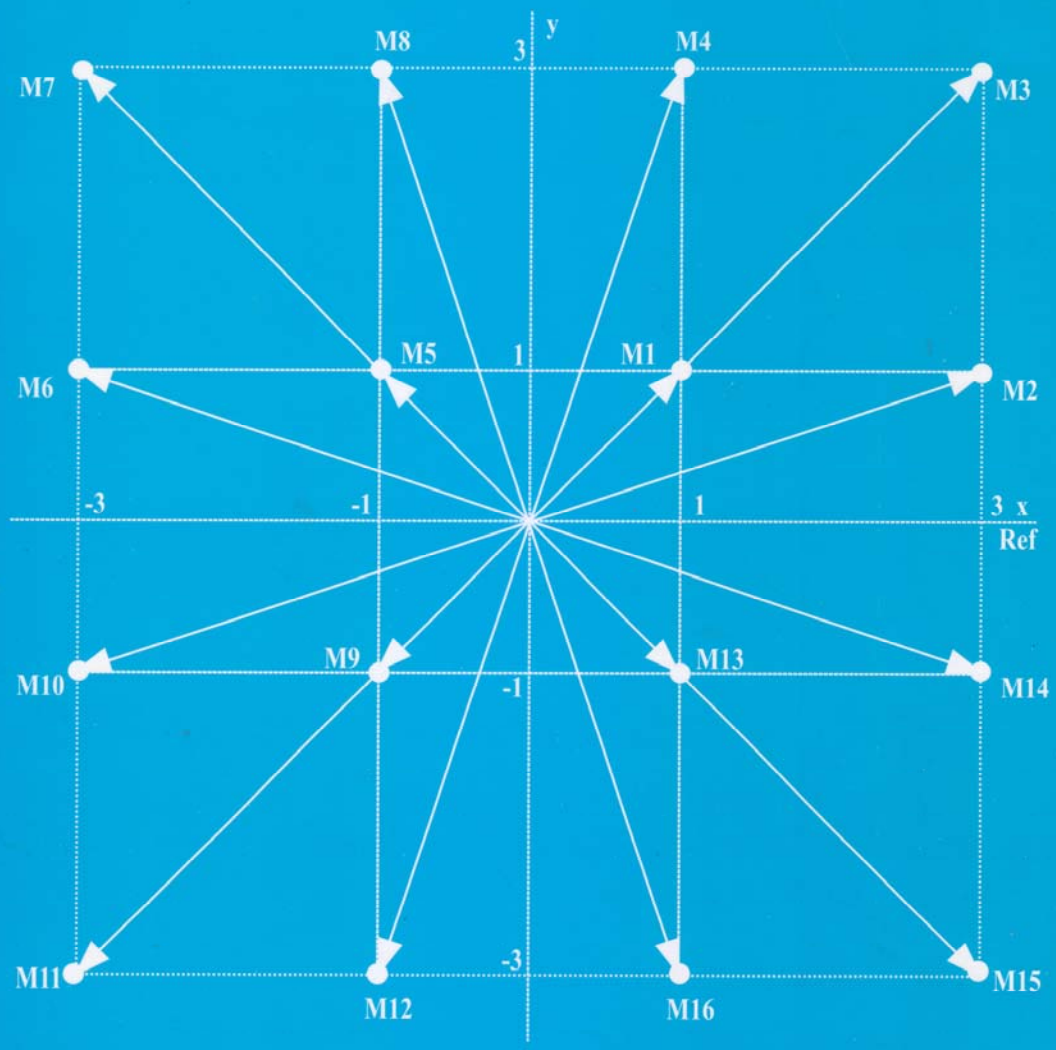


TRANSMISIÓN DE DATOS

José E. Briceño Márquez

Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería
Departamento de Publicaciones, Mérida.

TRANSMISIÓN DE DATOS

Tercera Edición
Edición Digital

José E. Briceño M., Dr. Ing.
Profesor Titular, ULA.

Mérida, Venezuela
Abril 2005

PUBLICACIONES DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

La primera edición de este libro fue recomendada para su edición y publicación por el Departamento de Electrónica y Comunicaciones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, en su reunión ordinaria realizada el 14 de Diciembre de 1989.

Prohibida la reproducción
total o parcial de este libro
sin previa autorización del autor

Edición: 1ª. 1991; 2ª. 2000; 3ª. 2003, Digital 2005
Código:

Impreso en Mérida, Venezuela
Taller de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, ULA

INDICE DE MATERIAS

PAGINA

PREFACIO xiii

PROLOGO xix

CAPITULO I 1

BASES PARA LA TRANSMISION DE DATOS 1

1.1. INTRODUCCION 1

1.2. VELOCIDADES DE TRANSMISION 1

1.3. EL CANAL DE VOZ 3

1.4. EL CANAL DIGITAL 5

Elementos Limitativos, 7

1.5. CLASIFICACION DE LOS CANALES TELEFONICOS 9

1.6. LA COMUNICACIÓN DIGITAL 14
1.6.1. Introducción, 14
1.6.2. Redes de Datos, 15
1.6.3. Interfaces, 16

1.7. TECNICAS DE CONMUTACION 16
1.7.1. Conmutación de Circuitos, 17
1.7.2. Conmutación de Mensajes, 18
1.7.3. Conmutación de Paquetes, 19

1.8. LA EVOLUCION DE LAS COMUNICACIONES DIGITALES 21
1.8.1. Introducción, 21
1.8.2. El Modelo de Referencia ISO/OSI, 22

1.9. RESUMEN 33

1.10. CUESTIONARIO 34

CAPITULO II 37

TECNICAS DE MODULACION 37

2.1. INTRODUCCION 37

2.2. MODULACION DE SEÑALES CONTINUAS 31
2.2.1. Introducción, 37
2.2.2. Modulación Lineal, 38
Modulación en Banda Lateral Doble (AM y DSB/SC), 38
Modulación en Banda Lateral Unica (SSB), 39
Modulación en Banda Lateral Residual (VSB), 40
Modulación Ortogonal o en Cuadratura (QAM), 40
2.2.3. Modulación Angular o Exponencial, 41
Modulación de Frecuencia (FM) y Modulación de Fase (PM), 41

2.3. MODULACION ANALOGICA DE IMPULSOS 42
2.3.1. Introducción, 42
2.3.2. Modulación de Amplitud de Impulsos (PAM), 43
2.3.3. Modulación de Duración o Anchura de Impulsos (PDM/PWM), 44
2.3.4. Modulación por Posición de Impulsos (PPM), 45

2.4. MODULACION DIGITAL DE IMPULSOS 47
2.4.1. Introducción, 47
2.4.2. Modulación de Impulsos Codificados (PCM), 47
Cuantificación y Codificación, 48
Demodulación de Señales PCM, 49

2.5. TECNICAS DE MODULACION DIGITAL CON PORTADORA MODULADA 51
2.5.1. Introducción, 51
2.5.2. Demodulación y Sincronización de Señales Binarias Moduladas, 52
Métodos de Demodulación, 52
Sincronización de Portadora y de Temporización, 53
2.5.3. Modulación Binaria de Amplitud (ASK), 55
Ancho de Banda y Relaciones S/N en Sistemas ASK, 56
Demodulación Coherente de Señales ASK, 59
Demodulación no Coherente de Señales ASK, 61
2.5.4. Modulación Binaria de Frecuencia (FSK), 63
Ancho de Banda y Relaciones S/N en Sistemas FSK, 64
Demodulación Coherente de Señales FSK, 67
Demodulación no Coherente de Señales FSK, 68
2.5.5. Modulación Binaria de Fase (PSK), 71
Demodulación de Señales PSK, 72
Modulación Binaria Diferencial de Fase (DPSK), 73
Ancho de Banda y Relaciones S/N en Sistemas PSK y DPSK, 76
2.5.6. Comparación entre los Sistemas de Modulación Binaria, 78

2.6. TECNICAS DE MODULACION DIGITAL M-aria 80
2.6.1. Introducción, 80
2.6.2. Modulación PSK M-aria, 81
2.6.3. Modulación DPSK M-aria, 85
2.6.4. Modulación FSK M-aria de Banda Ancha, 87

2.7. ASPECTROS PRACTICOS DE LA MODULACION DIGITAL 90
2.7.1. Introducción, 90
Control y Detección de Impulsos, 92
2.7.2. Codificación y Modulación Compuesta, 94
Codificación, 94
Modulación Compuesta, 96
2.7.3. Recomendaciones del UIT-T, 100

2.7. CODIGOS DE LINEA 101
2.7.1. Introducción, 101
2.7.2. Descripción de algunos Códigos de Línea, 103
Código AMI, 103
Código HDB3, 103
Código Manchester, 104
2.8. RESUMEN 105
2.9. CUESTIONARIO 106
CAPITULO III 111
CAPA FISICA. MODEMS E INTERFACES 111
3.1. INTRODUCCION 111
3.2. MODEMS UIT-T 112
3.2.1. Introducción, 112
3.2.2. Modems Asincrónicos, 114
Recomendación V.21, 115
Recomendación V.23, 116
3.2.3. Modems Sincrónicos, 117
Recomendaciones V.22 y V.22 bis, 117
Recomendaciones V.26, V.26 bis, V.26 ter, 117
Recomendaciones V.27, V.27 bis y V.27 ter, 118
Recomendación V.29, 118
Recomendaciones V.32, V.32 bis, V.32 ter, V.33, V.34 y V.90, 119
3.2.4. Modems de Banda Ancha, 120
3.2.5. Otros Tipos de Modem, 120
Eliminador de Modem, 120
Modems de Corta Distancia, 120
3.2.6. Modems Inteligentes, 121
Conjuntos de Comando, 121
Control de Error, 122
Compresión de Datos, 124
3.2.7. Resumen de Características para la Selección de Módems, 124
3.3. INTERFACES 126
3.3.1. Introducción, 126
3.3.2. Normas del UIT-T, EIA y IEEE, 127
UIT-T Serie V. Transmisión Serie sobre Redes Telefónicas, 127
UIT-T Serie X. Transmisión Serie sobre Redes de Datos Públicas, 128
Normas de la EIA y de la IEEE, 129
3.3.3. Descripción de las Interfaces, 130
3.3.4. Características Eléctricas de algunas Interfaces, 136
3.3.5. Características Mecánicas, 139
3.3.6. El Lazo de Corriente de 4-20 mA, 141

3.3.7. Señales de Temporización entre el ETD y el ETCD, 142
Temporización Asincrónica, 142
Temporización Isocrónica, 143
Temporización Sincrónica, 143
Temporización Plesiocrónica, 144
3.3.8. Control de Flujo CTS ON/OFF y XON/XOFF, 145
3.3.9. Protocolos de Capa Física, 145

3.4. RESUMEN 147

3.5. CUESTIONARIO 147

CAPITULO IV 149

CAPAS ENLACE Y RED. PROTOCOLOS DE COMUNICACION 149

4.1. INTRODUCCION 149
4.1.1. Códigos de Transmisión, 150
4.1.2. Modos de Operación Asincrónica y Sincrónica, 151
Operación Asincrónica, 151
Operación Sincrónica, 133
4.1.3. Operación Semidúplex, Fulldúplex y Simplex 155
4.1.4. Transmisión Serie y Paralelo, 156
4.1.5. Transmisión en Banda de Base y con Portadora Modulada, 157
4.1.6. Transmisión Punto a Punto y Multipunto, 158
4.1.7. Técnicas de Multiplexamiento, 159

4.2. PROTOCOLOS DE CONTROL A NIVEL DE ENLACE 161
4.2.1. Introducción, 161
4.2.2. Protocolos de Control por Caracteres, 162
Protocolo de Control BSC, 162
4.2.3. Protocolos XMODEM y YMODEM, 174
Protocolo XMODEM, 174
Protocolo YMODEM, 176
4.2.4. Protocolos de Control por Conteo de Octetos, 176
Protocolo DDCMP, 176
4.2.5. Protocolos de Control por Dígitos, 179
Protocolo SDLC, 180
Protocolo HDLC, 185

4.3. PROTOCOLOS DE CONTROL A NIVEL DE RED 191
4.3.1. Introducción, 191
4.3.2. Transmisión Digital por Conmutación de Paquetes, 192
Características de las Redes de Conmutación de Paquetes, 193
Servicios y Facilidades de la Red, 194
Recomendaciones del UIT-T, 196

4.4. LA RECOMENDACION X.25 197
4.4.1. Introducción, 197

4.4.2. Descripción de las Capas X.25, 198
4.4.3. Servicios de la Red X.25, 199
4.4.4. Formato de los Paquetes X.25, 202
4.4.5. Transferencia de Datos, 204
4.4.6. Control de Flujo y Recuperación de Errores, 206

4.5. LAS RECOMENDACIONES X.3, X.28 y X.29 208
4.5.1. Introducción, 208
4.5.2. La Recomendación X.3, 209
4.5.3. La Recomendación X.28, 209
4.5.4. La Recomendación X.29, 210

4.6. LA RECOMENDACIÓN X.75 210

4.7. EL SISTEMA PACKET RADIO 212
4.7.1. Definición, 212
4.7.2. Configuración del Sistema, 212

4.8. LOS PROTOCOLOS TCP/IP 214
4.8.1. Introducción, 214
4.8.2. Descripción General de los Protocolos TCP/IP, 215
El Protocolo TCP, 217
El Protocolo IP, 218

4.9. RESUMEN 219

4.10. CUESTIONARIO 220

CAPITULO V 223

COMUNICACIONES INDUSTRIALES 223

5.1. INTRODUCCION 223
5.1.1. Integración de la Red de Comunicaciones, 223
5.1.2. Definiciones, 226
5.1.3. Sistemas de Procesamiento y Control Industrial, 227
El Sistema SCADA, 227

5.2. SUBSISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL LOCAL 230
5.2.1. Esquema General, 230
5.2.2. Procesos Físicos, 231
5.2.3. Captura de Variables, 232
5.2.3. Acondicionamiento de las Señales, 235
5.2.4. Procesamiento y Control Local, 238
5.2.5. El Controlador Lógico Programable (PLC), 240
5.2.7. La Unidad Terminal Remota (RTU), 242

5.3. SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO Y CONTROL GLOBAL 247
5.3.1. Introducción, 247
5.3.2. Configuración, 248
5.3.3. La Unidad Terminal Maestra (MTU), 249

5.3.4. Computadores y Redes de Procesos, 250
5.3.5. Bases de Datos y Servidores, 251
5.3.6. Interfaces Hombre-Máquina, 252
5.3.7. Programas de Informática (Software), 252

5.4. PROTOCOLOS INDUSTRIALES 253
5.4.1. Introducción, 253
5.4.2. Protocolos ASCII, 255
5.4.3. Protocolo HART, 260
5.4.4. Protocolo Modbus, 266
5.4.5. Protocolo Bristol BSAP, 277
5.4.6. Protocolo Microbuffer, 287
5.4.7. Protocolo Conitel, 294
5.4.8. Protocolo DNP 3.0, 299
Otros Protocolos Industriales, 306

5.5. LA RED DE CAMPO (FIELDBUS) 307
5.5.1. Introducción, 307
5.5.2. Características Básicas de la Red de Campo Estándar, 310
5.5.3. Arquitectutra de la Red de Campo Estándar, 310
5.5.4. Ventajas de la Red de Campo Estándar, 312
5.5.5. Normalización de una Red de Campo, 313
La Red de Campo Fieldbus Foundation, 313
La Red de Campo Profibus, 316

5.6. RESUMEN 317

5.7. CUESTIONARIO 318

CAPITULO VI 323

REDES DE TRANSMISION DE DATOS 323

6.1. INTRODUCCION 323
6.1.1 Definición y Clasificación, 324
6.1.2. Principios de la Multicanalización, 324
Técnicas de Multicanalización, 324
Multicanalizacion de Canales Telefónicos, 324
Jerarquías en los Sistemas de Transmisión de Datos, 325
El Sistema Troncal T1, 326
El Sistema Troncal E1, 327
Leyes de la Compansión, 329
6.2. REDES DE GRAN AREA (WAN) 329
6.2.1. Introducción, 329
Características y Facilidades, 330
Medios y Velocidades de Transmisión, 330
6.2.2. La Red Digital de Servicios Integrados (ISDN), 333
Introducción, 333
Descripción de las Recomendaciones I, 333

6.2.3. El Sistema de Señalización Nº 7, 343
6.2.4. El Sistema Frame Relay, 344
Introducción, 344
Formatos y Configuración del Sistema Frame Relay, 345

6.3. REDES DE AREA LOCAL 348
6.3.1. Introducción, 348
6.3.2. Características Técnicas de las Redes de Area Local, 349
Topologías, 349
Métodos de Acceso al Medio, 351
Medios de Transmisión en Redes de Area Local, 358
6.3.3. Redes de Area Local no Estandarizadas, 361
6.3.4. Redes de Area Local Estandarizadas, 362
6.3.5. El Estándar LAN IEEE 802.3, 366
6.3.6. El Estándar LAN IEEE 802.4, 373
6.3.7. El Estándar LAN IEEE 802.5, 376

6.4. REDES DE AREA METROPOLITANA, 380
6.4.1. Definiciones, 380
6.4.2. El Estándar FDDI, 382
La Red FDDI-II, 387
6.4.3. El Estándar DQDB, 389

6.5. ESTANDARES, TECNOLOGIAS Y SERVICIOS DE ALTA VELOCIDAD 396
6.5.1. Introducción, 396
6.5.2. Los Estándares SONET/SDH, 397
6.5.3. El Modo de Transferencia Asincrónica (ATM), 400
6.5.4. El Servicio de Datos Conmutados Multimegabit (SMDS), 406

6.6. DISPOSITIVOS DE INTERCONEXION DE REDES 410
Repetidor, 410
Puentes (Bridges), 411
Enrutadores (Routers), 412
Pasarela (Gateway), 413

6.7. GESTION DE REDES 415
6.7.1. Introducción, 415
6.7.2. Gestión de Red OSI, 415

6.8. RESUMEN 418

6.9. CUESTIONARIO 419

CAPITULO VII 421

TECNICAS DE CONTROL DE ERROR 421

7.1. INTRODUCCIÓN 421

7.2. DETECCION Y CORRECCION DE ERROR 419
7.2.1. Rendimiento y Redundancia de un Código, 422

7.3. ESQUEMAS DE DETECCION Y/O CORRECCION DE ERROR 425
7.3.1. Repetición, 425
7.3.2. Códigos de Ponderación Constante, 425
7.3.3. Suma de Verificación, 426
7.3.4. Código de Prueba de Paridad Sencilla, 427
7.3.5. Código de Prueba de Paridad Vertical y Horizontal, 428
7.3.6. Códigos Matriciales (Array Codes), 428
7.3.7. Código de Hamming, 431
7.3.8. Códigos de Redundancia Cíclica (CRC), 434

7.4. PRINCIPIO DE LA ALEATORIZACION 440
7.4.1. Introducción, 440
7.4.2. Seudoaleatorizador Autosincronizante, 441

7.5. RESUMEN 444

7.6. CUESTIONARIO 445

CAPITULO VIII 447

FACTORES LIMITATIVOS EN LA TRANSMISION DE DATOS 447

8.1. INTRODUCCION 447

8.2. DISTORSION DE FASE 448
8.2.1. Introducción, 448
8.2.2. Definiciones, 449
8.2.3. Medición de la Distorsión de Retardo, 453
Medición del Desfase, 453
Empleo de Instrumentos de Medición, 453
Método del Diagrama de Ojo, 453
8.2.4. Interferencia Intersímbolo, 455
8.2.5. Compensación del Retardo, 456
8.2.6. Recomendaciones del UIT-T, 458

8.3. DISTORSION DE AMPLITUD O ATENUACION 459
8.3.1. Introducción, 459
8.3.2. Distorsión de Atenuación en Señales Digitales, 459
8.3.3. Recomendaciones del UIT-T, 460

8.4. OTROS FACTORES DE DETERIORO 461
Ruido Impulsivo, 461
Ruido Errático de Espectro Uniforme, 462
Ruido Sofométrico, 462
Picos de Ganancia, 462
Desplazamiento de Frecuencias, 463
Fluctuación de Fase (Jitter), 463

Picos de Fase (Phase Hits), 464
Ecos, 465
Fallas de Línea, 465

8.5. EVALUACION DE LA RED TELEFONICA CONMUTADA 466
8.5.1. Procedimientos de Medición, 466
8.5.2. Mediciones sobre la Red Conmutada Urbana, 467
8.5.3. La Recomendación V.53 para la Red Conmutada, 468

8.6. EVALUACION DE LA RED TELEFONICA DEDICADA 470
8.6.1. Introducción, 470
8.6.2. Recomendaciones del UIT-T para la Red Telefónica Dedicada, 471

8.7. NIVELES DE POTENCIA EN LA TRANSMISION DE DATOS 473
8.7.1. Introducción, 473
8.7.2. Niveles en Transmisión de Voz, 473
8.7.3. Niveles en Transmisión Digital, 475
8.7.4. Capacidad de Carga en Transmisión de Voz o Datos, 476
8.7.5. Capacidad de Carga en Transmisión Combinada de Voz y Datos, 479
8.7.6. Transmisión Combinada de Voz y Datos de diferentes Potencias, 487

8.8. NIVELES DE POTENCIA EN DECIBELES 488
8.8.1. Unidades de Potencia, 488
8.8.2. Niveles de Potencia Relativos y Absolutos, 489
8.8.3. Concepto de Punto de Referencia Cero y Nivel Relativo, 492
8.8.4. Medición del Ruido, 493

8.9. RESUMEN 494

8.10. CUESTIONARIO 495

CAPITULO IX 497

MEDIOS PARA LA TRANSMISION DE DATOS 497

9.1. INTRODUCCION 497
9.1.1. Clasificación, 497

9.2. EL PAR TRENZADO 499
9.2.1. Introducción, 499
9.2.2. Categorías del Par Trenzado, 500
9.2.3. Recomendaciones del UIT-T, 502

9.3. EL CABLE COAXIAL 502
9.3.1. Introducción, 502
9.3.2. Selección de Cables Coaxiales, 504
9.3.3. Cálculo de los Niveles de Potencia, 505

9.4. TRANSMISION DE SEÑALES DIGITALES SOBRE FIBRAS OPTICAS 511
9.4.1. Introducción, 511
9.4.2. Mecanismos de la Propagación de la Luz en Fibras Opticas, 512
9.4.3. El Canal Optico, 515
Modulación y Detección Electro-Optica, 516
9.4.4. Areas de Aplicación, 518

9.5. TRANSMISION DE SEÑALES DIGITALES POR MICROONDAS 519
9.5.1. Introducción, 519
9.5.2. Comportamiento de los Sistemas Digitales por Microondas, 520
9.5.3. Comparación Transmisión Digital TDM vs Transmisión Analógica FDM, 521
9.5.4. Características de la Trayectoria de Propagación, 522

9.6. CONFIGURACION TIPICA DE UN SISTEMA DIGITAL DE MICROONDAS 529
9.6.1. Tipos de Estación, 530
9.6.2. Conmutación de las Rutas de Reserva, 532

9.7. RESUMEN 534

9.8. CUESTIONARIO 535

APENDICE A 537

APENDICE B 540

BIBLIOGRAFIA 543

PREFACIO A LA TERCERA EDICION

La favorable acogida que han tenido las dos primeras ediciones de este libro entre los estudiantes de Ingeniería Eléctrica y profesionales en el campo práctico, me han incentivado para emprender la elaboración de una Tercera Edición aumentada y actualizada del libro "Transmisión de Datos". En la presente edición se han agregado nuevos temas y una gran cantidad de ejemplos de aplicación.

En los cursos y seminarios sobre la Transmisión de Datos que he tenido la oportunidad de dictar no solamente en el área de pregrado y postgrado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes, sino también para entidades tales como MARAVEN, LAGOVEN, SIDOR, CIED/PDVSA, HACER (ULA), Politécnico de Barquisimeto y la UPEL, he podido darme cuenta de la necesidad que se tiene de un libro escrito en español en donde se presenten los conocimientos básicos y las normas que regulan la transmisión de datos.

Como decíamos en el prefacio de la primera edición, nuestro objetivo no es la elaboración de un texto más que se sume al número cada día creciente de los excelentes que se han publicado y publican tanto en español como en otros idiomas, ni tampoco la presentación de los últimos desarrollos teóricos que cada día encontramos en el campo de la transmisión digital de información. Creemos que la lectura constante de las publicaciones de los organismos de normalización (UIT-T, UIT-R, ISO, ANSI, IEEE, EIA, ISA, IEC, etc.) y revistas especializadas, constituye el mejor medio del estudiante y del profesional para mantenerse informado de los aspectos relacionados con su especialidad. Sin embargo, en la mayor parte de las situaciones prácticas, el profesional en el campo no tiene acceso a todas estas fuentes de información y un libro, más bien un manual, que le ofrezca un primer contacto con esas materias le sería de mucha utilidad. Este libro está dirigido, entonces, no solamente a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica sino también a técnicos e ingenieros mecánicos, electricistas y de sistemas que en una forma u otra están relacionados con las telecomunicaciones y sistemas de automatización industrial.

Nuestro propósito es entonces más modesto pero, quizás, más urgente. El desarrollo explosivo experimentado en los últimos años en el procesamiento y transmisión de información en forma digital, ha creado la necesidad de proveer a los profesionales en el campo de un medio para ponerse al tanto de los procesos fundamentales de la transmisión digital de la información, comúnmente denominada Transmisión de Datos, en una forma asequible, sencilla y medianamente completa. Ese el objetivo de este libro.

En este libro no intentamos cubrir los aspectos avanzados de la Teoría de las Comunicaciones Digitales, ni tampoco la descripción de las capas o niveles superiores (4 al 7) del Modelo de Referencia de los Sistemas Abiertos Interconectados (ISO/OSI). Nos dedicaremos principalmente a la descripción y utilización de sistemas digitales dentro de las tres primeras capas (Física, Enlace y Red) de sistemas distribuidos moderada o débilmente acoplados, que son las características de los sistemas abiertos y las redes de comunicación. Pero, por otro lado, se le dará una gran importancia a los protocolos, normas y disposiciones que regulan el intercambio de información digital. A este efecto, se

describirán las principales recomendaciones y normas establecidas por organismos tales como el Sector de Normas de Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T), la EIA (Electronics Industries Association), IEEE, ANSI (American National Standards Institute) y otras que veremos posteriormente. Estas normas y recomendaciones regulan la interconexión y utilización de dispositivos físicos (hardware) y programas (software) para un efectivo, libre y global intercambio de información.

Vamos a describir brevemente el contenido de este libro. En el Capítulo I se dan las bases para la transmisión de datos. En primera instancia se describen las diversas velocidades de transmisión de información sobre el canal telefónico y de acuerdo con la velocidad se clasifican en bajas, medias y altas. El canal de voz se describe con base en el ancho de banda y la calidad de la transmisión, definida esta última en función de la inteligibilidad y la intensidad (energía de la voz). Para la transmisión de datos los canales telefónicos se clasifican de acuerdo con su ancho de banda y las velocidades de transmisión máximas permitidas. Se presenta, asimismo, la clasificación establecida por la Agencia Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos, así como algunas de las clasificaciones normalizadas por el UIT-T.

El aceleramiento y globalización del intercambio de información llevó a la creación de un modelo de referencia aplicable al proceso lógico de un sistema de comunicaciones. El resultado ha sido el Modelo de Referencia ISO/OSI para el empleo de procedimientos de intercambio de información entre redes del mismo tipo o tipos diferentes, de modo que la comunicación se establezca tan fácilmente por una combinación de redes como por una sola red. El Modelo de Referencia ISO/OSI se describe en este capítulo con un poco más de detalle estableciéndose sus objetivos y definiéndose tres de sus siete capas. Como la Transmisión de Datos tiene que ver con las tres primeras capas (Capa Física, Capa Enlace de Datos y Capa Red), se definen los objetivos, funciones y servicios de estas tres primeras capas. Los Capítulos III, IV, V y VI se dedican a la descripción y aplicaciones prácticas de las Capas Física, Enlace de Datos y Red.

Con el fin de darle un tratamiento más completo al tema de la Transmisión de Datos, en el Capítulo II se da un breve repaso de las técnicas de modulación de señales más utilizadas y algunos otros aspectos de tipo teórico-práctico. En general, se identifican dos tipos de modulación de señales de acuerdo con la clase de portadora: la "modulación de señales continuas" y la "modulación de impulsos". En la modulación de señales continuas se describen dos esquemas: la "modulación lineal", sobre la cual se basan los sistemas AM, DSB, SSB, VSB y QAM, y la "modulación angular", sobre la cual se basan los sistemas FM y PM. En la modulación de impulsos se describen dos formas: la "modulación analógica de impulsos", sobre la cual se basan los sistemas PAM, PDM(PWM) y PPM, y la "modulación de impulsos", una de cuyas realizaciones es la "modulación de impulsos codificados (PCM)", que es la modulación básica de la transmisión digital de señales.

De gran importancia para la transmisión de datos es la "modulación digital con portadora modulada", mediante la cual es posible la transmisión de datos a gran distancia y por cualquier medio físico. Se describen con algún detalle los esquemas básicos utilizados en la transmisión digital binaria: ASK, FSK, PSK y DPSK, y para complementar el

tratamiento, se describen algunos esquemas de modulación m-aria: PSK M-aria, DPSK M-aria y FSK M-aria de Banda Ancha. La transmisión de datos es bastante compleja y no basta generar una secuencia PCM y transmitirla; hay que conocer los canales de transmisión, sus características eléctricas, las formas de generación, sincronización y detección, etc., los diagramas de Fresnel y la necesidad de los códigos de línea. En las Secciones 2.7 y 2.8 introducimos estos aspectos.

En el Capítulo III se entra de lleno en la Capa Física, la cual se describe en relación con dos de los más importantes de sus elementos: los módems y las interfaces. En los Protocolos de Capa Física se describen las características mecánicas, eléctricas, funcionales y de procedimiento para activar, mantener y desactivar conexiones físicas entre entidades de la Capa Enlace. Todas estas características están normalizadas por el UIT-T y por la EIA de los Estados Unidos. El primer dispositivo de capa física visto es el módem, cuyas características y áreas de aplicación están especificadas por el UIT-T en las Recomendaciones de la Serie V. Se describen las características de los módems asincrónicos V.21 y V.23, y de los módems sincrónicos de las familias V.22, V.26, V.27, V.29, V.32, V.33, V.34 y V.90. También se describen las principales características de módems no normalizados pero que son de uso corriente, así como algunas de las técnicas y protocolos para el control de error y la compresión de datos.

La interconexión entre los dispositivos de capa física debe hacerse mediante las interfaces. Las principales interfaces utilizadas en los sistemas de transmisión de datos han sido normalizadas por el UIT- T y la EIA. en (a) la Serie UIT-T V: V.10, V.11, V.24, V.25, V.25bis, V.28 y V.35, (b) la Serie UIT-T X: X.20, X.20bis, X.21, X.21 bis, X.24 y X.25 y (c) en la EIA y la IEEE: las interfaces RS-232C (ANSI/EIA-232D), RS-423A, RS-422A, RS-449, RS-530, RS-485 e IEEE-488 (GPIB). Se presenta asimismo un conjunto de tablas de equivalencia entre las diferentes interfaces.

En el Capítulo IV se describen las funciones principales de las Capas Enlace de Datos y Red del Modelo de Referencia ISO/OSI, y algunos de los principales protocolos tanto de la Capa Enlace como de la Capa Red. Se revisan algunas características de la transmisión digital de señales como, por ejemplo, los códigos de transmisión, los modos de operación asincrónica y sincrónica, la transmisión semidúplex y fulldúplex, la transmisión en serie y en paralelo, en banda de base y con portadora modulada, punto a punto y multipunto, y se hace una breve introducción a los protocolos de comunicación, tanto de Capa Enlace como de Capa Red. Se establece asimismo la clasificación básica de los protocolos de Capa Enlace en Protocolos por Control de Caracteres (Character-Oriented Protocols), Protocolos de Control por Conteo de Octetos (Byte-Count Oriented Protocols) y Protocolos de Control por Dígitos (Bit-Oriented Protocols). Como ejemplo, se describen los Protocolos BSC, DDCMP, SDLC y HDLC.

Los Protocolos a nivel de Capa Red se estudian desde el punto de vista de la Transmisión Digital por Conmutación de Paquetes y la Recomendación X.25 del UIT-T. Se revisan las características más importantes de la Recomendación X.25 y aquellas otras recomendaciones que tienen relación con ella: la Triple X y la Recomendación X.75. Finalmente se presenta una breve descripción del Sistema Packet Radio AX.25 y los

Protocolos TCP/IP, de sus principales aplicaciones y de los formatos de la Capa TCP (Transporte ISO/OSI) y la Capa IP (Red ISO/OSI).

En el Capítulo V se describe la configuración general de un sistema de procesamiento y control como soporte de la automatización industrial de procesos. Se describe cada uno de los diferentes subsistemas, haciéndose énfasis en aquellos dispositivos necesarios para la adquisición, procesamiento y transmisión de los datos desde el campo hasta un centro de control y supervisión. Se estudian algunas de las características de las señales de campo y dispositivos y sistemas tales como los SCADA, los PLC, las RTU, los sensores y actuadores, así como los medios para el acondicionamiento y medición de las señales generadas en los procesos físicos.

Una parte importante del Capítulo V está dedicada a la descripción, desde el punto de vista del Modelo de Referencia ISO/OSI, de los protocolos industriales más utilizados en la industria venezolana: ASCII, HART, Modbus, BSAP, Microbuffer, Conitel y DNP 3.0. El enfoque seguido en la descripción de estos protocolos permite conocer las estrategias de control de cualquier tipo de protocolo, no solamente de tipo industrial sino también de otros protocolos de comunicaciones. Finalmente, se describen las Redes de Campo (Fieldbus), sus características y ventajas, y los esfuerzos de los organismos de normalización para establecer un patrón o estándar único para las comunicaciones industriales.

En el Capítulo VI se describen las características y principios de operación de las principales redes de transmisión de datos. Esta descripción se ha hecho desde el punto de vista del Modelo de Referencia ISO/OSI. Siguiendo la costumbre actual, las redes se clasifican de acuerdo con su extensión geográfica en (a) Redes de Gran Area (WAN), (b) Redes de Area Local (LAN) y (c) Redes de Area Metropolitana (MAN).

Se define lo que es una Red de Gran Area o WAN, sus características, facilidades, medios y velocidades de transmisión. Se describe también la aplicación de las líneas DDS, los multiplexores corrientes y los multiplexores estadísticos, así como los DSU y CSU, de gran aplicación en los enlaces troncales de una WAN. Como primer ejemplo de una WAN se describe con un poco de detalle la Red Digital de Servicios Integrados (ISDN), una red global de comunicaciones que permitirá la integración de servicios de comunicación diferentes (voz, texto, video y datos) en una sola red, sobre una sola línea, bajo el mismo número y a nivel mundial. En particular, se hace énfasis en la Serie I. 400, Interfaces Usuario-Red, en la cual se presentan los grupos funcionales, la Interfaz Básica y las Interfaces Primarias, y los correspondientes formatos y recomendaciones relativas a la Capa Física, Capa Enlace y Capa Red. Se describen también los diferentes Canales ISDN, sus estructuras y velocidades, y se hace una breve mención del Sistema de Señalización No. 7 del UIT-T y del Sistema Frame Relay.

En cuanto a las Redes de Area Local (LAN), se describen sus características principales, topologías, métodos de acceso al medio y los medios de transmisión. Se estudian con más atención las redes locales estandarizadas: el Estándar LAN IEEE 802.3 (ETHERNET), el Estándar LAN IEEE 802.4 (Token Bus) y el Estándar LAN IEEE 802.5 (Token Ring). Se describen sus arquitecturas, configuraciones físicas y algunas de sus

aplicaciones principales. Se define asimismo el concepto de Red de Area Metropolitana (MAN) y se dan sus características principales. Como ejemplo de MAN, se describen las características y arquitecturas de las redes FDDI, FDDI-II y DQDB. El capítulo finaliza con una breve descripción de los dispositivos de interconexión de redes (repetidores, puentes, enrutadores y pasarelas), así como las nuevas tendencias de alta velocidad (SONET/SDH, ATM y SMDS) y el concepto de Gestión de Red.

En el Capítulo VII se presenta en forma algorítmica algunos de los códigos más utilizados para la detección y/o corrección de errores mediante las dos técnicas de control de error comúnmente utilizadas: la "Corrección Directa de Error (Forward Error Correction, FEC)" y la "Solicitud de Repetición Automática (Automatic Repeat Request, ARQ)". La técnica FEC utiliza códigos para detectar y corregir los errores en el receptor; mientras que en la técnica ARQ los códigos solamente detectan la presencia de errores en los datos recibidos y se solicita en alguna forma la repetición de los bloques que vienen en error. Los esquemas para la detección y/o corrección que se describen en este capítulo son los siguientes: códigos de repetición, códigos de ponderación constante, suma de verificación, códigos de prueba de paridad sencilla, códigos de prueba de paridad vertical y horizontal, códigos matriciales, código de Hamming y los códigos de redundancia cíclica (CRC). Por ser el Código CRC muy utilizado en muchos de los protocolos de comunicación vistos, su descripción es más detallada, aunque no entramos en su justificación teórica. En este capítulo se introduce también la noción de "aleatorización" y sobre qué principios se basa, así como algunos tipos de aleatorizador utilizados en la práctica.

En el Capítulo VIII se describen los problemas que se presentan en la transmisión de datos y que son decisivos y limitativos en relación con la calidad de la señal y la máxima velocidad de transmisión permitida. Estos factores limitativos son, entre otros: Distorsión de Fase o de Retardo, Distorsión de Amplitud o Atenuación, Ruido Impulsivo, Ruido Errático de Espectro Uniforme, Ecos y Fluctuación de Fase. Se describe también un grupo de parámetros capaces de permitir una evaluación del comportamiento de los canales telefónicos para el servicio de transmisión de datos, tales como: Distorsión Telegráfica, Porcentaje de Dígitos y Bloques en Error, y Fallas de Línea. En particular, se citan muchas de las recomendaciones del UIT-T pertinentes.

Un aspecto de gran importancia en la transmisión de datos por canales telefónicos, es el cálculo de la potencia en un multicanal cuando se transmiten combinaciones de señales de voz y de datos. En el Capítulo VIII se presenta una serie de fórmulas y criterios con ejemplos de aplicación para la asignación de canales de voz y datos en un multicanal telefónico. También se definen las diferentes formas de expresar la potencia en decibeles y las recomendaciones del UIT-T pertinentes.

Actualmente se cuenta con toda una normativa para la selección y utilización del medio de transmisión más apropiado en una aplicación dada. En el Capítulo IX se cita parte de las normas emitidas por la Asociación de Industrias Electrónicas y la Asociación de Industrias de Telecomunicaciones (EIA/TIA 568A), a las cuales hay que agregar aquellas emitidas por el UIT-T. En este capítulo solamente se describe el par trenzado, el cable coaxial, las fibras ópticas y las microondas.

El par trenzado es uno de los medios más utilizados para la transmisión de señales tanto analógicas como digitales y su alcance puede llegar a 15 km. El par trenzado se encuentra especificado en la normativa de cableado EIA/TIA 568A, la cual establece un cable estándar de cuatro colores y contempla cinco categorías. El cable coaxial es uno de los medios de transmisión más versátiles. Se emplea en casi todas las gamas de frecuencia para la transmisión de señales tanto analógicas como digitales. En este capítulo se describen sus principales características y se dan algunos ejemplos de su aplicación. Se describen también las características de las fibras ópticas, sus mecanismos de propagación y la generación y detección de señales en sistemas de fibras ópticas. Se presenta una breve descripción del canal óptico y la modulación y detección electro-óptica, y algunas de sus ventajas y aplicaciones en la transmisión de información por las grandes troncales. En este capítulo se describe también el comportamiento de los sistemas digitales por microondas, las características de propagación y los parámetros principales en un radioenlace (pérdidas, ruido, umbral de recepción, el margen de desvanecimiento y la pérdida y ganancia neta de la trayectoria). Para complementar este tema, se muestra la configuración típica de un sistema digital por microondas; en particular, se describen los diferentes tipos de estación y los métodos usuales para la conmutación de las rutas de reserva en caso de falla en las rutas principales.

Como este libro es el resultado de mis actividades docentes, no solamente en la Universidad de Los Andes sino también en el ambiente industrial, en la selección, organización y presentación del material me ha sido de gran ayuda las inquietudes de los estudiantes de pregrado y postgrado de la Universidad de los Andes. Pero también ha sido inestimable la ayuda proporcionada por ese gran número de técnicos e ingenieros en la industria con quienes he departido y discutido largamente sobre diferentes aspectos de la transmisión digital de señales con énfasis especial en los sistemas de automatización de procesos. Como consecuencia, este libro está dirigido no tanto a estudiantes de pregrado de Ingeniería Eléctrica, sino a esos profesionales que cada día se enfrentan a las tareas de diseño, construcción, operación y mantenimiento de sistemas de transmisión digital y automatización industrial.

Quiero agradecer también la ayuda que me han proporcionado mis colegas, los profesores Néstor Angulo, Edgar Chacón y Ermanno Pietrosemoli, de la Universidad de Los Andes, quienes han leído capítulos del libro, han corregido algunas inexactitudes y con sus críticas constructivas y sugerencias han contribuido al mejoramiento de esta edición. Para ellos mis agradecimientos.

Finalmente, quiero dedicar este libro a Margot, mi esposa, por su infinita paciencia y comprensión, y a Mabel, Carolina y Maité, mis hijas, de quienes me siento profundamente orgulloso.

José E. Briceño E., Dr. Ing.
Profesor Titular, ULA.
<briceros@hotmail.com>
Mérida, Diciembre 2002.

CAPITULO I

BASES PARA LA TRANSMISION DE DATOS

1.1. INTRODUCCION

El desarrollo de las Telecomunicaciones comenzó en 1844, cuando Samuel Morse puso en marcha el primer sistema telegráfico confiable. Este sistema fue también el primer paso en la transmisión de datos, pues, como bien lo sabemos, los símbolos utilizados por Morse son de naturaleza digital (puntos y rayas). Tres décadas después, con Alejandro Graham Bell, comenzó la era de la transmisión analógica de señales de voz por medios telefónicos. El sistema telefónico casi suplantó al sistema telegráfico y el subsiguiente desarrollo de la tecnología, sobretodo en el dominio de la electrónica, benefició casi exclusivamente a los sistemas analógicos de transmisión de información.

Esta situación se prolongó durante casi un siglo y fue el creciente desarrollo de la tecnología de las computadoras y la necesidad, cada vez más apremiante, de interconectar sistemas de procesamiento digital de la información, lo que aceleró el desarrollo de las tecnologías de la transmisión de señales digitales.

Por su propia naturaleza, el procesamiento de datos implica la recolección y la transmisión de señales digitales desde puntos alejados hasta un procesador central. En los años 50 el único medio apropiado para la transmisión de datos era la red telefónica ordinaria y fue necesario entonces adaptar las señales digitales a ese medio de transporte. Las señales digitales debidamente codificadas (en PCM, por ejemplo) no podían transmitirse directamente por un canal telefónico y era necesario convertirlas en señales compatibles con ese medio de transmisión analógica. Por otro lado, los canales telefónicos son muy susceptibles al ruido y el receptor debe tener la capacidad para correlacionar las señales recibidas con los conjuntos finitos de valores digitales. Por lo general, si la relación S/N (Potencia de Señal/Potencia de Ruido) a la entrada del receptor es superior a cierto nivel de umbral, las señales digitales se pueden reproducir con un error muy pequeño.

1.2. VELOCIDADES DE TRANSMISION

Aunque las comunicaciones digitales comenzaron su gran desarrollo a partir de la década de los 50, mucha de la terminología y conocimientos básicos se han derivado del viejo arte de la telegrafía. Un resultado de esta situación ha sido la variedad de formas en las cuales se han definido las velocidades de transmisión y la consiguiente confusión que se ha creado. Un ejemplo muy común es la confusión entre el baudio, el bit y el bit por segundo (bps). El baudio es un parámetro de naturaleza eléctrica que representa la velocidad de modulación o velocidad básica de transmisión en impulsos por segundo; es una medida de la capacidad de un canal para transportar impulsos digitales y está muy relacionado con el ancho de banda del canal. Estrictamente hablando, el baudio es un enunciado de la velocidad de señalización e indica cuántos impulsos de portadora son apropiados para transmitir información por unidad de tiempo sobre un canal dado. Por otro lado, el bit es la unidad de información y es una medida de la cantidad de información contenida en un mensaje dado y que puede transmitirse mediante impulsos o en

cualquiera otra forma. El baudio no se refiere entonces a la cantidad o flujo de información; la cantidad de información que se puede "empacar" en cada baudio se representa por el número de bits por baudio, y la velocidad o flujo de la información se expresa en bits por segundo (bps).

La velocidad de modulación en un canal dado generalmente es fija, mientras que la velocidad de la información puede ser variable. En un sistema estrictamente binario sucede que cada impulso contiene un bit de información, de modo que en este caso la velocidad de la información, en bps, y la velocidad de modulación, en baudios, es la misma. Pero, en general, estos términos no son intercambiables, como es el caso de sistemas que operan a velocidades superiores a 1200 bps sobre un canal telefónico.

Hemos dicho que para los servicios de comunicación de datos se utilizan las redes telefónicas existentes que han sido proyectadas en un principio para la transmisión de señales a frecuencias vocales (300 a 3300 Hz). Si bien los canales telefónicos son adecuados para la transmisión de la voz, ellos pueden crear problemas cuando se utilizan directa e indiscriminadamente para la transmisión de señales digitales. En efecto, los canales de voz están expuestos a diversas perturbaciones propias del canal que alteran las señales de datos en el curso de la transmisión produciendo errores en el punto de destino de la información. Pero no solamente son las perturbaciones propias del canal las que interfieren en la recepción fiel de la información, pues se tiene el ruido eléctrico que se introduce en el sistema afectando la calidad de la señal. Para caracterizar esta situación, Shannon [Shannon, 1948] demostró que la capacidad de transmisión de un canal, en bps, venía dada mediante la expresión

$$C = B \log_2 (1 + \frac{S}{N}) \quad \text{bps} \qquad (1.1)$$

donde S es la potencia promedio de la señal, N la potencia promedio del ruido y B el ancho de banda del canal. Esta expresión, conocida como "Ecuación de Hartley-Shannon", permite determinar el flujo máximo de la información sobre un canal en términos de tres parámetros (S, N y B) conocidos o fácilmente cuantificables.

Por ejemplo, si en un canal telefónico se tiene una relación S/N de 30 dB y si el ancho de banda efectivo disponible es de 3 kHz, la capacidad del canal será del orden de los 30 kbps. Aparentemente ésta es una cifra excelente, pero en la práctica las velocidades de transmisión son menores.

BAJAS	MEDIAS	ALTAS
Hasta 600 bps	De 600 a 2400 bps	De 2400 a 14400 bps

Fig. 1.1. Velocidades de Transmisión sobre un canal de voz

En general, las velocidades de transmisión por los canales de voz se clasifican en tres categorías: bajas, medias y altas, tal como se muestra en la Fig. 1.1.

En vista de la gran diversidad de formas de transmisión digital por diferentes clases de circuitos, el mayor problema consiste en elegir el mejor método para cada uso en

particular. Se puede transmitir un elevado volumen de datos con una velocidad de 2400 bps o más por ejemplo, pero hay casos en que es preciso contar con un método eficiente de compensación o acondicionamiento para reducir al mínimo la probabilidad de error en la transmisión. Sólo en esta forma se puede alcanzar el alto grado de confiabilidad necesario.

La velocidad de transmisión es, pues, una característica que determina la capacidad de canales que puede aceptar un circuito. En los circuitos de banda a frecuencias vocales se puede transmitir hasta 14400 bps a 2400 baudios con métodos de modulación apropiados y mediante un acondicionamiento del canal. Velocidades de información superiores a los 14400 bps solamente se pueden alcanzar mediante control de error y compresión de datos. Al emplearse equipos de entrada con bajas velocidades, el canal se puede dividir en subcanales para la transmisión de datos a bajas velocidades.

Las normas relativas a los canales de transmisión de datos, es decir, todas las cuestiones que tienen que ver con la transmisión de datos que exijan un conocimiento de las redes de comunicación o que puedan tener influencia en esas redes, corresponden al ex-CCITT (Comité Consultivo Internacional de Telegrafía y Telefonía) ahora denominado Sector de Normas de Telecomunicaciones, Unión Internacional de Telecomunicaciones, distinguiéndose con las siglas UIT-T, que utilizaremos en lo sucesivo. Estas normas están contenidas principalmente en la serie G.700 a G.900 de las Recomendaciones del Volumen III y en las series V y X del Volumen VIII, del Libro Azul (1988). En particular, en esta edición estaremos utilizando la edición CD en español UITS002, Diciembre 2000.

En cuanto a las reglas de base para el empleo de sistemas de radio en general, y particularmente en sistemas digitales, el ente responsable es el ex-CCIR (Comité Consultivo Internacional de Radio) ahora denominado Sector de Normas en Radio, Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R). Son de especial importancia sus resoluciones y recomendaciones, pues en ellas están contenidas las normas más importantes para el diseño de sistemas de comunicación y, en especial, los sistemas de transmisión de datos.

1.3. EL CANAL DE VOZ

En su mayoría, los equipos de transmisión que se emplean en los modernos servicios de telecomunicaciones, aparte del telefónico, se proyectan para funcionar en la banda de frecuencias de uno o varios canales de voz o una fracción de canal.

El concepto de canal de voz puede ser diferente según la utilización que se le dé o según los requisitos que se le impongan. Sin embargo, pese a la gran variedad de usos y a la diversa calidad de los sistemas de transmisión necesarios, los canales de voz tienen un común denominador: todos se determinan primordialmente de acuerdo con las características de la voz y oído humanos.

La calidad de un canal telefónico se puede medir en función del grado de inteligibilidad y del nivel de intensidad con que se escuchan los sonidos que se transmiten por el canal. La energía de la voz, es decir, su intensidad, se concentra casi toda en la gama de frecuencias bajas, mientras que la inteligibilidad viene determinada por las componentes a frecuencias altas. Si no se transmitiera las frecuencias inferiores a 1 kHz, la inteligibilidad

en el extremo receptor sería del 86% pero la intensidad caería al 17%. Por otro lado, si sólo se transmitiera las frecuencias inferiores a 1 kHz, la inteligibilidad sería del 42% y la intensidad del 83%, como se puede apreciar en la Fig. 1.2.

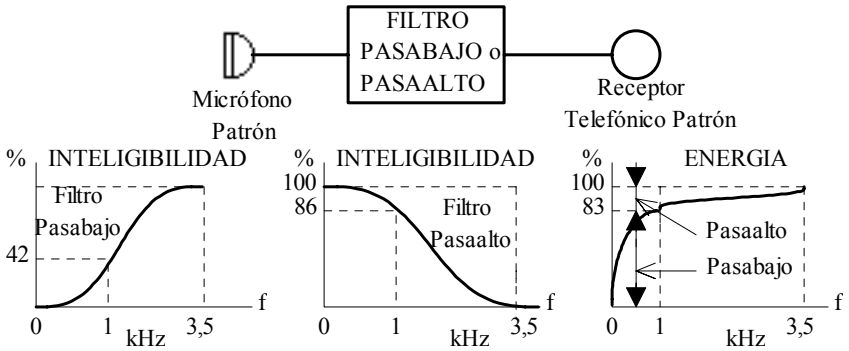


Fig. 1.2. Porcentajes de Inteligibilidad y Energía en Canales de Voz.

El canal de voz deberá entonces poseer componentes tanto de bajas como de altas frecuencias, y ha sido necesario llegar a un compromiso debido a la limitada disponibilidad de asignación de frecuencias; como resultado, se ha establecido un canal de aproximadamente 3 kHz de ancho. Por lo general, la banda de transmisión del canal de voz abarca aproximadamente de 300 a 3300 Hz.

Desde el punto de vista de la teoría de la información, una característica de extrema importancia de un lenguaje hablado o escrito es su redundancia. En efecto, se ha determinado que el contenido de información de una conversación normal posee un 75% de redundancia. Esto quiere decir, en términos generales, que si en el curso de una conversación telefónica se pierde una sílaba o aún una palabra, el oyente puede deducirla por el significado de la frase o del tema de conversación. En consecuencia, los requisitos de transmisión de voz son mucho menos estrictos que en otras formas de transmisión.

En la transmisión de datos el ancho de banda necesario del canal aumenta en relación directa con la velocidad de transmisión. Por ejemplo, el servicio telegráfico, que es relativamente lento, necesita un ancho de banda de 170 Hz para una velocidad de 100 palabras por minuto. En la transmisión de datos a alta velocidad puede ocuparse un ancho de banda equivalente a muchos canales de voz; de hecho, el canal para transmitir la voz digitalizada (a 64 kbps) es el canal de base de todos los sistemas digitales de alta velocidad modernos, como veremos más adelante. Cuando un sistema de transmisión digital funciona por un canal de voz, la información puede enviarse a una velocidad que puede llegar hasta los 14400 bps con una velocidad de modulación máxima de 2400 baudios. Con métodos de codificación y modulación más sofisticados y con técnicas de control de error y compresión de datos, se puede alcanzar velocidades muy superiores.

El canal de voz, sea para transmisión de datos o para conversaciones telefónicas, generalmente es perturbado por señales espurias que producen interferencias y degradan la calidad de la transmisión. Por ejemplo, el ruido de fondo (ruido blanco) produce la mayor

interferencia en la conversación llegando a hacerla casi ininteligible, pero no produce prácticamente perturbaciones o deterioros en la señal digital. En cambio, el ruido de impulsos o ruido impulsivo que consiste en repentinas tensiones interferentes o espigas ("spikes") de corta duración, puede llegar a adquirir una amplitud suficiente y producir errores aislados o ráfagas de errores en la señal digital. El ruido de fondo produce escasa interferencia en la transmisión de datos mientras no llegue hasta el umbral de detección de la señal. Por lo tanto, un alto ruido de fondo que puede perturbar la conversación producirá poco efecto en la transmisión de datos.

Por otro lado, las frecuencias que componen el espectro de la señal transmitida, sea analógica o digital, tienen una estrecha relación entre sí tanto en magnitud como en duración. Esto significa que todas las componentes de frecuencia dentro de la banda de paso deben experimentar la misma pérdida de amplitud si se desea evitar la "distorsión de atenuación" en la trayectoria de transmisión. También significa que todas las componentes de frecuencia dentro de la banda de paso deben propagarse en la trayectoria a una misma velocidad para evitar la "distorsión de retardo o de grupo", que es una alteración de la relación de fase entre las diferentes componentes frecuenciales de la señal.

La distorsión de atenuación y de retardo de fase o grupo, de gran importancia en los sistemas de transmisión de datos, las veremos con más detalle posteriormente junto con las recomendaciones de la UIT-T pertinentes.

1.4. EL CANAL DIGITAL

La comunicación digital es una expresión general que puede cubrir cualquier intercambio de información codificada. En un sentido más restringido puede definirse como la "transmisión de datos entre dos o más dispositivos terminales". Esta definición restringida hace aparecer el importante concepto de "interfaz" entre la fuente generadora de datos y el canal digital propiamente dicho.

Un sistema de comunicación digital se puede representar en la forma mostrada en la Fig. 1.3.

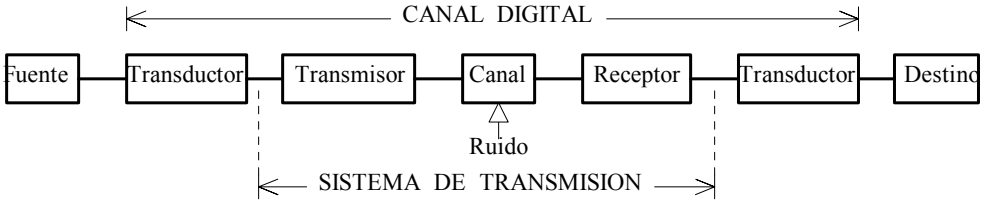


Fig. 1.3. Diagrama de Bloques de un Sistema de Comunicación Digital.

La fuente de información representa la entrada de datos a transmitir. Esta fuente puede ser una cinta magnética, una memoria de una computadora o simplemente una señal eléctrica proveniente de un proceso industrial. Puede ser también un operador frente a una consola.

El transductor convierte la información de la fuente en una señal eléctrica de naturaleza digital, le agrega cualquiera redundancia necesaria y la correspondiente información de control y supervisión. El transductor puede ser, por ejemplo, el digitalizador de una termocupla o un instrumento de medición, un lector de cintas, un teletipo, o un miembro cualquiera de la clase de dispositivos comúnmente denominados "terminales de datos".

El transmisor es la interfaz entre el transductor y el canal de transmisión. Su objetivo principal es el de transformar las señales digitales en formas compatibles con el canal de transmisión; por ejemplo, se puede utilizar diferentes técnicas de modulación mediante un dispositivo denominado "**MODEM** (**MO**dulador-**DEM**odulador)" que puede ser una unidad separada o formar parte del transmisor. Más adelante trataremos los módems con mayor atención.

El canal de transmisión puede ser un canal telefónico, conductores metálicos (par trenzado o coaxial), fibras ópticas, un canal de radio, rayos infrarrojos o cualquier otro medio de transmisión. A menudo en un sistema de comunicación dado se utiliza diferentes combinaciones de estos medios de transmisión. Sin considerar su forma física, el canal de transmisión es asimilable a un filtro pasabanda con ciertas características de fase y amplitud. El canal estará también sujeto a perturbaciones externas y puede no ser estable en términos de la amplitud, fase o frecuencia.

El receptor complementa al transmisor restaurando la señal recibida a su forma original y entregándola al transductor para su descodificación y utilización final en el extremo receptor de la información.

En general, el sistema de transmisión es un circuito complejo que comprende capacitancias en paralelo, inductancias en serie, transformadores de acoplamiento de impedancia, amplificadores, moduladores y demoduladores, y filtros pasabanda. En particular, la banda de base puede experimentar numerosas modulaciones y demodulaciones en su trayectoria entre terminales. Todos estos efectos tienen como consecuencia una limitación de la banda del espectro de las señales de datos y en particular en los canales telefónicos, pues estos canales han sido diseñados para la transmisión de voz y no en función de requerimientos específicos para la transmisión de datos.

En los años 70 comenzó la definición de sistemas de transmisión pura de datos, en los cuales los canales se diseñan especialmente para la transmisión de señales digitales. Sin embargo, debido a su gran cobertura geográfica, se continuará utilizando la infraestructura telefónica y el problema que se presenta es el de cómo hacerlo con el máximo rendimiento.

Las imperfecciones del canal telefónico tienen que ser tomadas en cuenta en el diseño de sistemas digitales. Especialmente, en lo que se refiere a la redundancia, se aplica el mismo alto grado de redundancia contenido en el lenguaje hablado. Un ejemplo es en la transmisión de facsímil y telefotografía en las cuales el "ruido" contribuye a una pérdida en la calidad tonal, disminución del contraste, ligeras imperfecciones en los bordes, etc., pero que son tolerables hasta un cierto grado; prueba de ello es que la transmisión en facsímil (FAX) por los canales telefónicos corrientes se hace a velocidades que no serían posibles para otro tipo de transmisión, como por ejemplo, para transacciones bancarias. Sin

embargo, en la transmisión de datos la información se genera con un mínimo de redundancia, de tal manera que es necesaria la recepción de todos y cada uno de los datos transmitidos para interpretar correctamente el mensaje recibido. En estos casos, el comportamiento del medio de transmisión es crucial en el diseño global del sistema; es necesario entonces conocer al máximo los parámetros que inciden en la degradación de la señal.

Elementos Limitativos

Los elementos limitativos que hay que tomar en cuenta en el diseño de un sistema de transmisión son, entre otros,

Atenuación

La atenuación en la intensidad de la señal es su decrecimiento a medida que se propaga desde la fuente hasta el extremo receptor. Es una función de la distancia, del contenido frecuencial de la señal y de los parámetros eléctricos distribuidos del medio de transmisión (resistencias, inductancias y capacitancias).

Ancho de Banda

Es la cantidad de Hertz en la banda útil de la señal y está basado sobre la velocidad de información a transmitir y en el método de codificación y modulación. El ancho de banda de la señal y el ancho de banda del canal son dos conceptos distintos. El ancho de banda útil del canal generalmente es fijo, es un parámetro físico. Sin embargo, debe verificarse, para una buena transmisión, que el ancho de banda útil del canal sea igual o mayor que el ancho de banda útil de la señal. El ancho de banda del canal influye enormemente en la velocidad máxima de transmisión y su insuficiencia es la causa de la interferencia intersímbolo, como veremos más adelante. En general, la velocidad de transmisión es proporcional al ancho de banda disponible del canal o medio de transmisión.

Ecos

Los ecos son producidos por reflexiones de la energía hacia la fuente. En transmisión de voz, es la repetición de sonidos producidos por corrientes que regresan por el circuito y que han sido reflejadas por obstáculos eléctricos, por ejemplo, por desacoplamiento de impedancias. En el caso de transmisión de datos, es el efecto de una onda reflejada a partir de una onda primaria, la cual llega a cualquier terminal del circuito con una amplitud y fase suficientes para ser confundida con una onda primaria. El eco, igual que en el caso de señales analógicas, se produce por desacoplamiento de impedancias en el trayecto recorrido por la señal. Los factores asociados al eco son de gran importancia; estos factores son la intensidad y el tiempo de retardo. En la conversación telefónica se permite como máximo un tiempo de retardo de 45 microsegundos. Para valores superiores es necesario incorporar canceladores o supresores de eco. En cuanto a la transmisión digital, el UIT-T ha normalizado todos los aspectos relacionados con el eco, como veremos más adelante.

Resonancias (“Singing”)

Este es un eco que es muy difícil de controlar y que ocurre generalmente a las frecuencias para las cuales el circuito o partes de él son resonantes.

Diafonía

Es el fenómeno mediante el cual una señal transmitida por un circuito o canal de transmisión es detectable en otro circuito o canal cercanos. Este fenómeno puede ser creado por el acoplamiento electrostático o electromagnético entre canales. La intermodulación en un amplificador no lineal utilizado en común por varios canales en un sistema a portadora es también una fuente de diafonía.

Ruido

Son señales espurias que pueden distorsionar y aún enmascarar la señal transmitida. Su origen puede ser interno al circuito o externo a él. En transmisión de datos es de especial importancia el ruido impulsivo, el cual generalmente es producido por tormentas eléctricas, motores eléctricos y por la apertura y cierre de contactos en los equipos de señalización y conmutación. Este tipo de ruido produce cadenas de errores en las secuencias digitales, denominadas comúnmente “ráfagas de errores”.

Distorsión

No existen trayectorias de transmisión que permitan la reproducción perfecta de las señales de entrada. Como en el caso del canal de voz, la máxima velocidad de transmisión está limitada no solamente por el ancho de banda del canal sino también por los siguientes parámetros que son de fundamental importancia:

La distorsión de atenuación

La distorsión de retardo de fase

La fluctuación de fase (“jitter”)

La distorsión no lineal

Esta última es producida por la presencia de elementos no lineales en el sistema (tubos electrónicos, transistores, transformadores, moduladores, etc.).

El gran incremento en la demanda de servicios confiables para la transmisión de datos tanto a cortas como a largas distancias, ha llevado a la necesidad de buscar métodos más refinados para la corrección de las deficiencias normales en la transmisión. De las características señaladas más arriba, las más importantes en la transmisión de datos son la distorsión y fluctuación de fase, la atenuación y el ruido impulsivo.

En la transmisión de voz el oído humano puede tolerar la distorsión de fase y una cantidad limitada de ruido impulsivo. Esto se debe a la capacidad de resolución del oído, lo cual le permite que las componentes de frecuencia diferentes sean registradas separadamente con una dependencia de fase bastante pequeña. Pero en la transmisión de datos se requiere un alto grado de linealidad fase-frecuencia.

Todos los factores limitativos que hemos señalado están especificados y regulados en las Recomendaciones del UIT-T, como veremos en el Capítulo VIII.

1.5. CLASIFICACION DE LOS CANALES TELEFONICOS

Actualmente un gran porcentaje de la transmisión de datos de transmite sobre las líneas troncales telefónicas. Las Empresas Telefónicas, sean del Estado o compañías privadas, han puesto a disposición de los usuarios, previo arrendamiento, un conjunto de canales con diferentes características de acuerdo con su utilización. Este arreglo, económicamente rentable para el usuario, le asegura una inmediata y continua disponibilidad y un comportamiento controlado.

Como los canales arrendados utilizan los mismos circuitos que las conexiones telefónicas ordinarias, ellos poseerán también en cierto grado los mismos problemas de distorsión de fase y amplitud, ecos, desplazamientos de frecuencia, etc. Sin embargo, con el fin de cumplir determinadas especificaciones para un tipo de transmisión dado, la empresa telefónica acondiciona ciertos circuitos que el usuario utilizará directamente sin necesidad de pasar por la red de conmutación. Estos circuitos se denominan comúnmente "línea privada, arrendada o dedicada", para diferenciarla de la "línea conmutada o de discado".

En general, y dependiendo del tipo de transmisión y su correspondiente acondicionamiento, la Agencia Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos, en el documento Tariff FCC No. 260, ha clasificado los canales telefónicos en once series, cada una dividida en tipos, de acuerdo con el ancho de banda y aplicación del canal. Vamos a describir someramente diez de las series y algunos de los tipos más utilizados.

SERIE 1000: Canales no acondicionados apropiados para transmisión telegráfica (marca-espacio) o para transmisión binaria de baja velocidad hasta 150 baudios. Estos canales pueden ser circuitos físicos o pueden ser derivados a partir de sistemas telegráficos a portadora. Los canales de esta serie no pueden llevar ningún tono de señal.

TIPO 1002: Para transmisión de señales a 55 baudios de teletipo o equivalente.

TIPO 1005: Idem para transmisión a 75 baudios.

TIPO 1006: Idem para transmisión a 150 baudios.

Estos canales son más baratos que los canales de voz, aunque no en proporción a la reducción en el ancho de banda. La transmisión se hace generalmente en semidúplex (transmisión unilateral alternada entre dos usuarios, HDX); para transmisión en fulldúplex (transmisión bilateral simultánea, FDX) es necesario un canal adicional de retorno, con el consiguiente aumento en el costo.

SERIE 2000: Canales para la transmisión de voz solamente. Es el canal telefónico típico.

SERIE 3000: Esta serie cubre los canales de voz que van a ser utilizados para transmisión de datos o para transmisión híbrida alterna voz/datos.

Estos son los canales arrendados más comunes para la transmisión de datos, pues acepta velocidades hasta 14400 bps. Pueden también subdividirse en subcanales, algunas veces denominados "de suprafonía", para la transmisión de señales telegráficas de baja velocidad.

TIPO 3001: Canales para telemetría, control supervisor y señalización miscelánea en la industria.

TIPO 3002: Canales para datos o voz/datos, con un ancho de banda aproximado de 300 a 3300 Hz. Los canales de la Serie 3000 son idénticos a los circuitos telefónicos ordinarios, con la diferencia que los canales de la Serie 3000 están permanentemente interconectados entre los extremos o terminales fijos del usuario. Son líneas dedicadas. Dentro del ancho de banda asignado y dentro de ciertos límites de potencia permitidos, el usuario puede utilizar estos canales a su conveniencia para transmisión digital a cualquiera velocidad, ya sea en serie o en paralelo, como se muestra en la Fig. 1.4.

Número de Canales	Velocidad bps	Acondicionamiento			
		C0	C1	C2	C4
24	75	17	19	22	24
12	150	8	9	11	12
6	300	3	4	5	6
L-Stack 17	134	11	13	15	17

Fig. 1.4. Capacidad del Canal 3002

Los canales semidúplex utilizan dos conductores, pero hay una diferencia entre estos canales y los canales telegráficos de la Serie 1000. En efecto, como el canal en sí mismo es un circuito simétrico, él podrá transmitir simultáneamente en forma bilateral pero estará limitado por el terminal de datos al cual sirve. Por ejemplo, los módems de baja velocidad que tienen diferentes frecuencias para transmitir y recibir, pueden operar en fulldúplex en un canal semidúplex. Pero para altas velocidades se requiere el ancho de banda completo del canal y la transmisión en fulldúplex es imposible. En este caso se utiliza canales en fulldúplex con cuatro conductores. Al canal 3002 se le denomina también Canal Tipo 5.

SERIE 4000: Estos son canales de voz para la transmisión de telefotografía o señales facsímil en aplicaciones especiales, por ejemplo, en los medios de comunicación y meteorología. En la transmisión de facsímil ordinaria (los FAX actuales) se puede utilizar el canal telefónico 2000.

SERIE 5000: Estos son los canales Telpack C y D (Telpack C y D son denominaciones registradas por la Bell para los sistemas de 60 y 240 canales, respectivamente). Dentro de los límites de la capacidad de la banda de base, los canales de la Serie 5000 pueden acomodar un cierto número de canales de banda ancha y/o un número proporcionalmente mayor de canales de voz. En

este último caso tienen las mismas aplicaciones y características de los canales de la Serie 3000.

TIPO 5700: Canales con un ancho de banda de 240 kHz equivalente a 60 canales de voz (Telpack C) o un supergrupo.

TIPO 5800: Canales con un ancho de banda de 1 MHz equivalente a 240 canales de voz (Telpack D) o a cuatro supergrupos.

Para la Serie 5000 se provee terminales de servicio para efectuar combinaciones siempre que se limiten al ancho de banda especificado (240 kHz o 1 MHz). En la Fig. 1.5 se muestra algunos de los tipos de la Serie 5000.

Cuando no se necesita el canal completo para la transmisión de datos, como en el caso de un canal tipo 5701, se puede utilizar el resto equipándolo para transmisión telefónica punto a punto. Los canales de banda ancha no pueden ser subdivididos por el usuario; sin embargo, el tipo 5302, que se considera equivalente al tipo 3002, puede ser subdividido en canales de datos de baja velocidad. El terminal de servicio del canal de banda ancha incluye al modem de banda ancha correspondiente.

TIPO	ANCHO DE BANDA	EQUIVALENCIA EN CANALES DE VOZ	APLICACIONES
5701	48 kHz	12 (1 grupo)	Señales analógicas desde 10 Hz hasta 20 kHz. Señales digitales a 40,8 kbps y 50 kbps
5703	15 kHz	6	Facsímil a dos niveles. Datos a 19,2 kbps.
5751	240 kHz	60 (1 supergrupo)	Señales analógicas desde 200 Hz hasta 100 kHz. Señales digitales a 230,4 kbps y 250 kbps.
5102	--	1/6	Telegrafía a 55 baudios
5105	--	1/6	Telegrafía a 75 baudios
5106	--	1/3	Telegrafía a 150 baudios
5302	3 kHz	1	Voz/Datos, equivalente al 3002

Fig. 1.5. Canales de la Serie 5000.

SERIE 6000: Canales para la distribución de programas de audio desde los estudios o estaciones que operan en AM, FM o TV.

SERIE 7000: Canales para la transmisión de video y televisión educativa (ETV).

SERIE 8000: Canales apropiados para velocidades de 56 kbps y 64 kbps, o para transmisión de un grupo de 12 canales de voz. Al igual que en la Serie 5000,

los terminales de servicio a menudo incluyen el módem de banda ancha correspondiente.

TIPO 8801: Canal con un ancho de banda desde aproximadamente 10 Hz hasta 20 kHz para transmisión de señales analógicas, y para transmisión de datos a 40,8 kbps o 50 kbps.

TIPO 8803: Canal para transmisión de facsímil de alta calidad en la gama de 29 kHz a 44 kHz, o para datos a 19,2 kbps.

Si la transmisión de datos de banda ancha no es requerida, los canales de la Serie 8000 se pueden subdividir en 12 canales de voz (un grupo). En este caso, cada canal es equivalente a un canal tipo 3002 y como tal puede ser subdividido en un número de canales para transmisión de datos a baja velocidad.

Los canales de la Serie 8000 ofrecen la particularidad, no encontrada en la Serie 5000, de permitir que algunos canales individuales puedan extenderse más allá del límite formado por el "paquete" de 12 canales. La única restricción es que por lo menos uno de los canales termine en los puntos que definen al canal de la Serie 8000. Los otros once canales se pueden distribuir en puntos más distantes.

SERIE 10000: Esta es una serie que permite la interconexión de sistemas de microondas privados.

SERIE 11000: Esta es una serie experimental para 12 ó 60 canales de voz o para transmisión de datos a 56 y 64 kbps. Esta serie difiere de la Serie 5000 en que el ancho de banda puede ser compartido entre varios usuarios a un costo proporcional. La Serie 11000 ha sido muy poco utilizada.

Como los canales de voz, ya sean del tipo 3002, 5302 u 8302, tienen un ancho nominal que se extiende en la gama de 300-3300 Hz, no hay seguridad de que ellos sean apropiados para la transmisión de datos a medias y altas velocidades. Cuando se necesita una alta confiabilidad en la transmisión, la compañía telefónica puede acondicionar dichos canales. El tipo de acondicionamiento lo veremos con más detalle posteriormente.

En cuanto al UIT-T, este organismo ha clasificado, en sus recomendaciones M.1020 (H.12), M.1025, M.1040, M.910 (H.14) y H.15, algunos canales básicos para la transmisión de datos: tres canales de banda angosta en la gama de frecuencias vocales y dos canales de banda ancha para transmisión a nivel de grupo y supergrupo, respectivamente.

Es importante señalar que el UIT-T no tiene recomendaciones para transmisión de datos sobre circuitos telefónicos de discado. Todas las normas del UIT-T están referidas a circuitos telefónicos arrendados dedicados exclusivamente a la transmisión de datos, si bien pueden utilizarse para transmisión de voz.

Recomendación M.1020 (H.12), M.1025 y M.1040

La Recomendación M.1020 trata de los circuitos arrendados con fines distintos a la telefonía, por ejemplo, para transmisión de datos, y especifica las características de esos circuitos de calidad especial. Si bien estos circuitos no se han previsto para telefonía, se admite que se utilizarán para comunicaciones telefónicas a efectos de coordinación del servicio, así como para los distintos tipos de transmisión a que se refiere el punto 2 de la Recomendación M.1030 (telefonía, telegrafía, transmisión de datos, facsímil, etc.). Los límites prescritos no tienen por objeto definir un circuito destinado a transmitir el tráfico telefónico normal, pero un circuito que cumpla estos límites será adecuado para la transmisión de comunicaciones telefónicas. Las condiciones impuestas en esta recomendación tienen como objetivo asegurar la obtención de circuitos capaces de satisfacer las exigencias de velocidades de transmisión de datos hasta 9600 bps sobre un canal de ancho de banda de aproximadamente 3 kHz. Aunque el UIT-T no lo expresa, se puede utilizar el canal M.1020 para transmisión de datos hasta 16,8 kbps .

La Recomendación M.1025 establece las características eléctricas de los circuitos telefónicos asignados para la transmisión de datos hasta velocidades de 2400 bps, mientras que la Recomendación M.1040 lo establece para velocidades hasta 1200 bps.

Recomendación M.910(H.14)

Para la transmisión de datos a velocidades de 48 kbps a 72 kbps, el UIT-T ha definido en esta recomendación un canal de banda ancha para enlaces en grupo primario en la banda de 60-108 kHz. Sin embargo, en el mercado hay módems de hasta 172 kbps que requieren este ancho de banda y que también pueden utilizar este canal.

Un enlace en grupo primario se compone de una o más secciones de grupo primario en tándem generalmente prolongados en cada extremo por “líneas locales”. El enlace completo puede utilizar como soporte la red urbana de cables telefónicos, líneas especiales por cable o radioenlaces de microondas. Cabe señalar que el enlace en grupo primario comprende todos los equipos de ecualización, filtrado, etc., que funcionan en la banda de 60-108 kHz, pero no los equipos terminales (ETCDs, Módems, etc.) que deben ser proporcionados por el usuario.

Para más detalles, ver la Rec. H.14, UIT-T, Tomo III, Libro Azul, 1988.

Recomendación H.15

En esta recomendación se trata de las características de los circuitos en grupo secundario o supergrupo para la transmisión de señales de espectro amplio en la gama de 312-552 kHz. Su constitución es similar a la del canal H.14, pero su utilización no se ha generalizado porque para esos volúmenes de información se prefiere utilizar las redes de datos públicas. Este es un circuito que ha permanecido en estudio en el UIT-T durante muchos años.

1.6. LA COMUNICACION DIGITAL

1.6.1. Introducción

Cualquier estudio o aplicación de los principios de la transmisión de datos es difícil sin una comprensión clara y precisa de los términos utilizados. En primer lugar vamos a definir lo que es la comunicación digital.

La Comunicación Digital es la estructura necesaria para transportar información codificada desde un punto a otro punto. Estos dos puntos pueden estar separados en el tiempo o en la distancia, y desde el punto de vista del usuario final de la información, la transmisión sin falla de la información tiene un valor agregado de gran importancia.

La Comunicación Digital comprende tres categorías funcionales: Transmisión, Conversión y Procesamiento, que describiremos brevemente a continuación.

Transmisión

La función de Transmisión proporciona la trayectoria sobre la cual fluye la información. Esta función incluye, si es necesario, operaciones de modulación y demodulación a efectos de compatibilidad dentro del sistema de portadora. La trayectoria de transmisión es como una tubería por la cual fluye la información y los procesos de modulación y demodulación no son sino medios para adaptar los mensajes portadores de información a las características de la trayectoria (tubería).

En este libro se le dará un énfasis particular a esta categoría funcional.

Conversión

La función de Conversión o los Medios de Conversión transforman las señales eléctricas utilizadas para transmitir información en formas que pueden ser usadas y reconocidas por los humanos o las máquinas. Como la información en forma de una señal eléctrica tiene poca utilidad para un usuario dado, es necesario convertir esas señales en, por ejemplo, palabras, párrafos o números sobre una hoja impresa, caracteres o figuras sobre una pantalla visual, perforaciones en una cinta, etc. Los medios de conversión son los encargados de efectuar estas transformaciones; en el extremo receptor se efectúa la operación recíproca.

Procesamiento

La función de Procesamiento garantiza el más eficiente, confiable y oportuno movimiento de la información. Esta función opera sobre la información misma o sobre caracteres de control que preceden, acompañan o siguen la información a fin de asignar la entrada, transmisión y entrega de esa información. Por ejemplo, la conversión de códigos es un ejemplo de procesamiento; un dispositivo que opera con el Código ASCII puede necesitar comunicarse con otro dispositivo que opera con el Código EBCDIC: la función de procesamiento convierte la información del Código ASCII al Código EBCDIC o viceversa. Por consiguiente, el procesamiento opera sobre la información pero no cambia su contenido inherente. Otro tipo de procedimiento es el “formateo” y la edición utilizados para asegurar que la información entrada por un operador está estructurada en forma apropiada y es exacta. El usuario puede también procesar el mensaje para asegurarse de que su contenido,

la información, no sea cambiado o para asegurar su privacidad. Este es el caso del procesamiento para la detección y/o corrección de errores y el cifrado (criptogramado) de la información.

Estas tres funciones de la Comunicación Digital no son consideradas independientemente por el usuario. La cuantía de utilización de cada una de estas funciones es un asunto que concierne a la optimización del sistema. Un ejemplo es la utilización, por parte del usuario, de técnicas de almacenamiento y multiplexaje, además de otros tipos de preprocesamiento, que permiten al usuario reducir su necesidad de capacidad de transmisión adicional; muchos sistemas actuales emplean estas técnicas.

1.6.2. Redes de Datos

A fin de alcanzar una transmisión de datos satisfactoria especialmente si varios terminales requieren acceso a un computador central, es necesario establecer una red de transmisión de datos. Como las facilidades de transmisión requeridas se pueden establecer mediante conexión conmutada o por interconexión directa, corrientemente se emplea el término "Red de Datos" para definir tanto la transmisión como la conmutación (si es necesaria) de la información digital. La red de datos puede ser privada, en el sentido de que ella es utilizada solamente por una sola entidad, o puede ser compartida por diferentes entidades en cuyo caso se conoce con el nombre de "Red Pública de Datos". El UIT-T define la Red Pública de Datos como "una red establecida y operada por una Administración o Agencia (estatal o privada) con el propósito específico de proveer servicios de transmisión de datos al público en general". Hay que recordar que el procesamiento puede tener lugar dentro de la Red de Datos, la cual puede también proveer servicios de conmutación de circuitos, conmutación por paquetes y arrendamiento de líneas de transmisión ya sea como un servicio separado o en forma integrada. Una Red de Datos puede incluir también facilidades para el manejo centralizado de información (banco de datos, facilidades de computación e impresión, etc.) y los medios de transmisión pueden ser analógicos, digitales o una combinación de ambos.

En la Fig. 1.6 se muestra la topología típica de una red de datos.

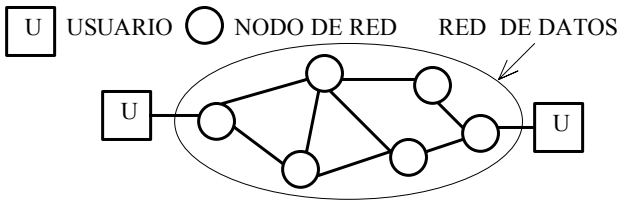


Fig. 1.6. Estructura típica de una Red de Datos

En general, una red de comunicaciones es un conjunto de nodos geográficamente dispersos conectados mediante enlaces de comunicación. El nodo de red es el subsistema de red que efectúa tareas de procesamiento, enrutamiento, multiplexamiento, conmutación y transmisión tanto a nivel local como a nivel de red. Es un subsistema con mucha inteligencia agregada que combina las funciones de un banco de canales, de un conmutador

digital de interconexión y de un multiplexor integral para voz, datos y video. En el Capítulo IV veremos esto con más detalle.

1.6.3. Interfaces

Para conectar los dispositivos de conversión y/o terminales a una Red de Datos hay que intercalar entre la red y el terminal lo que se conoce con el nombre de "Interfaz". Las interfaces están definidas por el UIT-T en términos de sus características eléctricas, físicas y de procedimiento, y la más conocida de ellas se sitúa entre el Equipo Terminal de Datos (ETD) y el Equipo de Terminación del Circuito de Datos (ETCD), conociéndose con el nombre de "Interfaz ETD/ETCD". En la Fig. 1.7 se muestra la forma conceptual de una interfaz digital. El ETCD puede ser un dispositivo independiente o puede ser parte de la red, como lo indica las líneas a trazos. En el Capítulo III describiremos algunas de estas interfaces.

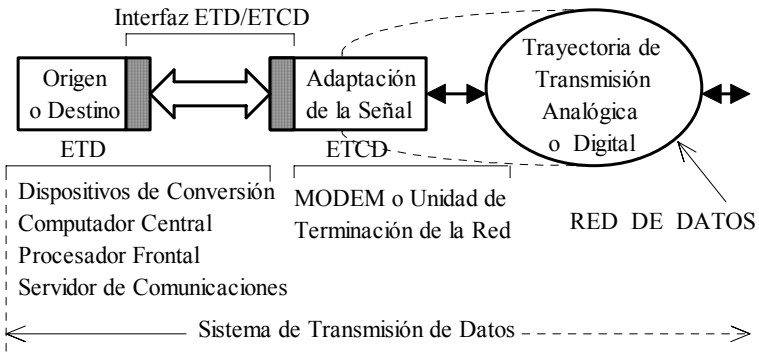


Fig. 1.7. Interfaz ETD/ETCD en un Sistema de Transmisión de Datos.

1.7. TECNICAS DE CONMUTACION

La Teoría General de la Conmutación es el estudio de las técnicas para el análisis de diferentes partes de un sistema en el cual las variables están restringidas a un número finito de valores. Estos sistemas incluyen computadoras digitales, sistemas de conmutación telefónica y de datos, sistemas de automatización de procesos y muchos otros sistemas de control. El enfoque teórico de la conmutación en un problema dado es diferente al enfoque en la ingeniería electrónica; en efecto, en la teoría de la conmutación los bloques funcionales básicos se dan por conocidos desde un principio y son, ellos mismos, subsistemas completos y complejos. El análisis de sistemas de conmutación no trata entonces con voltajes, corrientes, impedancias, funciones de transferencia o energía, sino con versiones idealizadas de los bloques básicos en los cuales las señales externas pueden ser analógicas o digitales (dígitos binarios). Por otro lado, la teoría de la conmutación es diferente de la teoría de los sistemas digitales en que ella consiste en un extenso y preciso conjunto de conceptos aplicables a la solución de ciertos problemas bien definidos y con un cierto grado de complejidad. El diseño de un sistema de comunicación es más una cuestión sistemática, algorítmica si se quiere, y concierne la especificación y ensamblaje de subsistemas. Por ejemplo, el ingeniero de telecomunicaciones no diseña los bloques

(receptores, transmisores, módems, etc.), sino que, de acuerdo con un plan de conjunto, interconecta los diferentes bloques para constituir un sistema global coherente.

En las redes de transmisión de datos, las técnicas de conmutación que nos interesan se refieren a las formas de establecimiento y mantenimiento de la conexión entre llamante y llamado para asegurar la transferencia de información. En este caso se puede distinguir tres tipos de conmutación: la conmutación de circuitos, la conmutación de mensajes y la conmutación de paquetes, los cuales describiremos a continuación.

1.7.1. Conmutación de Circuitos

La conmutación de circuitos está basada en los mismos principios empleados en los sistemas telefónicos y de telex. En la conmutación de circuitos una persona o terminal coloca en la red una llamada indicando el número o dirección del destinatario; el sistema de conmutación establece entonces una conexión física entre los nodos de red apropiados por todo el tiempo de duración de la llamada; la duración del establecimiento de la conexión dependerá del número de nodos y del tiempo de espera en cada nodo antes de que el nodo siguiente esté disponible. Una vez establecido el circuito o canal, éste es utilizado únicamente por las partes que se están comunicando, y aunque en el sistema pudiera ocurrir alguna modulación o algún multiplexamiento en el tiempo o en frecuencia, las partes en cuestión no se darán cuenta de ello. Las características más resaltantes de la conmutación de circuitos son su independencia de los protocolos de la red y el retardo constante en la propagación de la información en el circuito. La conexión y desconexión de los circuitos se controlan mediante sistemas de señalización establecidos por el UIT-T.

En la Fig. 1.8 se muestra el mecanismo de la conmutación de circuitos.

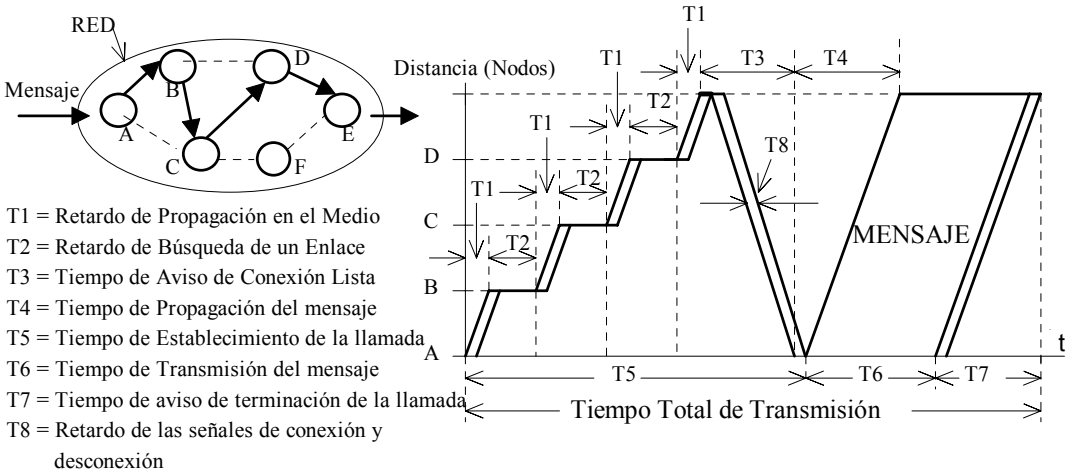


Fig. 1.8. Conmutación de Circuitos.

En la transmisión de un mensaje se pueden distinguir tres fases: (a) la fase de establecimiento de la llamada (T5), en la cual se establece un circuito físico entre el origen

y el destino, (b) la fase de transmisión del mensaje propiamente (T6), y (c) la fase de desconexión o terminación de la llamada (T7). Estas fases, con todos sus tiempos asociados, se muestra en la Fig. 1.12 en una comunicación entre un nodo A y un nodo E a través de una red mediante cuatro enlaces AB→BC→CD→DE.

Veamos el mecanismo de transmisión en la conmutación de circuitos, Fig. 1.8. El usuario llamante solicita una conexión, por ejemplo, mediante discado de un número. El equipo de conmutación transmite la petición desde el nodo A al nodo B completándose el primer enlace AB. En el nodo B hay un retardo de búsqueda del siguiente enlace apropiado, que en este caso es el enlace BC. La petición sigue en la misma forma por los diferentes enlaces hasta llegar al nodo E completándose el circuito físico A→B→C→D→E. En el nodo de destino E se tiene que confirmar la disposición para recibir el mensaje; esta confirmación regresa por el mismo circuito físico directamente sin retardos (excepto el de propagación) hasta el nodo A, indicando que se puede iniciar la fase de transmisión del mensaje. Una vez transmitido el mensaje, viene la fase de desconexión o terminación de la llamada. Como se muestra en la Fig. 1.8, el tiempo total de utilización del sistema es $T5 + T6 + T7$.

El tiempo de establecimiento de la conexión T5 puede ser muy alto. Por ejemplo, en la transmisión telefónica ordinaria puede ir de 5 a 25 segundos, según la distancia y condiciones de la red. El tiempo útil T6 de transmisión del mensaje puede ser menor que el tiempo de establecimiento T5 y de terminación de la llamada T7, condición que es onerosa para la red. Es por ello que en transmisión por conmutación de circuitos se cobra un tiempo mínimo de utilización del sistema, por ejemplo, tres minutos.

Además de las redes telefónicas y de telex, la conmutación de circuitos es utilizada en la Red Pública de Datos por Conmutación de Circuitos (Circuit-Switched Public Data Network). Esta red se utiliza para la transmisión de información que no tolera retardos en la transmisión como es el caso de la voz digitalizada y facsímil, y en general para la transmisión en tiempo real de grandes volúmenes de información entre computadoras remotas.

1.7.2. Conmutación de Mensajes

En la conmutación de mensajes, cada mensaje es enviado al primer centro o nodo de conmutación de la red donde es almacenado, generalmente en una memoria de disco. Si un enlace está disponible, se reenvía el mensaje a otro nodo de conmutación más cercano al destinatario en donde es de nuevo almacenado y luego retransmitido ("store and forward"); y así sucesivamente, de nodo a nodo, hasta que llega al destino. En este sistema no se establece una conexión física permanente entre llamante y llamado, y el retardo entre los instantes de envío y recibo puede ser considerable.

La conmutación de mensajes requiere entonces una red más "inteligente" con nodos capaces de leer las direcciones de los mensajes y con facilidades de almacenamiento de la información recibida hasta disponer de un enlace para la retransmisión hacia el siguiente nodo.

En la Fig. 1.9 se muestra el mecanismo de transmisión de un mensaje a través de cuatro enlaces (AB, BC, CD y DE) de una red de conmutación de mensajes.

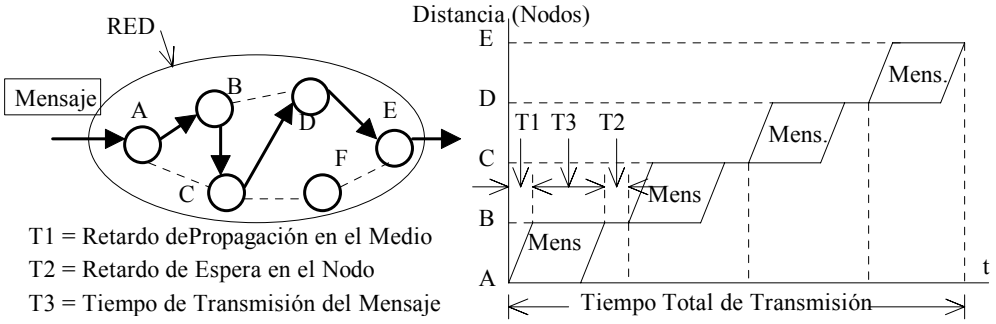


Fig. 1.9. Conmutación de Mensajes.

La conmutación de circuitos, sin embargo, tiene varias ventajas sobre la conmutación de mensajes. En primer lugar, es interactiva: si una persona hace una pregunta, la respuesta es inmediata y tendrá solamente un retardo que dependerá de la velocidad de propagación de la señal en el canal de transmisión. En segundo lugar, en transmisión de datos de baja velocidad se puede transmitir en fulldúplex. Por último, la velocidad del servicio es casi inmediata y la conexión con el destinatario se confirma y establece simplemente al responderse a la llamada. La conmutación de mensajes es, sin embargo, mucho más eficiente que la conmutación de circuitos, pues los enlaces entre nodos son más eficaces y el usuario no es penalizado al tasársele los "silencios" o pausas producidos por una utilización intermitente del canal. En efecto, un canal o enlace se ocupa para transportar un mensaje; al término de ese mensaje se envía otro mensaje (de los ya almacenados) sin ningún tiempo muerto entre mensaje y mensaje. La habilidad del sistema de conmutación de mensajes para almacenar mensajes durante las horas pico y transmitirlos después, aumenta considerablemente el rendimiento del canal: éste puede trabajar al máximo de su capacidad, lo que no sucede en los sistemas de conmutación de circuitos.

1.7.3. Conmutación de Paquetes

La conmutación de paquetes es, en esencia, similar a la conmutación de mensajes, pero ahora los mensajes se subdividen en "paquetes" más pequeños que se almacenan y retransmiten en cada nodo de red. En la transmisión de mensajes el retardo nodal (tiempo de espera en el nodo más el tiempo de propagación de nodo a nodo) es relativamente grande. Si los mensajes se dividen en paquetes de menor duración, ya no se necesita memorias de disco sino memorias electrónicas ("buffers") y el tiempo de propagación es menor también; por lo tanto, el retardo nodal se reduce apreciablemente, aunque a cada paquete haya que agregársele el número del paquete y las direcciones de fuente y destino. Dependiendo de la red, todos los paquetes de un mismo mensaje pueden seguir la misma ruta o ellos pueden ser enrutados independientemente, es decir, dos paquetes diferentes de un mismo mensaje pueden tomar rutas diferentes hasta llegar al destino.

En la Fig. 1.10 se muestra el mecanismo de la transmisión por paquetes.

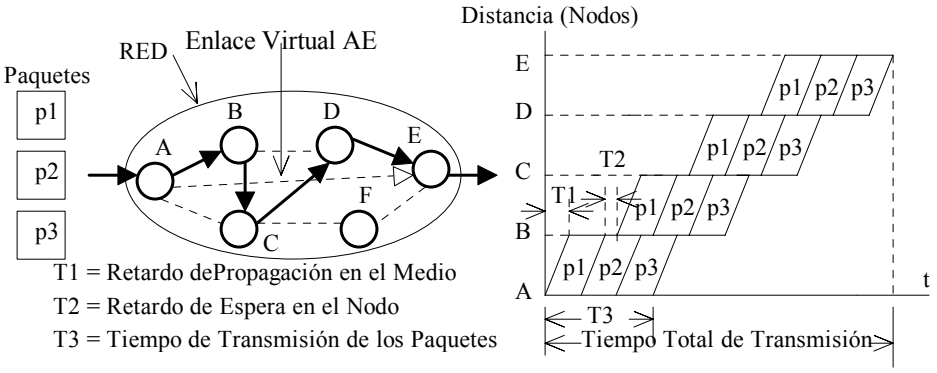


Fig. 1.10. Conmutación de Paquetes.

En la transmisión por paquetes se produce lo que comúnmente se denomina como "efecto tubería (pipeline effect)", pues el mensaje completo nunca se almacena en los nodos, solamente los paquetes que se reciben y se retransmiten uno tras otro de inmediato. Sin embargo, el usuario llamante cree que dispone del canal para él solo cuando en realidad lo está compartiendo con otros usuarios; de aquí las denominaciones de "circuito virtual" o "llamada virtual" con que se conoce esta forma de conexión.

En la transmisión por paquetes, para el enrutamiento de los paquetes a lo largo de los diferentes nodos de la red, se le agrega a cada paquete las direcciones de origen y destino, y en cada nodo se determina cuál es la mejor trayectoria a seguir para alcanzar el destino. En general, cada paquete va numerado en forma secuencial; pero existe un otro tipo de paquete individual que no va numerado. En este caso se dice que el paquete que va numerado es un "paquete con conexión" que requiere aviso de recepción, mientras que el paquete que no va numerado es un "paquete sin conexión" que no requiere aviso de recepción. Este último paquete se denomina "datograma (datagram)". En el Capítulo IV veremos estos aspectos con más detalle.

Debido a que los paquetes de un mismo mensaje pueden transitar por diferentes rutas, es posible que en el lugar de destino los paquetes no lleguen en el mismo orden en que fueron enviados. En este caso, en el nodo de destino los paquetes se reensamblan en el orden correcto para ser entregados al destinatario.

En el Capítulo IV se describe con más detalle la Red X.25 de Conmutación por Paquetes.

En la Fig. 1.10 el mensaje se ha dividido en tres paquetes p1, p2 y p3 que, para simplificar la figura, siguen la misma ruta. Como los paquetes son más pequeños, el retardo de espera es menor aunque el tiempo de transmisión de los tres paquetes es casi igual al de un mensaje. Nótese que la misma cantidad de información transmitida se transfiere en menor tiempo en el sistema de conmutación de paquetes. El sistema de conmutación de paquetes es entonces mucho más eficiente y es el utilizado en casi todas las redes de

transmisión de datos, que en este caso se denominan Redes Públicas de Datos por Conmutación de Paquetes.

Nótese, en la Fig. 1.10, el "efecto tubería"; por ejemplo, en un momento dado en el enlace AB habrá más de un paquete en tránsito, uno detrás de otro; la cantidad de paquetes en tránsito en un enlace dado dependerá de la longitud del enlace y del tamaño de los paquetes. La utilización simultánea de los circuitos de comunicación mejora notablemente el rendimiento del sistema y el tiempo total de transmisión en la conmutación por paquetes es considerablemente menor que en la conmutación de mensajes, a pesar de que a cada paquete se le ha agregado un número de secuencia y las direcciones de origen y destino. Asimismo, en el "enlace virtual" AE, el lector puede imaginarse la cantidad de paquetes en tránsito, no solamente de nuestro usuario, sino de todos los usuarios que están transmitiendo en la red. Esta situación se puede cuantificar y optimizar, pero está fuera de los objetivos de este libro.

1.8. LA EVOLUCION DE LAS COMUNICACIONES DIGITALES

1.8.1. Introducción

Ha transcurrido casi cuatro décadas desde que los primeros sistemas comerciales de procesamiento de datos fueron establecidos tanto en los Estados Unidos como en Inglaterra. En particular, en Inglaterra se utilizó las facilidades de transmisión de la Administración Postal. En ese entonces no se utilizaba módems pues la transmisión se efectuaba en banda de base sobre líneas telegráficas a velocidades de 110 bps. Para 1964 los sistemas de procesamiento requerían ya operar "en línea" (la operación en línea es la interconexión e intercambio de datos entre terminales y un computador central, por ejemplo) y mediante la utilización de módems de banda angosta fue posible emplear la infraestructura telefónica. Las velocidades de información aumentaron gradualmente permitiendo la creación de redes multipunto, aunque se seguía utilizando los canales telefónicos con la ayuda de módems de velocidades más altas.

Para 1970 el concepto de "operación en línea" ya estaba bien establecido y muchas compañías comerciales ofrecían servicios de computación, procesamiento y almacenamiento de datos. En muchos casos se utilizaba la red conmutada telefónica, lo cual restringía las velocidades de transmisión hasta un máximo de 300 bps. Actualmente, gracias a los continuos progresos en las áreas de la informática y de la electrónica digital, la red telefónica puede soportar hasta 56 kbps a 2400 baudios mediante un acondicionamiento apropiado de la señal y de los canales.

Como la red telefónica fue diseñada fundamentalmente para la transmisión de voz, fue necesario desarrollar redes especializadas dedicadas a la transmisión pura de datos. Al principio las redes fueron diseñadas para ajustarse a los requerimientos de una sola aplicación o servicio (caso del sistema de reservación de pasajes, por ejemplo); pero con las nuevas Redes Públicas de Datos se ofrece una gran cantidad de servicios de procesamiento y transmisión de voz, datos e imágenes. La tendencia actual se centra en el desarrollo de una red global de comunicaciones denominada "Red Digital de Servicios Integrados (Integrated Services Data Network, ISDN)" que pondrá al alcance a nivel doméstico en

cualquier sitio y cualquier momento facilidades de comunicación de voz, datos y video con cualquiera parte del mundo.

1.8.2. El Modelo de Referencia ISO/OSI

Introducción

El desarrollo cada vez creciente de equipos y programas para las comunicaciones digitales ha llevado a la creación de un modelo de referencia aplicable al proceso lógico de un sistema de comunicaciones. Los sistemas de comunicaciones que emplean los procedimientos y métodos de comunicación normalizados se denominan "Sistemas Abiertos" y dicha interconexión se denomina "Interconexión de Sistemas Abiertos ("Open Systems Interconnection, OSI). Este modelo concuerda con los principios establecidos por la Organización Internacional de Normas ("International Standards Organization, ISO) para la interconexión de sistemas abiertos.

Sistema Abierto

En este contexto, un sistema real abierto es un conjunto de uno o varios computadores, el material lógico asociado ("software"), periféricos, terminales, operadores humanos, procesos físicos, medios de transferencia de información, etc., que forman un todo autónomo capaz de efectuar procesamiento y/o transferencia de información y que cumple con las normas de interconexión ISO.

Objetivos y Campo de Aplicación del Modelo

La definición de un Modelo no supone o implica alguna realización o tecnología de red particular, sino que se refiere al empleo de procedimientos de intercambio de información normalizados, derivados según las disposiciones especificadas en la Recomendación UIT-T X.200.

El Modelo de Referencia tiene como objetivos

1. Especificar una estructura lógica universalmente aplicable que abarque las necesidades de las aplicaciones del UIT-T
2. Servir de referencia durante el desarrollo de nuevos servicios de telecomunicación, incluidos los posibles servicios recomendados por el UIT-T, y la definición de los procedimientos correspondientes
3. Permitir que diferentes usuarios se comuniquen entre sí, solicitando una reutilización compatible de las características de comunicación
4. Hacer posible una evolución de las aplicaciones del UIT-T asegurando una flexibilidad suficiente para que puedan incorporarse los adelantos de la tecnología y las crecientes necesidades de los usuarios
5. Permitir la comparación de las nuevas necesidades de usuario propuestas con los servicios de usuario existentes, lo que hará posible satisfacer las nueva necesidades de una manera compatible con los servicios existentes recomendados por el UIT-T

El Modelo de Referencia se empleará en el desarrollo de protocolos de interconexión para servicios de comunicación incluidos todos los posibles servicios recomendados por el UIT-T.

Descripción del Modelo ISO/OSI

En su Recomendación X.200, el UIT-T presenta la finalidad, el marco y la función de la estructura de un modelo de referencia denominado "**Modelo de Referencia ISO/OSI**" aplicable al proceso lógico de un sistema de comunicaciones. Este modelo permitirá que se definan métodos de interfuncionamiento entre diferentes redes del mismo tipo o de tipos diferentes, de modo que la comunicación se establezca tan fácilmente por una combinación de redes como por una sola red. En la Fig. 1.11 se muestra el Modelo de Referencia ISO/OSI con un nodo intermedio y en el caso de transmisión por paquetes, como veremos posteriormente con más detalle.

La técnica básica de estructuración del Modelo ISO/OSI es la estratificación. Con arreglo a esta técnica, se considera que cada sistema abierto está compuesto lógicamente por un conjunto ordenado de subsistemas, que por razones de conveniencia se representan en forma vertical, como se muestra en la Fig. 1.11. Los subsistemas adyacentes se comunican a través de su frontera común. Los subsistemas de un mismo rango N forman colectivamente la capa N del Modelo ISO/OSI. Un subsistema N consta de una o varias entidades N en la correspondiente capa N (una entidad N es un elemento activo de un subsistema N, por ejemplo, un convertidor de protocolo). Las entidades de una misma capa, pero en diferentes sistemas, que deben intercambiar información para alcanzar algún objetivo común, se denominan "entidades pares" y entidades de capas adyacentes interactúan a través de su frontera común. Por ejemplo, los servicios que provee la Capa Enlace de Datos a la Capa Red son la combinación de los servicios de ella misma más los de la Capa Física. En general, cada capa N proporciona servicios N a las entidades N+1 de la capa N+1. Se supone que la capa más alta representa todas las utilizaciones posibles de los servicios que proporcionan las capas más bajas.

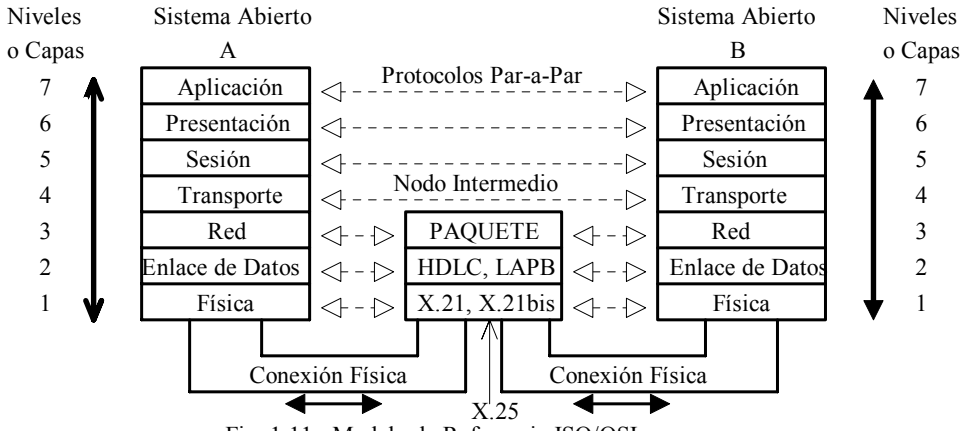


Fig. 1.11. Modelo de Referencia ISO/OSI.

La capa de mayor nivel sólo asegura servicios a los procesos de aplicación escritos por el usuario final. En este contexto el término "aplicación" se refiere al conjunto completo de procesos involucrados en un cierto servicio de usuario, por ejemplo, el correo electrónico. La forma de prestación de un servicio por dos entidades situadas, por lo general, en máquinas diferentes, debe estar bien definida y reglamentada de antemano para que puedan interactuar las entidades involucradas en la prestación del servicio. La manera como las dos entidades cooperan para prestar el servicio se denomina "Protocolo". Cada protocolo está concebido para prestar un servicio único y bien definido, y el conjunto de capas en las cuales se descompone el sistema es el mismo en cada máquina y cada capa presta el mismo servicio a la capa inmediata superior. La capa de más bajo nivel, la Capa Física, es la que está conectada directamente al medio físico de transmisión.

No todas las entidades pares N necesitan, o incluso pueden comunicarse. Puede existir condiciones que impidan esta comunicación, como el hecho de que no se encuentren en sistemas abiertos interconectados, o cuando ellas no contienen los mismos protocolos par-a-par.

Comunicación Par - a - Par

La manera mediante la cual tiene lugar la comunicación en la arquitectura OSI se muestra en la Fig. 1.12.

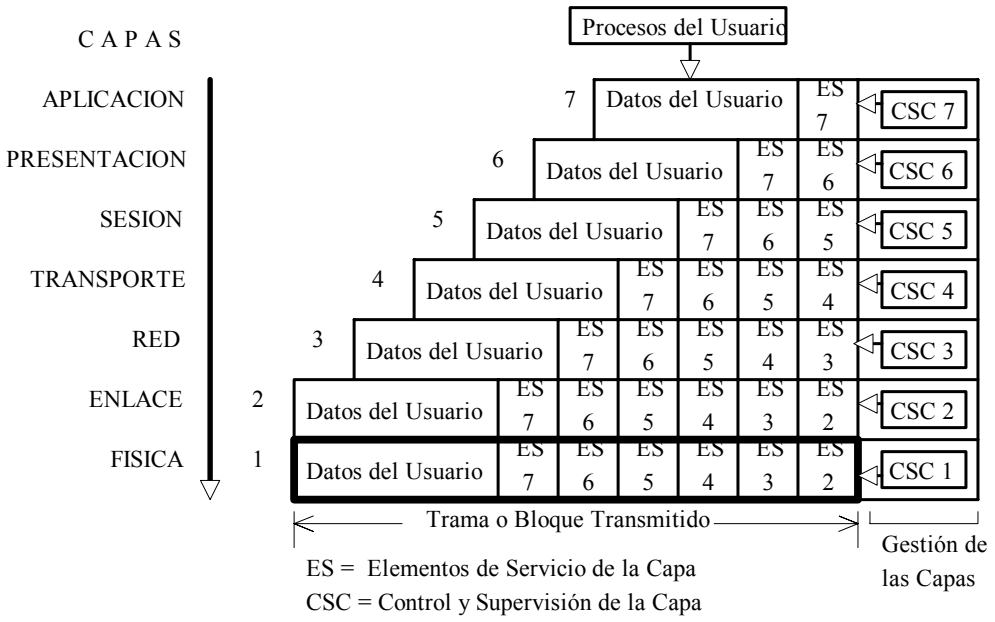


Fig. 1.12. Construcción de la Trama en la Arquitectura OSI.

La elaboración de la trama a transmitir es un proceso de "encapsulamiento", en el cual cada capa, excepto la Capa Física, agrega uno o más campos a la información que viene de las capas superiores. Cada capa considera a los bloques que vienen desde arriba simplemente como "datos o información" sin preocuparse acerca de su semántica y sintaxis. La trama final se transmite y en el extremo receptor en cada una de las capas se

toma la acción especificada en los correspondientes elementos de servicio y transfiere hacia arriba lo que considera como "datos o información". La configuración de la trama en cualquiera de las capas dependerá del tipo de protocolo par-a-par utilizado. En efecto, cada protocolo par-a-par define mensajes de control y supervisión, por ejemplo, para establecer conexiones en esa capa, para control de flujo, control de error, etc. que son interpretados en la capa par correspondiente. Nótese que el tamaño de los paquetes va creciendo, a medida que se baja de nivel, con la información agregada por cada capa para controlar el intercambio de información.

Como ejemplo de un protocolo par-a-par, en la Fig. 1.13 se muestra el conocido protocolo de comunicación de Capa Enlace denominado Protocolo HDLC ("High-Level Data Link Control") utilizado en muchos sistemas de comunicación y sistemas de automatización industrial. En cada capa los elementos de servicios se agrupan en un solo bloque denominado Unidad de Servicios de Datos (SDU). En el protocolo HDLC, Fig. 1.13, el SDU o Elementos de Servicio E2 agregados en la Capa Enlace son: Banderas, Dirección, Control y CRC. Una descripción de este protocolo la veremos en detalle posteriormente.

Fig. 1.13. Configuración del Protocolo de Capa Enlace HDLC.

Las siete capas del modelo tienen funciones específicas dentro de la lógica de un proceso de comunicación entre dos usuarios, Figs. 1.14 y 1.15. De acuerdo con estas funciones, las Capas Física, Enlace y Red son las que intervienen directamente en la transmisión de la información; por esta razón se dice que ellas desempeñan funciones de red.

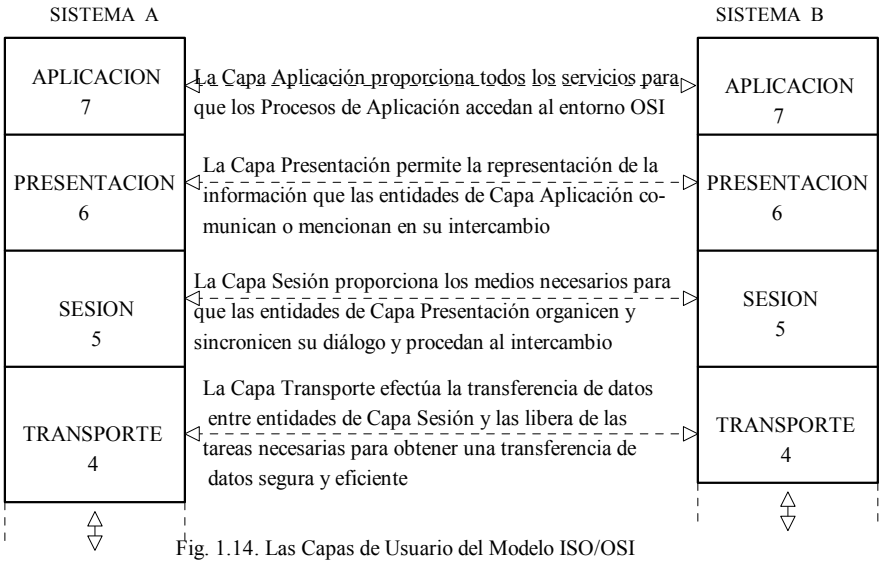


Fig. 1.14. Las Capas de Usuario del Modelo ISO/OSI

Por otra parte, las capas superiores Transporte, Sesión, Presentación y Aplicación tienen protocolos de alto nivel cuyas funciones están relacionadas con los usuarios finales, ya que están asociadas con éstos y no con la red. Para estas capas la red es completamente transparente. En las Figs. 1.14 y 1.15 se muestra la distinción entre las capas de servicio al usuario y las capas de red.

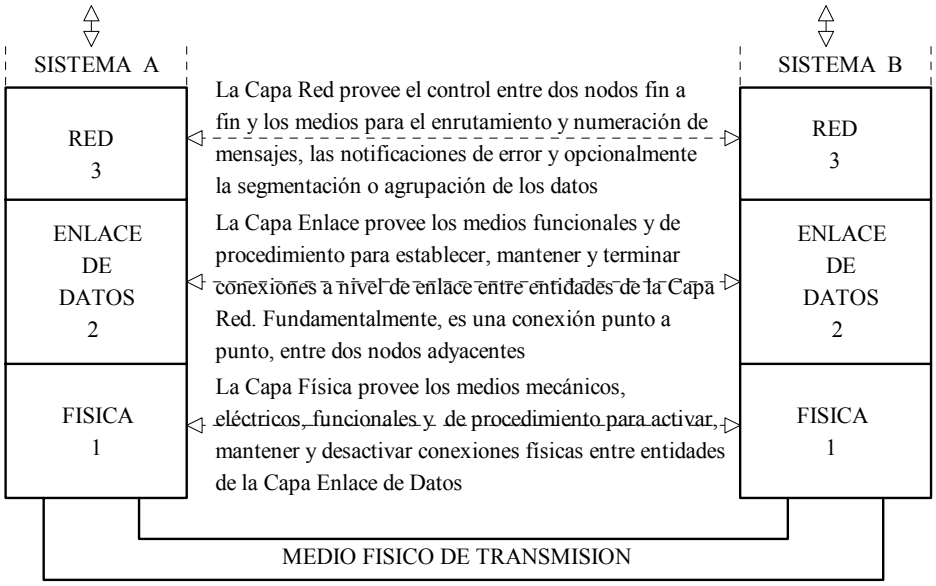


Fig.1.15. Capas de Servicios de Red del Modelo ISO/OSI

Primitivas de Servicio

Siguiendo el concepto de entidades N que ofrecen servicios a las entidades N+1, la OSI ha establecido estándares sobre el uso de cuatro primitivas básicas de servicio en cada nivel de la arquitectura para proporcionar la interacción entre el usuario del servicio en un nivel y el proveedor del servicio en el nivel inferior, como se muestra en la Fig. 1.16.

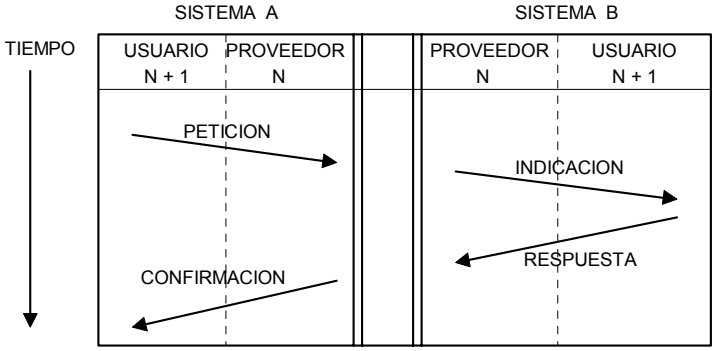


Fig. 1.16. Primitivas básicas en la Arquitectura ISO/OSI

Estas primitivas de servicio ofrecen los elementos básicos para definir un intercambio entre usuarios del servicio. Estas primitivas se denominan: petición, indicación, respuesta y confirmación, y se presentan de modo esquemático en la Fig. 1.16.

En una aplicación dada es posible que no todas las primitivas sean necesarias. Algunas de estas primitivas, o todas, se pueden usar en las tres fases del proceso de comunicación.

Fases de una Comunicación

En el caso orientado a conexión, los servicios que proveen las diferentes capas deben incluir condiciones para el establecimiento de la conexión, la transferencia de los datos y la terminación de la conexión. Estas tres fases secuenciales de operación de los protocolos en un nivel dado se muestran de manera esquemática en la Fig. 1.17. En ella se identifican dos sistemas, A y B, que desean comunicarse. Las entidades de la misma categoría en cada nivel de la arquitectura OSI deben primero establecer una conexión, luego efectuar la transferencia de datos de acuerdo con la aplicación y finalmente terminar o liberar la conexión.

Nótese que en cada una de estas fases hay que utilizar las cuatro primitivas de servicio.

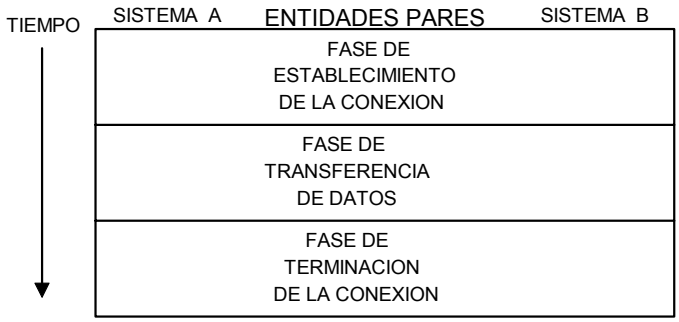
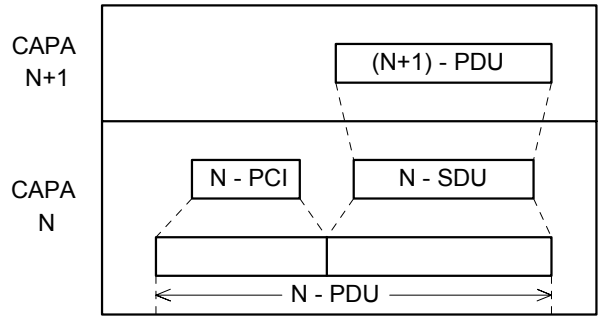


Fig. 1.17. Fases en el Intercambio de información en una capa en transmisión con conexión

Unidades de Datos

Los datos que se transfieren entre entidades iguales contienen datos del usuario, que vienen del nivel superior, así como información de control o elementos de servicio del respectivo protocolo. Este es principio del encapsulamiento que permite elaborar la arquitectura completa del Model ISO/OSI representada en la Fig. 1.12 Este principio de encapsulamiento se muestra en la Fig. 1.18.

Nótese que si desde la Capa N+1 viene un PDU cuya longitud no puede ser manejada por la Capa N, esta capa puede segmentar el PDU N+1 que llega en varios PDU N y agregarles los elementos de servicio PCI N apropiados. También es posible concatenar PDU N+1 relativamente cortos, para formar PDU N más grandes.



PDU = Unidad de Datos del Protocolo (Protocol Data Unit)
PCI = Información de Control del Protocolo (Protocol-Control Infrmation)
SDU = Unidad de Servicios de Datos (Service Data Unit)

Fig. 1.18. Unidades de Datos en la Arquitectura OSI

Capas Específicas del Modelo de Referencia ISO/OSI

La estructura general de la arquitectura del Modelo ISO/OSI refleja los conceptos de arquitectura en que se basa dicho modelo y la elección de las capas específicas y sus contenidos.

Las capas o niveles están representados en las Figs. 1.14 y 1.15. La capa más alta es la Capa de Aplicación y consiste en las entidades de aplicación que cooperan entre sí en el entorno OSI. Las capas inferiores proporcionan los servicios mediante los cuales cooperan las entidades de aplicación.

Las capas o niveles 1 al 3 son definidos por el UIT-T, mientras que las capas o niveles 4 al 7 son definidos conjuntamente por el UIT-T y la ISO. Sin embargo, en la Recomendación UIT-T X.200 están definidos todos los niveles. Nótese que en el UIT-T a los estratos se les denomina “niveles” mientras que en la ISO se les llama “capas”.

La Transmisión de Datos propiamente dicha tiene que ver con los tres primeros niveles del modelo de referencia incluyendo la conexión física, y por ello los capítulos siguientes estarán dirigidos a la Función de Transmisión con énfasis especial en la Capa Física (Nivel 1). La Capa Enlace (Nivel 2) la estudiaremos mediante la descripción de los protocolos de transmisión comerciales e industriales más conocidos y la Capa Red (Nivel 3) desde el punto de vista de la Transmisión Digital por Paquetes, que está definida por el UIT-T en su Recomendación X.25. Asimismo, la descripción de las redes de datos, que veremos en el Capítulo VI, se hará en relación con el Modelo ISO/OSI.

A continuación vamos a definir a grandes rasgos algunas de las características y funciones de las cuatro primeras capas. Para las capas superiores, el lector puede consultar la Recomendación UIT-T X.200, Tomo VIII, Fascículo 4, Libro Azul, 1988.

Capa Física

La Capa Física o Nivel 1 proporciona los medios mecánicos, eléctricos, funcionales y de procedimiento para activar, mantener y desactivar conexiones físicas en la transmisión de información entre entidades de la Capa Enlace de Datos. La conexión física puede incorporar sistemas abiertos intermedios, cada uno actuando en relevo (repetidoras), dentro de la Capa Física. Las entidades de la Capa Física están interconectadas a través de los medios físicos de transmisión: conductores metálicos, fibras ópticas, microondas, etc.

La Capa Física tiene las siguientes funciones:

- Activación y desactivación de las conexiones físicas
- Transmisión de las unidades de datos
- Administración, supervisión y control de las funciones y servicios de la capa

La Capa Física proporciona los siguientes servicios a la Capa Enlace de Datos:

- Proporciona las conexiones físicas y las unidades de datos correspondientes
- Enlaza físicamente los puntos terminales
- Reconoce los niveles de conexión
- Proporciona los medios para la detección y notificación de errores y el control de secuencias
- Controla la calidad de los parámetros de servicio

Para que los sistemas abiertos puedan comunicar en el entorno real, es preciso establecer conexiones físicas, como se muestra en la Fig. 1.19. Su representación lógica se muestra en la Fig. 1.20 y se denomina "conexión por medios físicos".

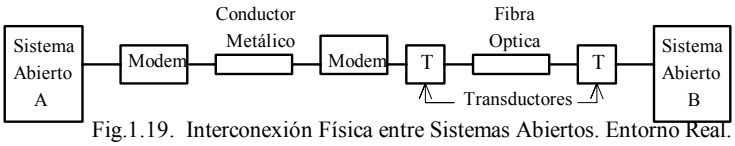


Fig.1.19. Interconexión Física entre Sistemas Abiertos. Entorno Real.

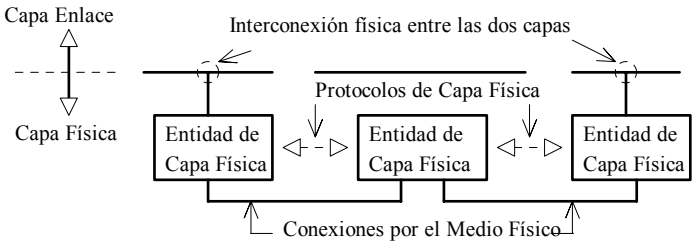


Fig. 1.20. Representación Lógica de las Interconexiones Físicas. Entorno Lógico.

Las características mecánicas, electromagnéticas y de otra naturaleza de las conexiones por medios físicos, que dependen del medio empleado, se definen en la frontera entre la capa física y los medios físicos. La definición de estas características figura en otras Recomendaciones del UIT-T.

Capa Enlace de Datos

La Capa Enlace de Datos o Nivel 2 proporciona los medios funcionales y de procedimiento para establecer, mantener y terminar conexiones a nivel de Enlace entre entidades de la Capa Red, y para transferir unidades de datos entre entidades de la Capa Enlace. Una conexión de Enlace está soportada por una o varias conexiones físicas y fundamentalmente es una conexión punto a punto, para diferenciarla de una conexión de Red que es una conexión fin a fin. La Capa Enlace detecta y posiblemente puede corregir errores que pueden ocurrir en la Capa Física; además, la Capa Enlace capacita a la Capa Red para que controle la interconexión de circuitos de datos dentro de la Capa Física.

La Capa Enlace tiene las siguientes funciones:

- Establecimiento y terminación de conexiones
- Delimitación, sincronización y control de secuencias
- Detección, notificación o corrección de errores
- Control de flujo e identificación e intercambio de parámetros
- Control de la interconexión de los circuitos de datos
- Administración, supervisión y control de los servicios y funciones de la capa

La Capa Enlace proporciona los siguientes servicios a la Capa Red:

- Proporciona la sección de transmisión y las unidades de datos de servicio para el enlace de datos
- Identifica los puntos terminales de la conexión a nivel de enlace
- Controla el flujo de la secuencia de datos
- Notifica la aparición de errores y puede también recuperarlos
- Control de la calidad de los parámetros de servicio

Capa Red

La Capa Red o Nivel 3 proporciona los medios para establecer, mantener y terminar conexiones a nivel de red entre sistemas abiertos, y los medios funcionales y de procedimiento para intercambiar unidades de datos entre entidades pares de la Capa Transporte utilizando los medios de la Capa Red. La Capa Red independiza a las entidades de la Capa Transporte de las tareas de enrutamiento y relevo asociadas con el establecimiento y operación de una conexión a nivel de red, es decir, de fin a fin.

El servicio básico provisto por la Capa Red es la transferencia transparente de datos entre entidades pares de la Capa Transporte. Este servicio permite que la estructura y el

contenido detallado (sintaxis y semántica) de los datos a transmitir sean determinados exclusivamente por las entidades de las capas superiores a la Capa Red.

La Capa Red tiene las siguientes funciones:

- Direccionamiento, enrutamiento y relevo
- Conexiones de Red, simples o multiplexadas
- Identificación de las conexiones de la red
- Servicios de transferencia de las unidades de datos en forma segmentada o por bloques
- Detección, corrección o notificación de errores
- Secuenciamiento, sincronización y control de flujo
- Petición, Indicación, Respuesta y Confirmación de Llamadas. Estos términos se denominan "primitivas"
- Administración, supervisión y control de los servicios y funciones de la capa

Asimismo, la Capa Red proporciona los siguientes servicios a la Capa Transporte:

- Direccionamiento y conexiones a nivel de red
- Identificación de los puntos terminales en las conexiones
- Transferencia de las unidades de datos de servicio de la red
- Control de la calidad de los parámetros de servicio
- Notificación sobre errores no corregibles a nivel de red
- Control de flujo y de secuencias
- Transferencia de datos a alta velocidad
- Inicialización y terminación de las conexiones de red

Capa Transporte

La capa de transporte identifica de manera única cada entidad de sesión por su dirección de transporte. Cuando se proporciona el servicio en modo sin conexión, la capa de transporte suministra un servicio en el modo sin conexión que relaciona una petición de transmisión de una unidad de datos del servicio de transporte con una petición al servicio de red en modo sin conexión. En el modo con conexión, el servicio de transporte ofrece los medios para establecer, mantener y liberar conexiones de transporte. Las conexiones de transporte proporcionan transmisión fulldúplex entre un par de entidades de sesión (a través de puntos de acceso al servicio de transporte).

Se puede establecer más de una conexión de transporte entre dos direcciones de transporte. Una entidad de sesión utiliza los identificadores de punto extremo de la

conexión de transporte suministrados por la capa de transporte para distinguir los puntos extremos de la conexión de transporte.

El funcionamiento de una conexión de transporte es independiente del funcionamiento de todas las demás, salvo en lo que respecta a las limitaciones impuestas por los recursos finitos de que dispone la capa de transporte.

La calidad del servicio ofrecida en una conexión de transporte depende de la clase de servicio pedida por las entidades de sesión al establecer la conexión de transporte. La calidad de servicio seleccionada se mantiene durante toda la conexión de transporte. Se notifica a la entidad de sesión cualquier fallo en mantener la calidad de servicio seleccionada en una conexión de transporte dada.

Servicios de la Capa Transporte

A continuación se describen los siguientes servicios proporcionados por la capa de transporte en el modo con conexión:

- Establecimiento de la conexión de transporte
- Liberación de la conexión de transporte
- Transferencia de datos
- Transferencia de datos acelerados

En el modo sin conexión, la capa de transporte no proporciona segmentación ni reensamblado. De esta manera, el tamaño de las unidades de datos del servicio de transporte está limitado por el tamaño de las unidades de datos del protocolo de transporte y de la información de control del protocolo de transporte.

Funciones en la Capa de Transporte

En el modo con conexión, las funciones de la capa de transporte pueden incluir las siguientes:

- Correspondencia de la dirección de transporte con una dirección de red
- Multiplexación de conexiones de transporte (de extremo a extremo) en conexiones de red
- Establecimiento y liberación de conexiones de transporte
- Control de secuencia de extremo a extremo en cada conexión
- Detección de errores de extremo a extremo y toda la supervisión necesaria de la calidad de servicio
- Recuperación tras error de extremo a extremo
- Segmentación, bloqueo y concatenación de extremo a extremo
- Control de flujo de extremo a extremo en cada conexión
- Funciones de supervisión

- Transferencia de unidades de datos aceleradas del servicio de transporte

Básicamente, la función de la Capa Transporte es aceptar datos de la Capa Sesión, segmentarlos si es necesario, pasarlos a la Capa Red, y asegurarse de que la información llegue correctamente a su destino. La Capa Transporte proporciona entonces un mecanismo de transferencia de datos de fin a fin que es transparente y confiable para el Nivel de Sesión y niveles superiores.

De acuerdo con el concepto de estratificación de funciones, a la Capa Transporte no le interesa si la conmutación es por circuitos o paquetes, ni el medio de transmisión utilizado (conductores metálicos, fibras ópticas, radio, etc.), ni el tipo de red empleado (Redes de Gran Area, Redes de Area Local, etc.); a la Capa Transporte sólo le interesa la calidad de servicio recibido expresada en parámetros como tiempo de respuesta, tasa de error, velocidad de tráfico (throughput), etc.

Protocolos de Transporte ISO

Se han definido cinco clases para el protocolo de transporte ISO a fin de manejar tanto los diferentes tipos de transferencia de datos que podrían esperarse sobre una conexión de transporte, como la amplia variedad de redes que podrían estar disponibles para proporcionar los servicios de red.

Clases de Protocolo de Transporte ISO

Clase 0. Es la más sencilla, no tiene repercusión sobre el sistema de red

Clase 1. Añade recuperación de error a redes inestables e inseguras

Clase 2. Posee todas las funciones de la Clase 0 más multiplexamiento

Clase 3. Combina la recuperación de error y multiplexamiento

Clase 4. Añade facilidades para detectar errores y datos fuera de secuencia

La Capa Transporte es tangible a la capa destino. Esto quiere decir que un programa en el terminal transmisor tiene una conversación con un programa similar en el terminal de destino. En las capas inferiores, los protocolos son entre cada terminal y sus vecinos adyacentes.

Además de multiplexar varias cadenas de mensajes en un canal, la Capa de Transporte debe encargarse de establecer y terminar conexiones en la red. Esto involucra algún tipo de mecanismo de numeración o de nombramiento, para que un proceso en un terminal tenga una manera o método para describir con quién desea conversar.

1.9. RESUMEN

El propósito fundamental de este capítulo es el de introducir al estudiante y al profesional en ejercicio, en los principios o bases de la rama de aplicación de las Comunicaciones Digitales denominada comúnmente Transmisión de Datos.

En primera instancia se describen las diversas velocidades de transmisión de información sobre el canal telefónico y de acuerdo con la velocidad se clasifican en bajas, medias y altas. El canal de voz se describe con base al ancho de banda y la calidad de la

transmisión, definida esta última en función de la inteligibilidad y la intensidad (energía de la voz).

De gran importancia en la transmisión de datos es el conocimiento de lo que es el ”canal digital”, de los elementos que lo constituyen y de los factores de deterioro que limitan su desempeño. Algunos de estos conceptos se describen brevemente pero se desarrollarán con más amplitud en los capítulos siguientes.

Para la transmisión de datos los canales telefónicos se clasifican de acuerdo con su ancho de banda y las velocidades de transmisión máximas permitidas. Se presenta la clasificación establecida por la Agencia Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos, así como las clasificaciones normalizadas por el UIT-T en sus Recomendaciones M.1020 (H.12), M.1025, M.1040 y M.910 (H.14).

Se presentan también algunos de los conceptos relacionados con las Comunicaciones Digitales en los aspectos de transmisión, conversión y procesamiento de datos; asimismo, se definen en forma introductoria los conceptos y definiciones de “Red de Datos” e “Interfaces”, dentro de un sistema de transmisión de información.

Las formas de establecimiento de una conexión entre un usuario llamante y un usuario llamado a fin de asegurar la transferencia de la información, definen las técnicas de conmutación utilizadas en las redes. Se tiene así la conmutación de circuitos, la conmutación de mensajes y la conmutación de paquetes, y se comparan sus prestaciones desde el punto de vista del rendimiento del canal. Particularmente, en la transmisión por paquetes se define lo que es “enlace o llamada virtual”, “paquete con conexión” y “paquete sin conexión” o “datograma (datagram)”.

El aceleramiento y globalización del intercambio de información llevó a la creación de un modelo de referencia aplicable al proceso lógico de un sistema de comunicaciones. El resultado ha sido el Modelo de Referencia ISO/OSI para el empleo de procedimientos de intercambio de información entre redes del mismo tipo o tipos diferentes, de modo que la comunicación se establezca tan fácilmente por una combinación de redes como por una sola red.

El Modelo de Referencia ISO/OSI se describe en este capítulo con un poco de detalle estableciéndose sus objetivos y definiéndose cuatro de sus siete capas. Como la Transmisión de Datos tiene que ver con las tres primeras capas (Capa Física, Capa Enlace de Datos y Capa Red), se definen los objetivos, funciones y servicios de estas tres primeras capas. Los Capítulos IV, V y VI se dedican a la descripción y aplicaciones prácticas de las Capas Física, Enlace de Datos y Red.

1.10. CUESTIONARIO

1. ¿Por qué se considera a la telegrafía como un sistema de transmisión de información de naturaleza digital?
2. ¿Cuál es la diferencia entre “baudio” y “bit”?.
3. Determine la capacidad, en bps, de un canal telefónico 3002, para valores típicos de la relación S/N, por ejemplo cuando $[S/N]_{dB} = 40$ dB.

4. La velocidad de modulación máxima en un canal telefónico es de 2400 baudios. ¿Cómo ha sido posible obtener velocidades de transmisión, en bps, superiores a los 14400 bps?
5. En un canal de voz un filtro deja pasar solamente las componentes de frecuencia superiores a 1 kHz. ¿Cuáles son los porcentajes de inteligibilidad y de intensidad en el canal?
6. Repita la Pregunta 5, pero el filtro deja pasar solamente las componentes de frecuencia superiores a 1 kHz.
7. En un canal de voz, ¿Cuál es más perjudicial, el ruido blanco o el ruido de impulsos (ruido impulsivo)?
8. Dibuje el diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones y explique la función de cada uno de los bloques.
9. Diga cuáles son los factores que limitan la transmisión de datos en un canal telefónico.
10. En la clasificación de la FCC, ¿Cuál es la diferencia entre un canal Tipo 3000 y uno Tipo 3002?
11. ¿Cuántos canales de 150 bps se pueden transmitir por un canal Tipo 3002 con Acondicionamiento C2?
12. Se quiere transmitir una señal digital de 50 kbps por un canal de la Serie 5000. ¿Qué Tipo de canal se necesita?
13. Describa brevemente las tres categorías funcionales de la Comunicación Digital.
14. ¿Qué es una Red de Datos? ¿Qué es una Interfaz?
15. ¿Qué significan las siglas ETD y ETCD?
16. ¿A qué se refieren las técnicas de conmutación en una red de transmisión de información?
17. Defina lo que es la conmutación de circuitos, la conmutación de mensajes y la conmutación de paquetes.
18. ¿Por qué es más eficiente la conmutación de paquetes que la conmutación de circuitos?
19. ¿Qué es un “circuito virtual” o “llamada virtual”? ¿Qué es un “paquete con conexión”?; ¿Qué es un “datograma (datagram)”?
20. ¿Para qué se creó el Modelo de Referencia ISO/OSI?
21. Dibuje el Modelo de Referencia ISO/OSI indicando cada una de las Capas o Niveles.
22. ¿Cuáles son los objetivos del Modelo de Referencia ISO/OSI?
23. ¿Qué es la comunicación par-a-par?
24. Diga los objetivos, funciones y servicios de las Capas Red, Enlace de Datos y Física.

CAPITULO II

TECNICAS DE MODULACION

2.1. INTRODUCCION

Como lo expresamos en el Prefacio, el objetivo de este libro no es el de presentar los aspectos puramente teóricos de las Comunicaciones Digitales, sino el de describir las aplicaciones de esta teoría en la Transmisión de Datos y conocer las normas internacionales que la rigen. Sin embargo, para darle un tratamiento más completo al tema de la Transmisión de Datos, en este capítulo haremos un breve repaso de las técnicas de modulación más utilizadas en la práctica y cuya aplicación se verá en los capítulos siguientes. El lector que tenga conocimientos básicos de las comunicaciones y sistemas de modulación puede ir directamente a la Sección 2.7 (Aspectos Prácticos de la Modulación Digital) de este mismo Capítulo.

En la transmisión de señales portadoras de información se utiliza una gran variedad de métodos de modulación, pero es posible identificar dos tipos básicos de modulación de acuerdo con la clase de portadora: (a) la "Modulación de Señales Continuas", en la cual la portadora es una señal sinusoidal, y (b) la "Modulación de Impulsos", en la cual la portadora es un tren de impulsos.

La Modulación de Señales Continuas es un proceso continuo y por lo tanto es la apropiada para señales que varían en forma continua en el tiempo. En este caso la frecuencia de la portadora sinusoidal tiene generalmente un valor mucho más elevado que el ancho de banda de la señal moduladora o señal mensaje, y el proceso de modulación es fundamentalmente un proceso de traslación de espectros.

La Modulación de Impulsos es un proceso discreto, en el sentido de que los impulsos están presentes en ciertos intervalos de tiempo, lo que hace que la Modulación de Impulsos sea la forma apropiada para la transmisión de mensajes o información de naturaleza discreta.

2.2. MODULACION DE SEÑALES CONTINUAS

2.2.1. Introducción

En general, la modulación continua de una portadora de alta frecuencia es el proceso mediante el cual un parámetro (amplitud o ángulo) de la portadora se varía en forma instantánea proporcionalmente a una señal mensaje de baja frecuencia. Generalmente se supone que la portadora es una señal sinusoidal, pero ésta no es una condición necesaria.

Dependiendo de la relación entre la señal mensaje y los parámetros de la señal modulada, se tendrá los siguientes dos tipos de modulación de señales continuas:

1. Modulación Lineal. Cuando la amplitud instantánea de la portadora varía linealmente respecto a la señal mensaje.
2. Modulación Angular o Exponencial. Cuando el ángulo de la portadora varía linealmente respecto a la señal mensaje.

2.2.2. Modulación Lineal

Las señales moduladas linealmente se generan mediante multiplicación del mensaje m(t) que contiene la información por una portadora sinusoidal. Este producto es procesado por filtros pasabanda lineales y la configuración de los moduladores de amplitud se muestra en la Fig. 2.1, donde m(t), $m_1(t)$ y $m_2(t)$ son los mensajes a transmitir.

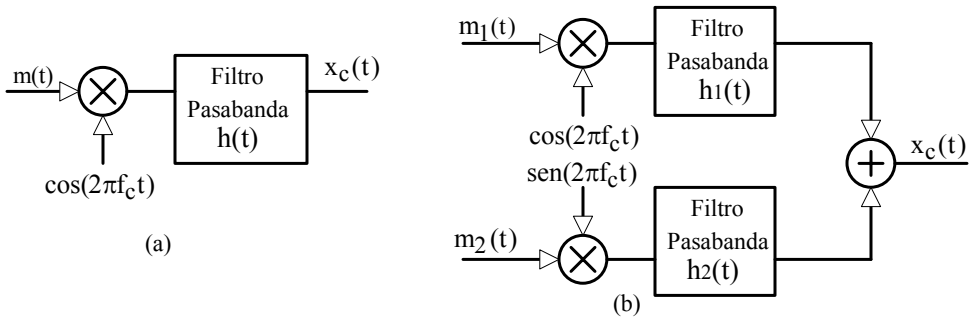


Fig. 2.1. Moduladores de Amplitud

Entonces, de la Fig. 2.1(a),

$$x_c(t) = [m(t)\cos(2\pi f_c t)] * h(t) \tag{2.1}$$

y de la Fig. 2.1(b),

$$x_c(t) = [m_1(t)\cos(2\pi f_c t)] * h_1(t) + [m_2(t)\mathrm{sen}(2\pi f_c t)] * h_2(t) \tag{2.2}$$

h(t), $h_1(t)$ y $h_2(t)$ son las características de los filtros. El asterisco significa convolución.

Las características de los filtros pasabanda dependen del tipo de modulación requerido. En efecto, la elección del tipo de filtro requerido permite generar los tipos familiares de modulación de amplitud, tales como los de "Doble Banda Lateral con o sin Portadora (AM y DSB/SC), los de "Banda Lateral Unica (SSB)", los de "Banda Lateral Residual (VSB)", y la "Modulación Ortogonal o en Cuadratura (QAM)". A continuación vamos a revisar en forma sucinta estas formas de modulación de amplitud.

Modulación en Banda Lateral Doble (AM y DSB/SC)

En este caso el filtro es un filtro pasabanda centrado en la frecuencia f_c y con un ancho de banda el doble de la frecuencia máxima del mensaje m(t); sea f_m el valor de esta frecuencia.

La señal modulada $x_c(t)$ contiene componentes de frecuencia dispuestas simétricamente alrededor de la frecuencia de portadora, es decir, es una señal de doble banda lateral. Se dice entonces que la señal modulada $x_c(t)$ es una señal modulada de doble banda lateral con portadora suprimida ("Double Side-Band/Supressed Carrier, DSB/SC") si la señal modulante m(t) no contiene una componente continua. Si m(t) contiene una componente continua de valor A_c, entonces $x_c(t)$ tendrá una componente a la frecuencia f_c

de portadora; este sistema de modulación de amplitud se conoce como modulación AM. Si m(t) no tiene una componente continua, entonces es necesario agregarla.

Dentro de la banda de paso de los filtros, la señal modulada transmitida será

$$x_c(t) = m(t)\cos(2\pi f_c t) \quad \text{en DSB/SC} \tag{2.3}$$

y

$$x_c(t) = \left[A_c + m(t)\right]\cos(2\pi f_c t) \quad \text{en AM} \tag{2.4}$$

La generación de estas señales se efectúa con el modulador mostrado en la Fig. 2.1(a). En el caso AM simplemente se le agrega a m(t) una componente continua A_c.

La instrumentación de estos sistemas es relativamente sencilla, pero tienen la desventaja de desperdiciar potencia y ancho de banda, siendo este último el doble del de la señal a transmitir. En transmisión de datos se utilizan las dos configuraciones mostradas en la Fig. 2.1.

Modulación en Banda Lateral Unica (SSB)

Una señal generada mediante un proceso de modulación lineal y que contiene componentes de frecuencia a un solo lado de la frecuencia de portadora se conoce con el nombre de "Señal de Banda Lateral Unica (Single Side-Band, SSB)".

Vamos a ver qué configuración debe tener el filtro pasabanda para generar señales SSB.

Introduciendo el concepto de transformada de Hilbert, se puede demostrar [Schwartz, 1990] que la señal modulada SSB tiene la forma

$$x_c(t) = m(t)\cos(2\pi f_c t) + \hat{m}(t)\,\mathrm{sen}(2\pi f_c t) \tag{2.5}$$

donde $\hat{m}(t)$ es la transformada de Hilbert de m(t). En este caso se ha transmitido la banda lateral inferior. Para la transmisión de la banda lateral superior el signo del segundo término de (2.5) es negativo. El ancho de banda de la señal modulada es igual al ancho de banda del mensaje, es decir, el rendimiento del canal ha aumentado al doble, pues por el mismo ancho de banda de una señal de banda lateral doble se puede enviar dos señales en banda lateral única.

La expresión (2.5) sugiere un medio, conocido con el nombre de "método por desplazamiento de fase", para generar señales SSB, como se muestra en la Fig. 2.2. Nótese que este esquema es básicamente el mismo de la Fig. 2.1(b). Si se fuera a utilizar el esquema de la Fig. 2.1(b), el filtro pasabanda debe dejar pasar solamente la banda lateral inferior o superior; pero en este caso el diseño

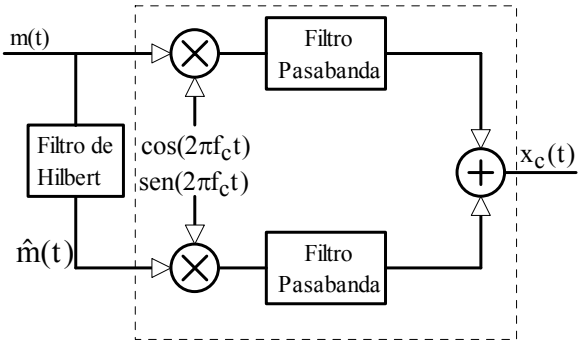


Fig. 2.2. Modulador SSB por Desplazamiento de Fase.

del filtro es más crítico.

Debido a la dificultad práctica en el diseño de filtros que separen perfectamente una de las dos bandas laterales, el comportamiento de los sistemas SSB a frecuencias próximas a la de portadora no es muy bueno, lo que tiene como consecuencia que la respuesta a frecuencias bajas de los sistemas SSB es más bien pobre.

La modulación SSB no se emplea directamente para la transmisión de datos; pero se utiliza en los canales de servicio en transmisión de datos en banda ancha, Recomendación UIT-T V.35.

Modulación en Banda Lateral Residual (VSB)

Las limitaciones prácticas del sistema de modulación en banda lateral única y el desperdicio en el ancho de banda inherente a los sistemas de doble banda lateral, ha hecho necesaria la búsqueda de un compromiso entre estos dos sistemas. Este compromiso lo cumple el sistema de "banda lateral residual (Vestigial Side-Band, VSB)" el cual tiene la sencillez de instrumentación de los sistemas de doble banda lateral y su ancho de banda es ligeramente superior al del sistema de banda lateral única.

En el esquema de modulación VSB se transmite la mayor parte de una banda lateral con una porción residual de la otra banda lateral. Esto tiene como consecuencia una reducción en los requerimientos de abruptez en los filtros, una disminución de la fluctuación de fase y una reducción en el ancho de banda de la señal modulada.

Las señales VSB se pueden generar con el modulador mostrado en la Fig. 2.1(a). En este caso el filtro pasabanda que permite la generación de señales VSB debe ser tal que su función de transferencia H(f) cumpla con la condición

$$\left[H(f+f_c)+H(f-f_c)\right]=\begin{cases}\text{constante} \quad \text{para} \quad |f|\le f_m \\ \text{arbitrario en el resto}\end{cases} \tag{2.6}$$

donde f_m es la frecuencia máxima del mensaje m(t) y f_c la frecuencia de portadora.

El pequeño incremento en el ancho de banda requerido en VSB comparado con SSB está más que compensado por la simplificación del sistema. Si se añade una portadora piloto a la señal VSB se puede emplear detección de envolvente en el receptor. El sistema VSB es el empleado en la transmisión de señales de video en televisión; en transmisión de datos se utiliza en los módems de la familia UIT-T V.35/36.

Modulación Ortogonal o en Cuadratura (QAM)

En este sistema de modulación la estructura de la señal modulada es de la misma forma que la de dos señales de doble banda lateral moduladas ortogonalmente. En este tipo de modulación dos fuentes independientes de datos se trasmiten por el mismo canal. Esto es posible porque una de las señales modula linealmente la envolvente de una señal coseno, mientras que la otra modula independientemente la envolvente de una señal seno, como se muestra en la Fig. 2.1(b).

Si $m_1(t)$ y $m_2(t)$ son las señales de banda de base, y si la ganancia de los filtros es constante dentro de la banda de paso, entonces la onda modulada QAM es

$$x_c(t) = m_1(t)\cos(2\pi f_c t) + m_2(t)\,\mathrm{sen}(2\pi f_c t) \qquad (2.7)$$

Las señales $m_1(t)$ y $m_2(t)$ se transmiten simultáneamente por el mismo canal con el consiguiente ahorro de ancho de banda. Este esquema de modulación es muy utilizado en la transmisión de datos, como veremos posteriormente.

2.2.3. Modulación Angular o Exponencial

Modulación de Fase (PM) y Modulación de Frecuencia (FM)

Las señales moduladas en ángulo son señales de envolvente constante y la información está contenida en la fase instantánea de la portadora. La señal modulada en ángulo se puede representar en la forma

$$x_c(t) = A_c \cos\lfloor \theta(t) \rfloor = A_c \cos[2\pi f_c t + \phi(t)] \qquad (2.8)$$

donde $\theta(t) = [2\pi f_c t + \phi(t)]$ es el "ángulo o fase instantánea" de la portadora, y $\phi(t)$ la "desviación instantánea de fase".

Por definición, la "frecuencia instantánea, $f_i(t)$" de la señal modulada $x_c(t)$ es

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d}{dt}[\theta(t)] = f_c + \frac{1}{2\pi}\frac{d}{dt}\phi(t) \qquad (2.9)$$

También, $\Delta f(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d}{dt}\phi(t) =$ desviación instantánea de frecuencia (2.10)

La desviación instantánea de fase $\phi(t)$ está relacionada con la señal mensaje y dependiendo de la naturaleza de esa relación, se tiene los siguientes tipos de modulación angular:

1. Modulación de Fase (Phase Modulation, PM), en la cual la desviación instantánea de fase es proporcional a la señal mensaje, es decir,

   $$\phi(t) = k_p m(t) \qquad (2.11)$$

   donde k_p es la "constante de desviación de fase" del modulador; la constante k_p se expresa en radianes por unidad de m(t), por ejemplo, en rad/Volt.

2. Modulación de Frecuencia (Frequency Modulation, FM), en la cual la desviación instantánea de frecuencia es proporcional a la señal mensaje m(t), es decir,

   $$\Delta f(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d}{dt}\phi(t) = f_d m(t) \qquad (2.12)$$

   o también, mediante integración de (2.12),

   $$\phi(t) = 2\pi f_d \int_{t_o}^{t} m(\tau)d\tau + \phi_o(t_o) \qquad (2.13)$$

   En este caso la desviación instantánea de fase es proporcional a la integral de la señal mensaje; la constante f_d es la "constante de desviación de frecuencia" del modulador y se expresa en Hz por unidad de m(t), por ejemplo, Hz/Volt.

Combinando las expresiones (2.12) y (2.13) con (2.8), se obtiene [con $\phi_o(t_o) = 0$]
Para la modulación de fase PM,

$$x_{PM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)] \tag{2.14}$$

y para la modulación de frecuencia FM,

$$x_{FM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + 2\pi f_d \int^t m(\tau)d\tau\,] \tag{2.15}$$

Generalmente no se especifica el límite inferior de la integral.

En la transmisión de señales binarias el mensaje m(t) está formado por impulsos de estados "0" ó "1", que se transmiten a intervalos de duración fija. Si la modulación es en frecuencia, se transmitirá una frecuencia $f_o = f_c - f_d$ cuando se quiere transmitir el "0", o una frecuencia $f_1 = f_c + f_d$ cuando se quiere transmitir el "1". Entonces, para señales binarias moduladas en frecuencia, la expresión (2.15) se escribe en la forma

$$x_{FM}(t) = A_c \cos[2\pi(f_c - f_d)t] \quad \text{cuando se transmite un "0"} \tag{2.16a}$$

y $$x_{FM}(t) = A_c \cos[2\pi(f + f_d)t] \quad \text{cuando se transmite un "1"} \tag{2.16b}$$

En el caso de modulación de fase, cuando se quiere transmitir un "0" la fase instantánea $\phi(t)$ se hace igual a cero, mientras que si se quiere transmitir un "1" la fase se hace igual a $-\pi$. Para señales binarias moduladas en fase, la expresión (2.14) se escribe en la forma

$$x_{PM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t] \quad \text{cuando se transmite un "0"} \tag{2.17a}$$

y $$x_{PM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t - \pi] = -A_c \cos[2\pi f_c t] \quad \text{cuando se transmite un "1"} \tag{2.17b}$$

Estas expresiones se generalizarán más adelante cuando veamos las técnicas de modulación binaria y m-aria.

En general, para una señal modulante m(t) dada, el ancho de banda en FM es mayor que en PM, lo cual implica que para un ancho de banda dado disponible, se puede enviar más información en PM que en FM. En efecto, las velocidades de transmisión más altas sobre un canal de un ancho de banda dado se obtienen mediante modulación de fase, como lo veremos posteriormente.

2.3. MODULACION ANALOGICA DE IMPULSOS

2.3.1. Introducción

Un tren de impulsos está caracterizado por su amplitud, su período y la duración de cada impulso. Si en alguna forma se imprimiera sobre alguno de estos parámetros una variación proporcional a alguna otra señal, y que esta operación fuera reversible, se tendría lo que se conoce como "Modulación Analógica de Impulsos".

Un mensaje adecuadamente descrito por sus valores de muestra se puede transmitir mediante la modulación analógica de un tren de impulsos. En la modulación analógica de

impulsos cada valor de muestra de la señal mensaje hace variar proporcionalmente uno de los parámetros de cada impulso; el tren de impulsos, así modulado, puede transmitirse y en el destino se le puede extraer la información o mensaje contenido en ella. Nótese que cada impulso dispone, para su transmisión, de todo el ancho de banda del canal pero sólo lo ocupa durante un intervalo $\tau < T_b$, donde T_b es el período del tren de impulsos sin modular y τ la duración del impulso.

Hay varias formas de modulación analógica de impulsos, pero tres son las más conocidas y utilizadas:

1. La "Modulación de Amplitud de Impulsos (Pulse-Amplitude Modulation, PAM)", en la cual la altura o amplitud de cada impulso varía en función del valor de muestra de la señal mensaje. El período y la duración de los impulsos no cambian.
2. La "Modulación de Duración o Anchura de Impulsos (Pulse-Duration (Width) Modulation, PDM o PWM)", en la cual la duración de cada impulso varía en función del valor de muestra de la señal mensaje. El período y la amplitud de los impulsos no cambian.
3. La "Modulación de Posición de Impulsos (Pulse-Position Modulation, PPM)", en la cual la posición de cada impulso varía, respecto a un punto de referencia, en función del valor de muestra de la señal mensaje. La amplitud y la duración de los impulsos no cambian.

2.3.2. Modulación de Amplitud de Impulsos (PAM)

En la modulación PAM la amplitud de cada impulso varía proporcionalmente con cada valor de muestra de la señal mensaje m(t); por lo tanto, una señal PAM no es otra cosa que una señal muestreada con retención, como la señal PAM mostrada en la Fig. 2.3.

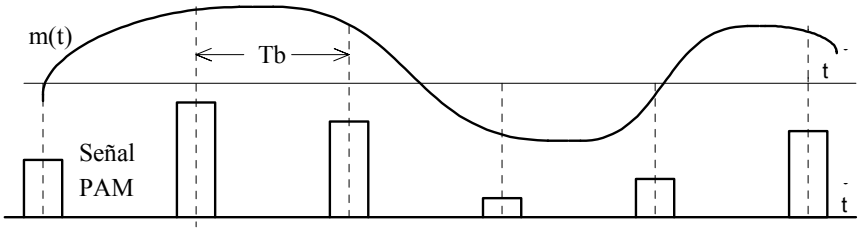


Fig. 2.3. Modulación de Amplitud de Impulsos **PAM**

Una señal $x_{PAM}(t)$ unipolar con retorno a cero tiene entonces la forma

$$x_{PAM}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [A + m(nT_b)] \cdot \Pi\left[\frac{t - nT_b}{\tau}\right] \tag{2.18}$$

donde $A > |\min m(t)|$ es una constante que se agrega a m(t) para evitar, para efectos de sincronización, que los impulsos modulados puedan ser de amplitud cero o negativa, T_b es el intervalo de Shannon, τ la duración de los impulsos y $|\min m(t)|$ es el valor de la

máxima excursión negativa de m(t). Se supone también que $< m(t) >= 0$. Nótese que en ausencia de modulación [m(t) = 0], la expresión (2.18) se convierte en un tren de impulsos periódicos de amplitud A, período T_b y duración τ, que representa la portadora sin modular.

Como la información está contenida en la variación de la amplitud de los impulsos, los sistemas PAM son muy sensibles al ruido aditivo. En la práctica, la modulación PAM no se utiliza para transmisión directa de información sino como un paso previo de procesamiento, sobre todo en los sistemas de modulación de impulsos codificados (PCM), que veremos más adelante.

2.3.3. Modulación de la Duración o Anchura de Impulsos (PDM o PWM)

En la modulación PDM la duración de los impulsos varía proporcionalmente a los valores de muestra de la señal mensaje m(t), como se muestra en la Fig. 2.4 Obsérvese que el valor más positivo de m(t) corresponde al impulso más ancho, mientras que el valor más negativo corresponde al impulso más angosto.

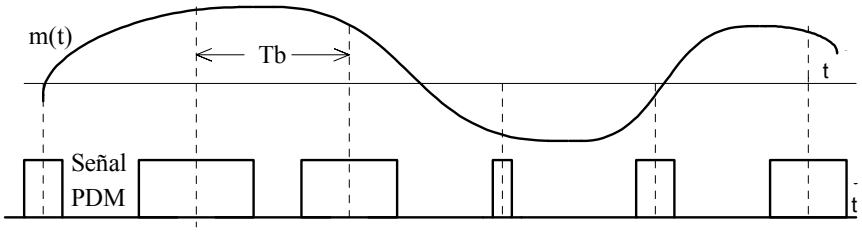


Fig. 2.4. Modulación de la Duración de Impulsos **PDM**

Como es evidente, hay que limitar las duraciones máximas y mínimas de los impulsos de tal manera que impulsos adyacentes no se solapen o que la duración mínima de los impulsos sea de tal magnitud que demande anchos de banda inadmisibles. A este efecto, el sistema PDM debe ser cuidadosamente diseñado de acuerdo con los niveles de señal máximos y mínimos esperados.

Una señal PDM tiene entonces la forma

$$x_{PDM}(t) = A\sum_{n=-\infty}^{\infty} \Pi\left[\frac{t - nT_b}{\tau(nT_b)}\right] \tag{2.19}$$

donde $\tau(t) = \tau_o + \tau_1[1 + m_t m(t)] = \tau_o[1 + \Delta(t)]$ (2.20)

siendo $m_t = \frac{\tau_1}{\tau_o} \leq 1$ el "índice de modulación PDM" y $\Delta(t) = m_t m(t)$; τ_o es la duración de los impulsos no modulados. A es la amplitud de los impulsos.

Si T_b es el período o intervalo de Shannon, B el ancho de banda de transmisión y $< m(t) >= 0$, los valores de τ_o y τ_1 se eligen de tal manera que se cumplan las siguientes condiciones, ver Fig. 2.5.

$$T_b > \tau_{max} = \tau_o[1+|\max m(t)|] > \tau_o > \tau_{min} \qquad (2.21)$$

$$\tau_{min} = \tau_o[1 - m_t\,|\min m(t)|] \geq \frac{1}{B} > 0 \qquad (2.22)$$

|max m(t)| y |min m(t)| son los valores de las máximas excursiones positiva y negativa, respectivamente, de m(t). Nótese que la expresión (2.22) implica que $m_t\,|\min m(t)| < 1$, ó también que $\tau_o > \tau_1\,|\min m(t)|$, lo cual nos asegura que el ancho mínimo del impulso nunca será cero o negativo.

En la Fig. 2.5 se observa que la variación de la duración del impulso se efectúa simétricamente alrededor del punto de muestra nT_b, pero también se puede mantener fijo un borde del impulso mientras que el otro borde es el que se desplaza.

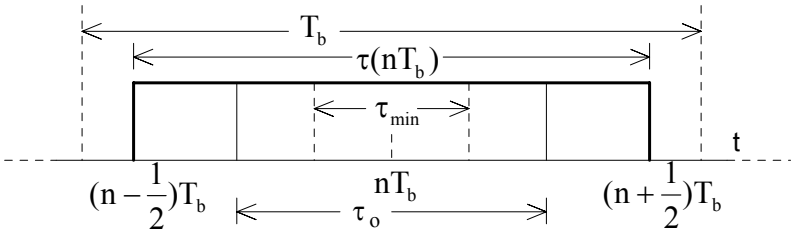


Fig. 2.5. Relaciones de Duración en PDM.

2.3.4. Modulación por Posición de Impulsos (PPM)

En la modulación PPM la posición de los impulsos, con referencia a un punto dado, varía proporcionalmente de acuerdo con los valores de muestra de la señal mensaje, como se muestra en la Fig. 2.6.

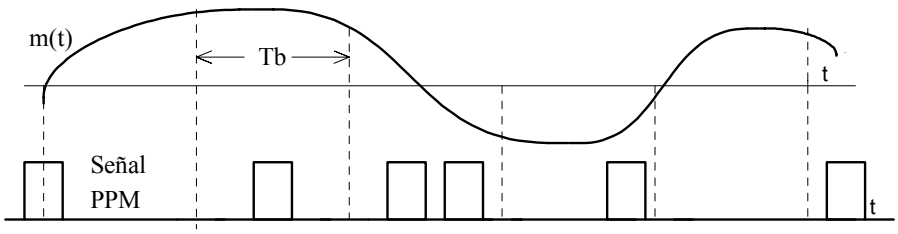


Fig. 2.6. Modulación por Posición de Impulsos PPM.

En un sistema PPM la información está contenida en los desplazamientos de los impulsos de un tren de impulsos, la portadora. Como la amplitud y la duración de los impulsos se mantienen constantes, la información posicional es también transmitida por la posición del borde frontal del impulso, o por la posición del punto, en el eje del tiempo, por donde cruza el borde frontal.

Las modulaciones PPM y PDM están íntimamente relacionadas, a tal punto que la modulación PPM se puede obtener directamente a partir de la modulación PDM en la forma mostrada en la Fig. 2.7.

Como la información reside en la posición temporal de los bordes del impulso y no en el impulso mismo, y como la potencia es proporcional a la duración de los impulsos, sería muy conveniente, si el ancho de banda del canal lo permite, transmitir impulsos muy angostos modulados en PPM. La potencia requerida para PPM será entonces inferior a la requerida para PDM y ésta ya es una ventaja muy importante que se refleja en las correspondientes relaciones S/N.

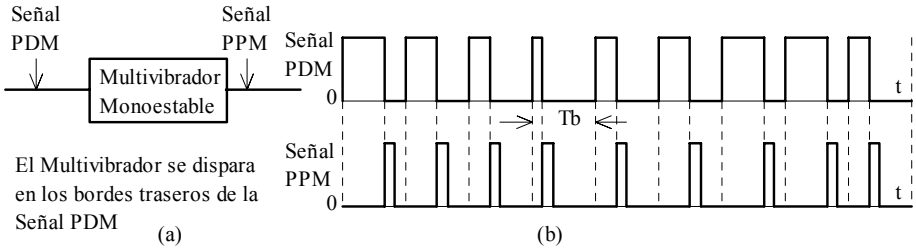


Fig. 2.7. Generación de Señales PPM a partir de Señales PDM.

Una señal PPM se puede expresar en la forma

$$x_{PPM}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A\Pi\left[\frac{t - nT_b - \Delta(nT_b)}{\tau}\right] \tag{2.23}$$

donde $\Delta(t) = m_t m(t)$ es el desplazamiento instantáneo del impulso respecto al instante de referencia $t = nT_b$, como puede observarse en la Fig. 2.8.

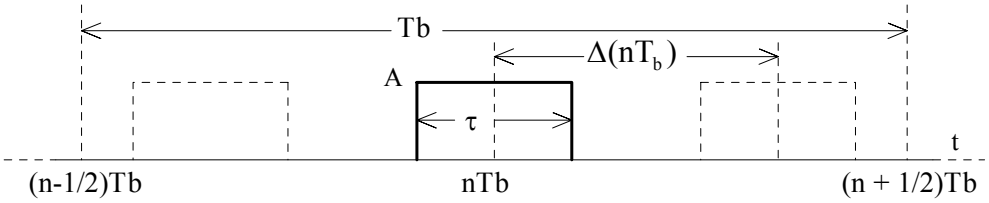


Fig. 2.8. Modulación PPM.

La posición del impulso respecto a $t = nT_b$ es proporcional a m(t); el desplazamiento máximo será

$$|\Delta(t)|_{max} = m_t\,|m(t)|_{max} \le \frac{1}{2}(T_b - \tau) \tag{2.24}$$

donde $|m(t)|_{max}$ es el valor máximo de m(t) y m_t el índice de modulación PPM.

Una forma de demodulación de fácil instrumentación, más eficiente en cuanto al ruido y con menor distorsión se puede obtener mediante conversión PPM a PDM y filtrado pasabajo. Esta transformación se puede efectuar haciendo que la portadora (un reloj) active un circuito basculador (un flip-flop RS), el cual, a su vez, es puesto a cero por los impulsos PPM. Sin embargo, como la señal PPM no contiene la información de portadora o

temporización, ésta tiene que ser transmitida por separado. En la Fig. 2.9 se muestra el proceso de demodulación PPM/PDM/m(t).

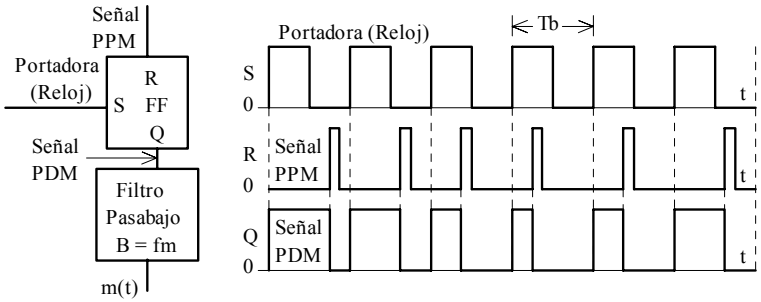


Fig. 2.9. Mecanismo de Demodulación PPM/PDM/m(t).

2.4. MODULACIÓN DIGITAL DE IMPULSOS

2.4.1. Introducción

En los sistemas PAM, PDM y PPM solamente el tiempo se expresa en forma discreta, mientras que los respectivos parámetros de modulación (amplitud, duración y posición) varían en forma continua de acuerdo con la señal mensaje. La transmisión de información se lleva a cabo entonces en forma analógica en tiempos o instantes discretos. En la modulación digital de impulsos el mensaje es representado por secuencias de impulsos digitales, donde la palabra "digital" significa "amplitud y duración discreta". En este tipo de modulación cada valor de muestra de la señal mensaje se codifica en secuencias de impulsos, generalmente binarios. Los sistemas prácticos de modulación digital de impulsos, por cuestiones de tipo tecnológico, son esencialmente sistemas binarios.

Los tres sistemas básicos de modulación digital de impulsos son:

- La Modulación de Impulsos Codificados (Pulse-Code Modulation, PCM)
- La Modulación Diferencial de Impulsos Codificados (Differential Pulse-Code Modulation, DPCM)
- La Modulación Delta (Delta Modulation, DM)

En este libro trataremos solamente el sistema PCM.

2.4.2. Modulación de Impulsos Codificados (PCM)

Los tres tipos de modulación de impulsos vistos en las secciones anteriores han sido representaciones analógicas del mensaje, pero la modulación de impulsos codificados es completamente diferente en concepto. En efecto, en la modulación PCM cada muestra del mensaje se representa o codifica en una secuencia de impulsos. Las muestras se presentan en forma de una señal PAM que se aplica a un codificador binario o convertidor cuya salida son secuencias de impulsos binarios que representan la amplitud de los impulsos PAM.

Cuantificación y Codificación

Aunque en la práctica no suele usarse, para comprender el mecanismo de la modulación PCM, se le puede descomponer en una secuencia de tres operaciones distintas: Modulación PAM, Cuantificación y Codificación, como se muestra en la Fig. 2.10.

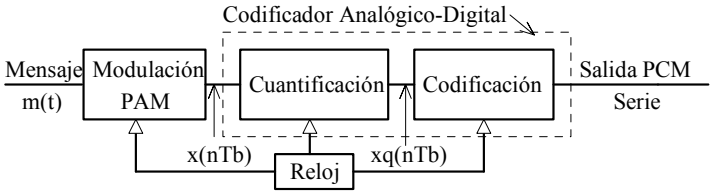


Fig. 2.10. Mecanismo de Generación de Señales PCM.

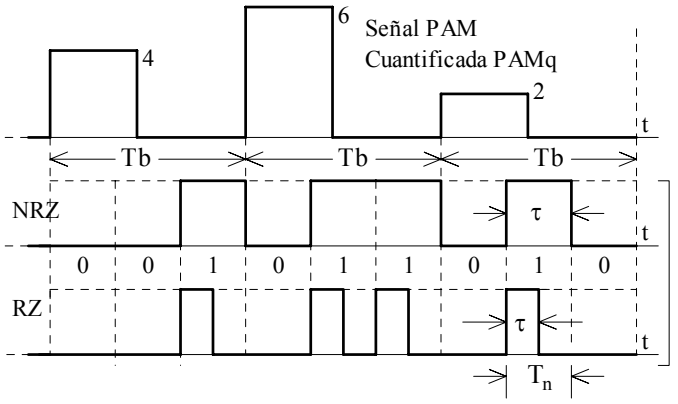
La relación entre el número de muestras de entrada N y el número de impulsos n de la muestra codificada es $N = 2^n$; por lo tanto, el número de muestras de entrada al convertidor debe ser un número finito. Pero como el número de amplitudes de los impulsos PAM es teóricamente infinito, es necesario efectuar previamente un proceso de "redondeamiento" de los valores de amplitud para generar un conjunto finito de valores fijos o niveles de tal manera que el número de niveles sea un entero finito N. Este proceso se denomina "cuantificación" y es similar al redondeamiento de los últimos dígitos en un proceso numérico.

En general, la cuantificación transforma un conjunto infinito de amplitudes en un conjunto finito de N amplitudes; como consecuencia, después de la conversión la señal m(t) nunca podrá ser recuperada exactamente en su forma original (aún en el caso de que el ruido de transmisión sea nulo) debido al denominado "ruido de cuantificación". En efecto, el proceso de cuantificación introduce una cantidad inicial de distorsión, la cual es inherente al sistema pero que podemos controlar y hacer tan pequeña como queramos, dependiendo del número de niveles de cuantificación elegidos. Esto significa que la señal original puede aproximarse mediante una señal que se construye a partir de un conjunto disponible de amplitudes discretas elegidas sobre una base de error mínimo. La existencia de un número finito de niveles de amplitud discreta es una condición básica en PCM. Por supuesto, si se asigna niveles de amplitud discreta con un espaciamiento lo suficientemente pequeño, se puede lograr que la señal cuantificada prácticamente no se distinga de la señal original.

La codificación binaria natural es el proceso de transformación de la amplitud de la muestra PAM cuantificada en secuencias de n impulsos binarios conocidas como "grupos de codificación". A cada nivel de cuantificación se asigna un grupo de codificación diferente, es decir, habrá $N = 2^n$ grupos de codificación, palabras o secuencias binarias de n impulsos (llamados también "dígitos binarios" y más impropiamente "bits") cada una, como se muestra en la Fig. 2.11(a).

En la Fig. 2.11(a) se tiene unas muestras PAM cuantificadas y sus correspondientes formas codificadas en PCM (NRZ y RZ). Nótese que en este caso se ha empleado 8 niveles (2^3) para cuantificar las muestras; por lo tanto, un código de tres dígitos será suficiente para codificación completa; nótese también que el bit de menor peso se transmite de primero. En

la Tabla, Fig. 2.11(b), se muestra la codificación empleada. En general, los fabricantes de los codificadores o convertidores especifican el correspondiente código de salida (binario natural, BCD, OFF-SET, etc.).



(a) Conversión PAMq/PCM. N = 8; n = 3

Decimal	Binario
0	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
6	110
7	111

(b) Codificación Binaria Natural

Fig. 2.11. Conversión Analógica-Digital

La codificación binaria, en sus distintas variedades, es la más utilizada debido a su simplicidad de generación, regeneración y detección, y por su gran inmunidad al ruido de transmisión. Esta inmunidad se debe a que: (a) solamente una parte de la información total es afectada por la pérdida o distorsión de uno o más impulsos de un grupo de codificación, y (b) que se puede tolerar grandes cantidades de ruido y distorsión en la detección de los impulsos individuales porque la selección o decisión se efectúa solamente entre dos estados: el estado “CERO” o el estado “UNO”.

Demodulación de Señales PCM

El mecanismo de recepción de señales PCM se muestra en la Fig. 2.12.

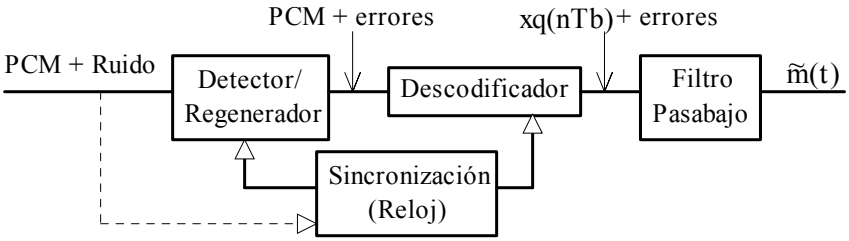


Fig. 2.12. Recepción de Señales PCM.

La señal de banda de base que llega al receptor está contaminada con ruido blanco n(t). En el detector/regenerador se determina si llegaron o no impulsos, se regeneran y se encuadran en los correspondientes grupos de codificación incluyendo los errores producidos por el ruido n(t). Esta secuencia de grupos se aplica al descodificador que los convierte en las muestras de una señal PAM cuantificada (incluyendo los errores debido al

ruido). Esta señal se filtra en un filtro pasabajo de ancho de banda $B = f_m$ para extraer el mensaje m(t). Nótese que la señal de salida $\tilde{m}(t)$ del receptor no es idéntica a m(t) debido a los efectos del ruido aditivo n(t) y del ruido de cuantificación; en otras palabras, en el sistema PCM la reconstrucción perfecta de una señal de variación continua es imposible aún cuando el ruido n(t) sea despreciable.

En la práctica, el proceso de cuantificación y codificación es efectuado por un solo dispositivo denominado "convertidor analógico-digital, (CAD)". La operación inversa en el receptor, es decir, la conversión de la señal PCM en una señal analógica PAM, se efectúa con un "convertidor digital-analógico, (CDA)". Estos dos convertidores son fácilmente disponibles a costos moderados como circuitos de mediana y gran escala de integración (MSI y VLSI), en todas las tecnologías (TTL, MOS, etc.), para cualquier valor de n y para diferentes velocidades de conversión y códigos de salida.

Hay que señalar que en los convertidores analógico-digitales prácticos la salida se presenta en forma paralela, pero como la señal PCM de banda de base es una secuencia serie, es necesario efectuar una transformación paralelo/serie utilizando comúnmente registros de desplazamiento ("shift-registers"), como se muestra en la Fig. 2.13(a). Para la demodulación el proceso es contrario: la señal PCM procesada en el detector regenerador, en el registro se transforma en PCM paralela, se aplica luego al convertidor digital-analógico y por último se pasa por un filtro pasabajo, como se muestra en la Fig. 2.13(b). Sin embargo, en el comercio se puede conseguir circuitos integrados (por ejemplo, el MM58100 o el MM58150) en los cuales el registro está incluido en el circuito integrado ("chip").

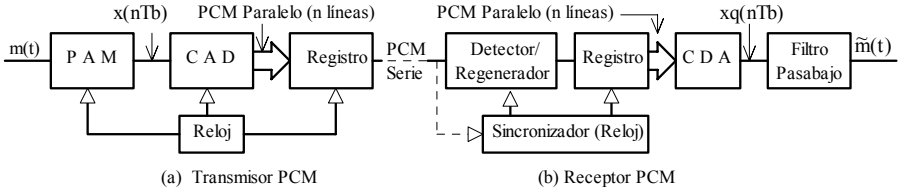


Fig. 2.13. Sistema de Transmisión y Recepción PCM

En la Fig. 2.14 se muestra el proceso completo de generación de señales PCM.

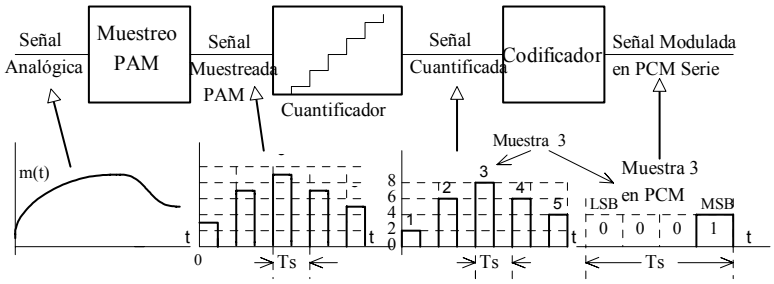


Fig. 2.14. Mecanismo de generación de señales PCM.

2.5. TECNICAS DE MODULACION DIGITAL CON PORTADORA MODULADA

2.5.1. Introducción

Las señales producidas mediante los métodos de codificación de impulsos (PCM), así como las señales de datos de terminales digitales y dispositivos afines, generalmente no se transmiten a gran distancia en la forma de señal de banda de base, es decir, tal como se generan, sino que se transmiten en forma de una señal modulada en forma analógica, en el sentido visto en la Sección 2.2; en efecto, los impulsos o dígitos binarios modulan una portadora sinusoidal cuya frecuencia es compatible con el medio de transmisión utilizado; este tipo de transmisión se denomina "Transmisión Binaria mediante Portadora Modulada". Por ejemplo, en un enlace de HF la frecuencia de portadora puede ser de unos cuantos megahertz, pero en un enlace de microondas la frecuencia de portadora puede alcanzar la gama de los gigahertz. Si la transmisión se efectúa por un canal telefónico de 4 kHz nominal de ancho de banda, la frecuencia de portadora está entre 1 y 2 kHz.

La modulación digital se realiza en un dispositivo denominado "MODEM" (de las palabras **MO**dulador y **DEM**odulador) en el cual los dígitos binarios modulan la amplitud, la frecuencia o la fase de una señal sinusoidal, la portadora. Como la señal binaria de entrada es una secuencia de impulsos o dígitos binarios (de dos estados), las magnitudes moduladas tomarán también dos valores, de ahí que a estos procesos se los denomina también "Técnicas de Modulación Binaria".

El "canal" puede ser un canal telefónico, conductores metálicos (par trenzado o cable coaxial), fibras ópticas, un canal de radio (HF, microondas, etc.) o rayos infrarrojos. El filtro $H_c(f)$ y el filtro de entrada al receptor están incorporados en el Módem y su diseño está integrado al mismo de acuerdo con la aplicación y normas correspondientes.

Las formas básicas de la modulación binaria mediante portadora modulada son:

1. La Modulación Binaria de Amplitud (Amplitude-Shift Keying, ASK)
2. La Modulación Binaria de Frecuencia (Frequency-Shift Keying, FSK)
3. La Modulación Binaria de Fase (Phase-Shift Keying, PSK)
4. La Modulación Binaria Diferencial de Fase (Differential PSK, DPSK)

Hay otros esquemas más avanzados de modulación digital pero no los trataremos aquí. Para más información ver, por ejemplo, [Benedetto y otros, 1987; Roden M., 1988, etc.].

En la Fig. 2.15 se muestra los modelos para la transmisión y recepción de señales binarias mediante portadora modulada.

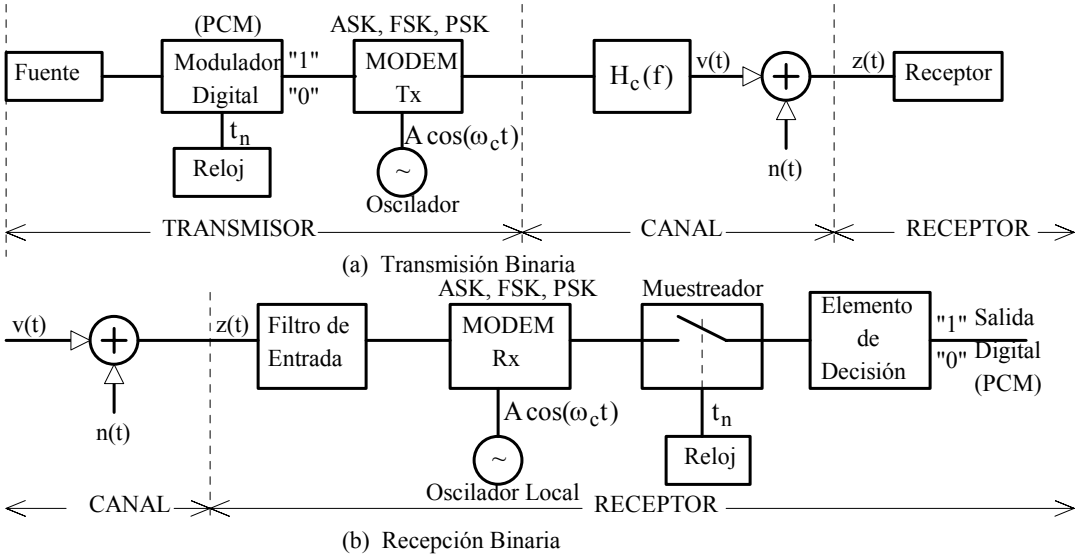


Fig. 2.15. Transmisión y Recepción Binaria mediante Portadora Modulada.

En la Fig. 2.16 se muestra la forma de las señales moduladas ASK, FSK y PSK para la secuencia binaria dada. La forma de la señal DPSK básicamente es idéntica a la de PSK.

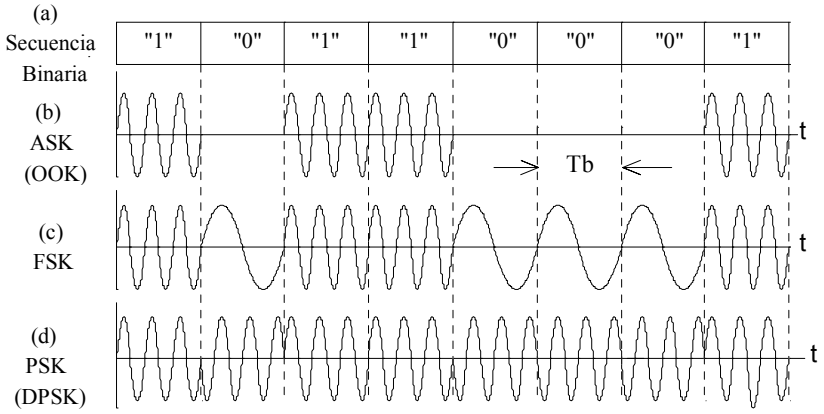


Fig. 2.16. Señales Binarias Moduladas ASK, FSK y PSK (DPSK).

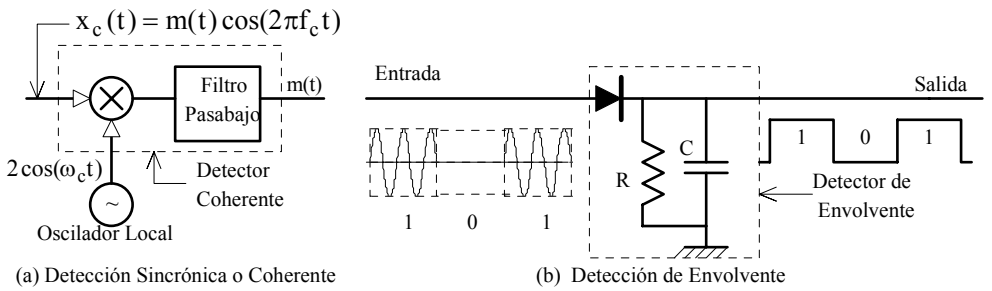
2.5.2. Demodulación y Sincronización de Señales Binarias Moduladas

Métodos de Demodulación

Esencialmente hay dos métodos comunes de demodulación o detección de señales moduladas con portadora sinusoidal:

1. La “Demodulación Sincrónica o Coherente”
2. La “Detección de Envolvente”

La demodulación o detección sincrónica o coherente consiste simplemente en multiplicar la señal modulada recibida por la portadora, generada localmente, y mediante filtrado pasabajo se obtiene la señal original portadora de información. Este proceso se muestra en la Fig. 2.17(a).



(a) Detección Sincrónica o Coherente (b) Detección de Envolvente

Fig. 2.17. Métodos de Demodulación o Detección de Señales Moduladas

Es necesario que la frecuencia y la fase de la portadora local en el receptor sean idénticas a las de la portadora en el transmisor. Si la frecuencia y la fase son diferentes, se produce una fuerte atenuación que puede hacer desaparecer el mensaje. Para evitar esta atenuación se utiliza dispositivos de sincronización en el receptor a fin de lograr la coherencia entre las dos portadoras.

Hay que hacer notar que con osciladores de gran precisión puede mantenerse la identidad entre las dos frecuencias, pero el sincronismo de fase es muy difícil de alcanzar, particularmente en transmisión a grandes distancias. La información de fase se puede obtener a partir de una portadora piloto superpuesta a la señal modulada que, una vez recuperada mediante filtrado, puede utilizarse para sincronizar el oscilador local. Como veremos más adelante, hay también circuitos especiales para lograr la sincronización a partir de la señal recibida, pero esta solución encarece y complica el sistema; sin embargo, la demodulación sincrónica o coherente se utiliza pues es superior, en presencia de ruido, a la detección de envolvente, como veremos posteriormente.

La demodulación por detección de envolvente se efectúa con el sencillo circuito mostrado en la Fig. 2.17(b). Con la detección de envolvente se evita los problemas de sincronización de fase y de frecuencia de la detección coherente; sin embargo, la detección de envolvente no se puede aplicar en sistemas de modulación de fase, porque el proceso de detección de envolvente elimina la fase de la señal. Como su nombre lo indica, la salida del detector representa la envolvente positiva (o negativa, según la polaridad del diodo) de la señal de entrada. La constante de tiempo RC debe ser entonces lo suficientemente grande para seguir los picos de la señal de entrada, pero lo suficientemente pequeña comparada con un período T_b de la señal binaria.

Sincronización de Portadora y de Temporización

La demodulación coherente de las señales ASK, FSK y PSK requiere el conocimiento de la frecuencia y la fase exactas de la portadora. La frecuencia puede aproximarse tanto como se quiera pues con osciladores a cristal de gran precisión se puede

mantener la frecuencia con una gran estabilidad; en cambio, el desfase entre los osciladores del transmisor y del receptor puede ser grande, sobretodo cuando los módems inician una transmisión. En estos casos los módems están desfasados y necesitan un período inicial, antes de transmitir información, para sincronizar sus osciladores; esto se lleva a cabo mediante la transmisión de secuencias de sincronización conocidas ("training secuences"). Este período se conoce con el nombre de "tiempo o fase de adquisición". Al finalizar la fase de adquisición los osciladores quedan "enganchados" en fase y en frecuencia, y la transmisión de información puede comenzar. Durante la transmisión es necesario mantener el desfase entre los osciladores dentro de ciertos límites específicos; esta operación se conoce como la "fase de seguimiento o de rastreo".

El receptor debe poseer entonces dispositivos de sincronización tanto de portadora como de temporización. En efecto, hay que tener en cuenta que los intervalos de reloj T_b también necesitan sincronización para poder detectar la presencia o ausencia de impulsos recibidos ya demodulados. En consecuencia, en el receptor no solamente se efectúa la sincronización de fase y de frecuencia, sino también la sincronización de señalización o de temporización.

En un sistema de transmisión digital a menudo se necesita diferentes niveles de sincronización. Como ejemplo, consideremos un sistema PCM/TDM/PSK; en este caso son necesarios cuatro niveles de sincronización: sincronización de trama, sincronización de canal, sincronización de dígitos y sincronización de portadora, los cuales se muestran en la Fig. 2.18(a). La localización típica de los sincronizadores de portadora y de temporización se muestra en la Fig. 2.18(b).

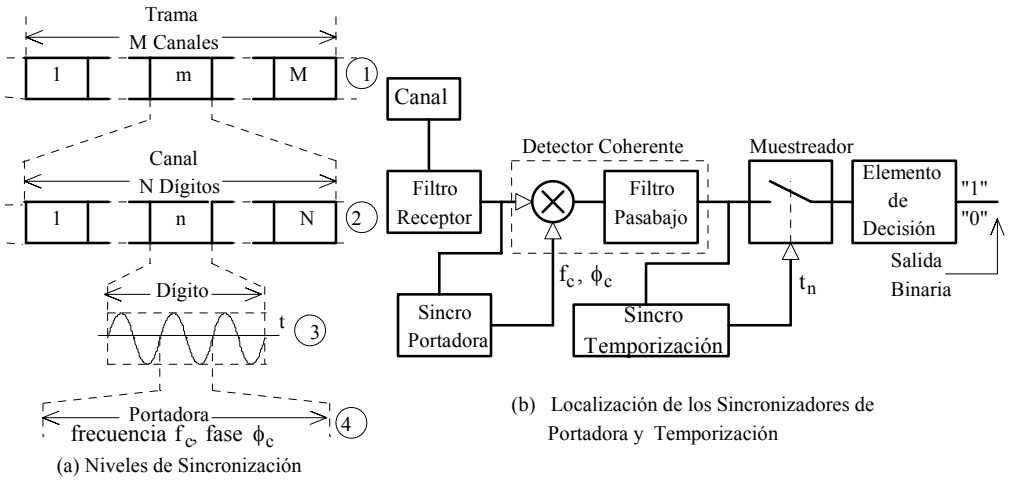


Fig. 2.18. Sincronización de Portadora y Temporización.

En la Fig. 2.19 se muestran dos circuitos de sincronización de portadora muy utilizados en la práctica: el sincronizador cuadrático y el denominado Lazo de Costas. Estos circuitos de sincronización de portadora no solamente se utilizan en los sistemas digitales sino también en los sistemas de modulación de señales continuas.

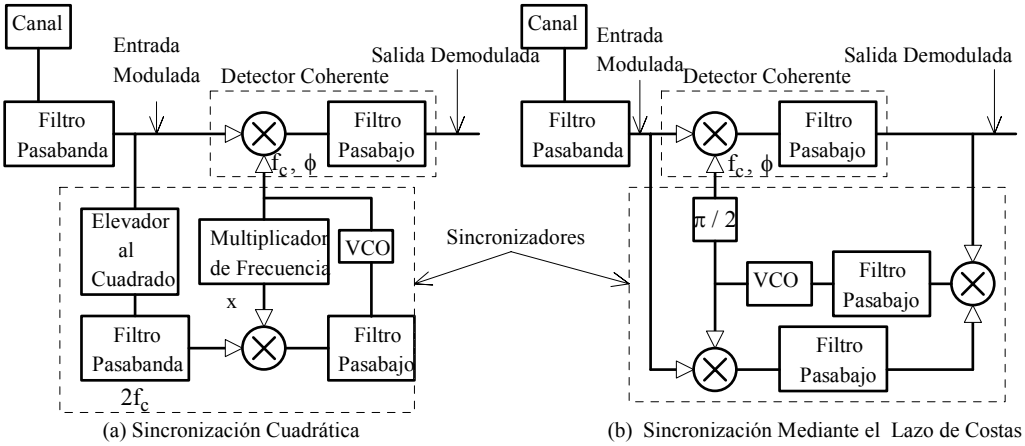


Fig. 2.19. Circuitos de Sincronización de Portadora.

En cuanto a la temporización, el proceso de extracción de la temporización se efectúa operando sobre la señal demodulada. La salida del sincronizador de temporización será una señal periódica (señal de reloj) de período T_b y con una fase tal que indique los instantes de muestreo dentro de cada intervalo de duración T_b.

En la Fig. 2.20 se muestra un circuito de sincronización de temporización.

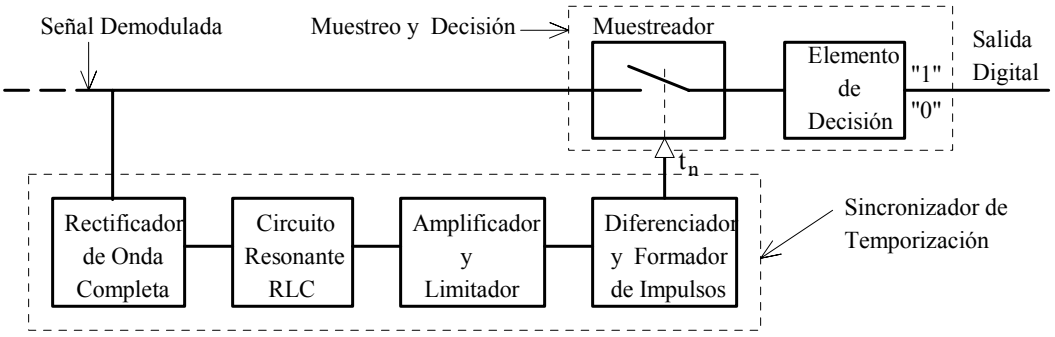


Fig. 2.20. Sincronización de Temporización.

El análisis detallado de los circuitos de sincronización anteriores se puede encontrar en cualquier texto de circuitos electrónicos [Miller, 1993; Gardner y Lindsey, 1980; etc.].

2.5.3. Modulación Binaria de Amplitud (ASK)

En la modulación binaria de amplitud ASK, la amplitud de la portadora sinusoidal se conmuta entre dos valores en respuesta al dígito binario de entrada. Por ejemplo, el estado “0” se puede transmitir como una amplitud de 0 volts, mientras que el estado “1” se transmite como una señal sinusoidal de amplitud fija A volts. La señal ASK resultante consiste en impulsos modulados, llamados “Marcas”, que representan el estado “1”, y “Espacios” que representan el estado “0”, como se muestra en la Fig. 2.16(b) para la

secuencia binaria dada. Este tipo de modulación se conoce también con el nombre de "modulación OOK (On-Off Keying)".

La señal ASK tiene entonces la forma

$$x_{ASK}(t) = A\sum_{n=-\infty}^{\infty} b_i \cdot \cos(2\pi f_c t + \phi_c)\Pi(\frac{t - nT_b}{T_b}) \qquad (2.25)$$

donde $b_i = \begin{cases} 1 & \text{si se transmite un "1"} \\ 0 & \text{si se transmite un "0"} \end{cases}$

A y f_c son la amplitud y frecuencia de la portadora, respectivamente; T_b es el intervalo de señalización y ϕ_c un desfase inicial constante. En general, se verifica que $f_c >> f_b = \frac{1}{T_b}$, donde f_b es la frecuencia de señalización, la cual es igual numéricamente a la velocidad de modulación $V_b = 1/T_b$, expresada en baudios.

La operación de demodulación consiste esencialmente en una toma de decisiones en los instantes de muestreo t_n en relación con el valor o estado ("1" ó "0") transmitido. Esta decisión reposa sobre un criterio más o menos elaborado, como veremos más adelante.

Ancho de Banda y Relaciones S/N en Sistemas ASK

La señal ASK se puede escribir en la forma (haciendo $\phi_o = 0$),

$$x_{ASK}(t) = A(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \qquad (2.26)$$

donde $$A(t) = A\sum_{n=-\infty}^{\infty} b_i \cdot \Pi(\frac{t - nT_b}{T_b}) \qquad (2.27)$$

es una secuencia aleatoria binaria unipolar NRZ (sin retorno a cero) de amplitud A.

Se demuestra [Briceño, 2004] que la función de autocorrelación y la densidad espectral de potencia de la secuencia aleatoria A(t) son, respectivamente,

$$R_A(\tau) = \frac{A^2}{4}[1 + \Lambda(\frac{\tau}{T_b})] \Leftrightarrow S_A(f) = \frac{A^2}{4}[\delta(f) + T_b \operatorname{sinc}^2(\frac{f}{f_b})]$$

De la expresión (2.26), la potencia promedio de la señal $x_{ASK}(t)$ es

$< x_{ASK}^2(t) >= \frac{1}{2} < A^2(t) >$. Pero como $< A^2(t) >= R_A(\tau)|_{\tau=0} = \frac{A^2}{2}$, entonces

$$< x_{ASK}^2(t) >= \frac{A^2}{4}$$

La potencia promedio de entrada o "potencia de portadora" de una señal ASK a la entrada del detector será

$$S_i = \frac{A^2}{4} \qquad (2.28)$$

Para calcular la potencia de ruido es necesario conocer las características espectrales de la señal ASK.

De acuerdo con el teorema de la modulación para señales de potencia, la densidad espectral de potencia $S_{ASK}(f)$ de $x_{ASK}(t)$ será

$$S_{ASK}(f) = \frac{1}{4}[S_A(f+f_c) + S_A(f-f_c)]$$

$$S_{ASK}(f) = \frac{A^2}{16}[\delta(f+f_c) + \delta(f-f_c)] + \frac{A^2T_b}{16}\left[\sin c^2(\frac{f+f_c}{f_b}) + \sin c^2(\frac{f-f_c}{f_b})\right] \qquad (2.29)$$

y tendrá la forma mostrada en la Fig. 2.21 (frecuencias positivas solamente).

En cuanto al ancho de banda en ASK, podemos considerarlo como la gama de frecuencias necesaria que comprende el lóbulo principal de $S_{ASK}(f)$, Fig. 2.21. Por consiguiente,

$$B = 2f_b = \frac{2}{T_b} \qquad (2.30)$$

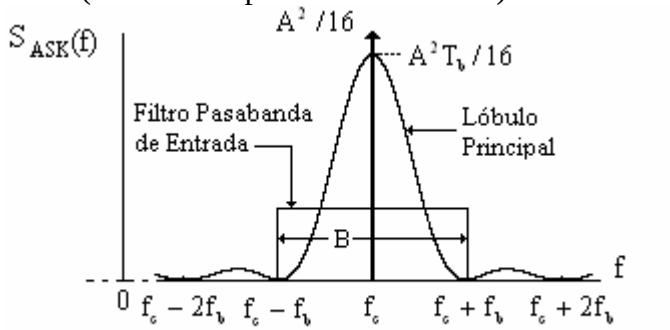


Fig. 2.21. Densidad Espectral de Potencia de Señales ASK

Este será entonces el ancho de banda del filtro pasabanda de entrada al receptor y, por supuesto, el ancho de banda mínimo del canal de transmisión. Este valor de B será utilizado en los cálculos de la Relación Señal/Ruido (S/N).

Se puede demostrar que la potencia contenida dentro del ancho de banda B es el 95% de la potencia total de la señal ASK, y que la mitad de esa potencia se consume en la transmisión de la portadora. Los sistemas ASK son sistemas de doble banda lateral y por lo tanto no son muy eficientes en cuanto a ancho de banda y consumo de potencia.

Si el ruido en el canal es blanco de densidad espectral $\eta/2$, la potencia promedio de ruido a la entrada del receptor será

$$N_i = B\eta = 2\eta f_b = \frac{2\eta}{T_b} \qquad (2.31)$$

y la relación S/N a la entrada del detector o “relación S/N de predetención”,

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{A^2}{4\eta B} = \frac{A^2T_b}{8\eta} \qquad (2.32)$$

Con el fin de comparar el comportamiento de los diferentes sistemas de modulación binaria sobre una referencia común, se define la "Relación Señal/Ruido Normalizada, γ" [Schwartz y otros, 1966] en la forma

$$\gamma = \frac{A^2 T_b}{2\eta} = \frac{A^2}{2\eta f_b} \tag{2.33}$$

donde A, f_b y η son parámetros comunes a todos los sistemas.

La relación S/N en ASK se puede escribir entonces en la forma

$$\left[\frac{S_i}{N_i}\right]_{ASK} = \frac{\gamma}{4} \tag{2.34a}$$

y en dB, $$[\gamma]_{ASK(dB)} = 6{,}02 \text{ dB} + \left[\frac{S_i}{N_i}\right]_{ASK(dB)} \tag{2.34b}$$

Rendimiento de Transmisión

Desde un punto de vista más general, la relación S/N en un sistema se puede definir a partir de parámetros comunes para cualquier esquema de modulación. En efecto, en un sistema binario la velocidad de información es $V_i = 1/T_b$ bps, y si E_b es la energía requerida para transmitir un dígito binario, entonces la potencia promedio de la señal se puede expresar en la forma $S_i = E_b/T_b = E_b V_i$. Nótese que E_b es diferente para cada esquema de modulación. Por otro lado, si B es el ancho de banda del sistema y $\eta/2$ la densidad espectral de ruido, la potencia promedio de ruido será $N = \eta B$ y la relación S/N se puede escribir en la forma

$$\frac{S_i}{N_i} = \frac{S_i}{\eta B} = \frac{V_i}{B} \cdot \frac{E_b}{\eta} = \eta_B \frac{S_i}{\eta f_b} \tag{2.35}$$

donde $\eta_B = V_i/B$ es el "rendimiento del canal respecto al ancho de banda" o "rendimiento de transmisión" y se expresa en bps/Hz; este rendimiento es una medida del ancho de banda requerido para una velocidad de información dada. Si V_i es la velocidad de información máxima en un canal, entonces se puede decir que $V_i = C$, donde C, la capacidad del canal, viene dada por la expresión (1.1) del Capítulo I. Asimismo, en la literatura a menudo se define la densidad η en la forma $\eta = N_o$, pero este valor N_o lo usaremos poco para no confundirlo con una potencia de ruido N_o.

Entonces, de las expresiones (1.1) y (2.35), podemos escribir

$$\eta_B = \log_2(1 + \eta_B \cdot \frac{E_b}{\eta}) = \log_2(1 + \eta_B \cdot \frac{E_b}{N_o}) \tag{2.36}$$

$$\eta_B = \log_2(1 + \eta_B \cdot \frac{S_i}{\eta f_b}) \tag{2.37}$$

En la expresión (2.36) la relación E_b/η o Eb/N_o se define como el "rendimiento de potencia del sistema", es decir, es una medida del consumo de potencia. Puesto que la expresión (2.36) ha sido deducida a partir de la "ecuación de Hartley-Shannon", ella expresa la relación máxima entre el rendimiento del ancho de banda y el rendimiento de potencia del sistema. Como veremos más adelante, la potencia S_i de las señales moduladas depende del sistema de modulación. Para el sistema ASK vimos que $S_i = A^2/4$, de modo que el rendimiento de transmisión (2.37) para el sistema ASK se puede escribir en la forma

$$\eta_B = \log_2(1 + \eta_B \cdot \frac{A^2}{4\eta f_b}) = \log_2(1 + \eta_B \cdot \frac{\gamma}{2}) \quad \text{en ASK binario} \qquad (2.38)$$

Más adelante demostraremos que la potencia promedio tanto en FSK como en PSK y DPSK es $S_i = A^2/2$; por lo tanto, el rendimiento de transmisión (2.37) en FSK, PSK y DPSK vendrá dado por

$$\eta_B = \log_2(1 + \eta_B \cdot \gamma) \quad \text{en FSK, PSK y DPSK binarios} \qquad (2.39)$$

En la Fig. 2.22 se grafica η_B vs λ en FSK, PSK y DPSK. Nótese que en FSK, PSK y DPSK, para la misma velocidad de transmisión y potencia de ruido, el rendimiento η_B aumenta al aumentar λ, es decir, para aumentos en la potencia de la señal de entrada.

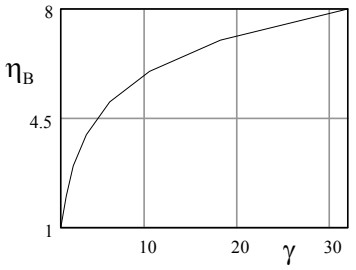


Fig. 2.22. Rendimiento de Transmisión en FSK, PSK y DPSK

Las expresiones (2.38) y (2.39) nos demuestran que el rendimiento de transmisión en FSK, PSK y DPSK es superior al de ASK; por ejemplo, un rendimiento de $\eta_B = 6$ bps/Hz se obtiene con $\gamma = 21$ en ASK, mientras que en FSK, PSK y DPSK $\gamma = 10{,}5$. Para un mismo rendimiento de transmisión, en FSK, PSK y DPSK se necesita la mitad de la potencia que en ASK.

Demodulación Coherente de Señales ASK

La razón principal para la utilización de la modulación ASK es su simplicidad, pero la demodulación coherente es poco utilizada debido a los problemas de sincronización de portadora y del ajuste del umbral. Sin embargo, vamos a explicar el comportamiento de la demodulación coherente más que todo para propósitos de comparación y fijación de conceptos.

En la Fig. 2.23 se muestra el diagrama de bloques de un receptor ASK con demodulación coherente.

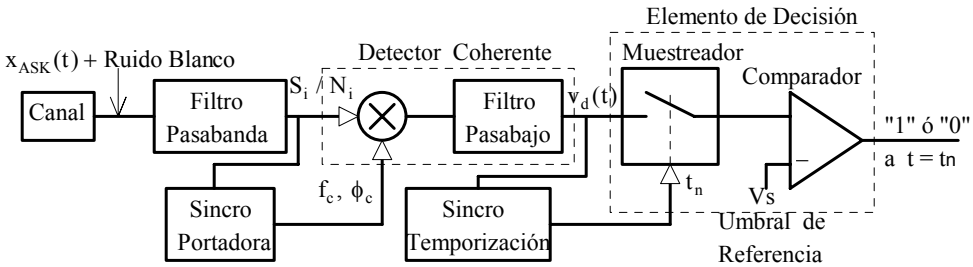


Fig. 2.23. Recepción Coherente en ASK.

A la entrada del detector coherente se tiene la señal ASK más ruido blanco pasabanda de banda angosta y densidad espectral de potencia $\eta/2$, es decir,

$$x_{ASK}(t) = A(t)\cos(2\pi f_c t + \phi_c)$$
$$n(t) = n_c(t)\cos(2\pi f_c t + \phi_c) - n_s(t)\,\mathrm{sen}(2\pi f_c t + \phi_c)$$

donde ϕ_c es un desfase constante.

Estas dos señales estarán presentes durante los intervalos en que ha sido transmitido un “1”. Si un “0” ha sido transmitido, solamente estará presente el ruido n(t).

En relación con la Fig. 2.23, el lector puede demostrar fácilmente que

$$v_d(t) = \begin{cases} \dfrac{k}{2}[A(t) + n_c(t)] & \text{si un "1" ha sido transmitdo} \\ \dfrac{k}{2} n_c(t) & \text{si un "0" ha sido transmitido} \end{cases}$$

donde k es una constante que depende de las características de los filtros.

En los instantes de decisión t_n se compara $v_d(t)$ respecto a un umbral de referencia V_s. El criterio de decisión será:

$$\text{Si en el instante } t = t_n, \quad \begin{cases} v_d(t_n) \geq V_s & \text{===> Un "1" ha sido transmitido} \\ v_d(t_n) < V_s & \text{===> Un "0" ha sido transmitido} \end{cases}$$

Como $n_c(t)$ es un ruido blanco pasabajo cuya amplitud puede tomar cualquier valor con una probabilidad no nula, se puede presentar errores en la decisión. Estos errores aparecerán si

$v_d(t_n) < V_s$ cuando un “1” fue transmitido: Error sobre los “1”

$v_d(t_n) \geq V_s$ cuando un “0” fue transmitido: Error sobre los “0”

Se ha demostrado [Schwartz y otros, 1966] que la probabilidad de error en sistemas ASK con umbral de referencia optimizado es

$$P_e = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{A^2T_b}{8\eta}}\right) = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{4}}\right) = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_o}}\right) \qquad (2.40)$$

donde γ se definió en la expresión (2.29) y erfc(…) es la "función error complementaria" definida en el Apéndice B. En la Fig. 2.35 se muestra la probabilidad de error P_e con el umbral óptimo normalizado, junto con las correspondientes a los otros sistemas de modulación binaria para efectos de comparación.

Asimismo, el umbral optimizado será

$$b_{on} = \sqrt{\frac{A^2T_b}{4\eta}} = \sqrt{\frac{\gamma}{2}} \qquad (2.41)$$

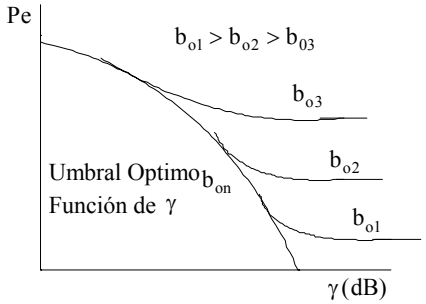


Fig. 2.24. Efecto del Umbral en ASK.

En la Fig. 2.24 se muestra el efecto del umbral sobre la probabilidad de error; para cada valor de γ hay un nivel de umbral normalizado, expresión (2.41), que produce la mínima probabilidad de error. Cuanto mayor es γ, mayor es el umbral. Si el umbral se mantiene constante e independiente de γ, la probabilidad de error decrecerá en función de γ hasta un cierto valor y se mantendrá constante no importa cuanto se aumente γ. Esta es una de las principales desventajas de los sistemas ASK, pues implica circuitos de ajuste del umbral en función de la relación S/N a la entrada (circuitos de control automático de ganancia).

Nótese que en el umbral óptimo los errores ocurren predominantemente no porque la suma [señal + ruido] excede el umbral, sino porque el ruido excede él solo el umbral.

Demodulación no Coherente de Señales ASK

En la Fig. 2.25 se muestra el diagrama de bloques de un receptor ASK no coherente.

En la detección no coherente de señales ASK no se requiere circuitos para sincronización de portadora, aunque sí de temporización. El detector de envolvente se muestra en la Fig. 2.17(b).

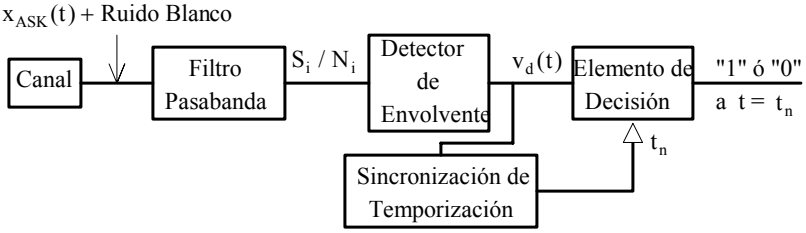


Fig. 2.25. Recepción no Coherente de Señales ASK.

El criterio de decisión es similar al caso de detección coherente.

En cuanto a la probabilidad de error, se demuestra [Schwartz y otros, 1966] que

$$P_e \approx \frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\gamma} - \frac{b_{on}}{\sqrt{2}}\right) + \exp(-\frac{b_{on}^2}{2})\right] \tag{2.42}$$

Para $\gamma > 2$ y con el umbral óptimo normalizado b_{on} , donde

$$b_{on} = \sqrt{2 + \frac{\gamma}{2}} \tag{2.43}$$

la expresión (2.42) se reduce a

$$P_e \approx \frac{1}{2}\exp(-\frac{\gamma}{4}) = \frac{1}{2}\exp(-\frac{E_b}{4N_o}) \tag{2.44}$$

La gráfica de P_e vs γ tiene la misma forma general de la Fig. 2.24 con las mismas desventajas debidas al ajuste del umbral. En la Fig. 2.35 se grafica (2.40) y (2.44) para efectos de comparación.

Se puede demostrar que para las mismas amplitud de portadora y densidad espectral de ruido, el comportamiento en ASK coherente es superior al de ASK no coherente; sin embargo, el receptor no coherente es mucho más simple y por eso este tipo de demodulación fue en su época el más utilizado.

Para obtener el comportamiento óptimo, el valor del umbral debe ser ajustado para cada valor de γ de acuerdo con las expresiones (2.41) y (2.43). Por otra parte, los filtros utilizados en el receptor deben ser descargados, mediante circuitos auxiliares, al final de cada intervalo de señalización a fin de reducir la interferencia intersímbolo. Aunque el circuito resultante ya no es un filtro lineal invariante en el tiempo, él actúa como tal entre los intervalos de descarga. Si la rapidez de descarga es alta, el ancho de banda del filtro ya no es tan crítico respecto a la interferencia intersímbolo. En general, estos filtros son "filtros óptimos o acoplados" y pueden utilizarse también en FSK y PSK/DPSK.

♣ Ejemplo 2.1

La palabra PI está codificada en ASCII siendo su velocidad de 1200 bps. Esta palabra se aplica a un modulador ASK cuya frecuencia de portadora es de 1200 Hz.

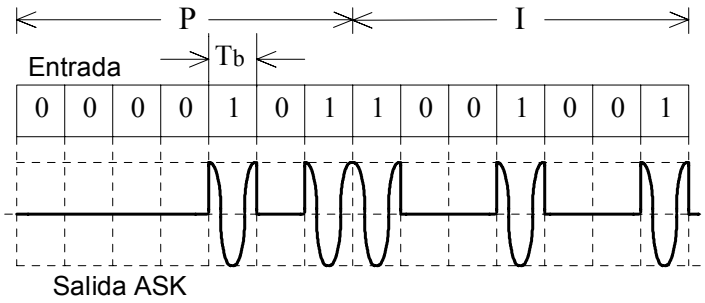
Vamos a dibujar la forma de onda a la salida del modulador

Solución:

En ASCII: P => 0000101; I => 1001001

Como la frecuencia de portadora es igual a la velocidad de transmisión, entonces

$T_b = T_c$. Un ciclo de f_c es igual a T_b. A la salida del modulador ASK la palabra PI tiene entonces la forma



♣

2.5.4. Modulación Binaria de Frecuencia (FSK)

En la modulación binaria FSK la frecuencia instantánea de la portadora se conmuta entre dos valores en respuesta al dígito binario de entrada. En la Fig. 2.16(c) se muestra la forma de una señal FSK.

El sistema de modulación binaria FSK se basó originalmente en el simple concepto de utilizar una señal telegráfica para modular la frecuencia de una portadora sinusoidal a fin de aumentar la relación S/N en el sistema. El sistema FSK más sencillo es aquel con modulación rectangular de frecuencia, amplitud constante y fase continua ("fase continua" significa que en la señal modulada no se producen discontinuidades cuando cambia la frecuencia).

Si $2f_d$ es la separación entre las dos frecuencias de transmisión, entonces la frecuencia instantánea en un intervalo T_b será $f_1 = f_c - f_d$ o $f_o = f_c + f_d$, donde f_c es la frecuencia de la portadora sin modular y f_d la desviación de frecuencia respecto a f_c; f_1 y f_o son las frecuencias de transmisión de un "1" o un "0", respectivamente. La señal FSK se puede representar entonces mediante la expresión

$$x_{FSK}(t) = A\sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos[2\pi(f_c + b_i \cdot f_d)t] \cdot \Pi(\frac{t - nT_b}{T_b}) \qquad (2.45)$$

donde $b_i = \begin{cases} -1 & \text{si se ha transmitido un "1"} \\ +1 & \text{si se ha transmitido un "0"} \end{cases}$

Nótese que la asignación de valores para f_c y f_d es, en general, arbitraria. Por ejemplo, el UIT-T establece que para transmisión de datos sobre un canal telefónico a una velocidad de modulación de 300 baudios utilizando un Módem V.21, las frecuencias a utilizar en el canal inferior son f_1 = 980 Hz y f_o = 1180 Hz (f_c = 1080 Hz y f_d = 100 Hz). Sin embargo, en el Módem Bell 103A, para la misma velocidad de modulación, las frecuencias de operación son f_o = 1070 Hz y f_1 = 1270 Hz (f_c = 1170 Hz y f_d = 100 Hz). Evidentemente, el módem normalizado UIT-T V.21 y el Bell 103A son equivalentes pero no son compatibles entre sí.

Ancho de Banda y Relaciones S/N en Sistemas FSK

La determinación exacta del ancho de banda de las señales FSK es bastante complicada [Lucky y otros, 1968; Benedetto y otros, 1987] y no trataremos de reproducirla aquí. Sin embargo, podemos aproximar el problema si consideramos que la señal FSK está formada fundamentalmente por dos señales ASK de frecuencias de portadora f_1 y f_o, respectivamente, y cuyos espectros ya conocemos, Fig. 2.21. En este caso, el espectro de la señal FSK es esencialmente la superposición de dos espectros ASK: uno centrado en f_1 y el otro centrado en f_o. Este enfoque permite también considerar al receptor FSK como la combinación de dos receptores ASK: uno para la recepción de los CEROS y el otro para la recepción de los UNOS, como se muestran en las Figs. 2.28 y 2.29. En la Fig. 2.26 se muestran las densidades espectrales correspondientes (frecuencias positivas solamente) y se definen algunos parámetros. Nótese que los espectros de los UNOS y de los CEROS no ocurren simultáneamente.

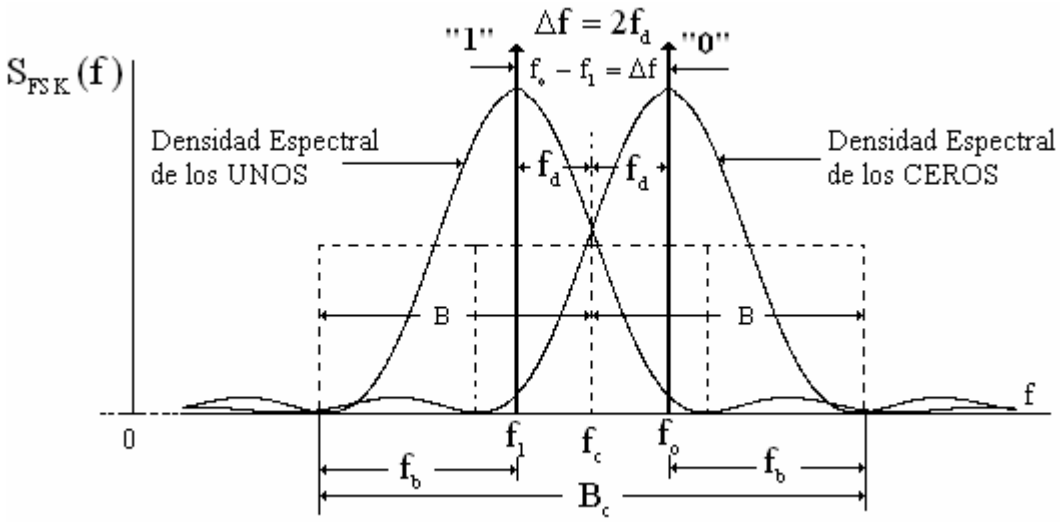


Fig. 2.26. Relaciones Espectrales en FSK.

El ancho de banda total B_c de la señal FSK se puede estimar a partir de la Fig. 2.26; en efecto, podemos definir $|f_o - f_1| = \Delta f = 2f_d$. Entonces,

$$f_c = f_1 + f_d = f_o - f_d \quad \text{y} \quad B_c = \Delta f + 2f_b = 2(f_d + f_b)$$

Sea $k = \dfrac{f_d}{f_b}$ y consideremos la Fig. 2.26. Si $k \ll 1$, entonces los espectros se acercan de tal manera que se produciría una gran interferencia mutua entre los dos canales "0" y "1". Si $\frac{1}{3} \le k < 1$ [Shanmugan, 1979], la separación entre los dos espectros aumenta y la interferencia mutua entre canales disminuye; el ancho de banda de cada canal se puede tomar como $B = (f_b + f_d)$. Si $k \ge 1$, los espectros estarán lo suficientemente separados, la interferencia mutua entre canales será mínima y el ancho de banda B de los canales "0" o "1" será $B = 2f_b$.

En resumen, para disminuir la distorsión de intermodulación producida por las colas de un espectro sobre la gama del otro espectro, se puede tomar $k \geq \frac{1}{3}$, aunque más adelante demostraremos que es preferible tomar $k \geq \frac{1}{2}$.

Principio de Ortogonalidad en Señales FSK

Se dice que dos funciones reales $s_1(t)$ y $s_o(t)$ son ortogonales, si dentro de un intervalo $(0, T_b)$ se verifica la integral $\int_0^{T_b} s_1(t)s_0(t)dt = 0$ para $s_1(t) \neq s_o(t)$.

En el caso binario, $s_1(t) = A\cos(2\pi f_1 t)$ y $s_0(t) = A\cos(2\pi f_0 t) = A\cos[2\pi(f_1 + \Delta f)t]$

Entonces, de la propiedad de ortogonalidad,

$$A^2 \int_0^{T_b} \cos(2\pi f_1 t)\cos[2\pi(f_1 + \Delta f)t]dt = 0$$

$$\frac{A^2}{2}\int_0^{T_b} \cos[2\pi(2f_1 + \Delta f)t]dt + \frac{A^2}{2}\int_0^{T_b} \cos(2\pi\Delta f \cdot t)dt = 0$$

Para que esta expresión se cumpla, las integrales deben ser cero en el intervalo $[0,T_b]$, es decir, debe verificarse, como se muestra en la Fig. 2.27, que el área neta de cada integral en un intervalo T_b cualquiera debe ser cero.

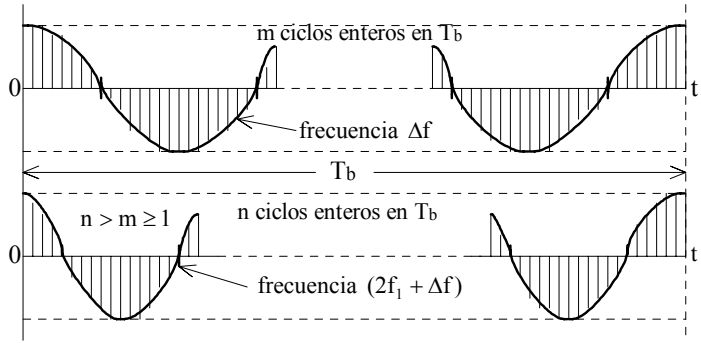


Fig. 2.27. Condiciones de Ortogonalidad en FSK.

Puede observarse, Fig. 2.27, que $\Delta f = \frac{m}{T_b}$ y $2f_1 + \Delta f = \frac{n}{T_b}$, donde m y n son enteros distintos de cero y n > m. Como $\Delta f = 2f_d$, entonces $f_d = m\frac{f_b}{2}$; asimismo, $2f_1 + 2f_d = \frac{n}{T_b} = nf_b$, y como $f_c = f_1 + f_d$, entonces $f_c = n\frac{f_b}{2}$. En la misma forma podemos demostrar que $f_1 = (n-m)\frac{f_b}{2}$ y $f_0 = (n+m)\frac{f_b}{2}$.

Para una velocidad de transmisión V_b bps o frecuencia de señalización f_b Hz, el principio de ortogonalidad en FSK binario establece entonces que:

Para dos enteros n y m tal que $n > m \geq 1$, se tiene

$$f_d = m\frac{f_b}{2}; \quad f_c = n\frac{f_b}{2}; \quad f_1 = (n-m)\frac{f_b}{2}; \quad f_0 = (n+m)\frac{f_b}{2}$$

En este caso se dice que la separación entre las frecuencias es ortogonal. Asimismo, el ancho de banda B_c del canal será $B_c = 2f_b + mf_b = (m + 2)f_b$.

La mínima separación entre las frecuencias se verifica para m = 1. En este caso el ancho de banda mínimo del canal será $B_c = 3f_b$. Esto también se puede interpretar diciendo que, bajo las condiciones de ortogonalidad, la máxima frecuencia de señalización en un canal de ancho de banda B_c es $f_b = \frac{B_c}{3}$. Esto puede deducirse directamente de la Fig. 2.26.

La ortogonalidad permite estimar la máxima velocidad de transmisión por un canal de un ancho de banda dado sin efectos interferentes entre las señales.

♣ Ejemplo 2.2

Las frecuencias de los módems prácticos pocas veces cumplen con las condiciones de ortogonalidad. Por ejemplo, en el MODEM UIT-T V.23 se tiene

$f_b = 600$ Hz; $f_d = 200$ Hz; $f_c = 1500$; $f_1 = 1300$ Hz; $f_0 = 1700$ Hz. De donde,

$$m = \frac{2f_d}{f_b} = \frac{400}{600} = \frac{2}{3} \neq \text{entero}; \quad n = \frac{2f_c}{f_b} = \frac{3000}{600} = 5 \text{ entero}. \text{ Generalmente } n >> m$$

Puesto que m no es entero, las señales $s_1(t)$ y $s_0(t)$ del MODEM V.23 no son perfectamente ortogonales. Por ejemplo, si hacemos m = 1 y dejamos n = 5 con la misma frecuencia de señalización $f_b = 600$ Hz, las frecuencias que satisfacen las condiciones de ortogonalidad son:

$f_c = 1500$ Hz; $f_d = 300$ Hz; $f_1 = 1200$ Hz y $f_0 = 1800$ Hz

♣

Puesto que $k = \frac{f_d}{f_b}$ y $m = \frac{2f_d}{f_b}$, entonces $k = \frac{m}{2}$

En el caso especial para el cual k = 1/2 (para m = 1), la separación entre las frecuencias es la mínima ortogonal; en este caso la separación mínima entre las frecuencias de transmisión es igual a la velocidad de señalización, es decir, $\Delta f = f_b = 2f_d$; la separación ortogonal es muy utilizada en transmisión FSK m-aria. En transmisión a altas frecuencias, por ejemplo, en microondas, $k >> 1$ y $B = 2f_b$.

El ancho de banda aproximado total de la señal FSK será entonces

$$B_c = 2(f_b + f_d) = 2(k+1)f_b = (m+2)f_b \quad \text{para} \quad k = \frac{f_d}{f_b} \geq \frac{1}{2} \text{ y } m \geq 1 \qquad (2.46)$$

B_c es el ancho de banda mínimo del canal de transmisión y, por supuesto, del filtro de línea de entrada al receptor. Este filtro deberá estar centrado a la frecuencia $f_c = \dfrac{f_o + f_1}{2}$.

Asimismo, el ancho de banda de los canales individuales "0" ó "1" será

$$B = \begin{cases} (f_b + f_d) = (k+1)f_b & \text{para } k < 1 \\ 2f_b & \text{para } k \geq 1 \end{cases} \qquad (2.47)$$

Este ancho de banda es el utilizado para el cálculo de la relación S/N.

Consideremos ahora la relación S/N en FSK. Como una señal FSK se puede considerar como la superposición de dos sistemas ASK en donde la amplitud de las portadoras es A, entonces la potencia promedio de la señal FSK será de dos veces la potencia promedio de la señal ASK, es decir, $< x^2_{FSK}(t) >= 2 < x^2_{ASK}(t) >= A^2 / 2$. En este caso, procediendo como en el caso ASK, obtenemos la relación S/N de predetección:

$$\text{Cuando } k < 1, \quad B = f_b + f_d, \qquad \left[\frac{S_i}{N_i}\right]_{FSK} = \frac{A^2}{2(f_b + f_d)\eta} \qquad (2.48)$$

$$\text{Cuando } k \geq 1, \quad B = 2f_b, \qquad \left[\frac{S_i}{N_i}\right]_{FSK} = \frac{A^2}{2\eta B} = \frac{A^2 T_b}{4\eta} = \frac{\gamma}{2} \qquad (2.49)$$

$$\text{también} \quad [\gamma]_{FSK(dB)} = 3{,}01 \text{ dB} + \left[\frac{S_i}{N_i}\right]_{FSK(dB)} \qquad (2.50)$$

Nótese que la potencia recibida en FSK es 3 dB mayor que en ASK; esta es una ventaja muy significativa a favor del sistema FSK.

Demodulación Coherente de Señales FSK

En la Fig. 2.28 se muestra el diagrama de bloques de un receptor FSK coherente.

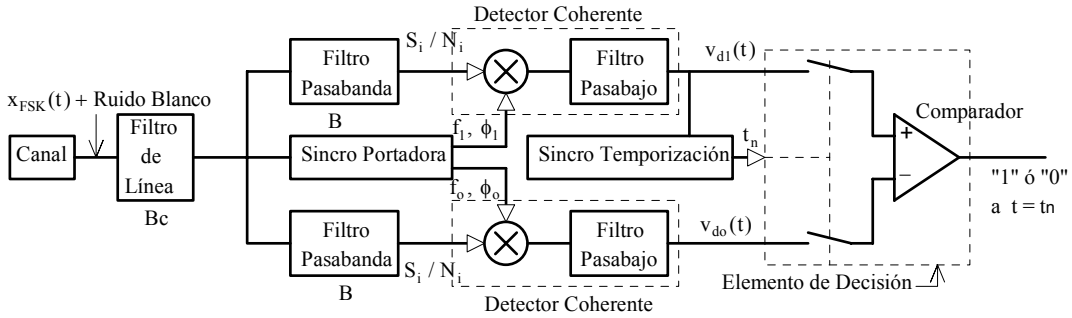


Fig. 2.28. Recepción Coherente en FSK.

El criterio de detección es el siguiente:

$$\text{Si en el instante} \quad t = t_n, \quad \begin{cases} v_{d1}(t_n) \geq v_{do}(t_n) & \text{===> un "1" ha sido transmitido} \\ v_{d1}(t_n) < v_{do}(t_n) & \text{===> un "0" ha sido transmitido} \end{cases}$$

Habrá error en caso contrario

Se demuestra [Schwartz y otros, 1966] que la probabilidad de error es

$$P_e = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}\right) = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_o}}\right) \tag{2.51}$$

En la Fig. 2.35 se grafica esta expresión.

Si se compara este resultado con el correspondiente en ASK coherente, vemos que si las condiciones de amplitud de portadora, ancho de banda y densidad espectral de ruido son las mismas, entonces la relación $[S_i / N_i]_{FSK}$ es 3 dB mayor que la relación $[S_i / N_i]_{ASK}$, pero las probabilidades de error son muy distintas. Sin embargo, si las probabilidades de error son las mismas en ambos sistemas, resulta que las relaciones $[S_i / N_i]$ en ASK coherente y en FSK coherente son iguales, pero en FSK no se necesita un umbral de detección. Esta es otra ventaja del sistema FSK sobre el sistema ASK.

En general, la demodulación coherente de señales FSK casi no se emplea y el estudio somero que hemos presentado aquí es más que todo para reafirmar conceptos y para efectos de comparación.

Demodulación no Coherente de Señales FSK

En la Fig. 2.29 se muestra el diagrama de bloques de un receptor FSK no coherente.

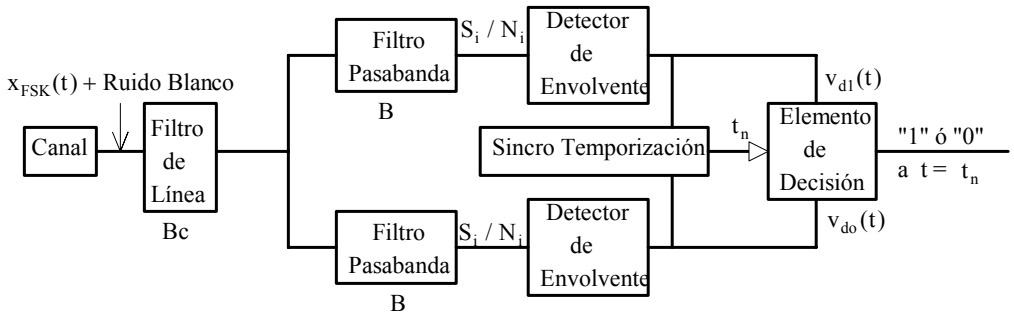


Fig. 2.29. Recepción no Coherente en FSK.

El criterio de decisión es el mismo que en el caso de detección coherente. Por ejemplo, si se ha transmitido un “1”, la decisión será correcta si $v_{d1}(t_n) \geq v_{do}(t_n)$. Si esta desigualdad se invierte, entonces se producirá un error. Nótese que $v_{d1}(t)$ y $v_{do}(t)$ son las envolventes de las señales filtradas y como tales serán afectadas por el ruido aditivo. Es lógico suponer entonces que cuanto mayor sea la relación S/N a la entrada de los detectores

de envolvente, más confiable será la decisión. Esto se logra cuando los filtros pasabanda de los canales “0” ó “1” son filtros óptimos.

En cuanto a la probabilidad de error, se demuestra [Schwartz y otros, 1966] que

$$P_e = \frac{1}{2}\exp(-\frac{\gamma}{2}) = \frac{1}{2}\exp(-\frac{E_b}{2N_o}) \qquad (2.52)$$

En la Fig. 2.35 se grafica esta expresión.

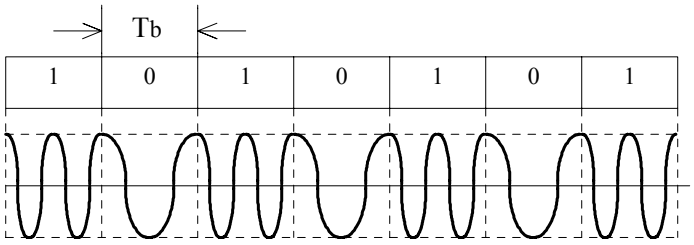
Nótese que si se compara esta expresión con la correspondiente en ASK no coherente, se ve que para la misma probabilidad de error en ambos sistemas las relaciones $[S_i / N_i]_{ASK}$ y $[S_i / N_i]_{FSK}$ son iguales. La desventaja más significativa del sistema ASK no coherente es la necesidad de optimizar el umbral de detección para cada valor de la relación $[S_i / N_i]_{ASK}$, mientras que este problema no existe en FSK.

♣ Ejemplo 2.3

La letra U está codificada en ASCII, siendo su velocidad de 1200 bps. Esta letra se aplica a un modulador FSK donde f_0 = 1200 Hz y f_1 = 2400 Hz; vamos a dibujar la forma de onda a la salida del modulador.

Solución:

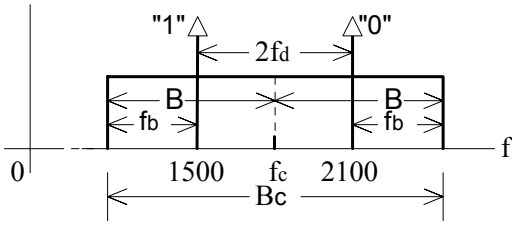
En ASCII: U => 1010101 . También, f_0 es igual a la velocidad de transmisión a la entrada del modulador; por lo tanto, un ciclo de f_0 es igual a un intervalo T_b. La salida del modulador FSK tendrá la forma



♣

♣ Ejemplo 2.4

Sobre un canal telefónico se transmite datos binarios en FSK. El ancho de banda útil del canal es de 3 kHz; las frecuencias de transmisión son f_1 = 1500 Hz y f_0 = 2100 Hz, como se muestra en la figura. Se utiliza un módem que trabaja a una velocidad de modulación de 300 baudios. La relación S/N en el canal es de 6,021 dB y la



densidad espectral de potencia de ruido es igual a 10^{-8} W/Hz.

Vamos a determinar la desviación de frecuencia, la frecuencia de portadora, el ancho de banda del filtro de entrada, el ancho de banda de los filtros de canal, la potencia de entrada y la probabilidad de error tanto en coherente como en no coherente. Verificar también si la separación de las frecuencias cumple con las condiciones de ortogonalidad.

Solución:

B_c = 3 kHz; f_1 = 1500 Hz; f_0 = 2100 Hz; f_b = 300 Hz

$\frac{S_i}{N_i} = 6,021$ dB = 4; η=2x10^{-8} W/Hz

De la figura anterior, f_d = (2100 – 1500)/2 = 300 Hz

Filtro de entrada, $B_c = 2(f_b + f_d)$ = 1200 Hz

Filtro de canal, $B = 2f_b$ = 2x300 = 600 Hz

En FSK: $\gamma = 2\left[\frac{S_i}{N_i}\right]_{FSK} = 8$

$$\gamma = \frac{A^2}{2\eta f_b} \therefore \; A=\sqrt{2\eta f_b \gamma} = \sqrt{2x2x10^{-8}x300x8} = 9,8 \text{ mV}$$

La potencia de entrada será $< x_{FSK}^2(t) >= \frac{A^2}{2} = \frac{(9,8x10^{-3})^2}{2} = 0,048$ mW

Probabilidad de error: En Coherente, $P_e = \frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}) = 2,339x10^{-3}$

En No Coherente, $P_e = \frac{1}{2}\exp(-\frac{\gamma}{2}) = 9,158x10^{-3}$

Veamos si cumple con las condiciones de ortogonalidad.

$m = \frac{2f_d}{f_b} = \frac{2x300}{300} = 2$ entero; $n=\frac{2f_c}{f_b} = 12$ entero

Puesto que m y n son enteros y n > m, este módem cumple con las condiciones de ortogonalidad.

♣ Ejemplo 2.5.

Sea el mismo canal telefónico del ejemplo anterior, donde B_c = 3kHz, S_i/N_i = 4 y $\eta = 2x10^{-8}$ W/Hz

Determine la máxima velocidad de transmisión en condiciones de ortogonalidad, la desviación de frecuencia, la frecuencia de portadora, las frecuencias de los UNOS y los

CEROS, el ancho de banda de los filtros de canal, la potencia de entrada y la probabilidad de error tanto en coherente como en no coherente.

Solución:

En condiciones de ortogonalidad, la máxima velocidad de transmisión por un canal de ancho de banda B_c se tiene cuando m = 1 y k = ½, es decir, cuando $B_c = 3f_b$. Entonces,

$$f_b = \frac{B_c}{3} = 1000 \text{ Hz}; \quad V_b = 1000 \text{ bps}; \quad f_d = \frac{f_b}{2} = 500 \text{ Hz}$$

La frecuencia de portadora f_c debe quedar centrada en el canal. Puesto que $f_c = n\frac{f_b}{2}$, la frecuencia de portadora quedará centrada en el canal cuando n = 3. En este caso, $f_c = \frac{3}{2}f_b = 1500$ Hz.

$$f_1 = f_c - f_d = 1000 \text{ Hz}; \qquad f_0 = f_c + f_d = 2000 \text{ Hz}$$

Filtros de canal, $B = (k+1)f_b = \frac{3}{2}f_b = 1500$ Hz

En FSK, $\gamma = 2\left[\frac{S_i}{N_i}\right]_{FSK} = 8$

$$\gamma = \frac{A^2}{2\eta f_b} \therefore \quad A = \sqrt{2\eta f_b \gamma} = \sqrt{2x2x10^{-8}x1000x8} = 17{,}9 \text{ mV}$$

La potencia de entrada será $< x_{FSK}^2(t) >= \frac{A^2}{2} = \frac{(17{,}9x10^{-3})^2}{2} = 0{,}1602$ mW

Probabilidad de error: En Coherente, $P_e = \frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{\frac{\gamma}{2}}) = 2{,}339x10^{-3}$

En No Coherente, $P_e = \frac{1}{2}\exp(-\frac{\gamma}{2}) = 9{,}158x10^{-3}$

En este caso se ha hecho un uso más eficiente del canal: la velocidad de transmisión y la potencia de entrada han aumentado 3,33 veces. Nótese que las probabilidades de error no han variado.

2.5.5. Modulación Binaria de Fase (PSK)

En la modulación PSK, la fase de la portadora sinusoidal se conmuta entre dos valores de acuerdo con el dígito binario recibido. Un desfase de 180° es una selección conveniente porque simplifica los circuitos de modulación y de demodulación, por lo tanto es el más utilizado.

Hay dos tipos principales de modulación binaria de fase que dependen de si la demodulación es o no coherente. El primer tipo es la modulación de fase propiamente dicha

(PSK), mientras que el segundo tipo es la "Modulación Binaria Diferencial de Fase (DPSK)". Nótese que cuando se dice que la demodulación en DPSK no es coherente, esto no quiere decir que la demodulación pueda efectuarse con detección de envolvente, pues el detector de envolvente elimina toda la información de fase, que en DPSK es justamente el soporte de la información.

La señal PSK tiene la forma

$$x_{PSK}(t) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos(2\pi f_c t - \phi_i) \cdot \Pi(\frac{t - nT_b}{T_b}) \qquad (2.53)$$

donde $\phi_i = \begin{cases} 0 & \text{si se ha trasmitido un "1"} \\ \pi & \text{si se ha transmitido un "0"} \end{cases}$

En la Fig. 2.11(d) se muestra la forma de las señales PSK. Las inversiones de fase pueden producir transientes indeseables pero, en general, las discontinuidades son alisadas por los filtros utilizados.

Demodulación de Señales PSK

La demodulación de señales PSK es esencialmente coherente. En la Fig 2.30 se muestra el diagrama de bloques de un receptor PSK. Nótese la semejanza con el receptor coherente ASK, Fig. 2.23, pero en el receptor PSK el elemento de decisión es mucho más sencillo pues se trata de determinar la polaridad (positiva o negativa) de $v_d(t)$ en el instante de decisión t_n.

El criterio de decisión adoptado es el siguiente:

Si en el instante $t = t_n$, $\begin{cases} v_d(t_n) \geq 0 & \text{===> Un "1" ha sido transmitido} \\ v_d(t_n) < 0 & \text{===> Un "0" ha sido transmitido} \end{cases}$

Habrá error en el caso contrario.

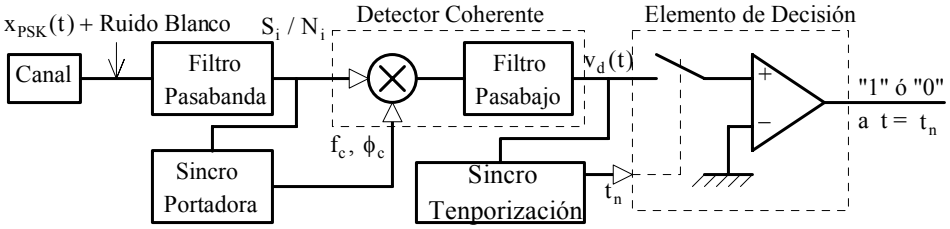


Fig. 2.30. Recepción Coherente en PSK.

La probabilidad de error [Schwartz y otros, 1966] es

$$P_e = \frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{\gamma}) = \frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}) \qquad (2.54)$$

Comparando estos valores respecto a ASK coherente, vemos que para la misma probabilidad de error, la relación $[S_i / N_i]_{PSK}$ es 3 dB menor que la relación $[S_i / N_i]_{ASK}$, o lo que es lo mismo, la potencia necesaria para transmitir una señal ASK coherente es el doble que la necesaria para transmitir la misma información en PSK. Esto es de particular importancia en sistemas en donde la potencia es el factor limitativo como, por ejemplo, en transmisión por microondas, en estaciones remotas o en satélites de telecomunicación.

Modulación Binaria Diferencial de Fase (DPSK)

En los sistemas de modulación binaria de fase, la referencia de fase para la demodulación se deriva a partir de la fase de la portadora en el intervalo de señalización anterior, y el receptor descodifica la información digital basada en esa diferencia de fase. Si las perturbaciones en el canal y otros factores como la estabilidad de los osciladores son lo suficientemente estables y no afectan la fase entre dos intervalos adyacentes, entonces la fase se puede codificar, no con respecto a un valor absoluto, por ejemplo, 0° para un "1" y 180° para un "0", que es el caso PSK, sino más bien por codificación diferencial en términos del cambio de fase entre intervalos sucesivos. Por ejemplo, 0° de desfase desde el intervalo anterior puede designar un "1", mientras que un desfase de 180° puede designar un "0". En la Fig. 2.31 se muestra el diagrama de bloques de un modulador DPSK, el cual es la combinación de un codificador diferencial y un modulador PSK.

En la Fig. 2.32 se muestra la forma de onda de las señales PSK y DPSK. Nótese que desde el punto de vista del canal, no hay ninguna diferencia entre la señal PSK y la señal DPSK, pero en DPSK hay una disminución en la complejidad de los circuitos de detección.

Nótese también que la codificación diferencial, en sí misma, se puede utilizar en cualquier sistema digital y no es privativa del sistema DPSK.

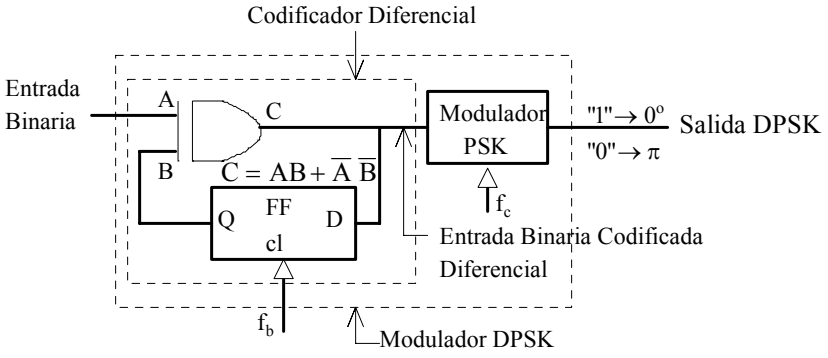


Fig. 2.31. Modulación DPSK.

En la Fig. 2.32 se muestra las formas de onda de las señales moduladas PSK y DPSK para la secuencia de entrada dada. Nótese que el número de transiciones en DPSK ha disminuido en relación con el número de transiciones en PSK; en efecto, en la corta secuencia de 10 dígitos binarios la señal PSK tiene 6 transiciones y al codificarla

diferencialmente el número de transiciones disminuye a cuatro. Como ya lo hemos señalado, las transiciones producen transientes indeseables que pueden perjudicar la sincronización de temporización y su disminución es muy deseable. Esta es otra ventaja del sistema DPSK sobre el sistema PSK. Para facilitar el dibujo de las formas de onda, en la Fig. 2.32 suponemos que la frecuencia de portadora es igual a la frecuencia de señalización, es decir, $f_c = f_b$.

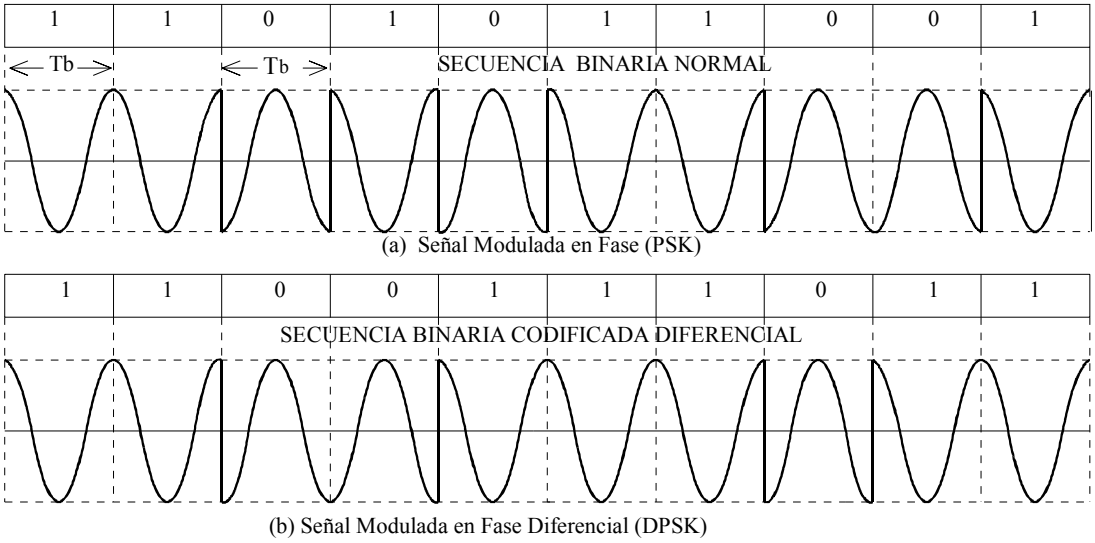


Fig. 2.32. Formas de las Señales Moduladas PSK y DPSK

En la Fig. 2.33 se muestra el mecanismo de codificación y descodificación diferencial tanto en el transmisor como en el receptor.

Transmisor	Secuencia Binaria de Entrada	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	
	Mensaje Codificado Diferencial	(1)	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
	Fase Transmitida ϕ_n	(0°)	0°	0°	π	π	0°	0°	0°	π	0°	0°
Receptor	Fase Recibida y Retardada ϕ_{n-1}	(0°)	0°	0°	0°	π	π	0°	0°	0°	π	0°
	$\Delta\phi = \lvert\phi_n - \phi_{n-1}\rvert$	(0°)	0°	0°	π	0°	π	0°	0°	π	π	0°
	Secuencia Binaria de Salida	(1)	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1

( ) Valores Arbitrarios

Fig. 2.33. Mecanismo de Codificación y Descodificación Diferencial en Modulación DPSK.

Un ejemplo de la instrumentación de un receptor DPSK se muestra en la Fig. 2.34. Esta técnica se denomina "detección por retardo" y no necesita sincronización de portadora pero sí de temporización.

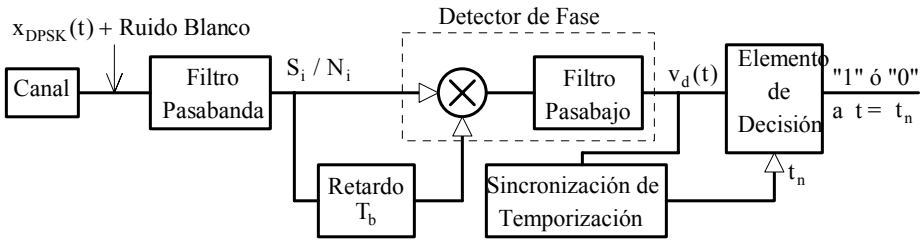


Fig. 2.34. Receptor DPSK con Detección por Retardo.

La señal DPSK recibida tiene la misma forma de la señal PSK; en efecto,

$$x_{DPSK}(t) = A\sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos(2\pi f_c t - \phi_i)\cdot \Pi(\frac{t - nT_b}{T_b}) \qquad (2.55)$$

donde $\phi_i = 0^o$ o π

Consideremos un intervalo T_b de orden n, donde $t = t_n$. En ese intervalo, de (2.55),

$$x_{DPSK}(t) = A\cos(2\pi f_c t_n - \phi_n); \quad \phi_n = 0^o \text{ o } \pi$$

Como el retardo es igual a T_b, a la salida de la red de retardo estará presente la señal DPSK correspondiente al intervalo anterior (n - 1); por lo tanto,

$$x_{DPSK}(t_{n-1}) = A\cos(2\pi f_c t_{n-1} - \phi_{n-1})$$

El lector puede verificar fácilmente que a la salida del filtro pasabajo, Fig. 2.34,

$$v_d(t_n) = \frac{A^2}{2}\cos(\phi_n - \phi_{n-1}) = \frac{A^2}{2}\cos(\Delta\phi) \qquad (2.56)$$

Como $|\Delta\phi| = 0^o$ o π, es suficiente verificar el signo de $v_d(t)$; el criterio de decisión será entonces igual al del caso PSK.

La probabilidad de error es [Schwartz y otros, 1966],

$$P_e = \frac{1}{2}\exp(-\gamma) = \frac{1}{2}\exp(-\frac{E_b}{N_o}) \qquad (2.57)$$

Si se compara DPSK con PSK, se observa que el sistema DPSK requiere alrededor de 1 dB más de potencia que el sistema PSK; sin embargo, esta desventaja se compensa con creces por el hecho de que DPSK no requiere detección coherente. Por otra parte, debido al retardo fijo T_b en el receptor, el sistema DPSK está "enganchado" a una frecuencia de señalización específica, lo que impide la transmisión de datos en forma asincrónica. Otro problema menor en DPSK es que los errores tienden a propagarse, por lo menos a los

intervalos adyacentes, debido a la correlación entre señales de temporización y el ruido sobre dichos intervalos.

Ancho de Banda y Relaciones S/N en Sistemas PSK y DPSK

Para efectos del cálculo de la densidad espectral y de la potencia, la modulación PSK puede considerarse como una modulación ASK donde la secuencia de entrada es una señal aleatoria bipolar NRZ. En este caso la señal PSK se puede escribir en la forma

$$x_{PSK}(t) = A(t)\cos(2\pi f_c t) \tag{2.58}$$

donde A(t) es una secuencia aleatoria binaria bipolar NRZ de amplitud ±A.

Se demuestra [Briceño, 2004] que la función de autocorrelación y la densidad espectral de potencia de esta secuencia aleatoria es

$$R_A(\tau) = A^2\Lambda(\frac{\tau}{T_b}) \quad \Leftrightarrow \quad S_A(f) = A^2 T_b \operatorname{sinc}^2(\frac{f}{f_b})$$

y del teorema de la modulación para señales de potencia,

$$S_{PSK}(f) = \frac{A^2 T_b}{4}\left[\operatorname{sinc}^2(\frac{f+f_c}{f_b}) + \operatorname{sinc}^2(\frac{f-f_c}{f_b})\right] \tag{2.59}$$

La densidad espectral de potencia de la señal PSK tiene la misma forma que la correspondiente a ASK, Fig. 2.21, con la diferencia de que la densidad espectral PSK no contiene un impulso a la frecuencia de portadora. Los requerimientos de ancho de banda son los mismos que en ASK, es decir, $B = 2f_b = 2/T_b$. Sin embargo, no hay que confundir similaridad con igualdad: el sistema ASK es un esquema de modulación lineal, mientras que el sistema PSK, en el caso general, es un esquema de modulación no lineal.

La potencia de la señal PSK se puede calcular en la misma forma que en el caso ASK. En efecto, de (2.58), $< x_{PSK}^2(t) >= \frac{1}{2} < A^2(t) >$; pero como $<A^2(t)> = R_A(0) = A^2$, entonces

$$< x_{PSK}^2(t) >= S_i = \frac{A^2}{2} \tag{2.60}$$

Esta es la potencia de entrada en PSK, y como entre una señal PSK y una DPSK no hay diferencia desde el punto de vista espectral, la potencia en DPSK es la misma que en PSK.

Como $B = 2f_b = 2/T_b$ y la potencia de portadora es $A^2/2$, la relación S/N de predetección es igual que en el caso FSK, es decir,

$$\left[\frac{S_i}{N_i}\right]_{PSK} = \frac{A^2}{2B\eta} = \frac{A^2 T_b}{4\eta} = \frac{\gamma}{2} \tag{2.61}$$

y en dB, $[\gamma]_{PSK(dB)} = 3{,}01 \text{ dB} + \left[\frac{S_i}{N_i}\right]_{PSK(dB)}$ (2.62)

Esta expresiones son válidas también en DPSK. Nótese que para una misma probabilidad de error, el sistema DPSK requiere alrededor de 1 dB más de potencia que el sistema PSK.

♣ Ejemplo 2.6

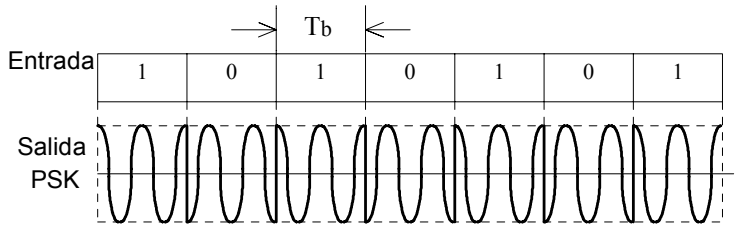
La letra U está codificada en ASCII a la velocidad de 1200 bps. Esta letra se aplica a un modulador PSK cuya frecuencia de portadora es de 2400 Hz.

Vamos a dibujar la forma de la señal de salida del modulador PSK.

Solución:

En ASCII: U => 1010101

Como la frecuencia de portadora es de 2400 Hz, en un intervalo $T_b = 1/1200$ habrá dos ciclos de portadora. A la salida del modulador FSK la letra U tendrá la forma



♣

♣ Ejemplo 2.7

Por un canal de microondas cuyo ancho de banda es de 3 MHz se transmite datos binarios a una velocidad de 1 Mbps. La densidad espectral de potencia del ruido es de 10^{-10} W/Hz. Vamos a determinar, en PSK y en DPSK, las potencias promedio de portadora y de ruido a fin de que la probabilidad de error sea $P_e \le 10^{-4}$.

$B_c = 3$ MHz; $f_b = 10^6$ Hz; $T_b = 10^{-6}$; $\eta = 2\text{x}10^{-10}$ W / Hz

El ancho de banda para el cálculo de la potencia de ruido es $B = 2f_b = 2$ MHz.

Solución:

(a) En PSK

Para $P_e = \frac{1}{2}\text{erfc}(\sqrt{\gamma}) = 10^{-4}$, se tiene que $\gamma = 6{,}916$

Puesto que $\gamma = \frac{A^2 T_b}{2\eta}$, entonces $S_i = \frac{A^2}{2} = \gamma\eta f_b = 6{,}916\text{x}2\text{x}10^{-10}\text{x}10^6$

$$S_i = 1{,}383 \text{ mW} = 1{,}41 \text{ dBm}; \quad N_i = B\eta = 2x10^6 x2x10^{-10} = -3{,}98 \text{ dBm}$$

$$\frac{S_i}{N_i} = 3{,}458 = 5{,}388 \text{ dB}$$

(b) En DPSK

Para $P_e = \frac{1}{2}\exp(-\gamma) = 10^{-4}$; se tiene que $\gamma = 8{,}517 = \frac{A^2 T_b}{2\eta}$

$$S_1 = \frac{A^2}{2} = \gamma\eta f_b = 8{,}517x10^6 x2x10^{-10} = 1{,}703 \text{ mW} = 2{,}313 \text{ dBm}$$

$$N_i = B\eta = 4x10^{-4} \text{ W} = -3{,}98 \text{ dBm}$$

$$\frac{S_i}{N_i} = 4{,}258 = 6{,}292 \text{ dB}$$

En este ejemplo se verifica, como ya lo habíamos señalado más arriba, que el sistema DPSK requiere alrededor de 1 dB más de potencia que el sistema PSK.

♣

2.5.6. Comparación entre los Sistemas de Modulación Binaria

En cualquier sistema de modulación digital la meta de un buen diseño es la de lograr el mejor compromiso entre la probabilidad de error P_e , el rendimiento de transmisión η_B , la relación S/N normalizada γ y la complejidad del equipo. Sin embargo, en la práctica la selección de un esquema de modulación depende más bien de la aplicación correspondiente, de los equipos existentes o disponibles, y de los requerimientos de potencia. Nosotros vamos a comparar los sistemas en relación con la potencia; a este efecto, vamos a suponer que la frecuencia de señalización f_b (o velocidad de transmisión V_i(bps)), la probabilidad de error P_e y las condiciones de ruido son las mismas.

Para hacer una comparación respecto a la potencia requerida, se puede utilizar las fórmulas dadas para el cálculo de la probabilidad de error P_e. En la Fig. 2.35 se grafica la probabilidad de error P_e en función de γ para todos los sistemas binarios vistos, donde $\gamma = A^2 T_b / 2\eta$ es la relación S/N normalizada. El eje de las abscisas debe entenderse como una función de la potencia pico recibida (o transmitida) A^2, siendo el valor pico A el mismo para todos los sistemas. Recuérdese que la potencia promedio en ASK es $A^2/4$, mientras que es $A^2/2$ en FSK, PSK y DPSK, donde A es la amplitud de la portadora a la entrada del receptor.

Las curvas de la Fig. 2.35 muestran, para un P_e dado, que el sistema PSK es el que requiere menor potencia, seguido de DPSK, FSK coherente, FSK no coherente, ASK coherente y ASK no coherente.

Si la comparación se hace en términos de la potencia promedio, entonces ASK y FSK tendrían las mismas características para un mismo P_e, pero como el diseño, y por supuesto el costo, de los equipos de transmisión y recepción dependen más bien de la

potencia pico que de la potencia promedio, la comparación se hace respecto a la potencia pico requerida y es lo que se ilustra en la Fig. 2.35. Con este criterio, el sistema ASK casi no se emplea por la alta potencia pico que demanda y por los problemas de ajuste de umbral; el sistema FSK coherente tampoco se emplea debido más que todo a los problemas de sincronización de las portadoras utilizadas.

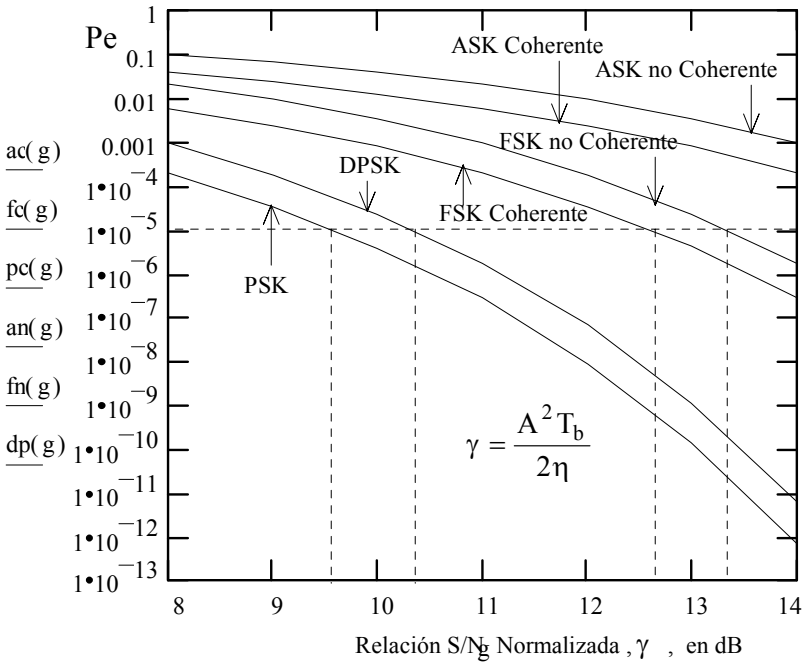


Fig. 2.35. Probabilidad de Error en Sistemas de Modulación Binaria.

En la práctica, los sistemas más utilizados son entonces el PSK, el DPSK y el FSK no coherente. Tomando como referencia el sistema PSK, el sistema DPSK está a aproximadamente 1 dB por encima, mientras que el sistema FSK no coherente lo está a aproximadamente 4 dB. Los módems comerciales a menudo trabajan con estos tres tipos de modulación.

En cuanto a la instrumentación práctica de estos sistemas, los sistemas PSK, DPSK FSK y ASK difieren muy poco en lo que se refiere a la instrumentación del transmisor, pero en el receptor la complejidad dependerá de si se utiliza detección coherente o no coherente, pues la detección coherente es, sin duda, más compleja. Entre los sistemas no coherentes, el DPSK es menos complicado que el FSK no coherente. Por otro lado, si en el canal se produce "desvanecimiento (fading)" de la señal, entonces hay que utilizar sistemas no coherentes debido a la dificultad para establecer la sincronización local cuando hay perturbaciones en el canal. Sin embargo, si el transmisor tiene limitaciones severas en cuanto a la potencia disponible (caso de satélites, estaciones remotas y comunicaciones espaciales), debe utilizarse los sistemas coherentes ya que ellos demandan menor potencia que los no coherentes para una velocidad de señalización y probabilidad de error dadas. En

un caso práctico el diseñador del sistema debe ponderar cada situación y seleccionar un sistema de acuerdo con las especificaciones que se establezcan para el proyecto. Sin embargo, podemos establecer algunos criterios o guías para simplificar el procedimiento de selección. Estas guías son las siguientes:

1. Si el ancho de banda es el parámetro más importante, los sistemas DPSK y el PSK son los más apropiados.
2. Si el consumo de potencia es lo más importante, los sistemas más apropiados son el PSK y el DPSK.
3. Si la complejidad del equipo es un factor limitativo y las condiciones del canal lo permiten, los sistemas no coherentes son preferibles a los coherentes.

Una fuente muy importante de información sobre los sistemas de modulación digital prácticos y sus aplicaciones son los catálogos de los fabricantes y vendedores de equipos.

2.6. TECNICAS DE MODULACION DIGITAL M-aria

2.6.1. Introducción

La mayoría de los sistemas de transmisión de datos a baja velocidad opera bajo el principio de la codificación binaria. En tales casos, la frecuencia de señalización está limitada a un valor del orden del ancho de banda del canal de transmisión. Sin embargo, si el nivel de ruido o cualquiera otra distorsión de la señal lo permite, se puede transmitir M valores de amplitud, frecuencia o fase de una portadora sinusoidal. En esta forma, cada baudio puede transportar más de un bit de información, es decir, el rendimiento del canal aumenta. Las técnicas M-arias en ASK y PSK no aumentan el ancho de banda requerido, mientras en FSK M-aria el ancho de banda requerido es mayor para un mismo incremento en el "empaquetamiento" de bits. Utilizando las técnicas M-arias se puede transmitir información, sobre un canal telefónico, hasta 14400 bps con una velocidad de modulación máxima de 2400 baudios. Velocidades de información superiores a 14400 bps se pueden lograr pero solamente mediante compresión de datos. Por ejemplo, el Módem UIT-T V.32 permite la transmisión, sobre un canal telefónico, a una velocidad de 9600 bps y con una velocidad de modulación máxima de 2400 baudios; con técnicas de control de error y compresión de datos puede llegar hasta 56 kbps, como es el caso del Módem UIT-T V.90. En los enlaces de microondas usualmente se utiliza PSK 4-ario y 8-ario; por ejemplo, se utiliza PSK 4-ario en el sistema satelital SPADE para la transmisión de señales de voz en PCM mediante el satélite INTELSAT, con una velocidad de transmisión de 64 kbps y un ancho de banda de 38 kHz.

En la práctica pocas veces se encuentra un canal que tenga el ancho de banda exacto para transmitir una señal mediante técnicas binarias. Cuando el ancho de banda es el factor limitativo, se utiliza técnicas M-arias para transmitir información sobre el canal pasabanda. Aún cuando el canal tenga un ancho de banda mayor que el requerido en modulación binaria, las técnicas m-arias se utilizan para mejorar la inmunidad al ruido aunque se aumente la demanda de potencia; pero, por otro lado, se aumenta el rendimiento de transmisión por el canal. En resumen, las técnicas PSK y DPSK M-arias conservan el ancho de banda aunque se aumenta el requerimiento de potencia, mientras que las técnicas

FSK M-arias consumen menor potencia pero aumentan el ancho de banda requerido. Los sistemas más utilizados en la práctica son el PSK M-ario, el DPSK M-ario y el FSK M-ario de Banda Ancha.

En los sistemas binarios, hemos visto, el modulador procesa cada dígito binario de duración T_b asignándole una cualquiera de dos señales diferentes, siendo la velocidad de transmisión $V_i = 1/T_b$ bps. En los sistemas M-arios el mecanismo de modulación es similar. En efecto, el modulador M-ario procesa, en el mismo tiempo T_b , bloques de L dígitos binarios asignándole a cada bloque distinto una cualquiera de M señales diferentes posibles, de acuerdo con la relación $M = 2^L$. La velocidad de transmisión ha aumentado L veces, es decir, ahora es $V_{is} = L \cdot V_i$ bps, pero se habrá introducido algunas restricciones sobre la potencia y el ancho de banda de la señal transmitida, factores que dependerán del esquema de modulación utilizado, como veremos a continuación.

2.6.2. Modulación PSK M-aria

En la modulación PSK M-aria el modulador asigna a cada bloque distinto de L dígitos y duración T_s una señal sinusoidal de amplitud A, frecuencia f_c pero con un ángulo o desfase $\phi_m = 2\pi m / M$, para $m = 0, 1, \ldots, (M-1)$, donde $M = 2^L$. La duración de cada muestra de señal es también T_s y las M posibles formas de la señal sinusoidal son

$$s_m(t) = A\cos(2\pi f_c t - 2\pi m / M) \quad \text{para } m = 0, 1, 2, \ldots, (M-1) \tag{2.63}$$

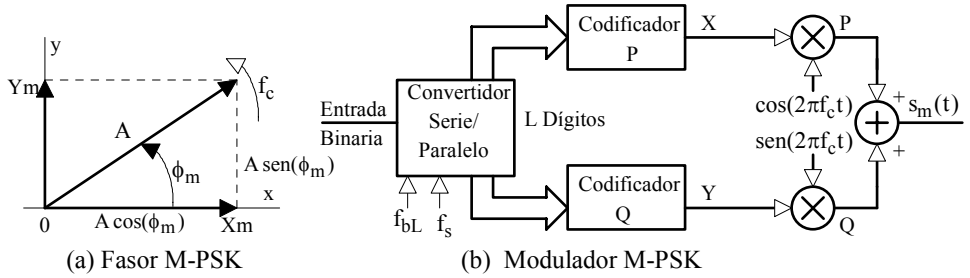
Como el ángulo ϕ_m se mantiene constante durante cada intervalo T_s, la señal $s_m(t)$ se puede escribir en la forma siguiente:

$$s_m(t) = X_m \cos(2\pi f_c t) + Y_m \operatorname{sen}(2\pi f_c t) \tag{2.64}$$

y en forma polar, $$s_m(t) = \sqrt{X_m^2 + Y_m^2}\cos(2\pi f_c t - \operatorname{arctg}\frac{Y_m}{X_m}) \tag{2.65}$$

donde $X_m = A\cos(\phi_m)$ y $Y_m = A\operatorname{sen}(\phi_m)$

Estas expresiones nos permiten representar la señal $s_m(t)$ en forma fasorial, como se muestra en la Fig. 2.36(a). Si A es constante, el extremo del fasor ocupará M posiciones equidistantes en un círculo de radio A y a cada posición angular corresponderá un bloque de L dígitos binarios, como se muestra en la Fig. 2.38 para algunos valores de M y L.



(a) Fasor M-PSK (b) Modulador M-PSK

Fig. 2.36. Modulación M-PSK

La expresión (2.64) tiene una forma canónica que nos permite utilizar un esquema de generación de señales PSK M-arias de la forma mostrada en la Fig. 2.36(b). El convertidor Serie/Paralelo forma bloques de L dígitos los cuales son aplicados a codificadores cuyas salidas son X_m y Y_m. Las salidas X_m y Y_m son señales analógicas cuyos valores dependen del valor del ángulo ϕ_m asignado, el cual, a su vez, depende de la secuencia particular de L dígitos a transmitir.

Cuando $M > 8$, los ángulos ϕ_m se tornan muy pequeños lo que induce a errores en la recepción. En estos casos, se puede asignar bloques de datos de L dígitos binarios a combinaciones de amplitud y fase, es decir, dos fasores distintos pueden tener el mismo ángulo de fase pero las amplitudes son diferentes. Este tipo de esquema, denominado M-QAM, es muy utilizado en la práctica.

En la Fig. 2.37 se muestra el mecanismo de modulación M-aria, y en la Fig. 2.38 unas asignaciones de L dígitos a las M fases de señales sinusoidales representadas en forma fasorial.

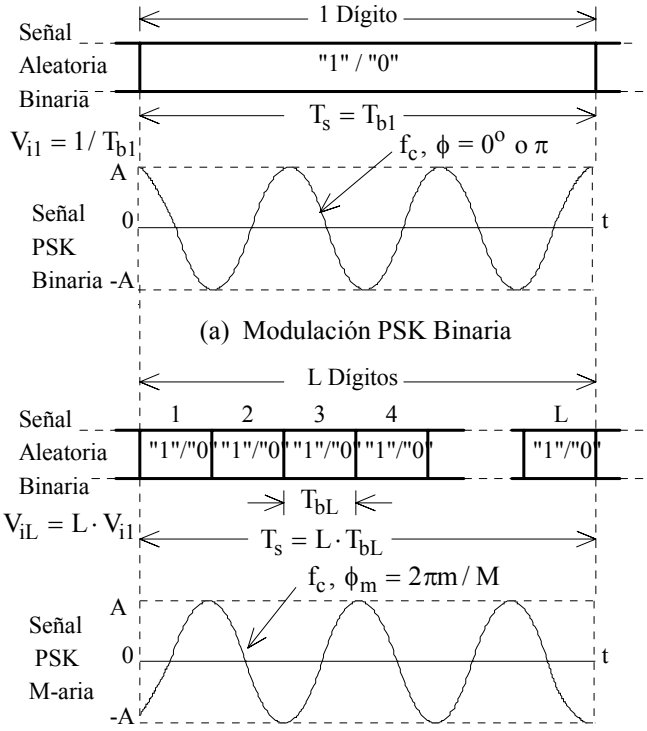


Fig. 2.37. Mecanismo de la Modulación PSK Binaria y M-aria.

Los diagramas mostrados en la Fig. 2.38 se denominan "diagramas de Fresnel". "patrones de fase" o "constelaciones". La asignación mostrada es arbitraria, pero en el UIT-T estos patrones de fase han sido normalizados, como veremos más adelante.

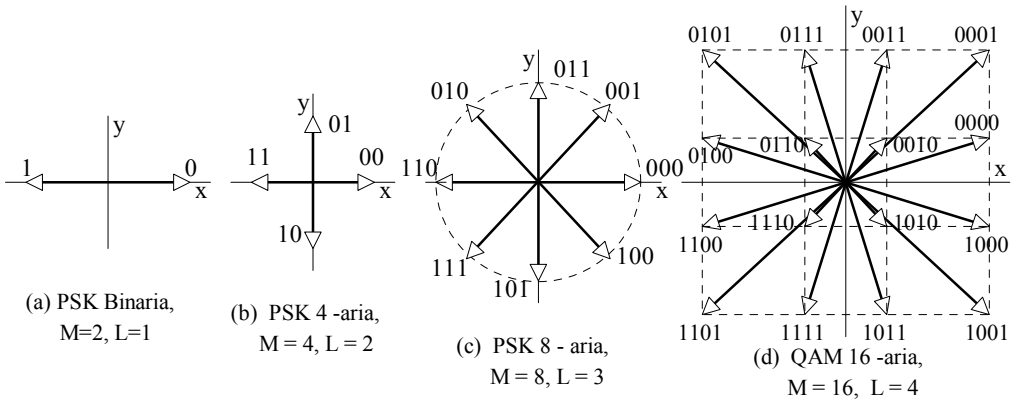


Fig. 2.38. Asignación de Fases en PSK M-aria (Diagramas de Fresnel)

La señal PSK M-aria tendrá entonces la forma

$$x_{PSKM}(t) = A\sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos(2\pi f_c t - \phi_m)\cdot \Pi(\frac{t - nT_s}{T_s}) \qquad (2.66)$$

La información va en la secuencia de valores aleatorios $\{\phi_m\}$; $T_s = LT_{bL}$ o $f_s = f_{bL} / L$, pues los bloques tienen L dígitos de duración T_{bL} cada uno. Nótese que T_{bL} es la duración de los dígitos a la entrada del modulador, de modo que la velocidad de información es $V_{is} = 1/T_{bL} = L/T_s$. Desarrollando (2.66),

$$x_{PSKM}(t) = A\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[\cos(\phi_m)\cos(2\pi f_c t) + \operatorname{sen}(\phi_m)\operatorname{sen}(2\pi f_c t)\right]$$

Dentro de un intervalo T_s, esta expresión se puede escribir en la misma forma que (2.64), es decir,

$$x_{Ts}(t) = A\cos(\phi_m)\cos(2\pi f_c t) + A\operatorname{sen}(\phi_m)\operatorname{sen}(2\pi f_c t)$$

El espectro de esta señal puede determinarse pues ϕ_m es constante en dicho intervalo. Podemos demostrar entonces que la densidad espectral de $x_{Ts}(t)$ es

$$S_{TS}(f) = \frac{A^2}{4f_s}\left[\operatorname{sinc}^2(\frac{f + f_c}{f_s}) + \operatorname{sinc}^2(\frac{f - f_c}{f_s})\right] \qquad (2.67)$$

Esta expresión tiene la misma forma que (2.59) calculada para PSK binario y es válida para $f_c \geq 2f_s$, lo cual se verifica en la mayoría de los casos prácticos. De acuerdo con los criterios ya aplicados en relación con el ancho de banda, el ancho de banda de la señal PSK M-aria es del orden de $2f_s$. Como $f_s = f_{bL}/L$, entonces la señal PSK M-aria permite una reducción del ancho de banda en un factor L. En realidad, no es que el ancho de banda se reduzca L veces, sino que la modulación PSK M-aria permite aumentar L veces

la velocidad de información por el mismo canal. Nótese que f_{bL} es la frecuencia de señalización a la entrada del modulador y f_s la correspondiente a la salida; sin embargo, cualquiera que sea el valor de L o M, el canal "verá' siempre la misma velocidad de modulación compatible con su ancho de banda, es decir, el canal "verá" siempre una señal sinusoidal de frecuencia f_c con cambios de fase cada T_s segundos. Esto equivale a decir que la velocidad de modulación en el canal es siempre la misma.

Puesto que $f_{bL} = L\ f_s$, se puede definir la "relación S/N normalizada M-aria, γ_s" en la forma

$$\gamma_s = \frac{A^2 T_s}{2\eta} = L \cdot \gamma \qquad (2.68)$$

donde γ ya se definió en (2.33).

En general, para un sistema PSK M-ario la probabilidad de error P_e [Shanmugam, 1979] es

$$P_e = \mathrm{erfc}\left[\sqrt{\gamma_s \,\mathrm{sen}^2\left(\frac{\pi}{M}\right)}\right] \qquad (2.69)$$

En la Fig. 2.39 se grafica la probabilidad de error P_e vs γ_s para algunos valores de M.

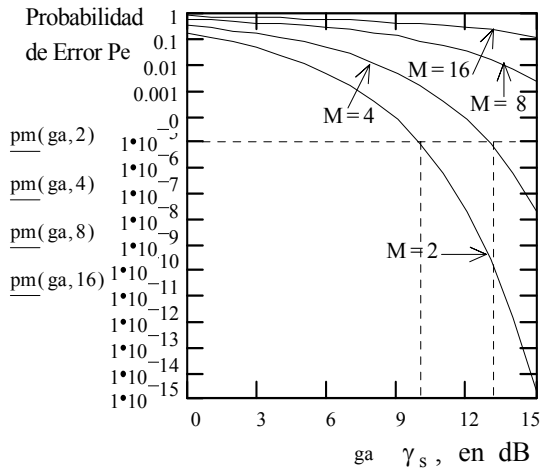


Fig. 2.39. Probabilidad de Error Pe vs en PSK M-ario.

Sería de interés comparar el sistema PSK M-ario con el sistema PSK binario para una misma probabilidad de error. En efecto, si B_B, P_B, B_M y P_M son los anchos de banda y potencias en binario y M-ario , respectiva mente, podemos demostrar que para una probabilidad de error de 10^{-4} se verifica que

$$B_M = \frac{B_B}{L} \quad \text{y} \quad P_M = \frac{1{,}094}{L \cdot \mathrm{sen}^2\left(\frac{\pi}{M}\right)} \cdot P_B \qquad (2.70)$$

En la Fig. 2.40 se muestra las relaciones entre los anchos de banda y la potencia en PSK M-ario y PSK binario para una probabilidad de 10^{-4}

Evidentemente, la mejor selección es aquella para M = 4, pues se aumenta la velocidad de transmisión al doble con un aumento de sólo un 9,4% (0,39 dB) en la potencia. Por esta razón, el sistema PSK 4-ario, denominado también QPSK ("Q" de cuadrature") y sus variedades OQPSK ("Offset QPSK) y MSK ("Minimum-Shift Keying") se utilizan bastante en la práctica [Benedetto y otros, 1987]. Para M > 8, los requerimientos

de potencia se hacen excesivos y la probabilidad de error aumenta porque los fasores están muy juntos; por eso la modulación PSK M-aria no se emplea cuando M > 8. En este caso se utiliza el esquema M-QAM, que es una modulación compuesta Amplitud-Fase; por ejemplo, en la Fig. 2.58(g) se muestra el diagrama de Fresnel del Modem UIT-T 16-QAM V.32, que transmite a 9600 bps por un canal telefónico.

M	B_M	P_M	B_M / B_B en dB
4	B_B / 2	1,094 P_B	0,39 dB
8	B_B / 3	2,49 P_B	3,96 dB
1	B_B / 4	7,186 P_B	8,56 dB
3	B_B / 5	22,8 P_B	13,57 dB

Fig.2.40. Comparación entre PSK M-ario y PSK binario para $P_e = 10^{-4}$

Los sistemas PSK M-arios requieren una instrumentación mucho más compleja que los sistemas binarios y por lo tanto su costo es mucho mayor. La selección final queda a juicio del diseñador del sistema y según la aplicación deseada.

2.6.3. Modulación DPSK M-aria

Los sistemas DPSK M-arios son muy similares a los estudiados en la Sección anterior y pueden ser representados con las mismas expresiones y gráficos, pues la diferencia básica entre PSK y DPSK es que en este último la secuencia de entrada ha experimentado un proceso previo de codificación diferencial.

En cuanto a la probabilidad de error, se ha demostrado [Lucky y otros, 1968] que en el sistema DPSK M-ario

$$P_e = \mathrm{erfc}\left[\sqrt{2\gamma_s \,\mathrm{sen}^2\left(\frac{\pi}{2M}\right)}\right] \qquad (2.71)$$

En la Fig. 2.41 se grafica esta probabilidad en función de γ_s para algunos valores de M.

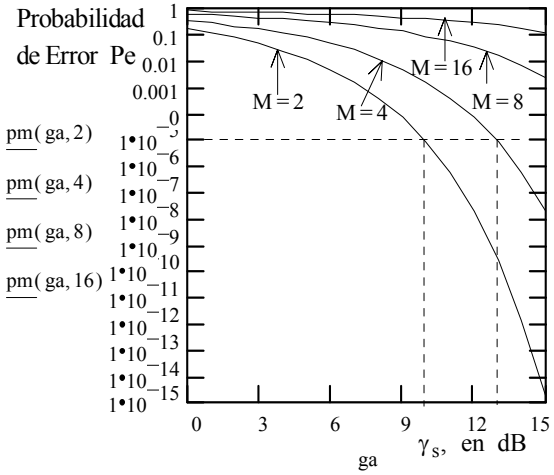


Fig. 2.41. Probabilidad de Error vs γ_s en DPSK M-ario.

Cuando se compara la probabilidad de error de DPSK con la de PSK, se verifica que para altos valores de M el sistema DPSK M-ario requiere un aumento de potencia de aproximadamente el doble (3 dB) sobre el sistema PSK M-ario. Específicamente, para M = 4 (QDPSK) este aumento es de 2,32 dB, un aumento del 71%; pero este aumento es compensado con la simplicidad de instrumentación del sistema QDPSK. Sin embargo, en la práctica se utilizan ambos sistemas de modulación; por ejemplo, algunos módems comerciales transmiten

conjuntamente a 9600 bps en 16-QAM (UIT-T V.32), a 2400 bps en QPSK (UIT-T V.22bis), a 1200 bps en QDPSK (UIT-T V.22) y poseen además un canal FSK binario para operar a 300 bps (UIT-T V.21).

♣ Ejemplo 2.8

Un sistema DPSK 4-ario está caracterizado por el diagrama de Fresnel de la figura.

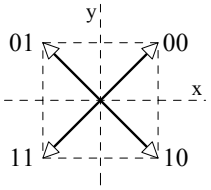


Diagrama de Fresnel

La secuencia binaria de entrada al modulador tiene una velocidad de transmisión de 2400 bps. El ancho de banda del canal es de 3 kHz; la amplitud de la portadora es de 1 mV y la densidad espectral de ruido es de 10^{-11} W/Hz.

(a) Calcule la relación Si/Ni en el canal y la probabilidad de error

(b) Si la amplitud de la portadora se aumenta al doble, ¿Cuál será la nueva probabilidad de error y en cuantos dB aumenta la relación Si/Ni?

(c) Dibuje la señal modulada DPSK de salida correspondiente a la entrada 1 0 1 1 0 1 0 0 (el dígito de la izquierda es el LSB, el cual se transmite de primero)

Suponga que f_c = 1800 Hz.

Solución:

(a) Vi = 2400 bps; B_c = 3 kHz; A = 10^{-3} V; M = 4; L = 2; $\eta = 2x10^{-11}$ W/Hz

En DPSK M-ario, $Pe = \text{erfc}(\sqrt{2\gamma_s \,\text{sen}^2(\frac{\pi}{2M})})$, donde $\gamma_s = \frac{A^2 T_s}{2\eta}$

$$Si = \frac{A^2}{2} = \frac{10^{-6}}{2} \text{ W}; \quad Ni = \eta B_c = 3x10^3 x 2x10^{-11} = 6x10^{-8} \text{ W}$$

$$\frac{Si}{Ni} = 8{,}3333 = 9{,}208 \text{ dB}$$

f_b = 2400 Hz; $f_s = f_b/L$ = 2400/2 = 1200 Hz ó 1200 bps. La velocidad de modulación en el canal es también de 1200 baudios.

$$\gamma_s = \frac{10^{-6}}{2x2x10^{-11}x1200} = 20{,}8333; \quad \sqrt{2\gamma_s \,\text{sen}^2(\frac{\pi}{2M})} = \sqrt{2x20{,}8333x\,\text{sen}^2(\frac{\pi}{8})} = 2.47$$

Pe = erfc(2.47) = $4{,}77x10^{-4}$

(b) A = $2x10^{-3}$; $\gamma_s = \frac{4x10^{-6}}{2x2x10^{-11}x1200} = 83{,}33$;

$$Pe = \text{erfc}(\sqrt{2x83{,}3333x\text{sen}^2(\frac{\pi}{8})}) = 2{,}812x10^{-12}$$

El aumento en la relación Si/Ni es de 15,23 – 9,208 = 6,02 dB. Esto equivale a un aumento de potencia de 4 veces.

(c) fs = 1200 Hz; $T_s = 8{,}333\text{x}10^{-4}$ seg; $f_c = 1800$ Hz

$T_c = 5{,}556\text{x}10^{-4}$ seg; $T_s = 1{,}5\ T_c$

La señal M-DPSK tiene la forma $s_m(t) = a\cos(2\pi f_c t - \phi_m)$, y se supone que la señal de entrada 1 0 1 1 0 1 0 0 está ya codificada diferencialmente. Para su codificación DPSK y como L = 2, los dígitos o bits se toman de dos en dos.

De acuerdo con el diagrama de Fresnel, la codificación para la señal modulada de salida será:

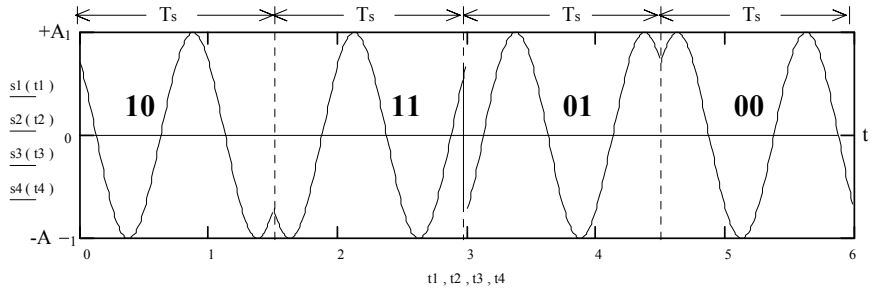
Para la dupla (dibit): $1\ 0 \rightarrow \phi_1 = -45^o$; $s_1(t) = A\cos(\omega_c t + 45^o)$

" " " (dibit): $1\ 1 \rightarrow \phi_2 = -135^o$; $s_2(t) = A\cos(\omega_c t + 135^o)$

" " " (dibit): $0\,1 \rightarrow \phi_3 = +135^o$; $s_3(t) = A\cos(\omega_c t - 135^o)$

" " " (dibit): $0\,0 \rightarrow \phi_4 = +45^o$; $s_4(t) = A\cos(\omega_c t + 45^o)$

La señal modulada DPSK 4-aria tendrá la forma siguiente



♣

2.6.4. Modulación FSK M-aria de Banda Ancha

En la modulación FSK M-aria, a cada bloque diferente de L dígitos binarios y duración T_s se le asigna una señal sinusoidal de la forma $s_i(t) = A\cos(2\pi f_i t)$ para $i = 1, 2, 3, \ldots, M$, con $M = 2^L$. La duración de cada muestra de señal $s_i(t)$ es también de T_s segundos, donde $f_s = 1/T_s = f_b/L$ es la frecuencia de señalización a la salida del modulador y $f_b = 1/T_{bL}$ la frecuencia de señalización a la entrada del modulador. Si $2f_d$ es la separación entre dos frecuencias adyacentes, entonces la frecuencia instantánea en un intervalo T_s es $f_i = f_c + (2i - 1 - M)f_d$, donde f_c es la frecuencia de la portadora sin modular [Benedetto y otros, 1987].

En la Fig. 2.42 se muestra el mecanismo de modulación FSK M-aria y en la Fig. 2.43 la distribución o asignación de las frecuencias de transmisión para algunos valores de M y L.

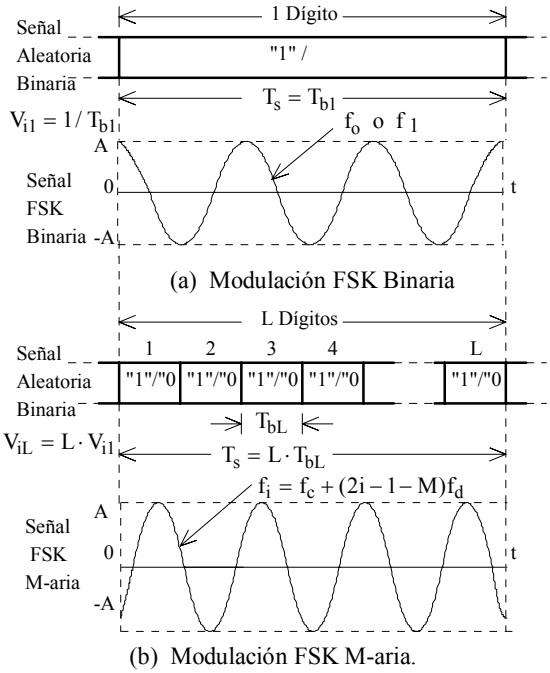


Fig. 2.42. Mecanismo de la Modulación FSK Binaria y M-aria.

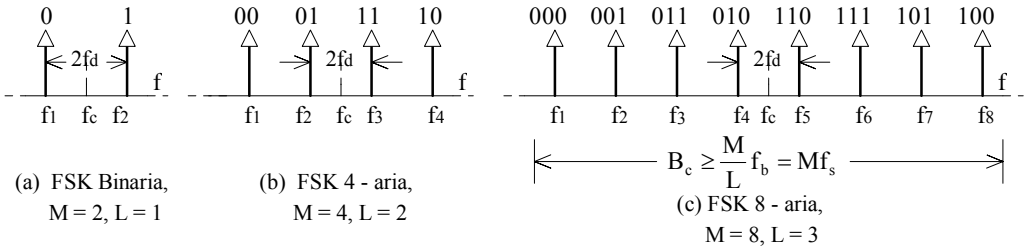


Fig. 2.43. Asignación de Frecuencias en FSK M-aria

La señal FSK M-aria tendrá entonces la forma

$$x_{FSKM}(t) = A \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cos\left\{2\pi\left[f_c + (2i - 1 - M)f_d\right]t\right\} \cdot \Pi\left(\frac{t - nT_s}{T_s}\right) \qquad (2.72)$$

para $i = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots,\ M$

El ancho de banda mínimo de la señal $x_{FSKM}(t)$ se puede estimar en la forma

$$B_{min} = (f_M + f_d) - (f_1 - f_d) = 2Mf_d \qquad (2.73)$$

Si la separación mínima entre dos frecuencias adyacentes se hace igual a la frecuencia de señalización en el canal, es decir, si $2f_d = f_s$ (separación ortogonal), entonces el ancho de banda mínimo será

$$B_{min} = Mf_s = Mf_b/L \tag{2.74}$$

La frecuencia mínima f_1 vendrá dada por $f_1 = f_c - (M-1)f_d = f_c - (M-1)f_b/L$ y cualquiera frecuencia de orden j será $f_j = f_1 + (j-1)f_b/L$, para $j = 2, 3, 4, \ldots, M$. La frecuencia mínima f_1 deberá ser igual o mayor que $f_s/2$, de modo que se puede tomar

$$f_1 = kf_s = kf_b/L \quad \text{para } k \text{ entero y } k \geq 1. \tag{2.75}$$

En este caso la frecuencia de portadora será

$$f_c = (2k + M - 1)\frac{f_b}{2L} \tag{2.76}$$

Por ejemplo, si M = 8, L = 3, V_i = 2400 bps, f_b = 2400 Hz y k = 1,

$f_d = f_s/2 = f_b/2L = 2400/6 = 400$ Hz; $2f_d = 800$ Hz; $f_s = 800$ Hz

$f_c = (2+8-1)2400/6 = 3600$ Hz;

$f_1 = 2400/3 = 800$ Hz; $f_8 = 800 + 7x2400/3 = 6400$ Hz

$B_{min} = 8x2400/3 = 6400$ Hz

El conjunto de señales $s_i(t)$ para $i = 1, 2, 3, \ldots, M$ es ortogonal, es decir, se verifica que

$$\int_0^{T_s} s_i(t) \cdot s_j(t) \cdot dt = \begin{cases} \dfrac{A^2 T_s}{2} = E_s & \text{para } i = j \\ 0 & \text{para } i \neq j \end{cases} \tag{2.77}$$

Las señales $s_i(t)$ son ortogonales en el intervalo T_s, tienen duración T_s y todas tienen la misma energía E_s. La ortogonalidad exige también que la separación mínima entre frecuencias adyacentes sea tal que $2f_d = f_s$. Por lo tanto, la separación mínima entre dos frecuencias adyacentes será $f_s = f_b/L$, condición que hemos tomado para estimar el ancho de banda mínimo de la señal FSK M-aria, expresión (2.73).

La probabilidad de error P_e en FSK M-aria ha sido calculada [Lucky y otros, 1968: Benedetto y otros, 1987], pero la ecuación de P_e es una ecuación integral de muy difícil resolución. En la Fig. 2.44 se muestra la forma aproximada de la Probabilidad P_e vs γ_s para algunos valores de M. Se demuestra [Lucky y otros, 1968] que para grandes valores de γ_s las curvas tienden a juntarse indicando que con solamente un aumento de 3 dB en la potencia, se puede aumentar el número de niveles de 2 a 1024. Sin embargo, el precio que hay que pagar es el aumento en el ancho de banda. En efecto, mientras que en un sistema FSK binario el ancho de banda es aproximadamente $2f_b$, en un sistema FSK M-ario el ancho de banda es M/L veces mayor, como se desprende de la expresión (2.74). Una desventaja adicional es la creciente complejidad de los equipos de transmisión y recepción tanto en recepción coherente como no coherente.

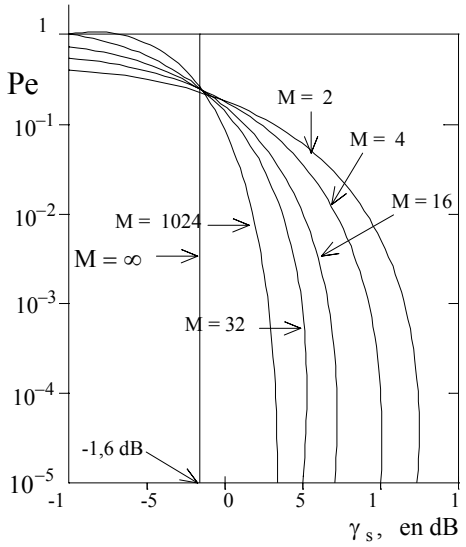


Fig. 2.44. Probabilidad de Error Pe vs γ_s en FSK M-aria.

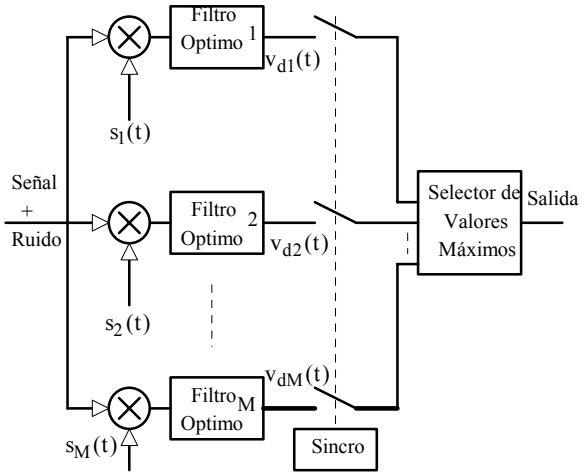


Fig. 2.45. Receptor Optimo FSK M-ario Coherente.

El receptor óptimo coherente para el conjunto ortogonal de señales consiste en una batería de M filtros óptimos, como se muestra en la Fig. 2.45. En el selector se muestrea las salidas de los filtros en los instantes nT_s y el elemento de decisión selecciona cual señal estaba presente en la entrada del filtro j en el intervalo de señalización n-ésimo.

En general, la modulación M-aria proporciona los medios para intercambiar ancho de banda por relación S/N, es decir, se puede aumentar la velocidad de transmisión en un factor $L = \log_2 M$ pero pagando un precio adecuado en términos de ancho de banda o de relación S/N. Por ejemplo, en PSK M-aria o DPSK M-aria podemos mantener fijo el ancho de banda de transmisión pero la potencia transmitida aumenta en forma exponencial con L (ó 2^{2L}); asimismo, en FSK M-aria la potencia transmitida es prácticamente independiente de L, pero el ancho de banda aumenta también en forma exponencial con L (ó 2^L). En consecuencia, se puede utilizar PSK M-aria o DPSK M-aria cuando el ancho de banda es limitado (como en los canales telefónicos), y FSK M-aria cuando la potencia es el factor limitativo (como en las comunicaciones espaciales o por satélites). Por consiguiente, un aumento en la velocidad de transmisión de la información se puede lograr mediante un compromiso entre el ancho de banda y la relación S/N. Este compromiso nos permite disponer de una gran flexibilidad de intercambio entre diferentes parámetros para adecuar una fuente de información dada a un canal determinado.

2.7. ASPECTOS PRACTICOS DE LA MODULACION DIGITAL

2.7.1. Introducción

El crecimiento explosivo de los métodos y técnicas de computación digital, y la aplicación de los principios de procesamiento de datos en casi cada área de la sociedad, ha ejercido una gran influencia sobre las redes de telecomunicación.

II. TECNICAS DE MODULACION

A mediados de la década de los 60, cuando los computadores y terminales comenzaron a intercomunicarse a distancias relativamente grandes, los enlaces físicos eran las líneas telefónicas y las velocidades de transmisión no pasaban, en el mejor de los casos, de los 1200 bps. Actualmente, los canales telefónicos pueden soportar hasta 56 kbps, pero el crecimiento del tráfico de datos ha estimulado la creación de redes y canales dedicados exclusivamente a la transmisión de datos, como ya lo hemos señalado. Como consecuencia, han emergido nuevas tecnologías tales como los sistemas de portadora T1 y E1, a 1544 kbps y 2048 kbps, respectivamente; satélites con velocidades, por transponder, de hasta 50 Mbps; canales de fibras ópticas con anchos de banda ya en el orden de los Gigabps; tecnologías de transmisión como la Transmisión por Paquetes, y el desarrollo de las Redes de Gran Area (WAN), de las Redes de Area Local (LAN), de las Redes de Area Metropolitana (MAN) y la Red Digital de Servicios Integrados (ISDN).

Pero la extensión a nivel mundial de la transmisión de voz, datos e imágenes sólo puede llevarse a cabo mediante acuerdos internacionales, que son coordinados por los Sectores de Normas en Telecomunicaciones y Radio (UIT-T y UIT-R) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Estos organismos emiten sus Recomendaciones, dentro de sus áreas de competencia, en forma de colecciones de libros que se identifican por el color de su portada o tapas. Por ejemplo, el conjunto de Recomendaciones del UIT-T emitido en 1992 está contenido en volúmenes de tapas blancas; en particular, el Tomo VIII es el dedicado a la Transmisión de Datos (Nosotros estaremos utilizando la edición en CD en español UITS001/2). En los próximos capítulos nos dedicaremos principalmente a la descripción y aplicación de muchas de estas recomendaciones, no solamente en los sistemas de telecomunicación sino también en sistemas industriales de control y automatización de procesos.

El intercambio de información entre las computadoras y centros de datos entre sí, ha conducido a la utilización de la red troncal telefónica la cual, hemos visto, solamente puede acomodar una cantidad limitada de señales telegráficas de velocidades relativamente bajas, pero no manejar grandes volúmenes de datos a altas velocidades. Para poder transmitir tales datos sobre canales telefónicos de voz, es necesario procesar las señales digitales de entrada transformándolas en señales analógicas apropiadas. Es el MODEM el dispositivo que efectúa esta transformación y su correspondiente inversa.

El canal de transmisión de los canales de voz puede generalizarse como un circuito pasabanda de aproximadamente 3 kHz de ancho de banda útil, cuya frecuencia central está comprendida entre 1500 y 2000 Hz y cuya atenuación es gradual a cada lado de esa banda de frecuencias. La cantidad de espectro o ancho de banda útil depende de (a) del grado de distorsión, tanto de amplitud como de fase, que puede tolerarse, y (b) de si se ha aplicado o no una ecualización para aplanar la respuesta de amplitud y linealizar la respuesta de fase. Diremos al pasar que esta ecualización o acondicionamiento es posible en las líneas de propiedad privada o en líneas arrendadas directas, pero en las líneas conmutadas es prácticamente imposible. Como consecuencia, las líneas privadas y las líneas arrendadas pueden manejar señales digitales a más alta velocidad que las líneas conmutadas.

Aún cuando el medio de transmisión es un circuito pasabanda, los trenes de impulsos digitales, por ejemplo, los de la Fig. 2.59 pueden contener frecuencias desde CC

hasta muchas veces la frecuencia fundamental de los mismos. Sin embargo, el ancho de banda de la señal de banda de base comúnmente se hace igual a la frecuencia de señalización f_b. La primera tarea del módem es trasladar entonces la banda comprendida entre CC y la frecuencia de señalización f_b hasta una gama de frecuencias apropiadas o compatibles con el medio de transmisión, tales que $f_c > f_b$, donde f_c es la frecuencia central de la gama o frecuencia de portadora; el ancho de banda de la señal modulada será entonces, como mínimo, igual a $2f_b$ y deberá ser compatible con el ancho de banda del canal. Esta traslación o modulación se puede efectuar en FSK, PSK y DPSK, en forma binaria o m-aria, como ya lo hemos explicado.

Para asegurar la calidad de la transmisión, generalmente se agrega a la secuencia de datos de información cierto tipo de redundancia formada por impulsos que pueden servir para la detección y/o corrección de errores, compresión de datos, sincronización, etc. Todo este proceso debe efectuarse antes del modulador, Fig. 2.46. La salida del modulador será fundamentalmente una señal continua con parámetros que varían según el esquema de modulación empleado y según el ancho de banda del canal.

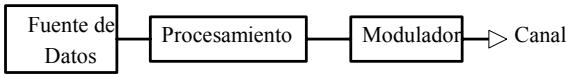
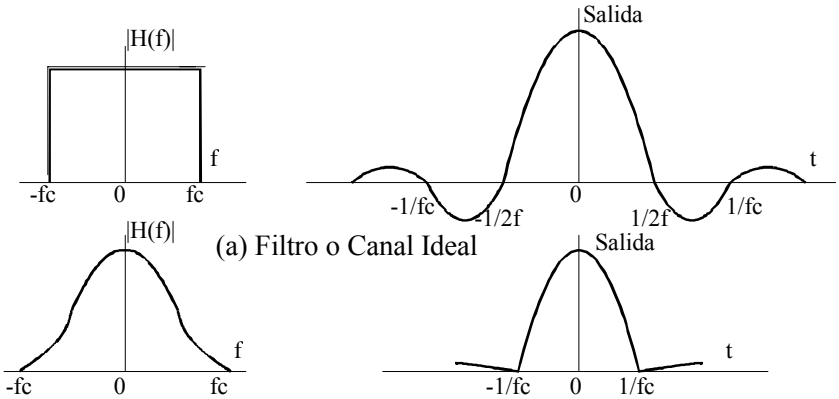


Fig. 2.46.

Control y Detección de Impulsos

Si un impulso ideal pasa a través de un filtro pasabajo, la energía recibida o de la salida se dispersa en el tiempo y aunque la mayor parte de la energía estará en el lóbulo principal, habrá numerosos lóbulos laterales que pueden actuar como ecos. Estos lóbulos laterales están espaciados a intervalos regulares iguales a $1/2f_c$, donde f_c es la frecuencia de corte o la frecuencia máxima que el filtro puede pasar, como se muestra en la Fig.2.47(a). La situación mejora si se utiliza un filtro de Nyquist cuyas características se muestran en la Fig. 2.47(b).



(b) Filtro en Coseno Elevado o Filtro de Nyquist

Fig. 2.47. Modelos de Canal.

Aparece aquí una de las funciones del procesamiento previo de la señal. Aunque la señal de entrada no es una secuencia de impulsos perfectos, ni la línea un filtro perfecto, es aún posible obtener buenos resultados si se adopta una solución de compromiso. Esta solución de compromiso se logra mediante (a) perfilado del impulso de manera que contenga una banda de energía dada, por ejemplo, con el Filtro de Nyquist, Fig.2.47(b); (b) por acoplamiento de esta banda de energía mediante un filtro pasabanda complementario (filtro óptimo o acoplado) a fin de controlar los cruces o transiciones por cero, y (c) estableciendo métodos de sincronización que permitan muestrear cada impulso en forma óptima.

El filtro debe poseer un ancho de banda más angosto que el de la línea de transmisión: la línea de transmisión es, entonces, "transparente" respecto al filtro pero tendrá algún efecto sobre el comportamiento del sistema. El filtro y la línea pueden también diseñarse en forma integrada, pero esto implica que los módems deben ajustarse a cada caso en particular; a este efecto, los módems modernos poseen recursos y técnicas de diagnóstico para ajustarse a las características del medio de transmisión.

Cuando se excede el ancho de banda utilizable de la trayectoria de transmisión, comienzan entonces los problemas de distorsión de amplitud y de retardo de fase. Estas imperfecciones o deterioros producen cambios en los perfiles del lóbulo principal y en las colas de la señal recibida. Ellas desplazan también los puntos de transición por cero, de tal forma que los impulsos comienzan a interferirse mutuamente (interferencia intersímbolo) y en los instantes de muestreo no habrá certidumbre en cuanto a la presencia o no de un impulso en particular.

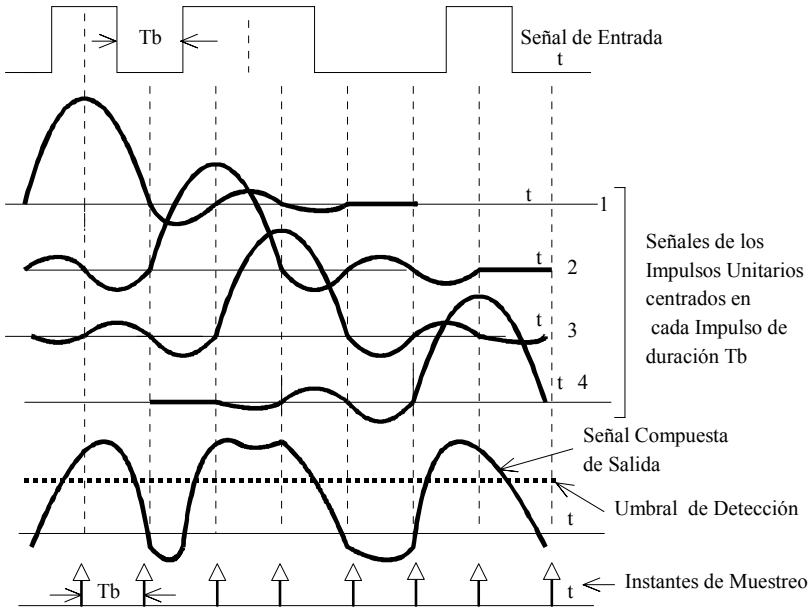


Fig. 2.48. Forma de Onda de la Señal recibida en Banda de Base

Combinando el perfilado de los impulsos y las características del filtro, se puede minimizar la amplitud de las colas (rizado) de tal manera que la velocidad de los impulsos y los instantes de muestreo no necesitan ser muy precisos, como se muestra en la Fig.2.48. Sin embargo, a pesar de esta aproximación, estos sistemas necesitan sincronización y que esta información sea transportada en alguna forma y recuperada en el receptor. Esta es la forma de operación sincrónica, para diferenciarla de los sistemas, especialmente de baja velocidad, en los cuales no hay sincronización.

Los circuitos sincrónicos actuales de alta velocidad se diseñan para trabajar a ciertas velocidades específicas recomendadas por el UIT-T y que pueden utilizarse tanto en los sistemas telefónicos como en las redes de datos.

2.7.2. Codificación y Modulación Compuesta

Codificación

Se puede demostrar que la máxima velocidad de modulación (en baudios o impulsos por segundo) que un canal ideal puede soportar es del orden del ancho de banda del canal, y los canales de voz, cuyo ancho de banda es de aproximadamente 3 kHz, pueden transmitir teóricamente hasta 3000 baudios. Los canales reales, debido al ruido y a los diferentes tipos de distorsión, tienen un ancho de banda efectivo mucho más angosto; prácticamente, la velocidad límite que un canal telefónico puede soportar es de 2400 baudios. Mediante los métodos de modulación M-aria se puede llegar hasta 14400 bps con una velocidad de 2400 baudios sobre un canal de voz. Velocidades superiores solamente se logran mediante control de error y compresión de datos.

Cuando los datos se transmiten a velocidades relativamente bajas (hasta 1200 bps), la señal modulada puede llevar la información en forma binaria. En general, el contenido de información de una señal codificada se puede expresar mediante la expresión

$$I = \log_2 m \quad \text{bits} \tag{2.78}$$

donde I es la cantidad de información, en bits, y m el número de estados posibles.

En el caso binario m = 2 y la información transmitida es de 1 bit por impulso o por baudio. Nótese que la palabra “bit” es una medida de la cantidad de información, pero como la palabra “bit” viene de la contracción inglesa “binary digit”, se ha generalizado el uso de la palabra “bit” para indicar también el impulso o dígito binario. El lector debe estar atento a esta situación un poco ambigua y diferenciar cuándo la palabra “bit” significa “cantidad de información” y cuándo significa “impulso o dígito binario”.

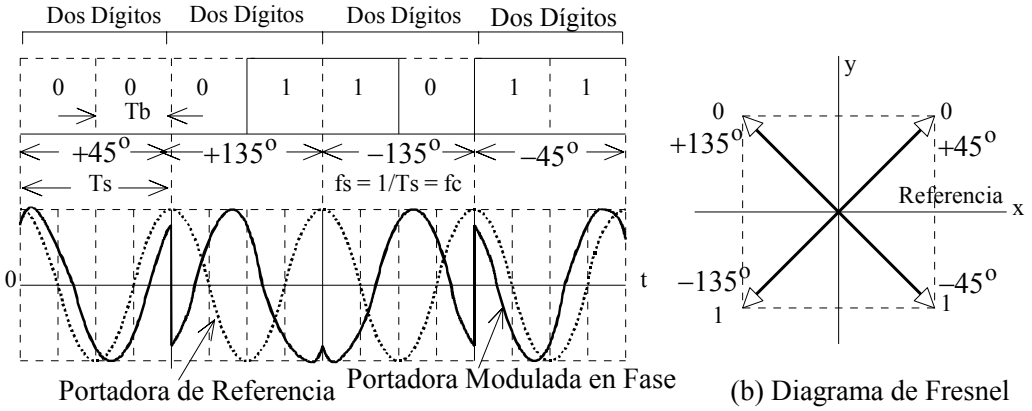
Se puede demostrar también que si los impulsos tiene una duración T_b, la velocidad de información se puede expresar en la forma

$$V_i = \frac{1}{T_b} \log_2 m = V_b \log_2 m \quad \text{bits por segundo (bps)} \tag{2.79}$$

donde $V_b=1/T_b$ es la velocidad de modulación, en baudios. Nótese que en el caso binario (m = 2), las velocidades de información y de modulación son iguales numéricamente.

Pero cada impulso puede contener más de un bit de información si se varía alguna de sus características. Por ejemplo, la amplitud y la fase de una señal sinusoidal pueden variar. En este caso es posible transmitir dos bits por baudio.

En general, se puede "empacar" más información en una señal haciendo que alguna de sus características asuma varios estados. La modulación multifase PSK y sus variaciones (QAM y DPSK) es quizás la técnica más utilizada en los módems de velocidades superiores a los 1200 bps porque la técnica PSK es relativamente inmune al ruido en el circuito de transmisión. Un ejemplo se muestra en la Fig.2.49(a) y (b); en efecto, se divide la secuencia de entrada en bloques de dos impulsos binarios y se relaciona cada combinación posible de dos impulsos a un valor particular del ángulo de desfase; por ejemplo, $00 \rightarrow 45^o$, $01 \rightarrow 135^o$, $10 \rightarrow -135^o$ y $11 \rightarrow -45^o$; en la Fig. 2.49(b) se muestra el Diagrama de Fresnel correspondiente. Esta asignación caracteriza a los moduladores QPSK que son muy utilizados en la práctica. Con este esquema puede efectuarse la transmisión de dos bits por impulso. Si el sistema opera a una velocidad de 1200 baudios, el proceso de codificación permite transmitir a 2400 bps. Este tipo de codificación se emplea en los Módems UIT-T V.22, V.26, V.27 y Bell 201C para transmitir a 2400 bps, y en el Módem V.29 para transmitir a 4800 bps, como se muestra en la Fig. 2.58.



(a) Forma de la Señal Modulada (b) Diagrama de Fresnel

Fig. 2.49. Modulación PSK (QPSK).

Vimos anteriormente que el modulador M-ario procesa bloques de L dígitos binarios asignándole a cada bloque distinto una cualquiera de M fases, de acuerdo con la relación $M = 2^L$. La asignación de fases se hace según el Código Gray. En efecto, en el Código Gray dos números sucesivos difieren solamente en un solo dígito. Con el código binario puro, en dos números sucesivos desde uno hasta todos los dígitos pueden ser diferentes. Por ejemplo, el Módem Bell 208A es un módem 8-ario (L = 3) en el cual la asignación de fases es la siguiente:

$000 \rightarrow 45^o$, $001 \rightarrow 90^o$, $011 \rightarrow +135^o$, $010 \rightarrow 180^o$

$110 \rightarrow -135^o$, $111 \rightarrow -90^o$, $101 \rightarrow -45^o$ y $100 \rightarrow 0^o$

cuyo Diagrama de Fresnel se muestra en la Fig. 2.50. Nótese en este diagrama que en la codificación de dos fasores consecutivos un solo dígito es el que cambia. El Código Gray reduce los efectos indeseables del canal sobre la señal digital.

Modulación Compuesta

En general, si se utiliza un alfabeto de M símbolos, donde $M = 2^L$ siendo L el número de bits por símbolo, se puede generar una secuencia de V_b símbolos por segundo con M valores correspondiendo a una velocidad de información

$$V_i = L \cdot V_b = V_b \cdot \log_2 M \quad \text{bps} \qquad (2.80)$$

relación que es de la misma forma que la relación (2.79).

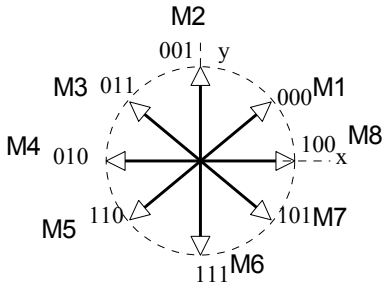


Fig. 2.50. Diagrama de Fresnel del Modem Bell 208A.

Este modo de operación se puede realizar con la ayuda de un codificador que divida la secuencia binaria en bloques de L bits y, para cada bloque, produzca un símbolo **a** de un conjunto de M valores posibles. En la práctica, estos valores posibles son los valores de una portadora sinusoidal de frecuencia fija f_c pero con M valores de fase diferentes. En la Fig. 2.51 se muestra la relación entre V_b, L, M y V_i.

La señal transmitida por el canal consiste entonces en una portadora sinusoidal modulada (en fase o amplitud, o en ambas) por una secuencia de $\mathbf{a_i}$ símbolos producidos por el codificador. Esta señal puede considerarse también como la superposición de portadoras desfasadas en un ángulo dado (modulación QAM), como se muestra en la Fig. 2.50. En efecto, los fasores M_6, M_4, M_2 y M_8 están desfasados entre sí en un ángulo de 90° (fasores ortogonales); pero, a su vez, ellos están desfasados en un ángulo $\phi = \pi / 4$ en relación con los fasores M_5, M_3, M_1 y M_7, desfasados entre sí también en 90°. Esta propiedad es la que permite la modulación compuesta Amplitud-Fase en la cual cada grupo de fasores puede ser modulado separadamente en amplitud y que caracteriza a la modulación QAM. La operación e instrumentación de esta modulación, para cualquiera velocidad, se puede explicar mediante los diagramas de bloque de la Fig. 2.52 y 2.53.

Velocidad de Modulación Vb Baudios	**M**	**L**	Velocidad de Transmisión Vi bps
1200	2	1	1200
1200	4	2	2400
1600	8	3	4800
2400	8	3	7200
2400	1	4	9600

Fig. 2.51. Relación entre Vb, L, M y Vi.

Nótese que $T_b = 1/f_b = 1/V_b$, donde T_b es la duración de un dígito binario y f_b la frecuencia de señalización a la <u>entrada</u> del modulador. Asimismo, $T_s = L\ T_b = 1/f_s$, donde f_s es la frecuencia de señalización a la <u>salida</u> del modulador, es decir, en el canal; la duración de cada trozo de señal en el canal es precisamente T_s.

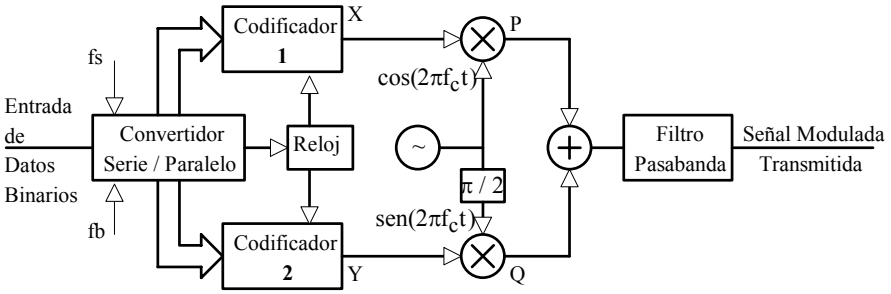


Fig.2.52. Modulación M-PSK o M-QAM

Las dos portadoras moduladas P y Q, Fig. 2.52, constituyen dos canales de transmisión QAM diferentes. La separación de los canales y la demodulación se efectúa en el demodulador, Fig. 2.53.

La demodulación requiere la regeneración local de la frecuencias de portadora y de señalización sincronizadas con las correspondientes en el transmisor. La señal de señalización se utiliza para interpretar y descodificar las señales demoduladas X'_m y Y'_m, Fig. 2.53. Al inicio de la transmisión se utiliza secuencias de sincronización ("training sequences") para lograr la sincronización de los relojes.

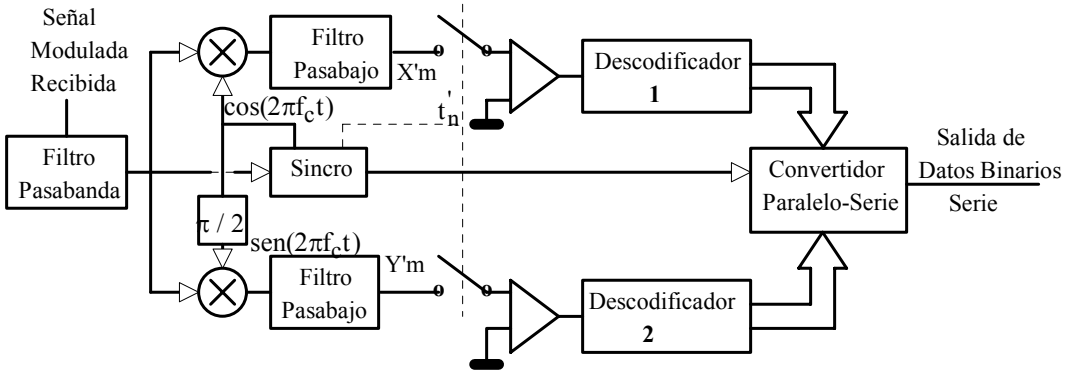


Fig. 2.53. Demodulación M-PSK o M-QAM

En cuanto al modulador, la secuencia serie de datos binarios d_1, d_2, ….,d_k, ….. se aplica al convertidor serie/paralelo, el cual produce bloques de L dígitos binarios que se codifican en los codificadores 1 y 2 de acuerdo con el tipo o patrón de modulación requerido. Las salidas de estos codificadores representan los valores X_m o Y_m de las coordenadas (x, y) del diagrama de Fresnel para cada uno de los M bloques de L dígitos binarios producidos.

Para entender mejor las operaciones de conversión serie/paralelo y codificación, consideremos un módem PSK 8-ario, cuyo diagrama de Fresnel o patrón de modulación se muestra en la Fig.2.54. La codificación utilizada es arbitraria, pero se ajusta al Código Gray.

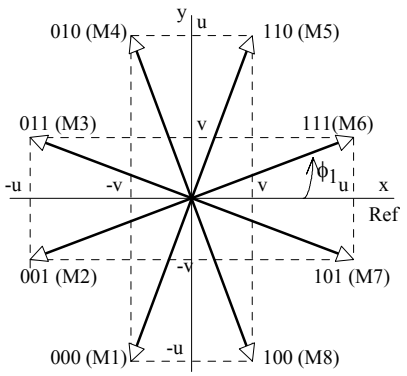


Fig. 2.54. Diagrama de Fresnel 8-PSK/DPSK.

La señal modulada es, de la Fig. 2.36(a),

$$x_c(t) = X_m \cos(2\pi f_c t) + Y_m \operatorname{sen}(2\pi f_c t)$$

$$= \sqrt{X_m^2 + Y_m^2} \cos(2\pi f_c t - \operatorname{arctg}\frac{Y_m}{X_m})$$

$$= A_m \cos(2\pi f_c t - \phi_m) \qquad (2.81)$$

donde $A_m = \sqrt{X_m^2 + Y_m^2}$ y $\phi_m = \operatorname{arctg}\frac{Y_m}{X_m}$

Si no hay modulación de amplitud, el valor de A_m será siempre constante y los extremos de los fasores estarán sobre una circunferencia, como es el caso de las Figs. 2.50 y 2.54. Sin embargo, si hay modulación de amplitud, el valor de A_m variará según el tipo de modulación, como es el caso, por ejemplo, de los Módems UIT-T V.22 , V.29 y V.32, mostrados en la Fig. 2.58.

Hay que determinar entonces los valores de X_m y Y_m para cada valor de fase o cada combinación de tres dígitos binarios, que identificaremos con las letras ABC. La asignación de fases que hemos establecido es la siguiente, Fig. 2.54:

$$000 \rightarrow M1,\ 001 \rightarrow M2,\ 011 \rightarrow M3,\ 010 \rightarrow M4,$$

$$110 \rightarrow M5,\ 111 \rightarrow M6,\ 101 \rightarrow M7,\ 100 \rightarrow M8$$

La asignación de estos fasores es arbitraria, pero sigue el Código Gray. Sin embargo, para simplificar la normalización, el UIT-T ha establecido algunas configuraciones fijas, en particular en las Series V, de las cuales se muestra algunas en la Fig. 2.58.

El diagrama de Fresnel de la Fig. 2.54 tiene, en este caso particular, ocho puntos equidistantes sobre su circunferencia y caracteriza a un modulador PSK o DPSK 8-ario que se puede emplear para transmitir información hasta 4800 bps.

El patrón de modulación de la Fig. 2.54 nos permite establecer la Tabla de Verdad o de Codificación de la Fig. 2.55.

En esta Tabla de Codificación puede demostrarse que los dígitos A y C determinan el valor de X_m (A el signo y C la magnitud), mientras que los dígitos B y C determinan el valor de Y_m (B el signo y C la magnitud). En efecto, para X_m y Y_m se tiene:

M	A	B	C	Xm	Ym
1	0	0	0	-v	-u
2	0	0	1	-u	-v
3	0	1	1	-u	v
4	0	1	0	-v	u
5	1	1	0	v	u
6	1	1	1	u	v
7	1	0	1	u	-v
8	1	0	0	v	-u

Código Gray

Fig. 2.55. Tabla de Codificación

Signo de X_m: $S_x = A \rightarrow \oplus$

Módulo de X_m:

$$|X_m| = \begin{cases} u \rightarrow U_x = \overline{A}\,\overline{B}\,C + \overline{A}\,B\,C + \\ \qquad + A\,B\,C + A\,\overline{B}\,C = C \\ v \rightarrow V_x = \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C} + \overline{A}\,B\,\overline{C} + \\ \qquad + A\,B\,\overline{C} + A\,\overline{B}\,\overline{C} = \overline{C} \end{cases}$$

Signo de Y_m: $Sy = B \rightarrow \oplus$

Módulo de Y_m: $$|Y_m| = \begin{cases} u \rightarrow U_y = \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C} + \overline{A}\,B\,\overline{C} + A\,B\,\overline{C} + A\,\overline{B}\,\overline{C} = \overline{C} \\ v \rightarrow V_y = \overline{A}\,\overline{B}\,C + \overline{A}\,B\,C + A\,B\,C + A\,\overline{B}\,C = C \end{cases}$$

Los valores normalizados de u y v se obtienen de la forma siguiente. Del patrón de modulación,

$\phi_1 = \pi/8$; entonces $u = \cos(\pi/8) = 0{,}924$ y $\text{sen}(\pi/8) = 0{,}383$.

Evidentemente, en este caso se verifica que $\sqrt{u^2 + v^2} = 1$ pues los fasores están sobre una circunferencia de radio unitario. Los dígitos A, B y C se aplican a un circuito lógico combinatorio que produce los valores lógicos S_x, U_x, V_x, S_y, U_y y V_y, los cuales van a los correspondientes codificadores o convertidores para generar los valores de X_m y Y_m. En este caso particular no es necesario un circuito combinatorio pues los convertidores se pueden controlar directamente con los dígitos A, B y C y sus complementos. Un circuito para el codificador o convertidor para X_m se muestra en la Fig. 2.56. Para Y_m el circuito es similar, como puede verificarlo el lector.

Los valores numéricos de u, v, R1, R2, R3 y R4, Fig. 2.56, con V = 10 V, se pueden obtener a partir de las siguientes relaciones:

$$\frac{R2 + R3}{R1 + R2 + R3} = \cos(\pi/8) = 0{,}924 = \frac{u}{V} \quad \text{y} \quad \frac{R3}{R1 + R2 + R3} = \text{sen}(\pi/8) = 0{,}383 = \frac{v}{V}$$

Si, por ejemplo, se hace R3 = 5 kOhm, entonces R2 ≈ 7 kOhm, R3 ≈ 1 kOhm, R4 = 100 kOhm, u = 9,24 V y v = 3,83 V .

Esto completa la síntesis o diseño de un modulador PSK/DPSK 8-ario. Este procedimiento se puede extender para cualquier modulador M-PSK/DPSK/QAM [Briceño, 1992].

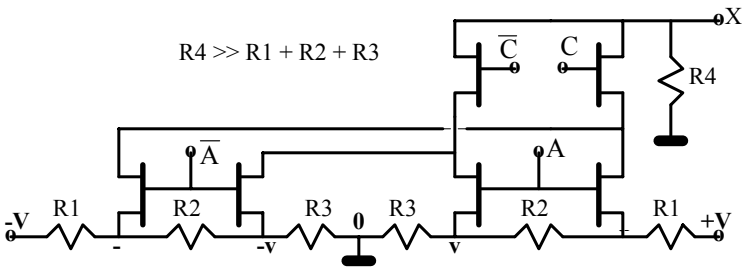


Fig. 2.56. Codificador de Xm.

En cuanto al demodulador, una vez obtenidos los valores X'_m y Y'_m, Fig. 2.53, la descodificación se efectúa considerando las ecuaciones lógicas correspondientes a **u** y **v** para obtener los dígitos A, B y C. En la Fig. 2.57 se muestra una forma posible de instrumentación del demodulador.

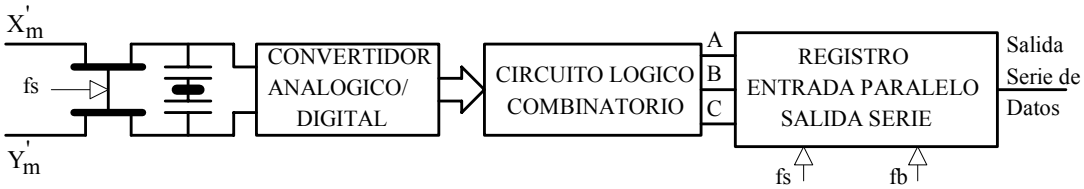
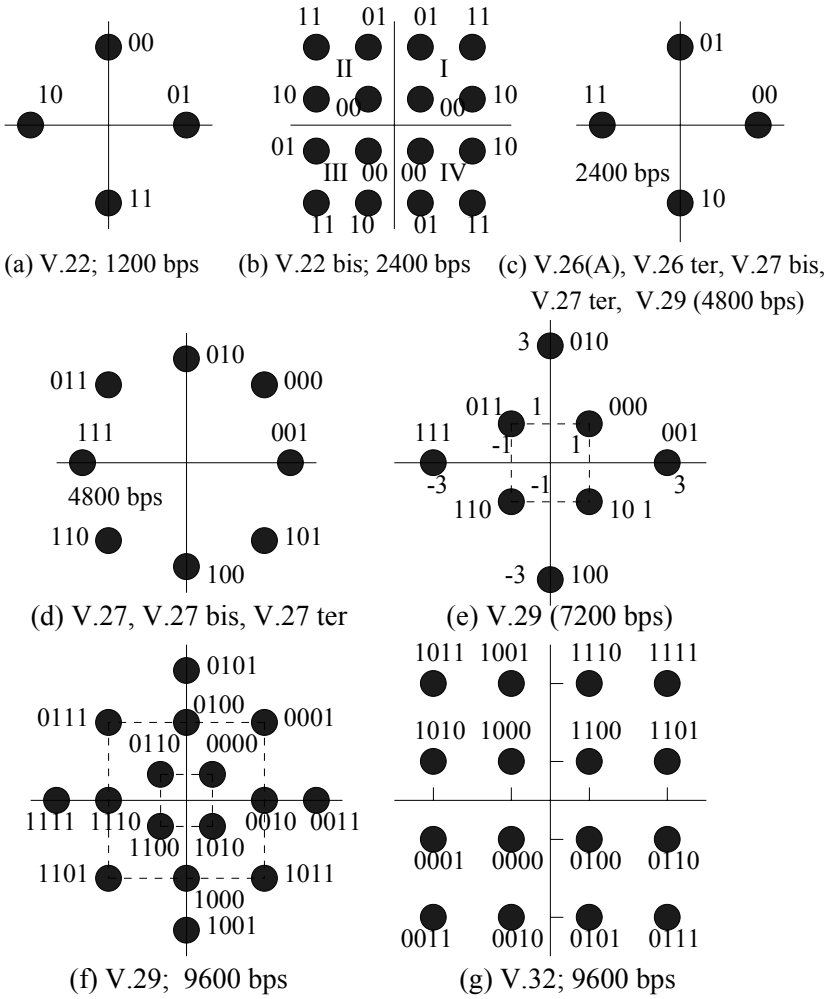


Fig. 2.57. Esquema del Demodulador PSK 8-ario

En la práctica los circuitos de codificación y descodificación son más complicados pues incorporan elementos para supervisión, mantenimiento e interfaz.

2.7.3. Recomendaciones del UIT-T

La asignación de los códigos al diagrama de fases se establece mediante acuerdos internacionales a fin de normalizar los equipos y facilitar la interconexión entre usuarios no sólo a nivel nacional sino internacional. En la Fig. 2.58 se muestra algunos de los diferentes patrones de fase recomendados por el UIT-T en la Serie V.



(a) V.22; 1200 bps (b) V.22 bis; 2400 bps (c) V.26(A), V.26 ter, V.27 bis, V.27 ter, V.29 (4800 bps)

(d) V.27, V.27 bis, V.27 ter (e) V.29 (7200 bps)

(f) V.29; 9600 bps (g) V.32; 9600 bps

Fig. 2.58. Diagramas de Fresnel de Modems UIT-T.

Los módems modernos tienen incorporadas muchas funciones no solamente para aumentar la velocidad de transmisión sino también para mejorar su comportamiento. Entre estas funciones se tiene la aleatorización (“scrambling), el control automático de ganancia, capacidad de multiplexamiento (“split-stream”), cancelación de ecos, técnicas de control de error y de compresión de datos, etc. En los próximos capítulos veremos algunas de estas características.

2.8. CODIGOS DE LINEA

2.8.1. Introducción

Hasta ahora hemos supuesto que las señales digitales en banda de base estaban codificadas en binario natural con o sin retorno a cero. Mientras algunos sistemas pueden transmitir directamente en binario natural, otros convierten las secuencias binarias

originales en nuevas secuencias binarias, denominadas “Códigos de Línea”. Estas formas tienen algunas ventajas en términos de facilidad de procesamiento y sincronización, requerimientos de ancho de banda, y otros factores.

En la Fig. 2.59 se muestra algunos de los códigos de línea utilizados en la práctica.

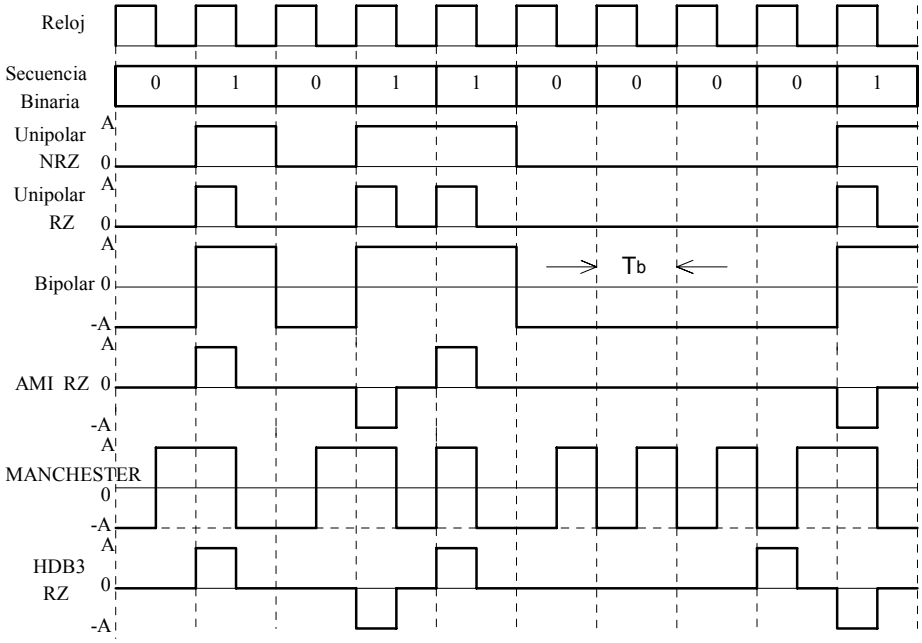


Fig. 2.59. Códigos de Línea.

En general, los códigos de línea deben cumplir, entre otras, las siguientes condiciones:

1. Que la amplitud de la componente continua sea lo más pequeña posible. La componente continua, además de demandar potencia adicional, produce derivas en la línea de base de la señal. Por otro lado, la presencia de componentes continuas genera impulsos unitarios periódicos en el espectro, los cuales complican los circuitos de control automático de ganancia en el receptor.
2. Que las señales de temporización o sincronización puedan ser fácilmente extraídas de la señal recibida. La señal codificada debe poseer muchas transiciones o cruces por cero, aunque la señal original contenga largas secuencias de “UNOS’ o “CEROS”.
3. Que el contenido espectral sea el más adecuado según las características del medio de transmisión. El espectro deberá estar contenido dentro de una banda restringida, es decir, deberá ser cero en los bordes de la banda y máximo en el centro de la misma.
4. Que la señal codificada pueda ser descodificada unívocamente para permitir la recuperación fiel de la secuencia original. Para ello, el código de línea debe

satisfacer la "condición del prefijo", esto es, ninguna "palabra" del conjunto de palabras del código debe ser la primera parte de otra palabra. También es deseable que la descodificación pueda realizarse inmediatamente luego de recibida la secuencia.

5. El código debe ser eficiente para aprovechar al máximo la capacidad del canal y ser inmune a las interferencias y ruido, lo cual produce una elevada tasa de errores.
6. Además de los aspectos puramente técnicos, hay que tomar en cuenta el aspecto económico. Es deseable que el código sea fácil de generar y detectar a fin de reducir la complejidad y costo del sistema. De esta manera se asegura una mayor confiabilidad.

Es muy difícil que un solo código pueda cumplir todas las condiciones anteriores, y la selección de un determinado código va a depender de su aplicación. A continuación vamos a describir algunos de estos códigos.

2.8.2. Descripción de algunos Códigos de Línea

Código AMI ("Alternate Mark Inversion)

En este código, cuando se asigna un impulso positivo al primer "1", al siguiente "1" se le asigna un impulso negativo, y así sucesivamente. Por lo tanto, se asignan alternativamente impulsos positivos y negativos a los "1" lógicos. Una forma de código AMI de gran utilización en la práctica es el código NRZI unipolar, el cual opera según el principio de que las transiciones (0 a V ó V a 0) ocurren cuando el próximo dígito es un "1".

Formas de este código se aplican en los sistemas troncales T1, y en la transmisión de canales B, en la Red Digital de Servicios Integrados de acuerdo con la Recomendación UIT-T I.430.

Código HDB3 (High Density Bipolar 3)

En el caso del Código HDB3 consideremos la Fig. 2.60.

El algoritmo de generación del Código HDB3 es el siguiente:

Cuando aparece consecutivamente menos de cuatro "0", se sigue las reglas del Código AMI.

Cuando aparece consecutivamente cuatro o más "0", el grupo "0000" se reemplaza por "B00V" o "000V", donde

- Impulso "B": Se le asigna un "1" de acuerdo con la regla AMI.
- Impulso "V": Se le asigna un "1" (impulso de violación) que no está de acuerdo con la regla AMI.

El uso de "B00V" o "000V" depende de la violación precedente. Si la violación precedente fue V-, se toma "000V", y si la violación precedente fue V+, se toma "B00V". Los impulsos de violación son los impulsos V+ o V- remarcados en la Fig. 2.60.

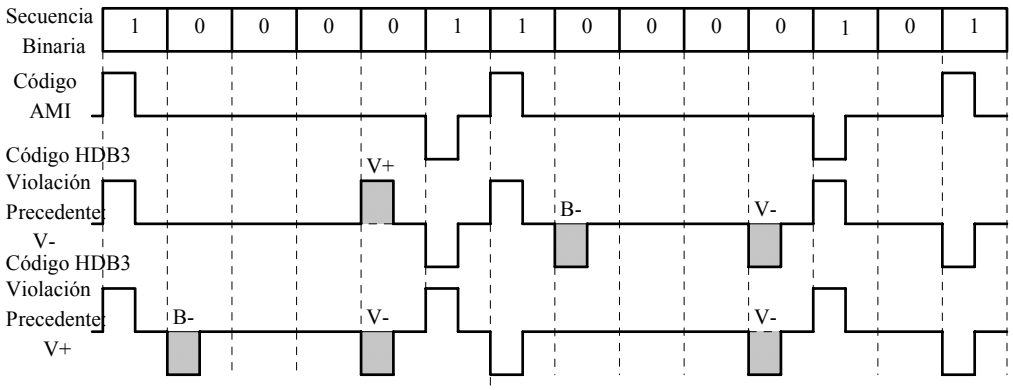


Fig. 2.60. Codificación HDB3

Este código se utiliza en los sistemas de 30 canales de voz, de acuerdo con la Recomendación UIT-T G.732.

Código Manchester

Cuando aparece un "1", la salida es +V durante la primera mitad del intervalo y se hace cero en la segunda mitad.

Cuando aparece un "0", la salida es cero en la primera mitad del intervalo y pasa a +V en la segunda mitad.

Las transiciones en el centro de los bits facilitan la sincronización.

La forma bipolar del Código Manchester, mostrada en la Fig. 2.59, se aplica en las Redes de Area Local IEEE 802.3 (ETHERNET), IEEE 802.4 Token Bus y IEEE 802.5 (Token Ring). La forma unipolar se utiliza en transmisión por fibras ópticas.

♣ Ejemplo 2.9

Vamos a representar la palabra Ab como:

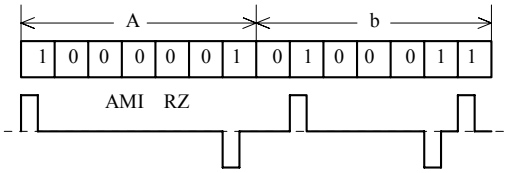
(1) Una señal AMI RZ, ASCII, transmisión sincrónica

(2) Una señal MANCHESTER bipolar, ASCII, transmisión sincrónica

Solución:

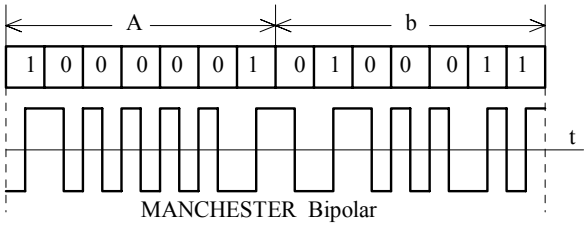
En ASCII: A => 1000001; b => 0100011

(1) La codificación de la palabra Ab en AMI RZ tiene la forma



(2) La codificación de la palabra Ab en MANCHESTER bipolar tiene la forma

♣



Otros códigos, que no mostraremos aquí, son: el Código PST (Paired Selected Ternary), el Código DICODE, el Código B3ZS (Bipolar 3-Zero Substitution), el Código B8ZS, el Código DUOBINARIO, el Código DIFASE, el Código CMI (Coded Mark Inversion), el Código Miller, etc.

Hay una clase particular de código de línea en el cual el codificador convierte grupos de M dígitos de entrada en grupos de N dígitos de salida, y se representan en la forma Código MB/NB; por ejemplo, si M = 4 y N = 5, se tiene el Código 4B/5B. Este código se utiliza en la Red de Area Metropolitana FDDI; en transmisión por fibras ópticas a 140 Mbps se utiliza el Código 5B/6B y el 8B/6B.

Estos códigos son de dominio público; sin embargo, en la práctica se encuentra códigos propietarios, es decir, códigos que son propiedad de un fabricante y que están protegidos por patentes.

2.9. RESUMEN

Con el fin de darle un tratamiento más completo al tema de la Transmisión de Datos, en este capítulo se da un breve repaso de las técnicas de modulación de señales más utilizadas y algunos otros aspectos de tipo teórico-práctico. Se supone que el lector de este libro tiene conocimientos básicos de electricidad, electrónica y de los sistemas de comunicación en general.

En general, se identifican dos tipos de modulación de señales de acuerdo con la clase de portadora: la “modulación de señales continuas” y la “modulación de impulsos”. En la modulación de señales continuas se describen dos esquemas: la “modulación lineal”, sobre la cual se basan los sistemas AM, DSB, SSB, VSB y QAM, y la “modulación angular”, sobre la cual se basan los sistemas FM y PM. En este capítulo se describen todos estos sistemas.

En la modulación de impulsos se puede distinguir dos formas: la “modulación analógica de impulsos”, sobre la cual se basan los sistemas PAM, PDM y PPM, y la “modulación de impulsos”, una de cuyas realizaciones es la “modulación de impulsos codificados (PCM)”, que es la modulación básica de la transmisión digital de señales. La cobertura de estos temas es necesariamente breve pues solamente se trata de recordar las técnicas de modulación usuales que se aplicarán en el resto de los capítulos.

De gran importancia para la transmisión de datos es la "modulación digital con portadora modulada", mediante la cual es posible la transmisión de datos a gran distancia y por cualquier medio físico. Se describen con algún detalle los esquemas básicos utilizados en la transmisión digital binaria: ASK, FSK, PSK y DPSK, y para complementar el tratamiento, se describen algunos esquemas de modulación m-aria: PSK M-aria, DPSK M-aria y FSK M-aria de Banda Ancha.

La transmisión de datos es bastante compleja pues son muchos los factores que intervienen en su desempeño. No basta generar una secuencia PCM y transmitirla; hay que conocer los canales de transmisión, sus características eléctricas, las formas de generación, sincronización y detección, etc., los diagramas de Fresnel y la necesidad de los códigos de línea. En las Secciones 2.7 y 2.8 introducimos estos aspectos. Como ya lo explicamos al principio de este capítulo, el lector que tenga conocimientos básicos de los sistemas de modulación, digitales en particular, puede saltar las Secciones 2.1 a 2.6 e ir directamente a la Sección 2.7.

2.10. **CUESTIONARIO**

1. Explique la relación entre la velocidad de modulación, la velocidad de información y el ancho de banda de un canal cuando se transmite impulsos binarios y m-arios con o sin redundancia.
2. Explique por qué no se puede transmitir señales de voz codificadas en PCM, moduladas o no, sobre un canal telefónico aún si éste está acondicionado. Se supone que el ancho de banda de las señales de voz es de 4 kHz.
3. ¿Qué es la modulación? Diga los dos tipos de modulación de señales.
4. En la modulación lineal se distinguen cuatro esquemas: diga cuáles son y descríbalos brevemente.
5. Defina lo que es la modulación angular y describa los dos esquemas usuales.
6. Defina lo que es la modulación analógica de impulsos y describa los tres esquemas de uso corriente.
7. Describa los mecanismos de generación y detección de la modulación de impulsos codificados (PCM).
8. ¿Qué es la modulación digital con portadora modulada?
9. Dibuje el diagrama de bloques de los modelos para transmisión y recepción de señales binarias mediante portadora modulada, y describa las funciones de cada elemento.
10. Sea la Fig. 2.16 en Modulación FSK. Si T_b = 1 milisegundo, f_1 = 2000 Hz y f_o = 1000 Hz, dibuje la forma de onda FSK cuando la secuencia de entrada es 1 0 0 1 1 1 0 1 0 1.
11. Sea la Fig. 2.16 en Modulación PSK. Si T_b = 1 milisegundo y la frecuencia de portadora es de 2000 Hz, dibuje la forma de onda PSK para la misma secuencia de entrada del problema anterior. Suponga que "1"$\rightarrow 0^o$ y "0"$\rightarrow \pi$.

12. Sea el modulador DPSK de la Fig. 2.31. Si la velocidad de modulación de la secuencia binaria de entrada es de 1000 baudios y la frecuencia de portadora de 2000 Hz, dibuje la forma de onda DPSK para la misma secuencia de entrada del problema anterior Observe las diferencias entre las formas de onda de estos dos problemas.

13. Diga cuáles son los métodos comunes de demodulación y sincronización de señales moduladas con portadora sinusoidal y dibuje los circuitos correspondientes.

14. Explique por qué la modulación PSK se puede considerar no sólo como una modulación de fase mediante una señal binaria, sino también como una modulación DSB mediante una señal modulante bipolar.

15. Describa las características de la modulación binaria ASK y sus formas de demodulación. Repita para FSK, PSK y DPSK.

16. En la modulación ASK, ¿Qué pasaría si el umbral de detección del comparador tiene un valor constante?

17. Compare los sistemas PSK y DPSK: ventajas y desventajas, facilidad de instrumentación, ancho de banda, requerimientos de potencia, etc. Repita para ASK y FSK.

18. Demuestre las siguientes relaciones en ASK, FSK y PSK:

(a) $$\left[\frac{Si}{Ni}\right]_{ASK} = \frac{\gamma}{4}; \qquad \left[\frac{Si}{Ni}\right]_{FSK} = \frac{\gamma}{2}; \qquad \left[\frac{Si}{Ni}\right]_{PSK} = \frac{\gamma}{2}$$

(b) Si las Probabilidades Pe son iguales en ASK, FSK y PSK, entonces

$$\left[\frac{Si}{Ni}\right]_{ASK} = \left[\frac{Si}{Ni}\right]_{FSK} = 2\left[\frac{Si}{Ni}\right]_{PSK}$$

(c) Si la relación Si/Ni en el canal es de 10 dB, la velocidad de transmisión de 1200 bps y la densidad espectral de ruido de 10^{-10} W/Hz, demuestre que la amplitud de la portadora y la probabilidad de error Pe en ASK, FSK y PSK Coherentes son:

ASK: A = 4,382 mV; $P_e = 3{,}872 \times 10^{-6}$

FSK: A = 3,098 mV; $P_e = 3{,}872 \times 10^{-6}$

PSK: Igual que en FSK

19. En un sistema binario PSK Coherente, la amplitud de la portadora a la entrada del receptor es de 1 mV, la densidad espectral de ruido es 10^{-11} W/Hz, la velocidad de transmisión es de 5000 bps y el ancho de banda del canal es $B_c = 2f_b$.

Demuestre que

(a) La probabilidad de error es Pe = $7{,}827 \times 10^{4}$

(b) La capacidad del canal es C = 18,07 kbps

(c) La velocidad promedio Ve a la cual se producen los bits en error, en bits erróneos/segundo es Ve = 3,914 ≈ 4 bits en error/segundo.

20. Demuestre que si las condiciones de amplitud de portadora, ancho de banda y densidad espectral son las mismas, entonces la relación S_i/N_i en FSK es 3 dB mayor que en ASK.

21. Demuestre que para la misma probabilidad de error, la relación S_i/N_i en PSK es mayor es 3 dB mayor que en ASK.

22. Si la función de autocorrelación de una secuencia aleatoria binaria unipolar NRZ de período T_b y amplitud A viene dada por $R_A(\tau) = \frac{A^2}{4}\left[1 + \Lambda(\frac{\tau}{T_b})\right]$, demuestre que la potencia promedio de una señal ASK binaria es $< x_{ASK}^2(t) >= \frac{A^2}{4}$.

[Nótese que $T_b = 1/f_b$]

24. (a) Si la función de autocorrelación de una secuencia aleatoria binaria bipolar NRZ de período T_b y amplitudes $\pm A$ viene dada por $R_d(\tau) = A^2\Lambda\left[\frac{\tau}{T_b}\right]$, demuestre que la potencia promedio de una señal PSK binaria es igual a $< x_{PSK}^2(t) >= \frac{A^2}{2}$.

(a) Demuestre también que la densidad espectral de potencia de una señal PSK es igual a

$$S_{PSK}(f) = \frac{A^2}{4f_b}\left[\text{sinc}^2(\frac{f+f_c}{f_b}) + \text{sinc}^2(\frac{f-f_c}{f_b})\right]$$

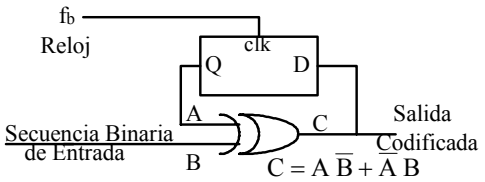
25. En la ecuación (2.29) y Fig. 2.21, se da la densidad espectral de potencia de una señal ASK para una secuencia binaria unipolar NRZ. La densidad espectral de ruido en el canal es $\eta/2$ en W/Hz.

(a) Demuestre que la potencia contenida dentro del ancho de banda $B = 2f_b$, centrado en $\pm f_c$, es igual a 0,951 veces la potencia total de la señal ASK

(b) Demuestre que el 50% de la potencia total de la señal ASK se consume en la transmisión de la portadora.

26. En el problema 18 obtuvimos la densidad espectral de potencia de una señal PSK. Demuestre que la potencia contenida en el ancho de banda $B = 2f_b$ es igual al 90,2% de la potencia total de la señal PSK. Nótese que en este caso toda la potencia es útil, pues no se consume potencia en la transmisión de una portadora.

27. En la figura se muestra un Codificador Diferencial.



La secuencia de entrada tiene la forma $\overleftarrow{1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1}$. La flecha indica la dirección del flujo de datos. Suponga

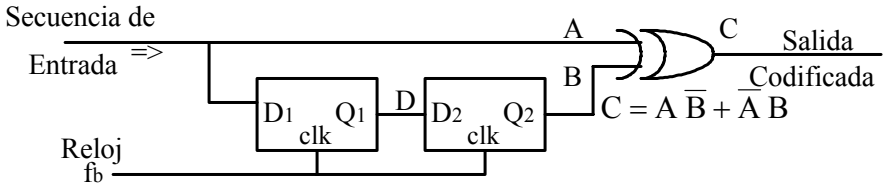
que el primer bit de salida es un “0” y la fase correspondiente 0 radianes.

(a) Demuestre que la salida codificada es

0 1 0 0 1 1 0 1 1 1 0

(c) Dibuje la forma de onda de la señal modulada DPSK. Suponga que $f_c = f_b$.

28. Con el codificador mostrado en la figura se puede efectuar también codificación diferencial.



Suponga que inicialmente la salida es un “1” y la fase es 0 radianes.

También, $Q_1 = Q_2 = B =$ “1” y $A =$ “0”.

(a) Demuestre que cuando la secuencia de entrada es **0** 1 1 1 0 1 0 1 1 0 0 1 la salida codificada es **1** 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1. Los dígitos en negrita son los valores iniciales.

(b) Dibuje la forma de onda de la señal DPSK. Suponga que $f_c = f_b$.

29. Discuta los criterios o guías para la selección de un método de modulación binaria.

30. Describa los mecanismos de la modulación digital M-aria y los sistemas más utilizados en la práctica.

31. ¿Qué es el diagrama de Fresnel? ¿Qué información nos proporciona el diagrama de Fresnel?

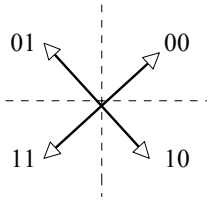
32. Dibuje el diagrama de Fresnel de un Módem UIT-T V.22 bis para operar a 2400 bps, y de un Módem UIT-T V.32 para operar a 9600 bps. ¿Por qué el diagrama de Fresnel en general no tiene más de ocho valores de fase?

33. Describa los mecanismos de la modulación compuesta y dibuje los circuitos básicos para modulación y demodulación M-PSK o M-QAM.

34. Sea la Fig. 2.49. Dibuje la forma de la señal modulada PSK 4-aria cuando la secuencia de entrada es 1 0 1 1 0 0 0 1.

35. Se tiene un modulador PSK 8-ario cuyo diagrama de Fresnel es igual al de la Fig. 2.38 (c). La frecuencia de portadora es de 1600 Hz y la velocidad de transmisión de la secuencia binaria de entrada es de 4800 bps. Dibuje con cuidado la forma de la señal modulada correspondiente cuando la entrada es de la forma 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 0.

36. Un sistema DPSK 4-ario está caracterizado por el diagrama de Fresnel de la figura ➔



La secuencia binaria de entrada al modulador tiene una velocidad de transmisión de 2400 bps. El ancho de banda del canal es de 3 kHz; la amplitud de la portadora es de 1 mV y la densidad espectral de ruido es de 10^{-11} W/Hz.

(a) Demuestre que la relación Si/Ni en el canal es de 9,208 dB y la probabilidad de error $P_e = 4{,}77 \times 10^{-4}$

(b) Dibuje la señal modulada DPSK de salida correspondiente a la entrada 1 0 1 1 0 10 0. Suponga que f_c = 1800 Hz. Haga el dibujo con cuidado para poder distinguir los cambios de fase.

37. Diga lo que es un "código de línea" y las condiciones que deben cumplir; describa también algunos de los códigos de línea de uso corriente.

38. De los códigos de línea mostrados en la Fig. 2.59, diga cuáles contienen impulsos periódicos en su espectro.

39. Investigue en qué sistemas prácticos se utilizan los códigos de línea AMI, HDB3, MANCHESTER Unipolar, MANCHESTER diferencial, AMI, CMI, B8ZS, 5B/6B y Miller.

CAPITULO III

CAPA FISICA
MODEMS E INTERFACES

3.1. INTRODUCCION

En la Capa Física es donde se resuelven todas las incompatibilidades entre los diferentes equipos y en ella se encuentran todos los dispositivos para interconectar un usuario con otro usuario, sea directamente por un canal o a través de una red. Normalmente la interconexión se efectúa entre computadores o terminales denominados "Equipos Terminales de Datos (ETD)" y los módems o adaptadores de comunicación denominados "Equipos de Terminación del Circuito de Datos (ETCD)".

Las secuencias generadas en la capa física en el extremo transmisor están diseñadas para ser interpretadas por la capa física del extremo receptor, en el cual se regeneran las correspondientes secuencias que son presentadas al usuario final. En la capa física no se toma en cuenta el significado o información contenido en la secuencia de datos, ni los diferentes formatos, etc.; todo esto es responsabilidad de las capas superiores. Por la capa física y su correspondiente medio de transmisión circulan dígitos binarios, lo que comúnmente se denomina "datos crudos" y su responsabilidad es transmitirlos sin error.

En los Protocolos de Capa Física se describe las características mecánicas, eléctricas, funcionales y de procedimiento para activar, mantener y desactivar conexiones físicas entre entidades de la Capa Enlace.

Las características mecánicas incluye las dimensiones y forma física de los conectores, la asignación de circuitos a cada "pin" del conector, las características de los cables, las formas de montaje, etc. Estas características hacen posible la interconexión física de equipos.

Las características eléctricas incluye los niveles de corriente y voltajes, los relojes de sincronización, las velocidades máximas, las frecuencias de operación, el acoplamiento de impedancias y toda la electrónica involucrada.

Las características o especificaciones funcionales asigna los significados y definiciones de las señales para cada circuito de interfaz. Por ejemplo, definición de circuitos para control, transferencia de datos, temporización y tierra. Las señales de datos, control y temporización se representan mediante secuencias de "UNOS" y "CEROS"; los valores y polaridad del voltaje o de la corriente dependen de la interfaz considerada.

Las especificaciones de procedimiento indican la configuración de las secuencias de control y de información, la aplicación y desactivación de los niveles de conexión física, etc. Como tiene que haber acuerdo entre los dos extremos del sistema, es necesaria la utilización de protocolos de capa física. En efecto, el protocolo de capa física ("hand-shaking protocol") se encarga de manejar todas las situaciones que se puedan presentar incluyendo la de proveer los recursos para la detección de errores.

Todas estas características están normalizadas con gran detalle por el UIT-T y por la Asociación de Industrias Electrónicas (Electronics Industries Association, EIA) de los Estados Unidos. En este libro presentaremos y explicaremos en forma muy sucinta las normas más utilizadas en la práctica. Para más información, el lector puede consultar las fuentes especializadas.

3.2. MODEMS UIT-T

3.2.1. Introducción

En principio, vimos, el módem es un adaptador que convierte las señales digitales producidas por terminales de datos en señales compatibles con el medio de transmisión.

El modo de transmisión depende de la velocidad de transmisión y del tipo de medio utilizado. A fin de garantizar la compatibilidad entre diferentes tipos de equipo, el UIT-T ha normalizado la gama completa de equipos y sistemas utilizados para la transmisión de datos sobre la infraestructura telefónica y sobre las redes de datos (Recomendaciones V y X).

En la Fig. 3.1 se muestra las áreas de aplicación especificadas por el UIT-T en las Recomendaciones de la Serie V.

Las Recomendaciones V y X están enfocadas en los siguientes renglones:

- Las velocidades de transmisión normalizadas
- La interfaz entre el módem y el terminal de datos
- Los tipos de señal aplicables a los medios de transmisión
- Los protocolos de acceso a las redes de datos

Cuando se toma en cuenta las diferencias entre las distintas técnicas empleadas, el equipo se puede dividir en tres categorías aplicables a las Recomendaciones V y X:

(a) Módems asincrónicos para la transmisión de datos a velocidades hasta 1200 baudios

(b) Módems sincrónicos para la transmisión de datos desde 1200 bps hasta 56 kbps

(c) Módems sincrónicos para transmisión de datos sobre canales de banda ancha. Esta categoría se puede subdividir en

- Módems de Banda de Base utilizados para la transmisión sincrónica sobre líneas físicas (par trenzado, cable coaxial, fibras ópticas, etc.) a velocidades desde 1200 bps hasta varios Mbps
- Módems de Banda de Grupo que operan a velocidades desde 48 kbps hasta 172 kbps

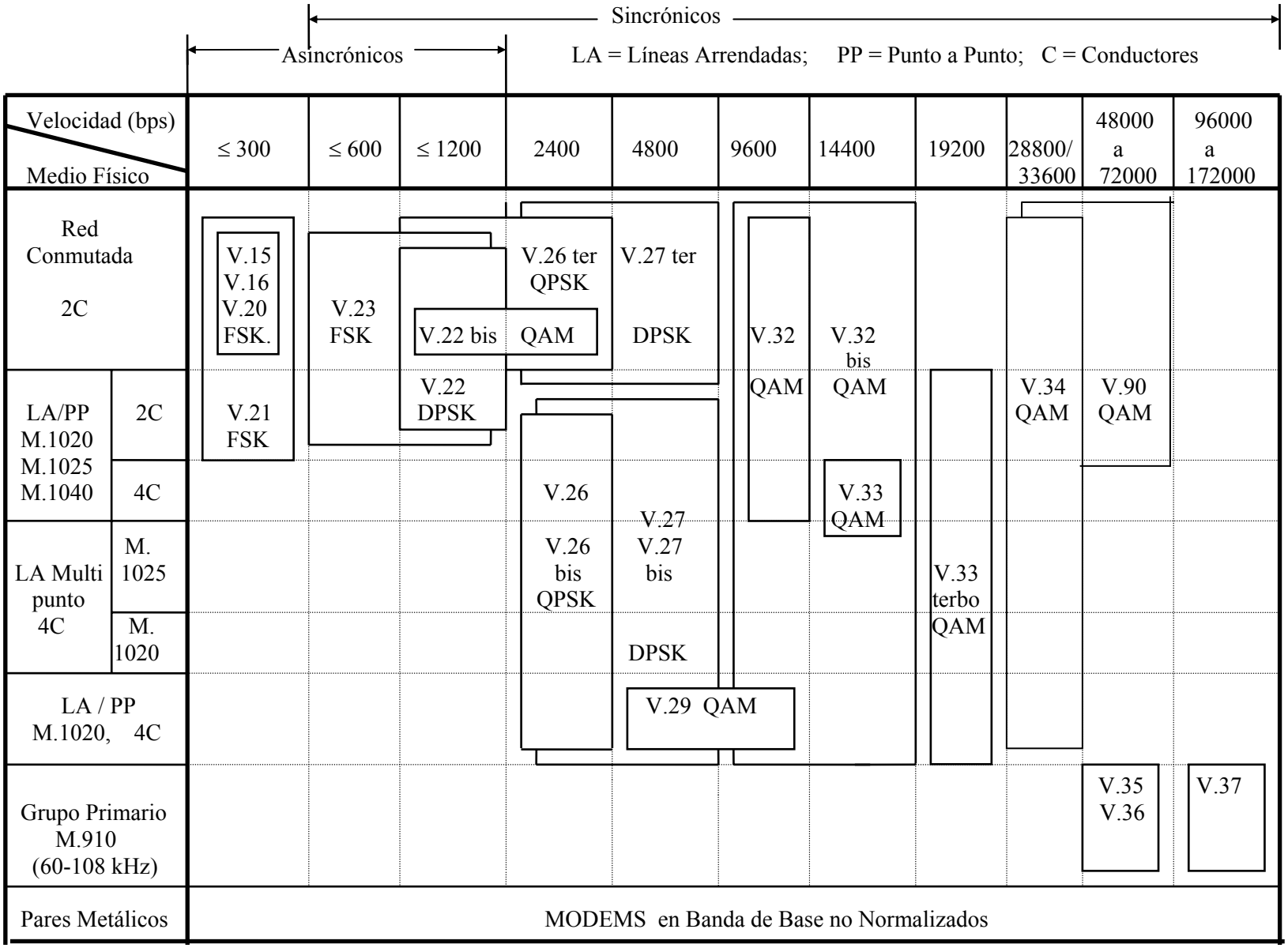


Fig. 3.1. MODEMS, Recomendaciones del UIT-T, Serie V.

3.2.2. Módems Asincrónicos (Tipo Arranque-Pare)

El UIT-T ha definido varios tipos de módems asincrónicos en sus Recomendaciones V.15, V.16, V.20, V.21 y V.23. La modulación utilizada es FSK.

En la Recomendación V.15 se especifica las características de los módems que incorporan acoplamiento acústico, y en la Recomendación V.16 se da las características de los módems para la transmisión de señales digitales médicas (electrocardiogramas).

Los módems descritos en V.21 y V.23 transmiten datos en serie FSK, mientras que los descritos en V.20 se utilizan para transmisión en paralelo empleando dos o tres frecuencias simultáneamente, tomando cada frecuencia cuatro valores diferentes. Estas 12 frecuencias van desde 920 Hz hasta 1960 Hz.

En la Fig. 3.2 se muestra el diagrama de bloques típico de los módems V.21 y V.23.

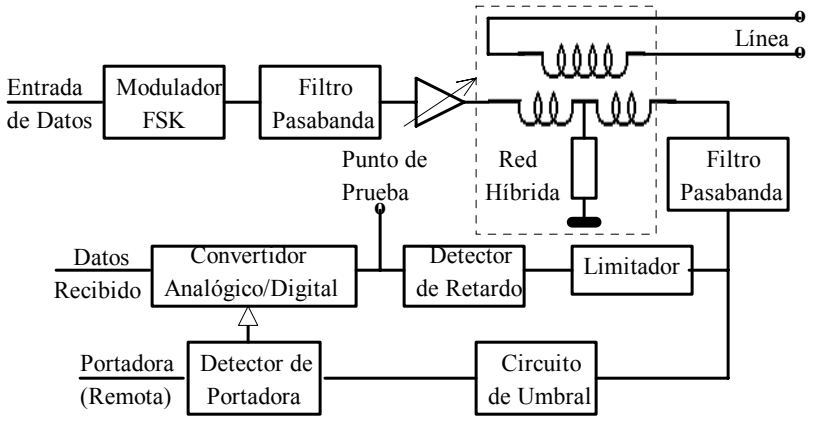


Fig. 3.2. Configuración de un Módem FSK Típico.

La secuencia digital binaria a transmitir se aplica directamente a un modulador FSK. La salida del modulador pasa a un filtro pasabanda que elimina las colas del espectro de la señal modulada, como vimos en el Capítulo II. El proceso de desplazamiento de frecuencias es un proceso no lineal que produce frecuencias adicionales que no deben alimentarse a la línea. Después de pasar por el amplificador de ganancia variable, la señal se aplica a la línea a través de una red híbrida.

En el receptor, la señal llega a través de la red híbrida y pasa por un filtro pasabanda que elimina el ruido fuera de banda dejando pasar las frecuencias de transmisión. La salida del filtro se aplica a un limitador o recortador el cual elimina las variaciones de amplitud, y de allí va al detector de retardo cuya salida es un voltaje proporcional a su frecuencia de entrada. Finalmente, la señal pasa a un convertidor analógico/digital que convierte las señales analógicas en los correspondientes estados “1” ó “0”. Nótese que el convertidor está controlado por el Detector de Portadora (Remota). Si la portadora desaparece, la salida del convertidor pasa a “1” y se mantiene en ese estado hasta que la portadora reaparece.

Además de los circuitos mostrados en la Fig. 3.2, los módems prácticos contienen circuitos monitores y de interfaz para establecer las conexiones así como para mantenimiento, diagnóstico y supervisión. En general, la circuitería de control, supervisión y mantenimiento ocupa tanto o más espacio y cuesta otro tanto o más que los circuitos propios de modulación y de demodulación mostrados en la Fig. 3.2.

Recomendación V.21

Esta recomendación describe un módem de 300 baudios normalizado para uso en la red telefónica conmutada, pero puede utilizarse también en líneas arrendadas o privadas.

Este módem dispone de dos canales de transmisión: el Canal N° 1 y el Canal N° 2. En el Canal N° 1 la frecuencia de portadora es de 1080 Hz, mientras que en el Canal N° 2 es de 1750 Hz. La desviación de frecuencia es de ± 100 Hz y en cada canal la frecuencia de transmisión más elevada corresponde al símbolo “0”; sin embargo, en los Módems Bell es todo lo contrario. Las frecuencias de transmisión del UIT-T que representan a los “1” y los “0” se dan en la Fig. 3.3.

La vía de conmutación para la transmisión de datos es una vía fulldúplex que permite, en cada sentido de transmisión, la transmisión con una velocidad de modulación igual o inferior a 300 baudios, utilizando modulación FSK. El Módem V.21 es un módem que puede simultáneamente transmitir por un canal y recibir por otro. Puesto que por cada canal la velocidad de transmisión es de 300 bps, el intercambio neto de datos en el Módem V.21 es de 600 bps.

Estado	Canal Inferior No. 1 (Transmisión en Modo Origen)	Canal Superior No.2 (Transmisión en Modo Respuesta)
"1"	980 Hz	1650 Hz
"0"	1180 Hz	1850 Hz
Frecuencia de Portadora	1080 Hz	1750 Hz

Fig. 3.3. Frecuencias Características del Módem V.21

Estos módems pueden utilizarse en dos modos diferentes cuando operan en diferentes bandas de frecuencia: en Modo Origen (transmite a 1180 y 980 Hz) y en Modo Respuesta (transmite a 1850 y 1650 Hz), y pueden operar en full dúplex, como se muestra en la Fig. 3.4.

Se tiene entonces:

Modo Origen: el módem entra automáticamente en Modo Origen cuando él inicia una llamada. En este caso transmite por el canal inferior a las frecuencias 1180 y 980 Hz (el Módem Bell 103 transmite a 1070 y 1270 Hz).

Modo Respuesta: el módem entra automáticamente en Modo Respuesta cuando él recibe una llamada. En este caso transmite por el canal superior a las frecuencias 1850 y 1650 Hz (el Módem Bell 103 transmite a 2025 y 2225 Hz).

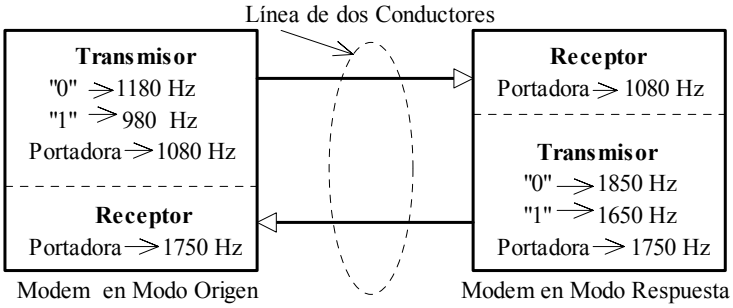


Fig. 3.4. Modos de Transmisión Origen/Respuesta.

Algunos módems comerciales incorporan acoplamiento acústico de la señal. En este caso, la señal eléctrica modulada es convertida en una señal audible mediante un altavoz incorporado en el módem y alimentada a la línea por medio del micrófono del aparato telefónico corriente. En forma similar, las señales eléctricas recibidas son convertidas en señales audibles en el aparato telefónico y reconvertidas en señales eléctricas mediante el micrófono incorporado en el módem. Este tipo de módem es afectado por el ruido ambiente, aunque en los aparatos más recientes la pérdida de calidad debido al ruido ambiental es despreciable. Su uso está normalizado en la Recomendación V.15.

Los Módems V.21 y Bell 103 son equivalentes pero no son compatibles.

Recomendación V.23

El Módem V.23 opera a una velocidad de 600 ó 1200 baudios y es utilizado en líneas de discado y arrendadas. El modo de transmisión puede ser semidúplex en líneas de discado y en líneas privadas de dos conductores. De acuerdo con esta recomendación, se puede agregar un canal auxiliar de retorno que opera a una velocidad de 75 baudios. Este módem puede operar también en forma sincrónica. En la Fig. 3.5 se lista sus frecuencias de portadora y de transmisión. El Módem Bell 202, equivalente al V.23, opera a una velocidad de modulación de 1200 baudios y sus frecuencias de operación son de 2200 Hz (“0”) y 1200 Hz (“1”). Estos módems no son compatibles.

	CANAL PRINCIPAL		CANAL AUXILIAR
	600 baudios MODO 1	1200 Baudios MODO 2	75 Baudios
Estado "1" Estado "0"	1300 Hz 1700 Hz	1300 Hz 2100 Hz	390 Hz 450 Hz
Frecuencia de Portadora	1500 Hz	1700 Hz	

Fig. 3.5. Frecuencias Características del Módem V.23.

Como en general la modulación FSK es fundamentalmente asincrónica, estos módems pueden transmitir información a velocidades por debajo de sus velocidades nominales y, en efecto, esto se hace con bastante frecuencia. Sin embargo, es muy difícil aumentar la velocidad de información sobre los 1800 bps en los canales de voz debido a la gran distorsión que el canal impone a las señales. Por ejemplo, a una

velocidad de modulación de 1800 baudios en el Módem V.23 para el tono de 1300 Hz ("1"), en cada intervalo T_b se observaría solamente una fracción 1300/1800 = 0,722 de ciclo, que no es mucho tiempo para identificar la frecuencia del tono en presencia de ruido y distorsión. Si se quiere alcanzar velocidades de información superiores en los canales de voz, es necesario utilizar técnicas de modulación más complejas y eficientes que, en general, son sincrónicas. Como consecuencia, para velocidades de información superiores a 1200 bps hay que utilizar las técnicas sincrónicas PSK, DPSK y QAM m-arias.

3.2.3. Módems Sincrónicos

En transmisión sincrónica las señales de entrada y salida consisten en largas secuencias de símbolos binarios sincronizados mediante un reloj maestro incorporado en el mismo módem o en el terminal de datos fuente.

Debido a su carácter sincrónico, estos módems necesitan relojes para la sincro-. nización de la señalización. La sincronización de temporización se logra transmitiendo previamente secuencias conocidas ("training sequences") de tal manera que el receptor al recibirlas sincronice su reloj con el reloj del transmisor y se mantenga en sincronización durante el intercambio de información. Estas secuencias permiten también desactivar los supresores de eco y activar los ecualizadores de línea y los circuitos de control automático de ganancia.

En las recomendaciones del UIT-T de la Serie V concernientes a los módems sincrónicos se emplea las técnicas de modulación M-aria QAM, PSK y DPSK y las velocidades de modulación van desde los 1200 bps hasta 172 kbps.

Recomendaciones V.22 y V.22 bis

Estos módems operan en 1200 y 2400 bps con una velocidad de modulación de 600 baudios sobre líneas de discado, dedicadas y privadas. El V.22 opera en DPSK y el V.22 bis en QAM, y utilizan dos canales: el Canal N° 1 con una frecuencia de portadora de 1200 ±0,5 Hz, y el Canal N° 2 con una frecuencia de portadora de 2400 ±1 Hz. Pueden utilizarse en modo Origen/Respuesta: en modo origen transmiten por el Canal N° 1, y en modo respuesta lo hacen por el Canal N° 2. En la Fig. 2.58(a) y (b) se muestra los correspondientes diagramas de Fresnel.

La transmisión es sincrónica fulldúplex sobre líneas de dos conductores e incorporan facilidades para ecualización, diagnóstico y aleatorización (scrambling). Algunas veces estos módems incorporan convertidores asincrónico-sincrónicos para operar en modo asincrónico.

Recomendaciones V.26, V.26 bis y V.26 ter

Estas recomendaciones se refieren a módems normalizados para operar hasta 2400 bps para uso en circuitos dedicados de cuatro conductores y de discado de dos conductores. La velocidad de modulación en el canal es de 1200 baudios.

Estos tipos de módem pueden funcionar en modo fulldúplex sincrónico e incluyen un canal auxiliar de retorno con una velocidad menor o igual que 75 baudios en cada

dirección de transmisión. El uso del canal auxiliar es facultativo. El V.26 ter utiliza técnicas de cancelación de ecos y puede trabajar en binario a 1200 bps.

La frecuencia de portadora es de 1800 ±1 Hz y el patrón de fase se muestra en la Fig. 2.58(c). La modulación utilizada es DPSK 4-aria.

Recomendaciones V.27, V.27 bis y V.27 ter

Estas recomendaciones se refieren a módems normalizados para operar a 4800 bps en circuitos dedicados. La velocidad de modulación en el canal es de 1600 baudios. El V.27 bis y el V.27 ter pueden operar también a 2400 bps; el V.27 ter, en particular, puede utilizarse en líneas conmutadas.

Las características principales de estos módems son las siguientes:

(a) Pueden funcionar en semi o fulldúplex

(b) Modulación DPSK y QDPSK 8-aria; operación en modo sincrónico

(c) Inclusión facultativa de un canal auxiliar de retorno con una velocidad de hasta 75 baudios

(d) Inclusión de un ecualizador ajustable y aleatorización.

La sincronización se efectúa con secuencias conocidas que permiten al ecualizador ajustar sus coeficientes o "taps" a fin de minimizar el error en la señal recibida.

La frecuencia de portadora es de 1800 ±1 Hz y sus patrones de fase se muestran en la Fig. 2.58(c) y (d). La modulación es DPSK 8-aria.

Recomendación V.29

Este es un módem normalizado para ser utilizado en circuitos arrendados de cuatro conductores. La modulación es 16-QAM a 9600 bps y la velocidad de modulación en el canal es de 1200/2400 baudios. La frecuencia de portadora es de 1700 ±1 Hz.

Las características son idénticas a las del módem tipo V.27 excepto en lo que se refiere al patrón de fase, el cual se muestra en la Fig. 2.58(f). Este diagrama de Fresnel contiene 16 puntos cuya distribución en el diagrama satisface la necesidad de obtener simultáneamente las distancias más largas posibles entre puntos, a fin de minimizar los efectos del ruido, y las separaciones más altas a fin de mantener en un mínimo la fluctuación de fase.

La señal modulada en este módem se puede describir como una señal que consiste de dos portadoras moduladas en amplitud con una diferencia de fase de 90°, o como una simple portadora modulada en ocho fases y con cuatro niveles de amplitud. Este es el tipo de modulación que hemos llamado QAM, una forma de modulación compuesta Amplitud-Fase, como ya lo vimos en la Sección 2.7.

La codificación se hace en bloques de cuatro dígitos binarios (L = 4); los últimos tres dígitos determinan la fase de la señal de acuerdo con el patrón de fase V.27, mientras que el primer dígito determina la amplitud. El valor más pequeño de los niveles de amplitud

corresponde al estado "0". Los cuatro valores relativos de amplitud son $\sqrt{2}$, 3, $3\sqrt{2}$ y 5, como se observa en la Fig. 2.58(f).

Estos módems incorporan aleatorizadores (scramblers), ecualizadores automáticos, control automático de ganancia, pruebas de diagnóstico, etc. Algunos módems comerciales vienen equipados con un multiplexor para dividir la secuencia de 9600 bps en combinaciones de 4800 bps y 2400 bps.

Recomendaciones V.32, V.32 bis, V.32 terbo, V.33, V.34 y V.90

Estas son familias de módems normalizados para ser utilizados en líneas dedicadas y conmutadas. El V.32 opera a 9600 bps nominal.

En estos módems se utiliza dos técnicas de modulación: modulación 16-QAM, Fig. 2.58(g), y un tipo especial de modulación denominado "Modulación Reticulada o en Celosía" de 32 estados, que permite alcanzar hasta 14400 bps sin compresión de datos.

Cuando las condiciones del canal son adversas, el módem V.32 pasa automáticamente a una velocidad de 4800 bps ("fallback") y mediante un proceso de "cancelación de ecos" puede operar en fulldúplex por una línea telefónica conmutada de dos conductores. La velocidad de modulación es de 2400 baudios con una frecuencia de portadora de 1800 ±1 Hz.

Otros módems de estas familias son el V.32 bis para 14400 bps, el V.32 terbo para 19200 bps, el V.33 de 14400 bps para aplicación punto a punto sobre cuatro conductores en líneas dedicadas, el V.34 para 19200/28800 bps, semidúplex, para aplicación en la transmisión de facsímil (FAX) de alta calidad y el V.90 para transmisión a 56 kbps. Todos estos módems utilizan técnicas de control de error y compresión de datos y entran en la categoría de los denominados "Módems Inteligentes", de los cuales trataremos más adelante.

Las técnicas de control de error más utilizadas son los Protocolos MNP-4 (Microcom Networking Protocol) y el Protocolo UIT-T V.42. En la Recomendación V.42 se describe un sistema principal de control de error denominado LAPM (Link Access Procedure for Modems) el cual incluye al MNP-4 como un sistema alterno. Esto quiere decir que un módem con control de error V.42 puede establecer entonces una conexión con control de error con un módem que soporta MNP-4 solamente.

En cuanto a las técnicas de compresión de datos, las más utilizadas son los Protocolos UIT-T V.42 bis y el Protocolo MNP-5. Un módem no puede soportar compresión de datos sin utilizar un protocolo de control de error, aunque es posible tener un módem que soporta solamente control de error pero nó compresión de datos. Un módem con MNP-5 requiere control de error MNP-4, y un módem con V.42 bis requiere control de error V.42. Nótese que aunque V.42 incluye MNP-4, V.42 bis no incluye MNP-5. Sin embargo, casi todos los fabricantes de módems de alta velocidad que soportan V.42 bis incorporan también MNP-5 como un servicio agregado. La relación de compresión en MNP-5 es de 2:1, mientras que la de V.42 bis es de 4:1. Por consiguiente, un módem de 9600 bps MNP-5 puede transferir datos hasta 19200 bps, mientras que, por ejemplo, un módem V.32/V.42 bis puede llegar hasta 38400 bps.

3.2.4. Modems de Banda Ancha

En el estado actual de la tecnología, sin compresión de datos no es conveniente exceder con rendimiento y confiabilidad la velocidad de 14400 bps sobre un canal telefónico tipo 3000. Para velocidades superiores se puede utilizar cables coaxiales, pero a distancias más largas se necesita por lo menos un canal 5701, 5703 o H.14/M.910.

En su Recomendación V.35, el UIT-T establece las características funcionales para la transmisión de datos a 48 kbps utilizando los circuitos de banda de grupo de 60-108 kHz (H.14/M.910), que se puede utilizar para transmitir por canales dedicados a 56 y 64 kbps. La señal de banda de base en la gama de 60-108 kHz debe estar modulada en VSB con una frecuencia de portadora de 100 kHz. Dispone también de un canal de servicio con modulación SSB en la parte inferior de la banda y de una portadora piloto de 104,08 kHz. En esta recomendación se especifica también las características de línea, de interfaz (utilizando conductores especificados en la Recomendación V.24) y de aleatorización.

En la Recomendación V.36 se define una familia de módems sincrónicos de banda ancha aplicables en circuitos dedicados de banda de grupo (M.910), y en canales B de 64 kbps o en canales D de 16 kbps para la transmisión de señalización (los canales B y D son canales definidos para la Red Digital de Servicios Integrados, ISDN). Estos módems se pueden aplicar también en multiplexamiento de señales de datos y telegrafía.

Los módems especificados en la Recomendación V.36 pueden operar a frecuencias de 48, 56, 64 y 72 kbps. A la salida del módem la señal de línea debe corresponder a una señal SSB con una frecuencia de portadora de 100 kHz ± 2 Hz.

La Recomendación V.37 tiene características similares a la V.36 y se aplica para la transmisión sincrónica a velocidades de 96, 112, 128, 144 y 172 kbps.

3.2.5. Otros Tipos de Módem

Eliminador de Módem ("Null Modem")

Muchas veces es necesario interconectar directamente dos ETDs no siendo necesario ni enlaces de comunicación ni módems. Esto es muy común en el caso de interconexión directa de un terminal con un computador. Como un ETD está configurado para trabajar con módems o ETCDs, es necesario que cada ETD crea que está conectado con un ETCD. Por ejemplo, el conductor de transmisión de un ETD debe estar conectado al conductor de recepción del otro ETD y viceversa. La forma de efectuar esta interconexión la veremos más adelante al estudiar las interfaces ETD/ETCD.

Módems de Corta Distancia

Una categoría muy importante son los Módems de Corta Distancia ("Short-Haul Modems"), utilizados directamente en operaciones locales sobre líneas telefónicas. Estos módems (que no deberían denominarse así pues no modulan ni demodulan) pueden operar en banda de base en líneas arrendadas, con velocidades hasta 64 kbps. Como estos módems no están normalizados, hay poca compatibilidad entre los tipos de diferentes fabricantes y generalmente se utilizan en pares. Se utilizan mucho en sistemas privados.

3.2.6. Módems Inteligentes

La emergencia de nuevas técnicas de programación ("software") ha permitido agregar una gran cantidad de inteligencia a los módems a fin de permitirles efectuar funciones que aumentan sus prestaciones y alcanzar velocidades por sobre los 14400 bps. Si bien se puede agregar inteligencia a un módem para efectuar una gran cantidad de funciones, la tendencia actual es la de incorporar solamente tres áreas claves que son las que normalmente se asocian con los denominados "módems inteligentes": los conjuntos de comando, el control de error y la compresión de datos.

Conjuntos de Comando

En la década de los 70 una pequeña compañía estadounidense de comunicaciones denominada BIZCOM, desarrolló el concepto de "inteligencia agregada" en módems mediante la utilización de códigos que el módem podía reconocer y obedecer. Esta serie de códigos se denomina "Conjunto de Comandos".

Muy pronto otros fabricantes de equipos de comunicación comenzaron también a desarrollar módems con inteligencia agregada, pero desafortunadamente para ellos los diferentes códigos de comando eran incompatibles entre sí. Debido a la popularidad de la serie Smartmodems de la Hayes Microcomputer Products, la cual capturó más del 50% del mercado de los módems inteligentes, el conjunto de comandos de esta firma se constituyó en un "estándar de facto" de la industria. Fue así como, en los años 80, muchos fabricantes incorporaron en sus módems el ya denominado "Conjunto de Comandos Hayes", resultando en un alto nivel de compatibilidad entre los módems de la serie Hayes Smartmodems y módems de otros fabricantes. Los módems de la Serie V.32 y siguientes con todas las prestaciones que se les han agregado están en la categoría de módems inteligentes y en el mercado se puede conseguir módems compatibles UIT-T y Hayes.

Actualmente muchos fabricantes anuncian sus productos como "Hayes compatibles"; sin embargo, esta denominación es ambigua porque no indica si un programa "Hayes compatible" soporta o no todas las características de un módem en particular. Además, los programas de comunicación anunciados como "Hayes compatibles" pueden no soportar el conjunto de comandos completo utilizados tanto en los Hayes Smartmodems como en los módems "Hayes compatibles" de otros fabricantes. Hasta puede darse el caso de que dos módems "Hayes compatibles" sean incompatibles entre sí. Para asegurar la compatibilidad, en la práctica es muy común instalar, sobretodo en sistemas privados, pares de módems de un mismo fabricante.

El conjunto de comandos utilizado en un módem gobierna su capacidad operacional, permitiendo, por ejemplo, el discado y rediscado automático de números telefónicos, la selección de parámetros para el intercambio de información entre terminales, y otras funciones establecidas en el programa de comunicaciones en operación. En general, un Conjunto de Comandos está especificado mediante tres características: un conjunto básico de comandos y sus extensiones, los códigos resultantes y los registros de módem.

Los comandos básicos, tales como colocar el módem en línea (descolgar), discar o rediscar un número, seleccionar una configuración UIT-T o Bell, etc., son comunes en todos los módems "Hayes compatibles". Las extensiones de comando, tales como operar un

módem a cierta velocidad específica, son solamente aplicables a módems diseñados para transmitir y recibir datos a esa velocidad específica. En particular, el Conjunto Básico de Comandos AT Hayes del Smartmodem 9600 contiene 28 comandos básicos y 22 extensiones.

La respuesta de un módem inteligente a cualquiera de sus comandos se conoce con el nombre de "códigos resultantes (result codes)". Por ejemplo, el comando básico F con un parámetro o modificador 1 se utiliza para iniciar un intercambio en modo semidúplex, y si el modificador es 0 la operación es en modo fulldúplex.

La tercera característica de los Conjuntos de Comando es el número, modo de utilización y programabilidad de los registros contenidos en el módem. Los módems inteligentes contienen una serie de registros programables que gobiernan la función del módem y la operación de algunos de los comandos del conjunto de comandos básico. Por ejemplo, el módem Hayes Smartmodem 9600 contiene 39 registros, denominados Registros S, que efectúan funciones de control y permiten la configuración del sistema según las necesidades del usuario.

En cuanto a la compatibilidad, para que un módem dado sea 100% compatible con un módem Hayes, los comandos, los códigos resultantes y los registros de módem deben ser compatibles al mismo tiempo. Sin embargo, algunos fabricantes incorporan compatibilidad solamente en los conjuntos de comandos y en los códigos resultantes, y utilizan los valores "por defecto (default)" de los registros del módem Hayes Smartmodem. En esta forma se reduce el tamaño, la complejidad y, por supuesto, el costo del módem

Control de Error

La detección y corrección/recuperación de errores, conocida simplemente como "control de error", se ha instrumentado en un gran número de módems de redes conmutadas utilizando una variedad de técnicas. En su acepción más simple, la capacidad agregada a un módem para detectar y recuperar errores simplemente consiste en agregar, en el módem transmisor, una secuencia especial o "cola" la cual es calculada a partir del bloque de datos a transmitir de acuerdo con un algoritmo prefijado. En el módem receptor se efectúa la misma operación sobre el bloque recibido y se compara el resultado con la "cola" recibida. Si ambos valores son iguales, se considera que el bloque de datos ha sido recibido sin error; de lo contrario, el módem receptor solicita al módem transmisor la repetición del bloque de datos. Este mecanismo lo veremos y comprenderemos mejor cuando estudiemos las características y funciones de la Capa Enlace en el Capítulo IV. En general, en el módem receptor no se utiliza la corrección de los errores, pues esto tomaría demasiado tiempo y la velocidad neta de transmisión disminuiría sensiblemente. Básicamente, la recuperación de errores se realiza mediante retransmisión de los bloques de datos; esta técnica es la utilizada en los métodos V.42 LAPM y el MNP-4, ya mencionados.

Puesto que la corrección de errores se realiza mediante retransmisión, todos los módems con capacidad de corrección de error deben poseer registros de almacenamiento o "buffers" para almacenar temporalmente los datos hasta que el módem receptor les comunica la recepción correcta (ACK) de la información. En este caso, los datos almacenados se pueden descartar y simplemente se almacena la nueva información a

transmitir. Como la capacidad de los "buffers" es finita, hay que instrumentar un mecanismo para controlar el flujo de datos desde el ETD hasta el módem o ETCD. Este mecanismo se conoce con el nombre de "Control de Flujo" y está instrumentado en todos los módems que poseen control de error. A su vez, el control de error es fundamental en la aplicación de los métodos de compresión de datos, como ya lo mencionamos anteriormente. El control de flujo es, entonces, un mecanismo para compensar la diferencia entre la velocidad de entrada al módem y la velocidad a la cual el módem procesa y transmite los datos. Como ejemplo de control de flujo consideremos la Fig. 3.6.

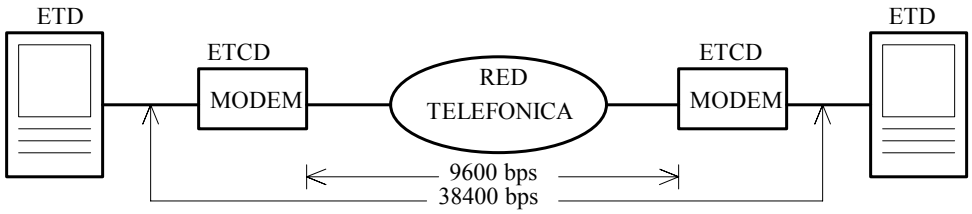


Fig. 3.6. Mecanismo de Compresión de Datos.

Supongamos que los módems de la Fig. 3.6 son módems V.32 bis, los cuales incorporan algoritmos de control de error V.42 y de compresión de datos V.42 bis. Este módem opera nominalmente a 9600 bps y puesto que su velocidad de modulación es de 2400 baudios, él "empaqueta" cuatro bits por cada cambio de estado de la señal. Como la relación de compresión es de 4:1, aquellos datos que entran al módem a 38400 bps son de inmediato puestos en la salida a 9600 bps. Aparentemente aquí hay un contrasentido, pues la velocidad de salida parece ser menor que la de la entrada. Lo que pasa es que la secuencia de datos a la entrada del módem experimenta una compresión, es decir, se elimina muchos caracteres redundantes que ocupan espacio transmitiéndose solamente la información neta, y de cada cuatro caracteres solamente se transmite uno sin perder información. En el extremo receptor se efectúa la operación contraria: el módem recibe a 9600 bps, descompresiona el flujo de datos y restaura la velocidad de salida a 38400 bps, como se muestra en la Fig. 3.6 . La velocidad de modulación en el canal seguirá siendo de 2400 baudios.

En cuanto al control de flujo, si la relación de compresión fuera menos de 4:1, el módem no podría transmitir a la misma velocidad, siendo necesario almacenar los datos entrantes en un buffer. Para prevenir el desbordamiento del buffer, el módem requiere un mecanismo de control que le indique al ETD cuándo debe enviar información, por ejemplo, el mecanismo XOFF/XON que veremos posteriormente. Mientras el módem pueda comprimir cuatro caracteres en uno, el ETD puede seguir transfiriendo datos a 38400 bps. En resumen, el control de flujo es una técnica utilizada para evitar que los buffers de un módem puedan desbordarse con la consiguiente pérdida de información. En el Capítulo IV veremos algunas técnicas de control de flujo.

Compresión de Datos

Durante el transcurso de un intercambio de información entre dos dispositivos, ocurre muchas situaciones que por la naturaleza misma del lenguaje humano o por las características del mensaje tienden a ser repetitivas o redundantes. Largas cadenas del mismo símbolo (espacios en blanco, silencios, etc.), combinaciones fijas de letras (por ejemplo, "qu" en español o "th" en inglés), alta frecuencia relativa de aparición o de empleo de palabras de uso común, son formas que se pueden codificar en alguna forma para ser transmitidas en un tiempo mucho menor sin pérdida de la información contenida y sin que aumente la velocidad de modulación en el canal.

El aumento de la velocidad de transmisión en un sistema con capacidad de compresión de datos ya de por sí es un valor agregado en la comunicación. En efecto, hay beneficios adicionales derivados de la utilización de dispositivos con compresión de datos. Como la compresión de datos implica la transmisión de un número menor de caracteres, asimismo la probabilidad de error en la transmisión se reduce, y si en el sistema hay control de error, la compresión de datos aumenta considerablemente las prestaciones del sistema. Por otro lado, y de gran importancia por supuesto, es que la reducción en el número de caracteres transmitidos se traduce en una disminución de los costos de comunicación. Ejemplos de esta reducción en los costos de operación van desde la habilidad para conectar terminales adicionales en una línea multipunto, hasta la aplicación en una red de paquetes en donde uno de los elementos asociados con el uso de la red es el número de caracteres transmitidos y recibidos en un terminal dado. El uso de dispositivos con compresión de datos debe considerarse siempre cuando su aplicación pueda elevar el rendimiento de las redes y disminuir los costos de operación.

En la creciente búsqueda de métodos para aumentar la velocidad de información, se ha desarrollado más de 100 algoritmos de compresión de datos, pero sólo algunos de ellos han tenido éxito en la práctica y se han convertido en estándares. Los algoritmos V.42 bis y el MNP-5 son dos de estos algoritmos aplicados en los módems de uso corriente. Un estudio más completo de estos algoritmos está fuera de los límites de este libro.

3.2.7. Resumen de Características para la Selección de Módems

La selección de un tipo particular de módem depende de muchos factores como lo podemos constatar en las páginas anteriores. Para simplificar un poco esa tarea, a continuación resumimos la mayoría de las características o especificaciones que se pueden demandar de un módem.

1. Características de Transmisión

Tipo	Formato
Analógico (líneas telefónicas)	Paralelo (sólo para respuesta audible)
Digital	Serie
Modos	Velocidades

Simplex (SPX)
Semi Dúplex (HDX)
Full Dúplex (FDX)

Bits por Segundo
Caracteres por Segundo
Bloque de una longitud dada por Seg.

Tipos de Modulación

Amplitud (ASK, VSB, SSB)
Frecuencia (FSK)
Fase (QAM, PSK, DPSK)
Impulsos (PCM y todas sus variaciones)

Relojes y Controles

Asincrónicos
Sincrónicos:
-- Internos
-- Externos
-- Opcional y con Control

2. Características de Interfaz

Líneas

Acoplador Acústico o Inductivo
Líneas Privadas o Dedicadas
Líneas Conmutadas
Red Digital Pública

Terminales

Sin necesidad de Módem (Lazo de Corriente)
-- Interfaces:
UIT-T, EIA y Militares

3. Características de Operación

Modo

Modo Origen
Modo Respuesta
Modo Origen/Repuesta (Automático o Manual)

Simetría

Con Canal Auxiliar separado
Con Sistema de Intercambio-Retorno Rápido
Con Tiempo de Retorno ajustable

Compatibilidad

Modelos Bell, Western
UIT- T , otros

Porcentaje de Error

Ajuste de la Relación S/N
Ajuste de Velocidad/Tamaño Bloque

Diagnóstico

Ciclo Analógico de Verificación
Ciclo Digital de Verificación
Lazos de Retorno Local/Remoto
Verificación Automática

Operaciones

Adaptador Vocal
Autodiscado (V.25/V.25 bis y RS-366)
Control de Error (V.42/MNP-4)
Compresión de Datos (V.42 bis/MNP-5)

Ecualización

Circuitos Internos en el módem
Adaptación de las Plantillas

Acondicionadores Especiales

En el cuadro siguiente se muestra la equivalencia entre los Módems UIT-T y Bell. Esta equivalencia no implica compatibilidad.

EQUIVALENCIA ENTRE MODEMS BELL Y UIT-T

VELOCIDAD, bps	MODEMS BELL	MODEMS UIT-T
Hasta 300	103A, F, B	V.21
600 a 1200	202C, D, E, R	V.23
1200/2400	212A	V.22; V.22 bis
2400	210B, C, D	V.26; V.26 bis
4800	208A,B,D	V.27; V.27 bis; V.27 ter
9600	209A	V.29; V.32
40800	301B	V.35
56000	303C	V.36, V.90

3.3. INTERFACES

3.3.1. Introducción

Antes de comenzar con la descripción de las diferentes interfaces conviene definir algunas palabras y conceptos que estaremos utilizando continuamente, aunque algunos conceptos ya han sido definidos.

PUNTO DE INTERFAZ. Es el límite común en una conexión física entre el ETD y el ETCD por donde circulan todas las señales en transmisión serie. En la Fig. 3.7 se representa como una línea de puntos entre el ETD y el ETCD.

CIRCUITO DE ENLACE. Los circuitos de enlace son los circuitos de interconexión entre el ETD y el ETCD para la transferencia de datos binarios, señales de control y de temporización, y señales analógicas. También se aplica a ambos lados del equipo intermedio que se pueda insertar entre el ETD y el ETCD. En la Fig.3.7 son los conductores entre el ETD y el ETCD.

GENERADOR o “DRIVER”. Es el transmisor de una señal digital binaria.

RECEPTOR. Es el dispositivo que recibe la señal binaria para su procesamiento.

MARCA. Es el equivalente a un “UNO” lógico positivo.

ESPACIO. Es el equivalente a un “CERO” lógico negativo.

CANAL SIMPLEX. Es un canal de comunicaciones que opera solamente en una dirección.

CANAL SEMIDUPLEX. Es un canal de comunicaciones que es capaz de operar en ambas direcciones pero no simultáneamente; la dirección de transmisión es reversible. Las velocidades de transmisión en cualquiera dirección son siempre las mismas.

CANAL FULLDUPLEX. Es un canal de comunicaciones que es capaz de operar en ambas direcciones simultáneamente. Las velocidades de transmisión en cualquiera dirección son siempre las mismas

CANAL SINCRONICO. Es un canal de comunicaciones en el cual se transmite información de temporización entre el ETD y el ETCD.

CANAL ASINCRONICO. Es un canal de comunicaciones en el cual no se transmite información de temporización entre el ETD y el ETCD

En la Fig. 3.7 se muestra la ubicación de las interfaces y de algunos de los protocolos de Capa Física que veremos posteriormente.

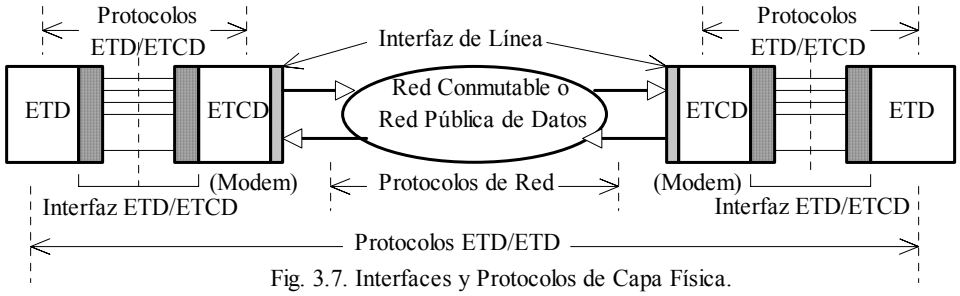


Fig. 3.7. Interfaces y Protocolos de Capa Física.

A fin de permitir la fabricación económica de los módems, terminales y computadoras, y para facilitar el intercambio de datos entre diferentes países, el UIT-T y la Asociación de Industrias Eléctricas de los Estados Unidos (Electronics Industries Association, EIA) han promulgado toda una serie de normas para las interfaces en la transmisión de datos y para otros aspectos de las Telecomunicaciones.

3.3.2. Normas UIT-T, EIA y IEEE

En lo que se refiere a las interfaces, el UIT-T ha promulgado las Recomendaciones V y X, algunas de las cuales veremos a continuación. Las Recomendaciones de la Serie V se aplican en sistemas de transmisión que utilizan la infraestructura telefónica, mientras que las Recomendaciones de la Serie X se han promulgado para utilización en las Redes Públicas de Datos.

<u>UIT-T Serie V. Transmisión Serie sobre las Redes Telefónicas</u>

V.10(X.26) Características Eléctricas de los Circuitos de Enlace de doble corriente desbalanceados de uso general en equipos integrados en el campo de la transmisión de datos. Operación bajo 100 kbps.

V.11(X.27) Características Eléctricas de los Circuitos de Enlace de doble corriente balanceados de uso general en equipos integrados en el campo de la transmisión de datos. Operación bajo 10 Mbps.

V.24 Lista de Definiciones para los Circuitos de Enlace entre el ETD y el ETCD. En combinación con las características eléctricas dadas en la

Recomendación V.28, se define la Interfaz UIT-T V.24/V.28 de 25 conductores para trabajar sincrónica o asincrónicamente bajo 20 kbps hasta 15 m de distancia.

V.25, V.25 bis Equipos para llamada y/o respuesta automática paralelo/serie sobre la red telefónica con conmutación, incluyendo la desconexión de Supresores de Eco en llamadas establecidas manualmente. El V.25 bis se utiliza solamente para equipos de llamada automática serie.

V.28 Características Eléctricas de los Circuitos de Enlace de doble corriente desbalanceados para operación bajo 20 kbps.

V.35 Esta recomendación establece también los circuitos de enlace para transmisión de datos desde 48 kbps hasta 172 kbps utilizando la banda de grupo de 60 a 108 kHz. Utiliza un conector especial de forma rectangular de 34 conductores especificados en la Rec. V.24.

UIT-T Serie X. Transmisión Serie sobre Redes de Datos Publicas

X.20 Interfaz ETD/ETCD en servicios de transmisión Arranque-Pare sobre Redes de Datos Públicas. Operación bajo 20 kbps hasta 15 m de distancia.

X.20 bis Uso sobre las Redes de Datos Públicas de ETDs diseñados para interconectarse a Módems Asincrónicos de la Serie V.

X.21 Interfaz ETD/ETCD de Uso General para Operación Sincrónica sobre Redes de Datos Públicas. Conector de 15 conductores. Operación bajo 2 Mbps hasta 60 metros de distancia. La combinación X.21/V.10 puede operar bajo 100 kbps, mientras que la combinación X.21/V.11 opera bajo 10 Mbps. La velocidad disminuye con la distancia, pero se puede alcanzar hasta 1200 m, como se muestra en la Fig. 3.12.

X.21 bis Uso sobre las Redes de Datos Públicas de ETDs diseñados para interconectarse a Módems Sincrónicos de la Serie V.

X.24 Lista de Definiciones para las Interfaces ETD/ETCD de la Serie X.

X.25 Interfaz ETD/ETCD para terminales que operan en Transmisión por Conmutación de Paquetes en Redes de Datos Públicas.

Los circuitos de enlace definidos en las Recomendaciones V.24 y V.25 son aplicables a:

(a) A las transmisiones de datos sincrónicas y asincrónicas, manuales o automáticas

(b) A la transmisión de datos por líneas arrendadas, de dos o cuatro conductores, punto a punto o multipunto

(c) A la transmisión de datos por la red de conmutación, con dos o cuatro conductores

El Módem puede estar integrado al ETCD o constituir una unidad separada.

La interfaz ETD/ETCD para las Redes Públicas de Datos, además de las características eléctricas y funcionales de los circuitos de enlace, requiere la definición de las características de procedimiento para las funciones de control de llamadas de acuerdo con la Recomendación X.2. En la Recomendación X.24 se define los circuitos de enlace entre el ETD y el ETCD en lo que se refiere a sus funciones para la transferencia de datos y señales de control y temporización, pero sus características eléctricas se definen en las Recomendaciones X.26 y X.27 que son idénticas a las características eléctricas especificadas en las Recomendaciones V.10 y V.11.

Las interfaces UIT-T V.24/V.28, X.21 y X.21 bis constituyen el Nivel 1 o Capa Física del Modelo de Referencia ISO/OSI.

En la práctica se utiliza un tipo de interfaz denominado "Lazo de Corriente de 4-20 mA", utilizada en algunas aplicaciones industriales y en las teleimpresoras o teletipos. Más adelante describiremos este tipo de interfaz.

En cuanto a la EIA y la IEEE, estas organizaciones han promulgado normas de Capa Física para las interfaces en sistemas de transmisión de datos, de las cuales describiremos las de más uso práctico. Las letras RS de estas normas significa "Norma Recomendada (Recommended Standard)".

Normas de la EIA y de la IEEE

RS-232C Interfaz ETD/ETCD de 25 conductores para el intercambio de datos binarios en transmisión serie. La última versión de esta norma es la ANSI/EIA-232D. Operación sincrónica o asincrónica bajo 20 kbps hasta 15 m de distancia. La nueva versión EIA-232D es 100% equivalente a la última revisión de la interfaz UIT-T V.24/V.28.

RS-423A Características Eléctricas de los Circuitos de Enlace Digitales con voltajes desbalanceados. Operación Bajo 100 kbps. Equivalente a la UTI-T V.10.

RS-422A Características Eléctricas de los Circuitos de Enlace Digitales con voltajes balanceados. Operación bajo 10 Mbps. Equivalente a la UIT-T V.11.

RS-449 Interfaz de Uso General de 9/37 conductores para la interconexión de ETDs y ETCDs que emplean secuencias binarias serie. Operación bajo 2 Mbps hasta 60 m. Esta interfaz es equivalente a la interfaz UIT-T X.21. Las combinaciones RS-449/RS-423A y RS-449/RS-422A son equivalentes a las combinaciones X.21/V.10 y X.21/V.11, respectivamente. Estas combinaciones utilizan conectores de 15 conductores.

RS-530 Interfaz de alta velocidad de 25 conductores para interconectar ETDs y ETCDs. La interfaz RS-530 ofrece los beneficios de la RS-449 y la eficiencia del conector DB25 de la interfaz RS-232C. Se utiliza desde 20 kbps hasta 2 Mbps. La distancia máxima depende de la interfaz

eléctrica utilizada (RS-422A o RS-423A). Hay que tener presente que la interfaz RS-530 y la RS-232C no son compatibles pues sus características mecánicas y eléctricas son diferentes.

RS-485 Normas para las Características Eléctricas de los Generadores y Receptores Tri-State en sistemas balanceados multipunto. Operación bajo 10 Mbps. La interfaz RS-485 utiliza normalmente conectores de 9/15 conductores y en conexión multipunto Maestra/Esclava puede atender hasta 32 estaciones esclavas. La estación esclava más alejada puede estar a 1200 m de distancia. Esta interfaz se ha desarrollado específicamente para aplicaciones industriales multipunto.

IEEE-488 Norma que define una interfaz digital para la interconexión de instrumentos industriales programables. La transmisión es en paralelo, bajo 1 MHz y utiliza un conector de 24 conductores. En conexión multipunto puede atender hasta 15 dispositivos, con una separación máxima de 4 m entre dispositivos. Esta interfaz se conoce también con el nombre de Interfaz GPIB (General Purpose Interface Bus).

.3.3.3. Descripción de las Interfaces

En el UIT-T los circuitos de enlace se representan con números (Serie 100), mientras que en la EIA se representan con letras. En las tablas siguientes se muestra la equivalencia entre las designaciones del UIT-T y de la EIA de las diferentes normas relativas a los circuitos de enlace. En la Recomendación V.24 se listan 43 circuitos de enlace pero aquí solamente presentamos los más utilizados.

En la interfaz EIA-232D las siglas que están entre paréntesis son siglas en inglés mneumotécnicas y las que tienen un asterisco son denominaciones no incluidas en la interfaz RS-232C. Asimismo, la primera letra del código de dos letras indica:

A $\Rightarrow$ Tierra (Ground); B $\Rightarrow$ Transferencia de Datos; C $\Rightarrow$ Control; D $\Rightarrow$ Temporización

En el caso de Transferencia de Datos, la segunda letra indica:

A $\Rightarrow$ Sentido ETD a ETCD; B $\Rightarrow$ Sentido ETCD a ETD.

Cuando el código tiene tres letras, la letra S indica “Canal Secundario o de Retorno”. Las otras dos letras están de acuerdo con el código de dos letras.

TABLA DE EQUIVALENCIA ENTRE CIRCUITOS DE ENLACE
UIT-T (Serie 100) y EIA

Designación del Cicuito	Sentido ETD⇔ ETCD	UIT-T V.24	UIT-T X.20bis	UIT-T X.21bis	EIA EIA-232D	EIA RS-530	EIA RS-449
Tierra de la Señal	⇔	102	102	102	AB(GND)	AB	SG
Común del ETD	-	102a	-	-	-	-	SC
Común del ETCD	-	102b	-	-	-	-	RC
Terminal de Servicio	⇒	-	-	-	-	-	IS
Transmisión de Datos	⇒	103	103	103	BA(TxD)	BA	SD
Recepción de Datos	⇐	104	104	104	BB(RxD)	BB	RD
Petición de Transmisión	⇒	105	-	105	CA(RTS)	CA	RS
ETCD listo para Tx	⇐	106	106	106	CB(CTS)	CB	CS
ETCD preparado	⇐	107	107	107	CC(DSR)	CC	DM
ETD preparado	⇒	108/2	108/2	108/2	CD(DTR)	-	TR
Portadora detectada	⇐	109	109	109	CF(RLSD)	CF	RR
Calidad de la Señal	⇐	110	-	-	CG	-	SQ
Señal nueva	⇐	136	-	-	-	-	NS
Selector de velocidad en el ETD	⇒	111	-	-	CH	-	SR
Selector de velocidad en el ETCD	⇐	112	-	-	CI	-	SI
Reloj Tx desde el ETD	⇒	113	-	-	DA	DA	TT
Reloj Tx desde el ETCD	⇐	114	-	114	DB	DB	ST
Reloj Rx desde el ETCD	⇐	115	-	115	DD	DD	RT
Selección de Reserva	⇒	116	-	-	-	-	SS
Indicador de Reserva	⇐	117	-	-	-	-	SB
Tx por Canal de Retorno	⇒	118	-	-	SBA	BA	SSD
Rx por Canal de Retorno	⇐	119	-	-	SBB	BB	SRD
Pedido de Transmisión del Canal de Retorno	⇒	120	-	-	SCA	-	SRS
Canal de Retorno listo	⇐	121	-	-	SCB	CB	SCS
Portadora detectada en el Canal de Retorno	⇐	122	-	-	SCF	DB	SRR
Indicador de Repique	⇐	125	125	125	CE(RI)	-	IC
Lazo de Retorno Remoto	⇒	140	-	-	RL(*)	RL	RL
Lazo de Retorno Local	⇒	141	141	-	LL(*)	LL	LL
Indicador de Prueba	⇐	142	142	142	TM(*)	TM	TM

(*) No incluidos en la RS-232C

En la Recomendación UIT-T V.25 bis se utiliza los circuitos 103, 104, 106, 107, 108/2 y 125 para equipos de llamada automática serie. Para llamada automática paralelo se tiene la siguiente tabla:

TABLA DE EQUIVALENCIA DE CIRCUITOS DE ENLACE LLAMADA AUTOMATICA PARALELO
UIT-T V.25 (Serie 200) y EIA

Designación del Circuito	Sentido ETD⇔ETCD	UIT-T V.25	EIA RS-366
Tierra o Retorno Común	⇔	201	FGD
Petición de Llamada	⇒	202	CRQ
Línea de Datos ocupada	⇐	203	DLO
Estación distante conec-tada	⇐	204	DSC
Abandono de llamada	⇐	205	ACR
Señal Digital 1 (2°)	⇒	206	NB1
Señal Digital 2 (2^1)	⇒	207	NB2
Señal Digital 4 (2^2)	⇒	208	NB4
Señal Digital 8 (2^3)	⇒	209	NB8
Presente cifra siguiente	⇐	210	PND
Cifra presente	⇒	211	DPR
Tierra de Protección	⇔	212	SGD
Indicador de Alimentación	⇐	213	PWI
Conjunto de Datos (Status)	⇐	-	DSS

RECOMENDACION X.24
Circuitos de Enlace de las Interfaces X.20 y X.21

Designación del Circuito	Sentido ETD⇔ETCD	Número de Pin (*)	X.24	X.20	X.21
Tierra de Señalización	⇔	8	G	G	G
Retorno Común del ETD	⇒	8	Ga	Ga	Ga
Retorno Común del ETCD	⇐	8	Gb	Gb	-
Transmisión	⇒	2/9	T	T	T
Recepción	⇐	4/11	R	R	R
Control	⇒	3/10	C	-	C
Indicación	⇐	5/12	I	-	I
Temporización para los elementos de Señal (ETCD)	⇐	6/13	S	-	S
Caracter de Temporización	⇐	7/14	B	-	B
Identificación de comienzo de Trama (Frame)	⇐	-	F	-	-
Temporización para los elementos de Señal (ETD)	⇒	-	X	-	-

(*) Este es el número de “pin” del conector de 15 conductores

Las interfaces RS-423A, RS-422A y RS-485 utilizan comúnmente conectores de 15 pines; sin embargo, las interfaces RS-422A y RS-485, que son interfaces balanceadas, no incluyen un determinado conector. Los fabricantes pueden usar cualquier tipo de conexión, incluso tornillos. Se puede utilizar un conector DB9, un DB15, un DB25 con denominación

de pin no normalizada, un DB25 de acuerdo con RS-530 o un DB37 de acuerdo con RS-449.

En el cuadro siguiente se muestra una designación no normalizada para un conector DB25 utilizada en algunas aplicaciones industriales.

INTERFACES EIA RS-423A, RS-422A y RS-485

Circuitos de Enlace. Conector de 15 pines

Designación del Circuito	Sentido ETD⇔ETCD	Número de Pin	RS-423A	RS-422A RS-485
Transmisión de Datos +	⇒	1	-	TxD +
Transmisión de Datos -	⇒	2	TxD	TxD -
Recepción de Datos +	⇐	3	-	RxD +
Recepción de Datos -	⇐	4	RxD	RxD -
Pedido de Transmisión +	⇒	5	-	RTS +
Pedido de Transmisión -	⇒	6	RTS	RTS -
Listo para Transmitir +	⇐	7	-	CTS +
Listo para Transmitir -	⇐	8	CTS	CTS -
Detección de Portadora +	⇐	9	-	CD +
Detección de Portadora -	⇐	10	CD	CD -
ETD Listo +	⇒	11	-	DTR +
ETD Listo -	⇒	12	DTR	DTR -
ETCD Listo +	⇐	13	-	DSR +
ETCD Listo -	⇐	14	DSR	DSR -
Tierra	⇔	15	GND	GND

En la interfaz RS-423A los circuitos 6/8 y 10/12 están “puenteados” internamente; entre el ETD y el ETCD habrá solamente dos conductores: TxD y RxD.

En Full Dúplex en las interfaces RS-422A y RS-485 los circuitos 5/7, 6/8, 9/11 y 10/12 están “puenteados” internamente; entre el ETD y el ETCD habrá solamente cuatro conductores: ±TxD y ±RxD . En aplicación Maestra/Esclava los circuitos 1/2 y 3/4 de la Maestra van conectados a los circuitos 2/4 y 1/2, respectivamente, de las Esclavas.

En las interfaces RS-422A y RS-485 la distancia máxima entre la Maestra y la Esclava más alejada depende de la velocidad de transmisión con una distancia máxima de 1200 m; sin embargo, en aplicaciones industriales esta distancia la establece el fabricante del sistema en particular. Por ejemplo, en el Protocolo Industrial BSAP se recomienda una distancia máxima de 305 m (1000 pies).

En la Recomendación UIT-T V.35 los conductores del conector están representados con letras y el conector (de forma rectangular) contiene 34 conductores, pero no todos se utilizan. En la tabla siguiente se muestra las asignaciones de los circuitos de enlace de esta interfaz. Vamos a utilizar como código del circuito las letras mnemotécnicas en inglés.

RECOMENDACION V.35
Circuitos de Enlace

Designación del Circuito	Sentido ETD⇔ETCD	Letra del pin	Código del Circuito
Tierra de Protección	⇔	A	FG
Tierra de la Señal	⇔	B	SG
Pedido de Transmisión	⇒	C	RTS
Preparado para Transmitir	⇒	D	CTS
ETCD listo	⇐	E	DSR
Portadora Remota Detectada	⇐	F	RLSD
ETD listo	⇒	H	DTR
Indicador de Llamada	⇒	J	RI
Indicador de Prueba	⇐	K	LT
Patrón de Prueba	⇐	L	-
Transmisión de Datos	⇒	P/S	TxD
Recepción de Datos	⇐	R/T	RxD
Temporización Exterior	⇒	U/W	SCTE
Reloj de Recepción	⇐	V/X	SCR
Reloj de Transmisión	⇒	Y/AA	SCT

El desarrollo de grandes redes de datos, tanto públicas como privadas, hizo necesaria la adopción de normas y protocolos de acceso a dichas redes. Estas normas facilitan la conexión de diferentes tipos de ETD a las redes de datos y permiten el intercambio de información entre redes nacionales e internacionales. La Recomendación X.25 se promulgó para llenar esa necesidad. En esta recomendación se da las características, tanto a nivel físico como a nivel estructural, de una interfaz entre el ETD y las redes de datos en donde se aplica el sistema de transmisión por conmutación de paquetes. En el Capítulo IV, al estudiar los protocolos de transmisión en las Capas Enlace y Red, veremos la aplicación de esta norma. Por ahora nos limitaremos a señalar que la interconexión física entre los ETD y los nodos de acceso a la red se verifica mediante la interfaz X.21, mientras que el acceso propiamente a las redes de datos se controla mediante los protocolos especificados en la Recomendación X.25. La interfaz X.21 es parte de la norma X.25, independientemente de su aplicación en otros sistemas.

La introducción de la interfaz RS-449 trajo como consecuencia un aumento en el número de “pines” del conector. Este aumento se debe a las nuevas funciones incorporadas en las interfaces, tales como modos de prueba y diagnóstico remoto y local, y un mejoramiento de sus características eléctricas. Pero, por otro lado, el incremento en el número de pines aumentó el costo y dificultad de manejo del conector. Esto sugiere de inmediato que una interfaz que utilice un número mínimo de pines y con características funcionales y eléctricas superiores a las interfaces existentes, sea muy deseable. En el UIT-T se desarrollaron las interfaces X.20 y X.21 que utilizan conectores de 15 pines y sus características eléctricas y funcionales son marcadamente superiores a las de la interfaz

V.24/V.28. En efecto, el conector de interfaz X.21 tiene 15 pines mientras que la V.24/V.28 tiene 25 y la RS-449 tiene 37. La interfaz X.21 tiene características adicionales tales como "llamada automática", señales de "llamada en progreso", "identificación de la línea llamada", "fallas en la llamada", etc. El número de circuitos se ha reducido porque la información de control va ahora codificada utilizando secuencias conocidas. Igualmente, en la EIA se desarrollaron las interfaces RS-422A y RS-423A que utilizan también conectores de 15 pines. En la Fig. 3.8 se muestra la forma de conexión de algunas interfaces de uso común.

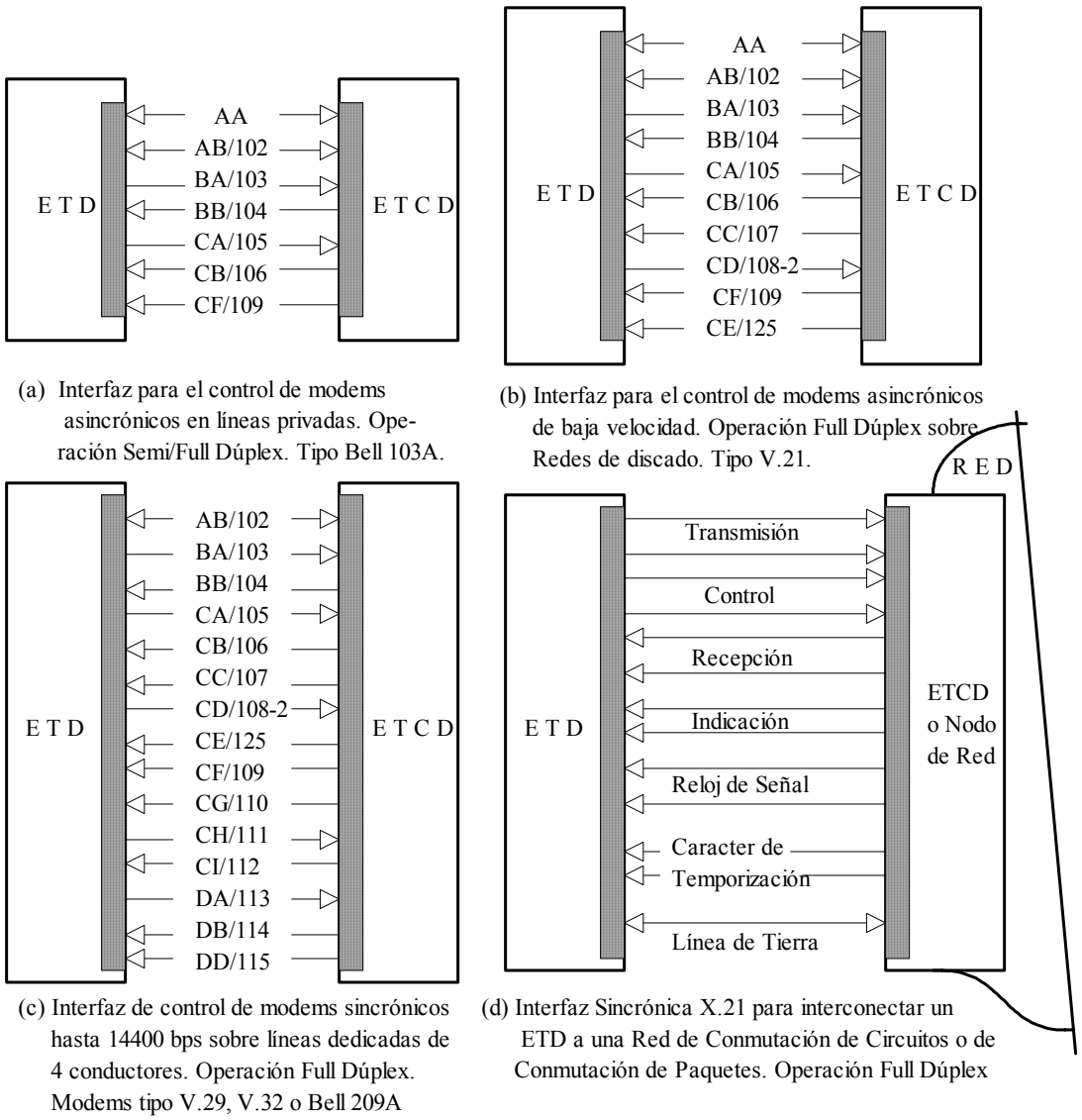
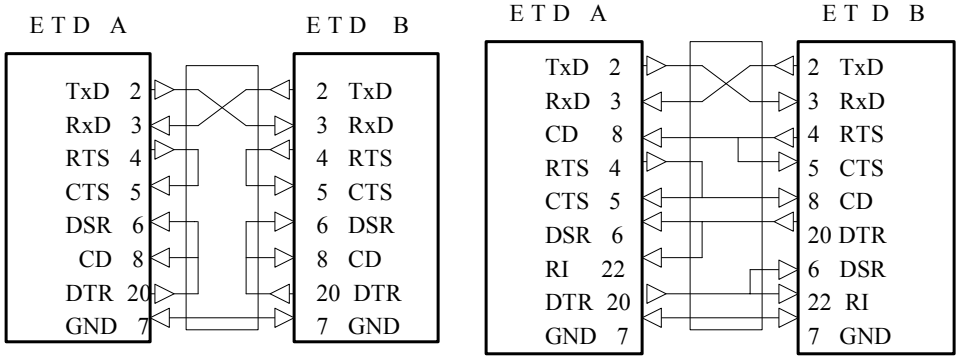


Fig.3.8. Ejemplos de Interconexión de Interfaces prácticas

En la transmisión de datos sobre la red telefónica o en circuitos privados punto a punto, las características avanzadas de las interfaces X.20 y X.21 no se pueden instrumentar o simplemente no son necesarias. Esto quiere decir que el gran número de ETCD que utilizan las interfaces V.24/V.28 o EIA-232D continuarán en uso hasta que sean poco a poco reemplazadas por interfaces compatibles con los nuevos sistemas como son la X.20 bis, la X.21 bis y la RS-530.

En la Sección 3.2.5 mencionamos brevemente los “eliminadores de módem” o “null modems” para la interconexión directa de un ETD a otro ETD. Esta interconexión se efectúa en la práctica con un cable especial EIA-232D con sus dos extremos hembras, pues los pines machos están en el ETD. En este cable se hace algunas transposiciones a fin de que cada ETD crea que está “viendo” un ETCD. En la Fig. 3.9 mostramos dos formas de eliminador de módem utilizadas en la práctica. Configuraciones más elaboradas se pueden conseguir en el comercio en forma de “cajas negras”.

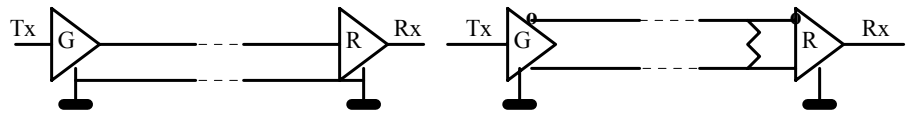


(a) Conexión Full Dúplex sencilla (b) Conexión Semi Dúplex

Fig. 3.9. Conexiones típicas de dos "Null Modems".

3.3.4. Características Eléctricas de algunas Interfaces

La creciente necesidad de aumentar la velocidad de transmisión y la distancia por sobre lo permitido en las interfaces EIA-232D y V.24/V.28, impulsó la creación de interfaces con características eléctricas apropiadas para la transmisión hasta 10 Mbps y distancias hasta 1200 m. Fue así como se desarrolló, por parte de la UIT-T, las interfaces eléctricas V.10 y V.11, y por parte de la EIA las interfaces eléctricas RS-423A y RS-422A. Los generadores y receptores utilizados en estas interfaces tienen la forma mostrada en la Fig. 3.10(a) y (b).



(a) Circuitos Desbalanceados. V.28, EIA-232D, V.10, RS-423A(Cat. II)

(b) Circuitos Balanceados. V.11, RS-449/RS-530, RS-422A(Cat. I)

Fig. 3.10. Circuitos de Enlace en Interfaces

Nótese que es posible interconectar diferentes interfaces. En el comercio se consigue una gran cantidad de convertidores de interfaz que permiten conectar una salida de un tipo de interfaz con una entrada de otro tipo. Por ejemplo, convertidores de interfaz RS-232C ⇔ RS-485, RS-232C ⇔ RS-422A, RS-232C ⇔ Lazo de Corriente , etc. En los catálogos de los vendedores de componentes se muestra una gran diversidad de convertidores.

Las interfaces señaladas en la Fig. 3.10 han sido desarrolladas para conexión punto a punto. Sin embargo, en operación multipunto una maestra debe comandar un cierto número de esclavas, sobre todo en instalaciones industriales con conductores metálicos (par trenzado o coaxial). Esta situación impulsó la creación de la interfaz RS-485 con la cual se puede comandar hasta 32 esclavas. En este caso los generadores y receptores son de tipo "tres-estados (tri-state)" a diferencia de las otras interfaces en donde la electrónica es de "dos estados (dual state)". En el comercio se consigue convertidores EIA-232D⇔RS-485 que le permiten a una maestra con salida EIA-232D comandar hasta 32 esclavas con entradas EIA-232D. En los catálogos de los fabricantes y vendedores el lector puede encontrar una gran variedad de convertidores. En la Fig. 3.11 se muestra la configuración de los circuitos de enlace de las interfaces RS-422A (opcional) y la RS-485. Obsérvese que con esta configuración se puede alcanzar en semidúplex (Figs. 3.12 y 3.13) hasta 1200 m con solamente tres conductores, en realidad, dos conductores (A y B) más el blindaje (C). Con otras interfaces el número de conductores sería muy alto y habría que utilizar módems.

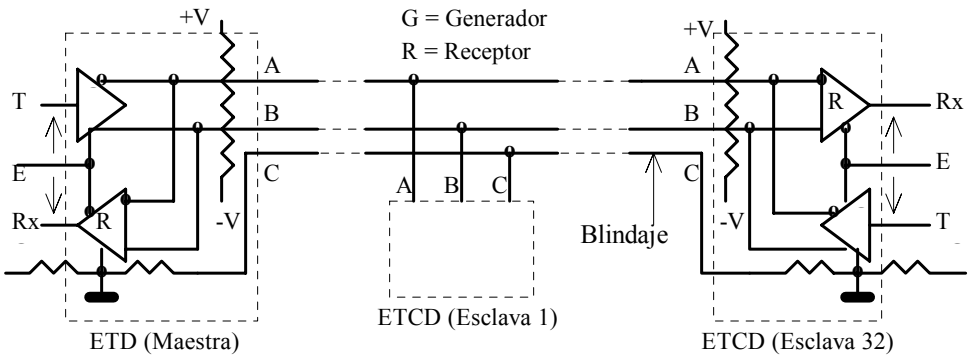


Fig. 3.11. Circuitos Balanceados Tri-State. RS-422A(opcional), RS-485 (Multipunto Semidúplex)

En las Fig. 3.12 se muestra algunas formas de interconexión entre una maestra y varias esclavas.

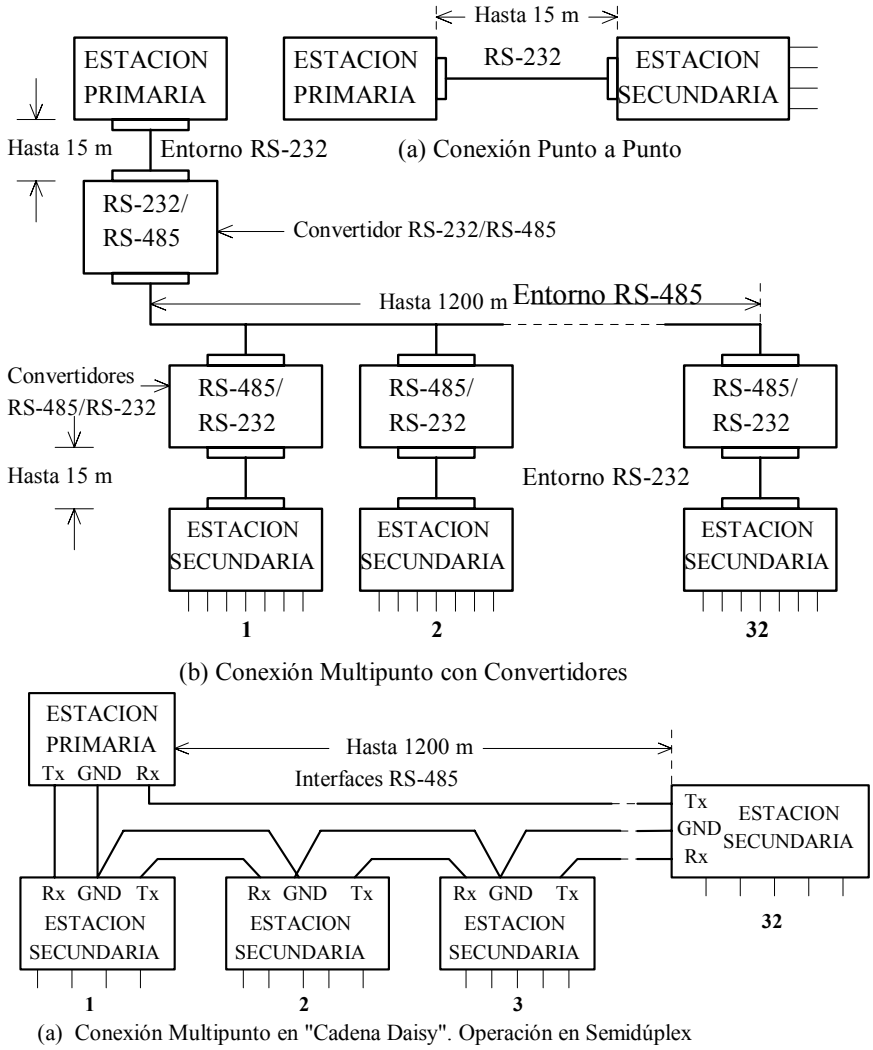


Fig. 3.12. Interconexión de estaciones con las interfaces RS-232 y RS-485

En la interfaz UIT-T V.24/V.28, además de las características eléctricas, los tiempos de respuesta para los circuitos de control y respuesta (102 a 106) deben ser tomados en cuenta. Estos tiempos están determinados por las frecuencias de transmisión y se dan para módems en la gama de 1200 bps hasta 9600 bps en las Recomendaciones V.23, V.26, V.26 bis, V.27, V.27 bis, V.27 ter, V.29 y V.32. Para la frecuencia de transmisión a 48 kbps es válida la Recomendación V.35. La Recomendación V.35 incluye también sus correspondientes características eléctricas.

En servicios de transmisión ARRANQUE-PARE (START-STOP), de 50 a 300 bps sobre redes públicas de datos, la Recomendación X.20 es válida para la interfaz ETD/ETCD. Esta es una recomendación de aplicación porque emplea solamente circuitos

V.24 y V.28. Utiliza conectores de 15 pines. En cuanto a sus características eléctricas, se le puede aplicar las mismas características establecidas en la Recomendación V.10 (X.26) para circuitos desbalanceados. Las características eléctricas de la interfaz X.21 están establecidas en la Recomendación V.10 (X.27) para circuitos de intercambio balanceados. Utiliza conectores de 15 pines.

Muchos ETD están todavía equipados con interfaces V.24/V.28. A fin de instrumentar la conexión a una red pública de datos, se definió las interfaces X.20 bis para servicios de ARRANQUE-PARE (asincrónico) en redes públicas de datos y la X.21 bis para operación sincrónica en redes públicas de datos. Las características funcionales y las especificaciones eléctricas de estas interfaces se describen en las Recomendaciones V.24 y V.28. Utiliza un conector de 25 pines.

En la Fig. 3.13 se muestra la relación entre la distancia y la velocidad de transmisión en las interfaces anteriores.

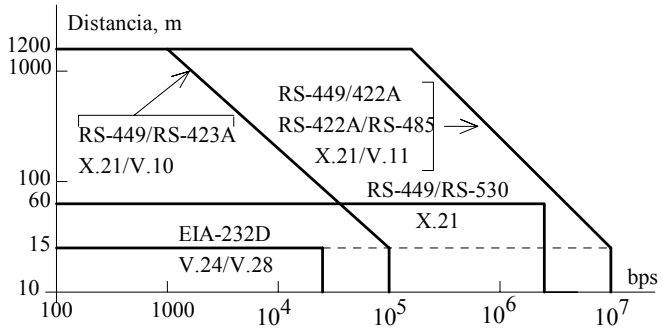


Fig.3.13. Relaciones Distancia vs Velocidad de Transmisión

En la Tabla siguiente se muestra las características de trabajo de las interfaces que hemos visto

CARACTERISTICAS DE TRABAJO
Voltajes de Salida

Condición	RS- 232C V.24/V.28	RS-485	RS-422A V.11	RS-423A V.10
"0" lógico=ESPACIO=Control ON	+5 a +25	+1,5 a +5	+2 a +6	+4 a +6
Margen de Ruido	+3 a +5	+0,17 a +1,5	+0,2 a +2	+0,2 a +4
Región de Transición	-3 a +3	-0,17 a -0,17	-0,2 a -0,2	-0,2 a -0,2
Margen de Ruido	-5 a -3	-1,5 a –0,17	-2 a -0,2	-4 a -0,2
"1" lógico=MARCA=Control OFF	-25 a -5	-5 a –1,5	-6 a -2	-6 a -4

3.3.5. Características Mecánicas

En todas las interfaces se dan las especificaciones detalladas de los conectores que deben utilizarse. En general, los conectores son del Tipo DB de forma trapezoidal, con excepción del conector V.35 que es un conector de forma rectangular. Algo que

es conveniente recordar es que el lado macho del conector está siempre en el ETD, mientras que el lado hembra está en el ETCD; por lo tanto, el terminal hembra del cable de interconexión va al ETD, mientras que el terminal macho del cable va al ETCD. No vamos a extendernos más en las características mecánicas de estas interfaces pues en los catálogos de los fabricantes y vendedores se puede obtener mucha información.

En la Fig. 3.14 se muestra la forma y asignación de los números de pin de los conectores machos de las interfaces RS-232D, RS-449 y V.35. Nótese que el conector de la interfaz RS-530 es también de Tipo DB25, pero tiene diferentes números y asignaciones a los pines y por ello es completamente incompatible con RS-232D.

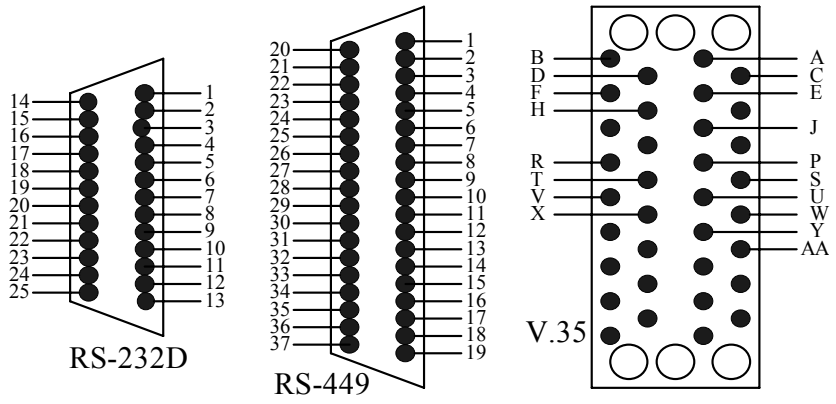


Fig. 3.14. Conectores de Interfaz

En la Tabla siguiente se muestra la asignación de circuitos a los números de pin del conector DB25 para las interfaces V.24/V.28 y RS-232D.

TABLA DE CORRESPONDENCIA NUMERO DE PIN ⇔ NUMERO DE CIRCUITO

Número	V.24/V.28	RS-232D	Número	V.24/V.28	RS-232D
1	101	AA	15	114	DB(TxC)
2	103	BA(TxD)	16	119	SBB(SRxD)
3	104	BB(RxD)	17	115	DD(RxC)
4	105	CA(RTS)	18	141	LL
5	106	CB(CTS)	19	120	SCA(SRTS)
6	107	CC(DSR)	20	108/1	--
7	102	AB(GND)		108/2	CD(DTR)
8	109	CF(RLSD)	21	140	RL
9(*)	--	--		110	CG(SQD)
10(*)	--	--	22	125	CE(RI)
11(*)	126	--	23	111	CH
12	122	SCF		112	CI
13	121	SCB(SCTS)	24	113	DA(XTxC)
14	118	SBA(STxD)	25	142	TM

El Pin # 1 se conecta directamente al blindaje del conector (Shield)

Observaciones:

(*) Reservados para uso de las Administraciones Nacionales:

Pin 9. Algunas veces se utiliza para tensiones positivas de prueba
Pin 10. Idem para tensiones negativas
Pin 11. El circuito 126 se utiliza únicamente en los Módems V.21

3.3.6. El Lazo de Corriente de 4-20 mA

En muchas aplicaciones, sobre todo en la industria y en muchos periféricos de sistemas de computadoras, se utiliza el lazo de corriente de 4-20 mA. Históricamente, el lazo de corriente se utilizó en la telegrafía para accionar las máquinas impresoras mecánicas, pero actualmente se utiliza en sistemas totalmente electrónicos, particularmente en los terminales no inteligentes y en los sensores industriales. Como se muestra en la Fig. 3.15, el lazo de corriente requiere solamente un par de conductores. La fuente de corriente se puede colocar en cualquier extremo del lazo (fuente o destino) definiendo el "transmisor activo" o el "receptor activo", y los voltajes pueden llegar a 100 V, dependiendo de la aplicación. El acoplamiento entre el lazo propiamente dicho y el resto de la electrónica comúnmente se efectúa con acopladores ópticos, como se puede observar en la Fig. 3.15.

En la transmisión binaria un "UNO" lógico se representa con una corriente de +20 mA, mientras que un "CERO" lógico se puede representar con una corriente de 4 mA en el modo de señalización "neutro", como el mostrado en la Fig.3.15, o con -20 mA en la convención "bipolar". Este lazo permite transmitir valores tanto discretos como continuos.

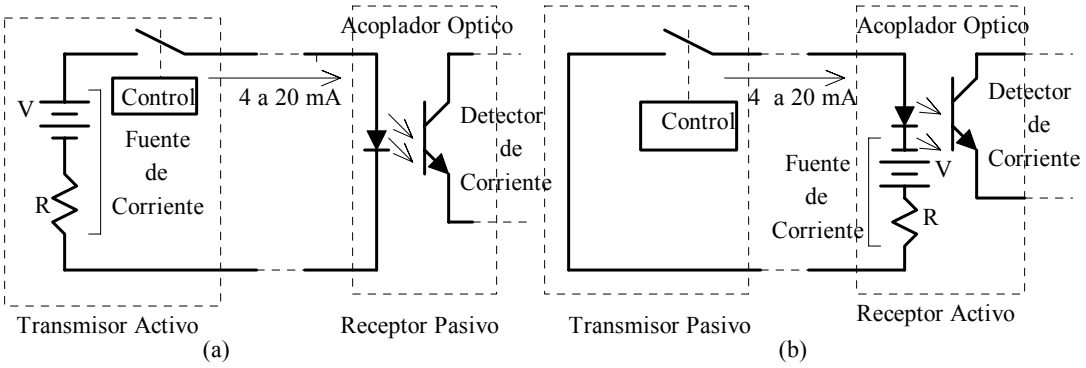


Fig. 3.15. La Interfaz de Lazo de Corriente de 4-20 mA.

En cortas distancias, bajo 600 m, el desempeño del lazo de corriente es superior al de la interfaz RS-232C, además de la sencillez de esta configuración. Sin embargo, el problema principal del lazo de corriente es que no hay normas mecánicas o eléctricas que regulen su utilización, no hay especificaciones para señales de control y supervisión. Esto impide su aplicación, por ejemplo, en el discado automático, en el control en transmisión semidúplex, en la transmisión de la señal de sincronización en sistemas sincrónicos y en el control de canales secundarios. En las aplicaciones industriales se emplea con frecuencia

dentro de un mismo sistema o de un fabricante dado, pero no se puede asegurar la compatibilidad con otros sistemas; sin embargo, es el medio de transmisión utilizado en el Protocolo Industrial HART, como veremos en el Capítulo V.

Un problema adicional del lazo de corriente es su vulnerabilidad al ruido, sobretodo cuando hay componentes mecánicos para las tareas de conmutación. Este ruido debe ser adecuadamente filtrado. Por otro lado, en distancias largas los componentes activos del lazo de corriente tienden a producir ruido de intermodulación en conductores cercanos.

3.3.7. Señales de Temporización entre el ETD y el ETCD

Parte de las especificaciones de interfaz requeridas entre el ETD y el ETCD es la configuración de temporización. Alguna fuente de temporización, además de las señales a transmitir o recibir, se requiere para permitir la sincronización entre el ETD y el ETCD. En los sistemas de transmisión digital se emplea comúnmente cuatro formas de temporización que vamos a describir brevemente a continuación.

Temporización Asincrónica

Como ya lo hemos visto, la transmisión asincrónica está controlada básicamente por caracteres, y entre el ETD y el ETCD se tendrá solamente los conductores de transferencia de datos 103/BA y 104/BD, pero no los conductores de temporización 113/DA, 114/DB y 115/DD, como se muestra en la Fig. 3.16.

Normalmente se utiliza los Alfabetos 2 y 5 del UIT-T y el Código EBCDIC, que contienen impulsos de arranque y de pare (estos códigos los describiremos con más detalle en el Capítulo IV). Los impulsos de arranque y pare permiten al terminal receptor identificar el comienzo y el final de un carácter. El impulso de pare generalmente es más largo que el de arranque y esto se hace para compensar diferencias de frecuencia entre los relojes transmisor y receptor.

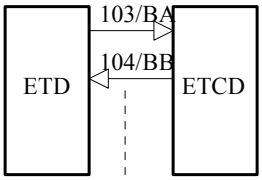


Fig. 3.16. Temporización Asincrónica

En la práctica se utiliza un UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) como interfaz de sincronización entre el ETD y el ETCD. Un UART es un subsistema completo que recibe datos en forma paralela asincrónica y los transmite en forma serie asincrónica tanto en operación FDX como en HDX. Se utiliza comúnmente en los módems Bell 103A, V.21 o V.23. En sistemas más avanzados se utiliza los USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter) para operación sincrónica y/o asincrónica. Los UART y los USART se consiguen en el comercio en forma de “chips” y su operación y configuración se puede encontrar en cualquier catálogo de componentes electrónicos para comunicaciones.

Un ETCD transmite directamente cada impulso, no importa su duración, y preserva la relación entre los diferentes impulsos de un caracter durante la transmisión. En sistemas multiplex TDM, sin embargo, es posible que los caracteres no se transmitan en su integridad; en este caso:

(a) Los impulsos de arranque y pare son eliminados antes de la transmisión y reconstituidos en el destino, o

(b) Se puede utilizar la denominada "codificación transicional " (una forma de DPCM) en la cual la fuente asincrónica se muestrea a una alta velocidad pero solamente se codifica las transiciones, las cuales se transmiten sobre el canal.

En el UIT-T se define la transmisión asincrónica como la característica esencial de una escala de tiempo o una señal, tal que sus instantes significativos correspondientes no necesariamente ocurren a la misma velocidad

Temporización Isocrónica

En la transmisión isocrónica (del griego *isos* = igual), la velocidad de operación del ETD es nominalmente la misma que la del ETCD. No se requiere impulsos de arranque y pare, y los dígitos de datos se transmiten continuamente hasta terminar el mensaje. En este caso, entre el ETD y el ETCD se tendrá los conductores 103/BA, 104/B , los conductores de control necesarios y los conductores de temporización 113/DA y 115/DD, como se muestra en la Fig. 3.17.

En modo transmisión, cada dígito generado por el ETD tiene la misma duración (igual a $T_b=1/f_b$, donde f_b = frecuencia de señalización) que todos los otros dígitos. Sin embargo, el ETD y el ETCD están cada uno temporizados por sus propios relojes internos. Estos relojes, aunque están a la misma frecuencia nominal f_b, pueden tener pequeñas diferencias de fase debido a in-exactitudes e inestabilidades en los mismos. Para

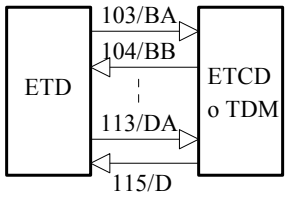


Fig. 3.17. Temporización Isocrónica.

evitar este problema, el ETCD generalmente engancha su reloj interno con el reloj entrante que acompaña a la señal isocrónica. Sin embargo, en operación en multiplex TDM hay que aceptar varias señales isocrónicas y el reloj interno del multiplexor (MUX) no puede engancharse con ninguna de las señales entrantes, pues tendría pequeñas desviaciones de fase y de frecuencia con el resto de las señales isocrónicas. Una manera de compensar estas diferencias es mediante el "relleno de dígitos (bit stufing)" de acuerdo con la Recomendación UTI-T O.111(temporización plesiocrónica). En el extremo de recepción, el ETCD o desmultiplexor extrae la señal de temporización a partir de la señal recibida y la pasa al ETD mediante el conductor 115/DD.

En el UIT-T se define la transmisión isocrónica como la característica esencial de una escala de tiempo o una señal, tal que el intervalo entre instantes significativos consecutivos tienen la misma duración o duraciones que son un múltiplo entero de la duración más corta.

Temporización Sincrónica

Una interfaz sincrónica es superior a la interfaz isocrónica pues el ETD y el ETCD están temporizados por un reloj común. En esta forma, las frecuencias de operación tanto

en el ETD como en el ETCD son idénticas, lo cual elimina la presencia de circuitos de extracción de temporización, por ejemplo, los PLL. La temporización sincrónica se puede generar en la forma mostrada en la Fig. 3.18 (a) y (b).

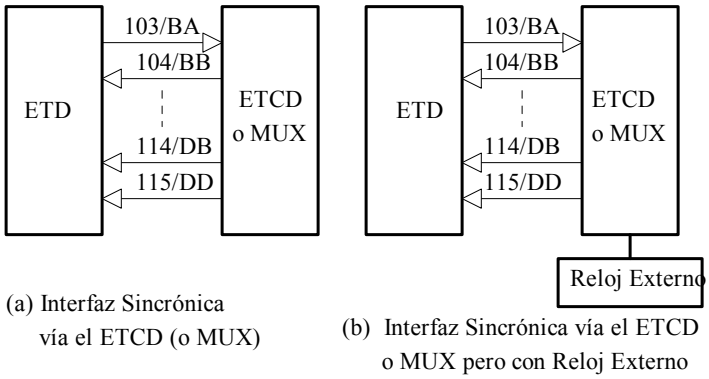


Fig. 3.18. Interfaces Sincrónicas.

En la Fig. 3.18(a) el reloj interno del ETCD se utiliza también en el ETD como fuente de temporización para la transmisión mediante el conductor 114/DB; esta es la disposición más utilizada en la práctica en los sistemas sincrónicos. En la Fig.3.18(b) el reloj externo se utiliza para temporizar tanto el ETCD como el ETD, este último a través del conductor 114/DB.

En el UIT-T se define la transmisión sincrónica como la característica esencial de una escala de tiempo o una señal, tal que sus instantes correspondientes significativos ocurren precisamente a la misma velocidad. En la transmisión sincrónica es posible extraer un canal individual de una secuencia multiplex, pues la localización del canal está completamente determinada. Los nuevos estándares de transmisión (SONET/SDH) son sincrónicos; estos estándares los describiremos en el Capítulo VI.

Temporización Plesiocrónica

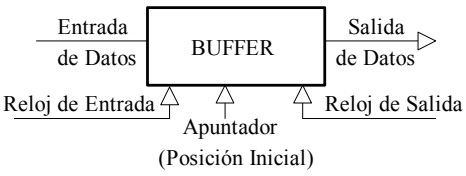


Fig. 3.19. Interfaz Plesiocrónica

Una interfaz plesiocrónica (del griego *plesios* = próximo) se puede definir como una interfaz "cuasi-sincrónica". Entre las frecuencias de reloj del ETD y del ETCD puede producirse diferencias muy pequeñas debidas a inestabilidades en los relojes o a variaciones en el retardo de propagación en la transmisión de las diferentes señales aplicadas a un multiplexor. Estas pequeñas diferencias de frecuencia se pueden absorber en un período arbitrariamente largo mediante un almacenamiento transitorio en un buffer de las secuencias de datos y efectuando un "relleno de dígitos", como se muestra en la Fig. 3.19. Sin embargo, este relleno de dígitos no permite la identificación de un canal individual dentro de una secuencia multiplex. La temporización plesiocrónica se utiliza en algunas jerarquías de transmisión de datos, como veremos en el Capítulo VI.

3.3.8. Control de Flujo CTS ON/OFF y XON/XOFF

En la sección anterior observamos los problemas que se presentan en la sincronización de las entradas de un multiplexor TDM y señalamos algunas de las soluciones. Pero también hay tener en cuenta el control de flujo entre el ETD y el ETCD o MUX. Como las entradas del MUX son independientes, no hay garantía de que la capacidad de línea en la salida, es decir, la velocidad de salida, nunca sea momentáneamente excedida, sobre todo en los multiplexores estadísticos. Por lo tanto, las entradas deben almacenarse (buffering) de manera que se pueda mantener el flujo sin sobrecargas o desbordamientos que se traducen en pérdida de datos. El precio que se paga para mantener un alto nivel de flujo es, por supuesto, un "retardo de almacenamiento"; este retardo puede ser un problema serio en transmisión en tiempo real donde retardos de 50 a 100 ms pueden llegar a ser críticos, sobre todo en sistemas de automatización industrial. Sin embargo, en la mayor parte de los terminales típicos este retardo no es un factor limitativo.

La otra consideración mayor con el almacenamiento es el "desborde (overflow)" de los buffers. Si el tráfico de entrada permanece o pasa sobre un promedio dado durante un tiempo suficientemente largo, los buffers se llenan y si el tráfico continúa se desbordarán con la consiguiente pérdida de datos. El ETCD o el MUX deben reconocer esta situación y detener la entrada de datos para impedir la pérdida de información. Este control de flujo de entrada ("input flow control") se puede efectuar ya sea con las líneas de control de la interfaz haciendo 106 OFF (CTS OFF) o mediante el envío de un caracter ASCII especial de control XOFF al ETD correspondiente (En ASCII, los caracteres XOFF y XON son los caracteres de control DC3 (13H) y DC1 (11H), respectivamente). Cuando el tamaño del buffer se ha reducido lo suficiente, es decir, que ya no hay posibilidad de desborde, la entrada de datos se reinicia haciendo 106 ON (CTS ON) o mediante el envío del carácter especial ASCII XON al ETD correspondiente.

3.3.9. Protocolos de Capa Física

Los protocolos de Capa Física, comúnmente denominados "protocolos de hand-shaking ", son los que establecen el diálogo entre el ETD y el ETCD para iniciar una conexión, transferir la información y terminar la conexión; también tienen que considerar algunas situaciones de excepción que se puedan presentar en la práctica. El protocolo de Capa Física depende del sistema considerado, y como ejemplo vamos a considerar un enlace punto a punto, de dos conductores, fulldúplex por líneas conmutadas, llamada manual/respuesta automática, operación sincrónica con módems tipo V.22 o Bell 212, como se muestra en la Fig. 3.20 [Barksdale, 1986].

En la Fig. 3.20 se muestra un sistema que trabaja a 1200 bps con modulación PSK; vamos a suponer que los módems son Bell 212; la activación de las señales va efectuándose de arriba hacia abajo. En este módem y para respuesta automática, el conductor CD del ETD B siempre está activado (ON) de manera que cuando el ETD A desea establecer una conexión él activa CD y el operador empieza la interconexión discando simplemente el número de destino. El Módem B detecta los repiques y activa CE. Como el ETD B tiene CD activado, su Módem B pasa inmediatamente a descolgar (OFF-HOOK) activando CC y comienza a transmitir un tono de respuesta de 2225 Hz. Cuando el

operador escucha este tono, conmuta de VOZ a DATOS; estando en modo DATOS el Módem A llamante activa entonces CC (descolgado, OFF-HOOK) y espera oír el tono de respuesta de 2225 Hz.

Cuando el Módem A escucha el tono de respuesta de 2225 Hz, comienza a transmitir secuencias de "UNOS" aleatorios ("traininig sequences") por el canal inferior con lo cual le indica al Módem B que la velocidad de transmisión es de 1200 bps. Cuando esta señal es detectada en el Módem B y adquirida la sincronización, el Módem B retorna secuencias de "UNOS" aleatorios durante un tiempo fijo para confirmar la operación a 1200 bps. El Módem B activa simultáneamente CF y CB indicándole al ETD B que hay portadora en la línea y que la transferencia de datos puede comenzar.

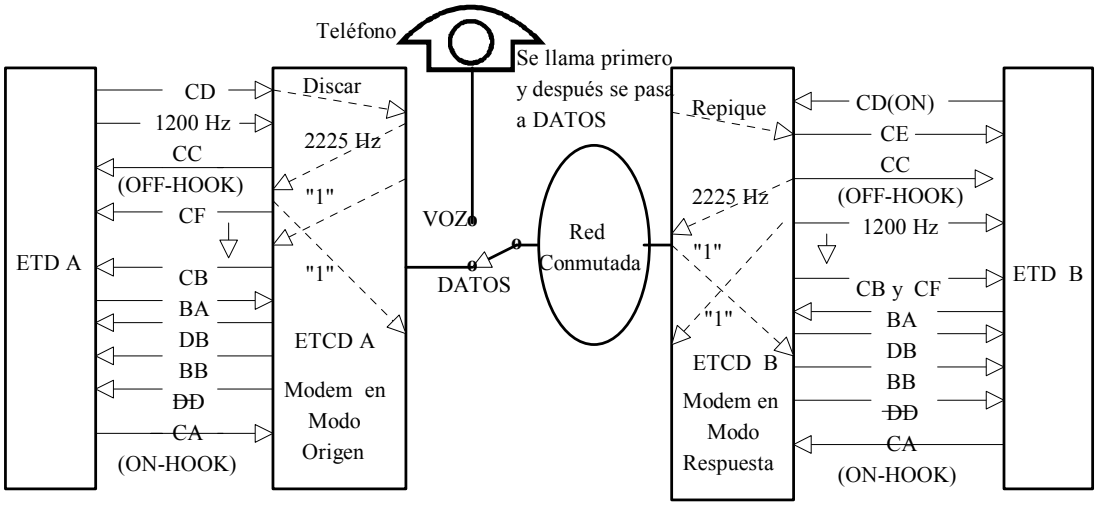


Fig. 3.20. Enlace punto a punto, FDX, en líneas conmutadas.

En el modo sincrónico los relojes son proporcionados por los ETCD a sus respectivos ETD por los conductores DB y DD; por supuesto, en modo asincrónico no hay relojes. La operación en FDX continúa normalmente en ambas direcciones hasta que cualquier ETD cuelga desactivando CA; como resultado, no hay más transmisión y en el otro extremo el módem correspondiente detecta esta condición y desactiva CF, lo cual el ETD interpreta como pérdida de la portadora y termina el intercambio desactivando CA. La terminación del intercambio puede ocurrir también si se producen largos silencios, que también son interpretados como pérdida de portadora.

El ejemplo anterior de protocolo de "hand-shaking" es solamente ilustrativo pero representa más o menos lo que ocurriría en la práctica en un sistema similar. Hay que tener en cuenta que cualquiera instalación en particular tiene características que le son muy propias, y el lector que va a operarlo deberá conocer toda la documentación del sistema para tener una idea de lo que tiene que diseñar, operar o mantener.

Más información sobre los protocolos de "hand shaking" se puede encontrar en [Barksdale, 1986].

3.4. RESUMEN

En la Capa Física es donde se resuelven todas las incompatibilidades entre los diferentes equipos y en ella se encuentran todos los dispositivos para interconectar un usuario con otro usuario, sea directamente o a través de un canal. En la Capa Física no se toma en cuenta el significado de la información contenida en las secuencias de datos, ni el control de error, ni los diferentes formatos, etc.; todo esto es responsabilidad de las capas superiores. Por la capa física lo que circula son secuencias de dígitos binarios y su responsabilidad es la de transmitirlos sin error.

En los Protocolos de Capa Física se describe las características mecánicas, eléctricas, funcionales y de procedimiento para activar, mantener y desactivar conexiones físicas entre entidades de la Capa Enlace. Todas esta características están normalizadas por el UIT-T y por la EIA de los Estados Unidos. En particular, en las Series V y X el UIT-T establece un conjunto de recomendaciones para la transmisión de datos sobre la red telefónica y sobre redes de datos públicas.

El primer dispositivo de capa física visto es el módem, cuyas características y áreas de aplicación están especificadas por el UIT-T en las Recomendaciones de la Serie V. Se describe las características de los módems asincrónicos V.21 y V.23, y de los Módems sincrónicos de las familias V.22, V.26, V.27, V.29, V.32, V.33, V.34 y V.90. También se describen las principales características de los módems inteligentes así como otros tipos de módem no normalizados pero que son de uso corriente. Se describe también algunas de las técnicas y protocolos para el control de error y la compresión de datos.

La interconexión entre los dispositivos de capa física debe hacerse mediante las interfaces. Las principales interfaces utilizadas en los sistemas de transmisión de datos han sido normalizadas por el UIT- T y la EIA. Se describen las siguientes recomendaciones: UIT-T Serie V: V.10, V.11, V.24, V.25, V.25bis, V.28 y V.35. UIT-T Serie X: X.20, X.20bis, X.21, X.21 bis, X.24 y X.25. En cuanto a la EIA y la IEEE, se describen las interfaces RS-232C (ANSI/EIA-232D), RS-423A, RS-422A, RS-449, RS-530, RS-485 e IEEE-488 (GPIB).

Se presenta un conjunto de tablas de equivalencia entre las diferentes interfaces ETD-ETCD tanto UIT-T como EIA para describir las relaciones entre los diferentes circuitos de intercambio. Se muestra también algunos ejemplos de interconexión entre interfaces prácticas incluyendo los “null modems”.

Finalmente, se describen las características eléctricas y mecánicas de algunas interfaces, incluyendo el lazo de corriente de 4-20 mA, de gran aplicación en el medio industrial, así como las formas de temporización, control de flujo y una breve descripción de lo que es un protocolo de capa física o “hand-shaking”.

3.5. CUESTIONARIO

1. ¿Qué es un Módem? ¿Cómo se clasifican de acuerdo con las Recomendaciones de la Serie V del UIT-T?
2. Estudie con atención la Tabla de la Fig. 3.1, donde se muestra los módems normalizados por el UIT-T en sus Recomendaciones de la Serie V. Por ejemplo, a partir

de esta Tabla diga todas las características del Módem V.34: velocidad, tipo de modulación, medio físico utilizado, número de conductores, etc.

3. Los módems V.21, V.22bis y V.32bis son muy utilizados en la práctica. Investigue en el Libro Azul del UIT-T sus características y aplicaciones principales. Investigue también en las revistas especializadas y catálogos comerciales cuáles son sus principales fabricantes y las diferentes versiones y opciones que ellos ofrecen.
4. Un módem puede operar en Modo Origen y/o Respuesta. ¿Qué significan estos términos? Diga las diferencias en la operación Origen/Respuesta de los Módems V.21 y Bell 103. ¿Cómo se efectúa la operación Origen/Respuesta de los Módems V.22 y V.22bis?
5. Diga cuáles son los protocolos usuales de control de error y de compresión de datos utilizados en los módems de la Serie V del UIT-T. Diga también las relaciones de compresión corrientes en estos protocolos. ¿Por qué la máxima velocidad de transmisión de un Módem V.32/V.42bis es de 38400 bps?
6. Describa las características básicas de los "módems inteligentes"; en particular, investigue en un catálogo comercial las características de un Smartmodem Hayes de 9600 bps.
7. Diga las principales características de los Modems de Banda Ancha y los tipos de canal preferidos.
8. Consiga las Especificaciones Técnicas de un módem en particular, preferiblemente normalizado; estudie y asimile todas las características dadas por el fabricante.
9. Se tiene los conectores de las interfaces RS-232C, RS-449 y V.35. ¿Cómo se reconoce cuál es cuál?
10. ¿A qué velocidad máxima se puede trabajar cuando se interconecta una interfaz RS-423A con una interfaz RS-422A?
11. Estudie con atención la Tabla de Equivalencias entre Circuitos de Enlace UIT-T (Serie 100) y EIA de la página 108 de este capítulo, y vea las relaciones entre los circuitos de enlace de las diferentes interfaces. Esta es una Tabla de mucha utilidad práctica.
12. Investigue las aplicaciones de las interfaces RS-485 y IEEE-488 en el campo industrial.
13. Explique las características de los circuitos de enlace balanceados y desbalanceados, y el por qué de su aplicación en las diferentes interfaces.
14. Dibuje el circuito del Lazo de Corriente de 4-20 mA, y diga algunas de sus aplicaciones en el campo industrial tanto para transmisión de señales discretas como continuas.
15. Describa las formas de temporización asincrónica, isocrónica, sincrónica y plesiocrónica. ¿Cuáles son los conductores de interfaz utilizados para la sincronización isocrónica y sincrónica?
16. Describa las formas de control de flujo en Capa Física.
17. ¿Qué es un Protocolo de Hand-Shaking?

CAPITULO IV
CAPAS ENLACE Y RED
PROTOCOLOS DE COMUNICACION

4.1. INTRODUCCION

En el capítulo anterior se mostró un panorama general de la Capa Física de un sistema de comunicación de acuerdo con el Modelo ISO/OSI. Pero la Capa Física es insuficiente para manejar el proceso completo de una comunicación digital entre dos puntos distantes; en efecto, en el intercambio entre dos usuarios existe todo un conjunto de reglas o procedimientos que permiten el movimiento oportuno, ordenado y correcto de la información y la capa física es sólo uno de los elementos que intervienen en el proceso. El conjunto ordenado de reglas que gobiernan este proceso comúnmente se denomina "protocolo de comunicación", y para cada una de las capas habrá protocolos diferentes. En este capítulo vamos a describir algunos protocolos tanto de Capa Enlace como de Capa Red.

Un protocolo de comunicación es, pues, un conjunto de reglas y procedimientos que proporcionan una técnica uniforme para gestionar un intercambio de información. Estas reglas y procedimientos proveen la administración, asignación y control de los recursos involucrados en el proceso; asimismo, establecen métodos para evitar y/o resolver problemas producidos por situaciones de excepción ocurridas en cualquiera de los elementos que intervienen en el proceso.

En el Capítulo I, al introducir el Modelo de Referencia ISO/OSI, establecimos que la Transmisión de Datos tiene que ver solamente con los tres primeros niveles, incluyendo el medio físico de interconexión. Desde el punto de vista de las telecomunicaciones, el conocimiento de las funciones de las tres primeras capas es suficiente para entender, diseñar, operar y mantener los sistemas de comunicación comúnmente utilizados en la práctica.

En el contexto del Modelo ISO/OSI, la Capa Enlace de Datos es la responsable de la interconexión directa, transparente y libre de errores entre dos puntos o entre dos nodos adyacentes dentro de una red. Ella proporciona los medios para activar, mantener y desactivar el enlace de datos. La Capa Enlace proporciona la trama final o bloque de datos que se va a transmitir, facilita el flujo ordenado de datos entre dos nodos y permite la detección y recuperación de errores. En este capítulo describiremos algunos de los protocolos de capa enlace más utilizados en la práctica.

La tercera capa del Modelo ISO/OSI es la Capa Red, la cual opera a través de la red (de fin a fin), a diferencia de la Capa Enlace la cual opera de punto a punto o nodo a nodo. La función básica de la Capa Red es la de proporcionar una trayectoria eficiente para el flujo de datos a través de la red; esto implica funciones de direccionamiento, enrutamiento, control de flujo, control de error y "empaquetamiento" de la información desde un nodo de entrada a la red (nodo de origen) hasta un nodo de salida de la red (nodo de destino). Las funciones de la Capa Red las explicaremos desde el punto de vista de la Transmisión Digital por Paquetes, definida por el UIT-T en la Recomendación X.25.

Un aspecto de considerable interés en el campo de la Transmisión de Datos y al que no se le ha dado suficiente importancia en el medio académico es el de los "protocolos industriales". En el estudio de los sistemas de comunicación y de todas las normas que lo conciernen, muy poco se publica, aparte de las revistas especializadas, sobre el tema de los protocolos de comunicación utilizados en la instrumentación y automatización de procesos industriales. La razón fundamental del poco conocimiento público de estos protocolos es que ellos no están normalizados y en su mayoría son protocolos propietarios; sin embargo, como en la industria petrolera y siderúrgica se utiliza una gran cantidad de estos protocolos en los sistemas de automatización y control de procesos, hemos creído necesario incluir la descripción de los protocolos industriales más utilizados y de las tendencias actuales hacia la normalización. Esto será materia del Capítulo V.

4.1.1. Códigos de Transmisión

Para poder explicar los diferentes métodos de comunicación, es necesario conocer los códigos empleados para representar la información a transmitir. Por ejemplo, dentro de un computador o terminal cada carácter alfanumérico está representado por una combinación única de dígitos binarios de acuerdo con un código determinado, y los Datos o Información son transmitidos en un canal en forma de secuencias de dígitos binarios.

Para la transmisión de información sobre un canal digital, el UIT-T ha normalizado dos tipos de código. Uno es el llamado "Alfabeto N° 2 del UIT-T", utilizado en sistemas de transmisión Arranque-Pare (sistemas asincrónicos) hasta 200 bps. Este es un código de cinco dígitos (32 caracteres) empleado en teletipo (TWX) y telex. Este fue el primer código de caracteres de tamaño fijo y se conoce también como Código Baudot, en honor del ingeniero francés Emile Baudot, un pionero en la transmisión telegráfica. En el Apéndice A se muestra este código en detalle.

En 1977, en sus Recomendaciones V.4 y T.50, el UIT-T establece y define el código "Alfabeto Internacional N° 5 del UIT-T", conocido también como el Código ASCII (American Standard Code for Information Interchange); en la ISO este código se define en la Recomendación ISO.646. Este es un código de 7 dígitos para 128 caracteres alfanuméricos. En ASCII el dígito de menor peso (LSB) se designa como b_o y el dígito de más peso como b_6 y en transmisión serie el dígito b_o se transmite de primero. Generalmente este código se extiende a 8 dígitos al agregársele un dígito adicional b_7 de paridad para detección de error. Este es el código más utilizado en la transmisión de datos.

En la Fig. 4.1 se muestra el Código ASCII. Nótese la presencia de columnas numeradas de 0 a 7, y filas numeradas de 0 a F. Estas columnas y filas permiten expresar los códigos directamente en hexadecimal. Para representar cualquiera combinación en hexadecimal, primero se lee la columna y después la fila; en este caso los dígitos se agrupan de cuatro en cuatro. Por ejemplo, el carácter SYN se puede expresar en numeración binaria, hexadecimal y decimal, respectivamente, en la forma

SYN => 001 0110 Bin = 16 Hex = 22 Dec

Dígitos → ↓	MSB 7 6 5	0 0 0	0 0 1	0 1 0	0 1 1	1 0 0	1 0 1	1 1 0	1 1 1
LSB **4 3 2 1**	columna → fila ↓	0	1	2	3	4	5	6	7
0 0 0 0	0	NUL	**DLE**	SP	0	@	P	\	p
0 0 0 1	1	**SOH**	DC1	!	1	A	Q	a	q
0 0 1 0	2	**STX**	DC2	“	2	B	R	b	r
0 0 1 1	3	**ETX**	DC3	#	3	C	S	c	s
0 1 0 0	4	**EOT**	DC4	$	4	D	T	d	t
0 1 0 1	5	**ENQ**	**NAK**	%	5	E	U	e	u
0 1 1 0	6	**ACK**	**SYN**	&	6	F	V	f	v
0 1 1 1	7	BEL	**ETB**	‘	7	G	W	g	w
1 0 0 0	8	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1 0 0 1	9	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1 0 1 0	A	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1 0 1 1	B	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
1 1 0 0	C	FF	FS	‘	<	L	\	l	:
1 1 0 1	D	CR	GS	-	=	M	]	m	}
1 1 1 0	E	SO	RS	.	>	N	^	n	~
1 1 1 1	F	SI	US	/	?	O	_	o	DEL

Fig. 4.1. Código ASCII.

En algunos sistemas, sobre todo de procedencia norteamericana, se emplea un código de 8 dígitos desarrollado por la IBM; este código se conoce con el nombre de Código EBCDIC (Extended Binary Coded Decimal Interchange Code), el cual mostramos en detalle en el Apéndice A. El Código EBCDIC es un código de caracteres alfanuméricos de 8 dígitos para un total de 256 caracteres alfanuméricos.

Los códigos ASCII y EBCDIC no son compatibles; por eso, cuando la transmisión se efectúa en ASCII y el sistema de procesamiento, por ejemplo computadoras IBM, trabaja en EBCDIC, es necesario utilizar convertidores ASCII/EBCDIC. Esta conversión se puede efectuar previamente en la unidad de control de la comunicación o mediante un programa dentro del mismo computador. Casi todos los terminales utilizan el código ASCII, de manera que la conversión a nivel de terminales no representa, en general, un problema.

4.1.2. Modos de Operación Asincrónica y Sincrónica

Cuando se transmite información sobre un canal digital se utiliza dos categorías o modos de operación: el modo de operación asincrónica y el modo de operación sincrónica.

Operación Asincrónica

En el modo de operación asincrónica se transmite un carácter de código a la vez. Cada carácter de código incluye dígitos de arranque, paridad y parada, denominados “dígitos redundantes”. Estos dígitos redundantes indican al receptor el comienzo de

un carácter, dónde termina y un dato adicional (la paridad) para efectos de detección de error; todos los dígitos tienen la misma duración excepto el de parada cuya duración es variable (una, una y media o dos veces la duración de los otros) según la aplicación. El carácter de código contiene también de 5 a 8 dígitos de información; este campo de información permite entonces codificar la información en Baudot, ASCII o en EBCDIC. La longitud máxima del carácter de código es de 11 dígitos binarios.

En la Fig. 4.2 se muestra el formato de un carácter de código para operación asincrónica.

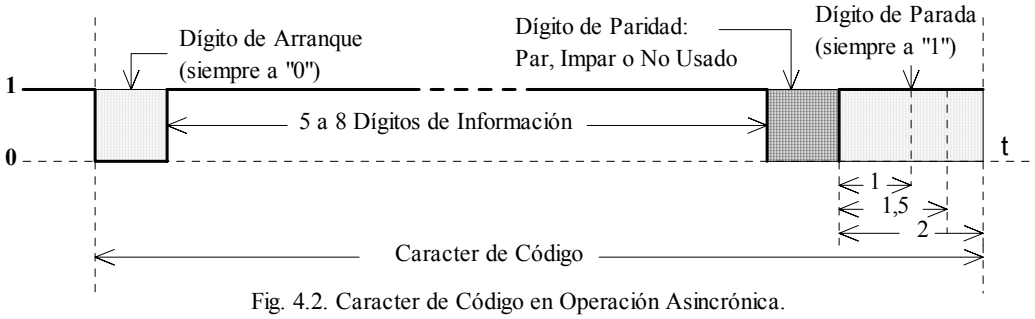


Fig. 4.2. Caracter de Código en Operación Asincrónica.

La transmisión asincrónica se utiliza muchas veces cuando por los terminales se transmite los caracteres uno a uno; la velocidad de transmisión de los octetos es variable. Por ejemplo, un terminal no inteligente puede que no tenga elementos de memoria; por consiguiente, cada vez que el operador oprime una tecla, el carácter correspondiente es transmitido por el sistema hasta un computador de procesamiento, como es el caso de los sistemas de reservación de pasajes. Como la mayoría de las personas escribe a velocidades que no pasan de 300 a 400 caracteres por minuto, lo que equivale a 5 a 7 caracteres por segundo ó 50 a 70 bps, esta velocidad es muy baja cuando la comparamos con la capacidad de la línea que puede ir de 600 a 2400 bps. En estos casos no se justifica sistemas más complicados como generalmente lo son los sistemas sincrónicos cuya velocidad de transmisión (caracteres/segundo) es constante.

El dígito de paridad es un medio para detectar si el carácter ha experimentado un error en la transmisión. En efecto, si el número de UNOS en el campo de información es cero o par, entonces en el dígito de paridad se coloca un CERO; pero si el número de UNOS es impar, entonces en el dígito de paridad se coloca un UNO. Esta es la llamada “paridad par”. Si en la transmisión se produce algún error, es decir, si por efectos del ruido un UNO cambia a un CERO o viceversa, el receptor se dará cuenta del error pues al efectuar la prueba de paridad sobre el carácter recibido, el dígito de paridad calculado y el recibido serán diferentes; esto indica un error en la transmisión. En el Capítulo VI explicaremos con más detalle algunos métodos de corrección y detección de error.

La operación asincrónica se emplea bastante pues las interfaces ETD/ETCD son más sencillas y económicas, y es aplicada cuando los datos se transmiten a baja velocidad y a intervalos aleatorios. La velocidad de transmisión generalmente es hasta 2400 bps, pero

puede llegar hasta 19200 bps en líneas conmutadas y 38400 en líneas dedicadas. En general, la transmisión es en semidúplex.

Operación Sincrónica

En aplicaciones donde se necesita altas velocidades de transmisión se utiliza el modo de operación sincrónica. En este modo de operación a los caracteres de código se les elimina los dígitos redundantes y los caracteres se agrupan en tramas o formatos precedidos y/o terminados por caracteres especiales de sincronización como, por ejemplo, el carácter ASCII SYN o un carácter de la forma 01111110 denominado "bandera". Este método de transmisión es el más utilizado y se emplea para velocidades de 2400 bps en adelante, tanto en semidúplex como en full dúplex.

En la Fig. 4.3 se muestra el formato típico de un mensaje en modo sincrónico.

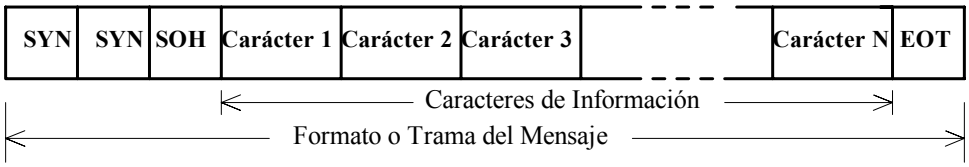


Fig. 4.3. Trama de un Mensaje en Operación Sincrónica.

Los caracteres SYN, SOH y EOT son caracteres ASCII de control, como veremos más adelante.

Las señales de sincronización establecen el ritmo o cadencia entre el transmisor y el receptor, de manera que ellos estén de acuerdo de que ocho dígitos u octeto, por ejemplo, constituyen un carácter. La velocidad de transmisión es constante. Este es el modo de transmisión utilizado en los protocolos de comunicación, como veremos más adelante.

♣ **Ejemplo 4.1**

Vamos a representar la palabra AbQ3 mediante el Código ASCII (con el LSB a la izquierda, paridad par) tanto en transmisión asincrónica como en sincrónica.

Solución:

Transmisión asincrónica, paridad par

Los caracteres conservan los dígitos de arranque, paridad y pare

En ASCII: A => 01000001011; b => 001000111011;

Q => 010001011011; 3 => 01100110011

AbQ3 en Código ASCII => 0100000101100100011101101000101101101100110011

Transmisión sincrónica, sin dígitos redundantes

A => 1000001; b => 0100011; Q =>1000101; 3 => 1100110

AbQ3 en Código ASCII =>10000010100011100010111001 10 ♣

♣ Ejemplo 4.2

Vamos a comparar la velocidad neta de información en dos sistemas, uno asincrónico y otro sincrónico, para una misma velocidad de transmisión en el medio, por ejemplo, V_i = 9600 bps.

La cantidad neta de información a transmitir es I_n = 1024 bits

La velocidad neta de transmisión se puede definir mediante la expresión

$$V_{in} = \frac{\text{Cantidad de Información neta transmitida (bits)}}{\text{Tiempo Total de Transmisión (segundos)}} \text{ bps}$$

Operación Asincrónica:

Carácter de Código de un dígito de arranque, ocho de información y dos de pare. Entre carácter y carácter habrá un intervalo de tiempo (gap) igual a la duración de un dígito.

Operación Sincrónica:

La trama tiene la forma de la Fig. 4.3. No hay gaps entre caracteres.

Se pide:

(a) La velocidad neta de información en Modo Asincrónico

(b) La velocidad neta de información en Modo Sincrónico

Solución:

Modo Asincrónico

Como los caracteres tienen 8 bits de información neta cada uno, los 1024 bits cabrán en N caracteres, donde N = 1024/8 = 128 caracteres.

Sea T_b la duración de un dígito y como la velocidad en el medio es V_i, entonces

$T_b = 1/V_i = 1/9600$.

La suma de los gaps de duración T_b dará un tiempo $T_g = (N - 1)T_b$

El tiempo total T_A será igual a $T_A = 11N \cdot T_b + (N-1)T_b = \frac{12N-1}{V_i}$

T_A = 0,16 seg. La velocidad neta de información en Modo Asincrónico será

$$V_{inA} = \frac{I_n}{T_A} = \frac{1024}{0{,}16} = 6404{,}17 \text{ bps}$$

Nótese que la velocidad neta de información es menor que la velocidad de transmisión en el medio.

Modo Sincrónico

Habrá N = 128 caracteres de información más 4 caracteres redundantes (SYN, SYN, SOH y EOT).

El tiempo total será Ts=8NTb+4x8Tb=0,11seg ——————

La velocidad neta de información será Vins=In/Ts=9309,09bps

Nótese que la velocidad neta de información en modo asincrónico es menor que en modo sincrónico. ♣

4.1.3. Operación Semidúplex (HDX), Fulldúplex (FDX) y Simplex (SX)

Como ya lo hemos señalado anteriormente, en operación semidúplex los datos se intercambian alternativamente entre la fuente (A) y el destino (B); la trayectoria de transmisión puede ser una línea de dos o cuatro conductores. Si la trayectoria es por radio, se utiliza una sola frecuencia.

Cuando se transmite en semidúplex en una línea de dos conductores, es necesario tener en cuenta el tiempo necesario para que el canal se estabilice antes de invertir el flujo de información. A fin de proteger al sistema contra los ecos producidos por una transmisión anterior, debe dejarse transcurrir un cierto tiempo en el ETCD que está recibiendo antes de empezar a transmitir. El lapso comprendido desde el momento que el transmisor de origen deja de transmitir y el momento en que el transmisor de destino se activa, se denomina "tiempo de silencio o tiempo de retorno (turn-around time)". Si se utiliza una línea de cuatro conductores en operación semidúplex, no es necesario tomar el cuenta el tiempo de estabilización del canal, pero el flujo sigue siendo alterno: una vez de A a B por un par de conductores y otra vez de B a A por el otro par de conductores.

Con la operación Simplex (SX) la transmisión es en un solo sentido. La televisión comercial, la radiodifusión y la transmisión de un instrumento de medida son ejemplos de transmisión Simplex.

En la Fig. 4.4 se muestran estas tres formas de operación.

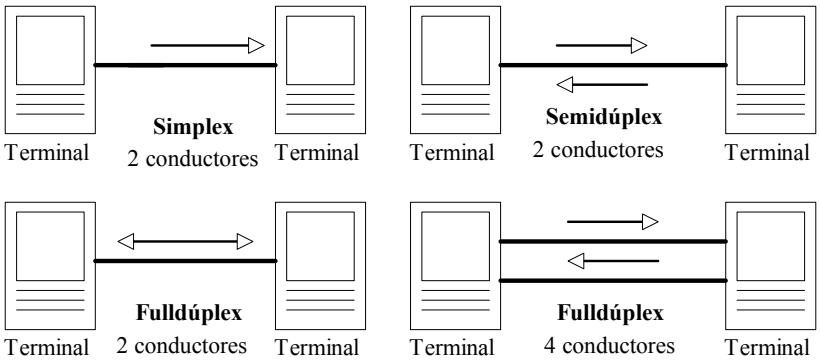


Fig. 4.4. Operación Simplex, Semidúplex y Fulldúplex

En las comunicaciones telefónicas con dos conductores, pueden aparecer ecos de la señal cada vez que la transmisión cambia de dirección. Estos ecos ocurren cuando los amplificadores de línea se conmutan y queda una cierta cantidad remanente de energía de la transmisión anterior. Si esta energía no se disipa totalmente, ella puede interferir en la inteligibilidad de los mensajes que se están recibiendo del lado opuesto. Este problema se puede resolver introduciendo en el receptor un período de retardo fijo desde el momento en que el ETCD pasa a ON (RTS se activa) hasta el momento en que se permite la transferencia de datos (CTS se activa). Este período permite que los ecos se disipen hasta un nivel con el cual no son ya un problema. Nótese que la energía de los ecos se almacena en las capacitancias parásitas de la línea de transmisión.

Aunque retardos pequeños son preferibles, ellos no deben ser tan cortos que puedan comprometer la calidad de la transmisión. Un buen punto de partida es establecer un retardo de 50 ms, pero se puede seleccionar otros valores basados en el conocimiento del sistema. Por ejemplo, en una transmisión a 1200 baudios sobre una línea privada o dedicada bajo 80 km, se puede establecer un retardo de 8 ms que puede producir resultados satisfactorios; para distancias mayores se toma desde 50 ms hasta 200 ms. En la red conmutada el retardo es generalmente de 200 ms. En trayectorias vía satélite de discado directo, el retardo propio de la trayectoria puede llegar a 600 ms; en este caso no hay problemas de estabilización del canal. En general, en los módems comerciales se puede variar el tiempo de retardo RTS/CTS según la aplicación.

En operación fulldúplex el flujo de información es simultáneo en ambos sentidos. Si la línea es de cuatro conductores, dos conductores transmitirán en un sentido y los otros dos en sentido contrario; la frecuencia puede ser la misma. Si la línea es de dos conductores, entonces hay que hacer un multiplexamiento en frecuencia, es decir, en una dirección se transmite a una frecuencia o banda dada, mientras que en la otra dirección se transmite a una frecuencia o banda diferente; igualmente si la transmisión es por radio.

4.1.4. Transmisión Serie y Paralelo

La información binaria se puede transmitir paralelamente o en serie. Por ejemplo, en la Fig. 4.5(a) se muestra cómo el grupo 0110 se transmite desde el punto A hasta el punto B en forma paralela. Obsérvese que cada dígito binario (b_o a b_3) tiene su propia línea de transmisión. En consecuencia, los cuatro dígitos binarios se pueden transmitir simultáneamente durante el intervalo Tb de un impulso de reloj.

En la Fig. 4.5(b) se muestra la forma de transmisión serie por una sola línea de transmisión. Los dígitos binarios se transmiten uno detrás del otro requiriendo un tiempo de $4T_b$ segundos para transmitir el grupo binario 0110.

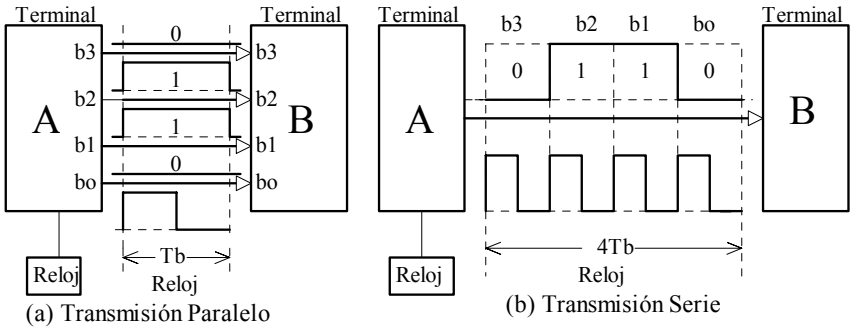


Fig. 4.5. Transmisión Paralelo y Serie

El intercambio o compromiso principal entre la transmisión paralela y la transmisión serie es la velocidad contra la simplicidad (costo). La transmisión paralela es mucho más veloz que la transmisión serie, pero es más costosa por el número de líneas que utiliza. Como regla general, la transmisión paralela se utiliza para transmisión a corta distancia (unos cuantos metros) o dentro de equipos, y la transmisión serie para la comunicación a largas distancias.

4.1.5. Transmisión en Banda de Base y con Portadora Modulada

Se dice que la transmisión es en banda de base cuando la señal digital se transmite tal como se genera y sin ningún otro tipo de modulación o conversión que no sea digital. En la Fig. 4.6(a) se muestra esta forma de transmisión.

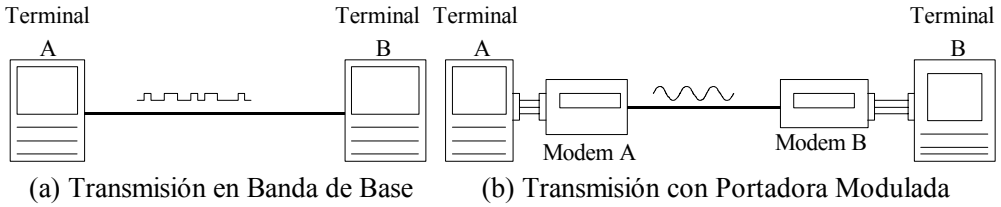


Fig. 4.6. Transmisión en Banda de Base y con Portadora Modulada

En la transmisión con portadora modulada, Fig. 4.6(b), la señal digital modula una señal sinusoidal de frecuencia compatible con el medio de transmisión. El módem es el dispositivo que realiza esta conversión.

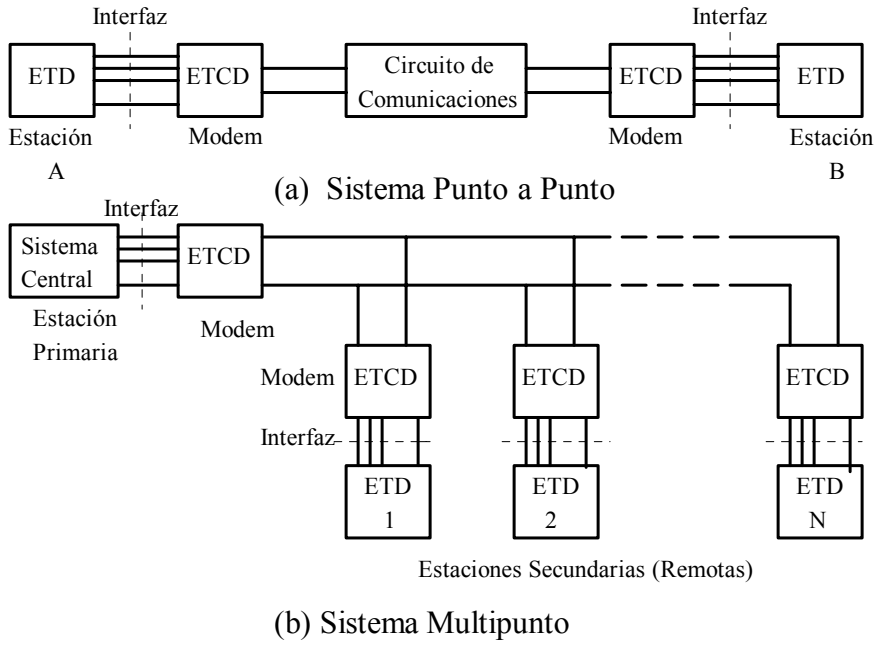
La transmisión con portadora modulada se utiliza cuando las distancias son muy grandes o cuando las características del medio de transmisión no son apropiadas para la transmisión de señales discretas. Las técnicas de modulación binaria ASK, FSK y PSK son formas de transmisión con portadora modulada.

4.1.6. Transmisión Punto a Punto y Multipunto

La configuración básica de la mayoría de los sistemas de transmisión de datos está conformada por un computador o procesador central con terminales en línea punto a punto o en multipunto, como se muestra en las configuraciones mostradas en la Fig. 4.7.

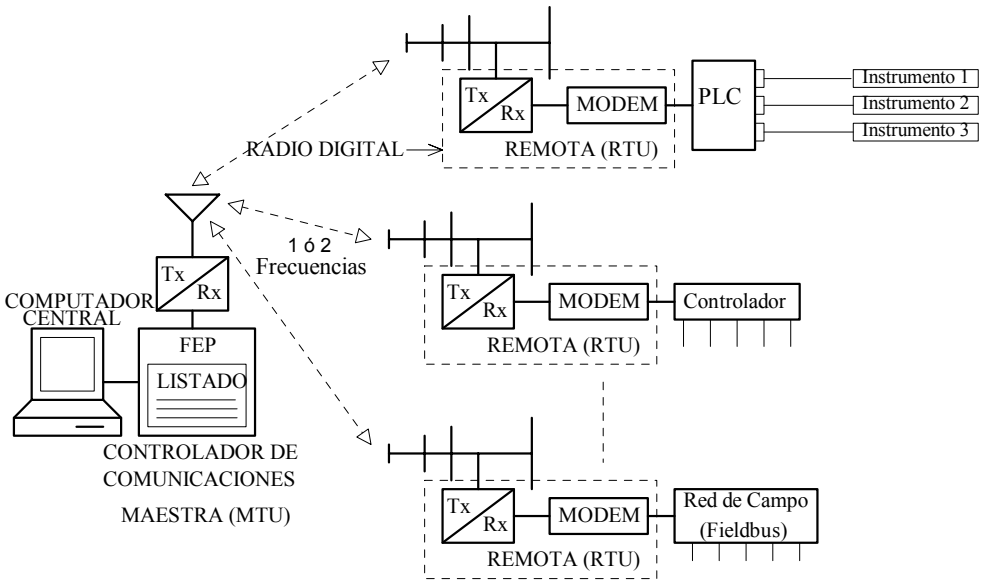
Esta situación introduce la noción de "Estación Primaria o Maestra" que controla los enlaces, y de "Estaciones Secundarias o Esclavas" que solamente responden a la Maestra. Una vez establecido el enlace, la Maestra puede iniciar el flujo de datos sea mediante "interrogación (polling)" o mediante "selección (selecting)". El "polling" es un comando mediante el cual la Maestra le solicita a una o varias Esclavas que transmitan algún tipo de información. La "selección" es una notificación a una o varias Esclavas de que estén listas para recibir información.

En los sistemas de telemetría y telecontrol generalmente se opera en el denominado Modo de Respuesta Normal (NRM), en el cual todas las estaciones secundarias están subordinadas a la estación principal y no efectúan ninguna operación que no sea solicitada por la estación principal. Este es el Sistema Maestra/Esclava.

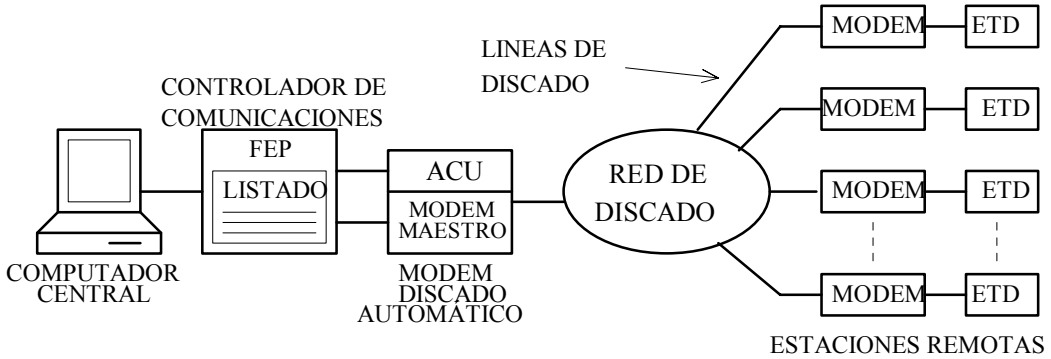


(b) Sistema Multipunto

Fig. 4.7. Configuraciones Punto a Punto y Multipunto



(c) Multipunto sobre Radio



(c) Multipunto sobre Líneas de Discado

Fig. 4.7(cont). Configuraciones Punto a Punto y Multipunto

4.1.7. Técnicas de Multiplexamiento

En las secciones anteriores se ha discutido varias de las técnicas de transmisión en términos de su habilidad para transportar información generada por una sola fuente. Pero en la práctica es necesario enviar simultáneamente una gran cantidad de mensajes diferentes por un medio de transmisión dado. El proceso de operación multicanal permite, mediante las técnicas llamadas de “multiplex” o “multiplexamiento”, combinar en el transmisor los mensajes de varias fuentes de información, transmitirlos como un solo bloque y luego separarlos en el receptor. Como solamente se necesita un transmisor y un receptor, aunque mucho más complicados, una ventaja de la operación multicanal es la

disminución de equipo y, por supuesto, costo. La banda de frecuencias o intervalo de tiempo asignado a cada mensaje individual se denomina comúnmente “canal”.

Hay dos formas de multiplex que son de interés:

1. Multiplex por División de Frecuencia (Frequency-Division Multiplex, FDM)

2. Multiplex por División de Tiempo (Time-Division Multiplex, TDM)

El sistema FDM, el cual es directamente aplicable a señales continuas, en esencia consiste en colocar lado a lado, mediante modulación y sin solapamiento, los espectros de las señales mensaje individuales y formar así un espectro compuesto o señal de banda de base compuesta que se transmite; las señales se reparten el ancho de banda disponible del canal de transmisión. En la Fig. 4.8 se muestra el mecanismo del multiplexamiento por división de frecuencia (FDM).

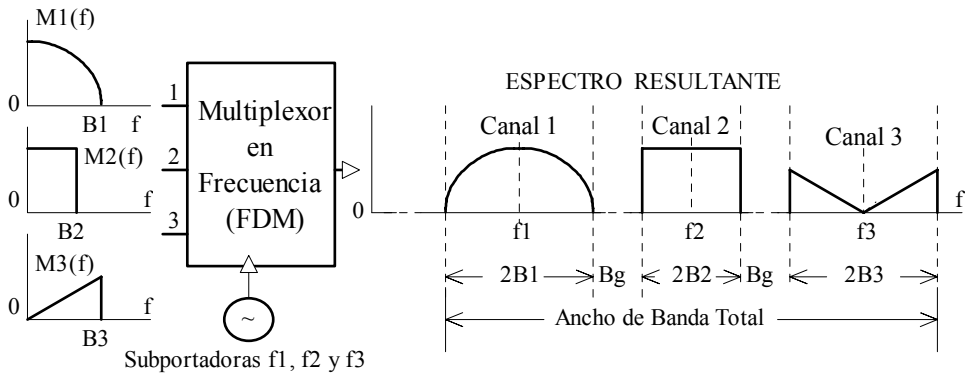


Fig. 4.8. Mecanismo de Multiplexamiento en Frecuencia (FDM).

El sistema TDM combina, en el tiempo y sin solapamiento, los valores de muestra, codificados o no, de los mensajes individuales; el tiempo es compartido por las señales individuales. La transmisión de cada muestra ocupa todo el ancho de banda del canal pero sólo una parte del tiempo, pudiéndose aprovechar el intervalo entre muestras para transmitir las muestras de otras señales mensaje. La separación de las señales individuales en el receptor se efectúa mediante circuitos de sincronización apropiados. En la Fig. 4.9 se muestra el mecanismo de multiplexamiento por división de tiempo.

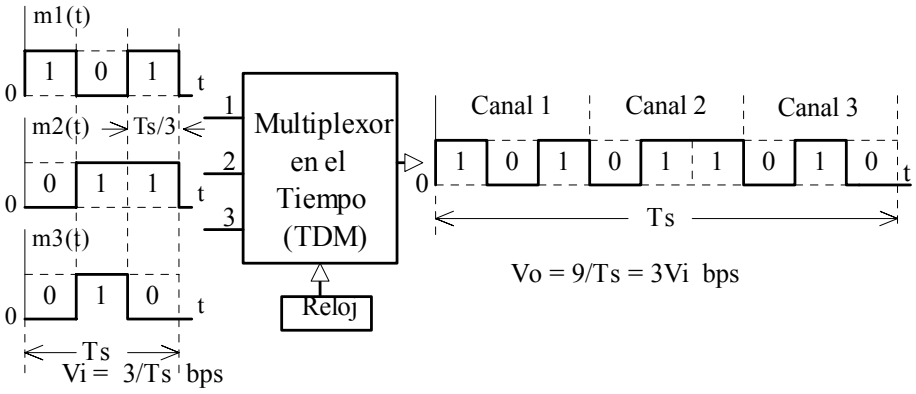


Fig. 4.9. Mecanismo de Multiplexamiento por División de Tiempo (TDM).

4.2. PROTOCOLOS DE CONTROL A NIVEL DE ENLACE

4.2.1. Introducción

El intercambio de información en un sistema de transmisión de datos exige una serie de pasos bien definidos o diálogo entre las estaciones transmisoras y receptoras. Estos pasos o fases implican procedimientos para

- La elaboración de un formato para el "encapsulamiento" de la información
- La determinación o selección de un enlace dado entre dos estaciones adyacentes
- La petición o demanda para transmisión o recepción de información
- La verificación de que la información recibida no contiene errores
- La repetición de una trama de información que ha sido recibida con errores
- El control del flujo de la información
- La transmisión transparente de la información
- La detección de Tiempo Cumplido ("time-out")
- La finalización de la transmisión
- La supervisión, control y sincronización de las estaciones en el caso de transmisión sincrónica

El intercambio de información entre estaciones se efectúa mediante la ayuda de los Protocolos de Comunicación tanto en sistemas punto a punto como en sistemas multipunto, algunas de cuyas configuraciones se mostraron en la Fig. 4.7.

Los protocolos empleados en la transmisión de datos dependen (a) de si el control se efectúa mediante caracteres especiales de control, (b) por conteo de bytes o (c) si se hace dígito por dígito. Se distinguen entonces tres categorías de protocolos: Protocolos de Control por Caracteres (Character-Oriented Protocol), Protocolos de Control por Conteo de

Octetos o Bytes (Byte-Count Oriented Protocol) y Protocolos de Control por Dígitos (Bit-Oriented Protocol).

Además de esta clasificación básica, se puede encontrar otros tipos de protocolo. Por ejemplo, algunos protocolos tienen características especiales que les permiten una mayor eficiencia en enlaces por satélites; otros que son apropiados en operación multipunto y redes en lazo cerrado, etc. Los protocolos industriales entran dentro de estas clases; sin embargo, al examinarlos con más atención, se pueden clasificar dentro de cualquiera de las tres categorías mencionadas en el párrafo anterior.

A continuación vamos a describir brevemente estos tres tipos de protocolo. Una descripción detallada de estos protocolos está fuera del propósito de este libro. Para más detalles, ver el Libro Azul del UIT-T y la bibliografía especializada.

4.2.2. Protocolos de Control por Caracteres

Protocolo de Control BSC

Se ha desarrollado toda una variedad de protocolos de control por caracteres, pero el más conocido es el Protocolo BSC (Binary Synchronous Communications) desarrollado por la IBM; a este protocolo se le denomina también Protocolo BISYN. Este protocolo utiliza ciertos caracteres de control para delimitar los diferentes campos y para el control de sus funciones propias.

El protocolo BSC es un protocolo sincrónico que opera en HDX y requiere un reconocimiento para cada trama transmitida antes de enviarse la trama siguiente. Este protocolo está diseñado para trabajar en punto a punto o en multipunto con una sola estación de control o estación primaria; esta es la denominada operación Maestra-Esclava.

Los caracteres de control en el protocolo BSC son los siguientes por orden alfabético: ACK, DLE, ENQ, EOT, ETB, ETX, NAK, SOH, STX y SYN. Estos diez caracteres están definidos en los Códigos ASCII (Fig. 4.1), EBCDIC y en el Transcódigo de 6 Dígitos (Six Bit Transcode). La significación de cada uno de estos caracteres es la siguiente:

ACK (Acknowledge). Reconocimiento positivo. Este carácter es transmitido por una estación cuando la información recibida es correcta o cuando se transmite una respuesta afirmativa.

DLE (Data Link Escape). Carácter utilizado para la transmisión transparente de la información.

ENQ (Enquiry). Petición. Carácter utilizado por la estación primaria para solicitar una respuesta desde una estación secundaria.

EOT (End of Transmission). Fin de transmisión. Este carácter indica la finalización de la transmisión. Generalmente se transmite al final de la última trama de una serie.

ETB (End of Transmission Block). Fin de la transmisión de un bloque o trama de información. Indica también que hay más tramas para transmitir.

ETX (End of Text). Fin de texto. Este carácter se coloca al final del campo "Texto" que comenzó con STX.

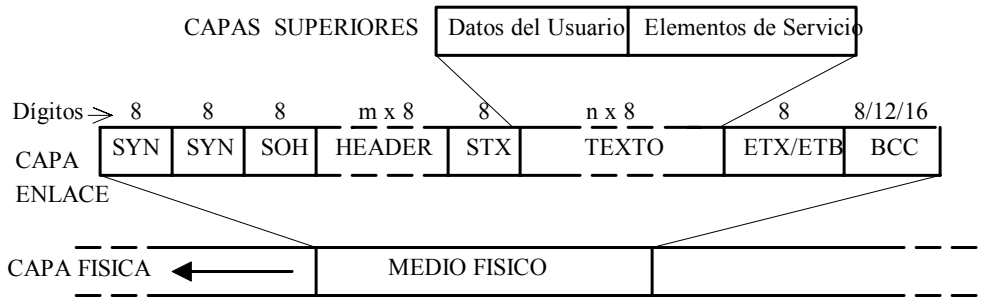
NAK (Negative Acknowledge). Reconocimiento negativo. Este carácter es transmitido por una estación para indicar que la información recibida está en error o cuando se transmite una respuesta negativa.

SOH (Start of Heading). Comienzo de un "membrete" o "encabezado" ("header") .

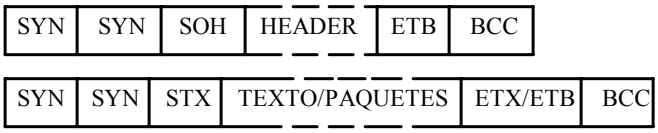
STX (Start of Text). Comienzo de Texto. Este carácter precede al campo "Texto" e indica también la terminación del encabezado o "header".

SYN (Synchronous Idle). Carácter de Sincronización. Se transmite series de caracteres SYN y la sincronización se considera completa cuando se detecta por lo menos dos caracteres SYN consecutivos. Los caracteres SYN siempre se transmiten en pares, de modo que si sólo se recibe uno, se ignorará; la probabilidad de que dos caracteres SYN falsos ocurran consecutivamente es remota.

El formato del protocolo BSC se muestra en la Fig. 4.10. Cada una de las partes del formato se denomina comúnmente "campo".



(a) Formato General del Protocolo BSC, Operación HDX, Sincrónico.



(b) Tramas Típicas de Información

(c) Trama de Control o Supervisión

Fig. 4.10. Formatos del Protocolo BSC

Para la sincronización de los relojes entre las estaciones transmisora y receptora, al principio de cada trama se transmite secuencias de caracteres SYN y la sincronización se considera completa cuando la estación receptora ha reconocido por lo menos dos caracteres SYN consecutivos.

El carácter de control SOH indica el comienzo de un encabezado o membrete ("header") el cual contiene información para iniciar los procedimientos de intercambio. Por ejemplo, direcciones, instrucciones, procesamiento de texto, etc., necesarios para iniciar el intercambio de información; el número de caracteres u octetos del "Header" es variable, depende de la aplicación y tanto el SOH como el "Header" se pueden omitir si no son necesarios en una transmisión dada. Generalmente ellos constituyen la primera trama de toda una serie de un mismo mensaje.

En el campo Texto va la información que viene de las capas superiores. El número de caracteres en este campo también es variable, pero comúnmente el número es de 256 caracteres.

El campo BCC (Block Check Character) que puede contener 8, 12 o 16 dígitos se emplea para la verificación de error. En el transmisor se efectúa una operación con un algoritmo de cálculo denominado CRC (que veremos en el Capítulo VII) con los datos desde SOH hasta ETX/ETB. El resultado de esta operación se coloca en el campo BCC y se transmite. En el receptor se efectúa la misma operación y el resultado de esa operación se compara con la cantidad que va en el BCC. Si esas cantidades son iguales, se considera que no hubo error y se responde con un ACK; en caso contrario, se responde con un NAK para solicitar la retransmisión de la trama.

Para entender mejor cómo opera el protocolo, vamos a explicar la forma de transmisión de dos secuencias de datos: una sin error y una con errores, Fig. 4.11 y 4.12.

Consideremos un sistema multipunto, y sea la Fig. 4.11. El punto de partida en el intercambio comienza cuando la Estación Primaria A inicia el diálogo con un "Pedido de Transmisión o de Recepción" de la forma **[SYN]["DIRECCION"][ENQ],** donde el campo "DIRECCION" es simplemente el código de una estación secundaria determinada B y el modo de intercambio: "Pedido de Transmisión (POLLING), Fig. 4.11(a), o "Pedido de Recepción (SELECTING)", Fig. 4.11(b). Si en modo POLLING la estación B tiene información para transferir, contesta con **[SYN][STX]["TEXTO"][ETB][BCC]**. El campo "Texto" es simplemente la información a transferir solicitada mientras que el campo BCC es el campo utilizado para la detección y recuperación de errores.

El campo que constituye el "Texto" puede contener más de 600 caracteres aunque normalmente está limitado a 256 caracteres. SOH y "Header" pueden transmitirse en la primera trama y omitirse en el resto. Si la información recibida de la estación B es correcta, la estación A la confirma mediante un reconocimiento positivo de la forma **[SYN][ACK]**; en muchos casos la confirmación se efectúa con ACK0 o ACK1, donde 0 indica que el número de la trama recibida es par, mientras 1 indica que es impar, lo cual ayuda en la detección de errores en las secuencias correspondientes. Las secuencias ACK0 y ACK1 constan de 16 dígitos y en el Código ASCII se transmiten como DLE0 o DLE1, mientras que en el Código EBCDIC se transmiten como DLE70 y DLE61 (70 y 61 son números hexadecimales).

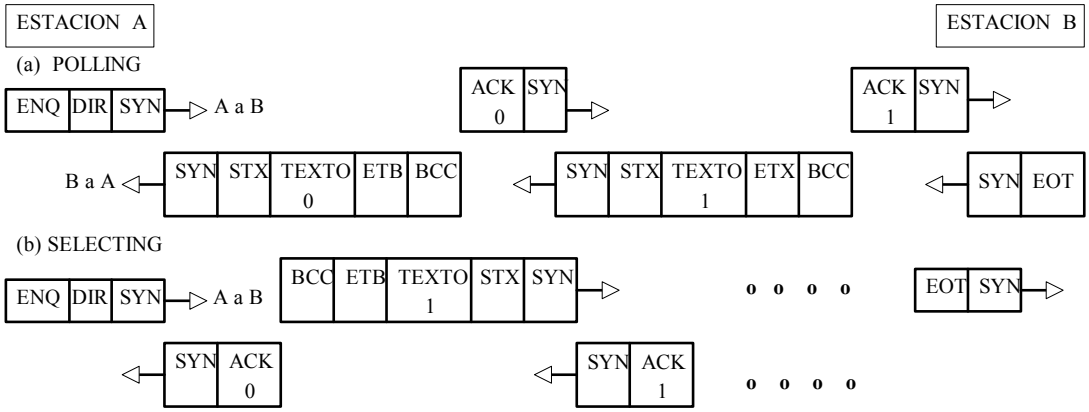


Fig. 4.11. Protocolo BSC. POLLING y SELECTING

La última trama o bloque de una transmisión lleva el carácter de control ETX dando por terminada la transmisión. La función de ETX es similar a la de ETB pero al mismo tiempo indica que no hay más bloques para transmitir. Después del reconocimiento positivo correspondiente al último bloque, la Estación B finaliza el intercambio con **[SYN][EOT]**. El carácter EOT se puede utilizar también para responder "nada para transmitir" a una petición de transmisión o para participar una interrupción durante el transcurso de una transmisión.

Veamos ahora el caso cuando la Estación Primaria A quiere enviar información a alguna Estación Secundaria B, Fig. 4.11(b). La Estación Primaria envía un "Pedido de Recepción (SELECTING)" en la forma **[SYN][“DIRECCION”][ENQ]**. En el campo "DIRECCION" está indicado el código de la Estación Secundaria B que debe recibir la información y el modo de transmisión (Selecting). Si la Estación B no está lista para recibir información, ella responde con **[SYN][NAK],** una respuesta negativa. Si ella está lista responde positivamente con **[SYN][ACK0]**. La Estación A envía entonces una secuencia de la forma **[SYN][STX][TEXTO 1][ETB][BCC]** y así sucesivamente y termina la transmisión con **[SYN][EOT]**.

Veamos ahora el caso de dos situaciones especiales, Fig. 4.12: una cuando hay bloques en error, y otra cuando la estación llamada no responde pasado un tiempo dado denominado "Tiempo Cumplido (Time-out)".

Cuando se recibe un bloque en error, Fig. 4.12(a), la estación receptora responde con **[SYN][NAK]**. En este caso la estación transmisora repite el bloque en error.

Cuando después de un determinado tiempo (generalmente 3 segundos) no hay ningún tipo de reconocimiento (ACK o NAK), entonces se produce una alarma de "tiempo cumplido" (Time-out), Fig. 4.12(b). Después del "time-out", la estación transmisora retransmite pedidos de reconocimiento de la forma **[SYN][ENQ]**. Si la situación se ha normalizado, la estación receptora responde con **[SYN][ACK 0]** y el intercambio de

información se restablece. Si no hay respuesta después de varias solicitudes, la estación transmisora aborta la transmisión.

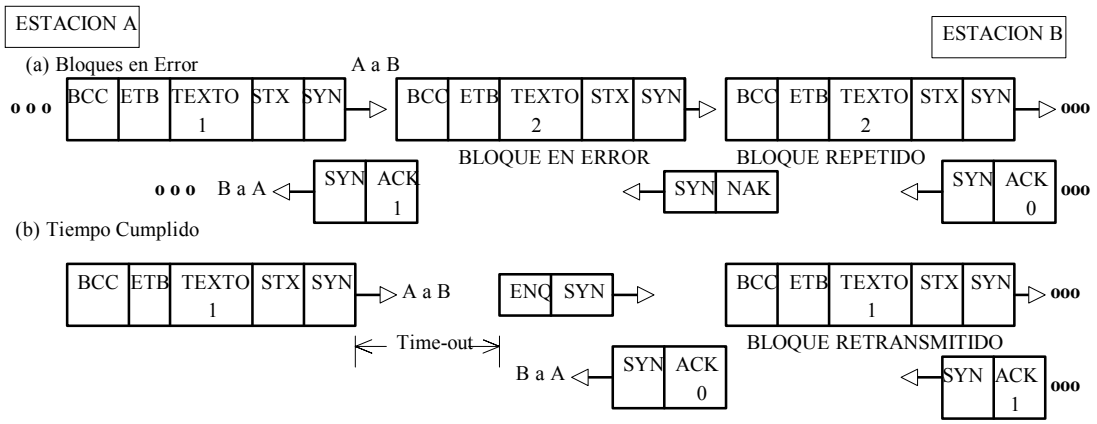


Fig. 4.12. Protocolo BSC. Manejo de Bloques en Error y Tiempo Cumplido.

La información contenida en los caracteres de control se puede extender mediante el carácter de control DLE, de tal manera que la información de control tendrá 2 octetos (16 dígitos). Por ejemplo, WACK o WABT, que son caracteres de espera, se pueden formar como una combinación de dos caracteres, incluyendo DLE y "**;**". En consecuencia, WACK o WABT pueden significar que el bloque recién recibido no contiene errores pero que la estación receptora está temporalmente imposibilitada para recibir más datos. La respuesta usual de la estación transmisora es ENQ y la estación receptora sigue respondiendo con WACK hasta estar lista para recibir. Asimismo, en algunas aplicaciones los reconocimientos ACK0 y ACK1 se expresan en la forma DLE0 y DLE1, respectivamente.

Pero la aplicación principal del carácter de control DLE es en el control de "datos transparentes". Se dice que un campo (texto, header o BCC) contiene "datos transparentes" cuando alguno de los caracteres que lo conforman tiene el mismo código que alguno de los caracteres de control. Esta situación se presenta cuando la información a transmitir es, por ejemplo, la salida de un instrumento de medida. En este caso es necesario que la lógica de reconocimiento de caracteres se desconecte, porque si aparece, por ejemplo, un carácter con el mismo código que ETX, el receptor lo tomará como tal creándose la correspondiente confusión. La desconexión de la lógica de reconocimiento se efectúa insertando antes de cualquier carácter de control, excepto los SYN, caracteres DLE. Se inserta también caracteres DLE cuando dentro de los campos "header" y "Texto" aparece algún carácter de control. Si aparece DLE la operación de transparencia quedará en la forma DLE DLE.

Algunas veces las tramas son precedidas y terminadas con caracteres especiales denominados PAD. El PAD al comienzo de una trama tiene como código 55H mientras que el código del PAD de fin de trama es FFH. El propósito de los PAD es el de facilitar la sincronización de los módems; en efecto, el PAD de entrada es simplemente una secuencia de UNOS y CEROS alternados cuyas transiciones son necesarias para la recuperación del reloj en el módem de recepción. El PAD de fin de trama es una secuencia de UNOS que se utiliza para separar las tramas dando tiempo para que la estación receptora se reinicialice.

La desventaja principal del Protocolo BSC es su lentitud pues trabaja en operación semidúplex y cada bloque debe ser reconocido (ACK0 o ACK1) por el receptor antes de proceder a la transmisión del bloque siguiente de una serie. Este es un procedimiento lento cuando se quiere transmitir a grandes velocidades o cuando los retardos de transmisión son grandes, como es el caso de la transmisión por satélites. Para sistemas que trabajan en full dúplex el protocolo BSC no se emplea utilizándose algunos de los protocolos que veremos más adelante.

Resumen de las Características del Protocolo BSC

Características

- Control por Caracteres
- Transmisión HDX Sincrónica
- Formato del Carácter: ASCII Sincrónico
- Velocidades: 300 a 20 kbps
- Modo de Respuesta Normal (NRM)
- Interfaz de preferencia : RS-232C
- Transparencia mediante inserción de caracteres DLE

♣ Ejemplo 4.3

Consideremos un enlace de radio punto a punto como el mostrado en la Fig. 4.13 Este sistema trabaja en Operación Maestra/Esclava.

La velocidad de transmisión en el sistema es de V_i bps.

Características del Transceptor (Tx/Rx): tiempo de alzada = t_a seg

tiempo de preámbulo = t_p seg

Cualquier otro parámetro de tiempo, por ejemplo, retardo RTS/CTS, ON/OFF = t_x seg

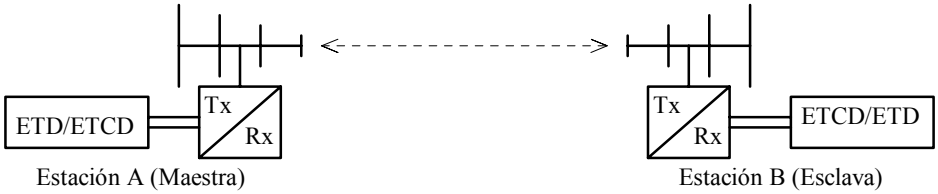


Fig. 4.13.Enlace de Radio Punto a Punto.

(Todos estos tiempos vienen dados por el fabricante del transmisor y del módem)

Tiempo de propagación en la atmósfera t_c = 4 a 10 μs/km. Si la distancia es menor que 1000 km, se puede despreciar el tiempo de propagación.

Tiempo de procesamiento de la respuesta en el receptor $= t_{pr}$ seg

El número de octetos a nivel de Capa Enlace del Bloque de Interrogación es de X octetos, mientras que para el Bloque de Respuesta es de Y octetos.

(a) Determine el Ciclo de Interrogación/Respuesta del Enlace, es decir, el tiempo entre el instante en que el ETD A inicia una interrogación y el instante en que termina de recibir la respuesta desde el ETD B.

(b) Sea un sistema punto a punto en una instalación industrial. El protocolo utilizado es el BSC, donde, a nivel de Capa Enlace, los bloques tienen la siguiente configuración, Fig. 4.14.

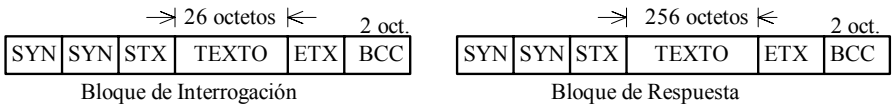


Fig. 4.14. Bloques de Interrogacion y Respuesta.

$t_a =$ 60 ms; $t_p =$ 70 ms; t_c despreciable; $t_x =$ 60 ms; $t_{pr} =$ 120 ms

Se desea que el Ciclo de Interrogación/Respuesta esté entre 0,9 seg y 1,1 seg.

Determine la velocidad de transmisión apropiada y seleccione un módem UIT-T.

Solución:

(a) Tiempo de Interrogación:

X octetos a V_i bps $\rightarrow$ $T_X = \dfrac{8X}{V_i}$

Tiempo de alzada, ..., etc $\rightarrow$ $t_{i2} = t_a + t_p + t_c + t_x$

Tiempo de Interrogación $\rightarrow$ $T_I = t_{i1} + t_{i2} = T_X + t_a + t_p + t_c + t_x$

Tiempo de Respuesta:

Y octetos a V_i bps $\rightarrow$ $T_Y = \dfrac{8Y}{V_i}$

Tiempo de alzada, ..., tiempo de procesamiento $\rightarrow$ $t_{r2} = t_a + t_p + t_c + t_x + t_{pr}$

Tiempo de Respuesta $\rightarrow$ $T_R = t_{r1} + t_{r2} = T_Y + t_a + t_p + t_c + t_x + t_{pr}$

La duración T del Ciclo de Interrogación /Respuesta en un enlace punto a punto es

$$T = T_I + T_R = \frac{8}{V_i}(X + Y) + 2(t_a + t_p + t_c + t_x) + t_{pr} \qquad \text{(A)}$$

En la expresión (A) hagamos $t_r = 2(t_a + t_p + t_c + t_x) + t_{pr}$, donde t_r es el tiempo total de retardo en el enlace. La expresión (A) queda en la forma

$$T = \frac{8}{V_i}(X + Y) + t_r$$

y la velocidad de transmisión V_i, $V_i = \dfrac{8(X+Y)}{T - t_r}$

Como V_i es una magnitud positiva ($V_i > 0$), debe verificarse entonces que $T > t_r$, es decir, el ciclo de interrogación/respuesta deberá ser siempre mayor que el retardo total en el enlace. De hecho, en la práctica es común que $T >> t_r$.

El intercambio entre la Estación A (Maestra) y la Estación B (Esclava o Remota) se puede visualizar mucho mejor mediante un diagrama de tiempo como el de la Fig. 4.15.

En esta figura,

$t_o = t_a + t_p + t_c + t_x$

T_x y T_y son los tiempos de transmisión de los bloques X y Y, respectivamente.

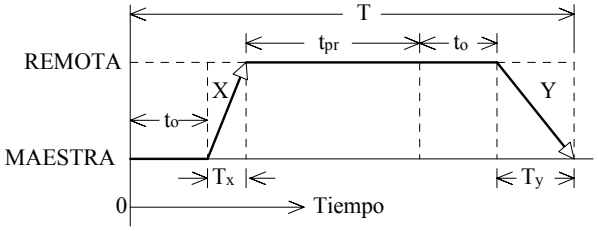


Fig. 4.15. Diagrama de Tiempo en un enlace

Esta figura nos permite determinar la velocidad neta de transmisión. Sea V_{in} esta velocidad.

Por definición,

$$V_{in} = \frac{8(X+Y)}{T} \text{ bps}$$

La velocidad neta de transmisión siempre es menor que la velocidad de transmisión en el canal.

Nótese que si el sistema fuera multipunto con N estaciones secundarias, el período de Interrogación/Respuesta de una estación secundaria sería

$$T_T = NT = N[\frac{8}{V_i}(X+Y) + 2(t_a + t_p + t_c + t_x) + t_{pr}] \qquad \text{(B)}$$

Esta fórmula implica que todas las remotas son iguales y están a la misma distancia. En un caso práctico hay que tomar las características propias de cada remota y su distancia correspondiente; sin embargo, si la distancia es menor de 1000 km, se desprecia el tiempo de propagación.

(b) Vemos que X = 32 octetos; Y = 262 octetos;

De la ecuación (A) de la parte (a),

Para T = 0,9 seg,

$$V_i = \frac{8(32+262)}{0{,}9 - 2(60+70+60)10^{-3} - 120x10^{-3}} = 5880 \text{ bps}$$

Para T = 1,1 seg,

$$V_i = \frac{8(32+262)}{1{,}1 - 2(60+70+60)10^{-3} - 120x10^{-3}} = 3920 \text{ bps}$$

Se puede seleccionar el Módem V.32 QAM que permite operar también a 4800 bps. En este caso el ciclo de interrogación/respuesta es T = 0,99 seg, lo cual está dentro de lo especificado. La velocidad neta de transmisión con el módem de 4800 bps será

V_{in} = 8(32+262)/0,99 = 2376 bps

Si se considera que esta velocidad no es apropiada, no queda más remedio que utilizar un módem de más alta velocidad. Por ejemplo, si se utiliza el Módem V.32 pero a 9600 bps, de la expresión (A) el tiempo T será T = 0,745 seg y la velocidad neta será

V_{in} = 3157 bps.

En un caso práctico el diseñador del sistema debe establecer la solución más apropiada según la aplicación. ♣

♣ Ejemplo 4.4

Sea un sistema en polling multipunto con una maestra M y cuatro esclavas iguales A, B, C y D. Los bloques de interrogación son de 64 octetos y los de respuesta de 1024 octetos. El tiempo total de (alzada + preámbulo + etc.) es de 50 ms y el tiempo de procesamiento de la respuesta es de 100 ms. La distancia máxima es menor que 1000 km. La velocidad de transmisión es de 9600 bps. El polling se efectúa en la forma siguiente:

Se interroga A y se espera la respuesta. Se interroga B y se espera la respuesta. Se vuelve a interrogar A y se espera la respuesta. Se interroga C y se espera la respuesta. Se vuelve a interrogar A y se espera la respuesta. Se interroga D y se espera la respuesta. Este proceso se repite cíclicamente.

Determine los períodos de interrogación de las remotas A, B, C y D.

Solución:

X = 64 octetos; Y = 1024 octetos; t_r = 50 ms; t_{pr} = 100 ms; V_i = 9600 bps.

Se desprecia el tiempo de propagación.

Como las remotas son iguales, el ciclo de interrogación/respuesta individual es el mismo. Sea T_o su duración. De la expresión (A) del Ejemplo 3 anterior,

$$T_o = \frac{8(64+1024)}{9600} + 2x50x10^{-3} + 100x10^{-3} = 1{,}107 \text{ seg}$$

En el diagrama de tiempo, Fig. 4.16, se muestra la forma como se efectúa el polling.

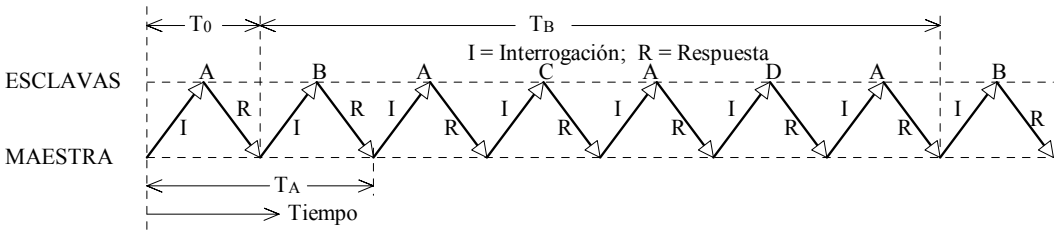


Fig. 4.16. Diagrama de Tiempo de los Enlaces

El período de las remotas B, C y D es el mismo. Entonces, del diagrama de tiempo,

Período de la Estación A: $T_A = 2\ T_o = 2{,}213$ seg

Período de las Estaciones B, C y D: $T_B = T_C = T_D = 6T_o = 6{,}64$ seg. ♣

♣ Ejemplo 4.5

En la memoria de una Esclava hay 20480 bits de información que deben ser transmitidos a una Maestra para efectos de control y supervisión de un proceso. El sistema es asincrónico y utiliza caracteres EBCDIC con un dígito de arranque y uno de pare. La transmisión se efectúa por conductores metálicos con Módems V.22bis.

El intercambio se inicia cuando la Maestra envía 10 caracteres en polling. La Esclava procesa esta información durante 100 ms y responde con un bloque que contiene 264 caracteres de los cuales 256 son caracteres de información neta. La Maestra recibe esta información y responde instantáneamente con un ACK de tres caracteres. Al recibir este ACK la Esclava espera 100 ms para transmitir otro bloque de 264 caracteres. La Maestra contesta con un ACK y así sucesivamente hasta que se agota la memoria. El intercambio termina cuando, agotada la memoria, la esclava responde con un EOT de tres caracteres al ACK recibido desde la Maestra. Determine el tiempo necesario para transmitir todo el contenido de la memoria y la velocidad neta de transmisión.

Solución:

El intercambio se puede caracterizar mediante un diagrama de tiempo como el de la Fig. 4.17. No se muestran los tiempos de overhead (alzada, preámbulo, etc.)

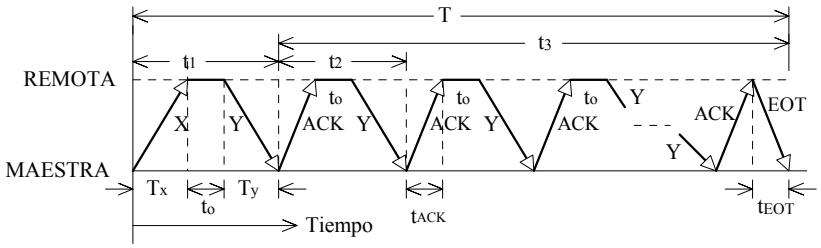


Fig. 4.17. Diagrama de Tiempo del Enlace

Cada carácter contiene 8 dígitos de información (en EBCDIC) y 2 dígitos redundantes para un total de 10 dígitos por carácter

Sea X = 10→ caracteres de interrogación; Y = 264→ caracteres de respuesta

$T_x = 10X/V_i$ duración de X; $T_y = 10Y/V_i$ duración de Y

t_o = tiempo de espera en la Esclava; $t_{ACK} = 10x3/V_i$ duración del ACK

$t_{EOT} = t_{ACK}$

El Módem V.22bis transmite a 2400 bps.

Sea N el número de bloques de respuesta necesarios para transmitir todo el contenido de la memoria que es de C_m = 20480 bits . Entonces, de la Fig. 4.17 podemos ver que

$t_1 = T_x + t_o + T_y$; $t_2 = t_{ACK} + t_o + T_y$; $t_3 = (N-1)t_2 + t_{ACK} + t_{EOT}$

Asimismo, como cada bloque contiene 256 caracteres de información neta y cada carácter 8 bits de información, se tiene que

$C_m = 20480 = 256xNx8$, de donde N = 10 bloques Y

Tiempo Total: $T = t_1 + t_3 = T_x + t_o + T_y + (N-1)(t_{ACK} + t_o + T_y) + t_{ACK} + t_{EOT}$

$T = T_x + N(t_{ACK} + t_o + T_y) + t_{EOT}$

Reemplazando valores numéricos,

T = 12,179 seg

El contenido de la memoria se transmite en 12,179 segundos. La velocidad neta de transmisión de información en el enlace es

$$V_{in} = \frac{C_m}{T} = \frac{20480}{12{,}179} = 1681\,\text{bps}$$

Nótese que la velocidad neta de transmisión es menor que la velocidad de transmisión del módem V.22bis. ♣

♣ **Ejemplo 4.6**

Sea un sistema digital que utiliza el Protocolo BSC.

(a) En la Estación Maestra el bloque de información que viene de la Capa Red consta de 1024 dígitos y en la Capa Enlace se le agrega un Header de 48 dígitos, siendo el BCC de 16 dígitos y la transmisión se efectúa con un Módem UIT-T V.22. ¿ En cuánto tiempo se transmite la trama?

(b) En la práctica hay que tomar en cuenta los tiempos de retardo ya vistos. Si tomamos los mismos valores dados en el Ejemplo 4.4 y que el bloque de respuesta no contiene un Header, determine el ciclo de Interrogación/Respuesta utilizando el mismo Módem V.22 de la parte (a).

(c) La información que viene de la Capa Red proviene de un instrumento de medida. Esta información tiene la forma [RS - XTE - GOT - SOH - HOS - ETX - DLE - CTE] (Cada uno de estos términos representa un carácter ASCII). Asimismo, en la Capa Enlace se le agrega un Header de la forma [QR - RST - NAK - DEL - OT - ETH].

Muestre la trama transmitida con transparencia de datos.

(d) Para la trama de la parte (c), con los mismo valores dados en el Ejemplo 4.4, determine el tiempo de transmisión con o sin transparencia.

Solución:

(a) La trama a nivel de Capa Enlace tiene la forma

[SYN][SYN][SOH][HEADER][STX][TEXTO][ETX][BCC]

donde el Header contiene 48 dígitos y el Texto 1024 dígitos, para un total de 1128 dígitos. Como el sistema es binario, cada dígito contiene un bit de información, y la información total será I = 1128 bits.

También, por definición, $V_i = \frac{I}{T}$ bps .

El Módem V.22 transmite a una velocidad de 1200 bps, de modo que el tiempo de transmisión T de la trama BSC será:

$$T = \frac{I}{V_i} = \frac{1128}{1200} = 0{,}94 \text{ seg} \quad .$$

(b) t_r = 50 ms; t_{pr} = 100 ms; V_i = 1200 bps.

En el Transmisor: [SYN][SYN][SOH][HEADER][STX][TEXTO][ETX][BCC]

En el Receptor: [SYN][SYN][STX][TEXTO][ETX][BCC]

Entonces, X = 141 octetos; Y = 134 octetos. De la expresión (A) del Ejemplo 4.3,

$$T = \frac{8(141+134)}{1200} + 2x50x10^{-3} + 100x10^{-3} = 2{,}03 \text{ seg}$$

Nótese que este valor es más del doble que el obtenido en la parte (a), aún cuando el bloque de respuesta es más pequeño. En la práctica industrial hay que tener en cuenta todos estos aspectos pues se pueden producir retardos inadmisibles y la velocidad neta de transmisión puede ser excesivamente pequeña.

(c) Recordemos el algoritmo para el MODO TRANSPARENTE BSC:

1. Se inserta un carácter DLE delante de cada carácter de control válido (excepto SYN) presente en la Trama BSC.
2. Si un carácter DLE aparece dentro del Header o dentro del Texto, se inserta delante de él otro DLE, quedando en la forma DLE DLE.

Nota: los caracteres DLE insertados se mostrarán en **negrita**.

Texto original: [RS – XTE – GOT – DLE – SOH – HOS - ETX – DLE - CTE]

Texto Transparente: [RS – XTE – GOT – **DLE** - DLE – **DLE** - SOH – HOS – **DLE** - ETX – **DLE** –DLE - CTE]

Header Original: [QR – RST – NAK – DLE – OT – ETH]

Header Transparente: [QR – RST – **DLE** - NAK – **DLE** - DLE – OT – ETH]

La Trama BSC Transparente transmitida tendrá la forma:

[SYN][SYN][**DLE**][SOH][HEADER TRANSP.][**DLE**][STX][TEXTO TRANSP.][**DLE**][ETX][BCC]

(d) La trama BSC original contiene 22 octetos (176 dígitos) y su tiempo de transmisión será

$$T = \frac{8x22}{1200} + 2x50x10^{-3} + 100x10^{-3} = 1{,}467x1`0^{-3}\ s = 1{,}467 \text{ milisegundos}$$

A la Trama BSC se le han agregado nueve octetos (caracteres DLE) para efectos de transparencia. La Trama BSC Transparente contendrá ahora 31 octetos (248 dígitos) y su tiempo de transmisión será

$$T' = \frac{8x31}{1200} + 2x50x10^{-3} + 100x10^{-3} = 2{,}067 \text{ milisegundos}$$

Nótese cómo ha aumentado el tiempo de transmisión. Esta es una de las desventajas del Protocolo BSC, sobre todo cuando la transmisión es a larga distancia. ♣

4.2.3. Protocolos XMODEM y YMODEM

Una aplicación muy corriente en el intercambio de información entre computadoras es el de la transferencia de archivos, habiéndose desarrollado toda una serie de protocolos para este solo objetivo.

Durante la transferencia de un archivo suele ocurrir errores los cuales son detectados y corregidos (mediante retransmisión de los bloques en error) automáticamente por los "Protocolos de Transferencia de Archivos (File Transfer Protocol, FTP)". Los FTP proveen detección y corrección de errores solamente durante la transferencia de archivos, a diferencia de los protocolos de control de error, por ejemplo el V.42, que actúan todo el tiempo. Algunos FTP han sido desarrollados para transferir archivos sin efectuar corrección de errores, con lo cual se elimina la redundancia aumentándose la velocidad de transferencia. En la práctica se encuentra varios FTP, pero aquí presentaremos solamente dos de los más utilizados.

Protocolo XMODEM

El protocolo XMODEM es un protocolo de transferencia de archivos (FTP), desarrollado en 1977, que ha sido instrumentado en muchos de los programas de transferencia de archivos en los sistemas BBS (Bulletin Board Service). En la Fig. 4.18 se muestra la forma básica de la Capa Enlace del Protocolo XMODEM.

Octetos ==>	1	1	1	128/1024	2
	SOH	NUMERO DE BLOQUE	COMPLEMENTO	INFORMACION	BCC

Fig. 4.18. Formato del Protocolo XMODEM.

La función de cada uno de los campos de este formato es la siguiente:

SOH. Es un carácter de control ASCII que indica el comienzo de la trama.

NUMERO DE BLOQUE. En este campo va el número, en modulo 256, del bloque que se está transmitiendo; va desde el 1 hasta el 255.

COMPLEMENTO. En este campo va el "Complemento a Uno" del número de bloque del campo anterior. Este valor se obtiene restando de 255 el número de bloque. Su objetivo es la detección de errores en los campos NUMERO DE BLOQUE y COMPLEMENTO. La suma Número de Bloque+Complemento=255.

INFORMACION. La información que hay que transmitir va en este campo. En el protocolo original contenía 128 octetos, pero en la nueva versión, denominada XMODEM-K, tiene 1024 octetos.

BCC. Para verificación de error se efectúa una determinada operación en el campo INFORMACION. El resultado de esta operación se coloca en el BCC. En la primera versión de este protocolo se efectuaba una suma de verificación que consiste en sumar el valor de los caracteres contenidos en el campo INFORMACION y dividir la suma por 255. El cociente de la suma se descarta, pero el resto de la división es el que se transmite en el campo BCC. En las nuevas versiones del protocolo para el cálculo del BCC se utiliza los códigos CRC, que estudiaremos en detalle en el Capítulo VII.

Una vez establecido el enlace, el receptor transmite un NAK para indicarle al transmisor que está listo para recibir bloques de datos. Los bloques recibidos se reconocen con ACK o NAK, según el caso.

En el protocolo XMODEM el receptor dispone de tres maneras para detectar un error. Si el error está en el carácter SOH, él será detectado de inmediato y se confirmará con NAK. Si el error está en el campo NUMERO DE BLOQUE o en el campo COMPLEMENTO, ellos no serán mutuamente complementarios y la condición de error se reconocerá con un NAK. Por último, si el error está en el campo INFORMACION, el BCC calculado y el BCC transmitido serán diferentes indicando que hay un error; esta condición conlleva un NAK.

Para finalizar un intercambio, el transmisor envía un carácter EOT indicando el fin del intercambio; el receptor lo reconoce con un ACK y el intercambio termina.

El protocolo XMODEM es de dominio público de modo que se puede desarrollar e instrumentar libremente en programas de comunicación (software).

Protocolo YMODEM

El protocolo YMODEM se desarrolló como una extensión del protocolo XMODEM para incorporar algunas carácterísticas adicionales a fin de mejorar su comportamiento. El formato del Protocolo YMODEM es idéntico al del XMODEM, Fig. 4.18, con la diferencia de que en vez de un carácter de arranque SOH utiliza el carácter STX. Además, el campo INFORMACION contiene 1024 octetos y el BCC se calcula con los códigos CRC.

Una vez establecido el enlace, el receptor transmite el carácter C (43H) para sincronizar el inicio y también para indicar que la verificación de error se va a efectuar utilizándose el código CRC. El transmisor envía un primer bloque que contiene en el campo INFORMACION el nombre del archivo, la longitud del mismo y la fecha de creación, y completa el resto del campo con CEROS. En esta etapa, el transmisor puede colocar al principio de la trama el carácter SOH para indicar que el campo INFORMACION contiene 128 octetos. Los bloques siguientes se inician con el carácter STX indicando que en el campo INFORMACION van 1024 octetos. La estación transmisora indica la terminación del intercambio con una trama de la forma **[SOH][00H][FFH][128 CEROS][BCC]** para indicar que no hay más archivos para transmitir; el receptor lo reconoce con un ACK y el intercambio finaliza.

En la práctica se consigue otros protocolos de transferencia de archivos, tales como el XMODEM-G, el YMODEM-G BATCH, el ZMODEM, el KERMIT, etc. Para más información sobre estos protocolos, ver, por ejemplo, [Held, 1994].

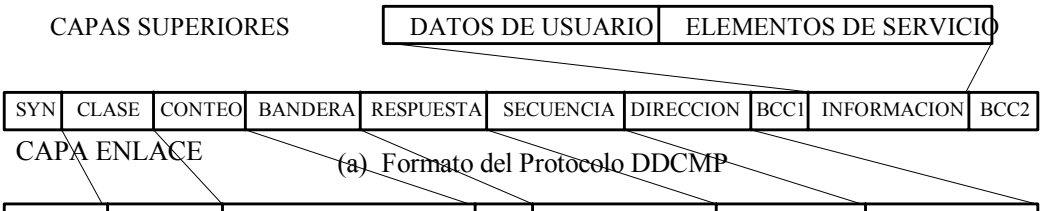
4.2.4. Protocolos de Control por Conteo de Octetos

Protocolo DDCMP

La principal desventaja del protocolo BSC es la complicación que se produce como resultado de los procedimientos especiales utilizados para asegurar la transparencia. Este problema se ha resuelto en el Protocolo DDCMP (Digital Data Communication Message Protocol) desarrollado por la DEC (Digital Equipment Corporation), en el cual mediante el conteo de los caracteres u octetos contenidos en el campo INFORMACION se ha eliminado la utilización de DLE y de otros caracteres de control.

El Protocolo DDCMP es un protocolo general y puede utilizarse en sistemas HDX y FDX, serie o paralelo, asincrónicos y sincrónicos, punto a punto y multipunto.

Este protocolo, cuyo formato se muestra en la Fig. 4.19(a), utiliza un Encabezado o "header" que contiene los campos CLASE, CONTEO, BANDERA, RESPUESTA, SECUENCIA, DIRECCION y BCC1. Este Encabezado no es opcional como en el caso del protocolo BSC y más bien es la parte más importante de la trama, pues contiene información acerca del número de octetos de información así como las cantidades de octetos transmitidos y recibidos, que son las dos características más importantes del protocolo DDCMP; tanto es así que tiene su propio campo, el BCC1, para la verificación de error. La información o texto propiamente va en el campo INFORMACION y puede contener hasta 16363 octetos; el campo BCC2 sirve para la verificación de error en el campo INFORMACION. Este tipo de verificación de error utiliza los códigos CRC.



(a) Formato del Protocolo DDCMP

DATOS	10000001	# DE CARACTERES DE INFORMACION	QS	RESPUESTA #	MENSAJE #	DIRECCION
ACK	00000101	00000001000000	QS	RESPUESTA #	00000000	DIRECCION
NAK	00000101	00000001xxxxxx	QS	RESPUESTA #	00000000	DIRECCION
STRT	00000101	00000110000000	QS	00000000	00000000	DIRECCION
STACK	00000101	00000111000000	QS	00000000	00000000	DIRECCION
REP	00000101	00000011000000	QS	00000000	ULTIMO #	DIRECCION
MANT	10010000	# DE CARACT. DE INF.	11	00000000	00000000	DIRECCION

(b) Tipos de Mensaje Información, Control y Supervisión

Fig. 4.19. Formato y Mensajes del Protocolo DDCMP.

Los campos de la trama DDCMP tienen la siguiente significación:

SYN. Se transmite varios caracteres SYN (por lo menos dos) para efectos de sincronización, como en BSC.

CLASE. Indica la clase de mensaje: Datos, Control (ACK, NAK, …, STACK) y Mantenimiento.

La trama de la CLASE DATOS es la única que lleva los campos INFORMACION + BCC2.

En la trama NAK los seis dígitos xxxxxx indican la causa por la cual se pide la repetición de una trama. Entre otras tenemos, por ejemplo,

0 0 0 0 0 1 indica “error en el Encabezado”
0 0 0 0 1 0 indica “error en el campo INFORMACION”
0 0 1 0 0 0 indica “buffer no disponible”
0 0 1 0 0 1 indica “receptor desbordado (overrun)”
0 1 0 0 0 1 indica “mensaje demasiado largo”

La trama REP es una trama de supervisión que se utiliza, después de un “time-out”, para pedir una respuesta a la trama cuyo número se envía en el campo SECUENCIA. Si la trama en cuestión ha sido recibida correctamente, la respuesta es un ACK; de lo contrario es un NAK. En ambos casos en el campo RESPUESTA se colocará el número de la trama solicitada.

La trama MANTENIMIENTO se utiliza para propósitos de diagnóstico.

CONTEO. Indica la cantidad de octetos, hasta 16383, contenidos en el campo INFORMACION cuando la trama es de Datos. Contendrá otros mensajes cuando la trama es de Control o de Mantenimiento, como puede observarse en la Fig. 4.19(b).

BANDERA. Indica la presencia de dos dígitos especiales denominados banderas: la bandera Q ("quick sync flag bit") que se utiliza para facilitar la sincronización en el receptor cuando hay un pequeño intervalo de tiempo antes de enviarse la trama siguiente, y la bandera S ("select bit") que se utiliza para controlar la transmisión en enlaces HDX y multipunto. El efecto de la bandera S es similar al de EOT en BSC.

RESPUESTA. En este campo se transmite el número, en módulo 256, del último mensaje recibido correctamente. Este es el "Número de Respuesta N(R)" y va desde 1 hasta 255; el valor 0 no se utiliza. El número N(R) solamente se transmite en las tramas de DATOS, ACK y NAK.

SECUENCIA. En este campo se transmite el número, en módulo 256, del mensaje que se está enviando. Este es el "Numero del Mensaje en Transmisión N(S)" y va desde 1 hasta 255; el valor 0 no se utiliza. El número N(S) solamente se transmite en las tramas de DATOS y REP.

DIRECCION. Es la dirección de una estación receptora en sistemas multipunto y puede direccionar hasta 255 estaciones secundarias. En el intercambio entre la Estación Primaria y una Estación Secundaria, todas las tramas llevarán la dirección de la estación secundaria. En transmisión punto a punto en el campo DIRECCION se coloca la dirección "1".

BCC1. El campo BCC1 contiene dos octetos para la verificación de error en el Encabezado. El cálculo del BCC1 se efectúa desde CLASE hasta DIRECCION mediante el código CRC-16, que veremos en el Capítulo VII.

INFORMACION. En este campo va la información del usuario que viene de las capas superiores; puede contener hasta 16383 octetos. Este campo con su BCC2 se utiliza solamente en las tramas de la CLASE Datos.

BCC2. Este campo contiene dos octetos para la verificación de error en el campo INFORMACION. Utiliza el código CRC-16.

En el protocolo DDCMP las estaciones que están intercambiando información numeran los mensajes en forma secuencial comenzando con el mensaje 1 hasta el 255. Esta numeración se aplica en cada sentido en forma independiente. Por ejemplo, la estación A puede estar enviando los mensajes 6, 7 y 8 a la estación B, mientras que la estación B está enviando los mensajes 5, 6 y 7 a la estación A.

Cuando una estación transmite un mensaje N(S) a otra estación, ella coloca el número $[N(S)+1]$ en el campo SECUENCIA. Además de registrar en un contador los mensajes que envía, la estación registra en otro contador los mensajes

recibidos correctamente en la forma [N(R) + 1] y los transmite en el campo RESPUESTA; N(R) es el número del último mensaje recibido correctamente.

Cuando una estación detecta un error, ella envía una trama NAK. El protocolo DDCMP no requiere un reconocimiento para cada mensaje puesto que el número contenido en el campo RESPUESTA especifica el número de secuencia del último mensaje correcto recibido. Por ejemplo, si se ha recibido los mensajes 4, 5, 6 y el mensaje 6 llega en error, se responde con una trama NAK donde se especifica en el campo RESPUESTA el número 6 que indica que los mensajes hasta el 5 han sido recibidos correctamente pero que el mensaje 6 está en error. En el campo CLASE de la trama NAK se especifica el tipo de error.

Cuando una estación recibe un mensaje fuera de secuencia, ella no responde a ese mensaje. La estación transmisora detecta esto en el campo RESPUESTA que recibe y espera un tiempo dado (Time-out) a partir del cual envía un mensaje REP el cual contiene el número del último mensaje enviado. La estación receptora contesta con ACK o NAK según el caso, indicando el último mensaje recibido correctamente. La estación transmisora retransmite los mensajes siguientes al especificado en la trama.

En general, el protocolo DDCMP es un buen protocolo de Capa Enlace pero no ha sido muy utilizado, fuera de la DEC, porque los protocolos de control por dígitos, que veremos a continuación, son mucho más eficientes. En particular, el Protocolo HDLC ya ha sido normalizado por el UIT-T y la ANSI (American National Standards Institute) y es de aplicación internacional.

Resumen de las Características del Protocolo DDCMP

Características

- Control por Conteo de Octetos
- Transmisión HDX/FDX Sincrónica
- Formato del Carácter: ASCII Sincrónico
- Velocidades: 300 a 100 kbps
- Interfaces: RS-232C, RS-449, V.35

4.2.5. Protocolos de Control por Dígitos

Los protocolos de control a nivel de enlace más utilizados en la transmisión de datos son los Protocolos de Control por Dígitos (Bit-Oriented Protocols). En estos protocolos la información se puede transmitir en secuencias de dígitos de cualquiera longitud sin necesidad de dividirla en caracteres, pues el control se hace dígito a dígito. Sin embargo, consideraciones de tipo instrumental y tecnológico requieren que la longitud de una secuencia de dígitos sea un múltiplo entero de un carácter, generalmente un octeto.

Entre las ventajas de estos protocolos, tenemos:

- Pueden trabajar en HDX y FDX en modo sincrónico.

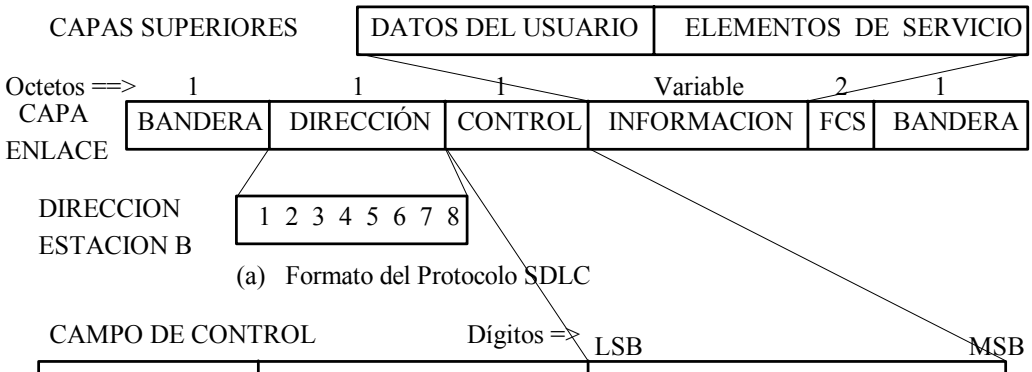
- Son más eficientes pues en el Encabezado solamente se tiene los campos DIRECCION y CONTROL, normalmente de un octeto cada uno.
- En el campo INFORMACION se puede emplear cualquier código, incluso códigos cifrados.
- No se necesita reconocimientos (positivos o negativos) para cada trama transmitida; solamente después de haber transmitido un cierto número de tramas (típicamente 7) es que se retransmite un ACK y el proceso se repite.
- El control de flujo es más sencillo.
- La integridad de los datos se verifica mediante una verificación de los bloques recibidos mediante un BCC, y mientras no se detecte un error la transmisión continúa. En caso de detectarse errores en la trama, simplemente se pide la retransmisión de la trama en error. En los protocolos de control por dígitos en vez de las siglas BCC se utilizan las siglas FCS (Frame Check Secuence) o "Secuencia de Verificación de Trama", que utilizaremos de aquí en adelante.

Hay varias clases de protocolos de control por dígitos, pero aquí vamos a describir solamente dos protocolos, el Protocolo SDLC (Synchonous Data Link Control Protocol) y el protocolo HDLC (High-Level Data Link Control Protocol). Estos protocolos proporcionan una base excelente para el estudio de otros protocolos tales como el ANSI ADCCP, el UIT-T LAP/LAPB, el ISDN LAPD, el UNISYS DLC y los protocolos IEEE 802 para el control de redes de área local.

Protocolo SDLC

El protocolo SDLC fue desarrollado por la IBM en 1974 específicamente para sistemas multipunto con una Estación Principal y múltiples Estaciones Secundarias. El Protocolo SDLC es un protocolo sincrónico, FDX, para operación punto a punto y multipunto. Este protocolo opera en el Modo de Respuesta Normal (Normal Response Mode, NRM) en el cual todas las Estaciones Secundarias están subordinadas a la Estación Principal (Sistema Maestra-Esclava) y no efectúan ninguna operación que no sea solicitada por la Maestra. . Este protocolo es muy utilizado por la IBM en muchos de sus sistemas.

En la Fig. 4.20 se muestra el formato y los diferentes tipos de mensaje de este protocolo. Este formato es, con algunas diferencias, el mismo que el del protocolo HDLC; de hecho, el protocolo HDLC es una versión avanzada del protocolo SDLC y normalizada por la ISO y el UIT-T. Como el formato SDLC y HDLC tienen la misma forma y aplicación, vamos a describir ahora el SDLC, y después veremos las diferencias de uno respecto al otro.



(a) Formato del Protocolo SDLC

CAMPO DE CONTROL — Dígitos => LSB … MSB

FORMATO	COMANDO/RESPUESTA P/F	1	2	3	4	5	6	7	8
DATOS I	----------	0	N(S)			P/F	N(R)		
SUPERVISION	RR	1	0	0	0	P/F	N(R)		
	RNR	1	0	1	0	P/F	N(R)		
	REJ	1	0	0	1	P/F	N(R)		
SIN NUMERACION (Unnumbered)	UI	1	1	0	0	P/F	0	0	0
	SNRM	1	1	0	0	P	0	0	1
	DISC	1	1	0	0	P	0	1	0
	UA	1	1	0	0	F	1	1	0
	TEST	1	1	0	0	P/F	1	1	1
	SIM	1	1	1	0	P	0	0	0
	RIM	1	1	1	0	F	0	0	0
	FRMR	1	1	1	0	F	0	1	0
	RD	1	1	1	0	F	0	1	0
	DM	1	1	1	1	F	0	0	0
	XID	1	1	1	1	P/F	1	0	1

(b) Tipos de Mensaje en el Protocolo SDLC

Fig. 4.20. Formato y Mensajes del Protocolo SDLC.

El formato SDLC, Fig. 4.20(a), contiene los campos BANDERA, DIRECCION, CONTROL, INFORMACION, FCS y BANDERA.

BANDERA

Tanto al principio como al final de la trama se tiene las banderas, que son octetos especiales de la forma 0 1 1 1 1 1 1 0 (7EH); la segunda bandera indica también el comienzo de la siguiente trama. Para proteger la bandera y asegurar la transparencia en la transmisión, en el transmisor se inserta un CERO cada vez que aparezca una secuencia de cinco UNOS seguidos a fin de impedir que una secuencia de la forma 7EH pueda confundirse con una bandera. Esta técnica se conoce con el nombre de

"inserción de CEROS"; en el receptor se eliminará siempre aquel CERO que esté precedido por cinco UNOS asegurándose así la transparencia y la integridad de la información.

DIRECCION

En este campo va siempre la dirección de la Estación Secundaria, pues el intercambio es siempre entre la Maestra y una Esclava. En efecto, cuando la Maestra transmite ella pone la dirección de la Esclava en el Campo DIRECCION y cuando la Esclava transmite ella pone allí su propia dirección. La Maestra puede direccionar hasta 255 Esclavas.

CONTROL

Este es el campo más importante del protocolo SDLC. En este campo, Fig. 4.20(b), se define tres tipos de mensaje o trama: DATOS I, SUPERVISION S y SIN NUMERACION U (Unnumbered), que vamos a describir brevemente.

DATOS I. Se utiliza para la transferencia de información y, junto con la trama FRMR, son los únicos que llevan el campo INFORMACION. Se carácteriza porque el primer dígito en el campo de control es un 0; se tiene también los números de secuencia de envío N(S) y de recepción N(R), de tres dígitos cada una, con los cuales se puede contar hasta siete mensajes consecutivos. El número en el campo N(R) indica el número de la próxima trama esperada; por ejemplo, si se recibe correctamente el mensaje 3, en el campo N(R) se colocará el número 4 que es el número de la próxima trama esperada. El dígito P/F se denomina Dígito Poll/Final; cuando se utiliza como Poll (un comando), la Maestra lo pone a UNO para solicitar una respuesta desde una Esclava. La Esclava responde a la solicitud y al finalizar la trama pedida o la última trama de una serie pone el dígito, ahora denominado Final (una respuesta), a UNO. La Estación Primaria no puede volver a colocar el dígito P igual a UNO hasta que no haya recibido el dígito Final igual a UNO. Asimismo, la Estación Secundaria no puede poner el dígito F igual a 1 hasta no haber recibido un comando con el dígito Poll igual a UNO. Los dígitos P y F siempre van aparejados.

SUPERVISION S. Las tramas de SUPERVISON S se identifican cuando los dos primeros dígitos del campo de control son 1 0. En esta trama se tiene, sea una respuesta (con la cual se confirma, por ejemplo, la recepción correcta de una trama I), o un comando (a fin de, por ejemplo, pedir la retransmisión de tramas I). En esta trama se indica también el número N(R). Los diferentes tipos de trama de SUPERVISION S son, Fig. 4.20(b),

RR(Receive Ready). Un comando/respuesta RR puede ser enviado por una estación primaria o por una secundaria para indicar que todas las secuencias o tramas hasta el valor [N(R) -1] han sido recibidas correctamente y que está lista para recibir más tramas.

RNR (Receive not Ready). Un comando/respuesta RNR puede ser enviado también por una estación primaria o secundaria indicando que ha recibido

mensajes correctos hasta el valor [N(R)-1], pero debido a una condición de "ocupado temporalmente" no puede recibir más tramas que requieran almacenamiento.

REJ (Reject). REJ es un comando/respuesta que se utiliza para pedir retransmisión de una trama en error cuyo número es N(R). El comando o respuesta REJ reconoce la llegada de tramas correctas hasta el valor [N(R)-1] y solicita las tramas de valor N(R) y siguientes.

SIN NUMERACION U. Estas tramas se identifican cuando los dos primeros dígitos del campo de control son 11. Las tramas U controlan la transferencia de información y proveen una variedad de funciones de gestión, inicialización, cambio de modos de operación, etc. Como su nombre lo indica, no llevan información sobre los números de secuencia N(R) y N(S). Al protocolo SDLC se le ha agregado nuevas funciones para las tramas U de ` comando/respuesta, pero las más utilizadas son, Fig. 4.20(b):

UI (Unnumbered Information). Esta trama indica que la información que sigue en el campo de información de longitud variable está siendo enviada separadamente de cualquier mensaje en secuencia actualmente en progreso.

SNRM (Set Normal Response Mode). Este comando subordina la estación secundaria receptora a la estación primaria transmisora y la estación secundaria no comenzará ninguna transmisión a menos que le sea pedida por la estación primaria; este es Modo de Respuesta Normal (NRM) propio del protocolo SDLC y es una configuración Maestra-Esclava. Los contadores N(R) y N(S) se inicializan a cero tanto en la estación primaria como en las secundarias. La estación secundaria permanece en este modo hasta que reciba un comando DISC o SIM. La respuesta esperada del comando SNRM es UA.

DISC (Disconnect). Este comando coloca a la estación secundaria fuera de línea (Off-Line). Esa estación no puede recibir ni transmitir tramas de información y permanece desconectada hasta que recibe un SNRM o un SIM. La respuesta esperada del comando DISC es UA.

UA (Unnumbered Acknowledgement). Esta es la respuesta afirmativa a los comandos SNRM, DISC o SIM. Se utiliza también para reconocer tramas de información no numeradas.

TEST. Es un comando que puede enviarse en cualquier modo para solicitar una respuesta de TEST. Si un campo de información está incluido con el comando, la estación secundaria lo regresa en la respuesta.

SIM (Set Initialization Mode). Este comando inicia los procedimientos específicos del sistema en la estación secundaria receptora a fin de comenzar el proceso de intercambio. Los contadores N(R) y N(S) se inicializan a cero tanto en la estación primaria como en las secundarias. La respuesta esperada del comando SIM es UA.

RIM (Request Initialization Mode). Esta trama es transmitida por una estación secundaria cuando desea que la estación primaria envíe un comando SIM . Si la estación primaria envía una trama diferente de SIM, la estación secundaria repite los RIM hasta que la estación primaria envía un SIM.

FRMR (Frame Reject). Esta es la respuesta transmitida por una estación secundaria en "modo de respuesta normal (NRM)" cuando recibe un comando no válido. Una trama con un FRMR en el campo de control contendrá un campo de Información de tres octetos en formato fijo en los cuales el primero contiene el campo de control de la trama rechazada, el segundo informa los números V(S) y V(R) actuales y un dígito C/R; y el tercero contiene cuatro dígitos W, X, Y y Z que cuando están a UNO indican, respectivamente: (a) la trama rechazada es un comando inválido, (b) la trama rechazada contiene un campo de información no autorizado, o una trama S o U de longitud incorrecta, (c) un campo de información que era tan largo que produjo un desbordamiento del "buffer", y (d) que el N(R) recibido desde la estación primaria no tiene sentido porque no está de acuerdo con los N(S) transmitidos. Una vez que la estación secundaria ha enviado una trama FRMR, ella continuará respondiendo con FRMR hasta que la estación primaria reinicialice el enlace, es decir, que transmita una trama SNRM, pues se supone que las continuas retransmisiones no resuelven el problema y la única solución es recomenzar el intercambio. El campo de información de la trama FRMR tiene el formato siguiente:

Dígitos →

1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4	5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8
Campo de Control de la Trama Rechazada	0 V(S)	C/R V(R)	W X Y Z 0 0 0 0

C/R = 0 = La trama rechazada era un Comando
C/R = 1 = La trama rechazada era una Respuesta

RD (Request for Disconnection). Es una respuesta enviada por una estación secundaria cuando desea colocarse en modo desconectado.

DM (Disconnection Mode) Esta es una trama de aviso transmitida por una estación secundaria para indicar que está desconectada.

XID (Exchange Identification). Cuando es un comando (P = 1) la estación primaria solicita la identificación de una estación secundaria. La estación secundaria transmite su código de identificación con el dígito F = 1.

INFORMACION

En este campo se localiza el texto o información que viene de las capas superiores y que se va a transmitir desde el ETD fuente hasta el ETD destino. En el campo INFORMACION se puede utilizar cualquier tipo de codificación y generalmente se utiliza un código que establece 8 dígitos por carácter; por lo tanto, el campo de información tendrá una longitud de **n** x **8** dígitos (64, 128,…., 1024 octetos, etc.). El campo INFORMACION no está restringido ni en formato ni en contenido, y puede ser de cualquiera longitud razonable. La longitud máxima es aquella que produce la

mínima cantidad de dígitos en error la mayor parte del tiempo, y es, por lo tanto, una función de la tasa de error (Bit Error Rate, BER) del canal.

FCS

Este campo se utiliza para la detección de error. La verificación cíclica se efectúa sobre los campos DIRECCION, CONTROL e INFORMACION. De acuerdo con el Código CRC, se calcula un valor determinado el cual se coloca en el FCS. En el extremo receptor se repite la misma operación y si el resultado de esta operación está de acuerdo con el FCS recibido, se considera que la trama está correcta; si no, se pide repetición de la trama en error. El Código CRC es el CRC-UIT-T especificado en la Recomendación UIT-T V.41, que veremos en el Capítulo VII.

El protocolo SDLC es uno de los protocolos sincrónicos más antiguos aunque no obsoleto, pues la IBM lo utiliza todavía en muchos de sus sistemas y su simplicidad lo hace ideal para iniciarse en el estudio de los protocolos de control por dígitos. Una forma avanzada del protocolo SDLC es el protocolo HDLC que describiremos de inmediato.

Protocolo HDLC

El protocolo SDLC se había convertido en un "protocolo de facto" por la cantidad de aplicaciones en donde se utilizaba, y cuando la IBM lo presentó a la ISO fue aceptado y con muchas modificaciones que mejoraron sus prestaciones, se publicó en 1976 con el nombre de Protocolo HDLC (High-Level Data Link Control Protocol), ISO 3309-76(E).

En la Fig. 4.21 se muestra el formato y algunos de los mensajes del Protocolo HDLC. Vamos a describir las diferencias en relación con el Protocolo SDLC.

Los mensajes definidos en el campo CONTROL, Fig. 4.21(c) son un subconjunto de los mensajes del protocolo HDLC. Más adelante describiremos otro subconjunto del protocolo HDLC, denominado LAPB, utilizado en la transmisión por paquetes (Recomendación UIT-T X.25).

Los campos BANDERA, INFORMACION y FCS tienen el mismo significado que en el protocolo SDLC. Sin embargo, en el campo INFORMACION se puede permitir caracteres de cualquiera longitud, pero por razones de instrumentación y compatibilidad generalmente los caracteres tienen ocho dígitos, es decir, son octetos.

En el campo DIRECCION el protocolo HDLC, además de la dirección específica (un octeto), tiene también la opción de "dirección extendida". En este caso el campo DIRECCION tendrá **n** octetos; el primer dígito del primer octeto del campo extendido es un UNO, mientras que los octetos siguientes comienzan con un CERO, excepto el último que comienza con un UNO. Una estación primaria puede controlar entonces hasta 127^n estaciones secundarias.

En la Trama de SUPERVISION S aparece un nuevo comando/respuesta denominado SREJ (Selective Reject) o Rechazo Selectivo. Con SREJ se puede solicitar la transmisión de una sola trama identificada en N(R), a diferencia de REJ que solicita la retransmisión de las tramas comenzando con la N(R). Con SREJ se puede pedir también la retransmisión de varias tramas pero una a la vez.

(a) FORMATO GENERAL
CAPAS SUPERIORES

DATOS DEL USUARIO	ELEMENTOS DE SERVICIO

Octetos→	1	1	1	Variable	2	1
CAPA ENLACE	BANDERA	DIRECCION	CONTROL	INFORMACION	FCS	BANDERA

(b) CAMPO DE DIRECCIONES

	1 2 3 4 5 6 7 8	LSB EXTENDIDA MSB 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
Específica	x x x x x x x x	1 x x x x x x x 0 x x x x x x x
De Grupo	1 1 1 1 x x x x	1 x x x x x x x x 1 1 1 1 1 1 1
Global	1 1 1 1 1 1 1 1	→ La Estación Primaria envía simultáneamente comandos o datos a todas las Estaciones Secundarias en el sistema

(c) CAMPO DE CONTROL

FORMATO	COMANDO/RESPUESTA P/F	LSB 1	2	3	4	5	6	7	MSB 8
DATOS I	----------	0	N(S)			P/F	N(R)		
SUPERVISION S	RR	1	0	0	0	P/F	N(R)		
	RNR	1	0	1	0	P/F	N(R)		
	REJ	1	0	0	1	P/F	N(R)		
	SREJ	1	0	1	1	P/F	N(R)		
SIN NUMERACION U (Unnumbered)	UI	1	1	0	0	P/F	0	0	0
	SNMR	1	1	0	0	P	0	0	1
	DISC	1	1	0	0	P	0	1	0
	RD	1	1	0	0	F	0	1	0
	UP	1	1	0	0	P	1	0	0
	NC	1	1	0	0	F	1	0	0
	UA	1	1	0	0	F	1	1	0
	TEST	1	1	0	0	P	1	1	1
	SIM	1	1	1	0	P	0	0	0
	RIM	1	1	1	1	F	0	0	0
	SARM	1	1	1	1	P	0	0	0
	DM	1	1	1	1	F	0	0	0
	XID	1	1	1	1	P/F	1	0	1

Fig. 4.21. Formato y Mensajes del Protocolo HDLC.
En algunas versiones del Protocolo HDLC la trama de Capa Enlace va precedida por un Preámbulo de 7 octetos, por ejemplo, en ETHERNET

Modos de Operación en HDLC

En el protocolo HDLC hay tres modos de operación: el Modo de Respuesta Normal (Normal Response Mode, NRM), el Modo de Respuesta Asincrónica (Asynchronous Response Mode, ARM) y el Modo Asincrónico Balanceado (Asynchronous Balanced Mode, ABM).

El modo NRM es el modo mejor adaptado en aplicaciones multipunto con una estación primaria y varias secundarias. En el modo NRM una estación secundaria puede transmitir solamente cuando recibe autorización (poll o select) de la estación primaria. La estación secundaria puede transmitir entonces una secuencia de tramas en una respuesta, pero una vez que ha puesto el dígito F igual a UNO en la última trama, no puede transmitir hasta que no reciba una nueva autorización. Este es el mismo modo NRM del protocolo SDLC.

En el modo ARM se permite a las estaciones secundarias enviar respuestas no solicitadas. Para transmitir una respuesta, una estación secundaria no necesita haber recibido un comando con el dígito P = 1. Sin embargo, si una secundaria recibe un comando con $P = 1$, debe responder con una trama con el dígito F = 1 lo más pronto posible.

El modo ABM es el modo de operación entre dos estaciones de igual rango en enlaces punto a punto. Cualquiera de las dos estaciones puede iniciar un intercambio sin esperar una autorización (En general, este modo de operación se conoce con el nombre de Comunicación Par a Par). En HDLC, los dígitos P y F deben estar aparejados; en efecto, cuando una estación inicia una transmisión ella actúa como primaria poniendo el dígito $P = 1$, y la otra estación actúa como secundaria respondiendo con el dígito F = 1. La única excepción a esta regla es en el caso de error en una trama. Esto permite a una estación primaria, en condiciones cuidadosamente establecidas, enviar otro dígito P = 1 después de un tiempo cumplido (time-out). Por otro lado, examinando el campo DIRECCION, se puede determinar si una estación está actuando como primaria o como secundaria, pues la dirección será siempre la de la estación que actúa como secundaria. Este modo de operación no está descrito en la Fig. 4.21(c), pero lo veremos con más detalle más adelante.

Cuando se inicia un intercambio, la estación primaria es la que determina el modo de operación (NRM, ARM o ABM) con los comandos SNRM, SARM y SABM, y si se tiene la opción "dirección extendida" los comandos respectivos son SNRME, SARME y SABME.

Control de Flujo y Recuperación de Errores

El control de flujo se verifica mediante la observación de los Números de Secuencia N(S) y N(R). En cada estación hay dos contadores, uno de los cuales determina el número de la trama I transmitida; se obtiene así el Numero de Secuencia de Envío N(S). El otro es el contador de las secuencias recibidas; este contador cuenta las tramas recibidas sin error de acuerdo con el algoritmo CRC-16 estableciendo así el Número de Secuencia de Recepción N(R). Por ejemplo, si la trama I transmitida tiene un N(S) = 4, y si la trama recibida no contiene errores, entonces en la estación receptora se hace N(R) = N(S) + 1 = 5.

Este es el número N(S) de la próxima trama a recibir. Nótese que la primera trama transmitida se numera N(S) = 0.

Los números N(S) y N(R) toman valores en módulo 7, es decir, 0, 1,2, ….6, 0, 1, 2, etc., de manera que se pueda transmitir 7 tramas sucesivamente, hasta recibir un reconocimiento en forma de una trama S desde la estación receptora. La trama S contiene el comando RR de manera que al recibirlo, la estación transmisora envía otra serie de 7 tramas y así sucesivamente. Las tramas transmitidas quedan almacenadas en el transmisor hasta que se recibe el comando RR, pero si hay una trama en error, esa trama y las siguientes deberán ser retransmitidas cuando se recibe un comando REJECT .

Veamos ahora cómo se efectúa la recuperación de errores en las tramas. Supongamos que la trama N(S) = 4 llegó con errores, es decir, al calcularse su FCS no concuerda con el FCS transmitido, de modo que se detecta una condición de error. Después que se ha recibido las tramas 0 a 3, el número de secuencia recibida pasará a ser N(R) = 4. Pero como la trama con N(S) = 4 contiene errores, el contador de recepción no puede avanzar. Después que se ha transmitido la trama siguiente, se recibirá un N(S) = 5, pero la estación receptora no estará de acuerdo pues el número N(R) permanece todavía igual a 4 . Como consecuencia, se transmite una trama S que contiene un comando REJECT y N(R) = 4, mediante lo cual se solicita la retransmisión de las tramas a partir de la número 4. Este procedimiento se muestra en la Fig. 4.22.

En el procedimiento descrito en la Fig. 4.22 hemos supuesto, para simplificar la figura, que la Estación B no está transmitiendo información, solamente recibe.

Resumen de las Características del Protocolo HDLC

Características

- Control por Dígitos
- Transmisión Sincrónica HDX/FDX
- Formatos de Carácter: ASCII, EBCDIC
- Modos de Operación: NRM, ARM y ABM (Comunicación Par a Par)
- Velocidades de Transmisión: desde 300 bps hasta 10 Mbps
- Interfaces: RS-232C, V.35, RS-423A, RS-422A, RS-449
- Medios de Transmisión: par trenzado, radio, cable coaxial, fibra óptica
- Transparencia mediante inserción de ceros

Nota: entre trama y trama se puede enviar banderas o caracteres de relleno de la forma

1 1 1 1 1 1 1 1.

ESTACION A	TRANSFERENCIA	ESTACION B
$N_A(S) = 0$ $N_A(R) = 0$	I $N_A(S) = 0$ $N_A(R) = 0$ →	$N_B(S) = 0$ $N_B(R) = N_A(S) + 1 = 1$
$N_A(S) = 1$ $N_A(R) = 0$	I $N_A(S) = 1$ $N_A(R)$ →	$N_B(S) = 0$ $N_B(R) = N_A(S) + 1 = 2$
$N_A(S) = 2$ $N_A(R) = 0$	I $N_A(S) = 2$ $N_A(R)$ →	$N_B(S) = 0$ $N_B(R) = N_A(S) + 1 = 3$
$N_A(S) = 3$ $N_A(R) = 0$	I $N_A(S) = 3$ $N_A(R)$ →	$N_B(S) = 0$ $N_B(R) = N_A(S) + 1 = 4$
$N_A(S) = 4$ $N_A(R) = 0$	I $N_A(S) = 4$ $N_A(R)$	$N_B(S) = 0$ $N_B(R) = 4$ <ERROR> El Contador no avanza
	TRAMA EN ERROR	
$N_A(S) = 5$ $N_A(R) = 0$	I $N_A(S) = 5$ $N_A(R) =$ →	$N_B(S) = 0$; Detección de Error $N_A(S) \neq N_B(R) = 4$
Repite las Tramas a partir de la 5 ($N_A(S) = 4$)	← ---------- $N_B(R) =$ S REJECT	$N_B(S) = 0$;Tramas Correctas $N_B(R) = 4$ hasta la 4
$N_A(S) = 4$ $N_A(R) = 0$	I $N_A(S) = 4$ $N_A(R)$ →	$N_B(S) = 0$ $N_B(R) = N_A(S) + 1 = 5$
$N_A(S) = 5$ $N_A(R) = 0$	I $N_A(S) = 5$ $N_A(R) =$ →	$N_B(S) = 0$ $N_B(R) = N_A(S) + 1 = 6$
$N_A(S) = 6$ $N_A(R) = 0$	I $N_A(S) = 6$ $N_A(R) =$ →	$N_B(S) = 0$ $N_B(R) = N_A(S) + 1 = 7$
Continúa la Transmisión de Tramas. RESET Contador; $N_A(S) = 0$	← --------- $N_B(R) = 0$ S RECEIVE READY (RR)	$N_B(S) = 0$ RESET del Contador $N_B(R)$ $N_B(R) = 0$

Fig. 4.22. Mecanismo de Control de Flujo y Recuperación de Errores en HDLC.

♣ **Ejemplo 4.7**

Sea el Protocolo HDLC:

Se han recibido las siguientes tres secuencias codificadas en HDLC. Examine cuidadosamente estas secuencias y diga qué tipo de información contienen. La codificación utilizada en las tramas está en EBCDIC; los 16 dígitos xxxx....xx corresponden al FCS, que suponemos están correctos, es decir, que no hay error. Nota: Estas secuencias no son transparentes

(a) 01111110110100001111 1000xxxxx...xx01111110

(b) 01111110001010001100011 0xxxxx...xx01111110

(c) 0111111011001100 0101101100100111110010111000011xxxxx...xx01111110

Solución:

El primero y último octetos son las banderas y no las tomaremos en cuenta. Hay que identificar cada uno de los campos. Como las secuencias no son transparentes, no hay ceros insertados para descartar.

(a) Dirección: 11010000 → Estación 11 (El LSB está a la izquierda)

Control: 11111000 → Indica que es una Trama U → SARM: Establecer el Modo de Respuesta Asincrónico. Como el dígito P está a "1", éste es un comando desde la Estación Maestra; por lo tanto, significa que la dirección es "a la Estación 11".

El mensaje, un comando, es el siguiente: "**A la Estación 11: Establecer el Modo de Respuesta Asincrónico**".

(b) Dirección: 00101000 → Estación 20 (El LSB está a la izquierda)

Control: 11000110 → Indica que es una Trama U → UA: Reconocimiento No Numerado. Es una respuesta afirmativa a los comandos SNRM, SARM, DISC o SIM. Como el dígito F = 0, es una respuesta y significa que la dirección es "desde la Estación 20"

El mensaje, una respuesta, es el siguiente: "**Desde la Estación 20: Reconocimiento No Numerado**". La Estación Secundaria ha establecido el Modo de Respuesta Asincrónico para el intercambio de información.

(c) Dirección: 11001100 → Estación 51 (El LSB está a la izquierda)

Control: 01011011 → Indica que este es una Trama de Datos → I

N(S) = 101 → 5; Ultimo mensaje correcto enviado: 5 - 1 = 4

P = 1 → Comando: indica "a la Estación 51"

N(R) = 011 → 6; Ultimo mensaje correcto recibido: 6 - 1 = 5

Información (Código EBCDIC): 00100111-11001011-10000011 → ULA

El mensaje, un comando, es el siguiente: "**A la Estación 51: Información enviada: ULA. Se han enviado 4 mensajes correctos (0, 1, 2, 3) y se han recibido 5 mensajes correctos (0, 1, 2, 3, 4)**". ♣

♣ Ejemplo 4.8

Se tiene la siguiente Trama HDLC transparente:

01111110100000001111101001101011110111011011111110

Identifique el tipo de trama y diga cuáles fueron los ceros insertados para lograr la transparencia.

Solución:

Recordemos el Modo Transparente en HDLC: "Cada vez que se encuentren cinco UNOS seguidos que no sean las banderas, se insertará un CERO".

Separemos la secuencia en grupos y si cinco UNOS están seguidos de un CER0, este es un CERO agregado para transparencia:

01111110-10000000-1111**0**100-1101011111**0**111011-01111110.

En el tercero y cuarto grupos hay cinco UNOS seguidos de un CERO. Este es un CERO insertado, que mostramos en negrita para identificarlo. La secuencia sin los CEROS insertados será entonces

01111110-10000000-11111100-1101011111111011-01111110

Ahora podemos identificar la secuencia (no tomamos en cuenta las banderas) :

Dirección: 10000000 → Estación 1 (Estación B)

Control: 11111100 → Trama Sin Numeración U → SABM: Establecer el Modo de Respuesta Balanceado. Este modo es propio del LAPB de X.25. Como P = 1, es un comando que indica la dirección "a la Estación B" (que es la número 1). En este mensaje la Estación A le pide a la Estación B establecer el modo SABM para iniciar un intercambio de información. ♣

4.3. PROTOCOLOS DE CONTROL A NIVEL DE RED

4.3.1. Introducción

De acuerdo con el Modelo de Referencia ISO/OSI, el propósito de la Capa Red es el de proporcionar capacidad de comunicación fin a fin a la Capa Transporte. La Capa Red debe proveer servicios de conmutación y enrutamiento a fin de establecer, mantener y terminar conexiones a nivel de red y transferir datos entre dos usuarios a través de una red.

Los protocolos de Capa Red son los primeros en operar a través de la red misma, a diferencia de los protocolos de Capa Enlace que operan solamente de punto a punto. De acuerdo con el concepto de estratificación de funciones, a la Capa Transporte no le interesa si la conmutación es por circuitos o por paquetes, ni el medio de transmisión utilizado (conductores metálicos, microondas, fibras ópticas, etc.), ni el tipo de red empleado (Redes de Gran Area (WAN), Redes de Area Local (LAN), etc.); a la Capa Transporte sólo le interesa la calidad del servicio recibido expresada en parámetros como tiempo de respuesta, tasa de error, velocidad de tráfico (throughput), etc.

La función básica de la Capa Red es, pues, la de proporcionar una trayectoria eficiente para el flujo de datos a través de una red. Esto implica funciones de direccionamiento, enrutamiento, control de flujo, secuenciamiento y multiplexamiento de mensajes y paquetes, y control de error desde un punto de vista global, es decir, de fin a fin. La trayectoria dentro de la red puede ser en la forma de un "circuito virtual" que se asemeja a una "trayectoria o circuito con conexión" que debe ser establecido antes de iniciar el intercambio de datos de control y de información. El circuito virtual puede asemejarse también a una "trayectoria o circuito sin conexión" en el cual los datos de control y de

información están contenidos en paquetes denominados “datogramas (datagrams)”. En este caso se dice que los paquetes son “paquetes sin conexión” y no es necesario el establecimiento previo de una conexión pues la red se encarga del enrutamiento y entrega del paquete; sin embargo, en general no hay garantía de que un datograma llegue a su destino.

La descripción de los protocolos de Capa Red la enfocaremos desde el punto de vista de la Transmisión Digital por Conmutación de Paquetes y de la Recomendación UIT-T X.25 cuyas características veremos a continuación.

4.3.2. Transmisión Digital por Conmutación de Paquetes

Como ya lo adelantamos en el Capítulo I, en la transmisión digital por conmutación de paquetes los datos de información se agrupan o segmentan en forma de tramas para su transmisión sobre la red. En cada nodo de la red cada trama se almacena transitoriamente mientras se verifica su destino y la ruta que deberá seguir para alcanzar el próximo nodo más cercano a su destino; esta tarea la efectúa la computadora de la red. Como paquetes diferentes de un mismo mensaje pueden tomar rutas diferentes para llegar al nodo destino, en este nodo se verifica el ensamblaje de los diferentes paquetes de un mismo mensaje y la distribución final, de acuerdo con su dirección, a las estaciones de destino, por ejemplo, las estaciones B, C y D, como se muestra en la Fig. 4.23. Entre las estaciones se establece entonces los “circuitos virtuales” o “llamadas virtuales”, cuyo mecanismo lo describiremos en conexión con la Recomendación X.25 (El lector debe reconocer la diferencia entre una trama y un paquete; la costumbre es la de llamar “tramas” a las secuencias de Capa Enlace transmitidas las cuales incluyen dentro de su campo INFORMACION a los “paquetes” formados en la Capa Red; las tramas se asocian con la Capa Enlace y los paquetes con la Capa Red).

La utilización compartida de las líneas de los usuarios se puede llevar a cabo en este modo de transmisión mediante un procedimiento de multiplexamiento. Por ejemplo, Fig. 4.23, la estación A puede transferir paquetes de datos en forma consecutiva a las estaciones B, C, D, etc.

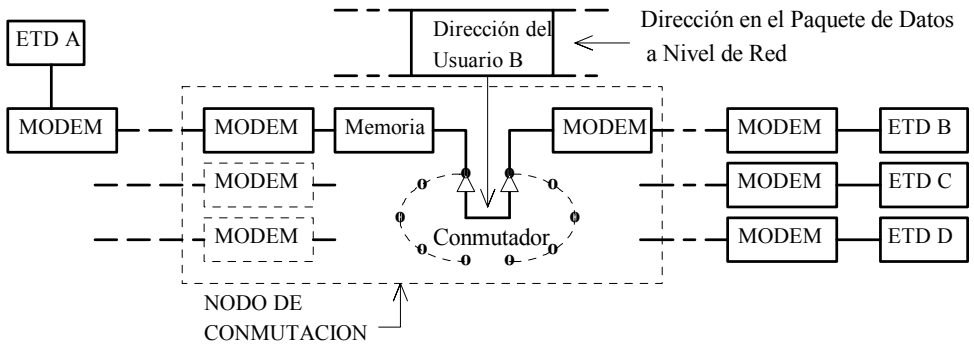


Fig. 4.23. Mecanismo de Conmutación en la Transmisión por Paquetes.

En los primeros sistemas de conmutación por paquetes se tenía como objetivo principal los siguientes aspectos:

(a) Aumentar la confiabilidad de la transmisión y de la conmutación. La red proporciona rutas alternas en caso de fallas en algún enlace e incluye sistemas de protección contra errores.

(b) Aumentar el rendimiento del sistema. El sistema se diseña a fin de maximizar la utilización compartida de las líneas troncales, lo que se logra si los mensajes se manejan por paquetes. El sistema proporciona los medios apropiados a fin de que terminales inteligentes puedan intercambiar datos con otros terminales sobre enlaces virtuales.

(c) Extender la capacidad de direccionamiento de las computadoras. En este caso el énfasis se enfoca en el manejo de los datos del usuario (en formato de paquetes) como una extensión del bloque de direccionamiento utilizado normalmente en la transferencia de información entre computadoras.

Las redes modernas se han diseñado para optimizar combinaciones de estos y otros aspectos de la operación por paquetes.

Características de las Redes de Conmutación de Paquetes

Paquetes entrelazados

Como ningún circuito está completamente dedicado para ser utilizado por dos usuarios solamente, se sigue que tanto los enlaces de usuario como en los enlaces troncales se puede entrelazar paquetes pertenecientes a diferentes pares de terminales de acuerdo con la demanda. Esta propiedad de multiplexamiento dinámico es muy atractiva desde el punto de vista económico, sobre todo para conexiones internacionales a grandes distancias.

Llamadas Multiplex

El entrelazado de los paquetes permite que un terminal pueda establecer un intercambio de paquetes con un número de terminales remotos, como se muestra en la Fig. 4.23.

Enrutamiento Adaptativo

El proceso de conmutación por paquetes requiere en cada nodo de conmutación la recepción de un paquete completo antes del procesamiento a fin de determinar la ruta de salida. El diseñador dispone de una completa flexibilidad para elegir la estrategia de enrutamiento óptimo de acuerdo con las condiciones y características de la red. Por ejemplo, se puede instrumentar las estrategias siguientes:

(a) Al recibir el paquete de establecimiento de llamada (el primero de una serie), se selecciona la ruta a seguir. Una falla en cualquiera de los elementos de la red ocasiona la interrupción de la llamada.

(b) Igual que en (a), pero la falla en un enlace dado hace que el nodo de conmutación seleccione una ruta alterna la cual es mantenida entonces durante toda la llamada.

(c) Cada paquete se enruta en base a un algoritmo de selección predeterminado, el cual varía la ruta de acuerdo con la carga instantánea y las fallas en los varios elementos o enlaces de la red.

(d) Igual que en (c), pero el algoritmo mismo varía de acuerdo con la información de supervisión del sistema referente a la carga instantánea y a las características de falla.

El paso desde la estrategia (a) hasta la (d) hace que la red sea teóricamente más segura pero a expensas de una creciente complejidad.

Cambios de Velocidad y de Códigos

Siendo el proceso de conmutación de paquetes esencialmente un sistema de procesamiento y transmisión de datos almacenados en una memoria, los paquetes recibidos a una velocidad dada pueden reexpedirse a otra velocidad. Asimismo, a petición del usuario puede efectuarse alguna conversión de código como, por ejemplo, criptografía para privacidad y protección de la información.

Control de Flujo

La conmutación de paquetes hace imperiosa la necesidad de una protección adecuada contra el congestionamiento producido por usuarios con altos volúmenes de datos a altas velocidades que pueden afectar el servicio y que en casos extremos pueden hasta saturar la red. El sistema provee estas facilidades.

Detección y Recuperación de Errores

En los sistemas de conmutación por paquetes la detección y recuperación de errores se efectúa nodo a nodo utilizando las técnicas de los polinomios generadores CRC. La detección y recuperación de errores en los nodos de entrada y de salida de la red se efectúa en cooperación con los usuarios mismos, pero en los enlaces troncales los errores son detectados y recuperados dentro de la red. En estos casos el usuario experimenta solamente un ligero aumento en el retardo de propagación debido a la necesidad de retransmisión de las tramas en error. En los sistemas modernos de paquetes rápidos, Frame Relay por ejemplo, hay verificación de error en todos los enlaces, pero si un paquete está en error inmediatamente él es descartado; la recuperación del error se deja a las capas superiores. Como consecuencia, la velocidad de transmisión de información aumenta en algunos órdenes de magnitud.

En la Recomendación UTI-T V.41 “Sistemas de Control de Error no dependientes de la Codificación”, se describe con detalle formas y métodos de detección y recuperación de errores en las redes digitales.

Servicios y Facilidades de la Red

Servicio de Datogramas (Datagram Service)

En principio, cada paquete manejado por la red se puede tratar como una entidad completamente independiente. Sin embargo, los datogramas, que son paquetes que solamente llevan las direcciones de origen y destino pero que no van numerados, se pueden

mover a través de la red, pero aún si llegan a destino el usuario de origen no podrá comprobarlo pues los datogramas no necesitan reconocimiento; ésta es la "transmisión sin conexión". La versión inicial de la Recomendación X.25 contenía un servicio de datogramas, pero en 1984 fue eliminado por la baja aceptación por parte de los usuarios. No obstante, en las Redes de Area Local se utiliza el servicio de datogramas, como veremos posteriormente.

Servicios de Llamadas Virtuales

Como la mayor parte de los intercambios requiere la transmisión de paquetes relacionados en alguna forma, por ejemplo, cuando dialogan dos terminales dados, las redes ofrecen en la interfaz del suscriptor un método para manejar paquetes en secuencia llamado "Servicio de Llamadas Virtuales (Virtual Call Service)". Este servicio se ofrece mediante "circuitos virtuales conmutados" o "circuitos virtuales permanentes".

En el circuito virtual conmutado los participantes en un intercambio no tienen una línea dedicada exclusivamente a ellos, pero la red mantiene un registro de la llamada, asigna un número de canal a los paquetes en tránsito y proporciona los recursos apropiados para que el flujo de datos sea uniforme. El usuario establece la llamada virtual mediante un paquete de solicitud de llamada dando todos los detalles de la dirección de destino, tipo de llamada, etc. Los paquetes siguientes llevan como referencia solamente el número de canal asignado como identificación durante todo el intercambio hasta que éste finaliza. Cualquiera de los dos usuarios puede finalizar la conexión mediante la transmisión de un paquete de desconexión de llamada.

Aquellos usuarios que llaman con mucha frecuencia al mismo punto de destino, pueden solicitar un circuito virtual permanente. La operación de este circuito es similar a la fase de transferencia de datos en un circuito virtual conmutado, pero el usuario no necesita hacer pedidos de llamada ni de terminación de llamada.

Los circuitos virtuales conmutados son análogos a los canales telefónicos conmutados en el sentido de que siempre hay que establecer previamente la conexión, la cual se mantiene durante el intercambio; mientras que los circuitos virtuales permanentes se asemejan a los canales telefónicos arrendados en que no hay que establecer conexiones y se tienen siempre a disposición del usuario sea que los esté utilizando o no.

Interconexión entre Terminales de Datos

Casi la mayor parte del intercambio de datos se efectúa entre terminales de datos y computadoras. Las computadoras pueden utilizar una interfaz para trabajar en Modo Paquete pero sería antieconómico convertir cada terminal, que trabaja en Modo Carácter, para transmitir o recibir paquetes de datos.

A fin de satisfacer esta creciente demanda, las redes ofrecen unos dispositivos para empaquetar y desempaquetar datos denominados Unidades PAD (Packet Assembler and Disassembler Unit, PAD). Estos dispositivos aceptan caracteres desde los terminales de datos tipo carácter y los ensamblan en paquetes para su transmisión por la red. En el PAD de destino se ejecuta la operación inversa. La operación óptima de los PAD depende del

conocimiento detallado de las características de los terminales servidos y del desarrollo de reglas y protocolos tanto para la transmisión de datos como para el control del PAD mismo.

Hay otros tipos de servicios y facilidades provistos por la red de paquetes que veremos en relación con la Recomendación X.25.

En general, las ventajas de la transmisión por paquetes sobre los otros sistemas actuales son sus altas velocidades de operación, su confiabilidad y su menor costo por paquete transmitido. Tiene también la ventaja de que en las horas pico los mensajes no se pierden por falta de línea sino que se almacenan para ser transmitidos en las horas siguientes. En esta forma el sistema trabaja casi al óptimo de su capacidad. En efecto, un sistema que opere, por ejemplo, al 80% de su capacidad, tendrá muy pocos retardos en la transmisión si la longitud de los mensajes no es muy larga pues puede bloquearse ciertas rutas y retardar otros mensajes.

Recomendaciones del UIT-T

Con el fin de ofrecer un servicio uniforme a nivel nacional e internacional, el UIT-T ha promulgado un conjunto de recomendaciones en la Serie X para la transmisión digital por conmutación de paquetes. Estas recomendaciones son:

X.1. Clases de Servicio Internacional para la Transmisión de Datos sobre una Red de Datos Pública. Asigna denominaciones a las diferentes velocidades y tipos de terminal.

X.2. Servicios y Facilidades a Nivel Internacional en las Redes de Datos Públicas. Especifica servicios y facilidades esenciales, adicionales u opcionales.

X.3. Parámetros de las Unidades de Ensamblaje y Desensamblaje de Paquetes (PAD). Describe las funciones del PAD y todos sus diferentes parámetros.

X.25. Interfaz para el Servicio de Llamadas Virtuales en Transmisión por Paquetes. Define una arquitectura de tres capas (Física, Enlace y Red) para controlar el acceso a una red de transmisión por paquetes.

X.28. Interfaz de Interconexión entre un ETD en Modo Arranque-Pare (Modo Asincrónico) y un PAD. Define la arquitectura de los protocolos entre un ETD en Modo Arranque-Pare y un PAD.

X.29. Interfaz de Interconexión entre un PAD y un ETD en Modo Paquete u otro PAD. Describe los procedimientos para el intercambio entre un PAD en un extremo de la red y un ETD u otro PAD al otro extremo de la red.

X.75. Operación Internacional (o inter-centrales) en Modo de Conmutación de Paquetes.

X.121. Plan de Numeración Internacional para las Redes Públicas de Datos. Define un plan de numeración que incluye asignaciones de código para cada nación.

4.4. LA RECOMENDACION X.25

4.4.1. Introducción

La Recomendación X.25 fue aprobada por el IUT-T en 1976, con revisiones en 1980 y 1984. Esta recomendación fue el fruto de un esfuerzo conjunto de Canadá, Francia, Japón y Estados Unidos. Es anterior al desarrollo del Modelo de Referencia ISO/OSI, pero con las revisiones que se le han hecho en cooperación con la ISO, ella está de acuerdo con las tres primeras capas ISO/OSI. La Recomendación X.25 define las normas para interconectar un ETD (terminales de datos, computadoras, etc.) a una red de conmutación de paquetes a través de un ETCD o un Nodo de Acceso a la Red.

Estrictamente hablando, el protocolo X.25 no es una arquitectura de red sino que es un protocolo estratificado que exhibe muchas de las propiedades de una arquitectura de red. La X.25 es una recomendación de interfaz; ella especifica los detalles de los protocolos de interfaz requeridos para capacitar a un ETD local para poder comunicarse con un ETCD local el cual se presume que provee el acceso a una red de conmutación de paquetes. La idea básica se muestra en la Fig. 4.24.

Los ETD que desean comunicarse (local y remoto) a través de una red de datos lo hacen mediante interfaces X.25, una a cada extremo de la red y la red maneja la transmisión y entrega de los datos entre los dos ETD. Nótese que lo que sucede dentro de la red no está especificado en la Rec. X.25; el fabricante de la red está en libertad de diseñar su propio protocolo de red siempre que las normas de entrada/salida sean X.25. La interfaz X.25 supone que la red es de conmutación de paquetes, aunque esto no es necesario puesto que solamente están especificados los protocolos de interfaz entre la red (representada por los ETCD) y los ETD local y remoto. Estos ETD pueden ser cualquier tipo de terminal inteligente o computadora equipados para manejar el protocolo X.25, generalmente mediante una tarjeta y su programa correspondiente.

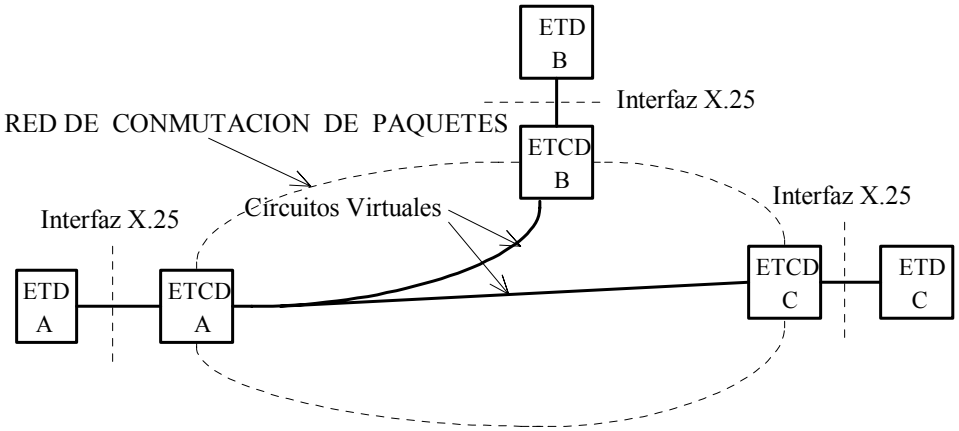


Fig. 4.24. Concepto X.25.

4.4.2. Descripción de las Capas X.25

En el protocolo X.25 solamente se describe las tres primeras capas del Modelo ISO/OSI, las cuales se muestran esquemáticamente en la Fig. 4.25. La capa inferior es, por supuesto, la Capa Física; para ella se especifica el uso de un circuito sincrónico, punto a punto, FDX, para la interconexión física entre el ETD y el nodo de acceso a la red. Se utiliza las interfaces V.24/V.28/EIA-232D cuando la interconexión es directa o a través de un módem (circuito analógico); pero si el circuito es digital se utiliza las interfaces X.21, RS-449/RS-423A y V.35. Las velocidades de transmisión se extienden desde 1200 bps hasta 64 kbps y la distancia máxima entre ETD y ETCD es de 15 m.

En el Nivel 2 o Capa Enlace el protocolo especificado por X.25 es un subconjunto del protocolo HDLC denominado LAPB (Link Access Procedure Balanced, LAPB). El protocolo LAPB, mostrado en la Fig. 4.26, proporciona un intercambio FDX entre el ETD y el ETCD o nodo de acceso a la red. La idea es que el intercambio de datos entre el ETD y la red se efectúe libre de errores, de manera que los errores producidos en la transmisión fin a fin sean imputables a la red y no a las interfaces.

Como puede observarse en la Fig. 4.26, el campo DIRECCION del protocolo LAPB solamente contiene dos direcciones: la de la Estación A o ETD (03H) y la de la Estación B o ETCD (01H). En el campo CONTROL se muestra los comandos/respuestas utilizados en LAPB; nótese que ahora son menos a fin de simplificar el intercambio. Durante un intercambio de información la mayoría de las tramas son comandos. Una trama de respuesta (con F = 1) se elabora solamente cuando se recibe una trama de comando con el dígito $P = 1$. Por ejemplo, la dupla SABM/UA es un par de comando/respuesta utilizado para inicializar todos los contadores y temporizadores al inicio de una sesión. Asimismo, la dupla DISC/DM es un par de comando/respuesta para finalizar el intercambio. La trama FRMR es una respuesta a cualquier comando ilegal para el cual no hay ninguna indicación de errores de transmisión; su descripción ya la vimos en relación con el protocolo SDLC. El resto de los comandos tienen la misma significación que en SDLC y HDLC.

Las tramas I de información llevan en el campo INFORMACION los paquetes que vienen de la Capa Red; las tramas I siempre se envían como comandos (P = 1). Las tramas se reconocen usando los números N(R) y N(S) como en el protocolo HDLC.

En el Nivel 3 o Capa Red de X.25 se especifica la manera en la cual la información de control y datos del usuario se estructura en paquetes. La información de control junto con el número de canal asignado y tipo de paquete, están contenidos en el encabezado (primeros tres octetos) del paquete, Fig. 4.28; en el campo INFORMACION va el resto de la información necesaria que le permite a la red identificar el ETD hacia el cual el paquete está destinado. Las funciones de control contenidas en el campo INFORMACION sirven para establecer o desconectar un circuito dado, para intercambio de datos, para interrupciones, etc. Contiene, asimismo, las direcciones del ETD local (llamante) y del ETD remoto (llamado). En este Nivel 3 hay que tomar en cuenta la diferencia entre paquetes que contienen información de usuario (Texto) y aquellos que sirven para controlar la transferencia de datos de ETD a ETD. Por esta razón, el encabezado contiene instrucciones codificadas acerca de, por ejemplo, paquetes para establecer o desconectar

circuitos, paquetes para transferir texto, paquetes para pedidos de retransmisión o para indicar la señal de "ocupado" desde un ETD dado. Más adelante describiremos la estructura de algunos paquetes con más detalle.

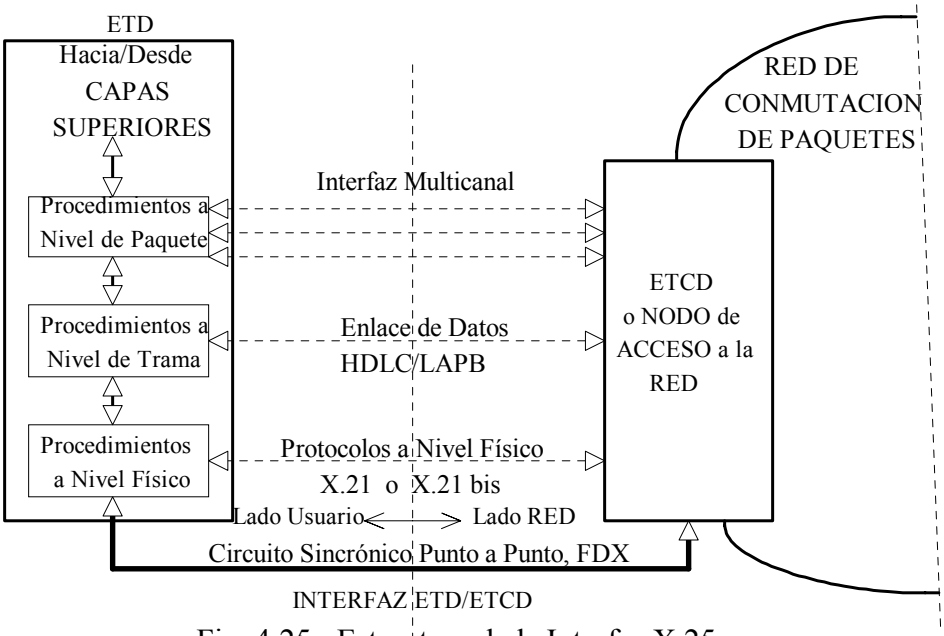


Fig. 4.25. Estructura de la Interfaz X.25.

En la Fig. 4.26 se muestra la estructura completa del protocolo LAPB en X.25.

4.4.3. Servicios de la Red X.25

En la X.25 se define cuatro clases de servicio de llamadas virtuales: servicios de Circuitos Virtuales Conmutados (SVC), servicios de Circuitos Virtuales Permanentes (PVC), servicios de Datogramas (DS) y servicios de Selección Rápida (Fast Select, FS). Sin embargo, el servicio de datogramas fue eliminado de la X.25 en 1984 a favor del servicio FS que es similar. En efecto, el servicio Fast Select permite transmitir hasta 128 octetos de información en el mismo campo de Datos de Usuario del paquete de control que establece la llamada virtual (Paquete de Petición de Llamada). La respuesta (Paquete de Llamada Conectada) confirma la recepción de la información y termina la llamada. La descripción de los otros circuitos virtuales ya fue dada en la Sección 4.3.2 y no la repetiremos aquí.

Para cada uno de estos servicios la red X.25 asigna, en los octetos 1 y 2, un número de canal, pudiéndose asignar hasta 4095 circuitos a un canal físico, es decir, a una conexión LAPB. En la Fig. 4.27 se muestra el mapa de asignación de canales en X.25.

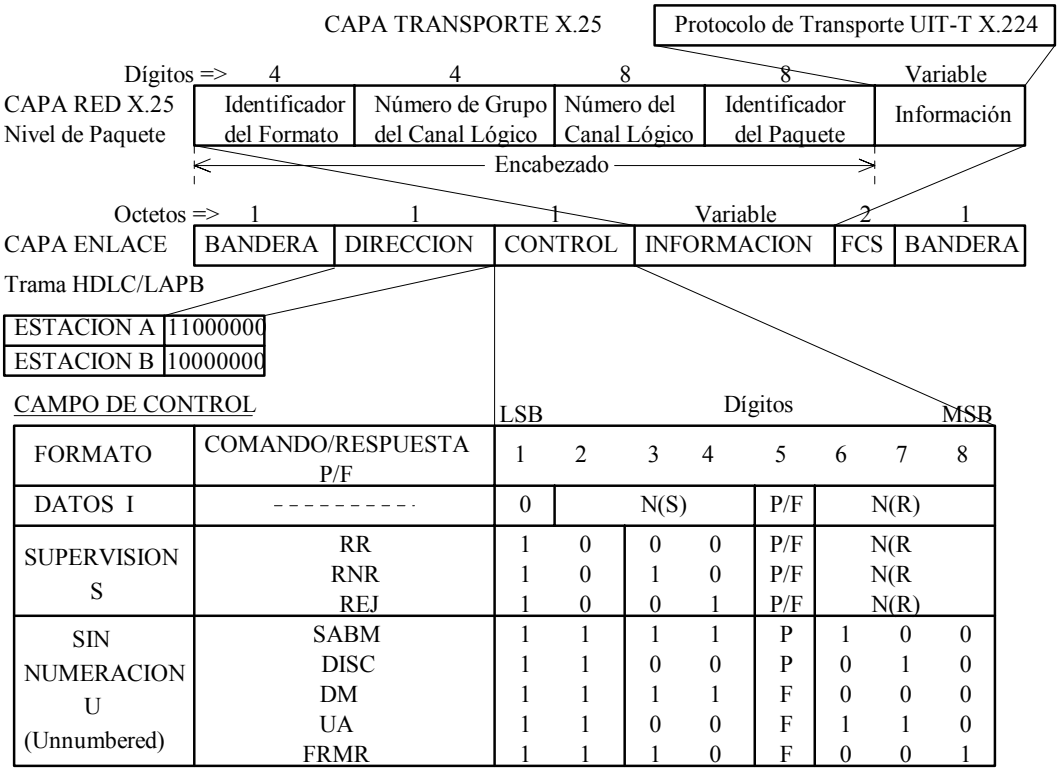


Fig. 4.26. Protocolo HDLC/LAPB en X.25.

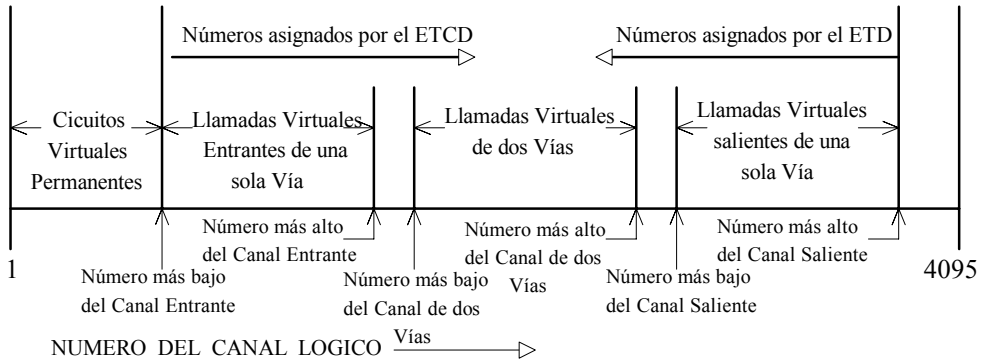


Fig. 4.27. Asignación de los Números de Canal Lógicos en X.25.

Los números de canal lógicos caen dentro de cuatro categorías, Fig. 4.27.

1. Los números más bajos se asignan a los “circuitos virtuales permanentes”.
2. Siguen los números para “llamadas virtuales entrantes de una sola vía”. Estos números se asignan para aplicaciones con servicio de autorespuesta.
3. A continuación se asigna números para las “llamadas virtuales de dos vías”. Este es el tipo más común pues permite recibir y transmitir sea en HDX o FDX.

4. Por último, se asigna números para "llamadas virtuales salientes de una sola vía". Se utiliza en aplicaciones con servicio de tipo autodiscado.

Los usuarios contratan con la red un conjunto predeterminado de circuitos de cada categoría, por ejemplo, 2 circuitos virtuales permanentes, 6 circuitos para llamadas entrantes de una sola vía, 10 circuitos para llamadas virtuales de dos vías y 6 circuitos para llamadas salientes de una sola vía. Los números asignados a los circuitos solamente tienen significado local; en efecto, al solicitar a la red una interconexión para una llamada saliente, el ETD llamante asigna un número en la parte alta el cual se conserva durante todo el intercambio. En el extremo remoto, al recibir la petición (llamada entrante) el ETCD remoto asigna un número en la parte baja a la llamada entrante el cual también se conserva durante todo el intercambio. Si el intercambio es entre circuitos virtuales de dos vías, pudiera ocurrir que los dos números sean iguales, pero esta es una situación cuya ocurrencia es muy remota.

El propósito del nivel de paquete es entonces el de proveer procedimientos para manejar cada uno de los servicios ya señalados, incluyendo los procedimientos para la conexión y desconexión requeridos, además de proveer un control de flujo a fin de que un usuario no sature a otro y que la información fluya en forma oportuna y eficiente. Hay que proveer también medios para el manejo de errores a nivel de paquete, para abortar o renovar una llamada virtual, etc., como veremos más adelante.

Además de los servicios ya mencionados, la Recomendación X.25 ofrece algunos servicios adicionales, denominados Facilidades, que son opcionales para el usuario. Estas facilidades se clasifican como "esenciales" cuando la red está obligada a proporcionarlos si se le solicita, y "adicionales" cuando pueden o no ser ofrecidas por la red.

En el momento de la suscripción a la red el usuario puede seleccionar otros parámetros como, por ejemplo:

En el Nivel de Capa Física: Velocidad de transmisión y tipo de interfaz; por ejemplo, X.21, X.21bis o V.35.

En el Nivel de Capa Enlace:

N1: número máximo de octetos por trama; normalmente 135 octetos.

N2: número máximo de veces que una trama puede ser transmitida y retransmitida en un enlace dado; normalmente 20 veces.

T1: tiempo máximo (time-out) que el transmisor debe esperar un reconocimiento antes de iniciar los procedimientos de recuperación de tramas; ajustable.

K: número máximo de tramas que se pueden enviar sin esperar reconocimiento; normalmente 7 tramas.

En el Nivel de Capa Red, además de los servicios de llamadas virtuales, se ofrece también Tamaño de Ventana (W), Tamaño Máximo del Paquete, Velocidad de Tráfico (throughput), Reconocimientos Local y Remoto, etc.

Las facilidades ofrecidas en X.25 se describen en la Recomendación X.2.

4.4.4. Formato de los Paquetes X.25

En la Recomendación X.25 se define 17 tipos diferentes de paquete: paquetes para datos, paquetes para control de flujo, paquetes de supervisión, etc., cada uno identificado con un código particular. En general, como se muestra en la Capa Red de la Fig. 4.26, un paquete está formado por un Encabezado de tres octetos y un campo Información cuya longitud depende del tipo de paquete. Vamos a describir solamente algunos de los paquetes para conocer su estructura; para los otros paquetes, el lector interesado puede consultar el Libro Azul del UIT-T.

Paquete de Datos

Como todos los paquetes X.25, los dos primeros octetos son comunes a todos. El primer octeto, Fig. 4.28, contiene (dígitos 8 al 5) el IDENTIFICADOR DEL FORMATO identificado con los dígitos Q, D, X y Y. Este campo indica el formato general del paquete: Datos, Control, Módulo 8, Módulo 128, etc. El significado de los dígitos es el siguiente:

Q = Dígito Calificador (Qualifier Bit). Se utiliza para diferenciar entre dos tipos de información, por ejemplo, entre datos de usuario e información de control. Para tráfico normal Q = 0. Para otro nivel de tráfico Q = 1. Se aplica también en los PAD.

D = Dígito de Confirmación de Entrega(Delivery Confirmation Bit). Se utiliza para indicar si el ETD desea o no recibir confirmación de los paquetes mediante un RR o un RNR que contienen el número de secuencia P(R).

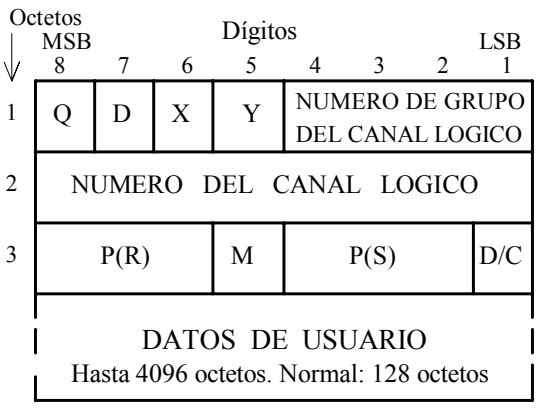


Fig. 4.28. Formato del Paquete de Datos X.25

XY = 01. Codificación utilizada para informar que los números de secuencia P(R) y P(S) son de tres dígitos: (8, 7, 6) y (4, 3, 2), respectivamente; estos números van en el octeto 3. En este caso se puede contar hasta 7 paquetes consecutivos.

Define al Módulo 8.

XY = 10. Codificación utilizada para indicar que los números P(R) y P(S) son de 7 dígitos y pueden contar hasta 127 paquetes consecutivos. En este caso, en vez de necesitarse un octeto, como se muestra en la Fig. 4.28, se necesita dos octetos, 3 y 4, para acomodar los números de secuencia P(R) y P(S) más los dígitos M y D/C. Define al Módulo 128.

En el primer octeto (dígitos 1 al 4) y en el segundo octeto de todos los paquetes, Fig. 4.28, se tiene el NUMERO DE GRUPO DEL CANAL LOGICO y EL NUMERO DEL CANAL LOGICO, los cuales permiten el establecimiento de las llamadas virtuales y la asignación de un número a cada una de las llamadas. En total son 12 dígitos con los cuales se puede asignar hasta $2^{12} - 1 = 4095$ números de canal sobre un enlace LAPB.

En el octeto 3, Fig. 4.28, se tiene los siguientes campos:

P(R) = Número de Secuencia de Recibo. Indica el número de paquetes recibidos en un ETD.
Este número se envía solamente en los paquetes de Datos, RR, RNR y REJ. En Modulo 8 tiene tres dígitos, mientras que en Módulo 128 tiene 7 dígitos.

M = Más Datos (More Data Bit). Cuando M = 1, se indica que todavía hay más paquetes por transmitir. En el último paquete de una serie, M = 0.

P(S) = Número de Secuencia de Envío. Indica el número de paquetes enviados por un ETD. Este número se envía únicamente en el paquete de Datos. En Modulo 8 tiene tres dígitos, mientras que en Modo 128 tiene 7 dígitos.

D/C = Dígito de Datos/Control (Data/Control Bit). D/C = 0 para paquetes de Datos. D/C =1 para cualquier otro tipo de paquete.

Por último, en el campo DATOS DE USUARIO se puede transmitir un máximo normal de 128 octetos. Sin embargo, mediante acuerdo con la red, se puede tener las opciones de 16, 32, 64, 256, 512, 1024, 2048 y 4096 octetos.

Paquete de Petición de Llamada y Llamada Entrante

En la Fig. 4.29 se muestra el formato de un Paquete de Petición de Llamada y de Llamada Entrante. Los tres primeros octetos son comunes; para estos paquetes en particular el código de tipo de paquete es 0BH.

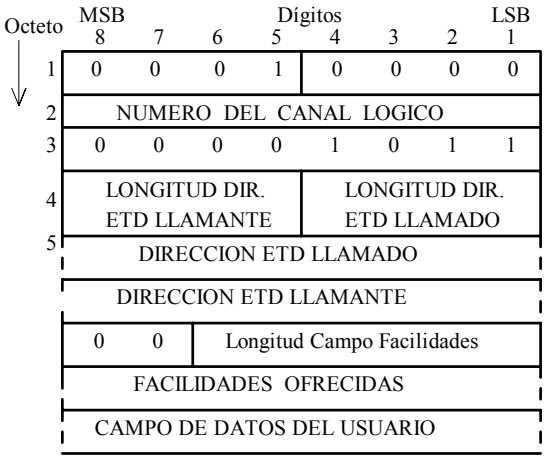


Fig. 4.29. Paquete de Petición de Llamada/Llamada Entrante

En el octeto 4 van las direcciones de los ETD llamante y llamado. Estos campos de cuatro dígitos indican el número de dígitos en BCD que aparecen en el campo de direcciones de los ETD llamante y llamado. De acuerdo con la Recomendación X.21, en estos campos se puede especificar hasta 14 dígitos; por ejemplo, para el número de destino 208243514600 se necesitará 6 octetos en el campo DIRECCION ETD LLAMADO. Los tres primeros dígitos identifican al país y el cuarto

dígito a la red; el resto de los dígitos, de 1 hasta 10, es el número del terminal llamado. El número de Venezuela es el 734.

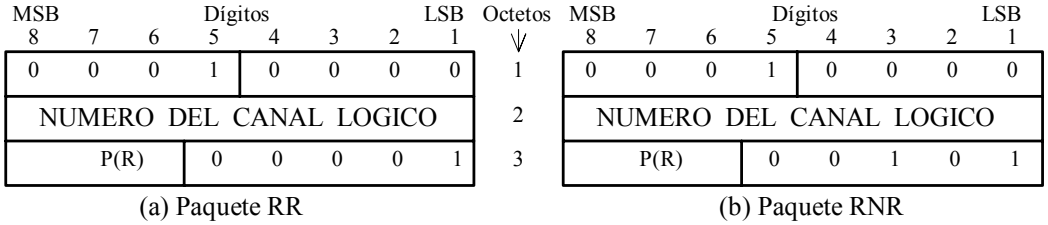
El siguiente campo es Longitud Campo Facilidades en el cual va el número de octetos presentes en el campo FACILIDADES OFRECIDAS; algunos de estos servicios son negociables entre el usuario y la red. Con los seis dígitos se puede pedir hasta 64 servicios, pero normalmente se ofrece once solamente. Entre estos servicios se tiene: grupo cerrado de usuarios, tamaño de paquete, tamaño de ventana, cargo a destino, Fast Select, etc. Si no se solicita ninguna facilidad, el octeto completo se pone a 00H.

El último campo es el CAMPO DE DATOS DEL USUARIO. La longitud máxima de este campo es de 16 octetos; sin embargo, si el paquete se utiliza en Fast Select, la longitud se puede extender hasta 128 octetos.

Muchas redes pueden aceptar un Paquete de Petición de Llamada sin la dirección del ETD llamante; en este caso la red agrega esta dirección al Paquete de Llamada Entrante antes de ser entregado al destino. Sin embargo, la regla general establece que si la dirección del ETD llamante está presente en el Paquete de Petición de Llamada, ella debe ser la correcta; de lo contrario, la red abortará la llamada.

Paquetes RR y RNR

Estos son los paquetes más cortos de X.25 pues son muy utilizados en la transferencia de datos y en el control de flujo. El formato de estos paquetes se muestra en la Fig. 4.30.



(a) Paquete RR (b) Paquete RNR

Fig. 4.30. Paquetes RR y RNR en X.25

El paquete RR se utiliza para reconocimientos positivos y el paquete RNR para indicar una condición de "ocupado temporalmente". Una condición RNR normalmente se despeja con un paquete RR. Estos paquetes se utilizan también en combinación con la "ventana de control" para el control de flujo. El paquete REJECT tiene la misma forma que estos paquetes, con la diferencia de que el código en el octeto 3 es 01001.

4.4.5. Transferencia de Datos

La transferencia normal de datos en X.25 consta, como en todos los sistemas ISO/OSI, de tres fases con sus correspondientes primitivas: la fase de establecimiento de la llamada, la fase de transferencia de información y la fase de terminación de la llamada. En el servicio de llamadas virtuales conmutadas se utiliza las tres fases, mientras que en llamadas virtuales permanentes no es necesaria la fase de establecimiento de la llamada.

El proceso de transferencia comienza, Fig. 4.31, Módulo 8, cuando el ETD local envía un paquete de Petición de Llamada. En este paquete se especifica el número de canal lógico, las direcciones local y remota y se solicita alguna de las facilidades ofrecidas, por ejemplo, el tamaño de ventana para el control de flujo. Este paquete llega al ETCD remoto como una llamada entrante. El ETCD remoto acepta la llamada, asigna un número de canal lógico al intercambio, negocia el tamaño de la ventana y pasa la información a su ETD el cual emite un Paquete de Llamada Aceptada. Este paquete llega al ETCD local el cual lo pasa a su ETD con el nombre de Paquete de Llamada Conectada. Esto completa la fase de establecimiento de la llamada.

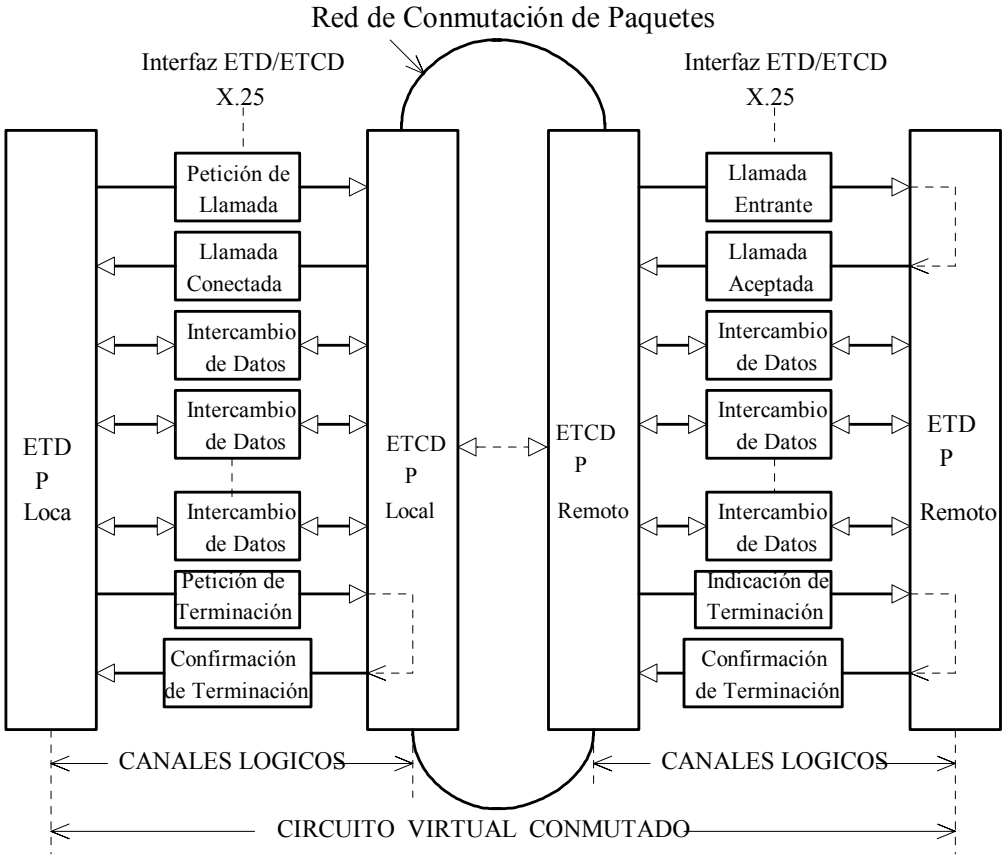


Fig. 4.31. Secuencia Normal en la Transmisión por Paquetes X.25.

Comienza ahora la fase de transferencia de Paquetes de Datos. En X.25 el flujo de paquetes se controla mediante una ventana deslizante que indica el número máximo de paquetes en espera para ser transmitidos; estos números son diferentes de P(S) y P(R). A diferencia del control de flujo en la Capa Enlace en donde se puede enviar hasta 7 tramas consecutivas, en la Capa Red hay una ventana que controla la cantidad de paquetes que se pueden enviar consecutivamente. Más adelante describiremos este mecanismo de control de flujo mediante una ventana. El intercambio de paquetes continúa hasta que, por ejemplo, el ETD Local comienza la fase de desconexión emitiendo un Paquete de Terminación de

Llamada. El ETCD local reconoce de inmediato este paquete con un Paquete de Confirmación de Terminación y en el extremo remoto el ETCD participa a su ETD el fin del intercambio con un Paquete de Indicación de Terminación. El ETD remoto lo reconoce con un Paquete de Confirmación de Terminación y el intercambio finaliza.

4.4.6. Control de Flujo y Recuperación de Errores

En el control de flujo en X.25 se utiliza el mecanismo de ventana deslizante. La ventana es un número W que indica cuantos paquetes se pueden transmitir sin reconocimiento y que están en espera para ser transmitidos. El valor normal de W es de 2 pero se puede negociar otro valor en la fase de establecimiento de la llamada. En la Fig. 4.32 se muestra el mecanismo de control de flujo normal para una ventana W = 3. Con esta ventana se transmite hasta tres paquetes y se espera el reconocimiento; al recibir los tres paquetes el ETD distante envía un RR; con este reconocimiento el ETD local corre la ventana tres posiciones más y el proceso se repite. Un ETCD puede cerrar la ventana con un RNR y la puede reabrir con un RR. Por ejemplo, si en el transcurso de un intercambio un ETCD transmite un RNR a su ETD al recibir el paquete 4 (recibido sin error), el ETD cierra la ventana e interrumpe la transmisión y no la reabrirá hasta recibir un RR de su ETCD. En este caso la nueva ventana incluirá los paquetes 5, 6 y 7.

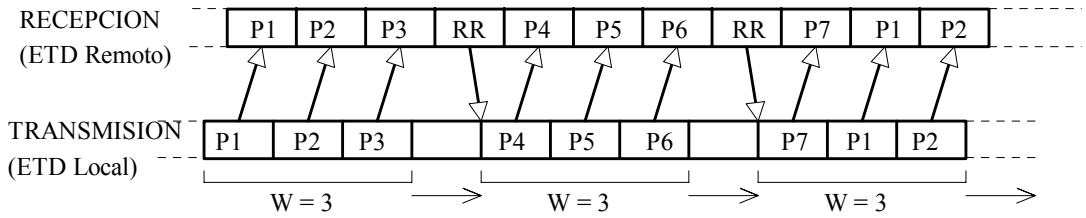


Fig. 4.32. Control de Flujo mediante Ventana Deslizante

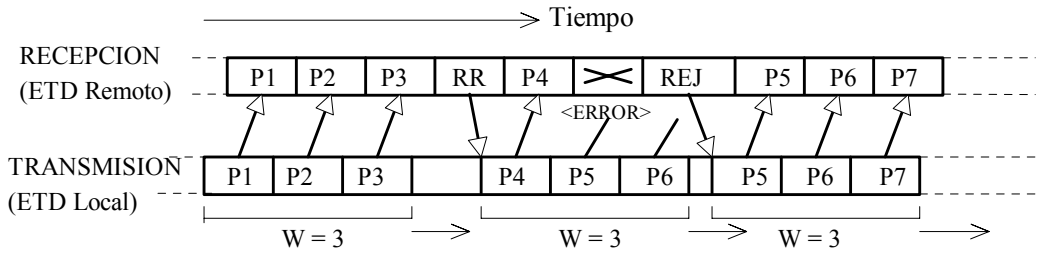


Fig. 4.33. Mecanismo de Recuperación de Error en X.25 (W = 3)

Veamos ahora cómo se efectúa la recuperación de errores. Consideremos la Fig. 4.33. Si durante la transmisión se detecta un paquete en error o un paquete perdido, por ejemplo, el paquete 5, el ETD remoto transmite un REJ indicando error en dicho paquete; como consecuencia, en el ETD local se cierra la ventana y se abre una nueva ventana para la transmisión de los paquetes 5, 6 y 7, y el proceso continúa. Nótese que el paquete 6 fue transmitido pero fue descartado en la recepción.

♣ Ejemplo 4.9

En un sistema X.25 el Paquete de Datos contiene 2048 octetos en su campo Datos de Usuario.

(a) Dibuje la arquitectura completa de la Recomendación UIT-T X.25

(b) ¿Cuántos paquetes por segundo se pueden transmitir utilizando un Módem V.32/V.42bis?

(c) Repetir cuando los paquetes se transmiten por una Troncal T1 que transmite a 1544 kbps.

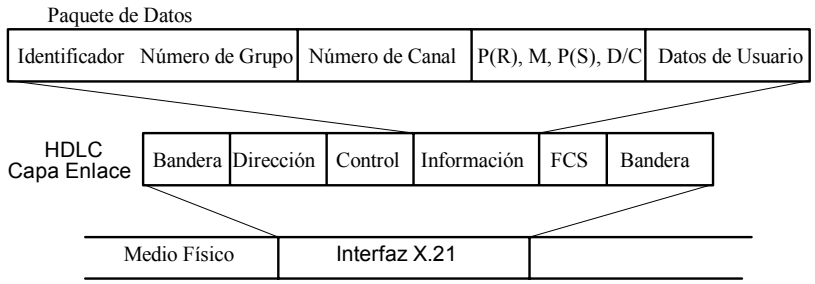
Solución:

En el Paquete de Datos X.25 se le agregan tres octetos de encabezado a los Datos de Usuario, para un total de 2051 octetos en el Paquete de Datos, es decir, 16408 dígitos a nivel de Capa Red. En el nivel de Capa Enlace se le agregan otros seis octetos (dos banderas, dirección, control y FCS) para un total de 2057 octetos, que corresponden entonces a una información I_p = 16456 bits por paquete.

Sea V_p la velocidad en paquetes/segundo y V_i la velocidad de transmisión en el medio; se tiene entonces que

$$V_p = \frac{V_i \text{ bits/seg}}{I_p \text{ bits/paquete}} = \frac{V_i}{I_p} \text{ paquetes/segundo}$$

(a) La arquitectura de la Rec. X.25 tiene la forma



(b) El Módem V.32/V.42bis transmite a una velocidad V_i = 38400 bps; entonces, la velocidad en paquetes por segundo será

$$V_p = \frac{38400}{16456} = 2{,}333 \text{ paquetes por segundo}$$

(c) En una Troncal T1 la velocidad de transmisión es Vi = 1544 kbps = 1544×10^3 bps. La correspondiente velocidad en paquetes por segundo será

$$V_p = \frac{1544 \times 10^3}{16456} = 93{,}826 \text{ paquetes por segundo}$$ ♣

4.5. LAS RECOMENDACIONES X.3, X.28 y X.29

4.5.1. Introducción

Los terminales asincrónicos sencillos, o con un número mínimo de funciones, son incapaces de manejar los protocolos X.25 y no se pueden conectar directamente a una red de conmutación de paquetes con interfaces X.25. Sin embargo, en el UIT-T se ha definido un conjunto de funciones y normas que le permiten a un terminal asincrónico tipo carácter (ETD C) acceder a una red X.25. Las funciones básicas las provee las Unidades PAD, las cuales ensamblan paquetes generados en un ETD C local y desensamblan paquetes recibidos desde la red para entregarlos a un ETD C remoto. Para esta interconexión se ha definido tres normas: X.3, X.28 y X.29, conocidas como "La Triple X", cuya interrelación se muestra en la Fig. 4.34.

En la Fig. 4.34 se muestra el caso de un conjunto local de ETD C que utilizan un PAD para conectarse a un terminal en modo paquete (ETD P) remoto, y los dominios de aplicación de las Recomendaciones X.3, X.28 y X.29.

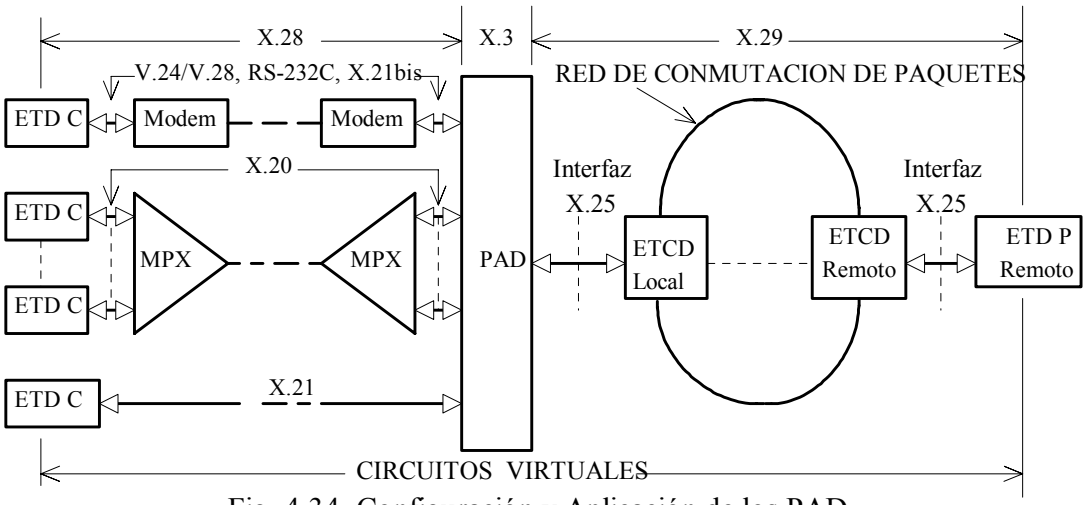


Fig. 4.34. Configuración y Aplicación de los PAD.

Los PAD pueden ser públicos o privados. Un PAD público es propiedad de la red y se puede acceder a él mediante líneas arrendadas o conmutadas. Un ETD C conectado a un PAD público puede iniciar llamadas pero no puede recibir. Los PAD privados pertenecen al usuario y generalmente están dentro de sus predios ("user premises"). Algunos PAD, como el mostrado en la Fig. 4.34, actúan además como multiplexores y pueden aceptar hasta 16 ETD C. Los PAD privados se pueden conectar a la red mediante líneas arrendadas o conmutadas y, a diferencia de los PAD públicos, los ETD C conectados a un PAD privado pueden iniciar y recibir llamadas. Los PAD utilizan los tres primeros niveles OSI en ambas direcciones; hacia el ETD C utiliza el protocolo del terminal utilizado, por ejemplo, la interfaz V.24/V.28/EIA-232D y los protocolos de capa física; hacia la dirección opuesta el PAD utiliza los protocolos X.25.

Ahora vamos a describir en forma breve las características de la Triple X.

4.5.2. La Recomendación X.3

En la Recomendación X.3 se describe las carácterísticas de operación del PAD para un determinado ETD C, por ejemplo, velocidad de operación, edición, control de flujo, etc. mediante la definición de un número de parámetros (22 máximo). El conjunto completo de estos parámetros se denomina "perfil del PAD".

Entre las funciones básicas de los PAD establecidas en la X.3 se tiene:

- Configuración del ETD C.
- Ensamblaje y Desensamblaje de caracteres en paquetes y viceversa.
- Manejo del establecimiento y terminación de llamadas virtuales.
- Control de los procedimientos a seguir en la interconexión del ETD C y el PAD.

Se provee también una función ESCAPE (ESC) la cual permite que señales enviadas por el ETD C controlen el PAD en vez de ser transmitidas como datos.

4.5.3. La Recomendación X.28

En esta recomendación se especifica los procedimientos a seguir entre el ETD C y el PAD en lo que se refiere a:

- Establecimiento de una trayectoria de acceso de información.
- Intercambio de caracteres y servicios de inicialización.
- Intercambio de información de control.
- Intercambio de datos.

Para poder entrar en la red, el ETD C primero debe ser configurado en forma apropiada. Esto incluye la velocidad de transmisión, la paridad, HDX/FDX, etc. A continuación debe activarse la conexión física ETD C / PAD mediante un carácter ASCII CR ("carriage return"). El PAD responde con su indicador *pad*> significando que el enlace físico está en operación. La interfaz ETD C / PAD queda en la fase de transferencia de datos si se trata de un PVC o en un estado de comando si se trata de un SVC. Una vez en la fase de transferencia de datos o de comando, el ETD C envía una señal de "solicitud de servicio" la cual es interpretada también por el PAD como una indicación de la velocidad de transmisión del ETD C. El PAD responde con una indicación de "enlace activo" y a continuación el usuario debe transmitir un código indicando su identidad, la dirección del ETD P de destino y solicitud de algunos servicios (facilidades) requeridos. El PAD establece una llamada virtual al ETD P remoto y ejecuta la transferencia de datos. Si el ETD C quiere enviar un comando al PAD durante la fase de transferencia de datos, lo puede hacer mediante un carácter DLE ("escape from data transfer"). El PAD sabe entonces que los próximos datos a recibir son para él y no para el ETD P remoto. Con un carácter CR el ETD C vuelve a la fase de transferencia de datos.

Los parámetros del PAD que afectan la transferencia de datos pueden variarse durante la fase de transferencia. Si no se modifican dichos parámetros, los caracteres destinados al ETD P remoto se ensamblan en paquetes y se transmiten sea que el paquete esté lleno, o al recibo de un carácter especial o al final de un tiempo especificado.

El ETD C puede terminar la llamada virtual enviando un DLE al PAD, seguido del comando CLR ("clear" = terminar). Cuando el PAD ha desconectado la llamada virtual, contestará con una confirmación de terminación ("clear confirmation") y el sistema queda listo para una nueva llamada.

4.5.4. La Recomendación X.29

En esta recomendación se detalla los procedimientos y reglas para el uso de los campos de datos que operan bajo la Recomendación X.25 para la transferencia de datos desde un PAD local hasta un ETD P remoto, y para la interrogación y control de los parámetros del PAD.

El paquete de petición de llamada desde el PAD es similar al del X.25, pero en los cuatro primeros octetos del campo de Datos de Usuario el PAD le dice al ETD P remoto que se está comunicando con un PAD y no con un ETD P. El resto de los octetos (hasta 12) contienen la información que viene desde el ETD C. Durante la fase de transferencia de datos el ETD P remoto puede tener alguna información que debe ser utilizada por el PAD y no por el ETD C; en este caso se hace Q = 1, donde Q es el dígito calificador del primer octeto. El procedimiento para la terminación de la llamada virtual entre el PAD y el ETD P remoto es el mismo de X.25. En efecto, el PAD envía una "invitación de terminación" y el ETD P remoto responde con una "petición de terminación" a la red, con lo cual se termina la conexión.

En general, el rango de la interrogación y control de los parámetros del PAD en un ETD P es similar al disponible en un ETD C.

4.6. LA RECOMENDACION X.75

La Recomendación X.75 fue emitida por el UIT-T en 1984 para normalizar los procedimientos utilizados para la transmisión de paquetes internacionalmente o entre centrales. Con este protocolo se permite el intercambio de paquetes de datos entre dos ETD a través de diferentes redes de conmutación de circuitos. En la Fig. 4.35 se muestra este tipo de estructura.

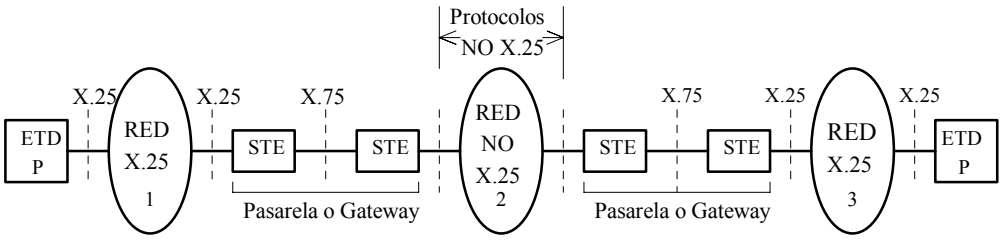


Fig. 4.35. Estructura de la Recomendación X.75 Interred

En la Recomendación X.75 se define los protocolos para una pasarela ("gateway") segmentada (una pasarela es un dispositivo para interconectar redes de diferentes tipos) denominada "terminal de señalización (STE)", que permite el encadenamiento secuencial de circuitos virtuales a través de redes diferentes, como se muestra en la Fig. 4.35. Una vez establecida la llamada virtual, este encadenamiento virtual se mantiene hasta que uno de los usuarios termina el enlace o cuando falla alguna de las pasarelas.

La información que fluye en el enlace X.75 se puede dividir en tres grupos: control de llamadas, información de control de la red y tráfico del usuario. Asimismo, la configuración de esta recomendación contiene también tres niveles como en el caso de la Recomendación X.25. En la Capa Física se utiliza una interfaz G.703 (que describiremos en conexión con la Red ISDN) y a una velocidad de transmisión de 64 kbps, FDX, sincrónica. Se puede utilizar otras velocidades de transmisión; por ejemplo, en los equipos especificados en la Serie V del UIT-T se puede usar velocidades de 2400, 4800, 9600 y 19200 bps. En la Capa Enlace el protocolo es similar al LAPB de X.25, tanto en Módulo 8 como en Módulo 128. Asimismo, los paquetes de la Capa Red son iguales a los de X.25; sin embargo, ellos contienen un nuevo campo de servicios denominado "Network Utilities Field" para información y señalización de red a red. Este campo puede contener información del tipo siguiente:

- Identificación de la Red en Tránsito. Identifica la red a través de la cual pasa una llamada internacional.
- Identificador de Llamada. Identifica cada llamada virtual establecida.
- Indicación de Clase de Velocidad. Especifica la velocidad máxima de transferencia de datos en el circuito virtual.
- Indicación de Clase de Tráfico. Indica el tipo de aplicación que se efectúa, por ejemplo, facsímil.
- Selección de Tamaño de Ventana. Indica los parámetros de control de flujo aplicables.
- Estimación del Retardo en Tránsito. Indica las carácterísticas del retardo en la transmisión.
- Tarifación. Utilizado para efectos de administración.

Los procedimientos de control de flujo, recuperación de errores, reconocimientos, etc. son similares a los de X.25 y no los repetiremos aquí.

La Recomendación X.75 está orientada hacia la interconexión de redes X.25 nacionales, pero puede utilizarse para interconectar redes X.25 a través de redes que no son X.25, como se muestra en la Fig. 4.35. Actualmente se utiliza para la interconexión de las grandes redes públicas de datos internacionales que son predominantemente redes X.25.

Las actuales redes de conmutación por paquetes (DATAPAC, TELENET, TRANSPAC, TYMNET, et.) son, en general, sistemas multipunto, sincrónicos, FDX, y con velocidades de transmisión de 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 56000 y 64000 bps. En

Venezuela PDVSA es la pionera en este tipo de sistema pues posee una red en funcionamiento para interconectar todas sus filiales. Hay otras redes en proyecto, tanto privadas como públicas.

La tecnología de las redes de conmutación de paquetes permite una reducción de los costos de utilización de las facilidades de telecomunicación, control centralizado, aumento de la confiabilidad del servicio, reducción del tiempo de implantación y, aún más importante, facilitar el acceso y uso compartido del recurso información.

4.7. EL SISTEMA PACKET RADIO

4.7.1. Definición

La versatilidad del protocolo X.25 motivó a un grupo de radioaficionados a experimentar la transmisión de paquetes vía radio; de aquí el nombre de Packet Radio, como se le conoce comúnmente. Los primeros experimentos comenzaron en 1978 y ya para 1980 era muy empleado por la comunidad de radioaficionados. En 1987 ya había sido ampliamente conocido y aplicado hasta convertirse en un estándar de facto, siendo designado con las siglas AX.25 (Amateur X.25), Versión 2.0, por la Liga Americana de Radio Relevos (American Radio Relay League, ARRL).

4.7.2. Configuración del Sistema

El sistema AX.25 utiliza los mismos protocolos que en X..25, tanto a nivel de Capa Enlace como a nivel de Capa Red. La diferencia principal está en el campo Dirección del formato LAPB que puede contener hasta 70 octetos. Otra diferencia es que el sistema AX.25 es un protocolo no orientado a conexión, pues opera mediante la transmisión por radio de datogramas que se transmiten y retransmiten por una cadena de relevos que puede cubrir grandes distancias geográficas.

La configuración básica del Sistema Packet Radio se muestra en la Fig. 4.36.

La operación del sistema Packet Radio se comprende mejor si observamos su Capa Enlace, es decir, el protocolo LAPB, el cual se muestra en la Fig. 4.37.

En el Modo Normal de operación, para la generación de los datogramas se utiliza un dispositivo denominado controlador de nodo terminal (Terminal Node Controller, TNC) que opera como un PAD asincrónico con funciones adicionales de modulación y demodulación FSK (Módem Tipo Bell 202). En un comienzo los TNC y los transceptores eran equipos separados, pero actualmente se pueden adquirir integrados en una sola unidad y con velocidades que en los equipos más modernos pueden llegar hasta los 19200 bps. Los radioaficionados han establecido toda una red mundial de nodos a fin de extender el alcance de las transmisiones mediante repetidores; estos repetidores son conocidos con el nombre de "**Digipeaters**" y su función es la de recibir y retransmitir los datogramas de estación en estación.

Puesto que el sistema generalmente opera en semidúplex, entre el TNC y el transceptor de radio se dispone de una señal especial denominada PTT (Push-to-Talk) para notificar los cambios de transmisión a recepción y viceversa. Asimismo, con el objeto de controlar la transmisión y evitar que se pueda estar transmitiendo al vacío, es decir, sin un

interlocutor al otro extremo, se dispone también de una señal CD (carrier detect) que monitorea la presencia de portadoras en el canal.

En el Modo Normal de operación, para la generación de los datogramas se utiliza un dispositivo denominado controlador de nodo terminal (Terminal Node Controller, TNC) que opera como un PAD asincrónico con funciones adicionales de modulación y demodulación FSK (Módem Tipo Bell 202). En un comienzo los TNC y los transceptores eran equipos separados, pero actualmente se pueden adquirir integrados en una sola unidad y con velocidades que en los equipos más modernos pueden llegar hasta los 19200 bps. Los radioaficionados han establecido toda una red mundial de nodos a fin de extender el alcance de las transmisiones mediante repetidores; estos repetidores son conocidos con el nombre de "**Digipeaters**" y su función es la de recibir y retransmitir los datogramas de estación en estación.

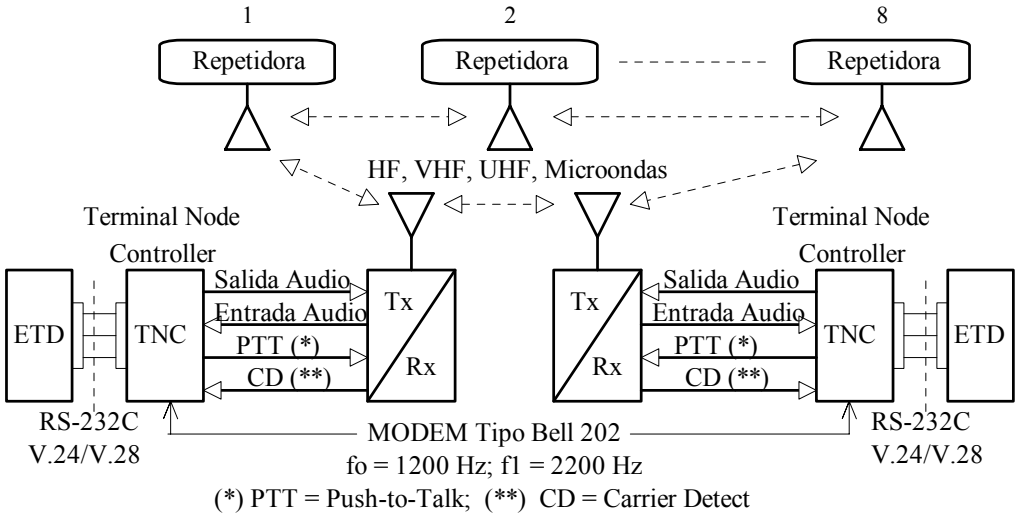


Fig. 4.36. Configuración de un Sistema Packet Radio AX.25.

Puesto que el sistema generalmente opera en semidúplex, entre el TNC y el transceptor de radio se dispone de una señal especial denominada PTT (Push-to-Talk) para notificar los cambios de transmisión a recepción y viceversa. Asimismo, con el objeto de controlar la transmisión y evitar que se pueda estar transmitiendo al vacío, es decir, sin un interlocutor al otro extremo, se dispone también de una señal CD (carrier detect) que monitorea la presencia de portadoras en el canal.

Nótese que la diferencia más notoria respecto al protocolo LAPB de X.25 es la longitud del Campo Dirección, Fig. 4.37; en efecto, la longitud mínima de 14 octetos equivale a una interconexión directa entre el origen y el destino. Si la distancia entre la estación de origen y la estación de destino es muy grande, es necesario utilizar estaciones de relevo cuyo número puede llegar hasta ocho; en este caso el Campo Dirección contendrá 70 octetos.

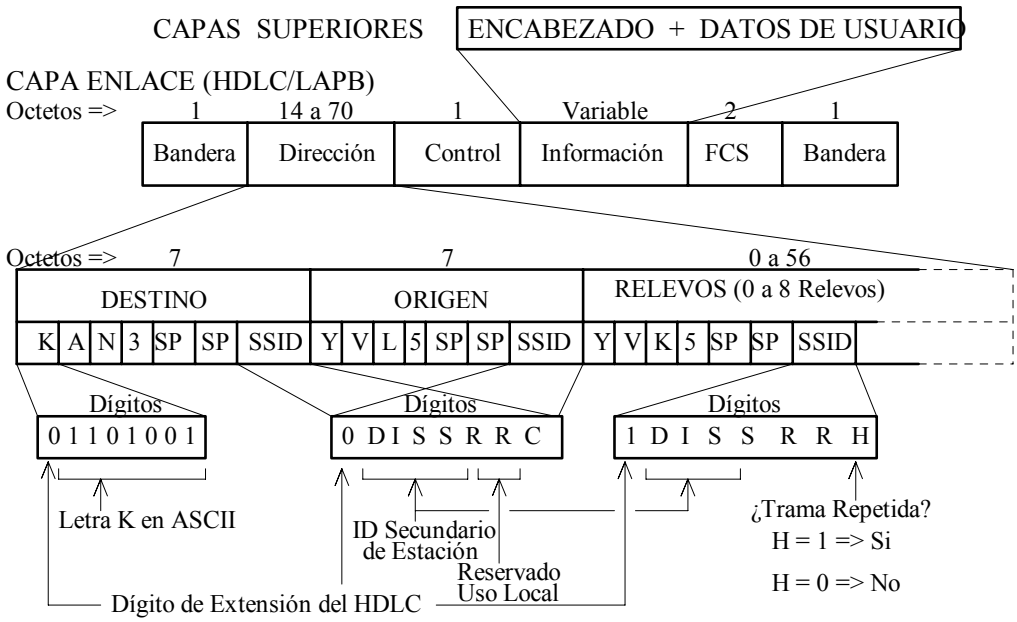


Fig. 4.37. Formato HDLC/LAPB en Packet Radio AX.25.

La trama **UI** (Información no numerada) del Campo Control permite transmitir datos desde una estación sin estar conectada a una estación destino. Como no hay conexión en este momento entre las dos estaciones, no existe detección de errores. Esto significa que no hay garantía que la trama UI haya sido recibida sin errores. Este tipo de trama o datograma se envía para llamados generales (**CQ**), balizas ("beacons"), en discusiones abiertas (conferencias) o cuando no se necesita que haya una corrección de errores en la Capa Enlace.

Además del Modo de Operación Normal, actualmente el sistema Packet Radio puede ser utilizado con paquetes de programa especiales, de los cuales el más conocido es el Programa KISS. Este programa permite la comunicación por la Internet utilizando los protocolos TCP/IP, que describiremos más adelante. Una descripción del programa KISS está fuera de los propósitos de este libro.

4.8. LOS PROTOCOLOS TCP/IP

4.8.1. Introducción

El Protocolo TCP ("Transmission Control Protocol") y el Protocolo IP ("Internet Protocol"), conforman un conjunto de protocolos desarrollados para permitir a un computador o usuario compartir recursos de comunicación a través de una red o red de redes (Internet). Este conjunto de protocolos fue desarrollado por una comunidad de investigadores, de los Estados Unidos, teniendo como base la red ARPANET. Hay varios protocolos de tipo "Internet", pero TCP e IP son los protocolos más conocidos, y comúnmente se utiliza el término compuesto TCP/IP para denominarlos. En general, estos protocolos ofrecen servicios de transferencia de archivos (FTP), conexión remota ('log in")

con otro computador en la red (TELNET), correo electrónico, etc. Pero muchas veces un usuario desea utilizar algunos servicios especiales, tales como sistemas de archivos de red, impresión y graficación remotas, servidores de nombres, servidores terminales, etc. Esto ha llevado a la definición del modelo "cliente/servidor" en los servicios de red. Un "servidor" es un sistema que provee un servicio específico para el resto de la red; mientras que un "cliente" es otro sistema que utiliza ese servicio. Nótese que el servidor y el cliente no necesariamente están en diferentes computadores; ellos pueden ser diferentes programas que se están ejecutando en un mismo computador. Para los servicios cliente/servidor existe en el comercio una gran cantidad de paquetes de programas (software) que se pueden utilizar pero que aquí no vamos ni a nombrar ni a describir.

4.8.2. Descripción general de los Protocolos TCP/IP

TCP/IP es un conjunto de protocolos estratificados que se pueden identificar con las capas correspondientes del Modelo de Referencia ISO/OSI. El protocolo TCP, a nivel de Capa Transporte, es el responsable de que los comandos correspondientes a alguna aplicación, correo electrónico por ejemplo, se transmitan a través de una red; el protocolo TCP vigila qué es lo que se ha enviado y retransmite todo aquello que no pudo llegar al otro extremo. Si un mensaje es muy grande para enviarse en un solo datograma, por ejemplo el texto a transmitir, TCP lo segmenta en varios datogramas y se asegura que ellos lleguen correctamente al extremo receptor. Pero TCP tiene que solicitar servicios provistos por el protocolo IP a nivel de Capa Red. Por su parte, el protocolo IP es el responsable del enrutamiento de los datogramas individuales. En términos más sencillos, TCP le entrega a IP un datograma con una dirección de destino, y el protocolo IP coloca ese datograma en el punto de destino. Nótese que IP no sabe si ese datograma está relacionado en alguna forma con datogramas anteriores o futuros provenientes de TCP.

Podemos ver, a grandes rasgos, que las aplicaciones TCP/IP utilizan cuatro capas:

- Un protocolo de aplicación, por ejemplo, correo electrónico
- Un protocolo como el TCP que provee servicios que se necesitan en muchas aplicaciones. Corresponde a la Capa Transporte ISO/OSI
- Un protocolo IP que provee los servicios básicos para llevar datogramas desde la fuente hasta el destino. Corresponde a la Capa Red ISO/OSI
- Otros protocolos de Capas Enlace y Física necesarios para manejar un cierto medio físico, como, por ejemplo, X.25, ETHERNET (ETHERNET es un sistema que veremos en el Capítulo VI), o una línea punto a punto

Comparado con el Modelo de Referencia ISO/OSI, una aplicación que utilice los protocolos TCP/IP tiene la configuración siguiente, en la cual se utiliza TCP/IP sobre ETHERNET, Fig. 4.38.

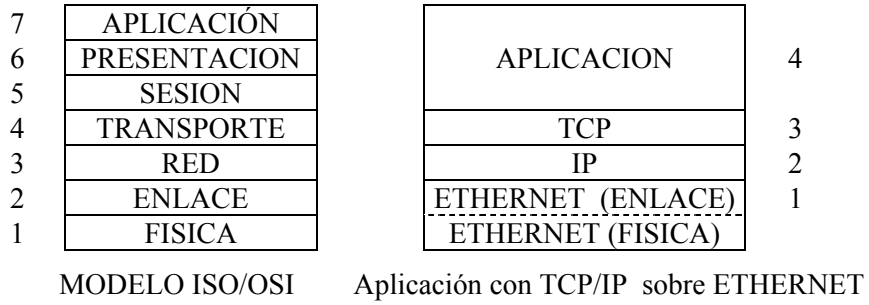


Fig. 4.38. Comparación TCP/IP vs ISO/OSI.

El conjunto TCP/IP opera con una tecnología sin conexión y la información se transfiere como una secuencia de datogramas; cada uno de estos datogramas son enviados individualmente a través de la red. Hay algunas formas para abrir conexiones, por ejemplo, para comenzar una conversación que continuará durante un cierto tiempo; sin embargo, en algún momento la información contenida en estas conexiones necesita ser segmentada en datogramas, los cuales son tratados por la red como entidades independientes. Cuando los datogramas de una misma conexión están en tránsito, la red no sabe si hay alguna relación entre ellos; es perfectamente posible que un datograma que se transmitió primero llegue después de otro que se transmitió posteriormente. Es posible también que por alguna circunstancia un datograma se pierda en la red; en este caso hay que retransmitir el datograma perdido. El conjunto TCP/IP proporciona los medios para la recuperación de la información perdida. La estructura del conjunto TCP/IP se muestra en la Fig. 4.39.

La trama TCP, Fig. 4.39, contiene los campos Números de Puerto de Origen y de Destino y un Número de Secuencia. Los números de puerto se utilizan para controlar las diferentes conexiones, mientras que los números de secuencia se utilizan para asegurarse que el extremo de destino reciba los datogramas en el orden correcto y que no se haya perdido ninguno. Nótese que TCP no numera los datogramas sino los octetos; si cada datograma contiene 500 octetos, el primer datograma de una serie se numerará 0, el segundo datograma se numerará 500, el tercer datograma se numerará 1000 y así sucesivamente. El campo Número de ACK o de Reconocimiento se utiliza para indicar la recepción correcta de los datogramas correspondientes; por ejemplo, si se recibe un número ACK igual a 1500, se está indicando que se ha recibido correctamente 1500 octetos o tres datogramas. Si en el origen no se recibe un reconocimiento después de un cierto tiempo cumplido, se retransmitirá el datograma correspondiente. Los tres siguientes campos (dos octetos) del formato TCP se utilizan para la gestión de la red.

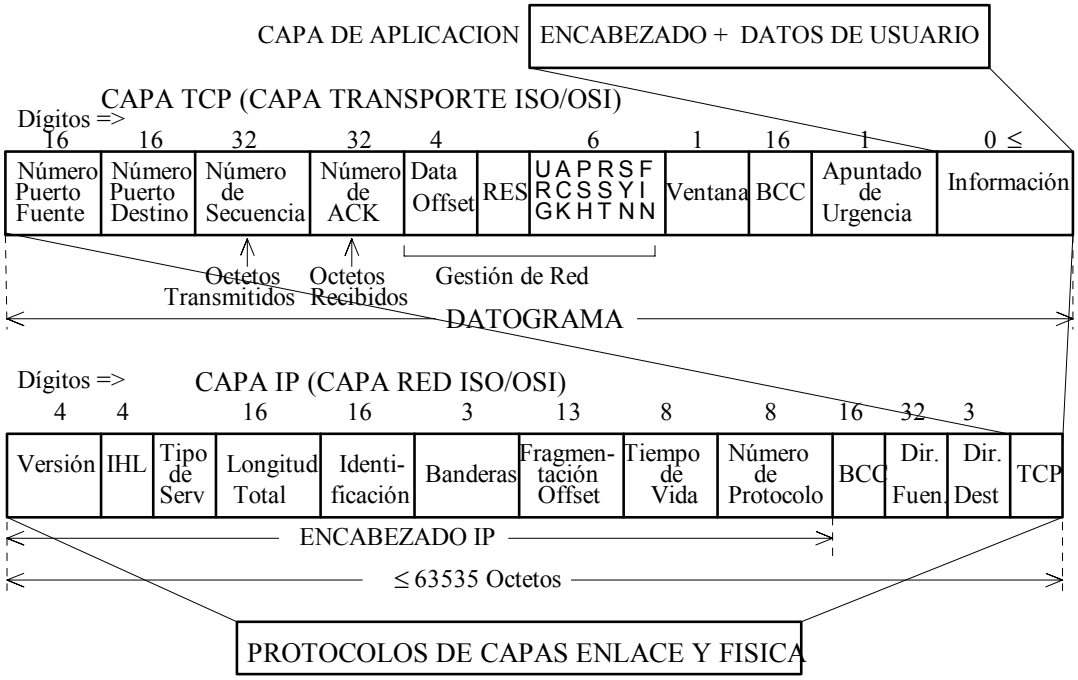


Fig. 4.39. Formatos de los Protocolos TCP/IP.

El Protocolo TCP

El protocolo TCP es el responsable de la segmentación del mensaje en datogramas, del reensamblaje correspondiente en el destino, de la retransmisión de los datogramas perdidos y de la reordenación del mensaje para ser entregado al usuario final.

El campo Ventana se emplea para controlar la cantidad de datos que pueden estar en tránsito en un momento dado. En general, no es práctico esperar que cada datograma sea reconocido antes de enviar el próximo, lo que produciría retardos de transmisión; por otro lado, no se puede enviar datogramas indiscriminadamente pues un computador de alta velocidad superaría la capacidad de un computador más lento. Esta situación se resuelve si cada terminal indica su capacidad de recepción de datos colocando en el campo Ventana un valor dado en octetos. A medida que el computador recibe datos, la cantidad indicada en la ventana disminuye, y cuando llega a cero el terminal transmisor debe detener la transmisión. A medida que el terminal receptor procesa los datos, va aumentando el valor de ventana indicando que está listo para recibir más datos. A menudo se puede utilizar un mismo datograma para reconocer recepción de datos y al mismo tiempo especificar en la ventana el valor de octetos apropiado a las condiciones de la interconexión.

El campo Apuntador de Urgencia permite que un extremo le diga al otro saltar a un octeto en particular; a menudo esto es útil para manejar eventos asincrónicos, por ejemplo, cuando se escribe un carácter de control o cualquier otro comando que interrumpe la salida.

El Protocolo IP

En el nivel IP se encapsulan los datogramas TCP con el agregado de numerosos elementos de servicio. De importancia primordial en IP son los campos Dirección Fuente y Dirección Destino, que deben ser direcciones de INTERNET de 32 bits; por ejemplo, la dirección INTERNET del servidor TELNET VOLTA de la Universidad de Los Andes es 150.185.162.18. Estos campos permiten la trayectoria segura de un datograma a través de INTERNET.

El campo Versión indica el tipo de protocolo que se está utilizando. Esto es de utilidad cuando se emite una nueva versión de protocolo, ya que es casi imposible sincronizar el cambio de una versión a otra. El campo IHL indica la longitud del Encabezado IP en incrementos de 32 dígitos. El campo Tipo de Servicio permite a los usuarios especificar la clase de servicio que ellos desearían, pero no hay garantía de que las pasarelas lo tomen en cuenta.

El campo Longitud Total es la longitud total, en octetos, del formato IP. Su valor máximo es de 63535 octetos. El campo Identificación es un número de secuencia, el cual, junto con las direcciones de origen y destino y el protocolo de usuario, identifican unívocamente un datograma.

Los campos Banderas y Fragmentación Offset se utilizan para el seguimiento de los fragmentos cuando un datograma tiene que ser segmentado. Esto puede suceder cuando los datogramas tienen que pasar por una red para la cual ellos son muy grandes. El campo Tiempo de Vida es un número que va disminuyendo cada vez que el datograma pasa por una red. Cuando este número se hace cero, el datograma es desechado. Esto se hace con el fin de que si el datograma cae en un lazo cerrado, él no podrá errar indefinidamente de un lado a otro.

El campo Número de Protocolo indica qué protocolo de capas superiores (Transporte y Aplicación) va a operar sobre el datograma. El campo BCC opera sobre el Encabezado IP para control de error. La verificación de error generalmente no se utiliza en los datogramas, pero en este caso hay que efectuarla pues no se quiere que un datograma en error pueda arribar a un destino no deseado. En IP los datogramas en error son descartados de inmediato y la recuperación del error se deja a las capas superiores.

Esta breve descripción de los protocolos TCP/IP no es suficiente para conocer con profundidad los protocolos utilizados en la INTERNET, pero sí para tener una idea general de cómo operan. Sin embargo, el lector interesado en una descripción más detallada la puede descargar desde INTERNET bajo las palabras claves “internet networking protocols”.

♣ Ejemplo 4.10

Se va a efectuar una transmisión de la forma TCP/IP/HDLC. De la Capa Aplicación vienen 450 octetos de información. Si la transmisión se efectúa por un canal de 64 kbps, ¿En cuánto tiempo se transmiten los 450 octetos?

Solución:

Sea la Fig. 4.39. De la Capa Aplicación bajan 450 octetos = 8x450 = 3600 dígitos. En la Capa TCP se le agregan 160 dígitos, para un total en la Capa TCP de 3760 dígitos. Estos 3760 dígitos bajan a la Capa IP en donde se le agregan 160 dígitos, para un total en la Capa IP de 3920 dígitos. Estos 3920 dígitos bajan a la Capa Enlace HDLC en donde se le agregan 48 dígitos, para un total en la Capa Enlace de 3968 dígitos, que corresponden a una información I = 3968 bits en la trama a transmitir.

Si en el canal la velocidad es V_i = 64 kbps, entonces, por definición, $V_i = \frac{I}{T}$ bps, de donde $T = \frac{I}{V_i} = \frac{3968}{64x10^3} = 62x10^{-3}$ seg. Los 450 octetos se transmiten en 62 milisegundos.

Si la transmisión hubiera sido por una Troncal E1 que transmite a 2048 kbps, el tiempo de transmisión sería $T = \frac{3968}{2048x10^3} = 1{,}938$ milisegundos.

Obsérvese que la velocidad neta de transmisión es $V_{in} = \frac{8x450}{1{,}938x10^{-3}} = 1858$ kbps y no 2048 kbps. ♣

4.9. RESUMEN

En este capítulo se describen las funciones principales de las Capas Enlace de Datos y Red del Modelo de Referencia ISO/OSI, y algunos de los principales protocolos tanto de la Capa Enlace como de la Capa Red.

Un protocolo de comunicación es un conjunto de reglas y procedimientos que proporcionan una técnica uniforme para gestionar un intercambio de información. Estas reglas y procedimientos proveen la administración, asignación y control de los recursos involucrados en el proceso de intercambio de información.

La Transmisión de Datos tiene que ver solamente con los tres primeros niveles, incluyendo el medio físico de interconexión. Desde el punto de vista de las telecomunicaciones, el conocimiento de las funciones de las tres primeras capas es suficiente para entender, diseñar, operar y mantener los sistemas de comunicación comúnmente utilizados en la práctica.

La Capa Enlace de Datos es la responsable de la interconexión directa, transparente y libre de errores entre dos puntos o entre dos nodos adyacentes dentro de una red. Ella proporciona los medios para activar, mantener y desactivar el enlace de datos. La Capa Red, opera a través de la red (de fin a fin), a diferencia de la Capa Enlace la cual opera de punto a punto o nodo a nodo. La función básica de la Capa Red es la de proporcionar una trayectoria eficiente para el flujo de datos a través de la red; esto implica funciones de direccionamiento, enrutamiento, control de flujo, control de error y “empaquetamiento” de

la información desde un nodo de entrada a la red (nodo de origen) hasta un nodo de salida de la red (nodo de destino).

En este capítulo se revisan algunos parámetros de la transmisión digital de señales como, por ejemplo, los códigos, los modos de operación asincrónica y sincrónica, transmisión semidúplex y fulldúplex, y se hace una breve introducción a los protocolos de comunicación, tanto de Capa Enlace como de Capa Red.

Se establece la clasificación básica de los protocolos de Capa Enlace en Protocolos por Control de Caracteres (Character-Oriented Protocols), Protocolos de Control por Conteo de Octetos (Byte-Count Protocols) y Protocolos de Control por Dígitos (Bit-Oriented Protocols).

De los Protocolos de Control por Caracteres se describe el Protocolo BSC de la IBM, sus caracteres de control, las diferentes tramas, los mecanismos de transmisión, las formas de control de flujo y recuperación de error, y el procedimiento para asegurar la transparencia de los datos. Asimismo, se describe las carácterísticas de los protocolos Xmódem y Ymódem utilizados para la transferencia de archivos.

Como ejemplo de un Protocolo por Conteo de Octetos se describe el protocolo DDCMP, de la DEC. Se describe la configuración del Formato DDCMP, con la mayoría de los mensajes de Información, Control y Supervisión, y el mecanismo básico para el intercambio de datos.

Los Protocolos de Control por Dígitos son los protocolos a nivel de enlace más utilizados. Se estudia con cierto detalle los protocolos SDLC y HDLC de gran aplicación en los sistemas de transmisión de datos. En particular se describen los formatos y los mecanismos para control de flujo y recuperación de error.

Los Protocolos a nivel de Capa Red se estudian desde el punto de vista de la Transmisión Digital por Conmutación de Paquetes y la Recomendación X.25 del UIT-T. Se revisan las carácterísticas más importantes de la Recomendación X.25 y aquellas otras recomendaciones que tienen relación con ella: la Triple X y la Recomendación X.75.

Finalmente se da una breve descripción de los Protocolos TCP/IP, de sus principales aplicaciones y de los formatos de Capa TCP (Transporte ISO/OSI) y la Capa IP (Red ISO/OSI).

4.10. CUESTIONARIO

1. ¿Qué es un Protocolo de Comunicación?
2. ¿Cuáles son las Capas ISO/OSI involucradas en la Transmisión de Datos?
3. Se dice que la Capa Enlace opera de punto a punto mientras que la Capa Red opera de fin a fin. ¿Qué significa esto?
4. Describa lo que es operación sincrónica y asincrónica

5. El siguiente mensaje está en Código ASCII, asincrónico, sin dígito de paridad y el dígito de pare es de dos intervalos. La flecha indica el sentido del flujo de datos. El LSB se transmite de primero. ¿Qué significa el mensaje?

   ← 0101100111010100111100100111110100101111000100111101000011 11

6. El siguiente mensaje está en Código ASCII, sincrónico, la trama es como la de la Fig. 4.3. ¿Qué significa el mensaje?

   ← 0110100011010010000001010101001100110000010010000

7. Se tiene el número [7CE] escrito en hexadecimal. Escríbalo ahora en Decimal y en Binario
8. Diga algunos de los procedimientos de los Protocolos de Control a nivel de Enlace
9. Dibuje una configuración multipunto con una Estación Primaria y cuatro Estaciones Secundarias Remotas. Los enlaces son por radio. ¿Cuántas frecuencias son necesarias en operación semidúplex y fulldúplex?
10. ¿Qué es un Protocolo de Control por Caracteres?
11. ¿Cuáles son las características de control en el Protocolo BSC?
12. Diga la diferencia entre “Polling” y “Selecting”
13. Sea la Fig. 4.8(a), donde n = 256, m = 16 y BCC = 16.
    (a) La transmisión se hace por un módem V.32bis. ¿En cuánto tiempo se transmite una trama BSC?
    (b) Si la duración de la transmisión de la trama debe estar entre 850 y 950 milisegundos, ¿Qué Módem de la Serie V se puede elegir?
14. ¿Cómo se efectúa la verificación de error en el Protocolo BSC?
15. En BSC, en los reconocimientos positivos se contesta con ACK 0 ó ACK 1. ¿Cuándo se utiliza uno u otro?
16. En BSC, ¿Cómo se efectúa la fase de transferencia de datos tanto en polling como en selecting?
17. ¿Cómo se asegura la transparencia de datos en el Protocolo BSC?
18. Cómo se verifica el control de error en BSC y en Xmódem?
19. ¿Qué es un Protocolo de Control por Conteo de Dígitos?
20. Dibuje el formato de trama del Protocolo DDCMP y describa cada uno de los campos que lo constituyen
21. ¿Qué es un Protocolo de Control por Dígitos?
22. Diga algunas diferencias entre los protocolos SDLC y HDLC
23. Dibuje el formato de trama del Protocolo HDLC y describa cada uno de los campos que lo constituyen

24. Describa las funciones de las diferentes tramas del Protocolo HDLC de acuerdo con el contenido del Campo de Control
25. El contenido del Campo de Control de una trama HDLC dada tiene la forma 00011110 (el LSB está a la izquierda). Diga toda la información referente a la trama
26. Explique en qué consisten los modos de operación NRM, ARM y ABM
27. ¿Cómo se verifica el control de transparencia en HDLC?
28. Una trama HDLC/LAPB de X.25 tiene la forma siguiente:

    01111110100000001111110011010111111101101111110

    (a) Diga toda la información contenida en esta secuencia de dígitos binarios

    (b) Esta secuencia no está protegida para asegurar la transparencia. Haga lo que corresponde de acuerdo con la Pregunta 27
29. ¿Cómo se efectúa el Control de Flujo y la Recuperación de Error en HDLC? (Estudie con atención la Fig. 4.12)
30. Describa las funciones básicas de la Capa Red
31. Explique el mecanismo de la Transmisión Digital por Conmutación de Paquetes
32. Describa algunas de las características de las Redes de Conmutación de Paquetes
33. ¿En qué consiste los Servicios de Llamadas virtuales?
34. Explique los aspectos generales de la Recomendación X.25. En particular, estudie con atención las Figs. 4.24, 4.25 y 4.26.
35. Describa las categorías y modos de asignación de canales lógicos en X.25
36. Describa los campos que constituyen el Paquete de Datos X.25
37. El campo Datos de Usuario de un Paquete de Datos X.25 contiene 256 octetos y la trama HDLC/LAPB se transmite en 220,83 milisegundos. ¿Cuál es el valor de la velocidad de transmisión, en bps, en el canal? Si la velocidad de transmisión es de 56 kbps, ¿En cuánto tiempo se transmite la trama?
38. Describa las tres fases de la secuencia normal en la Transferencia de Datos X.25, en el servicio de llamadas virtuales conmutadas
39. Describa los mecanismos de control de flujo y recuperación de error en X.25
40. Describa brevemente la Recomendación X.75 y el conjunto de normas UIT-T conocido como “La Triple X”.
41. ¿Qué es Packet Radio? Dibuje la configuración física de un Sistema de Packet Radio y describa las funciones de cada elemento
42. Describa el formato de trama HDLC/LAPB en Packet Radio X.25
43. ¿Qué son los Protocolos TCP/IP? Describa las capas utilizadas en las aplicaciones TCP/IP; en particular, estudie cuidadosamente la Fig. 4.39.

CAPITULO V

COMUNICACIONES INDUSTRIALES

5. 1. INTRODUCCION

La Automatización Industrial se ha convertido en un medio fundamental para mejorar el rendimiento y la eficacia de las funciones operacionales de una empresa industrial moderna. La obtención de datos en el momento y punto de origen, al integrarse al ciclo de procesamiento y control de las operaciones y al actualizar las bases de datos en forma automática, permite la toma de decisiones operacionales, tácticas y estratégicas más eficaces cualquiera que sea la naturaleza de la empresa.

Las estrategias básicas en la automatización de procesos industriales está dirigida hacia los siguientes objetivos:

1. Aumentar la eficiencia de las operaciones y procesos industriales a través de la aplicación de las modernas tecnologías de la Electrónica, la Informática y las Telecomunicaciones.
2. Incrementar la productividad de los recursos humanos mediante:
   (a) La automatización de las actividades manuales y repetitivas
   (b) La dotación de procedimientos, equipos y sistemas que permitan disponer de la información en forma oportuna y confiable en el sitio y momento deseados
   (c) Disminuir costos usando menor energía y manteniendo inventarios mínimos
   (d) Aumentar la disponibilidad de la planta física mediante mantenimiento centrado en la confiabilidad
3. Transformar la forma de operar mediante la integración de los puntos 1 y 2, y la aplicación de nuevos métodos de análisis de procesos y de la teoría del control, y la incorporación de las tecnologías más avanzadas.

5.1.1. Integración de la Red de Comunicaciones

Las telecomunicaciones desempeñan una función de primordial importancia en la implantación de los modernos sistemas de Automatización Industrial. Esta función es vital para aquellas empresas cuyas operaciones se encuentran dispersas geográficamente, como es el caso de los sistemas de distribución de energía eléctrica, la supervisión y control de instalaciones petroleras, patios de tanques, poliductos, refinerías, industria fabril, etc.

La Red de Telecomunicaciones para la Automatización Industrial tiene como objetivos:

(a) La recolección de datos, instantáneamente desde las localidades remotas

(b) La transmisión de los datos hasta los Centros de Control de Operaciones y de Procesamiento de la Información

(c) Proveer los recursos para aumentar la confiabilidad y seguridad en los procesos de producción mediante detección temprana de condiciones de alarma, supervisión y control continuo de procesos de alto riesgo, verificación del estado de las instalaciones y seguimiento de las condiciones de operación de estaciones remotas

(d) Proveer paralelamente Servicios de Transmisión de Voz e Imágenes

Para cumplir con estos objetivos la red integrada de comunicaciones debe estructurarse con base en una arquitectura bien definida y bajo las premisas de racionalización, conectividad, calidad y confiabilidad.

En la mayoría de las grandes empresas industriales el modelo de sistemas tiene una estructura piramidal de la forma mostrada en la Fig. 5.1.

Fig. 5.1. Modelo de Sistemas de una Empresa Industrial

En el Nivel Operacional es donde se llevan a cabo todas las actividades y procesos básicos que constituyen el objetivo de la empresa, por ejemplo, la producción de crudo en la industria petrolera o la manufactura de un producto. La velocidad de la transferencia de información es variable, pudiendo extenderse desde 300 bps hasta 20 Mbps.

En el Nivel Táctico es donde se llevan cabo actividades que tienen que ver directamente con las actividades del Nivel Operacional. Estas actividades pueden incluir la planificación de operaciones y mantenimiento, las labores de ingeniería, el control de inventarios, el manejo de materiales, etc. En este nivel la velocidad de transferencia de la información es alta, sobre los 20 Mbps.

En el Nivel Estratégico se manejan todas las directrices de producción y mercadeo, las políticas de la empresa, la fijación de las metas del Nivel Táctico y, en general, la gestión y administración global de la empresa. En este nivel la velocidad de transferencia de información es generalmente muy alta, del orden de los 100 Mbps.

Pero en una empresa no automatizada estos tres niveles están casi desconectados entre sí. La poca integración entre los Niveles Estratégicos, Tácticos y Operacionales se debe a todas o algunas de las siguientes causas.

- Diversidad de marcas, sistemas operativos, protocolos de comunicación y bases de datos. Algunos de estos protocolos de comunicación son primitivos,

ineficientes y específicos para la transmisión de una información predeterminada. Específicamente, en el Nivel Operacional puede existir toda una variedad de protocolos industriales poco o nada compatibles entre sí.

- Dispersión de datos con redundancia parcialmente controlada. En algunos casos la misma información es representada por varias formas distintas (nomenclaturas diferentes) lo cual obliga a mantener tablas de conversión con los consiguientes problemas de actualización manual de las tablas.
- Necesidad de grandes esfuerzos para el soporte y mantenimiento de la estructura tanto en equipos (hardware) como en programas (software), cuya obsolescencia es rápida.
- La interacción con los diversos sistemas a través de interfaces de usuario disímiles y poco amistosas.
- Poca integración entre las áreas de control de procesos, informática e instrumentación debido a la rápida evolución de cada área. Los avances en Electrónica, Informática y Telecomunicaciones, impulsarán y estimularán cada vez más la necesidad de integración.

El objetivo de la integración de la información en los tres Niveles es entonces la creación de un sistema distribuido con una alta conectividad e interoperabilidad.

Para la integración completa de los Niveles Operacionales, Tácticos y Estratégicos se requiere

(a) una infraestructura sólida de comunicaciones que comprenda:

--- Redes orientadas al control local

--- Redes orientadas al control supervisor

--- Redes orientadas al soporte de la planificación, ingeniería, gerencia y administración

--- Interconexión con Redes Externas a la Empresa

(b) mantener una visión integrada de los sistemas, tanto desde el punto de vista del modelo del flujo de datos como desde el punto de vista de la integración de los procesos.

En resumen, se requiere el diseño y construcción de un sistema integrado de red que permita

(a) la conectividad e interoperabilidad de todos los sistemas de información y control

(b) que facilite el acceso a cualquier subsistema (o subred)

(c) con un manejo integrado, flexible, de gran calidad y confiabilidad, del flujo de información entre los niveles Operacionales, Tácticos y Estratégicos.

En la Fig. 5.2 se muestra en forma esquemática la estructura integrada de una empresa industrial moderna donde se alcanzan los objetivos anteriores. Esta estructura se está imponiendo en las todas las grandes empresas; en particular, en Venezuela ha sido PDVSA la pionera en el establecimiento de este concepto.

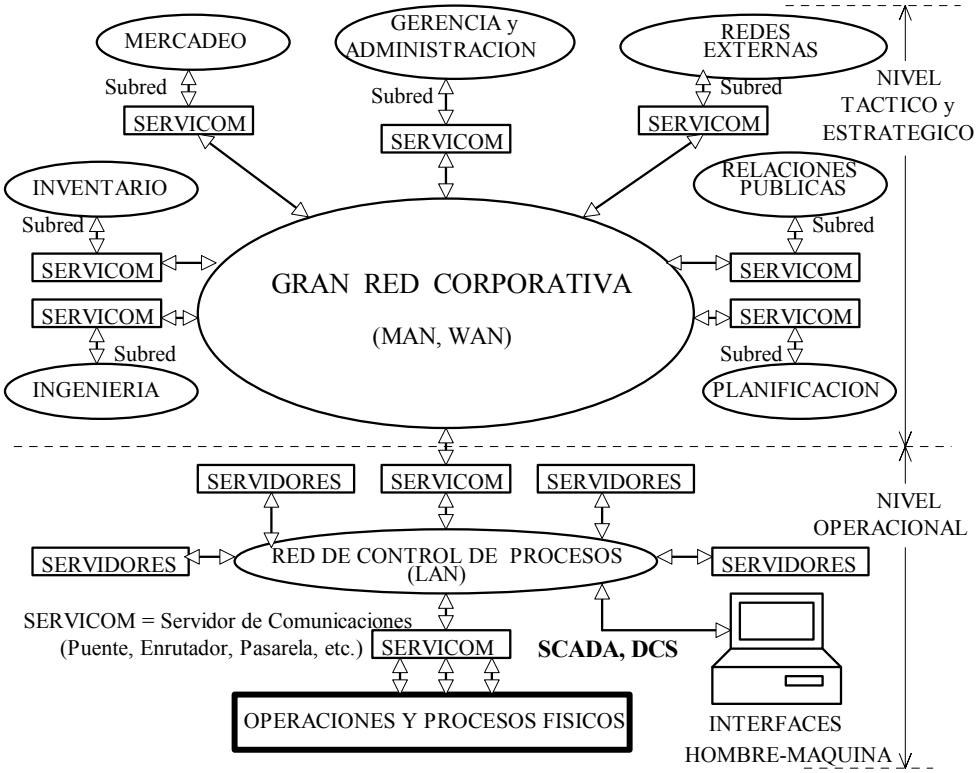


Fig. 5.2. Flujo de Información en una Empresa Industrial Moderna

La "Gran Red Corporativa" simplemente es una red MAN o WAN de alta velocidad tipo FDDI, DQDB, ISDN, Frame Relay, etc., con estándares SONET y tecnologías y servicios ATM o SMDS. La Red de Procesos generalmente es una Red de Area Local (LAN). Dentro del área de Operaciones y Procesos Físicos se encuentran las Redes de Campo, que se describen en este capítulo. Las redes LAN, MAN y WAN se describirán en el Capítulo VI.

En el contexto del presente libro, las "Comunicaciones Industriales" se refiere a todo el intercambio de información que se lleva a cabo en el Nivel Operacional, dentro de las tres primeras capas del Modelo de Referencia ISO/OSI.

5..2. Definiciones

Telemetría

La Telemetría es el uso de equipos eléctricos o electrónicos para detectar, acumular y procesar datos físicos en un lugar, para después transmitirlos a una estación remota donde pueden procesarse y almacenarse. Un ejemplo de la utilidad de la telemetría es la medición, transmisión y procesamiento de magnitudes físicas en sistemas de automatización de

procesos industriales. Estos datos pueden ser, por ejemplo, la temperatura y la velocidad de un líquido en una tubería. Estas magnitudes son las variables de campo.

Telecontrol

Un proceso industrial completo incluye también el control (local o remoto) de las operaciones que se están llevando a cabo. Muy ligado a la Telemetría se tiene entonces el Telecontrol, mediante el cual, una vez recibidas y procesadas las señales o variables de campo, se procede a modificar las condiciones de operación de los procesos de acuerdo con un plan preestablecido, o de acuerdo con las circunstancias. El ente que toma las decisiones puede ser un operador experimentado o un dispositivo automático.

Un sistema de procesamiento industrial básicamente es un sistema de telemetría y telecontrol.

5.1.3. Sistemas de Procesamiento y Control Industrial

A Nivel Operacional, un sistema de procesamiento y control industrial se puede representar esquemáticamente como se muestra en la Fig. 5.3.

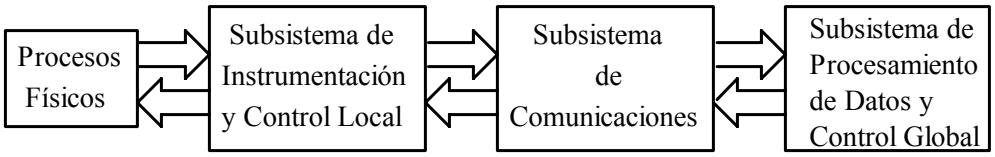


Fig. 5.3. Configuración General de un Sistema de Procesamiento y Control.

La configuración conceptual mostrada en la Fig. 5.3 se materializa en un sistema como el mostrado en la Fig. 5.4.

La red de telecomunicaciones, junto con los sistemas de instrumentación, control y procesamiento de los datos de campo (Redes de Campo), ha permitido el desarrollo del concepto de Sistema SCADA (Supervisory Control and Data Adquisition) para la automatización de procesos industriales.

El Sistema SCADA

El Sistema de Control Supervisorio y de Adquisición de Datos (SCADA) es una tecnología que permite obtener y procesar información de procesos industriales dispersos o lugares remotos inaccesibles, transmitiéndola a un lugar para supervisión, control y procesamiento, normalmente una Sala o Centro de Control. Un SCADA permite entonces supervisar y controlar simultáneamente procesos e instalaciones distribuidos en grandes áreas, y generar un conjunto de información procesada como, por ejemplo, presentación de gráficos de tendencias e información histórica, de informes de operación y programación de eventos, programas de mantenimiento preventivo, etc. En la Fig. 5.4 se muestra la configuración típica de un Sistema de Automatización Industrial a Nivel Operacional (Nivel inferior de la pirámide de la Fig. 5.1). En el Nivel 1, Fig. 5.4, se encuentran las Redes de Campo, cuya descripción veremos más adelante. El Nivel 2 es el dominio de la telecomunicación y el Nivel 3 es el dominio de la Supervisión y Control Global.

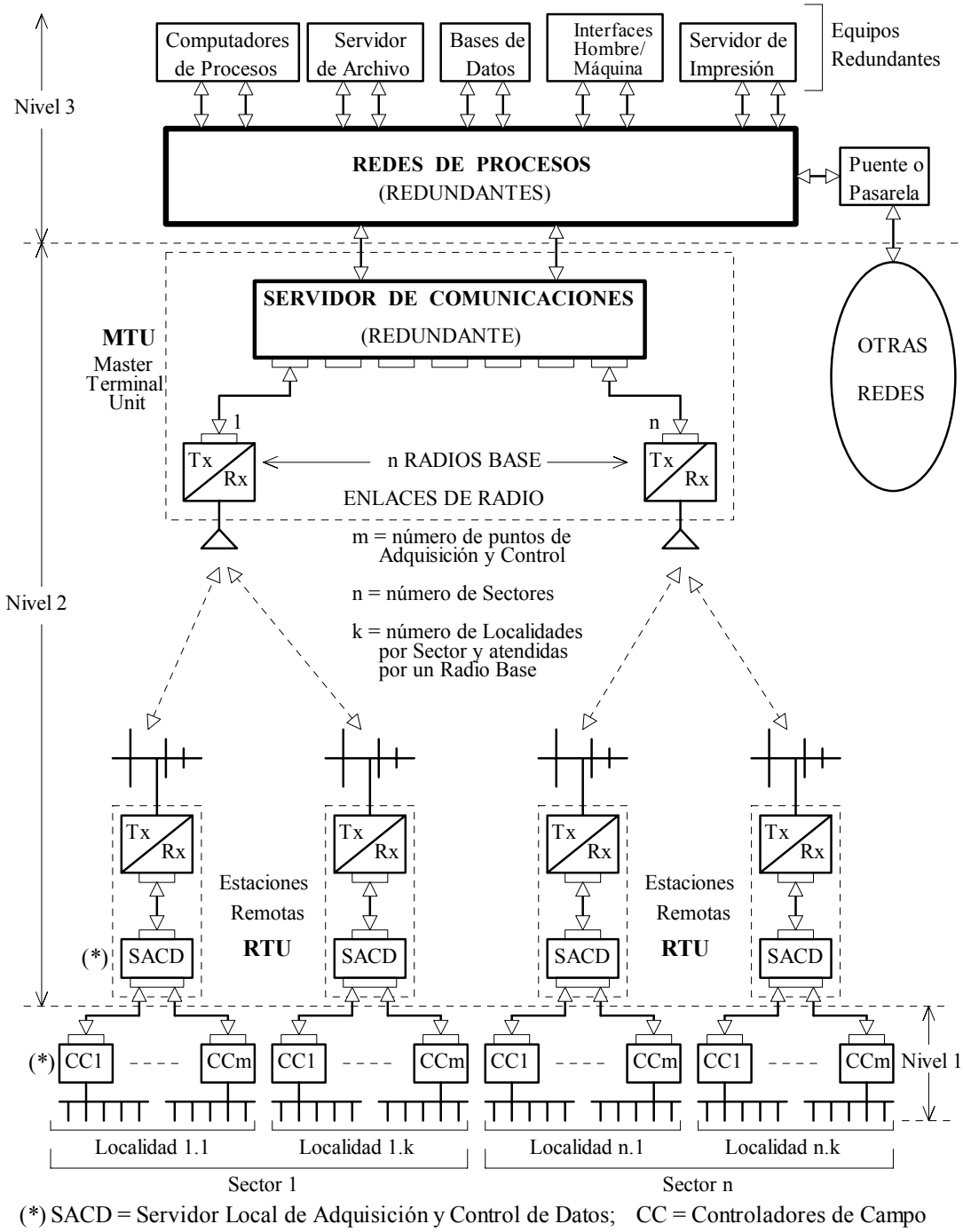


Fig. 5.4. Nivel Operacional de un Sistema Integrado de Automatización y Control.

Un SCADA no debe confundirse con un Sistema de Control Distribuido ("Distributed Control System, DCS") aunque los principios y tecnologías que ambos utilizan son similares. La diferencia principal es que los DCS normalmente se utilizan para controlar procesos industriales complejos dentro de un área pequeña, por ejemplo, una planta industrial y las restricciones en tiempo son muy diferentes. En cambio, el SCADA se emplea para el control y supervisión de áreas geográficas muy grandes, como, por ejemplo, un sistema de distribución de energía eléctrica o las instalaciones de las compañías petroleras en el Lago de Maracaibo, y la red de comunicaciones es su soporte físico.

La incorporación de un SCADA en un proceso permite al usuario conocer el estado de las instalaciones bajo su responsabilidad y coordinar eficazmente las labores de producción y mantenimiento en el campo, supervisando y controlando operaciones críticas y proporcionando los recursos para recibir la información en forma dinámica y en tiempo real, y proceder a su procesamiento ulterior.

Elementos de un Sistema de Automatización a Nivel Operacional

Como se puede observar en la Fig. 5.4, se puede distinguir tres niveles o subsistemas: el Nivel 1 o Subsistema de Instrumentación y Control Local, el Nivel 2 o Subsistema de Comunicaciones y el Nivel 3 o Subsistema de Procesamiento y Control Global.

Subsistema de Instrumentación y Control Local

Este es el nivel que se encuentra en contacto directo con el proceso y por lo tanto se encuentra distribuido en las localidades remotas a las que se quiere controlar y supervisar. Aquí se encuentran las Redes de Campo que incluyen toda la instrumentación asociada con el proceso, los elementos finales de control, así como los medios de conversión de la información en un formato digital apropiado para su transmisión al Nivel 3 o Subsistema de Procesamiento de Datos y Control Global. Este Nivel 1 o Subsistema de Instrumentación y Control Local está constituido por equipos específicos (controladores y redes de campo) que se ubican lo más cerca posible del proceso: instrumentos de medición (temperatura, presión, flujo, velocidad, etc.), sistemas PLC ("Programmable Logic Controllers"), sensores, actuadores, válvulas de control, bombas, compresores, etc. Bajo instrucciones desde el Centro de Control, en el Nivel 1 se realiza las operaciones de control y los ajustes en las tablas de configuración de parámetros tanto continuos como discretos de un lazo de control. Para su transmisión a los niveles superiores, algunas de estas funciones se integran en las denominadas "unidades terminales remotas (remote teminal unit, RTU)", cuya descripción la veremos más adelante.

Subsistema de Comunicaciones

En cada localidad remota de interés se instala un servidor de adquisición y control que junto con el transceptor de comunicaciones constituye la Estación Remota o RTU ("Remote Terminal Unit"), la cual debe mantenerse en comunicación continua con el Centro de Control. Esta comunicación la realiza el subsistema de comunicaciones o Nivel 2, mostrado en la Fig. 5.4 por un sistema de comunicaciones dado y utilizando protocolos especiales, como veremos más adelante.

El Servidor de Comunicaciones junto con los Radios Base constituyen la Estación Maestra ("Master Terminal Unit, MTU"). La función general de la MTU es la de realizar todas las labores de interrogación y comunicaciones entre el Nivel 1 y el Nivel 3. En la Fig. 5.4 se utiliza medios radioeléctricos de transmisión; sin embargo, se puede utilizar conductores metálicos, fibras ópticas, satélites, rayos infrarrojos, laser, etc.; la selección del medio de transmisión depende fundamentalmente, aparte de los aspectos económicos, de las condiciones climáticas o geográficas, y muchas veces el medio de transmisión es una combinación de estos medios.

Los protocolos utilizados en el subsistema de comunicaciones, denominados protocolos industriales o de campo, permiten la interacción entre los equipos de comunicación. Estos protocolos están constituidos por un conjunto de reglas y procedimientos para el intercambio de mensajes, detección y corrección de errores, y establecer las secuencias y lazos de control y supervisión. Hay muchos protocolos industriales, de los cuales describiremos algunos más adelante.

Subsistema de Procesamiento y Control Global

Una vez que los datos han sido recolectados desde las localidades remotas y transmitidos el Centro de Control, Nivel 3 de la Fig. 5.4, es necesario realizar sobre ellos un cierto procesamiento en tiempo real a fin de obtener información útil acerca de los procesos, presentarla al operador (o usuario) y emprender acciones de supervisión y control cuando sea necesario. Este trabajo lo realiza el subsistema de procesamiento de datos. Este subsistema es el brazo operativo del Centro de Control y es el encargado de ordenar y procesar la información que es recibida del proceso mediante los enlaces de comunicación. El Centro de Control debe poseer una alta capacidad de computación y normalmente está constituido por computadoras y redes de alta velocidad, interfaces hombre-máquina, bases de datos, servidores de aplicación (de impresión, de archivo, de datos históricos, de monitoreo, etc.). Todos estos recursos deberán ser redundantes para asegurar la confiabilidad e integridad en todas las operaciones. El subsistema de procesamiento y control global podrá comunicarse también con los Niveles Tácticos y Estratégicos, Fig. 5.1, para la toma de las decisiones tácticas y estratégicas correspondientes. Al final del capítulo describiremos este subsistema con un poco más de detalle.

La operación global del sistema está gobernada por programas de informática que manejan el Sistema Operativo, las Bases de Datos, el Software SCADA y los Programas de Servicio y Aplicación. La descripción de estos programas está fuera del propósito de este libro.

5.2. SUBSISTEMA DE INSTRUMENTACION Y CONTROL LOCAL

5.2.1. Esquema General

Los elementos de un subsistema de instrumentación y control local se muestran en la Fig. 5.5.

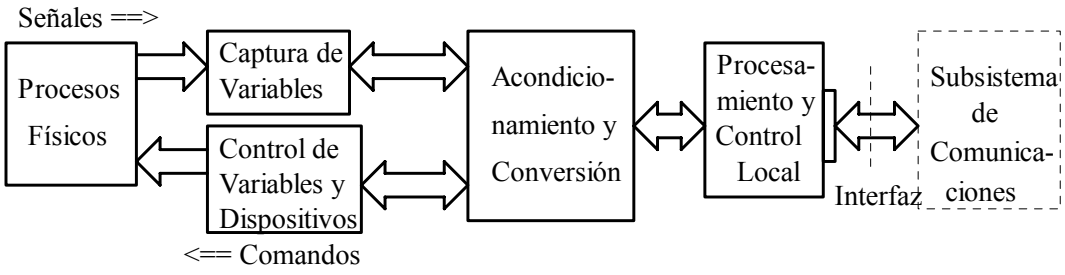


Fig. 5.5. Subsistema de Instrumentación y Control Local

En esta figura están representados todos los elementos que constituyen el subsistema de instrumentación y control local de un sistema de telemetría y telecontrol. En su forma más elemental, todo sistema de telemetría y telecontrol, por muy simple que sea, se basa en el concepto de "lazo de control", como se muestra en la Fig. 5.6.

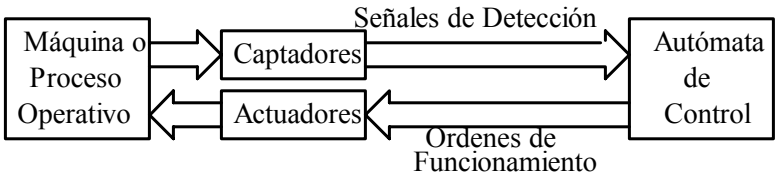


Fig. 5.6. Lazo de control básico en un sistema de telemetría y telecontrol

En la máquina o proceso operativo se producen señales que representan las condiciones del proceso que se está desarrollando y que son capturadas por los captadores. Estas señales o variables se llevan a un autómata de control donde son analizadas. El resultado de este análisis puede hacer necesario cambiar las condiciones de operación de la máquina, lo cual se efectúa con comandos hacia los actuadores que modifican las condiciones de operación del proceso operativo.

Cada uno de estos elementos tiene sus funciones propias cuyas características se describirán de inmediato.

5.2.2. Procesos Físicos

Definiciones

En términos prácticos, un proceso físico es una operación que se lleva a cabo para la ejecución de una tarea específica. Por ejemplo, un proceso físico puede ser la operación de una caldera, en donde es necesario conocer en todo momento sus condiciones de trabajo: temperaturas, nivel del agua, presión del vapor, monitoreo de la llama, etc.

En el proceso físico se está generando una cantidad de información que es necesario conocer y procesar para poder seguir y controlar su funcionamiento. Asimismo, en el proceso físico hay algunos elementos que permiten regularlo dentro de límites

preestablecidos; en el ejemplo de la caldera se puede accionar una bomba para mantener el nivel de agua adecuado. Puede distinguirse entonces dos conceptos: el concepto de variable física y el concepto de dispositivo de control.

Concepto de Variable

Variable es toda cantidad física (temperatura, presión, etc.) presente en el desarrollo de un proceso. Esta variable puede poseer su propia energía, como es el caso de la temperatura, y esta energía se puede utilizar para medir o conocer su estado. Alternativamente, la variable puede requerir de una fuente externa para ser medida, como es el caso de la lectura del código de barras presentes en las etiquetas de muchos productos. La medición de las variables se lleva a cabo con los sensores o transductores que transforman la variable física en una señal eléctrica susceptible de ser acondicionada, transmitida y procesada.

Concepto de Dispositivo de Control

Un proceso físico contiene también elementos que permiten modificar o controlar las variables. En el ejemplo de la caldera, el nivel de agua medido se compara con un nivel normal de trabajo preestablecido; si el nivel medido es inferior al nivel normal, se transmite un comando para arrancar una bomba que introduzca agua en la caldera. Cuando el nivel medido es del orden del nivel normal, otro comando detiene la bomba. En términos de la nomenclatura del control de procesos, se ha completado "un lazo de control" y la bomba es un "dispositivo de control". Un dispositivo de control es entonces un elemento que permite controlar el estado de una variable física.

5.2.3. Captura de Variables

Las variables físicas presentes en un proceso físico deben ser capturadas en forma apropiada, de tal manera que su medición, materializada en una señal eléctrica, sea una representación exacta de la variable misma. En general, esta operación es efectuada por un transductor, llamado también detector primario o sensor.

Transductor o Sensor

En general, un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra, como se muestra en la Fig. 5.7.

Fig. 5.7. Transductor o Sensor

Un transductor eléctrico, en particular, convierte la magnitud de una variable física en una señal eléctrica proporcional. Debe existir una relación conocida entre la entrada y la salida del transductor. Esto es parte de la calibración del instrumento.

El transductor es entonces el elemento que responde a la variable física a ser medida y la transforma de tal manera que el resultado de la operación pueda ser utilizado como información útil y representativa de dicha cantidad.

Un ejemplo es la utilización de una célula fotovoltaica para controlar el estado de la llama de una caldera. La célula toma la energía proveniente de la luz de la llama y produce a su salida una corriente que es proporcional a la intensidad de la luz. Si por alguna razón la llama se extingue, el sistema tomará las previsiones correspondientes (alarmas y accionamiento de otros dispositivos de control).

En algunos transductores la energía se obtiene de una fuente externa. Por ejemplo, en los potenciómetros y los transductores capacitivos, la variable física hace variar la resistencia o la capacitancia que están alimentadas por una fuente externa. Las variaciones de resistencia o capacitancia son convertidas en variaciones de voltaje o de frecuencia que son proporcionales a las variaciones de la variable física.

Clasificación de los Transductores

De acuerdo con su funcionamiento, los transductores se pueden clasificar en analógicos y digitales. Los transductores analógicos pueden ser autogeneradores o de parámetros variables. Los transductores digitales pueden ser de frecuencia variable o digitales propiamente dichos.

Como ejemplo de transductores se tiene:

Transductores Autogeneradores: termopares, acelerómetros y vibrómetros piezoeléctricos.

Transductores de Parámetros Variables: Potenciómetro, fotoresistencia, termómetro de resistencia de platino, anemómetro de alambre caliente.

Transductores de Frecuencia Variable: Alambre vibrante.

Transductores Digitales: Transductores codificadores de posición lineal o angular.

Aplicaciones de los Transductores

Los transductores se aplican en un amplio campo de actividades en la industria y en la investigación. Sus aplicaciones se pueden resumir en:

- Monitoreo de procesos que proporcionan datos en línea que permiten a un operador efectuar manualmente ajustes y controlar el desarrollo del proceso. Este es el denominado “ajuste en lazo abierto”
- Control de procesos automáticos (sin intervención de operadores): sistemas de lazo cerrado o lazos de control.

Características de los Transductores

En general, un transductor debe ser:

- Intercambiable
- Estable sobre un amplio rango de temperaturas

- Preciso y seguro
- De medida reproducible en el tiempo y sobre la gama de frecuencias de interés
- Resistente a condiciones extremas de humedad, temperatura, choque, presencia de gases, etc. que cabe esperar en el sitio de aplicación
- Compatible con los elementos de acondicionamiento y regeneración de señales
- Robusto y simple, a fin de ser utilizado por personal con poca experiencia.

Selección de Transductores

En el proceso de medición de una variable física se debe tener una idea muy clara de los requisitos exigidos antes de realizar cualquier medición. Para la selección de un transductor se debe conocer los principios físicos de la variable a medir, los dispositivos de medición, sus principios de operación y su dominio de aplicación. Es siempre deseable tener un estimado previo y confiable de los resultados y compararlo con las magnitudes medidas. Por último, no se debe adquirir un equipo de medición sin analizar cada caso en particular y establecer consideraciones en cuanto a futuras aplicaciones.

Ejemplo de Transductores y Variables

En general, los transductores están integrados en los instrumentos de medición que se utilizan en las mediciones de temperatura, presión, nivel, flujo, velocidad, aceleración, torque, posición angular, fuerza, humedad, voltaje, corriente, potencia, etc.

En particular, los tipos de transductores eléctricos o electrónicos comúnmente utilizados son:

Para <u>mediciones de presión</u>: transductor capacitivo, transformador lineal de frecuencia variable (LVDT), transductor piezoeléctrico, transductor potenciométrico, transductor piezoresistivo.

Para <u>mediciones de nivel de líquidos</u>: transductores de desplazamiento, transductores hidrostáticos, transductores de nivel capacitivo, transductores de ultrasonidos, etc.

Para <u>mediciones de flujo</u>: transductores de presión diferencial, transductores de flujo de desplazamiento positivo, transductores de velocidad del volumen de flujo, etc.

Para <u>mediciones de temperatura</u>: termómetro de resistencia (TRD), termocuplas, pirómetros, termómetros bimetálicos, termistores, etc.

Las fibras ópticas se han utilizado en los últimos años como transductores de presión, temperatura, deformación, nivel de líquido, etc., además de su aplicación como canal de comunicación.

Naturaleza de las Señales de los Transductores

La señal eléctrica producida por un transductor puede ser analógica, discreta o de impulsos.

La naturaleza de las variables físicas en muchos de los transductores se traduce en variaciones continuas de la señal de salida. Por ejemplo, la salida de los transductores de presión, flujo, temperatura, etc, son señales analógicas continuas cuya magnitud es proporcional a la variable física. La transmisión de esta señal hasta los elementos de acondicionamiento se hace con tensiones de 1 a 5 VDC, de 10 a 50 mVDC o mediante el lazo de corriente de 4-20 mA. Las señales analógicas se almacenan en registros de 8 o 16 dígitos.

Algunas variables físicas representan estados: abierto/cerrado, encendido/ apagado, estado AC/DC, Alto/Bajo Nivel, etc. que se pueden representar con variables discretas, es decir, con niveles fijos de amplitud. En este caso se utilizan voltajes de línea entre 0 y 24 VDC para indicar, por ejemplo, 0 V $\Rightarrow$ Abierto, 24 V $\Rightarrow$ Cerrado, o viceversa. Un dígito almacena una variable discreta.

Otras variables físicas representan estados cíclicos; por ejemplo, la velocidad en revoluciones por minuto de una turbina se puede transmitir como una serie de impulsos cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de la turbina. También se utilizan en los contadores de flujo.

Señales de Comando

Cuando es necesario actuar sobre alguna de las variables físicas, se utilizan los dispositivos de salida o actuadores que permiten, por ejemplo, arrancar una bomba, accionar una alarma, etc.

En la práctica se utiliza comúnmente tres tipos de salida hacia los actuadores:

- Salida a Relé (bobina electromagnética)
- Salida a Triac (un interruptor de estado sólido de gran potencia)
- Salida a Transistor

Cuando los actuadores son dispositivos de corriente alterna se utilizan el relé y el triac; los transistores se utilizan cuando los actuadores son de corriente continua.

Las intensidades que soportan cada una de las salidas son variables y oscilan entre 0,5 a 2 amperes. Al igual que en los transductores, las salidas pueden ser analógicas y digitales, si bien esta última es la más utilizada. En las salidas analógicas es necesario un convertidor digital-analógico que realice la función inversa a la de la entrada.

5.2.4. Acondicionamiento de las Señales

En general, la señal eléctrica de salida de los diferentes transductores no es apropiada para ser procesada debido a los siguientes factores:

- Alto contenido de ruido
- Las impedancias no están adaptadas
- Los niveles de amplitud son o demasiado altos o demasiado bajos
- No compatible con el resto del sistema

La señal eléctrica proveniente de los transductores debe entonces ser acondicionada desde el punto de vista del ancho de banda, nivel de amplitud, impedancia y ruido antes del proceso de digitalización y codificación.

El proceso de acondicionamiento de la señal incluye todos o algunos de los siguientes pasos:

Operación de Filtrado

El proceso de filtrado tiene varios objetivos: eliminación o disminución del ruido y de las componentes de frecuencia superfluas, adaptación de impedancias y amplificación (o atenuación).

La señales eléctricas analógicas provenientes de procesos físicos generalmente son de frecuencias bajas y el ruido que se introduce contiene una gran cantidad de componentes de frecuencia que pueden llegar a alterar significativamente la señal útil. Como el amplificador se diseña para dejar pasar solamente la gama de frecuencias de la señal útil, a la salida del amplificador la señal quedará limpia de la mayor parte del ruido y la relación S/N habrá aumentado significativamente. Nótese que el amplificador debe diseñarse con un ancho de banda compatible con el ancho de banda de la señal útil; asimismo, las impedancias de entrada y salida del amplificador deben estar acopladas. Esto quiere decir que la impedancia de entrada del amplificador debe ser igual a la impedancia de salida del transductor, y la impedancia de salida del amplificador debe ser igual a la impedancia de entrada del circuito siguiente. Por otro lado, la ganancia del amplificador debe ser ajustada de modo que el nivel de amplitud de su señal de salida sea compatible con los niveles de amplitud de los circuitos que siguen.

Aislación

Otra función del acondicionamiento de las señales es la aislación de las señales de salida de los transductores respecto a otras señales presentes: voltajes de alimentación, relojes, etc. Puede suceder que el sistema contenga también transientes de alto voltaje que pueden, por un lado enmascarar las señales útiles y por otro dañar al controlador o computador. Una razón adicional para la aislación es la de asegurarse que los circuitos de adquisición no sean afectados por diferencias de potencial de tierra o voltajes en modo común. Cuando las entradas a la tarjeta de adquisición están referidas a una tierra común, se puede originar problemas si hay una diferencia de potencial en las dos tierras (la de salida del transductor y la de entrada a la tarjeta de adquisición). Esta diferencia de potencial puede producir lo que generalmente se conoce como un"lazo de tierra", el cual puede producir representaciones inexactas de la señal adquirida o dañar al sistema de medición mismo. En la práctica los módulos de adquisición utilizados proveen una aislación que puede rechazar voltajes hasta de 240 VAC efectivos en modo común. En general, se utilizan circuitos de interfaz balanceados.

Excitación

El acondicionamiento de las señales debe incluir también la generación de los voltajes de excitación o alimentación externa de algunos de los transductores. Los termistores, las galgas extensométricas (strain gauges) y los TRD, por ejemplo, requieren

una alimentación externa de energía, sea de tensión o de corriente. Los módulos de acondicionamiento de señales prácticos proveen estos recursos.

Linealización

Otra función común en el acondicionamiento de las señales es la linealización. Muchos transductores, tales como las termocuplas, tienen una característica Entrada/Salida que no es lineal. Los módulos de acondicionamiento prácticos incluyen rutinas para la linealización de termocuplas, galgas extensométricas y TRD.

Digitalización y Codificación

La señal de salida del amplificador generalmente es una señal analógica que es incompatible con los sistemas digitales actuales. Es necesario entonces someter la señal a un proceso de muestreo, cuantificación y codificación, es decir, se somete la señal a un proceso de modulación PCM, en la forma vista en el Capítulo II.

Regeneración

Cuando se transmite una señal digital por un canal, ella experimenta variaciones debido al ruido y a la interferencia que se le suma en la trayectoria. Estas perturbaciones distorsionan la señal de tal manera que es casi imposible diferenciar si se transmitió un CERO o un UNO.

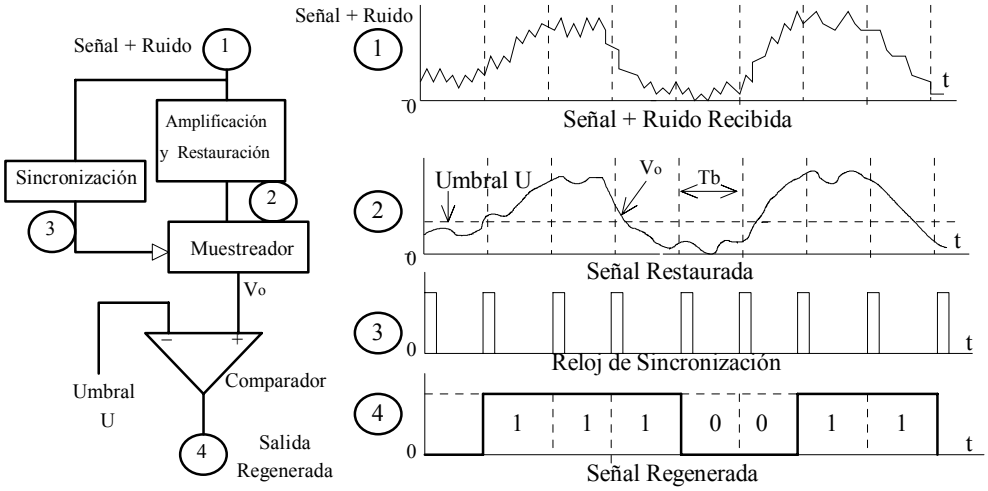
En el extremo receptor la primera operación que se hace sobre la señal es una operación de regeneración. Esta es una operación de limpieza (filtrado, ecualización y restauración) y resincronización. Cuando la distancia transmisor-receptor es muy grande, es necesario colocar repetidoras entre el transmisor y el receptor. En este caso en las repetidoras se efectúa también la operación de regeneración.

En la Fig. 5.8 se muestra el mecanismo básico de regeneración de una señal digital.

La señal que llega distorsionada y plagada de ruido pasa por un amplificador ecualizador y restaurador el cual se encarga de aumentar el nivel de la señal y de restablecer el ancho de banda original de los impulsos que han sufrido retardo de tiempo.

Después de la restauración, la señal es muestreada y presentada a un comparador que decide si se transmitió un UNO o un CERO. Si la señal $V_o \geq U$ (umbral de comparación), el comparador produce un UNO; si la señal $V_o < U$, el comparador produce un CERO.

El reloj de sincronización se extrae de la misma señal de entrada al sistema mediante circuitos de sincronización apropiados, tales como el Lazo de Costas o el Sincronizador Cuadrático, ya mencionados anteriormente.



(a) Circuito de Regeneración (b) Formas de Onda

Fig. 5.8. Mecanismo de Regeneración de una Señal Digital

5.2.5. Procesamiento y Control Local

Configuración

Una vez que las señales han sido debidamente acondicionadas, ellas pasan a la fase de procesamiento y control local, cuya configuración, algunas veces llamada arquitectura, se muestra en forma esquemática en la Fig. 5. 9.

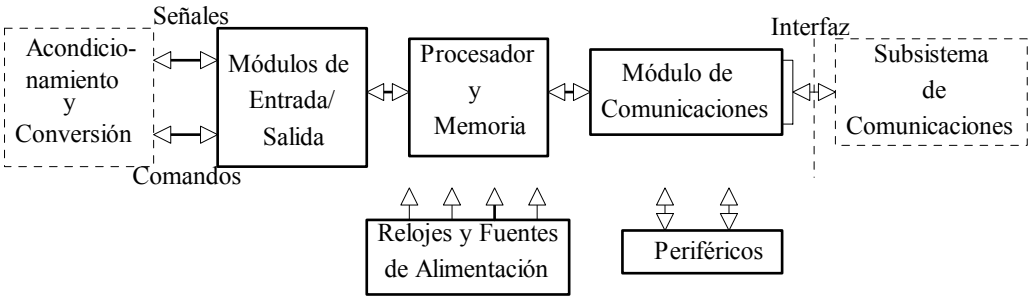


Fig. 5.9. Arquitectura del Sistema de Procesamiento y Control Local

El sistema de procesamiento y control local consta de los siguientes elementos:

- Módulos de Entrada/Salida (I/O)
- Procesador y Memoria (CPU)
- Módulo de Comunicaciones
- Relojes y Fuente de Alimentación

- Periféricos

Módulo de Entrada/Salida (I/O)

El módulo I/O puede considerarse como una interfaz en la cual se adapta y codifica en una forma comprensible para el CPU todas señales procedentes de la fase de acondicionamiento. En algunos casos en este módulo se lleva a efecto también el acondicionamiento de las señales procedentes de los captadores (pulsadores, relés, etc.) y los transductores. Este módulo tiene también la misión de protección de los circuitos electrónicos del CPU realizando una separación entre éstos y las señales externas.

En el módulo (I/O) se puede distinguir los diferentes elementos de interfaz:

- Entradas Analógicas
- Salidas Analógicas
- Entradas Discretas
- Salidas Discretas
- Entradas de Contadores
- Entradas de Alto/Bajo Nivel
- Otras entradas y salidas según la aplicación

Nótese que los elementos de salida trabajan en forma inversa a las de entrada, es decir, descodifican las señales emanadas del CPU, las amplifican y las envían a los dispositivos de control, tales como lámparas, relés, contactores, arrancadores, electroválvulas, etc. así como proveer los circuitos de adaptación a las salidas y de protección de circuitos internos.

Procesador y Memoria

El elemento procesador y memoria es la unidad central de procesamiento o CPU, en la cual radica toda la inteligencia del sistema local. Este es un computador de propósito especial en el cual, mediante la interpretación de las instrucciones del programa de usuario (software) y en función de las variables de entrada, se activan las salidas deseadas.

En esta unidad se suele disponer de interfaces para la conexión de una consola o un simple teclado de programación y de algunos periféricos de propósito especial, como es el módulo de comunicaciones. Estos periféricos son elementos auxiliares, físicamente independientes del CPU, que se utilizan para la realización de alguna función específica y que amplían el campo de aplicación o facilitan el uso del sistema. Como tales, no intervienen directamente ni en la elaboración ni en la ejecución de los programas.

Una descripción más detallada de este módulo está fuera de los alcances de este libro.

Relojes y Fuente de Alimentación

El módulo de relojes tiene como función la de proporcionar todas las señales de reloj necesarias tanto para los procesos de acondicionamiento como para el procesamiento

de la información en el sistema. Las frecuencias de señalización dependen del sistema considerado.

La fuente de alimentación adapta la tensión de red de 120/220 VAC, 60 Hz, a las tensiones de funcionamiento de todos los circuitos electrónicos internos, así como de los dispositivos de control (por ejemplo, 24 VDC). En caso de falla de la tensión principal, el sistema posee un banco de baterías para mantener el sistema en operación.

Módulo de Comunicaciones

En muchas instalaciones industriales pequeñas no es necesario comunicarse con el exterior al sitio donde se están realizando los procesos físicos y con los elementos descritos hasta ahora es suficiente para un control completo del sistema. Sin embargo, en sistemas de gran envergadura, como por ejemplo, en el control de un sistema de almacenamiento de petróleo, hay que tomar algunas acciones de tipo global que no pueden ser tomadas localmente pues es posible que los sistemas locales no estén asistidos por personal y la vigilancia y/o toma de decisiones se efectúa por control remoto desde una Sala de Control.

Las señales involucradas en la CPU en general no son apropiadas para su transmisión por un medio de transmisión dado. En la práctica existen algunos circuitos que permiten convertir las señales digitales de trabajo en formatos apropiados para su transmisión por un canal dado. Estos sistemas se denominan "receptor/transmisor universal asincrónico (UART)" y "receptor/transmisor universal sincrónico y asincrónico (USART)" los cuales disponen de una interfaz normalizada, generalmente una interfaz RS-232C, para acceder a un módem y entrar en el subsistema de comunicaciones.

El módulo de comunicaciones maneja entonces el intercambio de información con la estación principal o maestra. Las velocidades van normalmente desde 1200 bps hasta 19200 bps, aunque con los nuevos transceptores digitales se puede alcanzar velocidades que pueden llegar hasta los 128 kbps.

En el programa que se está llevando a cabo en el sistema está especificada cuál es la información que debe ser transmitida aguas arriba hacia la Sala de Control y cuáles son los comandos y respuestas que pueden esperarse desde arriba. Esto es parte de la programación de la estación y de los protocolos de control involucrados.

5.2.6. El Controlador Lógico Programable (PLC)

En los sistemas de control modernos la mayor parte de las operaciones desarrolladas por el subsistema de instrumentación local, con excepción de la captación de variables y la manipulación de dispositivos, son efectuadas por un autómata programable, el denominado Controlador Lógico Programable (PLC).

El PLC es una máquina electrónica diseñada para controlar en tiempo real procesos secuenciales en un medio industrial. Su manejo y programación puede ser realizada por personal electricista, electrónico o de instrumentación sin conocimientos de informática. El PLC realiza funciones lógicas: conversión serie/paralelo, temporizaciones, conteos y otras funciones más potentes como cálculos, regulación, emisión de comandos, etc. El PLC dispone también de facilidades de comunicación para acceder a un subsistema de comunicaciones.

El PLC se puede considerar como una "caja negra inteligente" en la que existen terminales de entrada para dispositivos y transductores, terminales de salida para accionamiento y control de motores, válvulas, etc., de tal forma que la actuación de estos últimos está en función de las señales de entrada que estén activadas en cada momento, según el programa almacenado. Esto quiere decir que los elementos tradicionales como relés auxiliares, relés de enclavamiento, temporizadores, contadores, etc. son internos. La tarea del usuario se reduce a realizar el "programa", que no es más que la relación que se tiene que cumplir entre las señales de entrada y la activación de alguna respuesta específica.

La arquitectura de un PLC mostrada en la Fig. 5.10 es básica y casi no hay diferencia entre las arquitecturas de diferentes fabricantes. Nótese que están incluidos todos los elementos de un subsistema de control local como el mostrado en la Fig. 5.9.

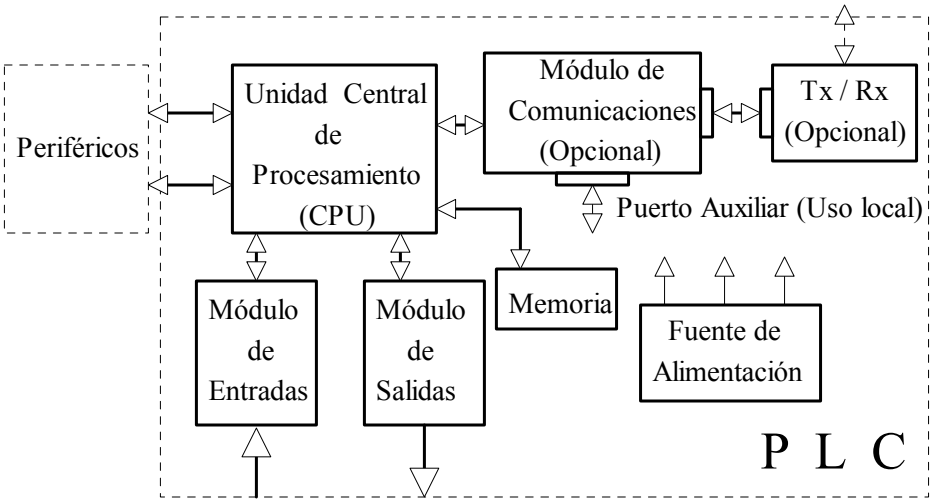


Fig. 5.10. Diagrama de Bloques de un PLC.

Campos de Aplicación del PLC

Por sus características especiales de diseño, el PLC tiene un campo de aplicación muy variado sobre todo en instalaciones locales donde es necesario realizar procesos de maniobra, control, señalización, etc. Sus dimensiones reducidas, la extrema facilidad de su montaje, la posibilidad de almacenamiento y modificación de programas lo hacen apto para aquellos procesos en que se producen necesidades tales como:

- Espacio reducido
- Procesos de producción periódicamente cambiantes
- Procesos secuenciales
- Maquinarias de procesos variables
- Instalaciones de procesos complejos y amplios

Ventajas de los PLC

Son muchas las ventajas que presentan los PLC, entre otras se tiene:

- Menor tiempo empleado en la elaboración del proyecto
- Facilidad para efectuar modificaciones
- Espacio ocupado de reducidas dimensiones
- Menor costo en equipos y mano de obra
- Poco mantenimiento

Como inconveniencias, aunque no son desventajas, el PLC necesita ser programado por un operador calificado y su costo inicial es grande; sin embargo, en instalaciones críticas y en grandes empresas estas consideraciones son de importancia menor.

5.2.7. La Unidad Terminal Remota (RTU)

El creciente desarrollo en la informática, en la electrónica y en las telecomunicaciones ha traído como consecuencia la integración de la mayor parte de los elementos del subsistema de procesamiento y control local. Como consecuencia, en una sola unidad se han integrado los módulos de entrada I/O, el CPU, el módulo de comunicaciones, el módem, el transmisor de radio, un teclado funcional y las fuentes de poder. Esta unidad se denomina Unidad Terminal Remota (Remote Terminal Unit, RTU) y es muy utilizada en la industria petrolera en instalaciones remotas. Todos los elementos vienen integrados en un gabinete blindado que cumple con las recomendaciones usuales de seguridad para su utilización en el campo (NEMA 4).

De acuerdo con la ANSI, el término "unidad terminal remota" se refiere al equipo de una estación remota de un sistema supervisorio, y el término "supervisorio" incluye todo el "control, indicación, y equipos asociados de telemetría en la estación maestra, y todos los dispositivos complementarios en la estación o estaciones remotas".

Como la RTU es la interfaz con los dispositivos de campo, se la puede considerar como los ojos, oídos y manos de una estación maestra. La inclusión de módulos de computación con microprocesadores ha hecho posible descargar el canal de comunicaciones y los computadores de procesos globales, de muchas tareas que anteriormente ellos desarrollaban. Como consecuencia, los costos totales se han reducido, la flexibilidad ha mejorado y aumentado las prestaciones de los sistemas local y global.

En la Fig. 5.11 se muestra en forma esquemática los elementos contenidos en una RTU.

Todas las funciones de los elementos constituyentes de la RTU ya han sido descritas; sin embargo, como estas RTU vienen ya construidas por diferentes fabricantes, para más información se recomienda al lector estudiar la documentación disponible en cada caso en particular.

Nótese el parecido entre el PLC y la RTU; sin embargo no hay que confundirlos. El PLC es un dispositivo de control, mientras que la RTU es un dispositivo de control y comunicación.

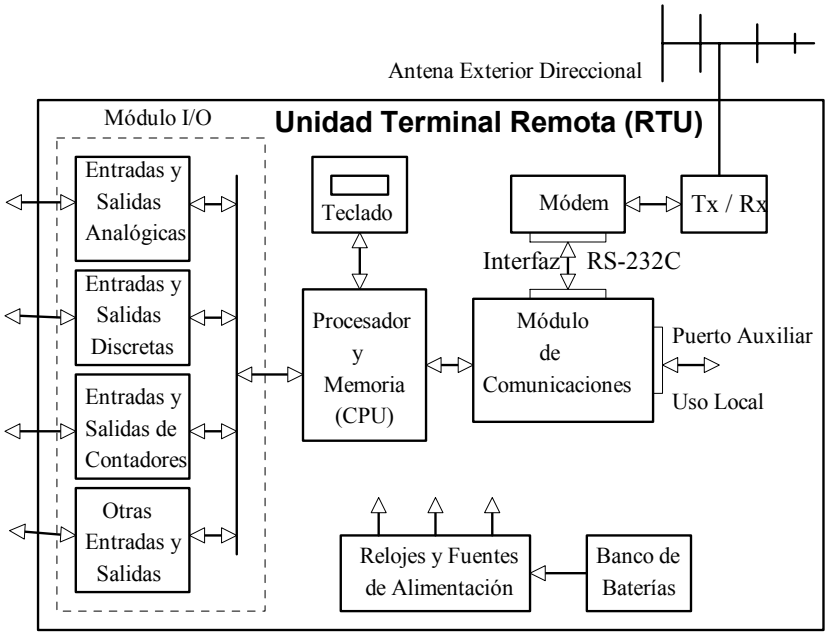


Fig. 5.11. Configuración Básica de una Unidad Terminal Remota (RTU).

♣ Ejemplo 5.1

Consideremos el proceso químico ilustrado en la Fig. 5.12 para la fabricación de un producto.

N1 y N2 miden Nivel Alto y Bajo, respectivamente. T mide la temperatura

V1, V2, ..., V11 son las variables del proceso.

Los demás elementos se explican por sí mismos.

El sistema opera en Manual y Automático. En Manual es controlado por un operador; en Automático es controlado por un Autómata, por ejemplo, un PLC. Inicialmente el tanque está vacío, todas las válvulas están cerradas y el sistema está en Operación Manual. El operador abre las válvulas A y B para llenar el tanque. Cuando el tanque se llena se pasa automáticamente a Operación Automática, se cierran las válvulas A y B, se abre la válvula D, se enciende la llama y el motor comienza a accionar al agitador. La válvula D gradúa la intensidad de la llama dentro de un rango ajustable de temperaturas. El contenido del tanque experimenta un proceso de reducción cuyo límite inferior lo da N2.

Cuando N2 detecta el nivel bajo, el producto está listo, se cierra la válvula D, se detiene el agitador, se abre la válvula C para que salga el producto y se activa una señal audible (chicharra) para que el operador actúe. Una vez que el producto ha salido, el operador cierra la válvula C, el sistema pasa a Operación Manual y queda listo para un nuevo ciclo. En caso de llama apagada, automática-mente se cierra la válvula D y se activa una sirena de alarma para que el operador actúe.

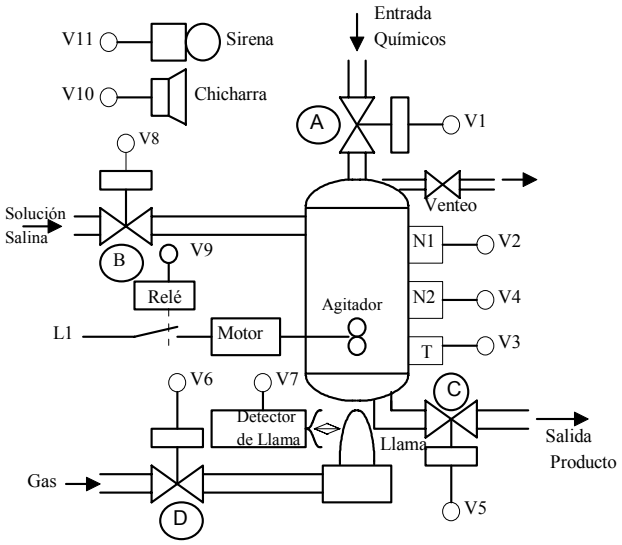


Fig. 5.12. Proceso Industrial

En este sistema, identifique y defina:

(a) Las variables discretas
(b) Las variables analógicas continuas;
(c) Los Sensores
(d) Los Actuadores;
(e) Las variables de Operación Manual
(f) Las variables de Operación Automática;
(g) Los lazos de control

Solución

Mediante una Tabla como la siguiente se pueden describir las partes (a) hasta (f):

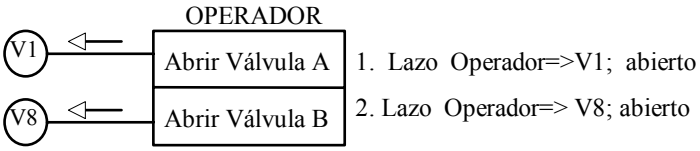
Variable	Función	Continua/ Discreta	Sensor/ Actuador	Operación Manual y/o Automática
V1	Abrir/Cerrar Válvula A	Discreta	Actuador	Manual y Automática
V2	Detector de Nivel Alto	Discreta	Sensor	Automática
V3	Medidor de Temperatura	Continua	Sensor	Automática
V4	Detector de Nivel Bajo	Discreta	Sensor	Automática
V5	Abrir/Cerrar Válvula C	Discreta	Actuador	Manual y Automática
V6	Graduar Llama	Continua	Actuador	Automática
V7	Detector de Llama	Discreta	Sensor	Automática
V8	Abrir/Cerrar Válvula B	Discreta	Actuador	Manual y Automática
V9	Arranque /Pare Agitador	Discreta	Actuador	Automática
V10	Chicharra de Aviso	Discreta	Actuador	Manual y Automática (*)
V11	Sirena de Alarma	Discreta	Actuador	Manual y Automatica (*)

(*) Activación Automática, Parada Manual.

(g) Lazos de Control

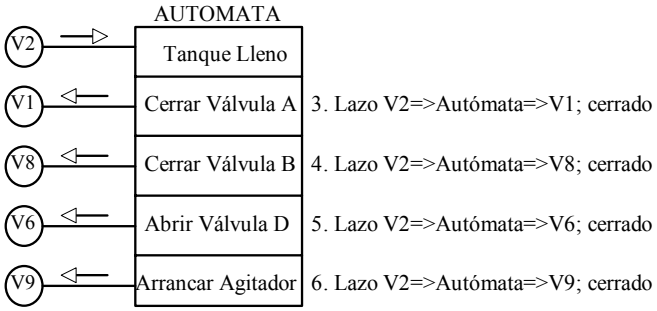
Operación Manual

Fase de Arranque



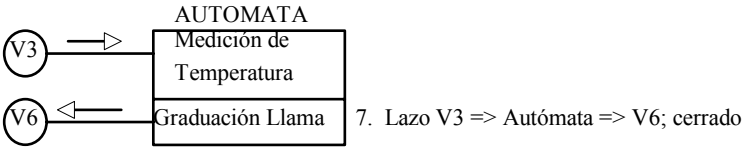
Operación Automática

Fase de iniciación del proceso



Proceso en progreso

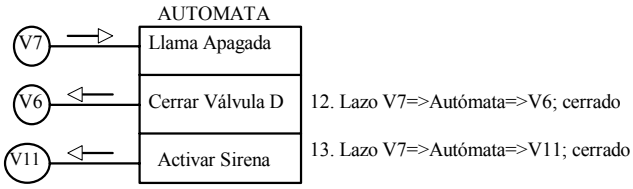
Monitoreo de la Temperatura



Fase de Finalización del proceso

Condiciones Anormales: Llama Apagada.

Activación de Alarmas



<u>En el sistema hay 13 lazos: 2 abiertos y 11 cerrados.</u>

El lector puede considerar otras opciones. ♣

♣ Ejemplo 5.2

En una instalación industrial una maestra MTU controla 10 estaciones remotas (RTU), las cuales atienden, cada una, 16 señales analógicas continuas de 16 dígitos cada una, y 64 puntos discretos.

Cada vez que una RTU es interrogada, ella transmite la información de 8 señales continuas y 32 puntos discretos. La RTU manda entonces toda la información en dos interrogaciones seguidas.

Se va a utilizar el Protocolo HDLC a una velocidad de Vi bps. En el campo de información de la trama se coloca la información solicitada, primero las señales analógicas continuas y a continuación las discretas. La MTU hace sus peticiones mediante una trama Sin Numeración SNRM.

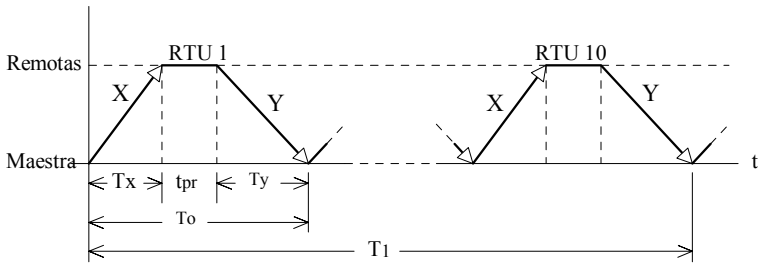
Se desea que la información completa de cada RTU sea entregada en períodos de

T = 2 segundos. Seleccionar también un Módem UIT-T apropiado.

Vamos a determinar la velocidad de transmisión apropiada, en bps, para lograr este objetivo. Se desprecian los tiempos de overhead (alzada, preámbulo, propagación, etc.) pero el tiempo de procesamiento en la RTU es t_{pr} = 20 milisegundos.

Solución.

El proceso completo de Interrogación /Respuesta se puede representar como se muestra en la figura siguiente:



Gráfica de Tiempo de los enlaces

Primer ciclo interrogación/respuesta (RTU 1):

Tiempo de Interrogación

La trama SNRM contiene 6 octetos (no contiene información); entonces,

Información contenida en la trama: $I_x = 8x6 = 48$ bits

Tiempo de transmisión de la trama: $T_x = \frac{I_x}{V_i} = \frac{48}{V_i}$

Tiempo de Respuesta

La información neta para transmitir de una RTU en cada interrogación es

I_n = 8x16 +32 = 160 bits equivalente a 20 octetos

A esta información se le agrega la información contenida en el resto de la trama HDLC: 2 banderas, dirección, control y FCS. La información total en la trama será

$I_y = I_n + 16 + 8 + 8 + 16 = 208$ bits

Tiempo de transmisión de la trama: $T_y = \frac{I_y}{V_i} = \frac{208}{V_i}$

Tiempo de procesamiento: $t_{pr} = 20\,\text{ms}$

De acuerdo con la figura anterior, el período de interrogación de una RTU será

$$T_o = T_x + t_{pr} + T_y = \frac{I_x + I_y}{V_i} + t_{pr}$$

El tiempo de transmisión para la diez RTU es, de la figura,

$$T_1 = 10T_o$$

En este tiempo T_1 se enviará solamente la mitad de la información, de modo que el tiempo T para el envío de toda la información será el doble, es decir,

$$T = 2T_1 = 20T_o = \frac{20(I_x + I_y)}{V_i} + 20t_{pr}$$

Finalmente, la velocidad necesaria para enviar toda la información en un tiempo T de 2 segundos será

$$V_i = \frac{20(I_x + I_y)}{T - 20t_{pr}} = \frac{20(48 + 208)}{2 - 20x20x10^{-3}} = 3200\,\text{bps}$$

La velocidad apropiada es de 3200 bps y puede utilizarse un Módem UIT-T V.32, a 4800 bps. ♣

5.3. SUBSISTEMA DE PROCESAMIENTO Y CONTROL GLOBAL

5.3.1. Introducción

Los datos de todas las localidades remotas deben ser recolectados y transmitidos a un Centro de Control, generalmente una Sala de Control, donde se realiza sobre ellos un cierto procesamiento en tiempo real a fin de obtener información útil acerca de los procesos, presentarla al operador (o usuario) y, como resultado de un análisis, emprender acciones de supervisión y control cuando sea necesario. Esta tarea la realiza el subsistema de procesamiento y control global. Este subsistema es el brazo operativo del Centro de Control y es el encargado de ordenar y procesar en tiempo real la información que se recibe desde los procesos físicos remotos mediante los enlaces de comunicación. El Centro de Control debe poseer una alta capacidad de computación y normalmente está constituido por computadores y redes de alta velocidad, bases de datos y servidores de todo tipo. Todos

estos recursos deberán ser redundantes para asegurar la confiabilidad e integridad en todas las operaciones. El subsistema de procesamiento y control global podrá comunicarse también con otros niveles superiores, para la toma de decisiones tácticas y estratégicas de tipo gerencial.

5.3.2. Configuración

En su forma más general, el subsistema de procesamiento y control global se muestra en forma esquemática en la Fig. 5.13.

En este subsistema es donde se procesan los datos de campo y se toman las acciones para establecer los lazos de control y supervisión globales. Debido a su gran capacidad computacional, desde este subsistema se puede controlar desde instalaciones de poca capacidad hasta grandes instalaciones industriales. En el SCADA se aplican todas las técnicas de telemetría, telecontrol, comunicaciones e informática para la supervisión y control de procesos e instalaciones industriales en grandes áreas geográficas. Una descripción más detallada de un SCADA está fuera de los alcances de este libro.

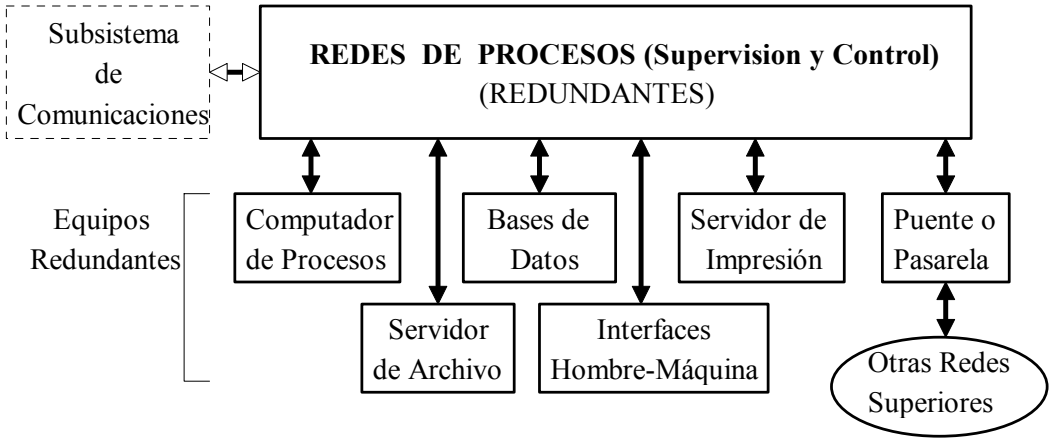


Fig. 5.13. Esquema General del Subsistema de Procesamiento y Control Global

En la Fig. 5.14 se muestra con más detalle los elementos que conforman un Centro de Control.

El Centro de Control es el cerebro de cualquier proceso de control y supervisión industrial y en él se encuentran todos los dispositivos para manejar, procesar, almacenar y controlar todos los procesos que se ejecutan en una instalación industrial. En su forma más general, un centro de control deberá poseer los elementos mostrados en la Fig. 5.14. En pequeñas instalaciones la configuración pudiera ser más sencilla y contener menos elementos, pero en las grandes instalaciones la configuración mostrada en la Fig. 5.14 es la más corriente.

Un Centro de Control puede consistir de los siguientes elementos:

- La Unidad Terminal Maestra (Master Terminal Unit, MTU)
- Los Computadores de Procesos (Supervisión y Control)
- Las Bases de Datos
- Los Servidores
- Interfaces Hombre-Máquina
- Otros: sistemas expertos, puentes y pasarelas de intercomunicación con otras redes, etc.

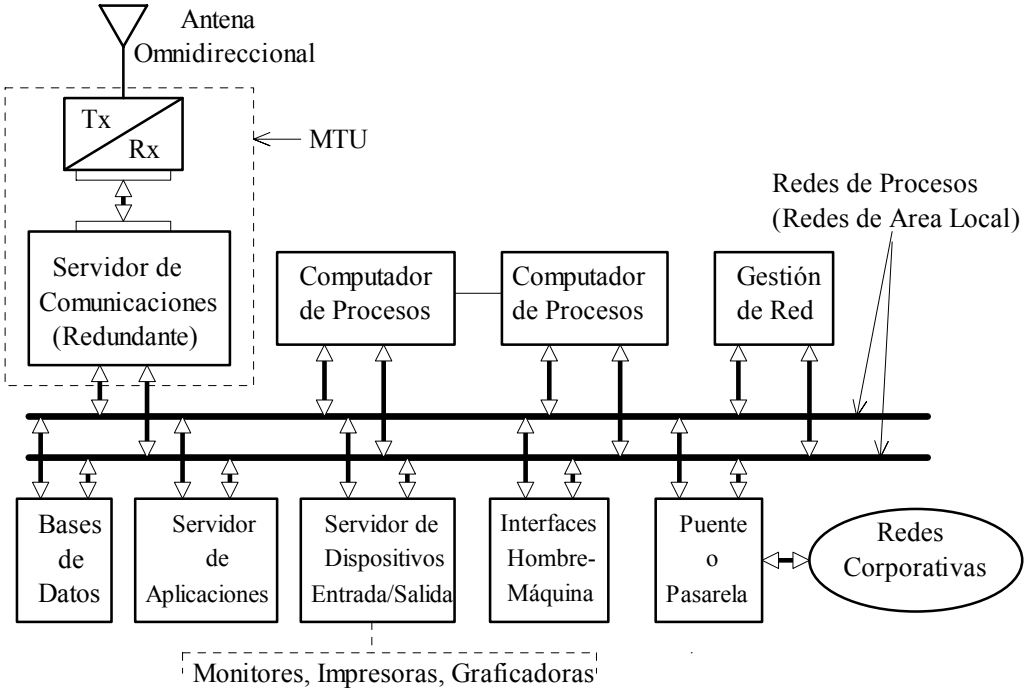


Fig. 5.14. Elementos de un Centro de Control Industrial.

5.3.3. La Unidad Terminal Maestra (MTU)

La función general de la MTU es la de realizar todas las labores de interrogación y comunicaciones entre el subsistema de procesamiento local y los computadores de procesos. Aunque en la Fig. 5.14 se muestra un transceptor de radio, en la transmisión se puede utilizar cualquier medio: par trenzado, cable coaxial, fibras óptica, etc. La selección de un medio depende fundamentalmente, aparte de los aspectos económicos, de las condiciones climáticas o geográficas del sistema, y muchas veces la trayectoria de transmisión es una combinación de varios medios.

El Servidor de Comunicaciones es un computador de propósito especial que se coloca antes de las redes de procesos o de los computadores de procesos. Este equipo tiene

mucha inteligencia agregada y se utiliza para efectuar todas las funciones de comunicación que de otra manera tendrían que ser realizadas por los computadores de procesos. Este arreglo, presente en casi todos los sistemas de transmisión de datos, es muy eficiente por cuando la transmisión de datos se efectúa en forma esporádica y por ráfagas; sin el servidor de comunicaciones el tráfico en tiempo real de un gran número de entradas puede consumir grandes cantidades de tiempo de computación y el computador del proceso no podría atender debidamente aquellas tareas orientadas a las aplicaciones para las cuales está destinado. El servidor efectúa entonces todas las tareas de recepción, formato, codificación, almacenamiento, etc. para un uso más eficiente de los recursos presentes. En algunos casos de altas velocidades, la transferencia de información entre el servidor de comunicaciones y el computador se hace por acceso directo a memoria (DMA), es decir, el servidor coloca directamente en la memoria del computador toda la información que éste necesita.

En los grandes sistemas de automatización de procesos los servidores de comunicación se utilizan en pares: uno activo y otro de reserva.

5.3.4. Computadores y Redes de Procesos

Computadores de Procesos

Los computadores de procesos constituyen el verdadero cerebro de un sistema de telemetría y de telecontrol. En la práctica se presentan diferentes formas de interconexión de los computadores según las necesidades particulares de un sistema. La capacidad de computación de estos recursos debe ser muy alta, pues hay que realizar funciones de supervisión y control del proceso, procesamiento en tiempo real de eventos, presentación de despliegues, emisión de informes, ejecución de programas de aplicación, etc. Los computadores más utilizados en la industria petrolera venezolana son los VAX , Serie 34XX.

La configuración más común de los computadores de procesos se muestra en la Fig. 5.15.

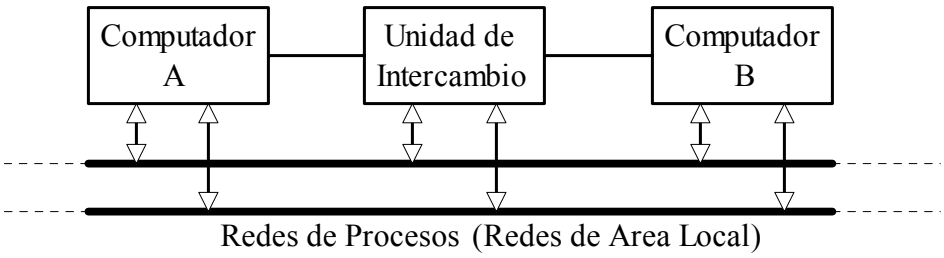


Fig. 5.15. Interconexión entre los Computadores de Procesos.

Los dos computadores A y B son idénticos y su interconexión puede asumir diferentes formas o criterios. Una forma sería la de asignar todas las funciones críticas y no críticas al computador A dejando al computador B de respaldo (standby). Otra forma sería la de asignar al computador A todas las funciones críticas en tiempo real, mientras que al computador B se le asignan las funciones no críticas y fuera de línea. En este caso el

computador A es el Computador Primario y el Computador B el Computador Secundario, pero cualquiera de los dos computadores puede asumir la carga del otro en caso de falla.

Como se muestra en la Fig. 5.15, la interconexión entre los dos computadores se hace por dos vías; una a través de las redes de procesos para la transferencia de datos de alta velocidad, y la otra a través de una unidad de intercambio que monitorea a ambos computadores. En caso de falla de un computador, esta unidad hace la transferencia (Changeover) del computador fallante al computador de reserva al mismo tiempo que acciona alarmas y toma otras decisiones.

Hay otras configuraciones cuya descripción y funciones se salen de los alcances de este libro.

Redes de Procesos

La red de procesos, como su mismo nombre lo indica, es la plataforma sobre la cual se efectúan todas las operaciones de un sistema de procesamiento y control de la información. Estas son redes generalmente centralizadas en un punto, el Centro de Control, y sobre ella se conectan todos los equipos que intervienen en las operaciones. La red de procesos generalmente es una red de área local o alguna red propietaria y normalmente trabaja hasta 20 Mbps.

No hay que confundir la red de procesos con la red de comunicaciones. La red de comunicaciones generalmente es una red extensa geográficamente y es la encargada de transportar toda la información que se produce en el campo y todos los comandos que se generan en el centro de control; es simplemente un medio de transmisión. La red de procesos es mucho más compleja debiendo poseer una alta capacidad de computación y ser capaz de alcanzar las altas velocidades que se necesitan para manejar procesos en tiempo real. Esta capacidad sólo la proporcionan las redes de área local y las redes de área metropolitana.

Una descripción más completa de las redes de procesos está fuera de los objetivos que nos hemos impuesto.

5.3.5. Bases de Datos y Servidores

Bases de Datos

Toda la información procesada es almacenada en las bases de datos. Las bases de datos son el corazón del sistema, pues todos los periféricos tales como servidores, estaciones de trabajo, etc., utilizan la información allí contenida para realizar sus propias funciones: funciones de adquisición y control, funciones de interfaz hombre/máquina, programas de aplicación, etc.

La transferencia ordenada, definida y segura de datos entre diferentes procesos es una de las funciones de la base de datos.

Los Servidores

Muchas veces un usuario desea utilizar algunos servicios especiales, tales como servicios de archivo, de impresión, de monitoreo, etc. Esta situación llevó a la definición

del modelo "cliente/servidor" en la prestación de servicios de red El servidor de comunicaciones es uno de los muchos servidores utilizados en los sistemas industriales.

Entre los servidores integrados al sistema de procesamiento se tiene:

- Servidor de datos históricos. Responsable de procesar, almacenar y mantener la información histórica del proceso a fin de producir gráficos de tendencias, generación de reportes y el despliegue de información.
- Servidor de Aplicaciones. Responsable de la ejecución de los diversos programas de aplicaciones del sistema.
- Servidor de Dispositivos Entrada/Salida. Es responsable de establecer una interfaz hombre/máquina conformada por consolas de operadores equipadas con teclados, monitores, impresoras, graficadoras, etc. Su objetivo principal es el de suplir las necesidades del operador y del personal de mantenimiento del sistema.

5.3.6. Interfaces Hombre-Máquina

El servidor de dispositivos entrada/salida junto con las bases de datos, constituyen el subsistema que permite la comunicación hombre-máquina, denominada también ïnterfaz hombre-máquina. Este subsistema permite al usuario interactuar con el sistema para la ejecución de diferentes funciones, entre las que se puede citar las siguientes:

- Funciones de control y supervisión sobre todo el proceso
- Funciones de planificación y mantenimiento de operaciones
- Funciones de presentación gráfica o impresa de: diagramas gráficos, menús de selección, despliegue de datos tabulados, despliegue de alarmas y tendencias históricas o reales, etc.
- Funciones de entrada de datos para la introducción de ordenes de control e información. Se realizan principalmente mediante teclados
- Funciones de generación de alarmas para la notificación de un estado anormal que requiere atención del usuario (quien tomará la acción correspondiente)
- Funciones de emisión de informes: informes periódicos de información, informes de información y eventos críticos, informes diarios de operaciones, etc.

5.3.7. Programas de Informática (Software)

Los programas de informática (software) constituyen el conjunto de instrucciones responsable de que los equipos (hardware) realicen sus tareas específicas. Como concepto general, el software puede dividirse en varias categorías basadas en el tipo de trabajo realizado. Las dos categorías primarias de software son los sistemas operativos (software del sistema), que controlan las tareas en línea del computador de procesos, y el software de aplicación, que dirige las distintas tareas fuera de línea y auxiliares para las que se utilizan las computadoras periféricas. Por lo tanto, el software del sistema procesa tareas tan esenciales como el procesamiento de la información y la administración de recursos, mientras que el software de aplicación lleva a cabo tareas de servicio, gestión de bases de

datos y similares. Constituyen también dos categorías separadas el software de red, que permite comunicarse a grupos de usuarios, y el software de lenguaje utilizado para escribir programas.

En el caso del subsistema de procesamiento y control global se puede distinguir varias clases de programas:

- Programas del Sistema Operativo
- Programas de los Servidores de Aplicación

Sistema Operativo

El Sistema Operativo es una estructura jerárquica encargada de administrar los recursos del sistema (equipos y programas). Se puede considerar como la interfaz entre los comandos o programas de aplicación y los dispositivos periféricos, tales como las unidades de memoria y los servidores. El sistema operativo depende de la plataforma computacional utilizada y representa la base para la ejecución de programas y aplicaciones especiales. Es importante notar que la base de datos constituye el núcleo del sistema operativo pues es el nexo que interrelaciona todas las funciones del sistema.

En particular, el programa para el procesamiento y control de los procesos físicos debe tener la capacidad para:

- Trabajar con sistemas multitarea y en tiempo real
- Capacidad para diagnóstico, mantenimiento correctivo y calibración de los elementos de las estaciones remotas
- Capacidad de programación con lenguajes de alto nivel (lenguaje C, por ejemplo)
- Capacidad para trabajar con distintos tipos de protocolo: protocolos de comunicaciones (BSC, HDLC, etc.) y protocolos industriales (Modbus, BSAP, DNP 3.0, etc.)

Programas de Aplicación

Los programas de aplicación se hallan instalados sobre el sistema operativo y utilizan los recursos del sistema, valiéndose del sistema operativo como interfaz.

Los programas de aplicación están relacionados con los servicios y servidores del sistema: programas para el procesamiento y control de los procesos físicos, programas de aplicación para datos históricos, para interfaz hombre/máquina, etc.

Una descripción más completa de los programas de informática (software) está fuera de los objetivos de este libro.

5.4. PROTOCOLOS INDUSTRIALES

5.4.1. Introducción

Fundamentalmente, hay muy poca diferencia entre un protocolo industrial y un protocolo de comunicación (BSC, DDCMP, HDLC, etc.). Sin embargo, los protocolos

industriales deben poseer algunas características muy importantes para su utilización en los Sistemas de Control de Procesos y en los SCADA. Estas características son:

Deben ser sistemas fáciles de reparar y mantener. Las operaciones en un sistema industrial son muy sensibles a retardos producidos por fallas o mantenimiento. Si las operaciones no demandan un alto nivel de intercambios y altas velocidades, se puede utilizar el protocolo más sencillo, por ejemplo, el protocolo ASCII, que describiremos posteriormente.

Deben poseer un alto nivel de integridad en la transferencia de datos. En un ambiente industrial con altos niveles de ruido eléctrico y donde no se permite errores en la transferencia de datos, por ejemplo, en el control de operaciones críticas, los protocolos deben poseer sistemas muy robustos para la detección y recuperación de errores. En este aspecto los códigos CRC son muy utilizados.

Alta velocidad en la actualización de parámetros. En sistemas industriales puede ser necesaria la actualización simultánea de un gran número de parámetros de control de operaciones. La naturaleza de muchas operaciones de control y supervisión no permite retardos entre los primeros y los últimos dispositivos en una cadena de transmisión de los datos. Los protocolos empleados deben cumplir con esta condición.

En su mayoría, los protocolos industriales no están normalizados y son propiedad de los fabricantes del sistema. Esta situación es de particular importancia cuando se necesita interconectar, por ejemplo, dos SCADA diferentes, lo cual es particularmente complicado pues los dispositivos utilizados en los SCADA generalmente no son interoperables. Algunos de los protocolos industriales han llegado a un grado de aplicación que puede considerarse que ellos son “protocolos de facto”; por ejemplo, el protocolo MODBUS es uno de ellos, pero aún así sigue siendo un protocolo propietario. En el momento actual está en período de prueba y desarrollo una cantidad de protocolos cuyos creadores desean conseguir su normalización por las entidades internacionales. Estos protocolos se denominarán Redes de Campo (Fieldbus); más adelante daremos una breve descripción de las características deseables de estas redes y algunos de los prototipos que están en desarrollo.

Los protocolos industriales que describiremos a continuación son algunos de los más utilizados en la industria venezolana. La descripción la haremos desde el punto de vista de la Capa Enlace y de Red; en la Capa Física se aplican las interfaces y dispositivos que se describieron en el Capítulo III y solamente los mencionaremos.

Como los protocolos industriales que se describirán a continuación son, en su mayoría, de propiedad privada, no quisiéramos que su descripción se interprete como publicidad de los mismos o como violación de derechos de “copywrite”; solamente es para beneficio de estudiantes, técnicos e ingenieros interesados en las técnicas de la Transmisión de Datos en instalaciones industriales.

5.4.2. Protocolos ASCII

Los protocolos ASCII son muy populares debido a su simplicidad, lo cual los hace apropiados para instalaciones sencillas, generalmente una Maestra y una Remota. Su principal desventaja es su lentitud y su incapacidad para manejar sistemas más complicados, por ejemplo, sistemas multipunto de más de 32 remotas.

En la práctica podemos encontrar dos tipos de protocolo ASCII: el protocolo ASCII para Transmisores Digitales y el protocolo ASCII ANSI X3.28-2.5-A4; este último es un poco más elaborado. La primera versión del protocolo ANSI X3.28 apareció en 1976.

Protocolo ASCII para Transmisores Digitales

En el comercio se encuentra una variedad de transmisores que aceptan la salida de sensores (de temperatura, flujo, densidad, etc.) la cual procesan y transmiten asincrónicamente en un formato digital hacia un puerto serie de un procesador, algunas veces denominado "indicador". Generalmente en el procesador la información es almacenada y actualizada normalmente ocho veces por segundo y está disponible, si es solicitada, para ser enviada a un servidor de control. El transmisor digital puede también aceptar comandos desde el servidor.

Características

- Control por Caracteres
- Transmisión HDX asincrónica
- Velocidades: entre 300 y 1200 bps
- Interfaces: RS-232C en operación punto a punto. Si acaso se llega a utilizar en operación multipunto, entonces hay que emplear la interfaz RS-485.

Estructura de los Formatos

El intercambio se basa en Comandos y Respuestas entre el transmisor y el procesador. El procesador genera siempre las secuencias de comando. Los formatos para los comandos y respuestas tiene la configuración mostrada en la Fig. 5.16.

Comando desde el Procesador: Leer Datos (Read Data)

Caracteres →	1	1	1	1	1	1
	#	ADD	R	D	BCC	CR

Respuesta desde el Transmisor

Caracteres →	1	1	1	1	9	1	1
	*	ADD	R	D	Valor del Dato	BCC	CR

Fig. 5.16. Formatos para Mensajes de Comandos/Respuestas.

Los caracteres # (23H), * (2AH) y CR (0DH) son caracteres ASCII, utilizados para delimitar los formatos. Nótese que estos formatos tienen una configuración fija, por cuanto se pide la salida única de un transmisor cuya dirección es ADD. Los caracteres R y D significan Leer Datos (Read Data, RD). El contenido del campo BCC es la suma en hexa-

decimal de los caracteres previos tanto en comando como en respuesta. Los nueve caracteres del campo Valor del Dato contienen la polaridad (±), siete dígitos decimales y un punto decimal. Por ejemplo, si el procesador le pide al transmisor 2 que lea sus datos y este responde con el valor -172.15, los formatos de comando/respuesta tendrán la forma mostrada en la Fig. 5.17.

Comando de Lectura de Datos desde el Procesador

#	2	R	D	EBH	CR

Respuesta del Transmisor

*	2	R	D	-	0	0	1	7	2	.	1	5	6AH	CR

Fig. 5.17. Formatos de Comando/Respuesta en un caso práctico.

En realidad, el BCC de la respuesta es 26AH, pero la convención establece que se puede descartar el 2 y dejar solamente 6AH en el BCC, pues se dispone sólo de un octeto.

Indicación de Error

Si el transmisor recibe un comando en donde hay un error, él emitirá una respuesta cuyo formato tiene la siguiente estructura, Fig. 5.18.

Caracteres →	1	1	1	Hasta 16	1
	?	ADD	SP	TIPO DE ERROR	CR

Fig. 5.18. Formato de Indicación de Error

Los caracteres ? (3FH) y SP (20H) son caracteres ASCII que caracterizan al formato de Indicación de Error. El tipo de error puede ser Error en el BCC, Caracteres en Error, Mala Sintaxis, etc.

Protocolo ASCII ANSI X3.28-2.5-A4

Este protocolo es mucho más elaborado que el anterior y se puede usar para interconectar un PLC o cualquier otro procesador, por ejemplo, un PC corriente, con un número de dispositivos que puede ir hasta 32.

Características

- Control por Caracteres
- Transmisión HDX asincrónica
- Formato del Carácter: un dígito de arranque, siete de información, uno de paridad par (o no paridad) y uno de pare
- Velocidades: entre 300 y 19200 bps
- Un procesador puede controlar hasta 32 dispositivos de campo
- Interfaz de preferencia: RS-485

Estructura de los Formatos

Formatos de Lectura. Son comandos/respuestas de Petición de Lectura (Read Request/Response) entre el procesador y un dispositivo, cuya dirección es ADD, solicitando una información específica. Tiene la forma mostrada en la Fig. 5.19.

Caracteres →	1	4	3	1
	EOT	ADD	PAR	ENQ
Comando	Inicializar Enlace	Campo de Direcciones	Campo de Parámetros	Petición

Fig. 5.19. Formato de Petición de Lectura (Read Request).

EOT: Inicializa todos los dispositivos conectados al enlace

ADD: Direcciones en el rango 00-31. Para asegurar la integridad de la transferencia, los dígitos se repiten. Por ejemplo, si la dirección es 26, entonces ADD = 2266

PAR: Parámetros o valores de la información solicitada, de 0-999

ENQ: Fin de la trama

Formato de Respuesta de Lectura (Read Response). Es la respuesta del dispositivo al comando anterior. Tiene la forma mostrada en la Fig. 5.20.

Caracteres →	1	3	6	1	1 ó 2
	STX	PAR	DATA	ETX	BCC
Respuesta	Comienzo de Trama	Campo de Parámetros	Campo de Información	Fin de Trama	Block Check Character

Fig. 5.20. Formato de Respuesta de Lectura (Read Response).

STX: Indica comienzo de la Trama

PAR: Parámetros de información enviados, de 0-999

DATA: El primer carácter es la polaridad (±) o un espacio (SP). Un máximo de cuatro dígitos decimales y un punto decimal conforman los otros cinco caracteres

ETX: Indica el fin de la información

BCC: Caracteres de Verificación de Error. Se calcula efectuando una suma de verificación módulo-2 sobre los campos [PAR + DATA + ETX]. En las versiones actuales se utiliza el código CRC-16, de dos caracteres, que veremos en el Capítulo VII.

El intercambio de mensajes entre el procesador y el dispositivo continúa después de la primera Petición de Lectura con una cualquiera de las siguientes acciones:

--- Seguir a la próxima trama: respondiendo con un ACK (la transmisión fue correcta)

--- Volver a la trama anterior: Respondiendo con un carácter BS (08H)

--- Pidiendo repeticiones de la misma trama: respondiendo con NAK (error en la trama

El intercambio finaliza cuando el procesador o el dispositivo responden con un EOT.

Formatos de Escritura (Write). Son comandos/respuestas entre el procesador y el dispositivo para que éste cambie sus parámetros de Lectura o Escritura. En la Fig. 5.21 se muestra la estructura de estos formatos.

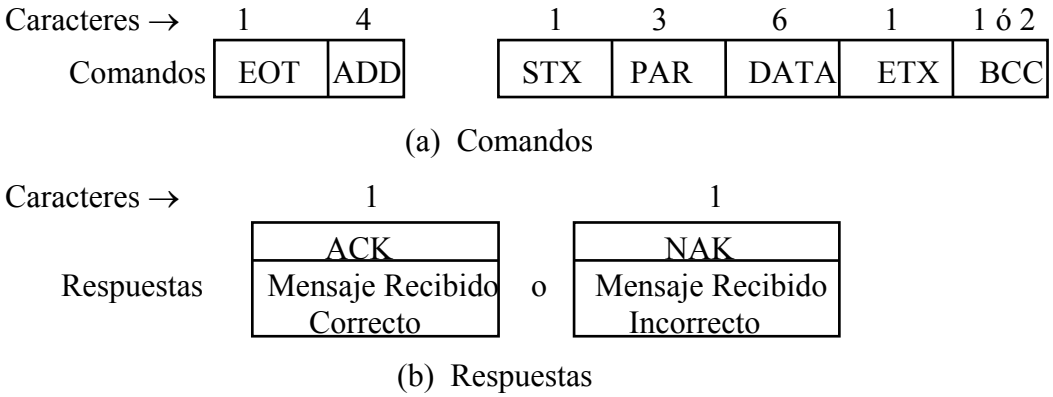


Fig. 5.21. Formatos de Petición de Escritura (Write Request).

El intercambio de información continúa hasta que el procesador (en Write Request) o el dispositivo (en Read Response) terminan su trama con EOT.

♣ Ejemplo 5.3

En un sistema con protocolo ASCII ANSI X3.28 se produjo el siguiente diálogo entre la MTU y una Estación Remota.

<u>Petición</u>: La MTU solicita a la estación remota número 12 el valor del voltaje en un punto especificado del sistema. Vamos a suponer que los tres caracteres de codificación para los parámetros son:

Leer => DC1; Voltaje => DC2; Punto especificado => DC3

<u>Respuesta</u> La estación remota # 12 responde diciendo que el valor del voltaje pedido es de +146.5

(a) Estructure los formatos correspondientes mostrando las secuencias que se verían en un Analizador Digital. La paridad es par. En el BCC coloque XY, pero en ASCII.

(b) Si estas secuencias se transmiten utilizando un Módem V.22bis, calcule el tiempo de transmisión correspondiente.

Solución:

(a) Petición:

EOT => 0001000011

Dirección: 12 => 1122 => 0100011011 0100011011 0010011011 001001101

Parámetros: DC1 DC2 DC3 => 0100010001 0100100001 0110010011

ENQ => 0101000001

La trama de comando o petición tiene la forma (vista en el analizador)

0001000011010001101101000110110010011011001001101010001000101
0010000101100100110101000001

Respuesta:

STX => 0010000011

Parámetros: DC1 DC2 DC3 => 0100010001 0100100001 0110010011

Data: +146.5 => 0110101001010001101100010110110110110010001101011010101011001

ETX => 0110000001

BCC => XY => 00001101110100110101

La trama de respuesta tiene la forma (vista en el analizador)

0010000011010001000101001000010110010011011010100101000110110001
0110110110110010001101011010101100101100000010000110111010011010 1

(b)

Petición

EOT => 10 bits

Dirección: 12 => 1122 => 40 bits

Parámetros: DC1 DC2 DC3 => 30 bits

ENQ => 10 bits

Información en la trama de petición: $I_p = 10 + 40 + 30 + 10 = 90$ bits

El Módem V.22bis transmite a una velocidad Vi = 2400 bps; por lo tanto, el tiempo de transmisión de la trama de petición será $T_p = I_p/Vi = 90/2400 = 37{,}5$ ms.

Respuesta:

STX => 10 bits

Parámetros: DC1 DC2 DC3 => 30 bits

Data: +146.5 => 60 bits

ETX => 10 bits

BCC => 20 bits

Información total en la trama de respuesta: $I_r = 10 + 30 + 60 + 10 + 20 = 130$ bits

Tiempo de transmisión de la trama de respuesta: $T_r = 130/2400 = 54{,}2$ ms

♣

5.4.3. Protocolo HART

Introducción

El Protocolo HART (Highway Addressable Remote Transducer) permite la transmisión simultánea de información analógica y digital pues generalmente opera superpuesto sobre el lazo de corriente de 4-20 mA, y utiliza una señal FSK para la transmisión digital binaria a 1200 bps, equivalente a un módem Bell 202 (2200 Hz para un Cero y 1200 Hz para un UNO), Fig. 5.22. La frecuencia máxima de la señal analógica no va más allá de 10 Hz.

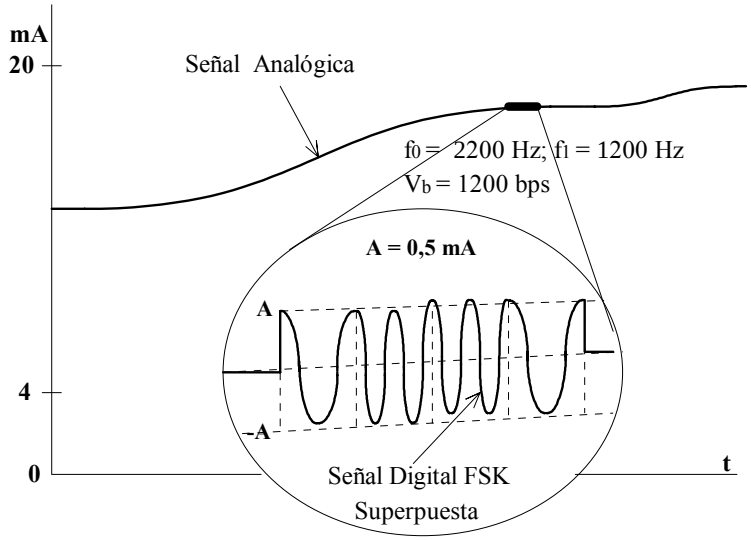


Fig. 5.22. Mecanismo de transmisión en el Protocolo HART

Como el valor promedio de una señal FSK es cero, ella no afecta los valores analógicos presentes en el lazo de corriente. La impedancia mínima del lazo requerida para la comunicación está entre 230 y 1200 Ohm, y es compatible con las barreras de seguridad intrínseca normalmente utilizadas en áreas peligrosas (la seguridad intrínseca es una metodología de diseño de circuitos en los cuales una chispa o un efecto térmico producido en condiciones de trabajo normales o en condiciones de falla especificadas, no puede causar la ignición de una atmósfera explosiva determinada).

El Protocolo HART se utiliza típicamente en configuración punto a punto, para la configuración remota, ajuste de parámetros y diagnóstico de dispositivos de campo inteligentes.

Este protocolo no es apropiado para sistemas que requieren respuestas muy rápidas; sin embargo, si se requieren altas velocidades, se puede utilizar el protocolo en

configuración multipunto (multidrop). En este caso no se emplea el lazo de corriente, es decir, la presencia de señales analógicas en el sistema; todas las mediciones se efectúan con los formatos HART.

Cada transmisor produce una corriente fija de 4 mA; además, cada uno de ellos posee un módem HART. Asimismo, el protocolo se puede utilizar asociado con otros protocolos, por ejemplo, con Modbus y aún con alguna red de campo (FIELDBUS).

Una particularidad del Protocolo HART es que posee dos terminales o maestras de control: una maestra de control fija (generalmente en la Sala de Control) y una maestra de control portátil. Esto permite el ajuste de parámetros o cualquier otra operación desde cualquier punto del lazo.

Como es común en casi todos los protocolos industriales, el protocolo HART tiene una estructura que comprende solamente las Capas Aplicación, Enlace de Datos y Física.

Características

Las características del protocolo HART son:

- Control por Conteo de Bytes
- Transmisión Asincrónica HDX, punto a punto y multipunto
- Carácter Básico de 1 bit de arranque, 8 de información, 1 de paridad impar y 1 de pare; NRZ
- Una Maestra puede controlar hasta 15 Remotas
- Operación en Modo de Respuesta Normal
- Permite hasta 250 variables en cada dispositivo de campo
- Distancia máxima: hasta 3000 m con par trenzado apantallado calibre AWG 24; hasta 1500 m con cable multipar, par trenzado común apantallado calibre AWG 20.
- Modulación FSK, 1200 bps, con Módems Tipo Bell 202
- Medio de transmisión: par trenzado y el lazo de corriente de 4-20 mA
- Interfaces asociadas: RS-232D y RS-485

En la Fig. 5.23 se muestran dos configuraciones típicas del Protocolo HART.

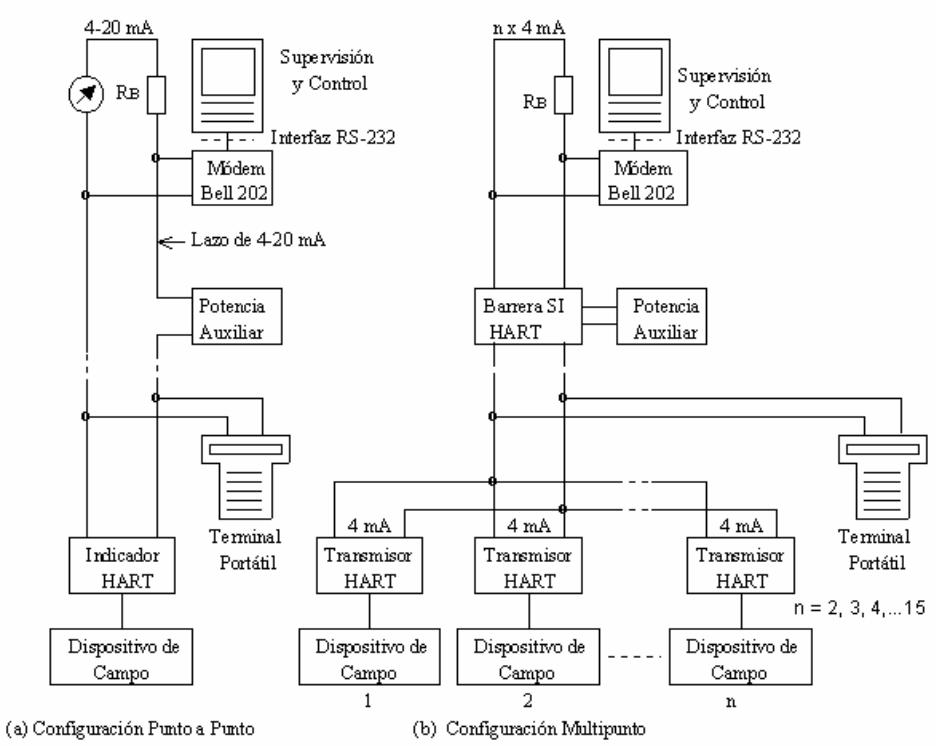


Fig. 5.23. Configuraciones Punto a Punto y Multipunto.

En la Fig. 5.24 se presenta una muestra de su interoperabilidad con otros protocolos:

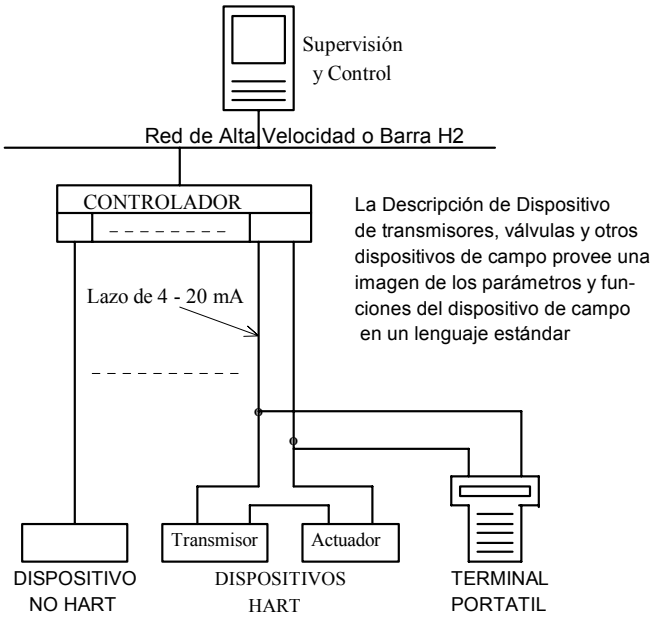


Fig. 5.24. Interoperabilidad del protocolo HART

Formato del Protocolo

El formato HART tiene la forma general mostrada en la Fig. 5.25.

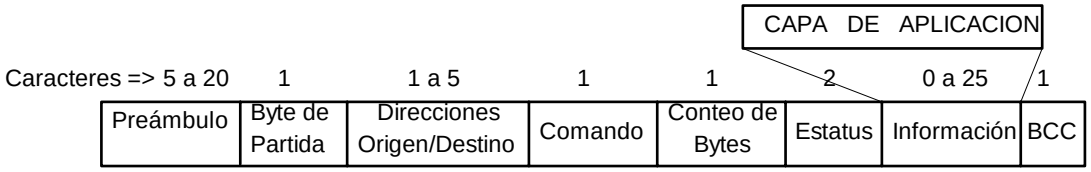


Fig. 5.25. Formato del Protocolo HART

Preámbulo. Es una secuencia de 5 a 20 octetos o bytes de puros UNOS que permite la sincronización de la trama.

Byte de partida. Indica el tipo de mensaje: maestra a esclava, esclava a maestra, “modo ráfagas” desde una esclava, etc. Puede indicar también el formato del campo Direcciones: formato corto o formato largo. En el “modo ráfagas (Burst mode)” una esclava transmite continuamente un mensaje dado a una velocidad de 3 a 4 mensajes por segundo. Se pueden alcanzar velocidades superiores pero solamente en configuraciones punto a punto.

Direcciones. Incluye tanto la dirección de la maestra (un UNO para la maestra primaria o un CERO para la maestra secundaria o portátil) y la dirección de la esclava. En formato corto, la dirección de la esclava es de 4 dígitos que contienen la “dirección de interrogación (polling address)” de 0 a 15. En formato largo, la dirección de la esclava es de 38 dígitos que contienen un “identificador unívoco” de un dispositivo en particular, y un dígito para indicar que la esclava está en modo ráfagas.

Comando. Contiene el comando o función específica del mensaje. Los tipos de comando son: comandos universales, comandos comunes y comandos específicos de dispositivo. Más adelante se describen estos comandos.

Conteo de Bytes. Contiene el número de bytes contenido en los campos Estatus e Información. El receptor utiliza este número para conocer el fin del mensaje.

Estatus. Este campo, conocido también con el nombre de “Código de Respuesta”, está presente solamente en los mensajes de respuesta de una esclava. Contiene información acerca de errores de comunicación en el mensaje, el estado del comando recibido y el estado del dispositivo mismo.

Información. Puede estar o no presente, dependiendo del tipo de mensaje. Su longitud máxima es de 25 bytes, aunque en algunos sistemas se puede encontrar campos de más de 25 bytes.

BCC. Contiene el resultado de una operación en O-Exclusivo o "paridad par longitudinal", efectuada desde el Octeto de Control hasta el campo Información. Junto con el bit de paridad de cada byte, determina o detecta los errores de comunicación.

Comandos HART

El Conjunto de Comandos HART está organizado en tres grupos y provee el acceso en lectura/escritura a toda la información disponible en los instrumentos de campo inteligentes.

El conjunto de comandos comprende tres categorías:

- Comandos Universales. Proveen el acceso a información que es útil en las operaciones normales, por ejemplo, el fabricante del instrumento, el modelo, número de serie, rango de operación, variables físicas, etc.
- Comandos comunes. Proveen el acceso a funciones que pueden efectuarse en muchos dispositivos pero no en todos, como, por ejemplo, leer variables, calibración (cero, rango), iniciar autotest, valores constantes, etc.
- Comandos específicos de dispositivo. Proveen el acceso a funciones que son propias de un dispositivo de campo particular, como, por ejemplo, funciones específicas del instrumento, arranque/pare/reset, seleccionar la variable primaria, habilitar el control PID, sintonizar el enlace, opciones especiales de calibración, etc.

Los comandos universales y los comandos comunes aseguran la interoperabilidad entre productos de diferentes fabricantes.

La configuración HART es muy apropiada en aplicaciones que requieren operaciones de seguridad intrínseca. Con el protocolo HART se pueden utilizar las barreras Zener y las barreras aisladoras, de uso común en instalaciones en áreas peligrosas. El protocolo HART es de uso común en las instalaciones petroleras.

Comandos de identificación de direcciones

Cada dispositivo HART posee una dirección de 38 dígitos que contiene el código de identificación del fabricante, el código del dispositivo y el número de identificación particular del dispositivo; es como la cédula de identidad del dispositivo. La maestra HART debe conocer esa dirección para poder interactuar con dicho dispositivo. La maestra puede conocer la dirección de una esclava mediante dos comandos que hacen que la esclava responda dando su dirección. Estos comandos, **0** u **11**, son:

0. Leer Identificador Unívoco. Este comando es el preferido para iniciar un enlace con una esclava porque le permite a la maestra conocer la dirección de cada esclava sin interactuar con o sin intervención del usuario. Cada dirección de interrogación (de 0 a 15) permite conocer la dirección propia de cada dispositivo de campo.

11. Leer Identificador Unívoco por Etiqueta. Este comando es útil cuando hay más de 15 dispositivos en la red o si los dispositivos no fueron configurados con direcciones unívocas.

♣ Ejemplo 5.4

Se tiene una configuración HART multipunto con N transmisores y una Maestra. La Maestra interroga a los transmisores a una frecuencia tal que cada vez que un transmisor es interrogado, él contiene información nueva. En HART el número máximo de transmisores es N = 15.

Mediante un comando CA de la Maestra, los N transmisores adquieren simultáneamente la señal correspondiente durante un tiempo de adquisición de T_a = 25 ms, y la retienen en un registro durante un tiempo T_r para transmitirla a la Maestra, cuando le sea requerida, mediante un comando CR. Una vez adquirida la señal, la Maestra comienza a interrogar cíclicamente a los transmisores, los cuales envían la información neta en 25 caracteres. Interrogado el último transmisor, la Maestra ordena una nueva adquisición y así sucesivamente se repite el ciclo. La velocidad de transmisión es de 1200 bps.

Se desea saber el tiempo máximo de retención T_r en las memorias de los transmisores, y el correspondiente período de interrogación T_{int} de cada uno de los transmisores.

Los preámbulos de las tramas contendrán 15 caracteres, las direcciones serán de 4 caracteres y las tramas de comando no llevarán información en el campo de información. Cada carácter contiene 11 dígitos.

Solución:

Las especificaciones del sistema se muestran en el diagrama de tiempos de la figura.

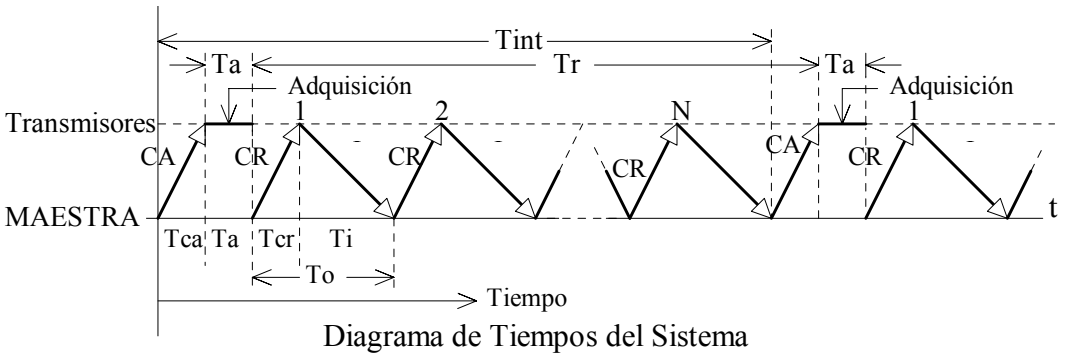


Diagrama de Tiempos del Sistema

Número de caracteres en las tramas de comando CA y CR:

$N_{CA} = N_{CR} = 15 + 1 + 4 + 1 + 1 + 2 + 1 = 25$ caracteres

Número de caracteres en las tramas de información:

$N_i = 15 + 1 + 4 + 1 + 1 + 2 + 25 + 1 = 50$ caracteres

Cálculo de los tiempos: $V_i = 1200\text{bps}$; $T_a = 25$ ms;

$$T_{CR} = \frac{11N_{CR}}{V_i};\ T_{CA} = \frac{11N_{CA}}{V_i};\ T_i = \frac{11N_i}{V_i};\ T_o = T_{CR} + T_i;$$

De la figura, vemos que

Tiempo de retención, $T_r = NT_o + T_{CA} = \frac{11N_{CA}}{V_i}(N_{CR} + N_i + N_{CA})$

Período de Interrogación, $T_{int} = T_{CA} + T_a + NT_o = \frac{11}{V_i}[N_{CA} + N(N_{CR} + N_i)] + T_a$

Las tiempos máximos se tendrán cuando N = 15. Entonces, para N = 15,

$T_{r\,max} = 13{,}75\,\text{seg}$ y $T_{int\,max} = 10{,}567\,\text{seg}$

Por ejemplo, para N = 10, $T_r = 9{,}167$ seg y $T_{int} = 7{,}129$ seg

Los transmisores podrán producir ahora señales cada 7,129 segundos y la mantendrán en un registro durante 9,167 segundos para ser transmitidas.

♣

5.4.4. Protocolo Modbus

Modbus es un protocolo de transmisión desarrollado por la Gould Modicon (ahora AEG Schneider Automation) para sistemas de control y supervisión de procesos (SCADA) con control centralizado. Utilizando este protocolo, una Estación Maestra (MTU) puede comunicarse con una o varias Estaciones Remotas (RTU) con la finalidad de obtener datos de campo para la supervisión y control de un proceso. El protocolo Modbus es muy utilizado en la industria en una gran variedad de sistemas SCADA.

En Modbus los datos pueden intercambiarse en dos modos de transmisión: en Modo RTU y en Modo ASCII. El Modo RTU, algunas veces denominado Modbus-B (por Modbus Binario), es el tipo más común y es el que describiremos a continuación. En el modo de transmisión ASCII los mensajes generalmente son de duración casi del doble que en el modo de transmisión RTU.

Aunque el Protocolo Modbus es anterior al desarrollo del Modelo ISO/OSI, se le puede identificar tres niveles: un nivel de Capa Física, un nivel de Capa Enlace y un nivel de Aplicación. En Modbus no se define una determinada interfaz de Capa Física y el usuario puede elegir entre alguna de las interfaces vistas en el Capítulo III que sea apropiada para las velocidades de transmisión definidas en el protocolo. A continuación vamos a describir la Capa Enlace de Modbus. La descripción de la Capa Aplicación queda fuera de los límites que nos hemos impuesto.

Características (Modo RTU):

- Control por Conteo de Caracteres
- Transmisión FDX/HDX asincrónica
- Carácter Básico NRZ de ocho dígitos de información (transmitidos como dos caracteres hexadecimales de cuatro dígitos), un dígito de arranque, un dígito de paridad y un dígito de pare; si no hay paridad, se toman dos dígitos de pare
- Una Maestra puede controlar hasta 247 Remotas

- Operación en Modo de Respuesta Normal (NRM)
- Topología en Estrella
- Interfaces de Capa Física: RS-232D, RS-422A, RS-485, o lazo de 4-20 mA
- Velocidades de Transmisión: 1200 a 19200 bps
- Medios de Transmisión: par trenzado, cable coaxial, radio

Funciones

Todas las funciones soportadas por el Protocolo MODBUS se identifican mediante un código. Algunas de estas funciones son:

- Comandos de control para lectura de posición y reposición de una bobina o de un grupo de bobinas
- Comandos de control para lectura de entradas y salidas digitales (discretas)
- Comandos de control para lectura y reposición de registros
- Otras funciones para test, diagnóstico, polling, condiciones de excepción, etc.

En la Tabla siguiente se muestran los códigos y direcciones de algunas de las funciones más utilizadas en el Protocolo Modbus.

Nótese que las entradas discretas y las bobinas se representan con simples dígitos, mientras que las variables analógicas que van en los registros se representan con octetos. En los formatos de comando/respuesta se colocan las direcciones relativas y el sistema hace la conversión correspondiente. Por ejemplo, el registro de memoria 40001 se representa con la dirección relativa 0000 (00H).

Tabla de Funciones y Códigos en Modbus

FUNCION	COD	DIRECCION ABSOLUTA	DIRECCION RELATIVA	DISPOSITIVO/DATOS
Leer Estado de una Bobina	01H	00001 a 09999	0 a 9998	Bobinas o Relés
Posicionar una Bobina	05H	00001 a 09999	0 a 9998	Bobinas o Relés
Posicionar Múltiples Bobinas	15H	00001 a 09999	0 a 9998	Bobinas o Relés
Leer Estado de Entradas	02H	10001 a 19999	0 a 9998	Entradas Discretas
Leer Registros de Entrada	04H	30001 a 39999	0 a 9998	Registros de Entrada
Leer Registro de Salida	03H	40001 a 49999	0 a 9998	Registros de Memoria
Reponer un Registro	06H	40001 a 49999	0 a 9998	Registros de Memoria
Reponer Múltiples Registros	16H	40001 a 49999	0 a 9998	Registros de Memoria
Leer Estados de Excepción	07H	---	---	---
Prueba y Diagnóstico	08H	---	---	---

Sincronización y Estrategias de Interrogación (Polling)

La sincronización de la trama se establece limitando el intervalo de tiempo (silencio o "gap") entre caracteres sucesivos dentro de una trama. Si dentro de una trama el intervalo sin recibir un nuevo carácter es mayor que la duración de 1,5 caracteres, el mensaje es descartado y el nuevo carácter que llega se interpreta como la dirección de una nueva trama. Después del BCC o CRC se tiene otro "gap" de por lo menos 3,5 caracteres como separación con el nuevo mensaje. Si este gap es menor que 3,5 caracteres, el sistema lo interpreta como un carácter de la trama anterior, lo cual produce un error que es detectado por el CRC.

Todas las estaciones remotas presentes en el sistema deben ser incluidas en las Tablas o Listas de Interrogación. El Servidor de Comunicación debe interrogar a la Remota basado en los parámetros contenidos en la Lista de Interrogación. Esta Lista depende del sistema en particular, pero básicamente contiene los siguientes parámetros:

- Secuencia de Interrogación
- Tiempo entre Interrogaciones (por unidad remota)
- Tiempo Cumplido entre Interrogaciones
- Número de intentos de interrogación de unidades remotas
- Estrategias de interrogación para unidades remotas con problemas de comunicaciones.

Cuando se programa la MTU en el sistema Modbus, debe considerarse que ha ocurrido un error en la comunicación si no se recibe respuesta desde la RTU dentro de un tiempo razonable. Este retardo depende del tipo de mensaje, de la distancia, de la velocidad de transmisión, de las características de los transceptores (preámbulo, tiempo de alzada, etc.) y del período de interrogación o barrido. Este tiempo se fija como el tiempo cumplido (time-out) y se incluye en la secuencia de interrogación.

En el caso de que una RTU no responda a un comando, la MTU debe retransmitir el mensaje un cierto número de veces; este número es variable. Si la falla continúa, la MTU anotará a la RTU en la lista de interrogación y continuará con la rutina de interrogación para unidades fuera de línea. Normalmente esta rutina consiste en interrogar a la RTU fallante una sola vez por ciclo de barrido, en vez de realizar el número de interrogaciones normal establecido en la lista de interrogación.

Formatos de Trama en Modo RTU. Capa Enlace

El protocolo Modbus posee dos formatos para el intercambio Maestra/Remota: uno es el formato general de trama y el otro es el formato para "respuestas excepcionales". Se dice que una respuesta es excepcional cuando una remota responde que el mensaje recibido es ilegal, es decir, que es un error no atribuible al medio de transmisión.

El formato general de la trama en Modo RTU se muestra en la Fig. 5.25.

Octetos →	1	1	Variable	2	
Gap > 3,5 Caracteres	Campo de Direcciones	Campo de Funciones	Campo de Información	CRC	Marca de 3,5 Caracteres

Fig. 5.25. Formato General de la Trama en Modo RTU

- Campo de Direcciones. En este campo se indica siempre la dirección de la RTU de destino, sea en comando sea en respuesta. Si la MTU se dirige simultáneamente a todas las RTU (Modo "Broadcast"), el campo de direcciones se pone a CERO (00H).
- Campo de Funciones. En este campo se indica a la RTU la función que debe ejecutar. La RTU responde con este mismo valor si la respuesta es normal; si la respuesta es excepcional, la RTU coloca un UNO en el MSB del Campo de Funciones de la respuesta
- Campo de Información. Este campo contiene la información que la RTU necesita para realizar la función específica requerida por la MTU, o la información requerida por la MTU en respuesta a una petición suya
- CRC. En este campo va una información que le permite a la MTU y RTU verificar si se ha producido errores en la transmisión. El contenido de este campo se calcula sobre los tres campos anteriores mediante el Código de Redundancia Cíclica CRC-16, que veremos en el Capítulo VII. El error se recupera mediante retransmisión de la trama en error.

Formato de Respuesta Excepcional

Cuando ocurre un error que no puede ser atribuible al medio de transmisión sino a errores de programación y operación del sistema, el mensaje de respuesta a la MTU debe ser excepcional. Errores de este tipo se producen cuando dentro de un campo perfectamente válido se envía una petición ilegal, es decir, que no está definida en la RTU de destino. Por ejemplo, si una RTU dada controla solamente las bobinas 514 a 521 (ocho bobinas) y recibe de la MTU un código 01H con los números 682 a 689, que no son los suyos, la RTU retransmitirá una respuesta excepcional.

Los mensajes de respuesta excepcional tienen la siguiente configuración, Fig. 5.26. Para simplificar la figura, no se muestran los "gaps".

Octetos →	1	1	1	2
Dirección RTU	Función	Código de Excepción		CRC

Fig. 5.26. Formato de los Mensajes de Respuesta Excepcional.

- Dirección RTU. Corresponde a la dirección de la RTU que detectó el error
- Función. Corresponde al Código de Función que la RTU recibió y cuya ejecución ella no tiene especificada. Se retransmite con el dígito de más peso puesto a UNO

- Código de Excepción. Es el código que le indica a la MTU cuál fue el error detectado
- CRC. Tiene la misma estructura y función que en el formato de mensajes.

Entre los códigos de excepción los más importantes son:

(1) Código 01H. Función ilegal. La función solicitada no está definida.

(2) Código 02H. Valor ilegal en la Dirección solicitada. La dirección de un punto especificado en el Campo de Datos de un mensaje es ilegal; no está definida en la RTU.

(3) Código 03H. Valor ilegal en el Campo de Datos. El valor especificado en el Campo de Datos de comando no está permitido.

(4) Código 04H. Falla en un Dispositivo Asociado. La RTU ha fallado al responder a un mensaje. Este mensaje de excepción se envía cuando la RTU comenzó a procesar el mensaje y ocurre un error irrecuperable.

(5) Código 05H. Reconocimiento. La RTU aceptó el comando PROGRAM y comienza a procesar una respuesta de larga duración. Al terminar de procesar la respuesta, con un comando especial debe participar a la MTU que ha finalizado.

(6) Código 06H. Ocupado, Mensaje Rechazado. El mensaje fue recibido sin error, pero la RTU se encuentra procesando un comando de larga duración. La MTU debe retransmitir el mensaje después de un tiempo especificado.

Tipos de Mensaje

El Protocolo Modbus es un protocolo muy completo con muchos tipos de mensaje. Los intercambios de mensajes en este protocolo se pueden dividir en dos tipos: peticiones de datos y peticiones de control. En las peticiones de datos la MTU transmite un mensaje solicitando valores de datos a la RTU, la cual responde transmitiendo los valores requeridos. Estos valores de datos pueden ser valores discretos o analógicos, contenidos de un acumulador, variables calculadas, estado de la RTU, etc. Los mensajes de control son aquellos en los cuales la MTU solicita a la RTU que cambie el estado de un dispositivo de campo, o que cambie o modifique una condición interna de la RTU. Vamos a describir entonces algunos de los mensajes más comunes.

- Leer Estado de una Bobina (Read Coil Status), Código 01H

Este mensaje permite a la RTU obtener el estado (ON/OFF) de salidas discretas (estados de una bobina o relé). El modo “broadcast” no es aceptado por esta función. Hay que indicar el número inicial de la salida discreta y el número de salidas a leer. Se puede leer hasta 2000 salidas con este comando. La respuesta a este comando contiene el número de caracteres de datos, los datos requeridos ordenados en forma creciente, una salida por cada dígito (ON = UNO; OFF = CERO). El dígito menos significativo del primer octeto de información lleva el estado de la primera bobina leída. Si el número de bobinas no es un múltiplo de ocho, el último octeto se rellenará con ceros en su parte alta. Cuando se pide

información que requiere más de dos octetos, el dígito menos significativo del primer octeto de información de la respuesta desde la RTU contiene el estado de la primera bobina solicitada.

En la Fig. 5.27 se muestra el formato comando/respuesta del Código de Función 01H cuando la MTU solicita a la RTU 1 el estado de las bobinas once y doce; la RTU responde diciendo que ambas bobinas están activadas (ON). Todas las cantidades están expresadas en hexadecimal y las direcciones son las relativas mostradas en la Tabla de Funciones y Códigos. Nótese que los campos Bobina de Partida y Número de Bobinas contienen dos octetos cada uno.

Comando

	Dirección	Función	Información				CRC
MTU			Bobina de Partida		Número de Bobinas		
	01H	01H	00H	0AH	00H	02H	9DC9H

Respuesta

			Información		
RTU 1	Dirección	Función	Número de Octetos	Estado de las Salidas	CRC
	01H	01H	01H	03H	1189H

Fig. 5.27. Formatos para Lectura del Estado de una Bobina.

Las características de las tramas de la función Leer Estado de Entradas (Read Input Status), Código 02H, son iguales a las de la función Read Coil Status, Código 01H, pero se aplica a entradas discretas.

Consideremos el caso de una petición ilegal en cuyo caso la RTU responde con un mensaje excepcional. Supongamos que la MTU pide a la RTU 1 leer el estado de las bobinas 514 a 521 (ocho bobinas que comienzan en el número 0201H) que no están atendidas por la RTU. El intercambio de mensajes tiene la forma mostrada en la Fig. 5.28.

Comando

	Dirección	Función	Información				CRC
MTU			Bobina de Partida		Número de Bobinas		
	01H	01H	02H	01H	00H	08H	6DB4H

Respuesta Excepcional

	Dirección	Función	Código de Excepción	CRC
RTU 1	01H	81H	02H	C191H

Fig. 5.28. Formatos de Comando/Respuesta Excepcional

- Leer Registros de Salida (Read Holding Registers), Código 03H

Este comando permite a la MTU obtener el contenido binario de registros internos en la RTU que contienen valores asociados con contadores y temporizadores. El modo

"broadcast" no es aceptado en esta función. En el formato de comando se debe indicar el número de registro inicial y el número de registros que se desea leer. Permite la lectura de hasta 125 registros por comando. La respuesta a este comando contiene el número de octetos de datos, los datos correspondientes ordenados en forma creciente, con dos octetos por registro, con el octeto más significativo de primero.

En la Fig. 5.29 se muestra el formato comando/respuesta del Código de Función 03H cuando la MTU solicita a la RTU 5 el contenido del Registro 40003. La RTU 5 responde diciendo que el contenido del Registro 40003 es el valor 2047 (07FFH). Los campos Registro Inicial y Número de Registros contienen dos octetos cada uno. Nótese que el primer octeto de datos es el octeto de mayor orden del primer registro, que en este caso en particular es el único registro solicitado. Si se hubiera pedido más registros, el segundo par de octetos correspondería al segundo registro y así sucesivamente.

Comando

			Información				
MTU	Dirección	Función	Registro Inicial		Número de Registros		CRC
	05H	03H	00H	02H	00H	01H	25CAH

Respuesta

	Dirección	Función	Información		CRC
RTU 3			Número de Octetos	Datos del Registro	
	05H	03H	02H	07H FFH	FA34H

Fig. 5.29. Formatos para Leer Registros de Salida.

Las características de los formatos de la función Leer Registros de Entrada (Read Input Registers), Código 04H, son iguales a las de la función Read Holding Registers.

- Posicionar una sola Bobina (Force Single Coil), Código 05H

Este comando permite que la MTU pueda alterar el estado (ON/OFF) de una bobina o punto discreto de la RTU, en la forma ON = FF00H, OFF = 0000H; otros valores no son legales. Si la RTU es capaz de realizar el comando solicitado, el formato de respuesta será idéntico al de comando; la respuesta será entonces un "eco" del mensaje recibido.

Si la MTU lanza una llamada "broadcast" cuya dirección es 00H, todas las RTU aceptarán el comando y colocarán el estado requerido.

En la Fig. 5.30 se muestra el formato comando/respuesta correspondiente. En este caso la MTU solicita que la RTU 1 coloque la bobina 000011 en OFF, lo cual fue efectuado por la RTU.

Comando/Respuesta (MTU/RTU)

Dirección	Función	Información		CRC
		Puntos de Salida	Nuevos Estados	
01H	05H	000AH	0000H	EDC8H

Fig. 5.30. Formatos para Posicionar una sola Bobina

- Reponer un solo Registro (Preset Single Register), Código 06H

Este comando permite modificar el contenido de un registro interno de la RTU. Los valores deben ser especificados en binario, hasta la capacidad máxima de la RTU (de 10 a 16 dígitos, según el modelo). Los dígitos más significativos sin uso se colocan en CERO. El modo "broadcast" es aceptado en esta función; en este caso todas las RTU efectuarán la misma operación sobre los registros correspondientes.

Si la RTU es capaz de escribir el nuevo valor requerido, la respuesta será un "eco" del comando. En caso contrario, la RTU responderá con un mensaje excepcional.

En la Fig. 5.31 se muestra el caso cuando la MTU le ordena a la RTU 1 cambiar el contenido del Registro 40003 a un valor 3072 (0C00H); la RTU cumplió el pedido.

Comando/Respuesta (MTU/RTU)

Dirección	Función	Información		CRC
		Registro	Valor	
01H	06H	0002H	0C00H	2D0AH

Fig. 5.31. Formatos para Reponer un solo Registro.

- Leer Estado de Excepción (Read Exception Status), Código 07H

Este es un mensaje muy corto mediante el cual se solicita el estado de ocho puntos digitales predefinidos contenidos en la RTU. La respuesta informa acerca del estado de esos ocho puntos predefinidos; por ejemplo, el estado de una batería, puntos discretos en ON o en OFF, condición de error o de alarma en algunos puntos específicos, etc. Este mensaje tiene la forma mostrada en la Fig. 5.32. En este caso la MTU le pide a la RTU 17 (11H) el estado de los ocho puntos predefinidos; la RTU 17 responde que el estado de los ocho puntos es (en binario, para más claridad) 01010010 (52H): los puntos 2, 5 y 7 están en ON y todos los demás están en OFF.

Comando (MTU)

Dirección	Función	CRC
11H	07H	XXXXH

Respuesta (RTU 11)

Dirección	Función	Información	CRC
		Estado Actual (8 puntos)	
11H	07H	52H	XXXXH

Fig. 5.32. Formatos para Leer Estado de Excepción.

- Prueba y Diagnóstico (Loopback Test), Código 08H

El objetivo de esta función es la de probar el sistema de comunicación sin afectar las tablas de memoria y los valores de referencia en el RTU. Es posible agregar también, si es necesario, otras características opcionales como, por ejemplo, número de errores CRC, número de informes de excepción, etc. Si no hay fallas en el sistema, la respuesta será un "eco" del comando; pero si hay fallas, la respuesta será diferente (o no habrá respuesta) produciéndose la alarma correspondiente. Este formato se muestra en la Fig. 5.33.

Comando/Respuesta (MTU/RTU)

Dirección	Función	Información				CRC
		Código del Test		Valores		
XXH	08H	XXH	XXH	XXH	XXH	XXXXH

Fig. 5.33. Formato para Prueba y Diagnóstico.

Este comando se encuentra muy relacionado con el diagnóstico del funcionamiento de la Capa Física del protocolo, debido a que maneja información de comunicaciones de bajo nivel. La acción ejecutada por este comando depende del código del test y del campo de información transmitido. Con este comando se puede ejecutar normalmente hasta 16 funciones de diagnóstico.

♣ **Ejemplo 5.5**

Se tiene un SCADA con Protocolo Modbus. Cada campo contiene un octeto, el CRC que contiene dos. Dígito de menor peso a la izquierda; no hay gaps. En un momento dado se produce el siguiente diálogo entre la MTU y una de sus RTU:

Petición. La MTU le pide a la RTU 25 que le envíe el estado (ON/OFF) de las entradas de 16 puntos comenzando por la entrada 10127.

Respuesta. La RTU 25 le contesta que el estado de las entradas pedidas es:

De 10127 a 10134: ON-OFF-ON-OFF-ON-ON-OFF-OFF

De 10135 a 10142: OFF-ON-ON-OFF-ON-ON-OFF-ON

Construya los formatos correspondientes a estos mensajes y muestre la secuencias digitales transmitidas. En el Campo CRC coloque 255 en forma hexadecimal.

Solución:

Tipo de mensaje: Petición

Dirección: 25 => 19H => 11001000

Función: Leer Estado de entradas: 02H => 10000000

Punto de Partida: 10127 => 126 => 7EH => 11111100

Número de puntos: 16 => 10H => 10000000

CRC: 255 => 00FF => 0000000011111111

Tipo de mensaje: Respuesta

Dirección: 25 => 19H => 11001000

Función: Leer Estado de entradas: 02H => 10000000

16 puntos discretos caben en dos octetos; por lo tanto,

Número de Octetos: 2 => 02H => 10000000

Contenido del Octeto Superior. Entradas 10142 a 10135:

ON-OFF-ON-ON-OFF-ON-ON-OFF => 10110110 => B6H => 10110110

Contenido del Octeto Inferior. Entradas 10134 a 10127:

OFF-OFF-ON-ON-0FF-ON-OFF-ON => 00110101 => 35H => 00110101

CRC: 255 => 00FF => 0000000011111111

Los mensajes tendrán entonces los formatos siguientes:

Petición

Dirección	Función	Información		CRC
		Punto de Partida	Número de Puntos	
19H	02H	7EH	10H	00FFH

Respuesta

Dirección	Función	Información		CRC
		Número de Octetos	Estado de Entradas	
19H	02H	02H	B6H 35H	00FFH

Por el canal circulan las siguientes secuencias, vistas en un Analizador Digital:

Petición: **110010001000000011111100100000000000000011111111**

Respuesta: **1100100010000000100000001011011000110101000000011111111**

♣

♣ Ejemplo 5.6

Se tiene un SCADA con Protocolo Modbus. Durante un intercambio entre la MTU y algunas de sus RTU se registró un enlace petición/respuesta cuyo formatos se muestran en la figura siguiente.

Petición

Dirección	Función	Registro Inicial		Número de Registros		CRC
17H	03H	00H	02H	00H	02H	XXXH

Respuesta

Dirección	Función	Número de Octetos	Datos del Registro		CRC
17H	03H	02H	18H	FFH	XXXH

Se considera que los CRC no muestran error. La longitud de los registros es de un octeto. La numeración está en hexadecimal.

Determine la información contenida en los dos mensajes.

Solución:

<u>Petición</u>

Dirección: 17H. Dirección de la RTU 23

Función: 03H. Leer Registro de Salida. El número de registros va desde 40001 a 49999. Son variables continuas

Registro Inicial: 0002H. Primer registro: 0002H + 1 = 2+1 = 3. El primer registro es el 40003

Número de Registros: 0002H. El número de registros a leer es 0002H = 2. Hay que leer el contenido de los registros 40003 y 40004.

Supongamos que en el primer registro están los valores en Volts y en el segundo valores de temperatura, en grados C

El mensaje dice: "**MTU solicita de la RTU 23 el contenido de los registros 40003 y 40004**"

<u>Respuesta</u>

Dirección: 17H. Dirección de la RTU 23

Función: 03H. Leer Registro de Salida. El número de registros va desde 40001 a 49999

Número de Octetos: 02H. El número de octetos es 02H = 2. El primer octeto es el 40001 y el segundo octeto es el 40002

Datos de los Registros: 18H FFH. El contenido del registro 40001 es 18H = 24

El contenido del registro 40002 es FFH = 255

El mensaje dice: **"RTU 23 responde: El contenido del registro 40001 es de 24 V El contenido del registro 40002 es de 255 grados C"**

♣

5.4.5. Protocolo Bristol BSAP

El Protocolo BSAP (Bristol Synchronous/Asynchronous Protocol) de la Bristol Babcock Instruments/Systems es un protocolo industrial utilizado para el control y supervisión de sistemas SCADA. Es un protocolo muy completo con una topología tipo árbol con un máximo de seis niveles y 127 nodos por nivel; a su vez, cada nodo puede controlar hasta 127 dispositivos remotos. Cada nodo tiene una dirección única basada en su posición en la red y puede ser maestra de los niveles inferiores o esclava de los niveles superiores. Cumple con el Modelo ISO/OSI en las cuatro primeras capas.

Características del Protocolo

- Control por Caracteres (Modo Transparente)
- Transmisión Asincrónica/Sincrónica HDX y FDX
- Topología Tipo Arbol; en la raíz se encuentra la MTU
- Operación en Modo de Respuesta Normal y Par a Par
- Carácter básico codificado en ASCII sin bit de paridad
- Interfaces de Capa Física: RS-232C, RS-422A, RS-423A y RS-485
- Velocidades de transmisión: Sincrónico: 187,5 kbps, 1 Mbps
  Asincrónico: 300 bps a 38,4 kbps
- Medios de transmisión: par trenzado, cable coaxial, radio

Estructura Jerárquica

La topología del protocolo BSAP es una estructura en árbol, como se muestra en la Fig. 5.34. El nodo o Maestra A, en el Nivel 0, es la raíz del árbol, y el árbol puede contener hasta seis niveles.

El número máximo de nodos en un nivel está determinado por el tiempo de respuesta de mensajes críticos y por el número de direcciones que un nodo puede soportar, que es de 127. En cada nodo se tiene entonces 127 posiciones de control que generalmente se denominan “direcciones locales” para distinguirlas de las “direcciones globales”, conceptos que definiremos a continuación.

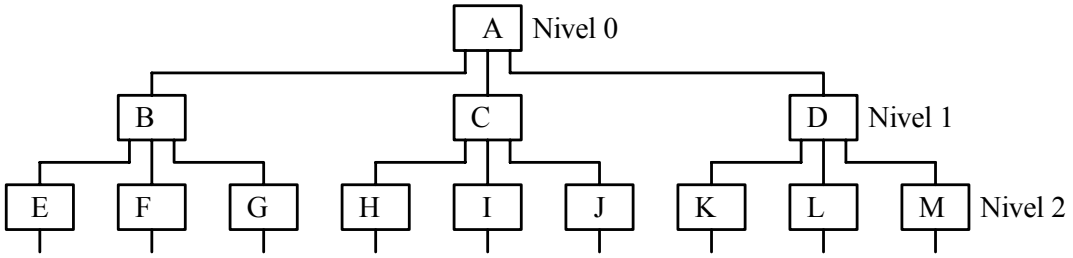


Fig. 5.34. Estructura Jerárquica del Protocolo BSAP.

Cualquier nodo dentro de la red (excepto los extremos: nivel 0 y nivel último) tiene un doble papel: puede ser maestra de sus nodos inferiores o puede ser esclava del nodo inmediatamente superior. Esta doble relación se define como una "relación local" pues los los nodos en cuestión son verticalmente adyacentes entre sí. Se denomina entonces "mensajes locales" al intercambio entre una maestra y una esclava o nodo sin pasar por ningún otro nodo; en este caso se aplica las direcciones locales. Mensajes que pasan por uno o más nodos hasta alcanzar su destino, se denominan "mensajes globales" en donde se aplica las direcciones globales. Por ejemplo, en la Fig. 5.34, un mensaje de A a B, o de B a G, o de D a M, etc., son mensajes locales; mientras que mensajes desde, por ejemplo, A a G, B a C, E a M, etc., son mensajes globales.

♣ Ejemplo 5.7

Como ejemplo de aplicación del protocolo BSAP Network 3000, vamos a describir el sistema de control distribuido de una Operadora de PDVSA. Este sistema tiene como finalidad básica asistir al operador en la Sala de Control en las operaciones de producción y manejo de gas producido en la región Centro-Oriente.

Este sistema posee una topología tipo árbol, la cual soporta hasta un máximo de seis niveles. Encontrándose en el nivel cero (raíz del árbol) el computador principal es un Micro VAX 3400 marca Digital . En el siguiente nivel, el uno, se encuentra ocupado por las Unidades Frontales de Comunicación CFE (communication front-end). El nivel dos lo ocupan los concentradores de datos y a partir del tercer nivel se encuentran las RTU situadas en el campo. Estas últimas, según la filosofía actual de la empresa, ocuparán los niveles tres y cuatro (en caso de ser necesario). Esta jerarquía de red se puede apreciar mejor en la Fig. 5.35.

En el nivel 0 se encuentran dos computadores MicroVax 3400. Cada computador es capaz de operar independientemente del otro y están configurados bajo un esquema de procesamiento redundante, de manera que una unidad es considerada la Unidad Principal mientras que la otra es considerada la Unidad de Respaldo. En caso de fallar la Unidad Principal, la operación del sistema es conmutada automáticamente a la unidad de respaldo.

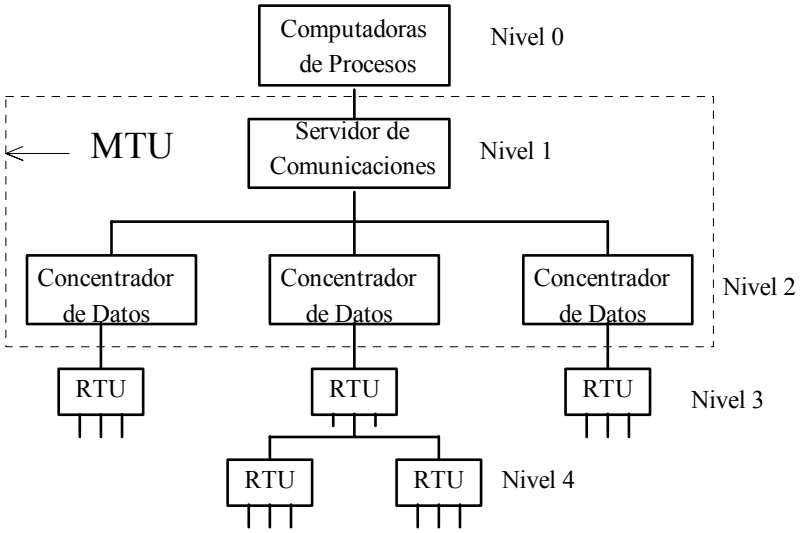


Fig. 5.35. Una aplicación del Protocolo BSAP.

En el nivel 0 se encuentra también el panel de transferencia y dos consolas de control. La función del panel de transferencia es la de realizar la transferencia desde el servidor de comunicaciones (CFE 3385) y periféricos desde el computador principal hacia el computador de respaldo en caso de fallar el computador principal. En cuanto a las consolas de control, ellas permiten al operador interactuar con el sistema, mostrando las condiciones existentes en campo y permitiendo el envío de comandos.

La MTU propiamente ocupa los niveles 1 y 2. En el nivel 1 se encuentra el servidor de comunicaciones, formado por dos CFE 3385, cuya función principal es la de servir de enlace entre los computadores de procesos VAX y las remotas (RTU 3335), es decir, pasar la información recibida a los computadores. Estas unidades poseen un máximo de seis canales de comunicación asíncronos de baja velocidad (9600 Baudios) para la comunicación con las remotas y un canal de comunicación redundante de alta velocidad. Existe un CFE conectado a cada computador VAX a través de un enlace paralelo IEEE-488. En el nivel 2 se encuentran los Concentradores de Datos 3350, encargados de recoger la información proveniente del campo y transmitírsela al CFE 3385. Actualmente hay instalados cuatro y se estima crecer hasta un máximo de quince a corto plazo.

Fuera de la Unidad Terminal Maestra, niveles 3 y 4, se encuentran las Unidades Terminales Remotas (RTU 3335). Son remotas inteligentes basadas en un microprocesador Intel 80C186 de 16 bits y su capacidad de memoria es de 64K (ROM/RAM). Soportan hasta cuatro puertos de comunicación serial (150 a 9600 Baudios) que pueden ser configurados de diferentes formas. Las RTU 3335 poseen una estructura modular, diez ranuras para tarjetas de Entrada/Salida (I/O), que permiten configurar la remota dependiendo de la necesidad del usuario. Las tarjetas I/O pueden ser: con ocho entradas digitales, con ocho salidas digitales, con cuatro entradas analógicas o con dos salidas analógicas. Este carácter modular es ventajoso por el hecho de que si se daña alguna de las tarjetas, se siguen recibiendo datos referidos a las restantes.

El lenguaje para realizar la programación de las RTU es el lenguaje de alto nivel ACCOL II (Advance Communication and Control Oriented Language de Bristol Babcock). Su programación es bastante práctica por el hecho de que está basado en módulos pre-construidos, los cuales permiten la elaboración de bloques de control específicos con la simple combinación de módulos. Los módulos tienen operaciones idénticas a las encontradas en ciertos elementos de hardware, como son: temporizadores (timers), contadores, controladores PID, controladores programables (PLC), etc. Una de las grandes ventajas de este sistema es que las RTU se pueden reconfigurar a distancia, es decir, no se necesita la presencia de personal en el sitio. Esta programación recibe el nombre de "carga (load)" y el proceso mediante el cual se coloca la carga en la RTU se denomina "descarga download)", debido a que las RTU se encuentran en la estructura tipo árbol debajo de las unidades MTU.

♣

Capas del Protocolo

El Protocolo BSAP está diseñado de acuerdo con las cuatro primeras capas del Modelo ISO/OSI más la Capa de Aplicación; en esta última capa están los programas de aplicación usuario/sistema. El flujo de información en las capas puede ir hacia abajo o hacia arriba, dependiendo de si el mensaje es un comando o una respuesta, respectivamente.

En BSAP la Capa Transporte es la responsable de la transmisión exacta del mensaje en la modalidad “primero llegado/primero atendido” en cualquier nivel funcional. Cuando la Capa Transporte determina que se está listo para transmitir, el control se pasa a la capa inferior.

La Capa Red o Capa de Control de Red, como se la denomina en BSAP, es la encargada de la manipulación del proceso de transmisión. Ella tiene la responsabilidad de determinar la mejor ruta que debe tomar el mensaje a través de la red, qué direcciones utilizar y establecer la trayectoria de comunicación.

La Capa Enlace es la responsable de robustecer la integridad del mensaje mediante la inclusión de mecanismos de verificación y recuperación de errores. Ella controla también el acceso al canal físico que se utilizará.

La Capa Física consiste principalmente de todos los equipos, medios y programas necesarios para controlar el intercambio de dígitos a nivel físico. Esta capa es totalmente independiente del formato final del mensaje que se está transmitiendo.

Estrategias de Interrogación

Cada nodo dentro de la red (excepto los nodos extremos) es a la vez maestra de sus nodos inferiores y esclava de su nodo superior. En su función de maestra, el nodo es responsable de la interrogación periódica de sus esclavas para determinar su estado, recibir información y ordenar la ejecución de acciones. Como esclava, el nodo debe responder a las interrogaciones de su maestra. El período de interrogación, es decir, la velocidad a la cual la maestra interroga a sus esclavas, depende del sistema y es ajustada por el usuario. Esta velocidad puede ser diferente en otras partes de la red. Para maximizar el tráfico de mensajes, se utilizan cuatro tipos de interrogación: el lazo principal de interrogación, la

interrogación de reactivación, el lazo preferido de interrogación y el lazo muerto de interrogación, los cuales son ejecutados en este mismo orden. Lo que se desea es interrogar a las esclavas con fallas a una frecuencia menor que con la que se interroga a las esclavas sin fallas.

- Lazo Principal de Interrogación. Es el primero en ser ejecutado dentro de un ciclo de interrogación. En este caso la maestra interroga a una esclava para determinar si está activa o muerta; y si está todavía activa, saber si tiene o no datos para transmitir. Una esclava que no responde a tres interrogaciones sucesivas (en tres períodos sucesivos de interrogación) se supone que está muerta o desactivada y se convierte en candidata para una interrogación de reactivación. Una esclava activa que responde con un mensaje de datos se convierte en candidata para la interrogación preferida. Una esclava activa que no tiene ningún mensaje de datos es ignorada hasta el próximo lazo principal de interrogación.
- La Interrogación de Reactivación. Este tipo de interrogación se hace solamente una vez por ciclo de interrogación. Su propósito es el de determinar si una cierta esclava que se suponía muerta se ha reactivado. La selección de cual esclava hay que interrogar (suponiendo que hay más de una) se hace en forma rotacional de un ciclo a otro. Si la esclava responde, su estado cambia de muerta a activa.
- Lazo Preferido de Interrogación. Puede ser ejecutado varias veces dentro de un ciclo. Se utiliza para interrogar, una por una, a todas las esclavas que han respondido con un mensaje de datos en el lazo principal de interrogación o en la interrogación de reactivación. Mientras una esclava responda a la interrogación preferida con un mensaje de datos, ella continuará en el lazo; pero tan pronto como ella responda sin transmitir datos, ella será sacada del lazo preferido de interrogación.
- Lazo Muerto de Interrogación. Si hay tiempo sobrante después del lazo preferido, se ejecuta este lazo sólo una vez. Se utiliza para dar la oportunidad a las esclavas desactivadas para que informen a su maestra que ellas son candidatas para el lazo principal de interrogación. A diferencia del lazo preferido de interrogación, el lazo muerto de interrogación se ejecuta una sola vez durante el ciclo de interrogación. Si la esclava simplemente responde, ella es elegible para el lazo principal de interrogación; pero si ella además tiene un mensaje de datos, ella pasará al lazo preferido de interrogación.

Comunicación Par a Par

La comunicación Par a Par es un mecanismo para la transferencia de bloques de datos entre dos nodos adyacentes en la red. En el entorno BSAP se tienen los denominados Módulos ACCOL Maestro/Esclavo que permiten efectuar la transferencia.

Los módulos se ejecutan periódicamente a la velocidad de la correspondiente tarea ACCOL, y las peticiones se pasan al entorno BSAP para su interconexión. Cuando un Módulo Esclavo recibe un comando desde un Módulo Maestro, la tarea es ejecutada de inmediato.

Reporte por Excepción

El Reporte por Excepción (RPE) proporciona una técnica efectiva para mejorar el rendimiento de la comunicación. Puesto que el RPE reduce la velocidad del tráfico, es muy apropiado en SCADAs de baja velocidad sobre módems y radio.

Cuando se habilita el RPE, un nodo responderá a una interrogación transmitiendo solamente los valores que han cambiado desde la última interrogación. Asimismo, transmite también cualquiera alarma ocurrida en el período. El RPE se selecciona en forma individual.

Formato General de las Tramas

Fundamentalmente, este protocolo tiene dos clases de tramas: las tramas de información y las tramas de supervisión y control.

Tramas de Información

Las tramas o mensajes de información se dividen en Mensajes de Datos Globales y Mensajes de Datos Locales. Los mensajes locales son: Alarmas, Par a Par, Descarga, Diagnósticos, Estadísticas, NRT (Tabla de Enrutamiento de Nodo), y RDB (Acceso a Base de Datos Remota). Los mensajes globales son: Par a Par, Descarga, Estadísticas y RDB.

En la Fig. 5.35 se muestra esta división en forma esquemática.

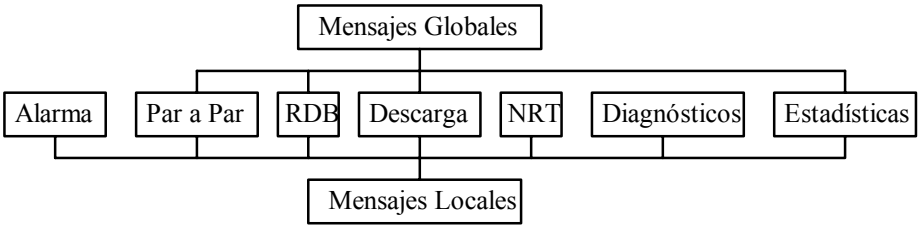


Fig. 5.35. Mensajes Globales y Locales

Mensajes de Datos Globales

Son aquellos que deben pasar por lo menos a través de un nodo antes de llegar a destino. El formato de mensaje global tiene la forma mostrada en la Fig. 5.36.

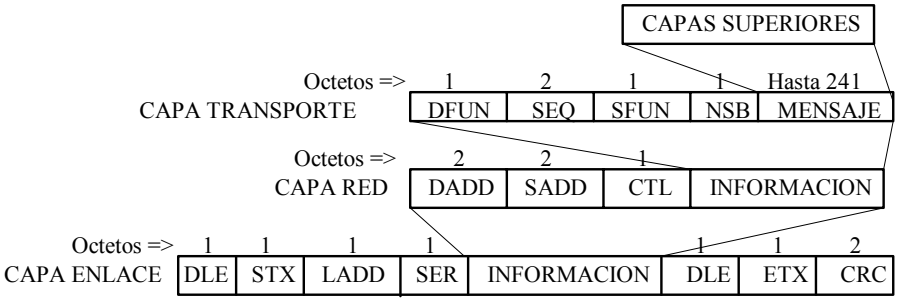


Fig. 5.36. Formato General para Mensajes Globales.

A nivel de Capa Transporte:

DFUN Código de función del destino

SEQ Número de Secuencia de Aplicación del mensaje. Se requiere para evitar la duplicación accidental de mensajes en condiciones de ruido extremo

SFUN Código de función de la fuente. El número de funciones puede llegar hasta 20.

NSB Octeto de Estado del Nodo. Si hay una falla en la comunicación, el dígito de mayor peso del octeto se pone a UNO y los otros 7 dígitos indican el tipo de falla.

MENSAJE Depende de la aplicación y puede contener hasta 241 octetos

A nivel de Capa Red:

DADD Dirección de destino global; SADD Dirección de fuente global

Nótese que DADD y SADD son las direcciones de las maestras destino y origen, respectivamente

CTL Octeto de control. Contiene el tipo de mensaje (petición o respuesta) y el estado de la respuesta o número de nivel si hubo fallas

A nivel de Capa Enlace:

DLE+STX/ETX Combinación de caracteres ASCII para asegurar la transparencia

LADD Dirección local. El dígito de mayor peso es una bandera que cuando está a UNO indica que el mensaje contiene una estructura a nivel de red. LADD es la dirección de la esclava hacia donde va dirigido el mensaje.

SER Número de serie del mensaje. Este número es asignado por la maestra; la esclava debe retornarlo en la respuesta. Se utiliza para evitar la confusión que se presenta cuando un mensaje o reconocimiento se pierde debido al ruido, etc. El número de serie cero no se utiliza porque está reservado para uso interno en el nodo.

CRC Campo para la verificación de error. Se calcula desde STX a ETX y no toma en cuenta los DLE intermedios. Utiliza el algoritmo CRC UIT-T V.41, ya mencionado.

Mensajes de Datos Locales

Los mensajes locales son aquellos que no tienen que pasar a través de ningún nodo para llegar a su destino. Por definición, el primer nodo en recibir un mensaje local es el destino. El formato de un mensaje local tiene la forma mostrada en la Fig. 5.37.

Nótese que este formato no contiene una estructura a nivel de Capa Red. El dígito de mayor peso de LADD está puesto a CERO; los otros siete dígitos indican la dirección local desde 1 hasta 127. La dirección de la maestra en un enlace local siempre es cero.

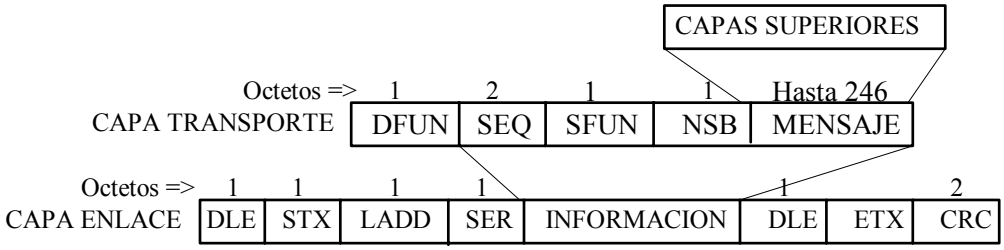


Fig. 5.37. Formato para Mensajes Locales.

Tramas de Supervisión y Control

En el Protocolo BSAP las tramas para supervisión y control más utilizadas son:

1. Trama de Interrogación (Poll), Código 85H
2. Trama de Reconocimiento (ACK o DOWN-ACK), Código 86H
3. Trama de Reconocimiento/"Nada para Transmitir" (ACK-NO DATA), Código 87H
4. Trama de Reconocimiento Negativo (NAK), Código 95H
5. Trama de Reconocimiento desde arriba (UP-ACK), Código 8BH
6. Ultimo Mensaje Descartado (DIS), Código 83H

- Interrogación (Poll), Código 85H

Esta trama es un comando utilizado por la maestra para interrogar a sus esclavas y determinar si ellas están activas. De estar activas, se les solicitará información con el mensaje respectivo. El formato del mensaje es el siguiente, Fig. 5.38.

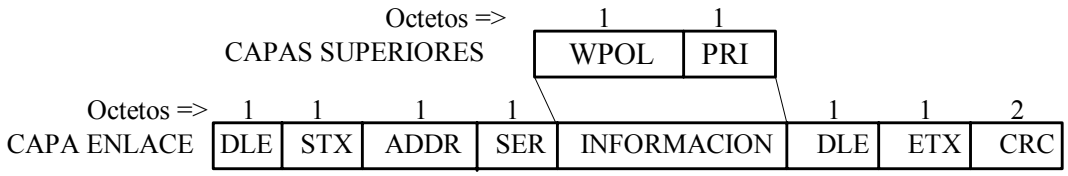


Fig. 5.38. Formato para Interrogación (Poll).

ADDR Dirección de la esclava o nodo interrogado

SER Número de serie del mensaje

WPOLL Código de Función 85H

PRI Prioridad de los datos requeridos. PRI = 00H indica que se puede aceptar alarmas o mensajes de datos. PRI = 10H indica que no se puede aceptar alarmas

- Reconocimiento (ACK o DOWN-ACK), Código 86H

Esta trama es una respuesta; la utiliza una esclava para reconocer a su maestra la recepción de un mensaje, excepto cuando se trata de una Interrogación (Poll). El formato correspondiente tiene la forma mostrada en la Fig. 5.39.

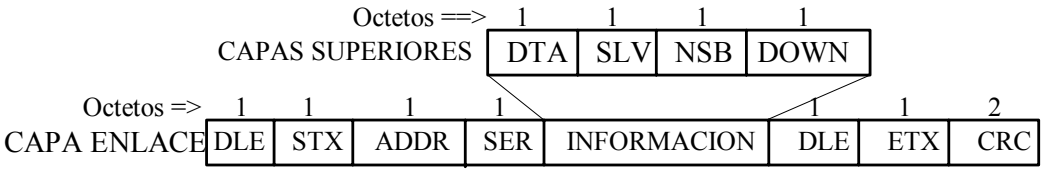


Fig. 5.39. Formato para Reconocimiento (ACK o DOWN-ACK).

ADDR Dirección de la maestra (siempre a CERO)

SER Número de serie del mensaje reconocido

DTA Código de Función 86H

SLV Dirección local de la esclava o nodo que responde

NSB Octeto de Status de la esclava o nodo. Con este octeto se le participa a la maestra ciertas condiciones existentes dentro de la esclava

DOWN Número de buffers en uso

- Reconocimiento/Nada para Transmitir (ACK - NO DATA), Código 87H

Este mensaje es utilizado por una esclava para reconocer la recepción de una Interrogación (Poll) indicando que no tiene mensajes de datos para transmitir. En la Fig. 5.40 se muestra el formato de este mensaje.

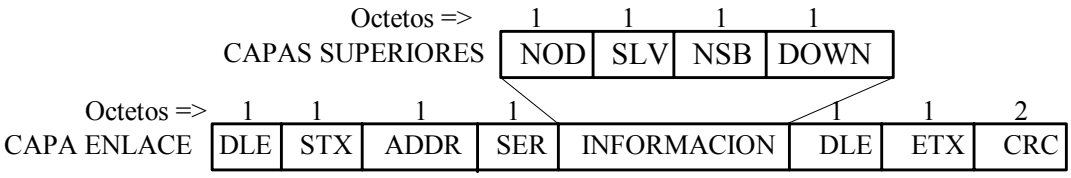


Fig. 5.40. Formato para Reconocimiento/Nada para Transmitir.

NOD Código de Función 87H

♦ Reconocimiento Negativo (NAK), Código 95H

Con este mensaje, una respuesta, la esclava le indica a su maestra que además de una Interrogación(Poll) ha recibido también otro mensaje pero no dispone de espacio en los buffers. El formato se muestra en la Fig. 5.41.

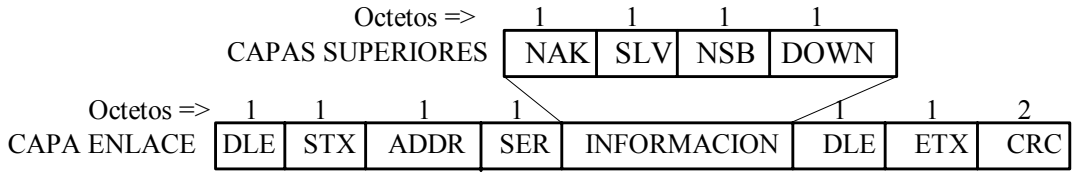


Fig. 5.41. Formato para Reconocimiento Negativo (NAK).

SER Número de serie del mensaje reconocido con NAK

NAK Código de Función 95H

- Reconocimiento desde arriba (UP- ACK), Código 8BH

Este mensaje es utilizado por la maestra para informar a la esclava que ha recibido correctamente y almacenado el mensaje. El formato es el siguiente, Fig. 5.42.

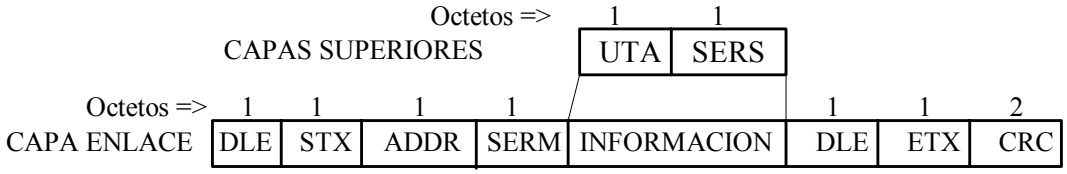


Fig. 5.42. Formato para Reconocimiento desde arriba (UP-ACK).

ADDR Dirección local de la esclava

SERM Número de serie del mensaje de la maestra

UTA Código de Función 8BH

SERS Número de serie del mensaje reconocido con UP-ACK

♣ Ejemplo 5.8

Consideremos el formato para mensajes globales en BSAP. Si de la Capa Aplicación bajan 241 caracteres y la velocidad de transmisión en el medio es de 9600 bps, determine el tiempo que tarda en transmitirse el mensaje global. El sistema opera en sincrónico (caracteres de 8 dígitos sin gaps entre caracteres)

Solución:

Número de Octetos:

De la Capa de Aplicación: 241 caracteres

En la Capa Transporte: 5 + 241 = 246 caracteres

En la Capa Red: 5 + 246 = 251 caracteres

En la Capa Enlace: 8 + 251 = 259 caracteres

Información a transmitir: I = 8x259 = 2072 bits

Velocidad de transmisión V_i = 9600 bps = I/T

Tiempo de Transmisión: $T = \frac{I}{V_i} = \frac{2072}{9600} = 215{,}8$ milisegundos

Nótese que en la práctica hay que agregar los tiempos de alzada, de preámbulo, de procesamiento, etc. para el número de estaciones de tránsito entre la estación transmisora y la estación receptora.

♣

5.4.6. Protocolo Microbuffer

El Protocolo Microbuffer es un protocolo de línea, diseñado en Venezuela por la Compañía AETI. Su estructura está concebida para la operación de sistemas de control distribuido y sistemas SCADA. Este protocolo permite la interconexión directa entre dos nodos cualquiera de la red (estructura de red de área local), o entre un nodo y el resto (operación punto a punto o multipunto). En el caso de sistemas SCADA, se establece uno o más nodos como Maestras (MTU) y al resto como remotas (RTU), pero sólo las MTU pueden iniciar intercambios con las RTU (modo de respuesta normal (NRM)). En el protocolo Microbuffer se puede identificar tres capas que se pueden comparar aproximadamente con las tres primeras capas del Modelo ISO/OSI.

El protocolo Microbuffer se puede configurar para trabajar en diversos medios, tales como en redes de área local (ETHERNET, por ejemplo), con canales de radio HDX tipo remota o canales tipo RS-232C/RS-485 (conductores metálicos directos o con módems). Es posible que en un SCADA en particular se utilice los tres medios; la estructura del protocolo lo permite.

Características

- Control por conteo de caracteres
- Topología tipo Barra (BUS), en red de área local
- Topología tipo Estrella, con la MTU en el centro (HUB) y radialmente las líneas remotas. Cada línea puede tener diferentes características físicas: conductores metálicos o radio. Maneja configuraciones punto a punto y multipunto
- Número máximo de nodos: 64 por línea

- Transmisión asincrónica HDX y FDX
- Operación en Modo de Respuesta Normal
- Interfaces: RS-232C y RS-485
- La velocidad de transmisión depende del medio utilizado (red de área local, conductores metálicos, radio)

Modos de Operación

Los modos de operación en el protocolo Microbuffer son:

Modo de Configuración. En este modo un nodo espera que el sistema le envíe las tablas de configuración necesarias para su correcta operación, inhibiéndose la recolección e informes de datos de campo. Las tablas de configuración son requeridas por la RTU y deben ser enviadas previamente por la MTU.

Modo de Operación Normal. Mediante un comando enviado por la MTU, las RTU pasan del modo de configuración al modo de operación normal, no aceptan más tablas de configuración, proceden a la recolección de datos de campo y a la ejecución de secuencias y estrategias de control locales, y a informar a la MTU (y a las redes de procesos) para posterior procesamiento. Mediante el mismo comando mencionado se puede pasar del modo de operación normal al modo de configuración.

El arranque de una RTU, después de la inicialización del sistema, puede efectuarse en modo de configuración o en modo de operación normal, dependiendo de la programación existente en el sistema.

Formato General de las Tramas

El formato general de los mensajes del protocolo Microbuffer tiene la forma mostrada en la Fig. 5.44.

Los campos desde Contador de Octetos hasta Status es el Encabezado de la Trama.

Contador de Octetos. Indica el número de octetos que contiene el mensaje en los campos Encabezado + Datos. La longitud máxima de los mensajes dependerá del medio utilizado. En canales tipo RS-232C un máximo de 128 octetos por mensaje; en canales tipo remota se permite un máximo de 64 octetos, esto es con el objeto de mejorar la efectividad en la transmisión por radio; en canales de red de área local se permite un máximo de 512 octetos por mensaje.

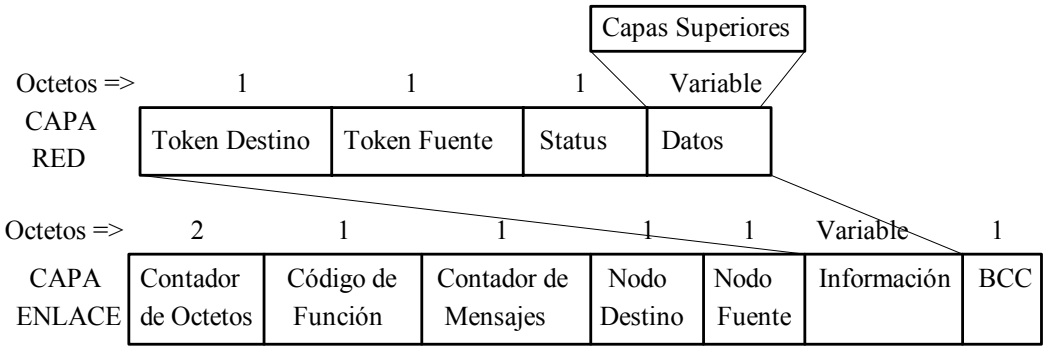


Fig. 5.44. Formato General del Protocolo Microbuffer

Código de Función. Este campo contiene el código o tipo de comando de la función a ejecutar o la definición del tipo de información suministrada por el elemento del sistema. Las principales funciones ejecutadas en el protocolo Microbuffer son:

1. Primer Barrido (Scan), Código 00H
2. Control Binario, Código 01H
3. Setpoint Analógico, Código 02H
4. Cargar Tabla de Secuencia, Código 04H
5. Cargar Tabla de Control, Código 05H
6. Integridad del Nodo Remoto, Código 07H
7. Reporte de Cambios, Código 08H
8. Cambio de Modo de Operación de un Nodo Remoto, Código 10H
9. Sincronismo de Hora y Fecha, Código 12H
10. Definición de Banda Muerta o Rango de Histéresis para los Nodos Remotos, Código 16H
11. Reset a un Servidor de Comunicaciones (SDC) en Forma Remota, Código 19H
12. Carga Inicial de Nodo o RTU, Código 20H
13. Sacar de Barrido a un Nodo, Código 21H
14. Colocar en Barrido a un Nodo, Código 22H
15. Arranque de Barrido de un SDC, Código 23H
16. Variar la Categoría de Barrido a un Nodo, 24H
17. Requisición de Downloading hacia un SDC, Código 25H

Contador de Mensajes. Campo utilizado para diferenciar un mensaje del mensaje anterior. En un mensaje de comando este campo lleva el número del mensaje que se está enviando, mientras que en un mensaje de respuesta lleva el número del último mensaje recibido correctamente.

Nodos Destino/Fuente. Estos campos indican los nodos lógicos de destino/origen del mensaje. Los nodos poseen tablas que indican cuales nodos físicos corresponden a los nodos lógicos, dependiendo del canal utilizado.

Token Destino/Fuente. Estos campos poseen la identificación de la tarea o dispositivo destino/origen del mensaje.

Status. Este campo indica el modo (operación o configuración) y estado en que se encuentra el nodo remoto. El dígito de más peso indica el modo, donde MODO = 0 indica Modo de Operación, y MODO = 1 indica Modo de Configuración; los otros siete dígitos indican el estado y condiciones del nodo.

Campo de Datos. Este campo posee la información pertinente a cada comando de función y dependerá directamente de cada uno de ellos así como el número de octetos que contiene.

BCC. Este es el campo de verificación de error en el cual va el resultado de la Suma O-Exclusivo sobre Encabezado + Datos. Se utiliza principalmente en los canales tipo remota y canales RS-232C.

Canales Microbuffer

El protocolo Microbuffer posee diferentes especificaciones para la capa física que dependen de las características del canal empleado. A continuación describiremos los medios de transmisión utilizados en el protocolo.

Canales Tipo RS-232C

Cuando el medio de transmisión utilizado es un canal tipo RS-232C o similar, incluyendo módems, el mensaje poseerá dos campos denominados “breaks” que tienen la misma función que los caracteres SYN en otros protocolos. En efecto, estos “breaks” sirven para lograr el sincronismo entre los elementos que se intercomunican. La configuración del mensaje en canales tipo RS-232C tiene la forma mostrada en la Fig. 5.45.

BREAK	BREAK	Trama Microbuffer (Fig. 5.44)

Fig. 5.45. Bloque Transmitido en Canales Tipo RS-232C.

La longitud máxima del mensaje, sin tomar en cuenta los “breaks” de sincronismo, será de 128 octetos y la velocidad máxima típica de 9600 bps.

En cada nodo, una vez recibido el mensaje, se observa el campo Nodo Destino recibido y se compara con el propio; si coincide, se enruta hacia la tarea o dispositivo indicado en el campo Token Destino para la ejecución de la acción correspondiente. Si la dirección de nodo no corresponde, lo enruta de acuerdo con el valor del campo Nodo

Destino utilizando la Tabla de Enrutamiento que posee cada nodo. Cada nodo puede atender hasta 255 elementos, dispositivos o tareas. Las Tablas de Enrutamiento son propias para cada sistema en particular.

Canales Tipo Remota

Cuando la configuración del sistema consiste en una MTU que se comunica, generalmente por radio, con un cierto número de RTU en HDX, el mensaje tendrá la misma configuración mostrada en la Fig. 5.44, pero se le habrá agregado un preámbulo o "pre-training" de 2 a 24 octetos, y al final de la trama se le agrega un "post-training" de tres caracteres. Los caracteres de "training" cumplen funciones de

- Sincronismo entre los elementos que se comunican
- Como marca de pre-transmisión del mensaje o preámbulo, dando tiempo para la estabilización de los equipos de comunicación
- En la post-transmisión, para permitir la culminación del mensaje antes de desactivar el transmisor

El formato del mensaje en Tipo Remota tiene la forma mostrada en la Fig. 5.46.

Pre-Training	Sincronismo	Trama Microbuffer (Fig. 5.44)	Post-Training

Fig. 5.46. Bloque Transmitido en Canales Tipo Remota

La longitud máxima del mensaje, sin tomar en cuenta los tiempos de training y sincronismo, es de 64 octetos. La velocidad típica es de 1200 bps, pero con los nuevos radios digitales se puede alcanzar velocidades superiores a los 19200 bps.

En los canales tipo remota se suele agregar un servidor de comunicaciones (SDC), que es un dispositivo inteligente con una gran capacidad computacional que se coloca entre la MTU y las RTU para aliviar al procesador de la MTU de la mayor parte de las tareas netamente de comunicaciones, y dejar a la MTU, junto con las redes de procesos, todas las labores de manejo, control y procesamiento de la información. Una MTU puede manejar varios SDC; a su vez, cada SDC puede controlar hasta 64 nodos o RTU. La MTU siempre tendrá dirección CERO. El protocolo tiene entonces una estructura jerárquica de tres niveles, similar a la del protocolo BSAP.

Canales Tipo Red de Area Local

Cuando se trabaja sobre una red de área local, por ejemplo, con una red ETHERNET, tanto la MTU como las RTU o nodos estarán conectados directamente a la red y cualquiera de ellos puede iniciar un intercambio. La descripción de la relación entre los protocolos de la red de área local y el protocolo Microbuffer no la emprenderemos ahora pues no conocemos los protocolos de la red de área local (que veremos en el Capítulo V); sin embargo, podemos decir que la trama Microbuffer se puede instalar en el campo Información de la trama de la red de área local. En este caso la longitud y velocidad máximas de la trama Microbuffer dependerá de la red de área local utilizada; en una red ETHERNET la velocidad puede ser de 10 Mbps con una longitud máxima de 512 octetos.

Tipos de Mensaje

El protocolo Microbuffer contiene una serie de mensajes que utiliza la MTU para solicitar datos o ejecutar acciones en las RTU. En un canal tipo remota se incluye el servidor de comunicaciones y la secuencia de los mensajes comando/respuesta tendrá la forma **MTU → SDC → RTU → SDC → MTU**, de modo que para realizar cada función se necesitará cuatro mensajes diferentes, como podemos observar a continuación para las funciones Primer Barrido y Setpoint Analógico; para las otras funciones el procedimiento es similar.

- Mensaje Primer Barrido (SCAN), Código 00H

Los mensajes Primer Barrido se utilizan para actualizar la base de datos de la MTU con la información contenida en las RTU. Son utilizados cuando se inicializa el SDC, o cuando un SDC detecta que una RTU ha pasado del modo de configuración al modo de operación normal. La RTU, una vez recibido el comando, colocará la base de datos en el campo de Datos del mensaje Microbuffer, lo transmitirá al SDC el cual lo retransmitirá hacia la MTU. La respuesta de la RTU puede ocupar varias tramas Microbuffer, según la aplicación.

Los cuatro mensajes de la función Primer Barrido, Código 00H tienen la forma mostrada en la Fig. 5.47. En este caso vamos a suponer que el sistema contiene una sola MTU y un solo SDC.

(A) Mensaje MTU → SDC

Contador de Octetos	Código Función	Contador de Mensajes	Nodo Destin	Nodo Fuente	Token Destino	Token Fuente	Status	Datos	BCC
10	00H	XX	SDC	MTU	(*)	(**)	00	(***)	XX

(*) Dirección de la Tarea del SDC que procesa los mensajes de la MTU
(**) Dirección de la Tarea de la MTU que generó el mensaje
(***) Dirección del Nodo Remoto

(B) Mensaje SDC → RTU

Contador de Octetos	Código Función	Contador de Mensajes	Nodo Destino	Nodo Fuente	Token Destino	Token Fuente	Status	BCC
09	00H	XX	Dir. RTU	00	01	01	(*)	XX

(*) 00: pide el primer bloque de datos; 01: pide el próximo bloque de datos
02: pide retransmisión del último bloque de datos

(C) Mensaje RTU → SDC

Contador de Octetos	Código Función	Contador de Mens.	Nodo Destino	Nodo Fuente	Token Destino	Token Fuente	Status	Datos	BCC
Variable	00H	XX	00	Dir. RTU	01	00	(*)	(**)	XX

(*) 00: último mensaje
01: RTU en modo de configuración
02: envío normal de datos, quedan más pendientes
(**) Base de Datos

(D) Mensaje SDC → MTU

Contador de Octetos	Código Función	Contador de Mens .	Nodo Destino	Nodo Fuente	Token Destino	Token Fuente	Status	Datos	BCC
Variable	00H	XX	MTU	SDC	(*)	00	(**)	(***)	XX

(*) Dirección de la Tarea de la MTU a donde va dirigido el mensaje
(**) 00: se envía el mensaje con el contenido de la base de datos
01: RTU en modo de configuración
02: SDC inhabilitado
03: RTU no válida; (***) Base de Datos

Fig. 5.47. Formato de los Mensajes Primer Barrido (SCAN).

- Mensajes Setpoint Analógico, Código 02H

Este mensaje permite forzar el valor de uno o más puntos de salida analógicos, puntos digitales internos o parámetros de lazo de control. Los correspondientes mensajes se muestran en la Fig. 5.48.

(A) Mensaje MTU → SDC

Contador de Octetos	Código Función	Contador de Mensajes	Nodo Destino	Nodo Fuente	Token Destino	Token Fuente	Status	Datos	BCC
Variable	02H	XX	SDC	MTU	(*)	(**)	00	(***)	XX

(*) Dirección de la Tarea del SDC que procesa los mensajes de la MTU
(**) Dirección de la Tarea de la MTU que generó el mensaje
(***) Dirección del Nodo Remoto, datos de control

(B) Mensaje SDC → RTU

Contador de Octetos	Código Función	Contador de Mensajes	Nodo Destino	Nodo Fuente	Token Destino	Token Fuente	Status	Datos	BCC
Variable	02H	XX	Dir. RTU	00	01	01	00	(*)	XX

(*) Datos de Control

(C) Mensaje RTU → SDC

Contador de Octetos	Código Función	Contador de Mens.	Nodo Destino	Nodo Fuente	Token Destino	Token Fuente	Status	BCC
09	02H	XX	00	Dir. RTU	01	00	00	XX

(D) Mensaje SDC → MTU

Contador de Octetos	Código Función	Contador de Mens.	Nodo Destino	Nodo Fuente	Token Destino	Token Fuente	Status	Datos	BCC
10	02H	XX	MTU	SDC	(*)	00	(**)	(***)	XX

(*) Dirección de la Tarea de la MTU a donde va dirigido el mensaje
(**) 00: control OK 02: punto no configurado 03: punto no válido
04: mensaje no válido 05: SDC inhabilitado
06: error de "time-out" en transmisión del mensaje
07: error de "time-out" en la respuesta de la RTU
08: error en la respuesta de la RTU
(***) Dirección de la RTU

Fig. 5.48. Formato de los Mensajes Setpoint Analógico.

5.4.7. Protocolo Conitel

El Protocolo Conitel 2020 es un protocolo industrial utilizado para la supervisión y control de sistemas SCADA.

Características

- Control por Dígitos
- Topología punto a punto y multipunto. Una Maestra (MTU) y una o varias Esclavas (RTU).
- Número máximo de nodos: 15
- Transmisión Asincrónica HDX/FDX
- Operación en Modo de Respuesta Normal
- Velocidad: 1200 bps
- Interfaz: RS-232C

Formato General de las Tramas

El formato básico que es transmitido de la MTU a las RTU o viceversa, está constituido por un bloque de 32 dígitos, dividido en tres campos A, B y C, como se muestra en la Fig. 5.49

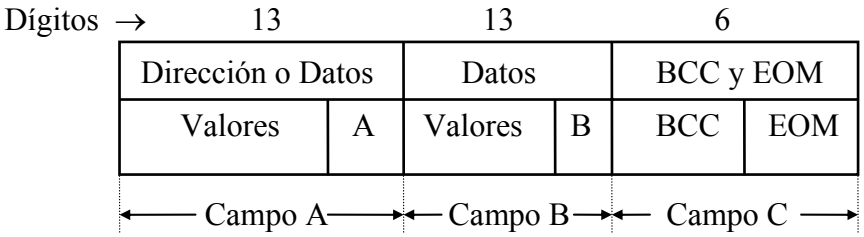


Fig. 5.49. Formato General del Protocolo Conitel.

Los campos A y B contienen 13 dígitos: 12 de información y uno de mantenimiento. El dígito de mantenimiento del campo A (dígito A) es utilizado como bandera para especificar si los dígitos que lo preceden contienen una dirección ($A = 0$) o son Datos $(A = 1)$. El dígito de mantenimiento del campo B (dígito B) siempre toma el valor cero (0). Los dígitos restantes (Valores) de los campos A y B se utilizan para direcciones, identificación de puntos y datos, según el caso.

Hay dos tipos básicos de mensaje: los que contienen direcciones y los que no. Las direcciones están contenidas en el campo A. El campo B de un mensaje se puede utilizar para información adicional de control o para datos dependiendo de la función. Cuando el campo B se utiliza para enviar información adicional a la MTU, se llama "Campo Modificador". Este modificador se puede utilizar para seleccionar una salida particular (de 1 a 12 dígitos) en el caso de funciones Disparar o Cerrar. En la transmisión RTU a MTU el campo B lleva habitualmente datos. El dígito B estará a CERO en todas las transmisiones MTU $\Leftrightarrow$ RTU.

El campo C contiene 6 dígitos: cinco dígitos del BCC para detección de error mediante el Código de Detección de Error Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH), y el dígito de "fin de mensaje" EOM; este dígito toma el valor cero (0) para indicar que ese bloque estará seguido por otro u otros en la transmisión, y el valor uno (1) para indicar que ese bloque es el último de la serie. El dígito más significativo de cada campo se encuentra en el extremo izquierdo del mismo.

Campo A de Direcciones

El primer mensaje transmitido sea de la MTU a la RTU o de la RTU a la MTU contiene siempre la dirección en el campo A. Los mensajes siguientes (si los hay) llevan ahora datos en los sitios donde estaba la dirección. El campo A de direcciones se divide, a su vez, en tres subcampos de cuatro dígitos cada uno más el dígito de mantenimiento A. El campo A tiene la forma mostrada en la Fig. 5.50.

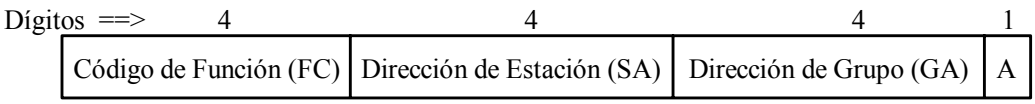


Fig. 5.50. Campo A de Direcciones.

Código de Función (FC). Especifica la función a ser ejecutada por la estación direccionada en el subcampo SA. Algunas de las funciones del protocolo Conitel se listan a continuación.

1. Barrer (SCAN), código 0H
2. Ejecutar (EXECUTE), código 1H
3. Disparar (TRIP) con verificación previa, código 2H
4. Posicionar (SET POINT), código 3H
5. Cerrar (CLOSE) con verificación previa, código 4H
6. Posicionar (SET POINT) B, código 5H
7. Reponer (RESET), código 7H

Dirección de Estación (SA). Contiene la dirección de la estación remota RTU. Debido a que se dispone solamente de cuatro dígitos, se puede direccionar, por línea, hasta 15 estaciones (1H a FH). La dirección 0H se reserva para mensajes globales ("broadcast") a todas las estaciones.

Dirección de Grupo (GA). Este subcampo contiene la dirección de grupo (hasta 16 grupos) a los cuales puede aplicárseles funciones de "SCAN" o funciones de control en cada estación. Estas 16 direcciones de grupo se pueden utilizar bajo cualquiera de los códigos de función.

Dígito de Mantenimiento A. Esta bandera se utiliza para indicar, cuando A = 1, que los subcampos SA y GA contienen datos, y cuando A = 0 que los subcampos SA y GA contienen una dirección.

Estrategias de Interrogación y Sincronización

En este protocolo todos los intercambios son iniciados por la MTU. Ninguna RTU puede iniciar intercambios con la MTU ni con otra RTU. La RTU retornará siempre una respuesta hacia la MTU para todos los mensajes o comandos válidos emitidos por la MTU. Las RTU permanecen inactivas hasta que reciben un comando desde la MTU.

Como no se transmite información de reloj (temporización), hay que establecer algún método para la sincronización de las secuencias o mensajes. En el protocolo Conitel a cada trama se le antepone una "marca de pre-transmisión" (un UNO) de duración variable seguido de un "espacio" (un CERO) cuya duración es igual a la de los dígitos del mensaje. La transición de la "marca" al "espacio" se utiliza para sincronizar el receptor. Esta transición hace el mismo papel que el dígito de arranque en transmisión asincrónica ASCII.

Tipos de Mensaje

Los intercambios en el protocolo Conitel se pueden dividir en dos tipos: peticiones de datos o peticiones de control. En las peticiones de datos (SCAN) la MTU transmite un mensaje solicitando valores de datos a la RTU. La RTU responde transmitiendo los datos solicitados; estos datos pueden ser de cualquier tipo, por ejemplo, estado de salidas

discretas y analógicas, valores en un acumulador, variables calculadas, parámetros remotos, condiciones de la RTU, etc. El número de renglones de datos y el tipo de datos que cada renglón representa depende del número de grupo incluido en la petición de datos.

Las peticiones de control son aquellas mediante las cuales la MTU le pide a la RTU que cambie el estado de un dispositivo de campo o que cambie o modifique alguna condición interna de la RTU. Las peticiones de control pueden ser directas como, por ejemplo, el comando RESET, o necesitan verificación desde la MTU antes de ejecutar la operación como, por ejemplo, TRIP. En las peticiones de control al campo B se le suele denominar Campo Modificador.

En Conitel se denomina "rutinas" a los diferentes tipos de mensaje. Aquí vamos a presentar solamente dos ejemplos de estos mensajes: el Mensaje SCAN y el formato de los mensajes para peticiones de control.

- Mensaje "SCAN", código 0H

La configuración de un mensaje "SCAN" tiene la forma mostrada en la Fig. 5.51. En este caso la Estación Maestra MTU le pide a la Estación Esclava RTU 3 ejecutar funciones de SCAN mediante el envío de la información correspondiente que ha sido programada para esa dirección.

MTU → RTU

Sincronización		Campo A				Campo B		Campo C	
		FC	SA	GA	A	Datos	B	BCC	EOM
Marca	Espacio	0H	3H	--	0	No Usado	0	XXX	1

RTU → MTU (Primer bloque de una serie)

Sincronización		Campo A				Campo B		Campo C	
		FC	SA	GA	A	Datos	B	BCC	EOM
Marca	Espacio	0H	3H	--	0	XXXX	0	XXX	0

RTU → MTU (Ultimo Bloque de la serie)

Sincronización		Campo A				Campo B		Campo C	
		FC	SA	GA	A	Datos	B	BCC	EOM
Marca	Espacio	0H	3H	--	0	XXXX	0	XXX	1

Fig. 5.51. Formatos del Mensaje SCAN.

El campo A es igual tanto para los comandos como para las respuestas. En el campo B de las respuestas se puede enviar, por ejemplo, información digital o discreta de doce dígitos, la cuenta de un acumulador, el equivalente binario para dispositivos de entrada analógicos, etc. El número de bloques de respuesta en un "SCAN" está determinado por el número de entradas que han sido programadas para una dirección particular.

- Rutinas para Mensajes de Control

En los mensajes de control hay un doble intercambio entre la MTU y la RTU. Por ejemplo, para un mensaje de control dado se necesitan cuatro mensajes, como se muestra en la Fig. 5.52.

(A) Comando de Control de la MTU a la RTU

Sincronización		Campo A		Campo B		Campo C	
Marca	Espacio	Dirección	A	Modificador	B	BCC	EOM

A = 0; B = 0; EOM = 1

(B) Verificación de Control de la RTU a la MTU

Sincronización		Campo A		Campo B		Campo C	
Marca	Espacio	Dirección	A	Modificador	B	BCC	EOM

A = 0; B = 0; EOM = 1

(C) Comando de Ejecución de la MTU a la RTU

Sincronización		Campo A		Campo B		Campo C	
Marca	Espacio	Dirección	A	No Utilizado	B	BCC	EOM

A = 0; B = 0; EOM = 1

(D) Verificación de Ejecución de la RTU a la MTU

Sincronización		Campo A		Campo B		Campo C	
Marca	Espacio	Dirección	A	No Utilizado	B	BCC	EOM

A = 0; B = 0; EOM = 1

Fig. 5.52. Rutina de Control en el Protocolo Conitel.

El campo modificador en el comando de control de la MTU indica cuál punto, de los 12 dispositivos en el grupo, especificado por la dirección de grupo, será controlado. Nótese que se utiliza el procedimiento de “verificar antes de ejecutar”; esto es, la RTU almacena el comando y envía una respuesta de verificación a la MTU, la cual, después de la verificación, transmite el comando de ejecución a la RTU. La RTU ejecuta el comando almacenado y envía una respuesta de verificación de ejecución a la MTU.

Todos los otros mensajes o rutinas tienen la misma configuración; sólo cambian los valores transmitidos de acuerdo con los códigos de función y las operaciones correspondientes.

5.4.8. Protocolo DNP 3.0

Introducción

El Protocolo DNP 3.0 (Distributed Network Protocol) está basado en las normas del Comité 57, Grupo de Trabajo 03 de la IEC para el desarrollo de un protocolo para aplicaciones en telecontrol, SCADAs y sistemas de automatización distribuidos. Este protocolo fue desarrollado por la GE Harris en 1990, y en 1993 fue cedido al Grupo de Usuarios DNP, que es una organización sin fines de lucro formada por compañías de servicio público y vendedores. El Protocolo DNP 3.0 es un protocolo abierto y de propiedad pública que fue diseñado para lograr la interoperabilidad entre RTU, IED (Dispositivo Electrónico Inteligente (Intelligent Electronic Device)) y estaciones maestras. Este protocolo ha sido adoptado por la IEEE como práctica recomendada para la interconexión IED-RTU.

El DNP 3.0 es un protocolo abierto, robusto y eficiente, con el cual se puede

- Solicitar y responder múltiples tipos de datos en mensajes sencillos
- Segmentar mensajes en múltiples tramas para asegurar una mejor detección y recuperación de errores
- Incluir solamente nuevos datos en los mensajes de respuesta
- Asignar prioridades a ciertas clases de datos y solicitar esos datos periódicamente de acuerdo con la prioridad establecida
- Permitir respuestas no solicitadas
- Soportar sincronización de temporización con un formato estándar de tiempo
- Permitir múltiples maestras y operaciones par a par
- Permitir el uso de objetos definibles por el usuario incluyendo la transferencia de archivos

Características

- Control por Conteo de Caracteres
- Carácter Básico de 8 dígitos de información, 1 de arranque y 1 de pare
- Topologías punto a punto. Soporta múltiples MTUs y RTUs
- Modos de Operación Normal y Balanceada. Permite transmisiones no solicitadas
- Transmisión con o sin conexión, serie, sincrónica, isocrónica y asincrónica, HDX/FDX
- Interfaces: RS-232C, UIT-T V.24/V.28 y RS-485. Modulación FSK
- Medios de transmisión: par trenzado, fibras ópticas y radio
- La velocidad de transmisión depende del medio utilizado

Arquitectura

El protocolo DPN 3.0 es un protocolo estratificado con cuatro capas:

Capa de Aplicación

La Capa Aplicación responde a los mensajes completos recibidos desde la Seudocapa Transporte, y elabora mensajes basados en la necesidad o disponibilidad de datos de usuario. Una vez que los mensajes han sido elaborados, ellos se pasan a la Seudocapa Transporte donde ellos son fragmentados, para seguir luego a la Capa Enlace y posterior transmisión a través de la Capa y Medio Físico.

Cuando la cantidad de datos a transmitir es muy grande para un solo mensaje de aplicación, se pueden elaborar, mediante fragmentación, múltiples mensajes y transmitirlos secuencialmente. Sin embargo, cada fragmento individual se transmite como un mensaje de aplicación independiente. Para relacionar los diferentes fragmentos de un mensaje global, en cada fragmento, excepto el último, se incluye una indicación de que vienen más fragmentos.

Los mensajes o fragmentos de Aplicación que vienen de una Maestra DNP generalmente son peticiones para operaciones sobre dispositivos, llamados en DNP "objetos de datos", y los fragmentos de Aplicación que vienen de las Esclavas DNP típicamente son las respuestas a esas peticiones. Nótese que una Esclava DNP puede transmitir también un mensaje sin haber sido solicitado (una respuesta no solicitada).

Al igual que en la Capa Enlace, los fragmentos de Aplicación se pueden enviar con un pedido de confirmación. Esto significa que el mensaje no solamente ha sido recibido sino que también ha sido pasado sin error. Por otro lado, en la Capa Enlace un mensaje de confirmación o ACK indica solamente que el mensaje ha sido recibido y que se somete a la verificación CRC.

Seudocapa Transporte

A esta capa se la denomina "seudocapa" en DNP porque no cumple con todos los requerimientos de una capa transporte según el Modelo ISO/OSI. En esta capa se fragmentan los mensajes de la Capa Aplicación en múltiples tramas, y en cada trama se inserta un octeto Código de Función que indica si la trama es la primera o la última de un mensaje. El Código de Función incluye también un número de secuencia que se incrementa con cada trama y que permite que la Capa Transporte receptora pueda detectar pérdida de tramas o tramas descartadas.

Esta seudocapa puede considerarse como una subcapa de capa enlace, pero como la Capa Enlace DNP no soporta las funciones asignadas a la seudocapa, es necesario subirlas formando, nó una Capa Transporte completa sino una capa intermedia a la que se le ha dado el nombre de Seudocapa Transporte.

Capa Enlace de Datos

En esta capa se maneja el enlace lógico entre el transmisor y receptor de la información a fin de mejorar las características físicas del canal para la detección y recuperación de error.

De especial importancia es el Octeto de Control, Fig. 5.56. El Control indica el propósito de la trama y el estatus del enlace lógico.

Algunos de los mensajes especificados en el Control son:

- Reconocimiento Positivo ACK
- Reconocimiento Negativo NACK
- Inicializar el Enlace
- Enlace Inicializado
- Petición de Confirmación ACK
- Petición del estatus del Enlace
- Respuesta del estatus del Enlace

Cuando se solicita una Confirmación ACK, el receptor debe responder con una trama ACK si la trama ha sido recibida y que pasa a las verificaciones CRC. Si no se pide Confirmación ACK, no se requiere una respuesta.

La longitud máxima de la trama transmitida es de 256 octetos.

Capa Física

Esta capa se refiere principalmente al medio físico sobre el cual se transmite el protocolo. Por ejemplo, maneja el estado del medio (libre u ocupado) y la sincronización a través del medio (arranque y pare). Las interfaces preferidas son la RS-232D y RS-485, y los medios corrientes de transmisión son los conductores metálicos (par trenzado y coaxial), fibras ópticas y radio. Actualmente se trabaja en las normas para la transmisión sobre redes de área local.

Formatos de los Mensajes

Secuencias a Nivel de Aplicación

En la Fig. 5.53 se muestra la secuencia de los mensajes de aplicación entre una Maestra y una Remota.

Como se muestra en la Fig. 5.53, la maestra envía una petición a la remota la cual contesta con un mensaje de respuesta. La remota puede decidir espontáneamente transmitir datos mediante un mensaje de Respuesta no Solicitada. Para la maestra, la transacción petición/respuesta con una remota en particular debe completarse antes de que una nueva petición sea enviada a esa remota. Una maestra puede aceptar respuestas no solicitadas mientras una respuesta está en progreso. Sin embargo, para la remota una transacción petición/respuesta debe completarse antes de que cualquiera otra petición o

respuesta no solicitada sean enviadas. Las respuestas no solicitadas solamente deben ser enviadas antes o después de una transacción petición/respuesta.

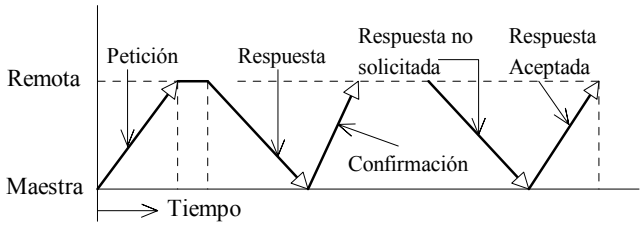


Fig. 5.53. Secuencia Interrogación/Respuesta a nivel de Aplicación.

Mensajes de Capa Aplicación

El formato de los mensajes de Aplicación se divide en Formatos de Petición y Formatos de Respuesta. Los Formatos de Petición son para mensajes desde la Maestra hacia las Esclavas, y los Formatos de Respuestas son las respuestas correspondientes de las Esclavas. El campo Control de Aplicación proporciona la información necesaria para la construcción de mensajes multifragmento. Los mensajes de aplicación se pueden fraccionar en segmentos lo suficientemente pequeños para que quepan en los buffers de mensaje. El tamaño recomendado del fragmento es de 2048 octetos a fin de mantener la compatibilidad con los dispositivos DNP corrientes. Cada fragmento tiene su propio encabezado de manera que él puede ser procesado como un mensaje individual y luego descartado para dejar espacio para el próximo fragmento. Nótese que los segmentos forman parte de los fragmentos; por ejemplo, el formato mostrado en la Fig. 5.54 puede ser un mensaje completo o un fragmento de un mensaje mucho más grande.

En la Fig. 5.54 se muestra el formato de la Capa Aplicación en el caso de un Mensaje de Petición. El formato para un Mensaje de Respuesta es igual con la diferencia de que el Encabezado Respuesta contiene después del campo Código de Función un campo adicional IIN (Internal Indications) cuyos dígitos indican el estatus de la respuesta.

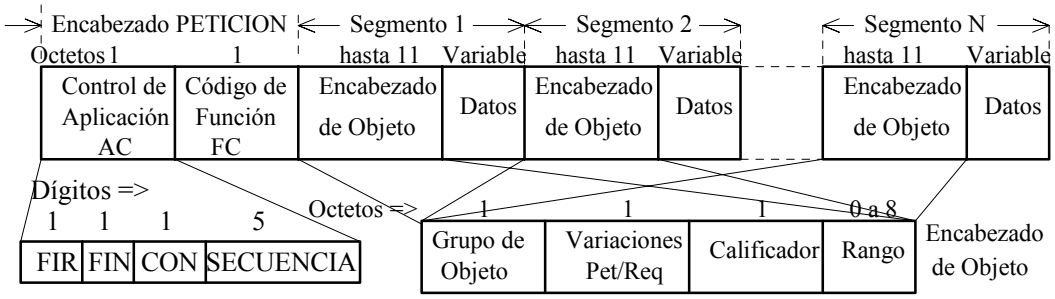


Fig. 5.54. Formato de la Capa Aplicación DNP 3.0

Control de Aplicación (AC). Proporciona la información necesaria para la construcción de mensajes multifragmento. Este campo contiene los siguientes elementos:

FIR. Cuando se coloca a UNO, indica que el fragmento es el primer fragmento de un mensaje de aplicación.

FIN. Cuando se coloca a UNO, indica que el fragmento es el último fragmento de un mensaje de aplicación.

CON. Cuando se coloca a UNO, indica que la aplicación llamante queda en espera de una confirmación de la aplicación llamada. El Código de Función 1 se utiliza en el mensaje de confirmación.

SECUENCIA. Indica el número del fragmento. Los números 0 a 15 están reservados para peticiones de la Estación Maestra. Los números 16 a 31 están reservadas para las Respuestas no Solicitadas desde las Esclavas.

Código de Función (FC). Identifica el propósito del mensaje. Hay dos grupos de Código de Función: uno para peticiones y otro para respuestas. En DNP hay alrededor de 30 códigos en operación para transferencia, control, control de aplicación, configuración, sincronización de temporización, etc. que no vamos a describir aquí.

Encabezado de Objeto. Especifica el tipo de datos que están contenidos en el mensaje o que van a ser utilizados para responder a ese mensaje. El encabezado de objeto es igual tanto en Petición como en Respuesta, pero la interpretación depende de si es una petición o una respuesta y del código de función que lo acompaña. El Encabezado de Objeto está formado por los siguientes campos:

Grupo y Variaciones Pet/Resp. Estos dos campos especifican el grupo de datos y las variaciones de dichos grupos, lo que permite identificar el tipo, clase de datos u objeto.

Calificador. Especifica el significado del campo Rango, es decir, cómo debe interpretarse.

Rango. Indica la cantidad de objetos, los índices de partida y final o identificadores de los objetos en cuestión.

Formatos de Seudocapa Transporte

Cuando una aplicación solicita la transmisión de un mensaje grande, este mensaje se segmenta en fragmentos lo suficientemente pequeños para que quepan en una trama de Enlace DPN, la cual contiene, como máximo, 260 octetos. El número máximo de octetos del formato Seudocapa Transporte es de 250, de los cuales uno es el Encabezado y los otros 249 son Datos de Usuario.

En la Fig. 5.55 se muestra el formato Seudocapa Transporte.

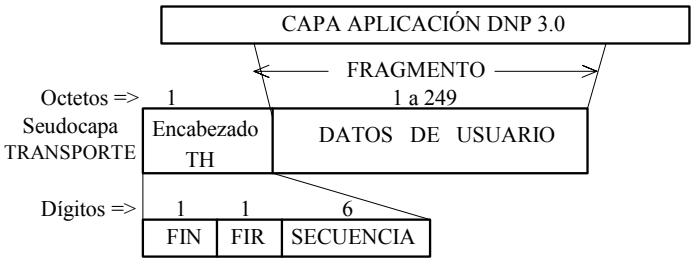


Fig. 5.55. Formato Seudocapa Transporte DNP 3.0

En el Encabezado TH está el control de la seudocapa y está compuesto por los siguientes elementos:

FIN. Cuando se coloca a UNO, este dígito indica que esta trama de datos de usuario es la última trama de una secuencia de fragmentos de un mensaje. Se tiene entonces que cuando FIN = 1 => última trama; FIN = 0 => vienen más tramas.
FIR. Cuando se coloca a UNO, indica que es la primera trama de una secuencia de tramas de un mensaje. Cuando una estación recibe FIR = 1, todas las tramas anteriormente recibidas que no habían sido terminadas (con FIN = 1), son descartadas. La primera trama de una secuencia puede tener un número de secuencia entre 1 y 63. Si se recibe una trama con FIR = 0 y no ha habido mensajes en progreso, entonces la trama es ignorada. Si el mensaje consta de una sola trama, entonces FIN = 1 y FIR = 1. En resumen, si FIR = 1 => primera trama de una secuencia, FIR = 0 => la trama no es la primera de una secuencia.

SECUENCIA. Este es el número de trama y se utiliza para verificar que cada trama está siendo recibida en secuencia. Ayuda también en la recuperación de tramas perdidas o duplicadas. Los números de secuencia van de 0 a 63.

Formatos de Capa Enlace

El formato de Capa Enlace DNP contiene un encabezado de 10 octetos seguido de una secuencia opcional de bloques de datos. Cada bloque contiene 16 octetos a los cuales se les agrega un CRC de dos octetos. La longitud máxima de la trama es de 260 octetos. En la Fig. 5.56 se muestra la trama Enlace DNP.

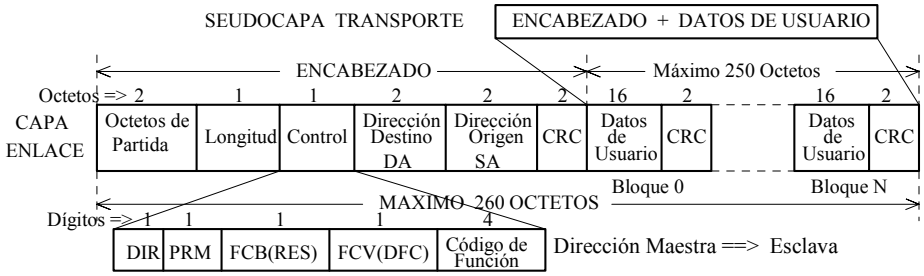


Fig. 5.56. Formato de Capa Enlace DNP

La trama Enlace DNP contiene los siguientes campos:

Octetos de Partida. El primer octeto contiene el número 05H y el segundo 64H. Ellos son una especie de bandera y permiten la sincronización de la trama.

Longitud. Especifica la longitud, en octetos, de los octetos de usuario en la trama, incluyendo los campos Control, Dirección Destino y Dirección Fuente. El valor mínimo en este campo es de 5 (que indica que solamente está presente el Encabezado) y el máximo 255.

Control. Este campo contiene la dirección de la trama, el tipo de trama e información de control de flujo. La dirección Maestra ==> Esclava es la mostrada en la Fig. 4. Para la dirección Esclava ==> Maestra, los dígitos FCB y FCV se reemplazan por los dígitos RES y DFC, respectivamente. Las funciones de estos subcampos son:

DIR. Indica el sentido de transmisión: Maestra => Esclava, DIR = 1, Esclava => Maestra, DIR = 0.

PRM. Mensaje primario; PRM = 1, trama desde la estación primaria (estación llamante); PRM = 0, trama desde la estación secundaria (estación llamada).

FCB. Dígito de conteo de tramas. Se utiliza para suprimir pérdidas o duplicación de tramas hacia la estación secundaria.

RES. Reservado

FCV. Dígito de validación que permite el funcionamiento del dígito FCB. En este caso: FCV = 0, indica ignorar el estado del dígito FCB; FCV = 1, le indica a una estación secundaria que el estado del dígito FCB debe ser verificado en relación con el estado del dígito FCB de la última trama enviada cuyo dígito FCV era 1.

DFC. Dígito de control del flujo de datos. Se utiliza para prevenir el desbordamiento de los buffers de la estación secundaria.

Código de Función. Identifica el tipo de trama. La definición de los valores colocados en este campo son diferentes en las estaciones primarias y secundarias.

Dirección de Destino (DA). Especifica la dirección de la estación hacia la cual se envía la trama. El primer octeto es el octeto de menor orden y el segundo es el de mayor orden. Cuando la estación primaria coloca la dirección FFFFH (broadcast), todas las estaciones secundarias escuchan y aceptan las tramas que vienen de la estación primaria.

Dirección de Origen (SA). Identifica la dirección de la estación de donde viene la trama. El primer octeto es el octeto de menor orden y el segundo es el de mayor orden.

Datos de Usuario. Los bloques contienen de 1 a 16 octetos de datos de usuario. Si el mensaje consta de más de 16 octetos, se llenarán bloques con 16 octetos excepto el último que puede contener de 0 a 16 octetos.

CRC. Campos para verificación de error; código CRC

El enlace de datos DNP 3.0 puede soportar múltiples maestras, múltiples esclavas y comunicaciones par a par (peer to peer). En la configuración de múltiples maestras, las maestras tienen mayor prioridad que las esclavas. Sin embargo, se puede establecer un orden de prioridades entre las maestras. En la configuración de múltiples esclavas habrá una maestra que tendrá el control; es el modo de respuesta normal. En comunicaciones par a par todos los dispositivos actúan como esclavas y el modo de respuesta es balanceado; sin embargo, hay que incorporar mecanismos para evitar colisiones, pues todas tienen la misma prioridad y pueden transmitir simultáneamente.

La Capa Física DNP 3.0

La capa física que se recomienda para el enlace de datos en DNP 3.0 es una capa asincrónica con caracteres de 8 dígitos de información, 1 dígito de arranque, 1 de pare y no paridad. Las interfaces físicas recomendadas son la RS-232C, la UIT-T V.24/V.28 y la RS-485, con Módems FSK.

La capa física debe proveer cinco tipos de servicios: Enviar, Recibir, Conectar, Desconectar y Estado (Status). El servicio Enviar convierte los octetos de datos en secuencias serie para su transmisión entre el ETD y el ETCD, con las señales apropiadas para la comunicación con un ETCD dado. El servicio Recibir debe ser capaz de aceptar datos desde el ETCD y entregarlos con la sincronización correcta y libre de ruido a su ETD. Los servicios Conectar y Desconectar permiten la conexión y desconexión, si es aplicable, desde una red pública de datos. El servicio Estado debe ser capaz de retornar el estado del medio físico; como mínimo, debe indicar si el medio está libre u ocupado.

Sin importar el tipo de capa física utilizada, en DNP 3.0 se utilizan dos configuraciones en un SCADA dado: la topología en barra directa y la topología en barra serie. La topología en barra directa es una configuración punto a punto, sea por radio, por conductores físicos o mediante una conexión a través de una red pública conmutada. La topología en barra serie es esencialmente una configuración multipunto en operación Maestra/Esclava.

Para más información sobre el Protocolo DNP 3.0, el lector puede consultar los documentos DNP V3.0 Application Layer (P009-0PD. APP), DNP V3.0 Data Link Layer (P009-0PD.DL) y DNP V.3 Transport Functions (P009-0PD.TF) que pueden descargarse sin costo desde INTERNET.

Otros Protocolos Industriales

En la práctica existe una gran variedad de protocolos industriales, pero todos tienen características similares a las de los protocolos que hemos descrito. Entre la miríada de protocolos industriales podemos mencionar los siguientes: WESDAC, TANO, MOTOROLA INTRAC 2000, SCI RDACS, SYSTRONICS MICROMOTE, TRW2000, OPTROL, AMOCAMS, TEJAS, TIWAY 1, etc.

5.5. LA RED DE CAMPO (FIELDBUS)

5.5.1. Introducción

La Red de Campo o Fieldbus (Barra o Bus de Campo) es un nombre genérico para una cantidad de protocolos de campo o protocolos industriales. Una Red de Campo es una red digital de comunicaciones serie, multipunto, bidireccional, compartida por diferentes elementos de campo (controladores, transductores, actuadores y sensores), que permite la transferencia de datos e información de control entre estos elementos primarios de automatización, control y monitoreo, con elementos de más alto nivel tales como los DCS y los SCADA. Cada dispositivo de campo es un dispositivo inteligente que tiene su propia capacidad de computación y es capaz de ejecutar funciones sencillas tales como diagnóstico, control, mantenimiento, así como capacidad de intercomunicación con elementos de más alto nivel; estos dispositivos se conocen con el nombre de "dispositivos electrónicos inteligentes (Intelligent Electronic Device, IED). En esencia, la red de campo reemplazará las redes de control centralizado por subredes de control distribuido.

El problema actual es que no todos los fabricantes de sistemas PLC e IED (sensores, actuadores, instrumentos de campo, etc.) soportan todos los protocolos existentes o comparten protocolos comunes. En este momento, en el diseño de un sistema de automatización y control, hay que seleccionar primero los elementos IED y después buscar al fabricante de los sistemas de control (DCS, PLC y SCADA) que puedan soportar esos elementos. Esto a menudo es lo opuesto a la forma lógica de emprender el diseño de un sistema, en el cual se enfatiza el concepto de control global donde la selección de los elementos de campo sería una de las últimas fases. Un ejemplo práctico ilustra la situación actual: para el sistema de control de una subestación eléctrica el diseñador especifica relés de protección SEL (Schweitzer Engineering Laboratories), relés ABB de protección de alimentadores, monitores GE Multilin de calidad de potencia, medidores PLM (Precision Measurements Labs) y un PLC Modicon. Pero los relés SEL se comunican mediante un formato ASCII propiedad de SEL; los relés ABB, los monitores GE y los medidores PLM utilizan el protocolo DNP 3.0, y el PLC Modicon se comunica mediante el protocolo Modbus. Esta situación es la que se desea evitar, pues en las actuales condiciones el diseñador queda atado a un fabricante pues tiene que elegir, por ejemplo, el PLC Modicon y todos los elementos de campo deberán comunicarse con el protocolo Modbus.

Actualmente se puede encontrar toda una variedad de redes que efectúan funciones de una red de campo; pero cuando se hace referencia a una Red de Campo o Fieldbus, se habla de redes que están en proceso de normalización por diversas organizaciones, tales como la Sociedad Americana de Instrumentación (ISA), el Instituto Americano de Normas Nacionales (ANSI), la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) y otras entidades de Europa y Japón, cuyo objetivo es el de llegar a definir un estándar abierto único que permita la intercomunicación entre y con dispositivos de campo en la forma más versátil independientemente de las diferentes marcas comerciales en existencia.

La necesidad de un protocolo de campo estándar único se justifica en los proyectos de automatización de procesos integrados desde el nivel de campo hasta el nivel gerencial y corporativo. La optimización de estos sistemas se logrará cuando a todos los niveles se

maneje un protocolo de comunicaciones abierto y compatible con el Modelo de Referencia ISO/OSI.

Para que el lector tenga idea de la tarea a la cual se enfrentan los organismos internacionales en sus esfuerzos de normalización, a continuación se lista algunos de los protocolos actualmente presentes en el mercado: Fieldbus Foundation, Bitbus, WorldFip (World Factory Instrumentation Protocol), Profibus (Process Fieldbus), CAN (Controller Area Network), Interbus-S, DeviceNet, Seriplex, AS-Interface, ARCnet, ControlNet, P-NET (Process Automation Net), SDS (Smart Distributed System), ASI (Actuator Sensor Interface), Sensoplex, FlexNet, LonWorks (Local Operating Network), CEBus (Consumer Electronic Bus), SERCOS (SErial Real-time Communication System), DIN-Meβbus (DIN-Measurement Bus), etc. Estos protocolos han sido diseñados en diferentes épocas, por diferentes compañías y para diferentes propósitos, y la selección de uno es más bien un asunto de requerimientos y preferencias.

CARACTERISTICAS DE ALGUNAS REDES DE CAMPO

Red de Campo	Foundation	WorldFIP	Profibus PA	CAN
Velocidad	31,25 kbps (H1)	31,25 kbps; 1 y 2,5 Mbps	31,25 kbps	Hasta 1 Mbps
Operación	Una Maestra; Múltiples Maestras	Productor/ Consumidor	Maestra/Esclava Par a Par	Par a Par
Max. Distancia sin repetidores	1,9 km	2 km/31,25 kbps	1,2 km	40 m/1 Mbps 1 km/20 kbps
Tamaño Formato	14 a 275 octetos	1 a 128 octetos	250 octetos	8 octetos fijo
Método de Acceso	Pase de Contraseña (token)	Barra Radiante	Pase de Contraseña (token)	CSMA/CD
Tipo de Cable	Par Trenzado	Par Trenzado	Par Trenzado	Par Trenzado
Estándar de Capa Física	IEC 1158	IEC 1158-2	IEC 1158	Voltaje Diff. Balanceado
Estándares Aplicables	IEC 1158 ISA S50	IEC 1158-2	DIN 19245	ISO 11898
Aplicaciones	Automatización de Procesos	Control de Procesos en Tiempo Real	Automatización de Procesos	Sensores/Ac-tuadores, Automóviles

En la Figs. 5.57 y 5.58, que corresponde al Nivel 1 de la Fig. 5.4, se muestra la diferencia entre una red industrial actual y una Red de Campo, respectivamente.

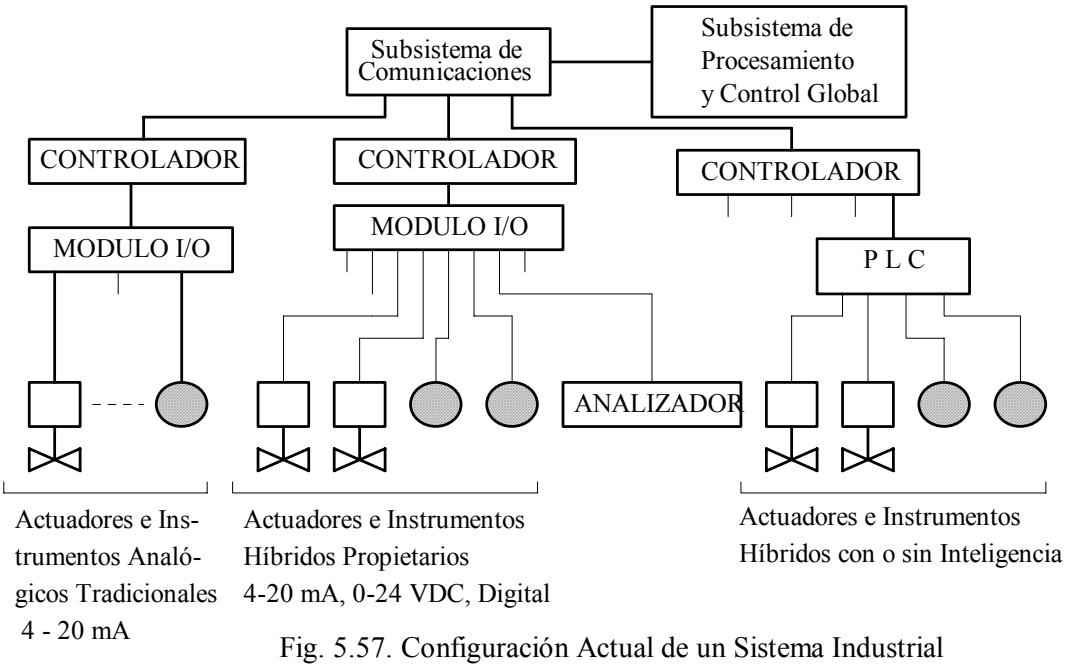


Fig. 5.57. Configuración Actual de un Sistema Industrial

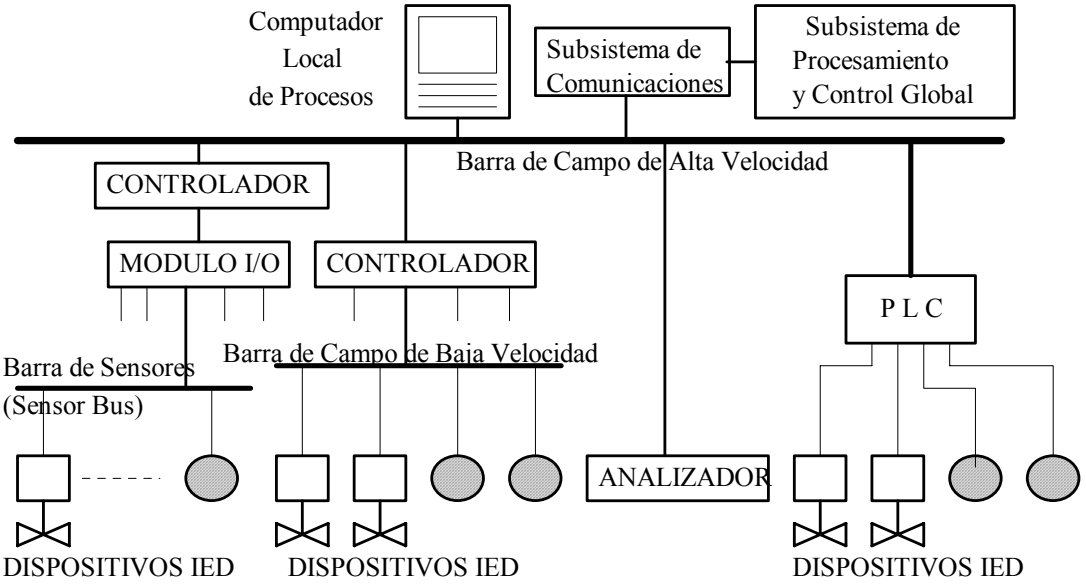


Fig. 5.58. Configuración con la Red de Campo de un Sistema Industrial.

5.5.2. Características Básicas de la Red de Campo Estándar

La red de campo estándar deberá tener las siguientes características básicas deseables:

- Modo de Transmisión serie asincrónica, HDX/FDX y una variada gama de velocidades de transmisión en los niveles de adquisición, transmisión y procesamiento
- Protocolos relativamente simples y limitados, y de fácil configuración. Abierto, interoperable, multivendedor y con especificaciones disponibles sin acuerdos de licencia
- Funcionamiento en tiempo real con prestaciones (performance) predecibles
- Estado de las estaciones accesible en cualquier momento
- Intercambio de mensajes con y sin confirmación
- Bajo costo de instalación y mantenimiento, e independencia de los fabricantes
- Servicios de conformación/verificación independientes y con reconocimiento
- Versatilidad para atender simultáneamente procesos continuos y discretos, que impliquen mejores tiempos de respuesta, optimización de las distancias de cableado, seguridad intrínseca, etc.
- Capacidad de aplicación en el campo de la generación y transporte de energía eléctrica

5.5.3. Arquitectura de la Red de Campo Estándar

Las organizaciones que están patrocinando la creación de una red de campo única están de acuerdo con el requerimiento básico de que esta red debe ser compatible con el Modelo ISO/OSI; pero la compatibilidad total no es necesaria ni deseable porque ello implicaría pobres prestaciones en tiempo real. La compatibilidad parcial permite que la red de campo sea más coherente con redes de área local de más alto nivel, mientras conserva las características y técnicas ya probadas en los niveles de Capa Física y de Enlace.

En su esfuerzo unificador la ISA y la IEC han venido desarrollando los estándares de capa física ISA 50.02 (1992) y IEC 1158 (1993), conocidos como estándares SP50, que es el nombre del Comité encargado del proceso de normalización. Estos estándares son compatibles con el Modelo ISO/OSI. En particular, sobre la Capa Aplicación se agrega una nueva capa que relaciona al usuario con los paquetes de mercado con vistas a la interoperabilidad o intercambiabilidad de dispositivos. La IEC ha estado trabajando también en una serie de normas de campo para aplicaciones en los sistemas de generación y transmisión de energía eléctrica. Estas son las normas IEC 870-5-101/102/103, pero todavía no han sido completadas y no se dispone de mucha información acerca de ellas.

En la Red de Campo Estándar se utilizará entonces las Capas Física, Enlace y Aplicación, cuyas características estarían enfocadas al desarrollo de las funciones siguientes:

Capa Física

- Velocidades de Transferencia apropiadas. En SP50 se han normalizado tres velocidades: 31,25 kbps, 1 Mbps y 2,5 Mbps.
- Distancias Máximas optimizadas para cada nivel de operación (adquisición, transmisión y procesamiento). En SP50 la máxima distancia permitida entre dos dispositivos sobre par trenzado es de 1900 m a 31,25 kbps, 750 m a 1 Mbps y 500 m a 2,5 Mbps
- Codificación y Transmisión Digital de Datos. Transmisión Serie, Sincrónica, HDX. Se utiliza el código Manchester
- Topologías: barra, árbol y punto a punto
- Características Eléctricas, Mecánicas, Funcionales y de Procedimiento
- Requerimientos para los diferentes componentes de la red, por ejemplo, seguridad intrínseca y alimentación de potencia
- Configuración del medio físico para alcanzar una gran integridad en la transmisión (medios para control de error) y para la interoperabilidad e intercambiabilidad de dispositivos

Capa Enlace

- Establecimiento/Desconexión del enlace lógico
- Direccionamiento de Estaciones (Nótese que el direccionamiento es una función de la Capa Red OSI, pero como esta capa no está definida en la barra de campo esa función se realiza en la Capa Enlace)
- Conformación de las tramas
- Control de Error y Flujo en el enlace
- Dos Subcapas de Enlace: Control del Enlace de Datos (FDLC) y de Acceso al Medio (FMAC)
- Recursos para la Transmisión eficiente y segura de mensajes (Códigos CRC)

Capa Aplicación

- Servicios: normalización y secuenciamiento de bloques funcionales y descripción de los dispositivos de campo
- Modelo Cliente-Servidor
- Interfaces Usuario/ Paquetes de Mercado (Algunas veces se considera este renglón como una Capa de Usuario superior a la Capa Aplicación)

Los estándares de Capa Enlace y Aplicación están en desarrollo.

5.5.4. Ventajas de la Red de Campo Estándar

La red de campo estándar tiene muchas ventajas que benefician al usuario final. La ventaja principal, y la más atractiva de ellas, es la reducción en los costos de capital. Estos costos tienen lugar en los renglones de costos iniciales, costos de mantenimiento y prestaciones del sistema.

Reducción de Costos Iniciales. Una de las principales características de la red de campo es la reducción en el cableado, en los costos de instalación de los dispositivos de campo y en la puesta a punto del sistema. Como la red de campo es, básicamente, una red multipunto, ella permite una reducción de 5 a 1 en los costos de alambrado e instalación, pues la red de campo requiere menos materiales y personal para la instalación.

Reducción de Costos de Mantenimiento. El hecho de que la barra de campo sea menos compleja que los sistemas convencionales, implica una menor necesidad de mantenimiento. En efecto, la simplificación de los sistemas significa que la confiabilidad a largo plazo del sistema ha aumentado. En la red de campo es posible examinar todos los dispositivos del sistema para determinar su estado y la interacción entre dispositivos individuales. Como consecuencia, es más fácil descubrir el origen de fallas, por ejemplo, a la vez que se mejoran las labores de mantenimiento. Todas estas operaciones pueden hacerse mediante diagnósticos en línea, lo cual simplifica el mantenimiento predictivo y la calibración remota de dispositivos de campo.

Mejoramiento de las Prestaciones del Sistema. La red de campo le permite al usuario una completa flexibilidad en el diseño del sistema. Algunos de los algoritmos y procedimientos de control que en los sistemas convencionales están contenidos en los programas centrales de control, pueden ahora residir en los dispositivos de campo individuales. En consecuencia, se reducen los costos y la expansión del sistema es mucho menos complicada.

Uno de los aspectos que está siendo actualmente objeto de un gran debate, es lo concerniente a la “interoperabilidad” y la “intercambiabilidad”. La interoperabilidad y la intercambiabilidad son características deseadas para las redes de campo, pues permiten al usuario cierta libertad en la selección de instrumentos de campo de diferentes fabricantes para la misma red y para las condiciones de operación normales. La interoperabilidad (o la intercambiabilidad) implica también la capacidad de agregar o remover dispositivos en la red sin modificar o revisar los programas (software) asociados.

Nótese que “interoperabilidad de dispositivos” no es lo mismo que “intercambiabilidad de dispositivos”. Con la interoperabilidad, se puede reemplazar sin problemas un dispositivo de un fabricante dado por un dispositivo similar de otro fabricante. La intercambiabilidad, por otro lado, es la habilidad para reemplazar exactamente un dispositivo de un fabricante por un dispositivo de otro fabricante. Muy pocas veces, por razones obvias, dos fabricantes pueden o quieren producir dispositivos idénticos; por lo tanto, desde el punto de vista de los fabricantes, la intercambiabilidad es más restrictiva y menos deseable que la interoperabilidad. Mirado desde el punto de vista del usuario, la intercambiabilidad es preferible a la interoperabilidad, pues la

intercambiabilidad le proporciona la más completa libertad en la selección de dispositivos en una aplicación dada.

En resumen, los dispositivos de campo (interoperables o intercambiables) producidos por diferentes fabricantes le permitirán al usuario seleccionar en forma óptima los elementos que cumplan con sus requerimientos para una buena estrategia de control, operación y monitoreo flexibles, y capacidad de configuración y diagnóstico remotos.

5.5.5. Normalización de una Red de Campo

En el actual proceso de normalización se están promoviendo tres clases de tecnologías para aplicación en el campo. Estas tecnologías son:

- Redes digitales de multipropósito y multiservicios
- Barras sensoras (sensor bus) diseñadas primordialmente para dispositivos de dos estados y otros dispositivos sencillos
- Digitalizadores de señal para terminación remota de dispositivos de dos estados.

Vamos a describir brevemente solamente la primera de estas tecnologías. Para las otras dos tecnologías, el lector interesado puede consultar, por ejemplo, la Edición Especial de la Revista In Tech, de la ISA, noviembre 1996, dedicada a las Redes de Campo.

Redes Digitales de Servicios Múltiples

En este tipo de tecnología es donde el proceso de normalización ha estado más activo y hasta el presente varias soluciones han sido propuestas y se ha hecho algunas pruebas de aplicación en el campo.

En la competencia para lograr el reconocimiento de sus respectivas propuestas, los fabricantes de sistemas de campo se han constituido en asociaciones para promover la normalización de sus propios diseños. En estos momentos dos grupos encabezan el proceso: el primer grupo es el Grupo Fieldbus Foundation formado por Honeywell (Estados Unidos), Allen-Bradley Corporation (Estados Unidos), Telemecanique (Francia) y otros de Europa y Estados Unidos. El segundo es el Grupo Profibus (Process Fieldbus), formado por Siemens (Alemania), The Rosemount Group (Estados Unidos), Yokogawa Electric Corporation (Japón), y otros de Europa y Estados Unidos; Profibus puede ser considerado como una norma europea, pues es un estándar DIN (Alemania).

La Red de Campo Fieldbus Foundation

La Red de Campo Fieldbus Foundation es un protocolo industrial completamente digital, de transmisión serie, HDX, que permite interconectar sensores, actuadores, PLC, DCS, etc., en un ambiente industrial. Esta red sirve también como red de área local para instrumentos utilizados en procesos industriales y en sistemas automáticos de manufactura.

La Red Fieldbus Foundation (FF) cumple con la mayoría de las especificaciones de los estándares SP50, como se puede apreciar en la Fig. 5.59 .

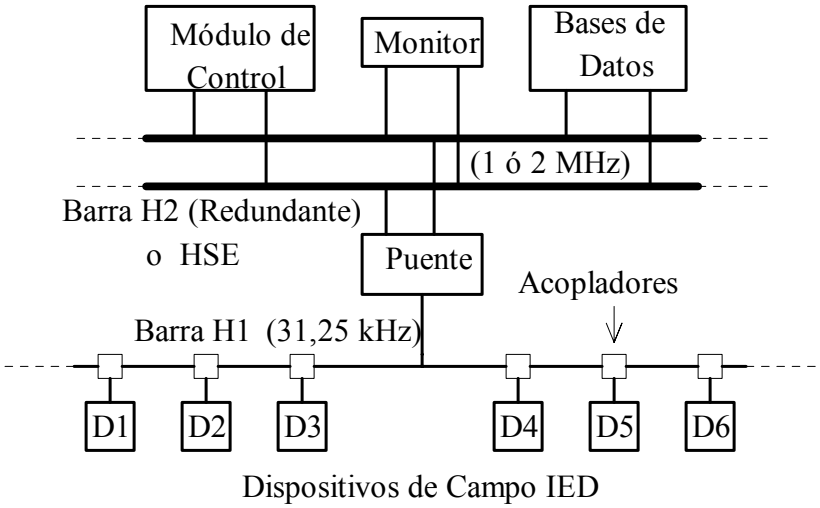


Fig.5.59. Topología Básica de la Red de Campo Fieldbus Foundation.

Como se muestra en la Fig. 5.59, la Red FF dispone de una barra (bus) H1, que trabaja a una velocidad de 31,25 kbps, para interconectar los dispositivos de campo individuales. Estos dispositivos pueden ser sensores, actuadores, analizadores, PLC, DCS, etc., para un total de 32 dispositivos. La barra H1 se puede interconectar mediante un puente a una barra H2 redundante (que puede ser una red de área local, por ejemplo, HSE) de 1 Mbps hasta 100 Mbps, que actúa como una red de control. La alimentación de potencia de los dispositivos de campo se efectúa desde fuentes locales lo cual elimina una cantidad de conductores y facilita la seguridad intrínseca.

Desde el punto de vista del Modelo de Referencia ISO/OSI, la red FF consta de tres capas denominadas

Capa de Aplicación de Usuario
Capa de Comunicaciones
Capa Física

La Capa Física FF corresponde a la Capa Física ISO/OSI. Esta capa recibe los mensajes o tramas de las capas superiores y las transmite por el medio de transmisión empleado. Este medio utiliza interfaces EIA RS-485 con fibras ópticas, par trenzado o cable coaxial, según la aplicación. La Capa de Comunicaciones FF tiene principalmente funciones de la Capa Enlace ISO/OSI y de Aplicación, como se muestra en la Fig. 5.60. Las capas 3 a 6 ISO/OSI no se utilizan. La Capa de Usuario es particular a la aplicación y la podemos considerar como una interfaz usuario/paquetes de mercado.

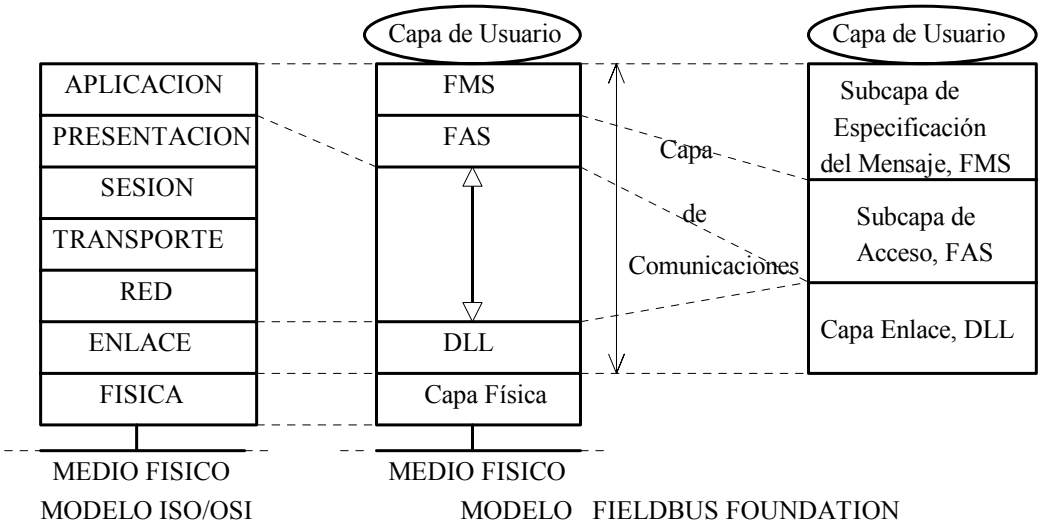


Fig. 5.60.

Arquitectura de la Red de Campo Foundation

La arquitectura de la red de campo Fieldbus Foundation se muestra en la Fig. 5.61.

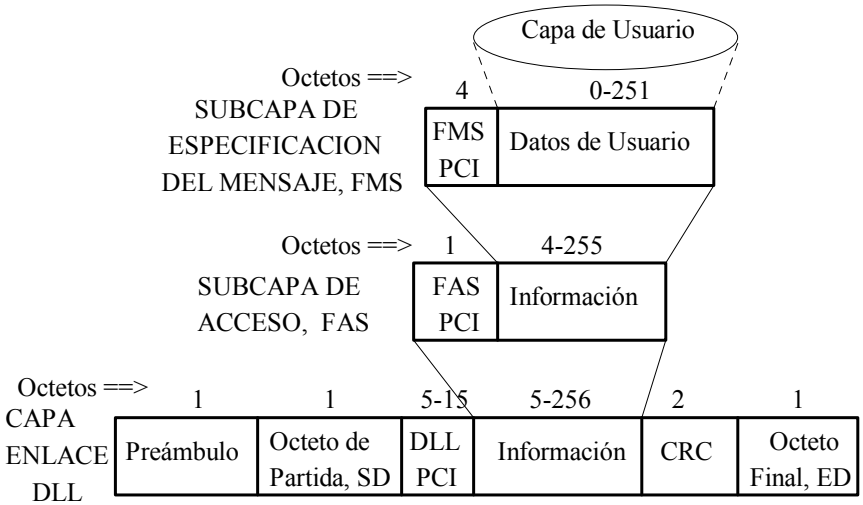


Fig. 5. 61. Arquitectura de la Red de Campo Fieldbus Foundation.

La longitud máxima de la trama es de 275 octetos

Los campos de la trama Fieldbus Foundation son:

Preámbulo. Secuencia de ocho dígitos utilizada para la sincronización de la trama. Esta secuencia está codificada en Manchester Bifase-L, pero contiene dos violaciones que permiten su identificación.

Octeto de Partida (SD). Utilizado para indicar el comienzo de la trama.

DLL PCI. Es la información de control del protocolo de capa enlace especificada en el estándar IEC/ISA DLL propio de Fieldbus Foundation.

FAS PCI. Es la información de control para proveer servicios de acceso a la Subcapa de Especificación del Mensaje (FMS). Los tipos de servicios que se proporcionan están especificados en una norma propia de Fieldbus Foundation.

FMS PCI. Es la información de control para proveer servicios que permiten a la Capa de Usuario el envío de mensajes; provee también los servicios de comunicación y protocolos necesarios para la elaboración de los mensajes que utilizará la Capa de Usuario.

CRC. Campo para la verificación de error; utiliza códigos CRC.

Octeto Final (ED). Utilizado para indicar el final de la trama.

Información más detallada sobre Fieldbus Foundation está fuera de los límites que nos hemos impuesto. Sin embargo, el lector puede bajar desde Internet, (www.fieldbus.org/information), mucha información sobre esta red.

La Red de Campo Profibus

La Red de Campo Profibus es un protocolo industrial que está siendo desarrollado y patrocinado sobre todo en Europa, y está en un plano competitivo con la red Fieldbus Foundation. Sin embargo, como se puede apreciar en la Tabla de la página 308, muchas de las características de Profibus son comunes con las de Fieldbus Foundation y no las daremos aquí. Las versiones más utilizadas de Profibus son Profibus PA y Profibus DP, las cuales cumplen también con la mayoría de las especificaciones de los estándares SP50.

Como es el caso en la mayoría de los protocolos industriales, la arquitectura de Profibus consta de tres capas equivalentes a las correspondientes ISO/OSI. Las capas ISO/OSI 3 a 6 no se utilizan. Las capas Profibus son:

Capa Física. Describe las características físicas de la tranmsmisión.

Capa Enlace de Datos. Especifica las reglas de acceso al medio. Es un protocolo de control por bit.

Capa de Aplicación. Define los mecanismos comunes útiles en las aplicaciones y el significado de las informaciones intercambiadas.

Características Generales de Profibus

- Control por Bit
- Velocidad: 31,25 kbps (H1)
- Topologías: multidrop y en árbol
- Distancias: 100 m a 12 Mbps hasta 1200 m a 9,6 kbps
- Medios de transmisión: para trenzado apantallado
- Número de estaciones: máximo 32 por segmento; 126 con 4 repetidoras
- Seguridad Intrínseca aplicable
- Interfaz de preferencia: RS-485

Información más detallada sobre Profibus está fuera de los límites de este libro; sin embargo, el lector puede bajar de Internet, www.profibus.com, mucha más información.

En este momento se está trabajando para lograr la interoperabilidad de dispositivos de campo tanto en Profibus como en Foundation. Si esta tendencia continúa, es posible que se pueda alcanzar un protocolo común para normalizar de una vez por todas las redes de campo; sin embargo, esta situación ambigua puede prolongarse pues están en juego considerables intereses económicos.

La necesidad de una red de campo estándar es un punto vital en la integración de equipos de diversos fabricantes a nivel de campo y tendrá alternativas efectivas de funcionamiento, tanto para aplicaciones en procesos continuos como en discretos. La existencia de un estándar único dará nuevas dimensiones al control de procesos y permitirá la comunicación efectiva entre los equipos de campo (sensores, actuadores, digitalizadores, etc.) y los controladores de mayor nivel (PLC, DCS y SCADA), así como la incorporación de Servidores de Comunicación, Puentes y Gateways en todas las etapas del proceso.

5.6. RESUMEN

La Automatización Industrial es el medio fundamental para mejorar el rendimiento y eficacia de una empresa industrial moderna, pues permite la toma de decisiones operacionales, tácticas y estratégicas cualquiera que sea la naturaleza de la empresa. En particular, la integración de una red de comunicaciones permitirá el flujo de información entre los tres niveles de sistemas de una empresa moderna: el Nivel Operacional, el Nivel Táctico y el Nivel Estratégico. Para cumplir con estos objetivos la red integrada de comunicaciones debe estructurarse con base en una arquitectura bien definida y bajo las premisas de racionalización, conectividad, calidad y confiabilidad.

En este capítulo se describe la configuración general de un sistema de procesamiento y control como soporte de la automatización industrial. Se describe cada uno de los diferentes subsistemas, haciéndose énfasis en aquellos dispositivos necesarios para la adquisición, procesamiento y transmisión de los datos desde el campo hasta un centro de control y supervisión. Se estudia algunas de las características de las señales de campo y

dispositivos y sistemas tales como los SCADA, los PLC, las RTU, los sensores y actuadores, así como los medios para el acondicionamiento y medición de las señales.

La mayor parte del capítulo está dedicada a la descripción de los protocolos industriales más conocidos y utilizados en la industria venezolana. La descripción de estos protocolos se hace en relación con el Modelo de Referencia ISO/OSI, indicándose las características propias de cada una de las capas como un medio para entender el proceso global de la comunicación en los ambientes industriales.

Los protocolos vistos fueron: ASCII, HART, Modbus, BSAP, Microbuffer, Conitel y DNP 3.0. El enfoque seguido en la descripción de estos protocolos permite conocer las estrategias de control de cualquier tipo de protocolo, no solamente de tipo industrial sino también otros protocolos de comunicaciones como los que se describirán en el Capítulo VI en conexión con las redes de computadoras.

Finalmente se describen las Redes de Campo, sus características y ventajas, y los esfuerzos de los organismos de normalización para establecer un patrón o estándar único para las comunicaciones industriales.

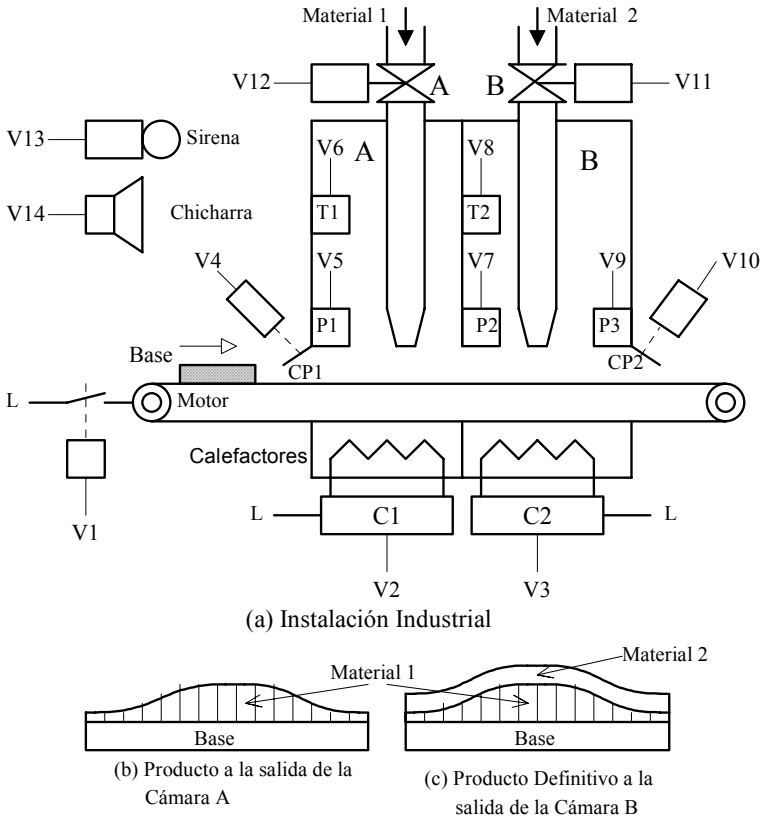
5.7. CUESTIONARIO

1. Diga los objetivos principales en la automatización de procesos industriales.
2. Describa el modelo de sistemas de una empresa industrial moderna y las características y funciones de cada uno de sus estratos.
3. Diga algunas de las causas de la baja integración entre los niveles operacionales, tácticos y estratégicos de una empresa industrial.
4. Diga las premisas y características de una red integrada de comunicaciones en una empresa industrial moderna.
5. Estudie con atención la Fig. 5.2 y observe las relaciones entre los diferentes elementos que la constituyen. En particular, diga qué subredes pertenecen a los niveles tácticos y estratégicos.
6. Defina lo que es, en general, un SCADA. Si en su empresa hay un SCADA, haga una descripción completa de él indicando todas sus características y las funciones de cada una de las capas (en el sentido ISO/OSI) que lo constituyen.
7. Dibuje el diagrama de bloques de un Sistema de Procesamiento y Control Industrial y describa las funciones y características de cada uno de los bloques.
8. Defina lo que es telemetría, telecontrol y lazo de control.
9. Defina lo que es un transductor; sus tipos, clasificación, características y aplicaciones.
10. Diga por qué la señal de salida de un transductor debe ser acondicionada, y los pasos necesarios para lograr ese acondicionamiento.
11. Sea la Fig. 5.8. Analice y entienda cada uno de los pasos del mecanismo de regeneración de una señal digital.
12. Explique los tres tipos de salida de las señales de comando hacia los actuadores.

13. Describa las características generales de los PLC y de las RTU. Si en su empresa se utilizan estos dispositivos, describa las características particulares de los modelos de PLC y RTU utilizados y la forma en que han sido aplicados.

14. Consideremos el proceso industrial ilustrado en la parte (a) de la figura siguiente

Se tiene dos hornos A y B en los cuales entra una correa transportadora que lleva una base sobre la cual se va a depositar dos materiales: Material 1 y Material dos. La correa lleva la base al Horno A en donde se le deposita Material 1 a una temperatura T1 constante, pero la válvula A tiene apertura variable de tal manera que el Material 1 se deposita en la forma mostrada en la figura (b). La correa sigue hacia el horno B en donde la temperatura T2 es variable y sobre la base se deposita el material 2 formando una capa de espesor uniforme. Esto quiere decir que la válvula B tiene apertura constante.



La operación del sistema es como sigue. Inicialmente el operador arranca manualmente la correa transportadora, lo cual hace también que los calefactores C1 y C2 se enciendan y el sistema pasa a Operación Automática. Cuando el detector de posición P1 detecta la llegada de la base, abre la compuerta CP1 para que la base entre en el Horno A y pasado un retardo establecido en el autómata, cierra la compuerta CP1 y abre la válvula A. La correa se mueve a través del Horno A a temperatura constante y el Material 1 se deposita en la forma mostrada en la figura (a). La correa se sigue moviendo y al llegar al

Horno B el detector de posición P2 detecta la presencia de la base ya con el Material 1. Se cierra la válvula A, se apaga el calefactor C1 y se abre la válvula B. En el Horno B la temperatura es variable y está controlada por el autómata que regula al calefactor C2; el Material 2 se deposita formando una capa uniforme, como se muestra en la figura (c)

La correa se sigue moviendo a través del Horno B hasta que llega a un punto donde es detectada por el detector de posición P3, considerándose que el producto final está listo. Se cierra la válvula B, se apaga el calefactor C2, se abre la compuerta CP2, y se avisa al operador con una señal audible (chicharra); el producto sale del horno B y pasado un retardo establecido en el autómata, la compuerta CP2 se cierra y se detiene la correa transportadora.

Las condiciones de alarma son las siguientes:

1. Si la temperatura T1 se sale fuera de su rango, se cierra la válvula A, se apagan los calefactores C1 y C2, y se activa una alarma (sirena) para que el operador actúe.
2. Si la temperatura T2 se sale fuera de su rango, se cierra la válvula B, se apaga el calefactor C2 y se activa una alarma (sirena) para que el operador actúe.

(a) En este sistema identifique y defina:

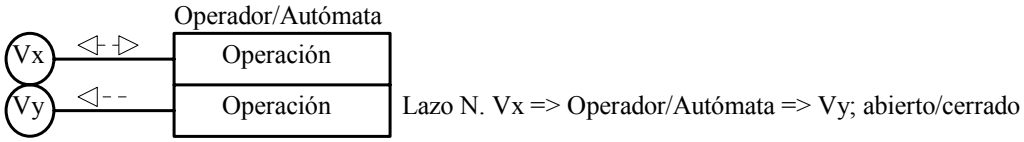
Las variables discretas y continuas, las variables de captación (sensores), las variables de control (actuadores), y las variables de operación manual y/o automática.

Represente su respuesta mediante una tabla de la forma

Variable	Función	Continua/ Discreta	Captación/ Control	Operación Manual y/o Automática
Vx				

(b) Identifique los lazos de control y clasifíquelos como abiertos o cerrados.

Represente su respuesta en la forma



15. Describa las funciones de cada uno de los elementos de un Centro de Control Industrial como el mostrado en la Fig. 5.14.

16. Diga por qué los elementos principales del Centro de Control deben ser redundantes.
17. Describa las funciones y tareas del Sistema Operativo.
18. Diga las características y funciones de las Interfaces Hombre-Máquina.
19. Describa las características principales del Protocolo ASCII.
20. Para los protocolos HART, Modbus, BSAP, Microbuffer, Conitel y DNP.3.0, describa sus principales características, formatos de capa, tipos de mensaje, funciones, etc. que le permitan entender sus principios de funcionamiento. Si en su empresa se utiliza alguno de estos protocolos, haga una descripción del mismo pero adaptada al tipo de instalación industrial y necesidades de la empresa (ver la pregunta 6).
21. Se tiene un SCADA con Protocolo Modbus. En un momento dado se produce el siguiente diálogo entre la MTU y una de sus RTU:

    Petición. La MTU le pide a la RTU 15 que le envíe el estado (ON/OFF) de los ocho puntos predefinidos.

    Respuesta. La RTU 15 le contesta que el estado de los puntos pedidos es:

    ON-OFF-ON-OFF-ON-ON-OFF-OFF

    Construya los formatos correspondientes a estos mensajes. En el Campo CRC coloque XXX solamente.
22. La MTU de un SCADA Modbus recibió el siguiente mensaje:

Dirección	Función	Código de Excepción	CRC
12H	07H	06H	XXXH

Explique el significado del mensaje y cuáles podrían haber sido las causas por las cuales la RTU lo envió.

23. Durante un intercambio MTU/RTU en Modbus se trasmitieron los siguientes mensajes:

Petición

Dirección	Función	Información		CRC
		Punto de Partida	Número de Puntos	
19H	02H	00C4H	0010H	XXX

Respuesta

Dirección	Función	Información		CRC
		Número de Octetos	Estado de Entradas	
19H	02H	0002H	B6H 35H	XXX

¿De qué tratan estos mensajes?

24. Considere el formato para mensajes globales en BSAP, Fig. 5.36. Si de las capas superiores bajan 128 octetos y se utiliza un módem UIT-T V.32, ¿En cuánto tiempo se transmite la trama?
25. Considere el formato de Capa Enlace DNP 3.0, Fig. 5.56. Si de la Seudocapa Transporte bajan 128 octetos y se utiliza un módem UIT-T V.32/V.42bis, ¿En cuánto tiempo se transmite la trama?
26. Defina lo que es una Red de Campo: características, arquitectura, ventajas.
27. Diga las ventajas de una Red de Campo Normalizada única.
28. Explique la diferencia entre interoperabilidad e intercambiabilidad.
29. Investigue lo que es la "seguridad intrínseca" y cuáles son las principales normas que la regulan.
30. Investigue las características de la Normas ISA 50.02 (1992), IEC 1158 (1993) y IEC 870-5-101/102/103 (desde Internet puede bajar la documentación respectiva).
31. Investigue y compare las características entre la Redes de Campo patrocinadas por Fieldbus Foundation en relación con las patrocinadas por Profibus.

CAPITULO VI

REDES DE TRANSMISION DE DATOS

6.1.INTRODUCCION

El desarrollo de las redes de transmisión de datos ha ido paralelo a la evolución de las técnicas de computación. Los primeros computadores de principios de los años sesenta operaban en "modo batch", mediante el cual grupos de programas eran almacenados en discos para ser posteriormente ejecutados sin interrupción por un gran computador. Para esa época, la capacidad de memoria de un "gran computador" era mucho menor que la de cualquiera de las calculadoras de bolsillo actuales. Por ejemplo, el autor de este libro trabajó con el computador IBM 1620, de 16 K de memoria, que en ese entonces (1961) era la última generación de computadoras utilizadas en las universidades de Estados Unidos.

Las primeras redes tenían una topología en estrella con dispositivos periféricos (impresoras, estaciones de trabajo, etc.) normalmente arrendados por los vendedores de los computadores. Para mediados de los años sesenta se comenzó a operar en modo de "tiempo compartido", en el cual se ejecutaban múltiples programas concurrentemente; pero muy pronto se sintió la necesidad de interconectar los computadores para efectuar tareas especializadas y para proveer servicios de computación a usuarios en localidades remotas. A medida que bajaban los costos de computación, así mismo aumentaba la demanda de servicios. En 1970 la "computación distribuida" permitió a los usuarios no solamente compartir los servicios de un gran computador (Main Frame), sino también disponer de una gran variedad de recursos como, por ejemplo, bases de datos, dispositivos para gráficos y servicios de mensajería.

La creciente necesidad de interconexión de centros de computación trajo como consecuencia el desarrollo de las técnicas de transmisión digital. La infraestructura telefónica, de conmutación de circuitos, fue la primera red que se utilizó, pero como ya lo hemos señalado, estaba restringida a bajas velocidades. La necesidad de disminuir los costos de operación, combinado con los avances tecnológicos en electrónica, en computación y en informática que pronto emergieron, hizo que la conmutación por paquetes fuera la forma más apropiada de transmisión en las grandes redes de transmisión de datos que se desarrollaron.

En este capítulo vamos a describir las características y principios de operación de las principales redes actuales de transmisión de datos. Siguiendo la pauta que nos hemos trazado de describir los sistemas desde el punto de vista de un modelo estratificado, en la descripción de las redes y su arquitectura se utilizará siempre el Modelo ISO/OSI como referencia. La descripción será necesariamente muy breve, pero se tratará dar al lector la información suficiente que posteriormente le permita explorar por sí mismo aquellos aspectos más avanzados tanto en instrumentación como en la operación y funcionamiento de las redes actualmente utilizadas.

6.1.1. Definición y Clasificación

En su acepción general, una red de comunicaciones es un conjunto de dispositivos o nodos interconectados mediante ”enlaces de comunicación”. Esta simple definición nos debe bastar por ahora pues las redes de datos actuales tienen características muy propias que no nos permiten establecer una definición más precisa. En efecto, se puede intentar una definición a partir de las topologías de red, o mediante la descripción de los modos de operación (sincrónica o asincrónica), o según las técnicas de conmutación (circuitos o paquetes), pero habría una multitud de redes que se ajustarían a una o más descripciones.

La costumbre actual es más bien clasificar las redes por tipos y definir las características de las redes que entran dentro de cada tipo. Esto ha llevado a clasificar las redes de acuerdo con su extensión geográfica; en este caso se tiene la siguiente clasificación: (a) Redes de Gran Area (Wide-Area Network, WAN), (b) Redes de Area Local (Local Area Network, LAN) y (c) Redes de Area Metropolitana (Metropolitan Area Network, MAN). Más adelante describiremos las características y arquitecturas de estos tipos de red y las redes comerciales que han sido estandarizadas.

6.1.2. Principios de la Multicanalización

Técnicas de Multicanalización

El proceso de operación multicanal permite, mediante las técnicas llamadas de “multiplicidad”, “multiplex” o “multicanal”, combinar en el extremo transmisor los mensajes de varias fuentes de información, transmitirlos como un solo bloque y luego separarlos en el extremo receptor. La banda de frecuencias o intervalo de tiempo asignado a cada mensaje comúnmente se denomina “canal”.

Hay dos formas básicas de multicanalización que son de interés:

1. La “Multiplicidad por División de Tiempo (Time-Division Multiplex, TDM)"
2. La “Multiplicidad por División de Frecuencia (Frequency-Division Multiplex, FDM)"

El sistema FDM en esencia consiste en colocar lado a lado, mediante modulación y sin solapamiento, los espectros de las señales mensaje individuales y formar así un espectro compuesto o señal de banda de base compuesta que se transmite; las señales se reparten el ancho de banda disponible del canal de transmisión y se transmiten simultáneamente. Este esquema se utiliza en la multicanalización de canales telefónicos.

El sistema TDM combina, en el tiempo y sin solapamiento, los mensajes individuales, codificados o no. El tiempo es compartido por las señales individuales, pero cada señal dispone para su transmisión de todo el ancho de banda del canal. Este esquema es el más utilizado en las redes de transmisión de datos.

Multicanalización de Canales Telefónicos

El proceso de asignación de las bandas de frecuencia en los sistemas telefónicos ha sido estandarizado por el UIT-T, cuyas recomendaciones establecen las bandas de frecuencia para la formación de conjuntos de 12 hasta 900 canales en multiplex.

En la Fig. 6.1 se muestra la configuración de los grupos FDM normalizados por el IUT-T en su Recomendación G.233 para transmisión por canales analógicos de banda ancha.

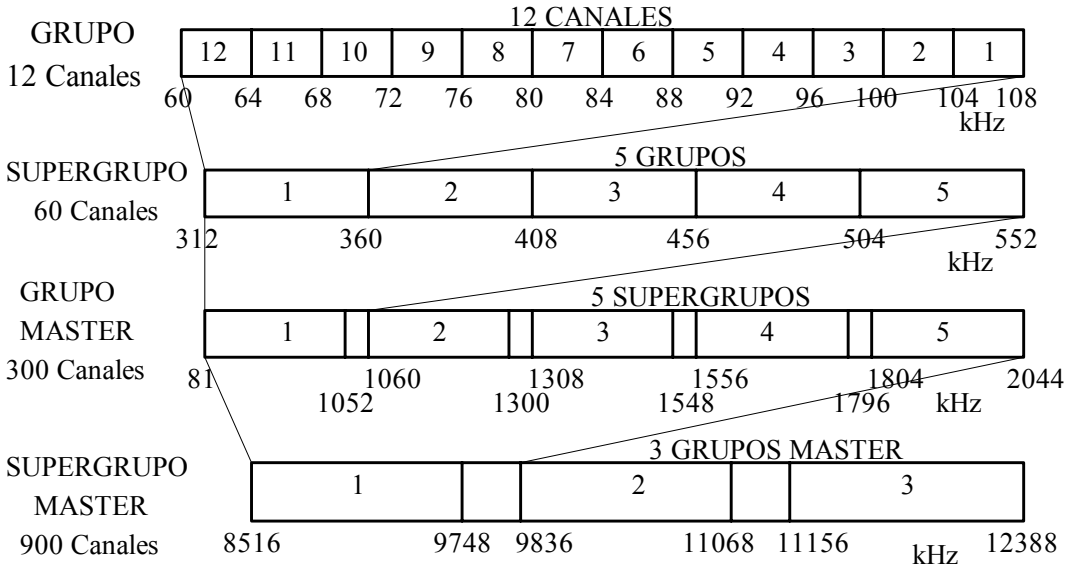


Fig. 6.1. Configuración FDM de Canales Telefónicos.

Jerarquías en los Sistemas de Transmisión de Datos

Una Jerarquía Digital, llamada también Jerarquía PCM, es una secuencia ordenada de velocidades de información (en bps) que constituye cada una un nivel jerárquico dado. Los equipos jerárquicos de multiplexamiento combinan un número definido de señales digitales del nivel (n-1) en una señal digital con velocidad del nivel n. Los bancos de canales PCM, los CODECs de banda ancha y los equipos de línea y multicanalización, deben operar únicamente a una velocidad igual o múltiplo de las velocidades jerárquicas. En la Fig. 6.2 se muestra las jerarquías actualmente en uso. Las características físicas y eléctricas de las dos primeras jerarquías han sido aprobadas por el UIT-T en la Recomendación G.703, y la estructura de la trama sincrónica de los dos primeros niveles en la Recomendación G.704. Estrictamente hablando, estas jerarquías son plesiocrónicas, y para diferenciarlas de las nuevas jerarquías digitales sincrónicas (Synchronous Digital Hierarchy, SDH), se las denomina Jerarquías Plesiocrónicas Digitales (Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH)

La jerarquía PDH se utiliza exclusivamente para la transmisión de datos, pero la tendencia actual es la de establecer una sola red por la cual se pueda transmitir voz, datos e imágenes, y en la cual se utiliza la jerarquía SDH. A este efecto, el UIT-T ha promovido la creación de la llamada “Red Digital de Servicios Integrados (Integrated Services Digital Network, ISDN)”. La Red ISDN permitirá la integración de servicios de datos, voz,

imágenes y video en una sola red, sobre una sola línea, bajo el mismo número y a nivel mundial. Más adelante describiremos esta red.

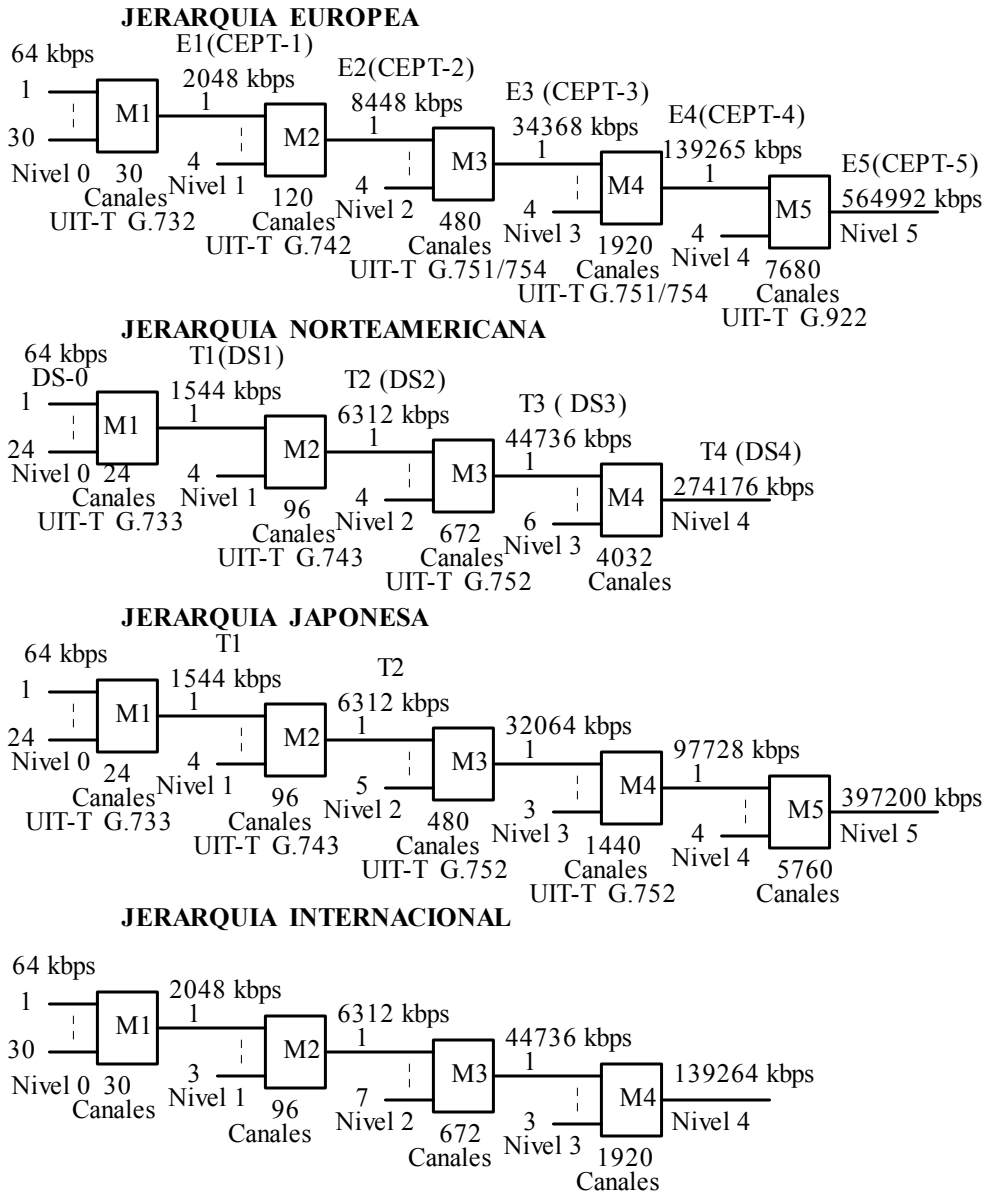


Fig. 6.2. Jerarquías Plesiocrónicas Digitales (PDH).

El Sistema Troncal T1

Un ejemplo muy interesante de la aplicación de los sistemas PCM/TDM es el sistema troncal de transmisión de voz y datos T1, desarrollado por la Compañía Bell de los Estados Unidos a principios de los años 60 para interconectar centrales telefónicas separadas hasta 80 km.

El Sistema Bell T1 fue inicialmente diseñado para que fuera compatible con los sistemas de comunicación analógicos existentes. Estos equipos habían sido diseñados principalmente para los enlaces telefónicos intercentrales, pero pronto emergieron las técnicas digitales PCM que ofrecían una mejor inmunidad al ruido y a medida que avanzaba la tecnología de los circuitos integrados, los costos de los equipos se hicieron cada vez más bajos que los analógicos. Además, la transmisión de la información de señalización requerida para el control de las operaciones de conmutación telefónica era más fácil y económica en forma digital que en analógica.

En el Sistema T1 se multiplexan 24 señales de Voz/Datos (DS0) que forman la llamada Trama T1 (DS1); es el primer nivel de la jerarquía norteamericana. Nótese que la denominación Tn se refiere a las troncales, mientras que la denominación DSn se refiere las señales propiamente. Estas señales analógicas de entrada se muestrean a 8000 muestras por segundo y las muestras resultantes se codifican en 8 dígitos binarios con el código de línea AMI RZ formando una trama de 192 dígitos a los cuales se les agrega un dígito adicional para sincronización de trama. La trama contiene entonces 193 dígitos y la velocidad de señalización es de 1544 kbps. La duración de la trama es de 125 μseg y la de cada dígito de 0,6477 μseg. La sincronización por canal se incorpora en la Trama T1 reemplazando el octavo dígito binario (el menos significativo en cada uno de los 24 canales) por un dígito de señalización cada seis tramas. La velocidad de señalización para cada uno de los 24 canales será entonces de 1333 bps. La señal de banda de base en T1 es entonces una secuencia AMI RZ de valores ± 3V sobre una resistencia de 100 Ohm. En el Sistema T1 se agrupan las tramas para formar multitramas de 12 tramas T1 cada una; la duración de la multitrama es de 1,5 mseg. El dígito de sincronización de trama en la multitrama tiene la forma 1 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 0 y se repite en la multitrama siguiente. En la Fig. 6.3 se muestra la configuración de la Trama T1 o señal DS1.

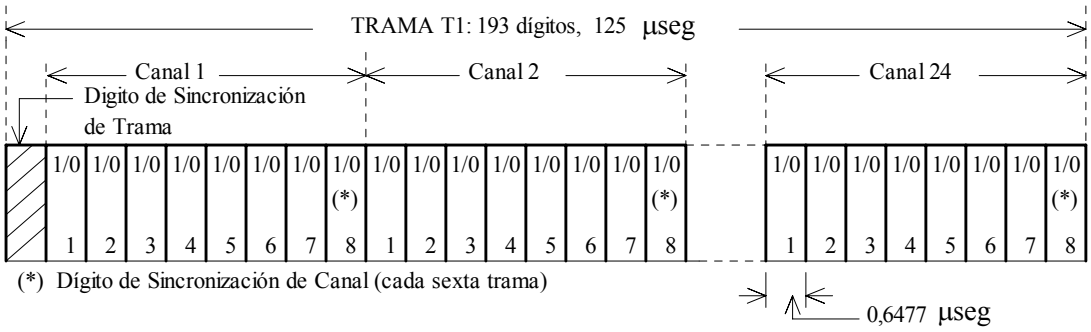


Fig. 6.3. Formato de la TRAMA T1.

El Sistema Troncal E1

El sistema E1, denominado también CEPT-1 PCM-30 (es el Nivel 1 de la Jerarquía Europea, Fig. 6.2), está formado por 32 canales, con 8 dígitos por canal para un total de 256 dígitos por trama. Como la frecuencia de muestreo es de 8000 muestras por segundo, la velocidad de la trama E1 es de 2048 kbps. La duración de cada trama es de 125 microsegundos, el período de cada ranura es de 3906 nanosegundos, siendo 488

nanosegundos la duración de cada dígito. La trama contiene 32 ranuras de tiempo RT de las cuales dos son para señalización y alineación, y treinta para los canales de Voz/Datos; la multitrama, formada por 16 tramas, tiene una duración de 2 ms. En la Fig. 6.4 se muestra la estructura de la multitrama CEPT-1.

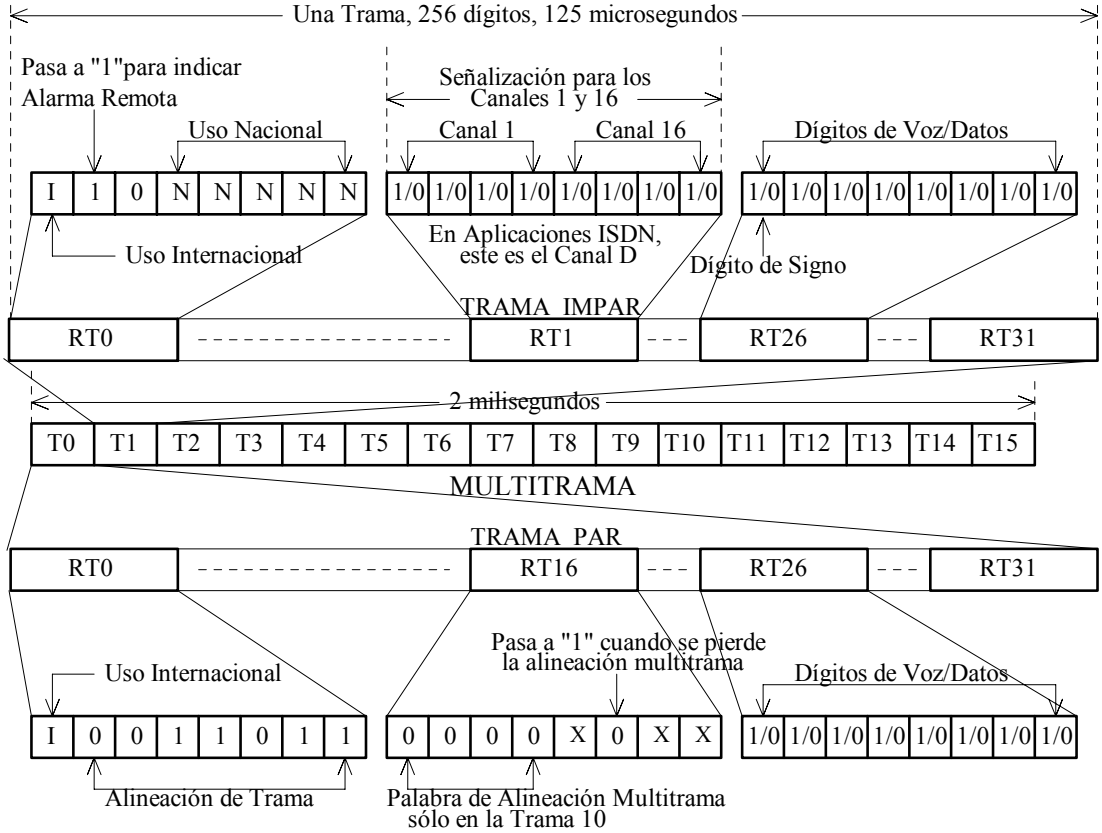


Fig. 6.4. Formato de la TRAMA E1.

En el formato CEPT-1, las informaciones de alineación y de señalización van en las dos primeras tramas, en las ranuras TR0 y TR1. La palabra de alineación de trama tiene la forma 0011011 y va en la ranura de tiempo RT0 de las tramas pares. Esta señal se utiliza para permitir que cada trama sea reconocida en el receptor. Un dígito de la misma ranura contiene el Dígito Internacional I. Las tramas impares llevan información de Señalización Nacional e Internacional, además de una indicación de alarma. La señalización para los canales 1 y 16 va en la ranura RT16 de la trama T1. Las tramas siguientes T2, T3,……, T15, llevan en la correspondiente ranura la información de señalización de los canales 2 y 17, 3 y 18, 4 y 19,…….,15 y 30, respectivamente.

Las Recomendaciones UIT-T G.711, G.712 y G.732 establecen todos los requerimientos para un comportamiento satisfactorio del sistema. El equipo E1 debe efectuar el multiplexaje TDM de los 30 canales de voz o datos agregando los sistemas de supervisión y alineamiento para transmitir la señal compuesta por una línea de transmisión

de 4 conductores y a una velocidad de 2048 kbps. Cuando los dígitos I y N no se utilizan, se suele ponerlos a UNO; sin embargo, algunas veces se pueden utilizar para transmitir información adicional; en este caso las velocidades de transmisión son de 1,5 kbps y 28 kbps con los dígitos I y N, respectivamente.

Leyes de Compansión

En las señales de voz la distribución de probabilidad de las amplitudes es tal que las amplitudes de baja frecuencia tienen una gran probabilidad de ocurrencia y como el ruido de cuantificación es del mismo orden, entonces la relación Señal/Ruido (S/N) será muy pequeña; esto significa también que el rango dinámico de las señales de voz puede exceder de 40 dB. Pero el efecto del ruido de cuantificación se puede reducir disminuyendo el valor de los pasos de cuantificación para niveles bajos de la señal, y aumentándolo para niveles altos. Esto se logra utilizando métodos de "compansión no lineal" en el proceso de cuantificación de las señales de voz, con lo cual se mejora la calidad de la transmisión. La "compansión" es un proceso de compresión en el transmisor y de expansión en el receptor.

El UIT-T, en sus Recomendaciones G.711, G.712 y G.713, establece las siguientes leyes o reglas de compansión: la "Ley A" utilizada en el formato E1, y la "Ley μ" utilizada en el formato T1, que se definen en la Tabla siguiente:

LEYES DE COMPANSION

Ley de Compansión A	Ley de Compansión μ
• $y = \dfrac{1+\log_{10}(Ax)}{1+\log_{10}(A)}$ para $0 < x \le \dfrac{1}{A}$ • $y = \dfrac{Ax}{1+\log_{10}(A)}$ para $\dfrac{1}{A} \le x \le 1$ A = 87,6	• $y = \dfrac{\log_{10}(1+\mu x)}{\log_{10}(1+\mu)}$ para $0 < x$ • $y = \dfrac{-\log_{10}(1-\mu x)}{\log_{10}(1+\mu)}$ para $x < 0$ μ = 100 Sistemas DS-1 μ = 255 Sistemas DS-2

x = entrada al Compansor; y = salida cuantificada y comprimida.

Los primeros sistemas PCM utilizaban compansión analógica, mientras que en los sistemas actuales la compansión es digital. En enlaces internacionales, cuando se pasa, por ejemplo, de un sistema T1 a un sistema E1 se utilizan convertidores de Ley μ a Ley A.

6.2.REDES DE GRAN AREA (WAN)

6.2.1. Introducción

Una Red de Gran Area o WAN es una estructura de red que interconecta Nodos de Acceso o Puntos de Presencia geográficamente dispersos, tanto a nivel regional, nacional o internacional. Los nodos están interconectados en forma de una topología "múltiplemente conectada", mediante la cual se dispone de suficientes rutas alternas para asegurar una alta conectabilidad y confiabilidad a un costo razonable. Fundamentalmente estas son redes con control distribuido.

Las unidades básicas de la WAN son los nodos de red, que son subsistemas de red que efectúan tareas de enrutamiento, multiplexamiento y conmutación a nivel local y a

nivel de red. El nodo de red es un subsistema con mucha inteligencia agregada que combina las funciones de un banco de canales, de un conmutador digital de interconexión y de un multiplexor integral para voz, datos y video.

El nodo de red tiene muchas denominaciones debido a las múltiples funciones que realiza: Punto de Presencia, Multiplexor-Compresor, Matriz de Conmutación, Conmutador, Procesador Nodal, etc., según la aplicación; pero todos tienen, en mayor o menor grado, las siguientes características y facilidades.

Características

1. Autonomía. Los nodos deben ser autónomos a fin de garantizar el servicio local ante fallas del sistema de transmisión.
2. Confiabilidad. Todos los servicios y equipos deben ser redundantes. La recuperación de fallas debe ser transparente para el usuario.
3. Transparencia de Servicios y Facilidades a nivel de Red. Cualquier usuario, debidamente autorizado, puede utilizar todos los servicios, facilidades y módulos especiales.
4. Capacidad de Crecimiento sin grandes modificaciones de estructura.
5. Posibilidad de migración hacia la Red Digital de Servicios Integrados (ISDN). Esto implica capacidad para intercambio global a Nivel Básico [2B+D] y Primario [30B+D] y [23B+D]. Estos conceptos los describiremos más adelante.

Facilidades

1. Enrutamiento y Conmutación Automáticos.
2. Asignación y Reservación de Ancho de Banda según demanda.
3. Facilidades de Corrección de Error y Compresión de Datos.
4. Soporte para servicios de voz, datos, facsímil y video interactivos.
5. Alta capacidad de transmisión, tanto nacional como internacional.
6. Capacidad para control y transmisión a bajas y altas velocidades.
7. Facilidades de conversión entre formatos E1 y T1.
8. Facilidades de Conversión entre (a) diferentes velocidades de transmisión y (b) entre las leyes de compansión A y μ en los circuitos de voz internacionales.

Medios y Velocidades de Transmisión

En general, las WAN están formadas por los nodos de acceso interconectados por sistemas de portadora (communication carriers) que prestan servicios de transmisión. En este aspecto, a las WAN se las denomina también Redes de Valor Agregado (Value Added Networks, VAN).

Los medios y velocidades de transmisión más comunes son:

- Líneas Telefónicas Dedicadas Arrendadas: 1,2; 2,4; 4,8; 9,6; 19.2; 56 y 64 kbps

- Líneas DDS Dedicadas Arrendadas: 2,4; 4,8; 9,6; 19,2 y 56 kbps. Se utilizan principalmente en Estados Unidos y Canadá
- Troncal T1 Fraccionada: 64, 128, 256, 384, 512 y 768 kbps
- Troncales T1 a T3 y E1 a E4: hasta 44736 y 139264 kbps, respectivamente

En sitios en los cuales la transmisión es esporádica o cuando se necesita líneas de respaldo, se puede utilizar líneas telefónicas conmutadas y líneas DDS conmutadas. El medio físico puede ser conductores metálicos, fibras ópticas y medios inalámbricos (microondas). Nótese que un enlace (carrier) puede atender diferentes nodos de acceso.

En la Fig. 6.5 se muestra la configuración típica de un enlace entre dos nodos de una Red de Gran Area. Las dos estaciones A y B se están comunicando a través de la red.

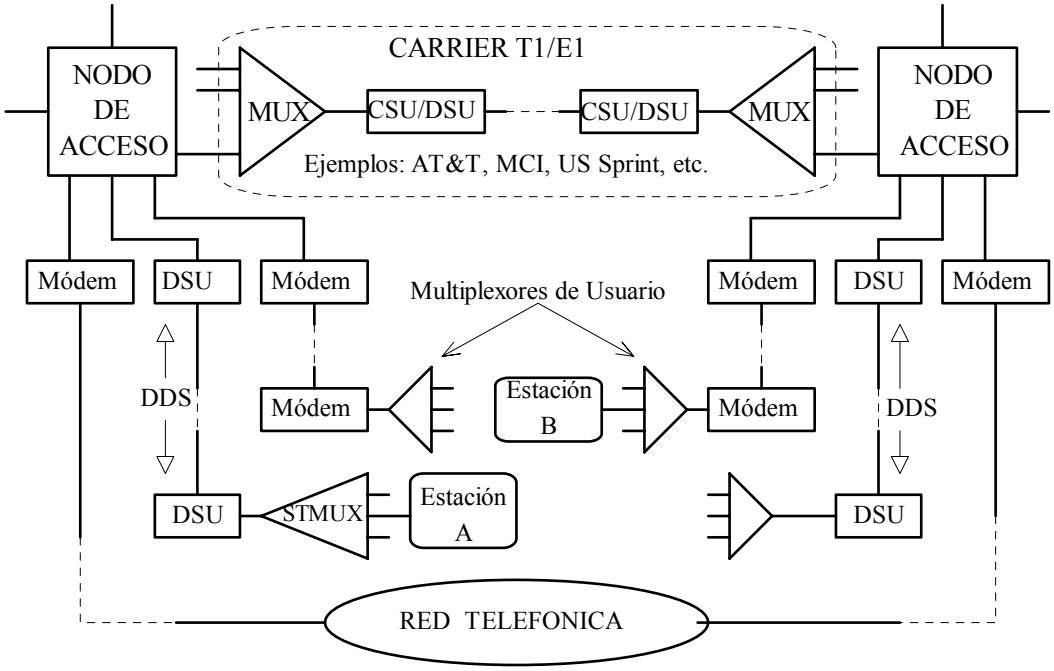


Fig. 6.5. Configuración Típica de un Enlace en una WAN.

En la Fig. 6.5 se puede observar, además de los módems y de los nodos de acceso, la presencia de otros elementos como son las líneas DDS, los multiplexores MUX y STMUX, los DSU y los CSU. Estos elementos están presentes en todas las redes de transmisión de datos y sería de interés conocer sus características y aplicaciones.

Las líneas DDS (Dataphone Digital Service) es un servicio de transmisión digital sincrónica, dedicado, arrendado, fulldúplex, punto a punto, con velocidades de 2,4; 4,8; 9,6; 19,2 y 56 kbps. Este servicio de transmisión fue establecido por la AT&T en 1974 para atender la creciente demanda de servicios de transmisión de datos. Posteriormente se establecieron dos nuevos servicios DDS conmutados: uno a 56 kbps y otro a 384 kbps, que se pueden utilizar como líneas de respaldo en las WAN.

Los multiplexores son dispositivos que permiten, mediante TDM o FDM, la transmisión de varias señales individuales como una señal compuesta o agregada. En los multiplexores digitales corrientes (MUX) la velocidad de salida es el agregado de las velocidades de entrada. Los primeros multiplexores poseían muy poca inteligencia, pero a medida que aumentaban las exigencias para una mejor utilización del ancho de banda, los multiplexores prácticamente se convirtieron en minicomputadores mediante la adición de una programación especializada y la ejecución de tareas que un multiplexor digital corriente no podía efectuar.

El multiplexor digital corriente MUX es poco costoso y muy confiable, pero es muy deficiente en cuanto al uso del ancho de banda del medio de transmisión. Esta deficiencia es debida al hecho de que una ranura de tiempo se reserva para cada dispositivo conectado, no importa si está transmitiendo o no. Cuando un dispositivo está inactivo, el MUX rellena la ranura con CEROS y no la puede utilizar para ningún otro propósito. Como consecuencia, la transferencia neta de información en promedio es menor que la máxima permitida por el MUX.

Para mejorar el rendimiento de transmisión, se desarrolló el Multiplexor Estadístico (STMUX), en el cual la asignación de ranuras de tiempo a los dispositivos de entrada se efectúa en forma dinámica, es decir, que solamente se asigna ranuras a aquellos dispositivos que tienen información para transmitir. Para la asignación de ranuras el multiplexor debe poseer una gran inteligencia para seleccionar las entradas activas y repartir las ranuras según la demanda exigida. Es posible entonces aumentar significativamente el número de dispositivos de entrada a tal punto que la velocidad total o agregada de todas las entradas sea mayor que la velocidad compuesta de salida o de línea del multiplexor. En este caso el multiplexor confía que la velocidad agregada promedio de los dispositivos de entrada activos en un momento dado es menor que la capacidad de salida. Sin embargo, como las entradas son completamente independientes y para asegurar que en un momento dado no se exceda la capacidad de salida, el multiplexor debe poseer "buffers" para almacenar transitoriamente la información hasta que se normalice la situación.

La transmisión a través de las líneas DDS se verifica mediante las Unidades de Servicio de Datos (data service units, DSU). Las DSU se pueden considerar como "módems digitales" por cuanto ellas convierten la señal unipolar recibida de los ETD (computadores, multiplexores, terminales, etc) en señales bipolares apropiadas para transmisión sobre las líneas DDS, por ejemplo, en código AMI. La interfaz ETD/DSU es simplemente la interfaz V.24/V.28/RS-232 con velocidades desde 2,4 hasta 19,2 kbps; para la velocidad de 56 kbps se utiliza la interfaz V.35 (Código Winchester). Nótese que los DSU deben estar configurados como un ETCD, es decir, su conector de entrada debe ser hembra.

Para el acceso a los servicios de portadora se utilizan las unidades de servicio de canal (channel service units, CSU) las cuales tienen funciones de regeneración de señal, monitoreo de señales, servicio de detección de error y servicios de prueba y diagnóstico. En los primeros sistemas la DSU se colocaba antes de la CSU, esta última era proporcionada por la empresa de portadora. En los sistemas actuales, sin embargo, la DSU y la CSU se

integran en una sola unidad, la DSU/CSU, la cual efectúa todas las funciones de las DSU y las CSU.

Para más información sobre estos dispositivos, el lector puede consultar [Held, 1992; Barksdale, 1986] quienes tratan estos temas en una forma muy completa.

6.2.2. La Red Digital de Servicios Integrados

Introducción

La meta actual de los organismos de telecomunicación internacionales es la creación de una red global de comunicaciones que permita a un usuario, en cualquier momento y en cualquiera parte, comunicarse con cualquier otro usuario o servicio a nivel mundial. En particular, el UIT-T ha estado involucrado en este proyecto desde 1972 y en la Octava Asamblea Plenaria efectuada en Málaga (España) en 1984, se adoptaron las primeras Recomendaciones I que establecieron las guías y procedimientos para la creación de la Red Digital de Servicios Integrados (Integrated Services Digital Network, ISDN).

La ISDN permitirá la integración de servicios de voz, texto, video y datos en una sola red, sobre una sola línea, bajo el mismo número y a nivel mundial. Las Recomendaciones I del IUT-T han establecido los basamentos para alcanzar una completa compatibilidad de equipos y servicios en la ISDN, tanto en modo de transmisión por conmutación de paquetes como en modo de transmisión por conmutación de circuitos.

La compatibilidad entre equipos y servicios es esencial para las comunicaciones internacionales y aunque se disponga de la tecnología y conocimientos necesarios, es a menudo difícil de instrumentar. Las partes involucradas (usuarios, fabricantes y las administraciones de telecomunicaciones) tienen diferentes intereses propios, ellas definen la compatibilidad en diferentes términos y tienen diferentes puntos de vista del grado de compatibilidad deseable o necesario. Por otro lado, hay influencias de tipo político y económico muy específicas que afectan aún más el proceso de compatibilización.

La ISDN permitirá entonces la integración de servicios de comunicación diferentes (voz, texto, video y datos) en una sola red de comunicación cuyo acceso será una simple "acometida de comunicaciones (comunications outlet)" a nivel de cada usuario. El desarrollo de la ISDN se efectuará en varias fases hasta lograr la red global de comunicaciones. La primera fase, la más importante, es la digitalización de la red analógica telefónica, proceso que actualmente está bastante avanzado. En la segunda fase, la red digital telefónica se desarrollará en una red de banda angosta (N-ISDN) para la integración de todos los servicios de comunicación que operan hasta 64 kbps (telefonía, texto y datos). En la tercera fase, se desarrollará la red de banda ancha (B-ISDN) para servicios de comunicación que operan sobre 64 kbps (videotelefonía, videoconferencia, radiodifusión y televisión).

Descripción de las Recomendaciones I

Las Recomendaciones I de la UIT-T proporcionan los principios y guías sobre la ISDN así como especificaciones detalladas de las interfaces usuario-red. Ellas contienen también las referencias a otras Recomendaciones del UIT-T sobre tópicos específicos ya

normalizados, por ejemplo, los protocolos de señalización de la Serie Q y los protocolos de comunicación de la Serie X.

Las Recomendaciones I están estructuradas en la forma siguiente:

- Serie I.100. Conceptos y Principios de la ISDN
- Serie I.200. Capacidades de Servicio
- Serie I.300. Aspectos y Funciones de la Red
- Serie I.400. Interfaces Usuario-Red
- Serie I.500. Interfaces Inter-Red
- Serie I.600. Principios de Mantenimiento

Las Series I.100 a I.400 aparecieron en el Libro Azul del UIT-T en la edición de 1989, mientras que las Series I.500 e I.600 aparecieron en el Libro Blanco del UIT-T, edición de 1993. Sin embargo, en el UIT-T se sigue discutiendo diferentes aspectos relacionados con la ISDN.

A continuación vamos a describir brevemente las cuatro primeras series.

Serie I.100. Conceptos y Principios de la ISDN

La Serie I.100 sirve como introducción general al concepto de la ISDN. Esta serie contiene también información común a otras Series I como, por ejemplo, la definición de los términos específicos de las normas de la ISDN.

La Recomendación I.130 establece el método para describir los servicios disponibles a través de una red de servicios integrados. Cada servicio de la ISDN está caracterizado mediante valores específicos asignados a cada "atributo descriptivo"; por ejemplo, un atributo descriptivo puede ser el siguiente: "circuito de 64 kbps apropiado para la transmisión de voz sobre un ancho de banda nominal de 3,1 kHz". En la Recomendación I.130 se define el significado de cada atributo.

Serie I.200. Servicios

Las Recomendaciones de la Serie I.200 proporcionan la clasificación y método de descripción de los servicios de telecomunicación provistos por la ISDN. Ellas forman también la base para definir los tipos de servicios ofrecidos por la red.

Los servicios provistos por la ISDN se han dividido en tres grandes familias:

- Servicios de Soporte o de Infraestructura
- Teleservicios
- Servicios Suplementarios

Los "servicios de soporte" proveen los medios para transmitir información entre usuarios en tiempo real y sin alteración de la señal mensaje. Sin embargo, algunas veces hay que alterar o transformar los mensajes como, por ejemplo, cuando es necesario pasar de un sistema con una codificación dada a otro tipo de codificación. En contraste, el

servicio de soporte "transferencia no restringida de información" no efectúa ningún cambio tanto en agrupamiento como en las secuencias digitales transportadas por la red. Los usuarios que utilizan este servicio deben proveer, en caso necesario, sus propios medios de codificación y descodificación. Los servicios de soporte ejecutan funciones de las tres primeras capas del Modelo de Referencia ISO/OSI.

Un ejemplo típico de servicio de soporte son los servicios de transmisión de datos especificados en la Serie X del UIT-T.

Los "teleservicios" utilizan los servicios de soporte para la transmisión de información, pero además emplean niveles funcionales superiores a los niveles 1, 2 y 3 de la Recomendación X.25. La caracterización de los teleservicios está todavía en proceso de definición, aunque la telefonía y el telex son ejemplos de teleservicios.

Tanto los servicios de soporte como los teleservicios se pueden usar en conjunto con los "servicios suplementarios". Un servicio suplementario es un servicio adicional que no puede ofrecerse sin el concurso, sea de los servicios de soporte sea de los teleservicios. Un ejemplo de servicio suplementario es el "cobro a destino (collect call)": el cobro a destino implica una llamada previa, por lo tanto la utilización de un servicio de soporte o de un teleservicio.

Serie I.300. Aspectos y Funciones de la Red

Las principales recomendaciones son la Recomendación I.320: Modelo de Referencia del Protocolo ISDN, y la Recomendación I.330: Numeración, Direccionamiento y Enrutamiento.

El propósito de la Recomendación I.320 es la de asignar funciones en una forma modular que facilite la definición de normas y protocolos de telecomunicación. El modelo de referencia definido en la Recomendación I.320 no es un reemplazo del Modelo ISO/OSI descrito en la Recomendación X.200, sino que lo extiende aún más de lo que fue definido en dicha recomendación.

Nótese que el propósito del Modelo ISO/OSI no está asociado con ningún tipo particular de red. En este sentido es menos específico que el Modelo ISDN, porque en este modelo se especifica el flujo de información a través de los servicios de telecomunicación definidos en la Serie I.200 (servicios de soporte, teleservicios y servicios suplementarios). En la descripción del Modelo ISDN se incorpora algunas características específicas de la ISDN que no se encuentran en otros tipos de red. Entre estas características se tiene los tipos de multiservicio entre los cuales se incluye voz, video, datos y comunicaciones multimedia.

Entre las extensiones del Modelo ISO/OSI incluidas en el Modelo ISDN, se tiene:

- Separación de las operaciones de señalización y supervisión del flujo de información dentro de un equipo
- Definición de los modos de comunicación que puedan operar independientemente uno del otro
- Aplicación de lo anterior a los componentes internos de la red

La separación de las operaciones de señalización, aplicación y supervisión dentro de un equipo permite que cada conjunto de operaciones sea modelado independientemente, aunque el flujo de información en el equipo del usuario continúe siendo modelado según el Modelo ISO/OSI.

La Recomendación I.330 provee los conceptos generales, principios y requerimientos para direccionar puntos de referencia localizados en los predios del usuario, para direccionar otras funciones y para permitir la comunicación entre terminales.

El Plan de Numeración Internacional sugerido por el UIT-T en las recomendaciones de la Serie E.164 se describen de nuevo en la Recomendación I.331. Para la ISDN los números tendrán un máximo provisional de 15 dígitos decimales y cada país retiene los números de código actuales.

En la ISDN la "dirección" no solamente contiene el "número de usuario" sino también información adicional de direccionamiento. Esta dirección adicional se puede utilizar en los sistemas privados (LAN, PABX, etc.) o también para distinguir varios servicios OSI dentro de un gran sistema de procesamiento de información.

La Recomendaciones I.300 muestran cómo los servicios de soporte, teleservicios y servicios suplementarios se pueden distribuir en conexiones elementales y en otras funciones adicionales.

Serie I.400. Interfaces Usuario-Red

En esta serie se detalla la interfaz entre el equipo del usuario y la ISDN, cuyos objetivos, características y capacidades se describen en la Recomendación I.410. En la Fig. 6.6 se muestra algunos ejemplos de interfaces usuario-red.

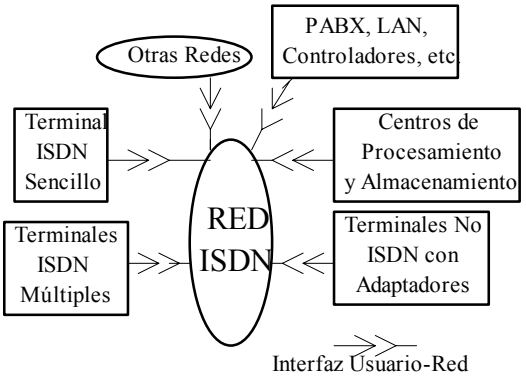


Fig. 6.6. Aplicaciones de las Interfaces Usuario-Red.

Los grupos genéricos de funciones que influencian las especificaciones de la interfaz se han establecido en la Recomendación I.411 y se muestran en la Fig. 6.7. Estos diferentes grupos de funciones proporcionan una gran flexibilidad entre los usuarios y la red, y toman en cuenta las diferentes situaciones que pueden presentarse en la práctica.

Un objetivo de la ISDN es que un pequeño conjunto de interfaces usuario-red compatibles pueda soportar económicamente una gran gama de aplicaciones de usuario, equipos y configuraciones. No obstante, se requiere diferentes interfaces para aplicaciones con velocidades de transmisión y complejidad muy diferentes, así como para aplicaciones en etapa evolutiva. En la Recomendación I.411 se describe un conjunto bastante completo de realizaciones físicas de configuraciones de referencia.

Las configuraciones de referencia son configuraciones conceptuales de utilidad en la identificación de las posibles formas de acceso a la ISDN. Las configuraciones de referencia básicas de la Recomendación I.411 se muestran en la Fig. 6.7.

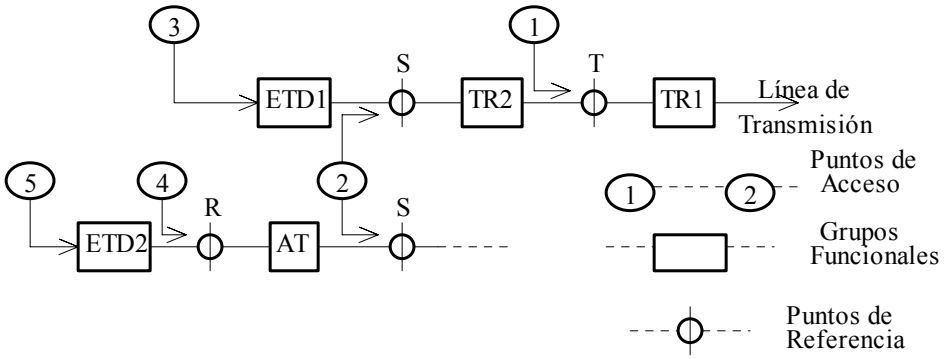


Fig. 6.7. Configuraciones de Referencia, Recomendación I.411

Los grupos funcionales son conjuntos de funciones que el usuario puede necesitar para acceder a la ISDN. En un arreglo particular las funciones específicas de un grupo funcional pueden o nó estar presentes; asimismo, es posible que funciones específicas de un grupo funcional puedan ser ejecutadas por uno o más equipos.

Los puntos de referencia son puntos conceptuales que separan los grupos funcionales. En un acceso particular, un punto de referencia puede corresponder a una interfaz física entre dos equipos; también puede ser que no haya ninguna interfaz física en ese punto de referencia.

En la Fig. 6.7 están representados los siguientes grupos funcionales:

<u>TR1 = Terminación de Red 1</u>. Corresponde a la terminación de la línea de transmisión; incluye solamente funciones de Capa Física, tales como mantenimiento, terminación de interfaz, temporización, transferencia de potencia, etc. Este grupo funcional constituye la frontera mínima entre el usuario y la ISDN.

<u>TR2 = Terminación de Red 2.</u> Corresponde a dispositivos tales como las PABX, LAN y controladores terminales. Incluye funciones de las tres primeras capas del Modelo ISO/OSI tales como, por ejemplo, terminación de línea, conmutación, concentración, manejo de protocolos, funciones de mantenimiento, etc.

<u>ETD1 = Equipo Terminal de Datos Tipo 1</u>. Corresponde a un terminal ISDN diseñado de acuerdo con las especificaciones ISDN Usuario-Red (Rec. 4100) e incluye funciones de la Capa Física y superiores del Modelo ISO/OSI. Algunas de sus funciones son el manejo de protocolos, funciones de mantenimiento y de interfaz, conexión con otros equipos, etc. Equipos típicos que proveen esta función son los teléfonos digitales, los ETD apropiados y las estaciones de trabajo integradas.

ETD2 = Equipo Terminal de Datos Tipo 2. Corresponde a un terminal que no sigue las especificaciones I.400; por ejemplo, un ETD2 puede ser un terminal X.25.

AT = Adaptador Terminal. Es un dispositivo necesario para interconectar terminales ETD2 a la interfaz ISDN. Este grupo funcional incluye funciones de Capa Física y superiores del Modelo ISO/OSI. Adaptadores entre las interfaces físicas en los puntos de referencia R y S o R y T son ejemplos de equipos o combinaciones de equipos que proveen funciones AT.

Los puntos de referencia R, S y T, Fig. 6.7, definen entonces las divisiones o fronteras entre los grupos funcionales: son los puntos donde están ubicadas físicamente las interfaces. El punto R es el punto donde está la interfaz ETD2/AT, es decir, el enlace físico entre un terminal no ISDN y su correspondiente adaptador. El punto S corresponde a la interfaz de terminales ISDN individuales, mientras que el punto T corresponde a la frontera mínima entre la terminación ISDN y el usuario. El punto T (incluyendo el grupo funcional TR1) constituye la "acometida de comunicaciones" ya mencionada. Los puntos S y T tienen las mismas especificaciones y características de diseño.

El acceso a los diferentes servicios de la ISDN se efectúa a través de los "puntos de acceso" señalados con círculos en la Fig. 6.7. Los servicios de soporte son accesibles a través de los puntos 1 y/o 2; en el caso en que las funciones correspondientes a TR2 no estén presentes o no sean necesarias, los puntos de referencia S y T (1 y 2) coincidirán, es decir, el terminal de usuario se conecta directamente a la red. Esta situación ilustra una característica clave de la compatibilidad ISDN usuario-red; en efecto, un terminal ETD1 puede conectarse directamente a una terminación de red TR1 o a un controlador, PABX, LAN o cualquier dispositivo TR2 usando las mismas especificaciones de interfaz, lo que asegura una completa portatilidad y compatibilidad. En forma similar, una PABX o una LAN pueden acceder a la red usando la misma interfaz.

Terminales que no siguen las normas ISDN como, por ejemplo, aquellos terminales basados en las Recomendaciones X.25 o X.21 utilizados para acceder a los servicios de soporte, utilizan el punto de acceso 4 con su correspondiente unidad adaptadora. En el caso de teleservicios, el equipo terminal está incluido en la definición del servicio. A estos servicios, que utilizan terminales basados en normas no ISDN, se puede acceder por el punto 5. Sin embargo, a los teleservicios que incorporan terminales conformes con las normas ISDN se puede acceder por el punto 3.

El equipo que se conecta en cualquiera de los puntos de acceso mostrados en la Fig. 6.7, debe cumplir con las especificaciones y protocolos asociados definidos por el UIT-T para el servicio solicitado en esos puntos. Esto asegura una completa portatilidad, compatibilidad e intercambiabilidad.

En la Recomendación I.412 se definen las estructuras de las interfaces y sus capacidades de transmisión. En cuanto a la estructura, se define tres tipos de interfaz usuario-red:

- La "Interfaz Básica (Basic Rate Interface, BRI)", con una capacidad básica de transmisión de 144 kbps simultáneamente en ambas direcciones.

- Dos "Interfaces Primarias (Primary Rate Interface, PRI)": una con una capacidad básica de transmisión de 1536 kbps y otra con una capacidad básica de 1984 kbps, simultáneamente en ambas direcciones.

Cuando se incluye los dígitos de supervisión y sincronización, las correspondientes velocidades de transmisión suben a 144, 1544 y 2048 kbps, respectivamente. En la Tabla de la Fig. 6.8 se muestra las diferentes estructuras de las interfaces BRI y PRI.

La capacidad de información de las interfaces están caracterizadas en términos de "canales". Estos canales son la base para la definición de las características de los servicios de la ISDN.

En la Recomendación I.412 se define los siguientes canales:

- El Canal B. Los canales B, con una capacidad de 64 kbps, se pueden utilizar para transportar una variedad de secuencias, en forma alterna o simultánea. Pueden utilizarse para voz, datos, facsímil o imágenes a 64 kbps en cualquiera de los diferentes modos de comunicación: conmutación de circuitos o conmutación de paquetes. Un canal B puede utilizarse también para transmitir flujos de información de usuario no tratados en Recomendaciones del UIT-T.

- El Canal D. Los canales D han sido concebidos originalmente para el transporte de la información de señalización para el control de los dispositivos ISDN. Su capacidad es de 16 kbps en la Interfaz Básica o de 64 kbps en la Interfaz Primaria. Los canales D tienen un protocolo estratificado de acuerdo con las Recomendaciones I.440, I.441, I.450 e I.451. Además de la señalización, ellos pueden transportar otra información compatible con esos protocolos como, por ejemplo, datos conmutados por paquetes, información de teleacción, señalización usuario-red, etc. En situaciones en que la confiabilidad de la señalización es crucial, las interfaces se configuran con dos canales D, uno activo y uno de reserva. Aunque no está especificado por el UIT-T, a los canales D de 64 kbps se les identifica algunas veces con la letra E.

- Los Canales H. Estos son canales de banda ancha diseñados para servir grandes grupos de terminales, PABX, LAN, etc. Dependiendo de la capacidad, se subdividen en:

  1. Un Canal H0 con una capacidad de 384 kbps
  2. Dos Canales H1: el Canal H11 con una capacidad de 1536 kbps, y el Canal H12 con una capacidad de 1920 kbps.
  3. Dos Canales H2: el Canal H21 con una capacidad de 32,768 Mbps y el Canal H22 con una capacidad de 43 a 45 Mbps.
  4. Un Canal H4 con una capacidad de 132 a 138,24 Mbps.

Los canales H se utilizan en aplicaciones de alta velocidad, tales como facsímil, video para teleconferencia, audio de alta calidad y datos multiplexados de alta velocidad.

Las características de Capa Física de estas interfaces están definidas en las Recomendaciones I.430 e I.431. Estas características incluyen las características eléctricas, la configuración de alambrado permisible, los tipos de conector, la forma de alimentación de potencia y la estructura TDM. La Interfaz Básica puede soportar hasta ocho equipos de usuario sobre el mismo alambrado de cuatro conductores, uno para cada dirección de transmisión. En este arreglo en barra radiante cada canal B se asigna a un usuario o terminal específico, de acuerdo con la señalización proporcionada por el canal D, el cual es compartido por todos los terminales. La Recomendación I.430 muestra los procedimientos de arbitraje cuando varios terminales solicitan simultáneamente acceso a la red, y la Recomendación I.440 el uso del Protocolo de Acceso LAPD (Link Access Procedures on the D Channel). La Recomendación Q.920 es equivalente a la Recomendación I. 440.

Específicamente, la Recomendación I.431 define la Capa Física de la Interfaz Primaria y está basada en las características eléctricas y de formato de las Recomendaciones G.703/G.704 de las troncales E1 y T1, a las cuales se les ha agregado especificaciones acerca de cómo serán usados los canales digitales para señalización y transferencia de información de usuario. Desde el punto de vista de la señalización, la Recomendación I.431 simplemente especifica que la información de señalización y control ocupará un canal de 64 kbps, el canal D, sea en la Ranura de Tiempo 16 de E1 o en la Ranura de Tiempo 24 de T1.

En la Tabla siguiente se muestra la forma como están estructurados los diferentes canales en la ISDN.

Tipo de Interfaz	Estructuras	Velocidad Básica kbps	Velocidad de Transmisión kbps	Observaciones
Interfaz Básica (BRI)	D B+D 2B+D	16 80 144	192 (*)	Canal D de 16 kbps N-ISDN
Interfaz Primaria (PRI)	23B+D 4H0 (**) 3H0+D H11+D 3H0+2B+D	1536 1536 1216 1600 1344	1544 (*)	Canal D de 64 kbps, B-ISDN Jerarquía Norteamericana T1 nB+D, $n \leq 23$ nH0+D, $n \leq 3$ nH0, $n \leq 4$
	30B+D 5H0 (**) 5H0 +D H12+D	1984 1920 1984 1984	2048 (*)	Canal D de 64 kbps, B-ISDN Jerarquía Europea E1 nB+D, $n \leq 30$ nH0+D, $n \leq 5$

(*) Incluye dígitos adicionales de sincronización y supervisión. Estos dígitos no llevan información de usuario y no se incluyen en la estructura de la interfaz.

(**) Cuando no se tiene un canal D propio, la señalización para los canales H0 puede ser proporcionada por un canal D de otra interfaz.

Fig. 6.8. Estructuras y Velocidades en las Interfaces Básica y Primaria.

Además de la señalización, el canal D puede transportar cualquiera otra información compatible con sus protocolos como, por ejemplo, datos conmutados por paquetes,

información de teleacción, etc. Nótese que la señalizacion en la ISDN es un sistema de señalización multicapa que utiliza la capa física como un medio para mover la información de señalización de capas superiores entre entidades de señalización. Tomados individualmente, los dígitos en la capa física no llevan ninguna información de señalización.

El Protocolo LAPD es el nombre dado al protocolo de señalización en modo paquete definido en las Recomendaciones Q.920(I.440) y Q.921(I.441) para la Capa Enlace y en las Recomendaciones Q.931(I.451) y Q.932(I.452) para la Capa Red. En la Capa Enlace, el protocolo LAPD utiliza el formato HDLC, y define los dígitos, octetos y secuencias de estados necesarios entre el usuario y la red con el fin de establecer, controlar y terminar llamadas utilizando cualquiera de los 100 o más tipos de servicio disponibles a través de la ISDN. Si los usuarios en ambos terminales de llamada están conectados a la ISDN y hay una vía para el canal D, existe entonces un control total de la llamada. Debido a la extensa gama de servicios ofrecidos, la instrumentación completa del protocolo LAPD requiere una gran capacidad de procesamiento.

De particular importancia son los formatos especificados en la Recomendación UIT-T G.704/I.431, Fig. 6.9. En esta Recomendación se especifican también las características funcionales de las interfaces asociadas a: nodos de la red, en especial equipos múltiplex digitales sincrónicos y centrales digitales en redes digitales integradas para telefonía, redes digitales de servicios integrados y equipos de multiplexación TDM.

En la Fig. 6.9 se muestra entonces los formatos E1 (30B+D) y T1 (23B+D) de la Interfaz Primaria, Recomendación UIT-T G.704/I.431.

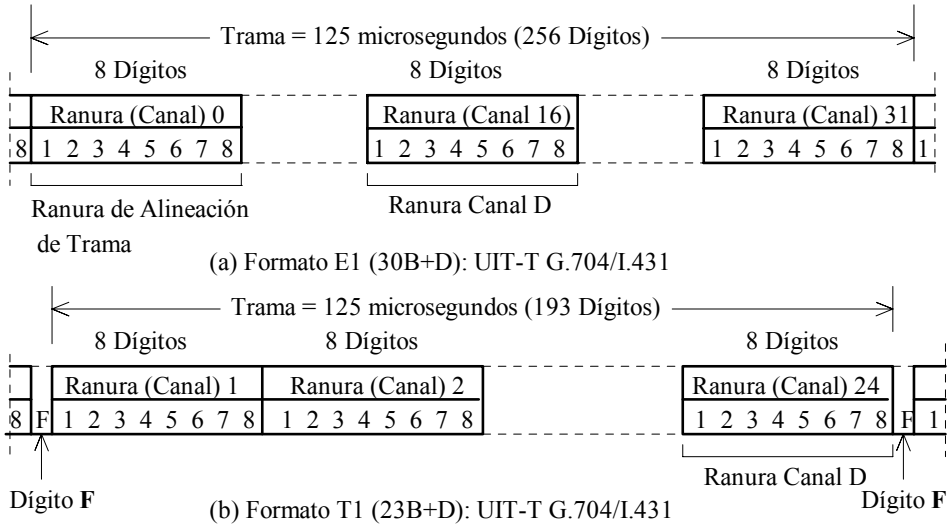


Fig. 6.9. Formatos de Capa Física de la Interfaz Primaria.

Para la Interfaz Primaria se especifican las estructuras de trama básica 30B+D (E1) a 2048 kbps y la 23B+D (T1) a 1544 kbps:

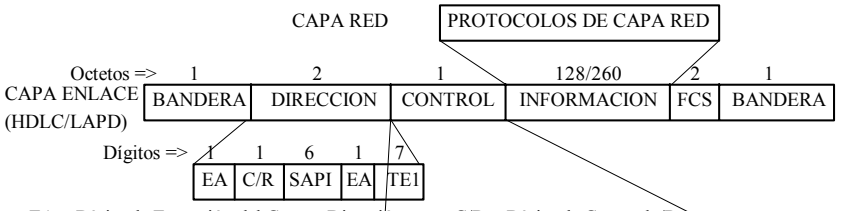
Estructura 30B+D (E1)

Cada trama está formada por 256 dígitos, numerados del 1 al 256 y contiene 32 canales o ranuras de tiempo. La ranura 0 se utiliza para la alineación de trama, mientras que la ranura 16 contiene el Canal D; las otras 30 ranuras contienen la información. La frecuencia de repetición de trama es de 8000 Hz y la velocidad de transmisión de 2048 kbps.

Estructura 23B+D (T1)

Cada trama está formada por 193 dígitos, numerados del 1 al 193 y contiene 24 canales o ranuras de tiempo. La ranura 24 contiene el Canal D; las otras 23 ranuras contienen la información. El primer bit de una trama se designa como dígito F y se utiliza para fines tales como la alineación de trama, la monitorización de la calidad de funcionamiento y el suministro de un enlace de datos. La frecuencia de repetición de trama es de 8000 Hz y la velocidad de transmisión de 1544 kbps.

El servicio básico que la Capa Enlace provee es la transferencia confiable de la información de señalización de la Capa Red entre dos conmutadores de red adyacentes. La Capa Enlace utiliza los medios de la Capa Física para efectuar esta tarea. En la Recomendación I.441, que es equivalente a la Recomendación Q.921, se define las especificaciones de la Capa Enlace de la Interfaz Primaria, protocolo LAPD, cuyo formato se muestra en la Fig. 6.10.



EA = Dígito de Extensión del Campo Dirección; C/R = Dígito de Comando/Respuesta
SAPI = Identificación del Punto de Acceso al Servicio; TE1 = Identificador del Punto Final del Terminal

Formato	Comando (P)	Respuesta (F)	1	2	3	4	5	6	7	8
Datos I	I (Inform.)	----	0	N(S)			P	N(R)		
Supervisión S	RR	RR	1	0	0	0	P/F	N(R)		
	RNR	RNR	1	0	1	0	P/F	N(R)		
	REJ	REJ	1	0	0	1	P/F	N(R)		
Sin Numeración U	SABM	----	1	1	1	1	P	1	0	0
	---	DM	1	1	1	1	F	0	0	0
	SI0	SI0	1	1	1	0	P/F	1	1	0
	SI1	SI1	1	1	1	0	P/F	1	1	1
	UI	----	1	1	0	0	P	0	0	0
	DISC	----	1	1	0	0	P	0	1	0
	----	UA	1	1	0	0	F	1	1	0
	----	FRMR	1	1	1	0	F	0	0	1

Fig. 6.10. Protocolo de Capa Enlace LAPD de la Interfaz Primaria.

Mientras que las Capas Física y Enlace tratan solamente con la señalización entre dos conmutadores o nodos de red, la Capa Red tiene responsabilidades más amplias, pues especifica los mensajes de control, los parámetros y los procedimientos necesarios para:

(a) establecer, mantener y terminar llamadas por conmutación de circuitos o conmutación de paquetes entre usuarios de la red, y

(b) transportar información de servicio suplementaria entre usuarios de la red.

Mediante el renglón (a) la Capa Red provee un conjunto completo de primitivas de señalización para control de llamadas; el renglón (b) es una función más básica de transferencia de datos la cual permite la aplicación de un mayor control sobre el manejo de los servicios suplementarios.

Las Recomendaciones Q.931(I.451) y Q.932(I.452) definen entonces la Capa Red de la Interfaz Primaria.

Dentro del Protocolo de Capa Red, cada mensaje o paquete consiste de los elementos siguientes, Fig. 6.11:

1. Discriminador del Protocolo (Protocol Discriminator)
2. Referencia de la Llamada (Call Reference)
3. Tipo de Mensaje
4. Otros Elementos de Información, si se requieren

Los renglones 1, 2 y 3 son comunes a todos los mensajes y deben estar siempre presentes, mientras que el renglón 4 es específico para cada tipo de mensaje.

Octetos ↓	Dígitos → 8 7 6 5 4 3 2 1
1	Discriminador del Protocolo
1	0 0 0 0 — Longitud del Valor de la Referencia de Llamada
m	Referencia de la Llamada
1	0 — Tipo de Mensaje
n	Otros Elementos de Información

Fig. 6.11. Protocolo de Capa Red de la ISDN.

La longitud máxima normal del mensaje es de 260 octetos. Nótese que el UIT-T no ha establecido protocolos de señalización Canal D para las Capas Transporte, Sesión y Presentación .

6.2.3. El Sistema de Señalización N° 7

Aunque no forma parte de las Recomendaciones de la Serie I, los protocolos de señalización descritos en las Serie Q y X son también fundamentales en la instrumentación de la ISDN. Las técnicas de "señalización por canal común" se emplean tanto dentro como entre ISDNs, utilizándose en particular el Sistema de Señalización N° 7 (SS7) del UIT-T.

Fundamentalmente, la señalización es el intercambio de información de control entre los elementos de una red de telecomunicaciones. Esta información incluye todos los recursos para la supervisión y control de todas las operaciones necesarias en la transferencia de información. La Señalización por Canal Común (CCS) es un método de señalización donde las señales de control no van por los mismos canales o circuitos

controlados (como es el caso de la telefonía), sino por un canal separado común compartido. En sí misma, la señalización es un sistema completo de transmisión de datos de propósito especial que puede utilizar los mismos protocolos y tecnología de las redes existentes.

El Sistema de Señalización N° 7 es el último sistema CCS especificado por el UIT-T en las Recomendaciones de la Serie Q.700. Los objetivos generales del SS7 son los de lograr un sistema CCS normalizado internacionalmente que (a) sea optimizado para operación en las redes digitales de telecomunicación en conjunto con centrales controladas por programas, y (b) que pueda aportar los requerimientos presentes y futuros de transferencia de información sin pérdidas ni duplicación de información.

6.2.4. El Sistema Frame Relay

Introducción

El Sistema Frame Relay (FR) es una nueva tecnología de las WAN que es análoga al sistema X.25 pero que permite la transmisión a velocidades mucho más altas (en la gama de 1 a 2 Mbps). El sistema FR está basado en la Recomendación I.122 del IUT-T, pero no es un estándar en sí, sino más bien una versión de la ISDN de banda angosta (N-ISDN); utiliza el protocolo de señalización Q.931 de la ISDN de banda angosta y retransmite o releva (relay) directamente tramas a través de la red. El sistema FR fue diseñado para trabajar específicamente con la ISDN y puede proveer altos anchos de banda (altas velocidades de transmisión) según demanda; esto es particularmente útil en la inter-conexión de redes de área local (LAN), debido a que el tráfico en una LAN es esporádico, es decir, se hace en ráfagas de datos que pueden ser de alta velocidad y de duración variable (en inglés se dice que el tráfico es “bursty”).

El sistema FR tiene dos características que lo hacen muy atractivo: bajo “overhead” y habilidad para soportar ráfagas de datos de alta velocidad. El bajo “overhead” se refiere al procesamiento mínimo que tiene lugar en cada nodo o conmutador de una red FR, denominados “puntos de presencia (POP)”. En particular, el procesamiento de errores y control de flujo es mínimo, lo cual teóricamente produce un menor retardo (de 2 ó 3 ms) comparado con el retardo de X.25 (de 20 a 40 ms) aún a las mismas velocidades de transmisión. En efecto, en FR se verifica en cada nodo si la trama está o no en error. Si la trama es correcta, se retransmite; pero si la trama está en error, ella es descartada dejando la recuperación del error a las capas superiores, es decir, a los usuarios terminales. Nótese la diferencia con X.25 en el cual, cuando la trama está en error, se pide la retransmisión del mensaje al nodo anterior. En FR se puede entonces aumentar la velocidad de transmisión desde 56 kbps hasta 2048 kbps; para un futuro muy próximo se espera alcanzar velocidades superiores, posiblemente 45 Mbps.

La habilidad del sistema FR para soportar ráfagas de datos de duración variable y de distintas velocidades, lo distingue también de los Servicios de Líneas Arrendadas (Lease-Line Services) de conmutación de circuitos, en los cuales las velocidades de transmisión generalmente son fijas. En FR los nodos están enlazados mediante Circuitos Virtuales Permanentes (PVC) y cada PVC tiene asignada una velocidad de transmisión CIR (Commited Information Rate), que es la velocidad de transmisión garantizada disponible en

el circuito. Sin embargo, la velocidad máxima disponible puede hacerse mucho mayor para ráfagas de corta duración. La velocidad CIR es equivalente al ancho de banda y más específicamente es la velocidad promedio en el PVC. Algunas veces la velocidad de transmisión puede superar durante breves períodos al CIR, lo cual a menudo se indica como "capacidad de ráfagas". Típicamente el CIR es inferior a la velocidad de acceso, y si es igual, significa que los datos nunca podrán viajar más rápido que el CIR. En general, en el momento de afiliarse a un sistema FR, el usuario especifica cuáles nodos deben interconectarse y define los parámetros de la conexión, por ejemplo, el CIR de operación. La red registra esta conexión como permanente hasta que el usuario la modifica y la red se encarga del enrutamiento, relevo y transmisión de las tramas. En un futuro próximo FR ofrecerá servicios en la forma de circuitos virtuales conmutados.

Formatos y Configuración del Sistema FR

En la Fig. 6.12 se muestra el formato de la trama FR.

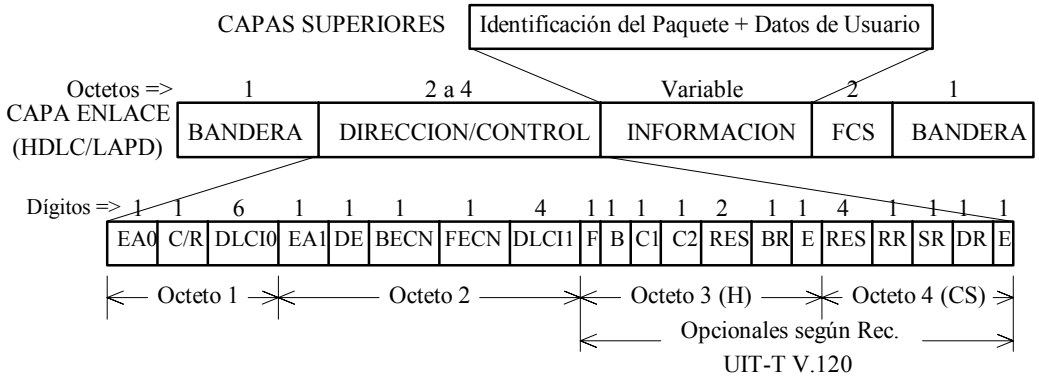


Fig. 6.12. Formato de la Trama Frame Relay.

Los dos primeros octetos del Campo Dirección/Control contienen los siguientes subcampos:

DLCI 1/0 (Identificador de la Conexión de Enlace). Estos 10 dígitos representan la conexión virtual entre un usuario y un conmutador o Punto de Presencia (POP). Cada conexión virtual que es multiplexada en un canal físico estará representada por un valor único DLC 1/0. Estos valores tienen significado local solamente, lo que significa que ellos son propios del canal físico sobre el cual ellos residen. Por lo tanto, dispositvos en los lados opuestos de una conexión pueden tener diferentes valores de DLCI/0 sobre la misma conexión virtual.

EA (Dirección Extendida). El dígito EA se utiliza para indicar si el octeto en el cual el valor de EA = 1 es el último campo de direcciones. Si el valor es 1, entonces el octeto actual es el último valor DLCI.

C/R. Es un indicador de comando/respuesta. Todavía no está bien definido.

DE, BECN, FECN. Son los dígitos de control de congestión.

El Identificador de la Conexión del Enlace (DLCI 0/1) permite que la red enrute cada trama de nodo a nodo a lo largo de una trayectoria virtual. La bandera DE (Elegible para Descartar) y los dígitos FECN y BECN de notificación de congestión se utilizan para el manejo de situaciones de congestión en la red. Los procedimientos establecidos en la Recomendación UIT-T V.120 se pueden utilizar en FR para proveer segmentación, reensamblaje y señalización fin-a-fin de las condiciones de error y el estado del control; estos procedimientos son opcionales.

Los dos octetos opcionales de adaptación de terminal según la Recomendación UIT-T V.120 tienen el significado siguiente:

H = Encabezado V.120; CS = Estado (Status) de Control

F = Dígito F de Segmentación ; B = Dígito B de Segmentación

C1/C2 = Dígitos de Control de Error ; Res = Reservado para uso futuro

BR = Dígito BREAK/HDLC; E = Dígito de Extensión

RR = Recepción Lista; SR = Enviar Listo; DR = Datos Listos

Para ver cómo opera el sistema FR, supongamos que una Aplicación A desea enviar un archivo a una Aplicación B por una configuración B+D. La Aplicación A inicia el proceso de comunicación enviando a la Capa Transporte, a través de las Capas Presentación y Sesión, una petición para el establecimiento de una conexión. La Capa Transporte envía información de control y señalización por el canal D utilizando los procedimientos Q.931; el mensaje de señalización es enrutado a través de la red y es utilizado para definir la trayectoria virtual y los parámetros de llamada que serán usados durante la etapa de transferencia de datos.

Una vez que la llamada se ha establecido, los datos son transferidos a través de la red por el canal B utilizando el DLCI y la información de ruta determinada en la etapa de establecimiento de la llamada. Lo importante en FR es que minimiza la cantidad de procesamiento de las tramas en la red y como consecuencia la transferencia de la información es mucho más rápida, pues, como ya lo hemos señalado, el retardo en cada nodo es de 2 ó 3 ms comparado con el retardo de 20 a 40 ms en X.25.

En el sistema FR no hay un mecanismo para impedir que un usuario descargue un gran volumen de datos sobre la red, retardando así las otras comunicaciones y generando problemas de congestión. Sin embargo, las especificaciones de FR contemplan un mecanismo para manejar la congestión, específicamente los dígitos BECN y FECN. El dígito BECN avisa que hay congestión en el sentido opuesto al de transmisión (aguas arriba). Por su parte, el dígito FECN avisa que la congestión es en el sentido de transmisión (aguas abajo). Cuando los usuarios finales reciben una indicación de congestión, ellos deben reducir inmediatamente las velocidades de transferencia hasta que la red desactiva los dígitos BECN y FECN. Una forma en la cual los POP manejan la congestión es almacenando los datos en un buffer de alta capacidad, por ejemplo, 2 megabits, y transmitiendo las tramas desde el buffer a una velocidad no superior al CIR. Si los datos continúan llegando a velocidades superiores al CIR, el buffer empieza a llenarse y cuando ha llegado a un cierto umbral, activa los dígitos BECN y FECN para alertar, aguas arriba y

aguas abajo, las condiciones de congestión. Estos dígitos participan la congestión, pero si la situación no mejora, se alcanza un segundo umbral y el buffer comienza a descartar tramas, al mismo tiempo que activa el dígito DE "Elegible para Descartar"; este dígito identifica las tramas que han excedido las velocidades contratadas y que pueden ser desechadas. De esta manera sólo queda afectado un solo PVC y no el resto de la red, y los datos perdidos son recuperados por mecanismos apropiados en las capas superiores. En FR es muy importante, entonces, el escoger una velocidad CIR apropiada para una conexión dada; en efecto, una velocidad CIR muy baja puede causar congestión y tiempos de respuesta lentos. Una velocidad CIR muy alta puede resultar innecesariamente costosa. Nótese que el costo de FR no depende de la distancia, sino de las velocidades CIR contratadas.

Las nuevas redes FR proveen todas las facilidades para el acceso de los usuarios a los cuales asignan "líneas de acceso (LA)" a una cierta velocidad, mayor que la velocidad CIR contratada. La mayor aplicación de FR es en la interconexión de grandes computadoras y de redes de área local formando redes de gran área, o redes de valor agregado. En la Fig. 6.13 se muestra la configuración de una red pública con Frame Relay.

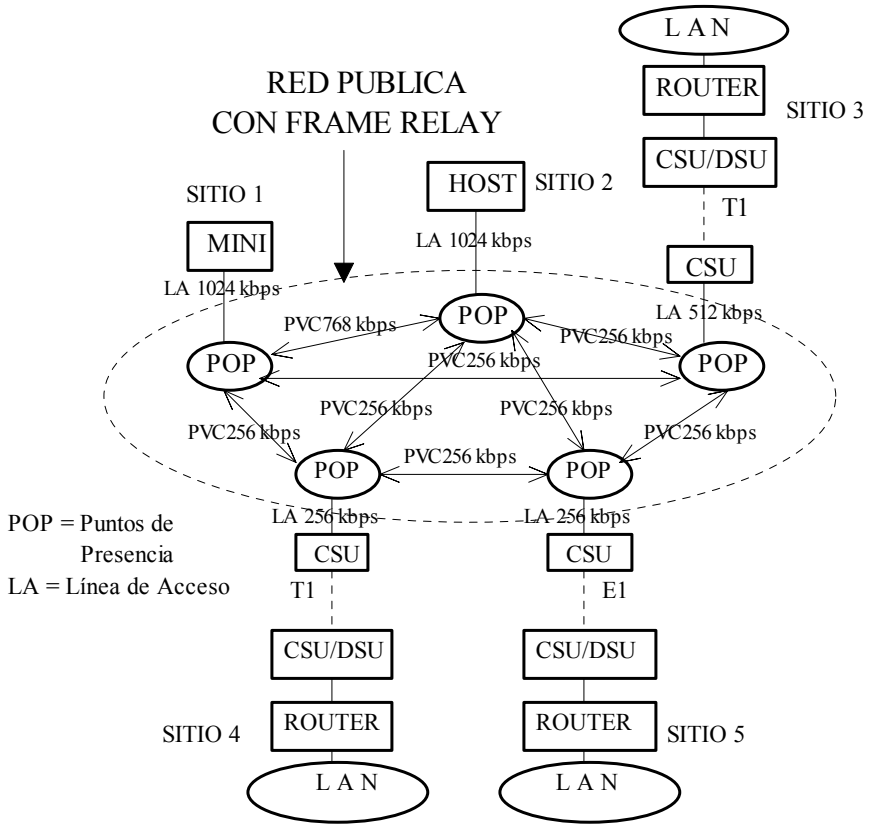


Fig. 6.13. Configuración de un Sistema Frame Relay.

El sistema FR fue diseñado para operar sobre una amplia gama de interfaces y servicios de transmisión existentes. En un ambiente privado el acceso a FR puede realizarse mediante las interfaces de la Serie V, T1, T1 Fraccional, X.21, y las interfaces ISDN BRI y

PRI, en las cuales el protocolo de base es el HDLC y sus variantes. El usar servicios fácilmente disponibles permite una rápida introducción al mercado y además el usuario puede escoger entre diferentes operadoras que ofrecen servicios de transmisión FR.

Minimizando los formatos y los procedimientos necesarios, FR ofrece beneficios de costo/prestaciones sobre las tecnologías existentes para el acceso de datos entre redes de banda ancha. Asimismo, el sistema FR reenruta automáticamente la comunicación por otra ruta en caso de falla y la red FR se ocupa de las reparaciones necesarias. En cambio, cuando se está conectado a una red privada con líneas dedicadas, el usuario no sólo debe asegurarse la posibilidad de reenrutamiento del tráfico, sino que además debe pagar por esa capacidad.

Otros estándares relacionados con el sistema Frame Relay son:

UIT-T: I.122. Q.922 y Q.933

ANSI: T1.606-90, T1S1/90-175R4 y T1S1/90-214.

6.3. REDES DE AREA LOCAL

6.3.1. Introducción

Una red de área local (Local Area Network, LAN) es una red de datos de recursos compartidos que permite que un número de dispositivos independientes y no homogéneos puedan comunicarse entre sí. Estas redes están confinadas en áreas geográficas relativamente pequeñas como, por ejemplo, un recinto universitario (edificios y laboratorios) o un edificio con una gran cantidad de oficinas, en donde se necesita servicios de transferencia de archivos, procesamiento de palabras, correo electrónico, servidores de todo tipo, bases de datos distribuidas, etc., e interconexión con otras LAN. Una LAN puede soportar una gran cantidad de dispositivos digitales: computadoras (micro, mini y maxi), terminales de video, bancos de datos, impresoras, graficadoras, impresoras de facsímil e interfaces con otras redes. La transmisión de voz y de video no ha sido definida en las LAN.

Las características principales de las redes de área local son:

- Tiene una extensión de 1 a 10 km, cuando más
- La información se transmite en serie sincrónica y asincrónicamente, comúnmente desde 300 bps hasta 20 Mbps, aunque hay en proyecto y desarrollo sistemas que pueden llegar hasta 1000 Mbps
- La tecnología utilizada es de avanzada y está basada en procesadores
- Comparada con los sistemas de transmisión analógica, la LAN es relativamente inmune al ruido. La tasa de error (BER) es del orden de 10^{-9}, mientras que la tasa de error en transmisión de voz, por ejemplo, es de 10^{-4}. La confiabilidad es alta
- La transmisión se efectúa por conmutación de paquetes

- Puede soportar una gran variedad de otros dispositivos como, por ejemplo, sensores, termostatos, alarmas de seguridad, dispositivos de control de procesos, terminales de datos de baja velocidad (telex, teletipo), etc.
- La arquitectura de la red es tal que permite una total conectabilidad entre los dispositivos conectados a ella sin necesidad de algoritmos de enrutamiento complicados
- El costo, tanto total como por conexión, es moderado

6.3.2. Características Técnicas de las Redes de Area Local

Las características técnicas de las redes de área local incluyen las topologías, los métodos de acceso empleados para transmitir datos por la red, los medios de transmisión, y los programas (software) y equipos necesarios para operar la red.

Topologías

La topología de una red de área local puede adoptar varias formas, como se muestra en la Fig. 6.15.

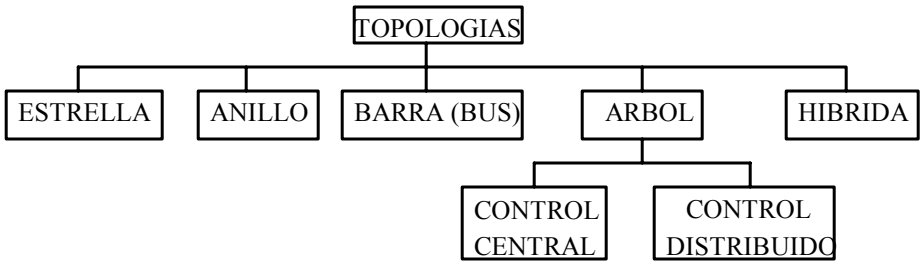


Fig. 6.14. Topologías de Red

Cada topología está adaptada a determinados usos, tiene sus propias estrategias de enrutamiento óptimo y sus características de confiabilidad. En contraste, una red telefónica tiene una organización jerárquica con enlaces entre nodos diseñados en términos de tráfico y costo, y con enrutamientos que siguen reglas muy complejas, mientras que una red de área local tiene una forma muy regular y el enrutamiento es muy sencillo.

En la Fig. 6.15 se muestra la forma de algunas de estas topologías.

La estrella es una topología conveniente para instalaciones centralizadas física y lógicamente. La estrella permite también la transmisión por conmutación de circuitos y un enrutamiento muy fácil y flexible por cuanto el nodo central conoce todas las trayectorias que de él irradian. Como existe un nodo central ("Hub"), el acceso a la red se puede controlar fácilmente y se puede establecer esquemas de prioridad de utilización en algunos de los nodos o usuarios. Con la centralización del control, el nodo central debe ser muy confiable y con una suficiente capacidad computacional para el enrutamiento y control de todo el tráfico de la red. El acceso del usuario al nodo central se verifica a través de las

"unidades de interfaz de nodo (Node Interface Unit, NIU)", las cuales están conectadas al nodo central, aunque muchas veces ellas están directamente incorporadas en él. La topología en estrella tiene la desventaja de que es muy vulnerable a fallas en el nodo central; cualquiera falla en este nodo ocasiona el derrumbe completo de la red.

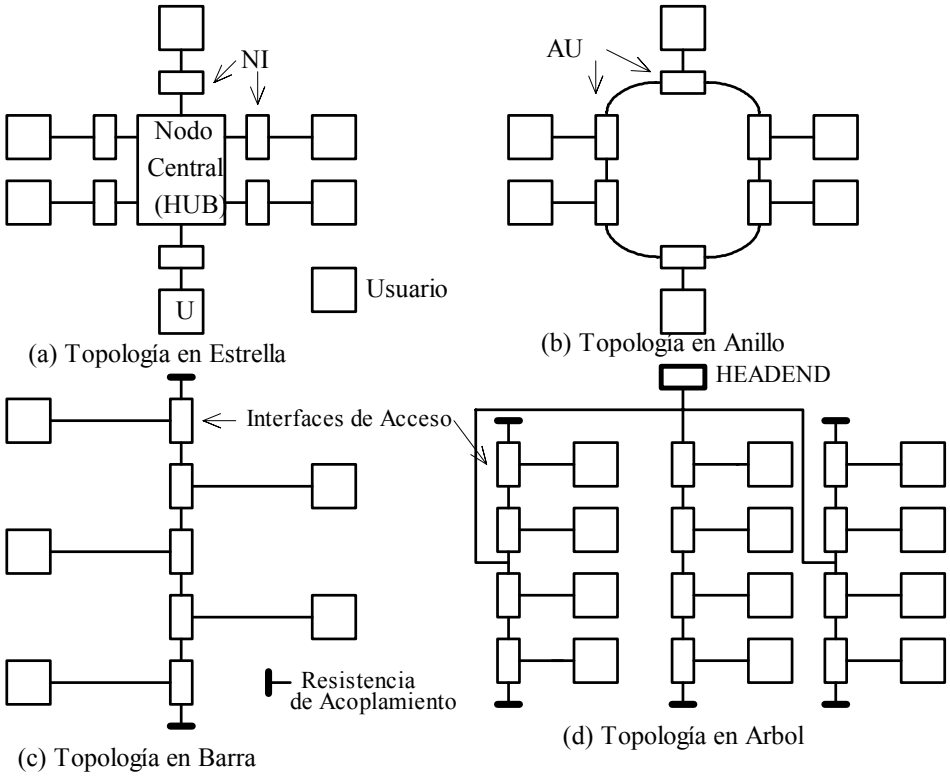


Fig. 6.15. Topologías de las Redes de Area Local.

El anillo es una topología apropiada para modos de transmisión por paquetes. El anillo consiste en una serie de enlaces conectados con repetidores activos o "Unidades de Acceso, (AU)". Las secuencias de información circulan en el anillo en forma unidireccional pasando por las unidades de acceso, las cuales deciden si aceptan la información o la dejan seguir a la próxima; en las unidades de acceso no hay almacenamiento (buffering) y el retardo producido es mínimo (generalmente de pocos dígitos). La vulnerabilidad del anillo es grande también, pues una rotura en un enlace interrumpe el flujo de información; sin embargo, como veremos más adelante, algunos sistemas en anillo tienen esquemas que permiten restablecer la continuidad del anillo en caso de rotura.

La topología en anillo y la topología en estrella se pueden combinar para formar una estrella cuyos rayos son las secciones de un anillo y cuyo nodo central es la denominada Unidad de Acceso a Multiestación (MAU). Esta configuración físicamente es una estrella pero lógicamente es un anillo; corrientemente se dice que es un "anillo colapsado". Más adelante veremos una aplicación de esta configuración en una red de área local.

La topología en barra o "bus" requiere un medio de transmisión fulldúplex en el cual las señales fluyen en cualquiera dirección. El modo de transmisión es por paquetes. A diferencia de las topologías en estrella o en anillo, los nodos o usuarios asociados con una barra no efectúan ninguna clase de enrutamiento; esto se debe a que la barra es un medio radiante o difusor ("broadcast") en el cual los nodos escuchan todas las transmisiones y solamente copian aquellos mensajes que llevan su dirección. En algunos sistemas de barra radiante los nodos tienen que competir entre sí para poder utilizar el medio; esto quiere decir que el control del medio está distribuido entre los diferentes nodos en competencia. Una aplicación de este sistema lo veremos más adelante.

La topología de barra y la topología en estrella se pueden combinar de tal manera que el nodo central (convertido en una "barra colapsada o puntual") retransmita simultáneamente a todas las estaciones en los rayos de la estrella la transmisión de una estación dada. El nodo central controla todos los aspectos de la transmisión. Esta configuración físicamente es una estrella pero lógicamente es una barra, en la cual el nodo central puede controlar el acceso y establecer prioridades.

La topología en árbol es una generalización de la topología en barra. La configuración en árbol comienza en un punto denominado "cabecera" o "headend". De la cabecera salen varios cables que a su vez contienen más ramales, los cuales se subdividen en más ramales formando una red que puede ser bastante compleja; en este caso el control está centralizado en la cabecera. Por ejemplo, la red del protocolo industrial BSAP, vista en el Capítulo V, es una red en árbol con control centralizado. Algunas veces las redes en barra con control distribuido se pueden extender hasta formar árboles y no necesariamente se dispone de una cabecera. En este caso se tiene una red en árbol con control distribuido.

Las topologías anillo en estrella y barra en estrella pueden ser consideradas como topologías "híbridas".

Métodos de Acceso al Medio

Las redes de área local están formadas por colecciones de dispositivos que deben compartir la capacidad de transmisión de la red, y es necesario disponer de medios para el control del acceso al medio de transmisión cuando dos (o más) dispositivos desean establecer una conexión en un momento dado. En primer lugar, hay que decidir si el control se ejerce en una forma centralizada o en una forma distribuida. En el sistema centralizado se define un controlador o nodo que tendrá la autoridad para permitir el acceso a la red. Una estación que desea transmitir debe esperar entonces hasta recibir autorización desde el nodo de control. Por el contrario, en la red con control distribuido las estaciones colectivamente establecen una forma dinámica de control para determinar qué estación transmitirá de primero, por cuánto tiempo, con qué prioridades, etc.

Basados en las premisas anteriores, podemos establecer entonces tres formas de acceso al medio: el acceso dedicado, el acceso controlado y el acceso aleatorio, que son las tres formas encontradas en la mayoría de las redes de área local corrientes, Fig 6.16.

Fundamentalmente, en el acceso dedicado se aplican las técnicas de multiplex TDM y FDM, que hemos visto anteriormente, y sus formas de acceso a satélites, conocidas como Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA) y Acceso Multiple por División de

Frecuencia (FDMA). El controlador, en este caso un multiplexor, asigna o reserva ranuras de tiempo o gamas de frecuencia a los diferentes usuarios. Esta asignación puede ser fija o puede ser dinámica, como es el caso de los multiplexores estadísticos, en los cuales la asignación de canales o ancho de banda es "según la demanda". Estas técnicas son poco utilizadas en las redes de área local corrientes y no abundaremos en más detalles.

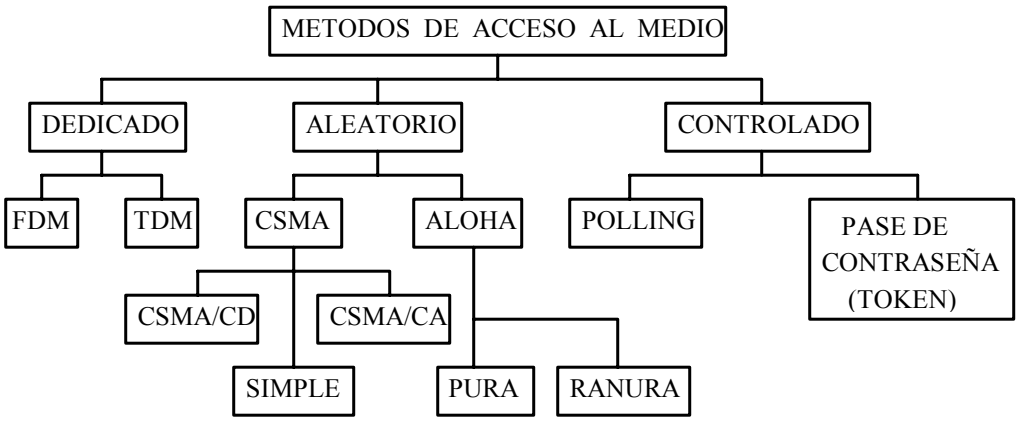


Fig. 6.16. Métodos de Acceso al medio en Redes de Area Local

Los métodos de acceso más utilizados en las redes de área local son los métodos de acceso aleatorio y los métodos acceso controlado, los cuales describiremos brevemente.

Métodos de Acceso Aleatorio

Método ALOHA

En los métodos de acceso aleatorio los usuarios compiten entre sí para lograr el acceso y control del medio de transmisión; esta es una forma de control distribuido. Este método tuvo su origen en la Universidad de Hawaii [Abramson, 1970] cuando se intentó transmitir desde varios transmisores independientes a través de un solo repetidor; en efecto, un terminal listo para transmitir simplemente envía su mensaje, sin importarle el estado del canal. La estación transmisora espera un tiempo igual al doble del tiempo de propagación máximo en el canal; si la estación escucha un reconocimiento durante ese tiempo, considera completa la transmisión y se prepara para enviar otro mensaje, y así sucesivamente para todas las estaciones. Obviamente habrá colisiones entre diferentes transmisiones simultáneas, en cuyo caso los receptores afectados descartan las tramas corruptas recibidas y no envían reconocimientos. En estas circunstancias, los transmisores afectados deberán retransmitir después de un tiempo de espera aleatorio. Este esquema se denominó ALOHA y representa la forma más pura o básica de acceso aleatorio, de allí el nombre de ALOHA PURA, como se le conoce comúnmente. Pero la simplicidad del sistema ALOHA pura tiene un costo; en efecto, debido a que el número de colisiones se incrementaba al aumentar la carga (número de transmisores en servicio), la capacidad de utilización del canal era aproximadamente de 18%.

Para mejorar el rendimiento del sistema ALOHA pura se decidió dividir el tiempo de transmisión en ranuras uniformes cuya duración era igual al tiempo de transmisión de una trama. Los transmisores solamente pueden transmitir en los extremos inferiores de las ranuras, de manera que las tramas que colisionen siempre estarán dentro de una misma ranura. Este esquema aumentó la capacidad de utilización hasta aproximadamente el 37%, y por sus características se denominó ALOHA RANURADA.

Método CSMA

La baja capacidad de transmisión del método ALOHA se deriva de su incapacidad para aprovechar una de las propiedades claves de las redes de packet radio y las redes locales y la cual es que el tiempo de propagación entre estaciones es generalmente mucho menor que el tiempo de transmisión de una trama. En este caso, cuando una estación transmite una trama las otras estaciones lo saben casi inmediatamente y pueden abstenerse de transmitir hasta que la transmisión finalice. De esta manera solamente cuando por lo menos dos estaciones comienzan a transmitir simultáneamente se puede producir colisiones. Estas consideraciones llevaron al desarrollo de una técnica conocida como Acceso Múltiple por Sondeo de Portadora (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) una de cuyas formas es utilizada en la Red Ethernet o LAN IEEE 802.3, como veremos más adelante. Este método de acceso es apropiado para topologías en barra y árbol.

En CSMA un terminal sondea el canal antes de empezar a transmitir y si el canal está desocupado realiza la transmisión; si el canal está ocupado, se retira y espera un tiempo aleatorio antes de volver a sondear el canal. Hay, sin embargo, una cierta probabilidad de que otro terminal haya efectuado la misma operación y que los dos terminales “vean” un canal desocupado produciéndose una colisión. La probabilidad de este suceso aumenta en barras largas con numerosos usuarios, puesto que una transmisión puede iniciarse en un extremo del canal y antes de que la señal se propague hasta un cierto punto, un nuevo usuario ha entrado al canal. El sistema debe ser capaz de detectar las colisiones y esto se efectúa comparando las señales transmitidas con las presentes en el canal para ver si el mensaje en el canal es igual al que está siendo transmitido, o mediante técnicas que detectan la presencia de otras transmisiones por medios eléctricos directos. En cualquier caso, los usuarios que han detectado una colisión se retiran y esperan un tiempo aleatorio, independiente para cada uno, antes de volver a tratar de acceder al canal. Este proceso se repite hasta que se consigue el canal desocupado o cuando se ha llegado a un cierto número de intentos, que en algunos sistemas es de 16.

Se puede presentar el caso en que dos terminales comiencen a transmitir simultáneamente sin que se haya detectado una colisión durante un cierto tiempo, debido al tiempo de propagación (alrededor de 5 nanosegundos por metro) de las señales antes de encontrarse. Si los mensajes son lo suficientemente cortos, puede ocurrir una colisión sin que los terminales sepan de ella y la información transmitida se perdería. Es necesario, entonces, que los mensajes o paquetes no sean menores que cierta longitud, la cual es una función de la velocidad de transmisión y de la longitud del canal. Otro problema en CSMA es que la cantidad de tiempo requerido para tener acceso al canal puede ser muy variable; de hecho, no hay ninguna garantía de que el terminal pueda tener alguna vez la oportunidad de transmitir.

El esquema que hemos descrito es el CSMA SIMPLE, que aunque más eficiente que el ALOHA, tiene todavía una deficiencia muy importante. En efecto, cuando dos tramas colisionan, el medio permanece inutilizable durante la duración de transmisión de las dos tramas, y si las tramas son largas, esto significa una gran pérdida de tiempo utilizable. Esta pérdida de tiempo, o de ancho de banda como algunas veces se dice, se puede reducir si el terminal continúa sondeando el canal mientras está transmitiendo ("oyendo mientras se habla"). Si durante la transmisión el terminal detecta otra señal en el canal, debe abortar su transmisión y transmitir de inmediato una señal de interferencia de muy corta duración para avisar a las otras estaciones que se ha producido una colisión. Después de transmitir la señal de interferencia debe retirarse del canal y esperar un tiempo aleatorio antes de hacer un nuevo intento de acceso; el terminal que originó la colisión actúa de la misma manera. Este esquema mejorado se denomina Acceso Múltiple por Sondeo de Portadora con Detección de Colisiones (CSMA/CD) y es el utilizado en la Red Ethernet y estandarizado por la IEEE, Comité 802, Norma 802.3, cuya estructura de trama veremos más adelante.

Otra forma de CSMA es aquella en la cual los terminales poseen un mecanismo que les permite estimar el tiempo o intervalo de ocurrencia de una colisión y evitar la transmisión durante ese tiempo. Esta técnica se denomina Acceso Múltiple con Sondeo de Portadora con Medios para evitar Colisiones (CSMA/CA). Como esta técnica elimina los circuitos de detección de colisiones, que son propiedad de Ethernet, las redes que utilizan el método CSMA/CA son menos costosas que la red Ethernet que utiliza el esquema CSMA/CD. La técnica CSMA/CA se utiliza actualmente en redes de área local inalámbricas, que han sido normalizadas en el estándar IEEE 802.11.

Una excelente descripción de las técnicas anteriores se puede encontrar en [Stallings, 1993].

Métodos de Acceso Controlado

En muchas aplicaciones el acceso de las estaciones al medio de transmisión debe ser asegurado por el sistema y el control que lo realiza puede ser centralizado o puede ser distribuido. Esta clasificación permite definir en las redes de área local dos tipos de acceso controlado: el método de acceso por interrogación (polling) y el método de acceso por pase de contraseña (token).

Método de Acceso por Interrogación(Polling)

El método de acceso por interrogación es una forma de control centralizado y es particularmente apropiado para topologías en árbol y en sistemas multipunto, aunque en principio se puede utilizar con cualquiera topología. Sin importar la topología, la interrogación es llevada a cabo por una estación de control conectada a todas las estaciones de la red mediante un enlace compartido o por enlaces dedicados. Este es el método de acceso comúnmente utilizado en los protocolos industriales.

La esencia del procedimiento del polling ya la hemos visto cuando se describió algunos de los protocolos de Capa Enlace, descripción que consideramos suficiente para entender sus principios.

Método de Acceso por Pase de Contraseña

A diferencia del polling, en el método por pase de contraseña ("token") se controla la secuencia de transmisión de las estaciones, los tiempos de transmisión, las prioridades, etc., y se puede utilizar en topologías en anillo y en barra. El control está distribuido entre las estaciones presentes.

La distribución del control necesita un medio mucho más restringido que en el caso de polling, con paquetes mejor estructurados y una interacción más estricta entre estaciones, y entre estaciones y el medio de transmisión. La clave del sistema es la utilización de una contraseña; la contraseña es una secuencia fija de datos que circula en el medio de transmisión, un anillo o una barra. Cuando una estación tiene datos para transmitir, primero debe tomar posesión de una contraseña libre, a la cual le agrega una bandera para indicar que la contraseña está siendo utilizada, y le agrega también la información que va a transmitir a una estación dada; a continuación la retransmite. Durante el tiempo en que la contraseña está en uso, las otras estaciones permanecen inactivas con lo cual se elimina la posibilidad de una colisión, aún si el medio es una barra; solamente aquella estación cuya dirección está en la contraseña puede copiar la información, las demás la ignoran. Una vez completada la transmisión, la contraseña es liberada en el medio y, de acuerdo con un esquema fijo, una nueva estación toma posesión de ella y el proceso se repite.

De acuerdo con el tipo de topología, se han desarrollado dos métodos de acceso por pase de contraseña: el Anillo de Pase de Contraseña ("Token Ring") y la Barra de Pase de Contraseña ("Token Bus"), que ya han sido estandarizados por la IEEE, Comité 802, Normas 802.5 y 802.4, respectivamente. Vamos a describir brevemente estos métodos de acceso a redes de área local.

Anillo de Pase de Contraseña ("Token Ring")

En esta topología las estaciones están acopladas al anillo a través de una interfaz activa AU, Fig. 6.15 (b), que permite que una estación esté en una condición de "escucha" o en una condición de "transmisión". Si las estaciones están inactivas o no quieren transmitir, la contraseña circula libremente a lo largo del anillo, pasando de estación en estación. Si una estación desea transmitir, ella espera hasta que detecta que le llega una contraseña vacía; la estación toma posesión de la contraseña, la marca cambiándole un dígito (bandera) y le agrega el resto de los campos necesarios para construir una trama la cual transmite a una estación dada. La trama así formada se desplaza por el anillo y cada estación la recibe y si no es para ella la retransmite. La estación de destino observa que la trama lleva su dirección, de modo que ella copia la información, marca la trama como recibida y la retransmite. Esta trama continúa circulando por el anillo y al llegar a la estación de origen, se verifica que la información ha sido entregada, se le elimina la información que se transmitió y se libera la contraseña. En la Fig. 6.17 se muestra este mecanismo: en (a) la Estación A espera a la contraseña vacía; cuando la recibe, la marca, le agrega los otros campos y la transmite con dirección Estación C. En (b) la Estación C ha copiado la trama a ella dirigida, la marca y la retransmite. En (c) la trama llega a la Estación A la cual elimina los campos adicionales liberando la contraseña. Más adelante, al describir

el sistema Token Ring IEEE 802.5, mostraremos la estructura de la contraseña y de la trama completa.

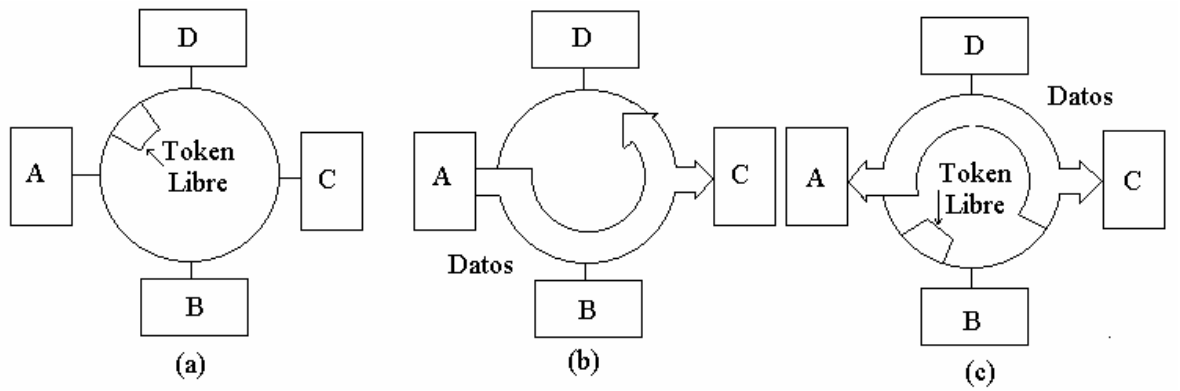


Fig. 6.17. Mecanismo de Transmisión en el Sistema Token Ring.

La principal ventaja de este esquema es que las estaciones transmiten en una forma controlada y equitativa, pues todas las estaciones tienen la oportunidad de transmitir. Sin embargo, como veremos más adelante, en algunos sistemas se agrega mecanismos para establecer prioridades y para garantizar servicios de ancho de banda según demanda.

La principal desventaja del esquema Token Ring es la necesidad de un estricto mantenimiento de la contraseña; por ejemplo, pérdida o duplicación del token produce interrupciones indeseables. Para prevenir estas eventualidades, una de las estaciones actúa como monitor para asegurar que una sola contraseña está en el anillo o para suplir una si es necesario.

Barra de Pase de Contraseña (“Token Bus”)

En esta técnica se combinan las atractivas propiedades de la topología en barra radiante, como, por ejemplo, la transmisión en banda ancha, con aquellas de un esquema con acceso controlado al medio, como, por ejemplo, buen rendimiento bajo condiciones de carga de alto tráfico, insensibilidad al factor velocidad-distancia y equidad de acceso, propias de la topología en anillo.

En este sistema una contraseña controla el derecho de acceso al medio; la estación que posee la contraseña tiene momentáneamente el control sobre el medio. A la contraseña se le agregan los diferentes campos de la trama y se transmite por la barra. Puesto que la barra es radiante, todas las estaciones “ven” la trama que solamente es copiada por la estación de destino. Esta estación libera a la contraseña la cual es tomada por una estación de acuerdo con una secuencia de direcciones de estación. Este mecanismo cíclico constituye un anillo lógico, es decir, se efectúa una operación en anillo utilizando una barra física.

La operación estable requiere el envío de la contraseña a una estación activa que especifica la sucesora cuando la estación ha finalizado su transmisión. El máximo tiempo de transmisión de cualquiera estación es controlado por un temporizador de posesión de contraseña. Pero lo más difícil es establecer y mantener el anillo lógico; esto implica, por ejemplo, la inicialización, incorporación o remoción de una estación. Cada estación

participante conoce las direcciones de su predecesora y sucesora, y una vez que una estación ha completado la transmisión de sus tramas, ella pasa la contraseña a su sucesora. La forma de la trama y de la contraseña las veremos más adelante al describir la red de área local LAN IEEE 802.4.

En la Fig. 6.18, se muestra en forma esquemática la operación del sistema Token Bus.

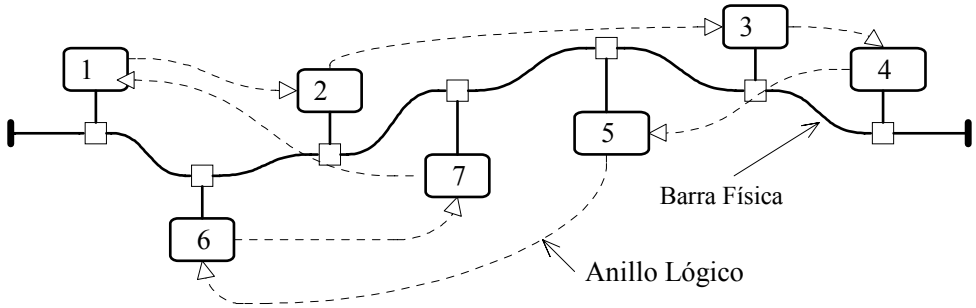


Fig. 6.18. Mecanismo de Transmisión del Anillo Lógico en el Sistema Token Bus.

Después de haber enviado la contraseña, la estación monitorea la barra para asegurarse de que su sucesora la ha recibido. Si la estación emisora detecta una trama válida después de la contraseña, supone que su sucesora posee la contraseña y está transmitiendo normalmente. En caso contrario, toma el control de la red y, si es necesario, las acciones de recuperación apropiadas para restablecer el anillo lógico.

Otros Métodos de Acceso al Medio

Además de los esquemas de control de acceso al medio vistos, hay otros dos métodos de acceso al medio que se emplean en algunos productos comerciales y sistemas prototipo; estos esquemas son el "anillo ranurado" y el "anillo con inserción de registro", que vamos a describir muy brevemente.

Anillo Ranurado

En el anillo ranurado ("slotted ring") un número constante de ranuras de longitud fija circulan continuamente a lo largo del anillo. Cada ranura contiene una bandera indicadora para designar si la ranura está llena o vacía e inicialmente todas las ranuras están vacías. La estación que desea transmitir debe segmentar sus datos en tramas de longitud fija y espera hasta que llega una ranura vacía. Al llegar una ranura vacía la estación activa la bandera y llena la ranura con su trama de datos y la transmite; la estación no puede transmitir más información hasta que su ranura retorne por el anillo, y el proceso se repite igual para todas las estaciones.

Una de las realizaciones del anillo ranurado es en el denominado "anillo de Cambridge", desarrollado en Inglaterra en la Universidad del mismo nombre. En el anillo de Cambridge cada ranura contiene un minipaquete de 5 octetos que incluye direcciones (fuente/destino), dígitos de control y de datos (2 octetos solamente). Este anillo puede

operar a una velocidad de 10 Mbps sobre par trenzado y puede contener hasta 1024 minipaquetes o ranuras.

La principal desventaja del anillo ranurado es el desperdicio que puede ocurrir si las estaciones no desean transmitir información, en cuyo caso las ranuras asignadas estarán circulando vacías. Sin embargo, esta desventaja es compensada por la simplicidad de operación; la interacción del nodo con el anillo está minimizada y como consecuencia aumenta la confiabilidad.

Anillo con Inserción de Registro

El anillo con inserción de registro ("Register Insertion Ring") contiene un registro de desplazamiento asociado con cada nodo. El registro, cuya longitud es igual a la de las tramas, se utiliza para guardar temporalmente las tramas que circulan a través del nodo. Además, en el nodo hay buffers para almacenar tramas producidas localmente. El paquete a transmitir se coloca en un registro el cual inmediatamente se inserta en el anillo. Como consecuencia, el anillo se alarga en una longitud igual a la del registro y transmite el mensaje. Todo el tráfico pasa a través del registro lo que permite que cada estación lea las direcciones de destino, y si es la suya copia la información y luego marca y retransmite el mensaje. Una vez que el paquete regresa a la estación de origen, él es renovado y queda listo para una nueva transmisión.

El lector puede encontrar mucha información sobre estos métodos en [Stallings, 1993].

Medios de Transmisión en Redes de Area Local

El medio de transmisión es el canal o conexión física entre el transmisor y el receptor en una red de comunicaciones. Los medios de transmisión utilizados en las redes de área local son el par trenzado, el cable coaxial, las fibras ópticas y el espacio libre.

Los medios de transmisión se pueden clasificar como "medios guiados" y "medios no guiados" y la transmisión es en forma de una onda electromagnética. Ejemplos de los medios guiados son el par trenzado, el cable coaxial y las fibras ópticas, mientras que la atmósfera y el espacio exterior son ejemplos de medios no guiados. La atmósfera y el espacio exterior permiten la transmisión de ondas electromagnéticas pero no las guían, como es el caso de la transmisión en radiofrecuencia y con rayos infrarrojos.

De acuerdo con el modo de transmisión de las señales, se tiene la "transmisión en banda de base" y la "transmisión mediante portadora modulada", que ya hemos definido anteriormente. La transmisión en banda de base demanda anchos de banda menores que la transmisión mediante portadora modulada y los medios de transmisión deberán ser compatibles con estos modos. Por ejemplo, el par trenzado es el medio apropiado para la transmisión en banda de base, mientras que el cable coaxial y las fibras ópticas lo son para la transmisión mediante portadora modulada. Nótese que en la literatura inglesa se utiliza el término "broadband", que significa "banda ancha", como sinónimo del término "modulada"; el lector debe estar atento a estas singularidades del lenguaje técnico.

Vamos a describir brevemente estos medios de transmisión en lo que se refiere a su aplicación en las redes de área local, pues en el Capítulo IX se trata con más detalle los medios de transmisión en general.

El Par Trenzado

El par trenzado consiste de dos conductores de cobre o de acero trenzados o torcidos en espiral con revestimiento de cobre. Estos conductores se fabrican como pares sueltos o en forma de cable multipar (generalmente cuatro pares). Los pares pueden venir con o sin apantallamiento. Nótese que el trenzado es para reducir el efecto del ruido externo sobre los conductores, mientras que el apantallamiento es para reducir la energía radiada por los conductores; sin embargo, el par trenzado con apantallamiento de plomo provee un alto grado de protección tanto del exterior al interior como del interior al exterior.

El par trenzado se puede utilizar para la transmisión tanto de señales analógicas como digitales. En el caso de señales analógicas se requiere amplificadores cada 5 a 6 km, mientras que para señales digitales lo normal es de 2 a 3 km. La aplicación más común del par trenzado es para la transmisión de voz con una capacidad de hasta 24 canales de voz y un ancho de banda de 268 kHz; en transmisión digital se puede alcanzar una velocidad de 230 kbps.

El par trenzado, tanto no apantallado (unshielded twisted pair, UTP) o apantallado (shielded twisted pair, STP), es el más económico de los medios de transmisión y su instalación es muy fácil. En los edificios modernos el alambrado telefónico con par trenzado es parte de la infraestructura normal de telecomunicaciones y puede utilizarse para interconexiones en algunas redes de área local. Aunque el par trenzado está restringido en cuanto a velocidad y distancia de transmisión, se puede alcanzar velocidades de hasta 16 Mbps a 750 metros. Su uso está normalizado en el estándar EIA/TIA 568.

Un tipo de par trenzado muy utilizado en la práctica es el denominado "sistema de cableado IBM", cuyos diámetros van desde 0,405 mm (calibre 26 AWG) hasta 0,644 mm (Calibre 22 AWG). El cable IBM se clasifica en tipos: desde Tipo 1 hasta Tipo 9, que se utilizan para diferentes distancias y aplicaciones. En el Capítulo IX veremos otras categorías de par trenzado. El lector puede obtener más información acerca de este tipo de conductor en cualquier catálogo de componentes.

El Cable Coaxial

En las redes de área local se utilizan dos tipos básicos de cable coaxial según la técnica de transmisión utilizada: banda de base o portadora modulada ("Broadband"). Ambos tipos de cable son mucho más costosos que el par trenzado, pero como su ancho de banda es mucho mayor, pueden permitir altas velocidades de transmisión a distancias mucho mayores que con el par trenzado.

En sistemas de banda de base se utiliza cable de 50 Ω, mientras que en sistemas de portadora modulada se utiliza cable de 75 Ω. Este último es el mismo tipo utilizado en sistemas de televisión por cable (CATV). La velocidad de transmisión en los cables en redes de área local de banda de base puede llegar hasta los 10 Mbps, y en las redes de portadora modulada hasta los 400 Mbps.

El cable coaxial se puede aplicar en configuraciones punto-a-punto y multipunto. En banda de base el cable de 50 Ω puede soportar hasta 100 dispositivos por segmento, aunque con la ayuda de repetidores se puede extender mucho más. Por su parte, el cable de banda ancha de 75 Ω puede soportar cientos de dispositivos; sin embargo, en altas velocidades de transmisión (sobre 50 Mbps) se originan algunos problemas técnicos que limitan el número de dispositivos de 20 a 30. Las velocidades de transmisión típicas en las redes de área local corrientes tanto en banda de base como en portadora modulada comúnmente van de 2 a 20 Mbps, pero con las nuevas tecnologías se puede llegar a 1000 MHz.

Las distancias máximas en un cable de banda de base típico están limitadas a unos cuantos kilómetros, mientras que en los cables de banda ancha pueden llegar a decenas de kilómetros. La diferencia tiene que ver con la intensidad relativa de las señales tanto digitales como analógicas. En efecto, los tipos de ruido electromagnético que se encuentran generalmente en zonas industriales y urbanas son de frecuencias relativamente bajas, del mismo orden de las frecuencias de las señales digitales. Las señales analógicas, por su misma naturaleza, pueden ser fácilmente trasladadas a frecuencias lo suficientemente altas para evitar el efecto de las componentes del ruido y pueden alcanzar distancias superiores. En general, altas velocidades (sobre 50 Mbps), en transmisión digital o analógica, están limitadas a una distancia de aproximadamente 1 km. En las especificaciones de las redes de área local corrientes todos estos parámetros vienen ya establecidos y el lector solamente tiene que seguir las instrucciones de los fabricantes de las redes.

El Cable de Fibra Optica

El cable de fibra óptica es un medio de transmisión de energía luminosa y como tal provee un ancho de banda muy alto, permitiendo velocidades de transmisión del orden de los cientos de gigahertz. La fibra óptica en sí consiste en un núcleo de vidrio o plástico rodeado por un revestimiento de otro material con un índice de refracción diferente (en el Capítulo IX describiremos las características físicas de las fibras ópticas con mucho más detalle). Generalmente, las fibras ópticas se juntan en forma de cable multifibra con armaduras protectoras de aluminio o de acero para darle fortaleza mecánica; las fibras en sí son extremadamente flexibles pero frágiles, y la protección que se les agrega las hace muy rígidas y por lo tanto más complicadas para instalar que el par trenzado o el mismo cable coaxial.

Además de su alto ancho de banda, las fibras ópticas tienen ventajas adicionales en comparación con los otros medios de transmisión. Puesto que los datos se transmiten en forma de luz, las fibras ópticas son inmunes al ruido electromagnético y su instalación no requiere elementos especiales de apantallamiento ni de protección contra humedad, gases tóxicos, etc. La fibra óptica es el medio de transmisión ideal para esos ambientes hostiles. Por otro lado, como la información viaja en una trayectoria unidireccional, se necesitan dos fibras para conectar los transmisores con los receptores, una para cada dirección de transmisión; además, como el costo actual de los cables de fibra óptica es más alto que el par trenzado o el cable coaxial, este requerimiento de un cable dual hace más costosa la instalación. Finalmente, la dificultad de su empalmado necesita equipos y personal especializado, y una vez que la red ha sido instalada es muy difícil efectuar cambios en ella. Estas desventajas hacen que la aplicación de las fibras ópticas en redes de área local en

muchas aplicaciones comerciales no se haya extendido como debiera. En la medida en que los costos de la fibra y de la instalación declinen debido a las mejoras tecnológicas que cada día emergen, la aplicación de las fibras ópticas hasta el nivel doméstico de usuario tendrá repercusiones inmensas en el ámbito de las telecomunicaciones.

El Espacio Libre

Para transmitir en la atmósfera o en el espacio exterior comúnmente se emplean tres técnicas: las microondas (radiofrecuencia), los rayos infrarrojos y el láser. La característica común en estas técnicas no guiadas es que la transmisión es en línea visual. Como los anchos de banda en estos medios son bastante altos (microondas, de 10^9 a 10^{10} Hz; infrarrojos, de 10^{11} a 10^{14} Hz), hay un gran potencial para la transmisión a muy altas velocidades. En el comercio se puede encontrar una variedad de sistemas inalámbricos para distancias cortas en una amplia gama de velocidades y frecuencias.

Estas técnicas de transmisión son particularmente apropiadas para enlaces de corta distancia, por ejemplo, entre edificios en una ciudad, en donde es muy difícil, si nó imposible, colocar conductores. Estas técnicas de línea visual requieren equipos de transmisión y recepción solamente en cada edificio y en general no resultan tan costosas como con los otros medios de transmisión.

En un enlace con infrarrojos los transmisores modulan una fuente incoherente de rayos infrarrojos. El sistema es muy fácil de instalar, es altamente direccional, muy difícil de interceptar y no se necesita licencias gubernamentales para su operación. Muchas de las denominadas "redes locales inalámbricas" son de este tipo y operan en la gama de 1 a 3 MHz. En el sistema con láser la operación es similar, pero en este caso el medio de transmisión es un rayo de luz coherente de diferentes longitudes de onda. Como los rayos láser pueden ser potencialmente peligrosos, en algunos países se requiere una licencia de operación y los equipos deben estar muy bien apantallados para evitar radiaciones indeseables.

Los rayos infrarrojos son muy susceptibles a las condiciones ambientales tales como la lluvia y la neblina, lo que no sucede con las microondas. En efecto, en las microondas, a las frecuencias utilizadas en la práctica y para las cortas distancias de operación, estos aspectos climáticos tienen poca importancia. La diferencia con los rayos infrarrojos es que las antenas deben montarse en el techo de los edificios. Por otro lado, las microondas son mucho menos direccionales y por lo tanto se puede presentar problemas de seguridad e integridad de la información en la trayectoria de transmisión. Como es el caso con todos los sistemas de radiofrecuencia, se necesita una licencia de operación expedida por las autoridades gubernamentales. El costo del sistema es superior al del sistema infrarrojo. En el Capítulo IX daremos más detalles sobre las microondas.

6.3.3. Redes de Area Local no Estandarizadas

Con la creciente utilización de computadoras de todo tipo y con la necesidad de interconectarlas en redes, poco a poco fueron apareciendo en el mercado redes de área local con distintas características y modos de operación. Estas redes fueron creadas por instituciones y fabricantes que, por supuesto, patentaron sus sistemas y fueron cautivando un mercado hasta constituirse virtualmente en "estándares de facto".

Las redes de área local más conocidas son:

- La Red Ethernet, desarrollada conjuntamente por la Digital Equipment Corporation (DEC), Xerox e Intel. Esta es una red en barra/árbol y su método de acceso es el CSMA/CD.
- La Red MAP (Manufacturing Automation Protocol) desarrollada por General Motors. Esta es una red de barra en anillo lógico con pase de contraseña (Token Bus).
- La Red en Anillo IBM (IBM Token Ring Network) desarrollada por la International Business Machines (IBM). Esta es una red en anillo con pase de contraseña (Token Ring).

Otros tipos de red de área local son: Arcnet, STAR-LAN, FIBER RING, HYPER-CHANNEL, WangNet (Wang Band, Interconnect Band), Net/One, XLAN, AT&T ISN, etc. y toda la gama de redes inalámbricas (WaveLan, BestLan, WiLan, etc). Se tiene también las redes de área local con conmutación matricial como, por ejemplo, las centrales computarizadas (CBX), las centrales automáticas digitales (PABX) y los Conmutadores de Circuitos Virtuales. No daremos detalles de estas redes; el lector puede encontrar mucha información en los catálogos de los fabricantes de redes.

6.3.4. Redes de Area Local Estandarizadas

Ante la creciente cantidad de redes de área local presentes en el mercado, el Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE) de los Estados Unidos decidió establecer el denominado Comité 802 para la elaboración de unos estándares para las redes de área local. En 1985, el Comité 802 completó un conjunto de normas que regulan el método de acceso, los medios de transmisión y otras características de las redes de área local. Estas normas han sido adoptadas por el Instituto Americano de Normas Nacionales (ANSI), la Oficina Nacional de Normas (NBS) y por la mayoría de los fabricantes de redes, incluyendo IBM, DEC y AT&T. Estas normas fueron revisadas por la ISO y emitidas en 1987 como normas internacionales con la designación ISO 8802; sin embargo, nosotros siempre nos referiremos a ellas como los estándares LAN IEEE 802.

Arquitectura de las Redes de Area Local

Como en el Modelo ISO/OSI, los modelos LAN IEEE 802 definen una arquitectura de red estratificada pero solamente para las Capas Enlace y Física; las capas superiores no están definidas. En la Fig. 6.19 se comparan los Modelos ISO/OSI y LAN IEEE 802.

En general, la Capa Enlace debe proveer servicios de control de error y control de flujo entre nodos en una red. Pero como en una LAN no hay nodos intermedios (el enrutamiento es innecesario), algunas funciones de Capa Red se pueden incorporar en la Capa Enlace. Estas funciones son los Servicios con Conexión, Servicios sin Conexión, Capacidad de Multiplexamiento y Servicios de Direccionamiento fin-a-fin.

En una LAN se tiene las estaciones conectadas a la red, y en las estaciones se están desarrollando procesos. Estos procesos pueden ser locales o pueden venir del

exterior de la estación; por ejemplo, un proceso puede ser una transferencia de archivo. Un proceso en una estación puede entonces conectarse a través de la LAN con otro proceso en otra estación de misma LAN. Esto implica dos niveles de direccionamiento: un nivel o dirección para el proceso que se está desarrollando en la estación (y que puede venir del exterior) y otro nivel o dirección de la estación de destino en la misma LAN. Como este doble direccionamiento implicaría dos capas (una capa de red adicional), en el estándar LAN 802 este problema se resolvió dividiendo la Capa Enlace en dos subcapas: la subcapa Control del Enlace Lógico (Logical Link Control, LLC) y la subcapa Control de Acceso al Medio (Media Access Control, MAC). En resumen, la dirección en la subcapa LLC debe identificar al usuario o proceso, mientras que la dirección en la subcapa MAC identifica una estación en la misma red.

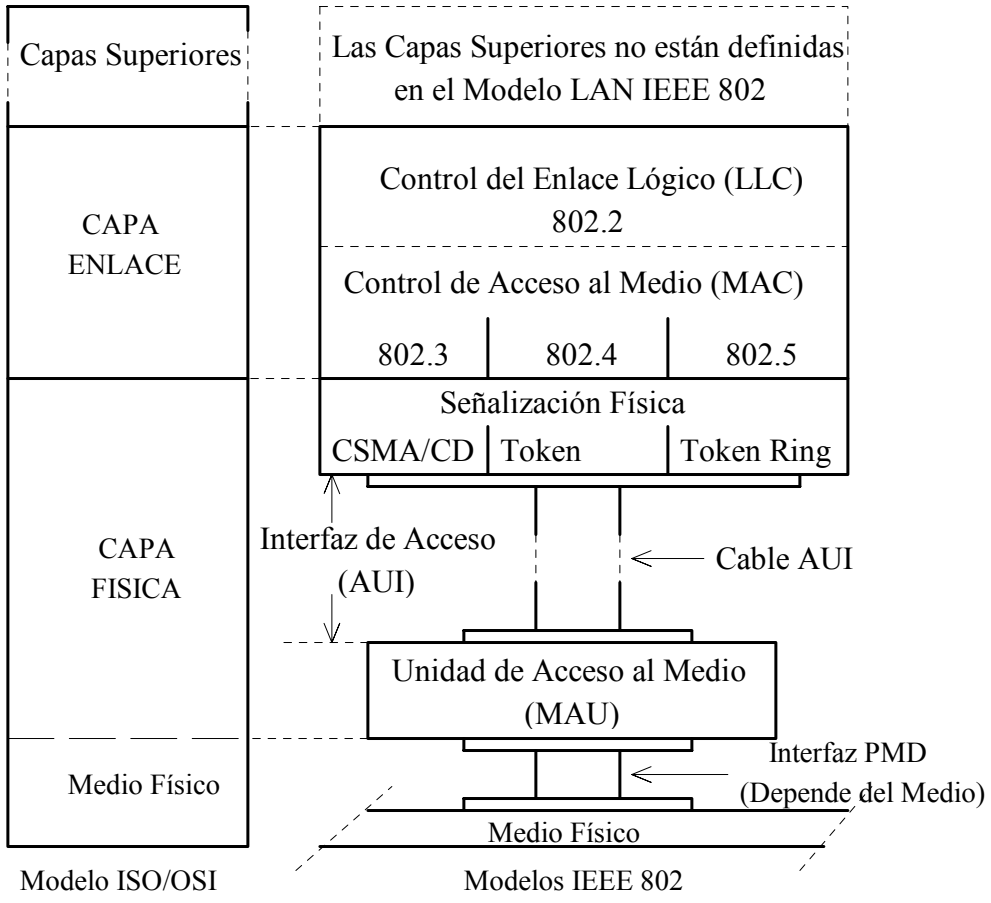


Fig. 6.19. Modelos ISO/OSI y LAN IEEE 802.

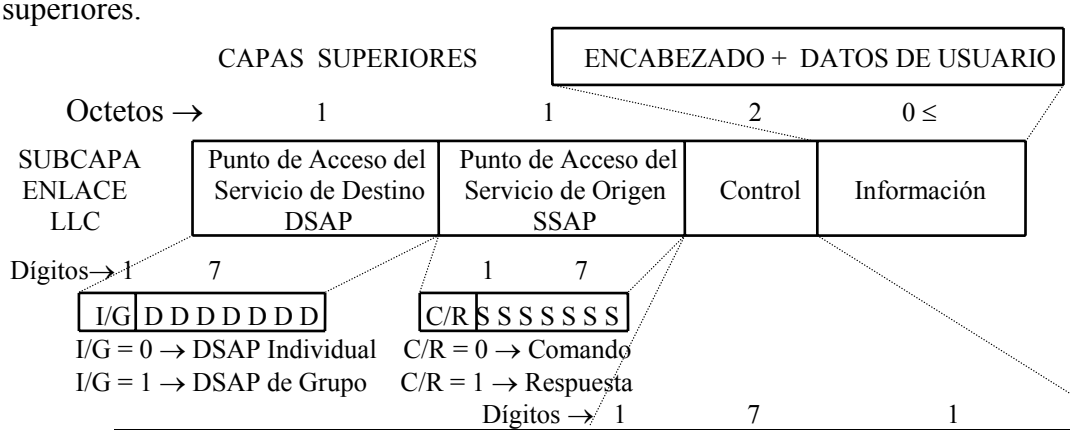
A nivel de Capa Física, los protocolos LAN IEEE 802 se encargan de los detalles técnicos de las características de señal tales como la codificación de línea, los tipos de cable, los conectores, la sincronización de reloj, la detección de colisiones, la calidad de la señal, las fallas en los equipos, etc. Todas estas características son altamente dependientes

del tipo de red en particular y más adelante veremos algunas de estas características al describir los diferentes tipos de LAN IEEE 802.

Subcapa Control del Enlace Lógico (LLC)

La subcapa LLC fue diseñada para servir de base a los diferentes tipos de LAN que fueron estandarizadas, y ella misma, la subcapa LLC, recibió la designación LAN IEEE 802.2. Como se puede observar en la Fig. 6.19, la subcapa LLC es común para los tres estándares especificados para la subcapa MAC: los estándares LAN IEEE 802.3, LAN IEEE 802.4 y LAN IEEE 802.5, las cuales describiremos más adelante.

En la Fig. 6.20 se muestra el formato LLC. Este formato consta de cuatro campos: dos de direccionamiento, uno de control y uno para la información que viene de las capas superiores.



	Formato		Comando	Respuesta	Dígitos → 1	7	1	7
					1	2 3 4 5 6 7 8	9	10 11 …16
Oper. Tipo 2	Servicio con Conexión	I	I	I	0	N(S)	P/F	N(R)
		S	RR	RR	1	0 0 0 0 0 0 0	P/F	N(R)
			RNR	RNR	1	1 0 1 0 0 0 0	P/F	N(R)
			REJ	REJ	1	0 0 1 0 0 0 0	P/F	N(R)
		U	SABME	----	1	1 1 1 P/F 1 1 0		
			DISC	----	1	1 0 0 P/F 1 1 0		
			----	UA	1	1 0 0 P/F 1 1 0		
			----	DM	1	1 1 1 P/F 0 0 0		
			----	FRMR	1	1 1 0 P/F 0 0 1		
Oper. Tipo 1	Servicio sin Conex. y sin ACK	U	UI	----	1	1 0 0 P/F 0 0 0		
			XID	XID	1	1 1 1 P/F 1 0 1		
			TEST	TEST	1	1 0 0 P/F 1 1 1		
Oper. Tipo 3	Servicio sin Conex. y con ACK	U	ACI0(*)	ACA0(*)	1	1 1 0 P/F 1 1 0		
			ACI1(*)	ACA1(*)	1	1 1 0 P/F 1 1 1		

(*) ACI0 = Acknowledged Connectionless Information. Secuencia 0.

ACI1 = " " " " 1.
ACA0 = " " Acknowledgement. Secuencia 0.
ACA0 = " " " " 1.

Fig. 6.20. Protocolo IEEE 802.2. Control del Enlace Lógico (LLC).

El campo DSAP (Destination Service Access Point) está asociado con un usuario particular o proceso que utiliza la estación; por ejemplo, si el usuario o proceso es un repetidor multipuerto, cada uno de los puertos de entrada al repetidor tendrá asociada una dirección, con un máximo de 128 direcciones. Asimismo, el primer dígito (I/G) del campo DSAP sirve para indicar direcciones individuales o de grupo. El objeto del campo SSAP (Source Service Access Point) es similar al del campo DSAP, con la diferencia de que el primer dígito (C/R) indica si se trata de un comando o de una respuesta.

El campo de control de LLC es idéntico al del protocolo HDLC con algunas variantes. En efecto, LLC utiliza solamente el modo de operación asincrónico balanceado (ABM), semejante al LAPB de X.25, y se utiliza para proveer los siguientes servicios, como se puede observar en la Fig. 6.20.

Servicios sin Conexión y sin Reconocimiento, Operación Tipo 1. Este es un servicio de datogramas que simplemente permite la transmisión y recepción de bloques LLC, sin necesidad de establecer previamente una conexión y sin medios de reconocimiento para saber si se han recibido o no. La recuperación de tramas o de errores se deja a las capas superiores. En la Operación Tipo 1 se utilizan tres comandos/respuesta: UI (información no numerada) para enviar una trama de datos; XID (exchange identification) para transmitir la clase de estación; y TEST para solicitar una prueba de la trayectoria LLC destino-LLC origen. La operación Tipo 1 está muy bien adaptada para comunicación sin conexión punto-a-punto, para comunicación "broadcast" o para usarla con un grupo particular de usuarios.

Servicios con Conexión. Operación Tipo 2. Este es un servicio con conexión para el establecimiento de circuitos virtuales entre los puntos de acceso al servicio o usuarios. Proporciona los medios para solicitar y ser notificado del establecimiento o terminación de una conexión lógica. En este caso el campo de control contiene dos octetos que contienen los números N(S) y N(R), de siete dígitos cada uno. La operación es idéntica a la del protocolo HDLC/LAPB en lo que se refiere a control de flujo y recuperación de errores, pero el dígito P/F se coloca a cero solamente en la última trama de una serie para indicar el final de la transmisión.

Servicios sin Conexión y con Reconocimiento. Operación Tipo 3. Este servicio proporciona un mecanismo mediante el cual un usuario puede transmitir una trama y recibir un reconocimiento sin necesidad de haber establecido previamente una conexión. Este servicio alivia a las capas superiores de la tarea de reconocimiento y se utiliza para transferencias punto-a-punto. A diferencia de los otros formatos LLC, este formato no está definido en el protocolo HDLC. En Operación Tipo 3 se define los comandos/respuesta ACI/ACA y para evitar la pérdida de tramas, se utiliza el dígito 8 que se alterna entre 0 y 1 en las tramas de comando (Secuencias 0 y 1); el receptor responde con tramas con el mismo número.

Subcapa Control de Acceso al Medio (MAC)

El Comité IEEE 802 definió tres estándares para los tres tipos de red de más uso en la práctica: la Red Ethernet de Xerox con la denominación LAN IEEE 802.3, la Red Token Bus MAP de la General Motors con la denominación LAN IEEE 802.4 y la Red Token Ring de la IBM con la denominación LAN IEEE 802.5, cada una de las cuales tiene

definida una Subcapa MAC, las cuales describiremos en breve. También definió los estándares 802.6 para las redes de área metropolitana y 802.11 para redes inalámbricas.

Las características de las tres primeras redes estandarizadas por el IEEE se muestran en la Tabla de la Fig. 6. 21.

CARACTERISTICAS DE LAS REDES DE AREA LOCAL ESTANDARIZADAS

CARACTERISTICAS	LAN IEEE 802.3 (*)	LAN IEEE 802.4 (**)	LAN 802.5 (***)
Topología	Barra / Arbol	Barra Física Anillo Lógico	Anillo Físico
Método de Acceso	CSMA/CD	Barra de Contraseña (Token Bus)	Anillo de Contraseña (Token Ring)
Forma de Transmisión	Banda de Base/ Portadora Modulada	Banda de Base/ Portadora Modulada	Banda de Base
Velocidad de Transmisión	10 Mbps	1 a 20 Mbps	1, 4 y 16 Mbps
Código de Línea	Manchester/DPSK	Manchester/ FSK, PSK	Differential Manchester
Medio de Transmisión	Cable Coaxial, Par Trenzado, Fibras Opticas	Cable Coaxial Fibras Opticas	Par Trenzado Fibras Opticas
Distancia Máxima entre Estaciones	1500 (Con Repetidores)	800 m	100 m
Número Máximo de Estaciones	100 (Segmento de 500 m)	45	260

(*) Ethernet: DEC, XEROX, Intel; (**) MAP: General Motors; (***) IBM Token Ring Network

Fig. 6.21. Características de las Redes LAN IEEE 802.

6.3.5. El Estándar LAN IEEE 802.3

El estándar LAN IEEE 802.3 fue desarrollado tomando como base la red Ethernet, en la cual el método de acceso es el CSMA/CD y la topología en barra/árbol. En el estándar LAN IEEE 802.3 hay una cantidad de opciones que le dan al usuario una completa flexibilidad y variedad en la mayor parte de las aplicaciones prácticas. La LAN IEEE 802.3 tiene dos características principales:

- La topología es en barra radiante. Esto significa que cada trama enviada por una estación es escuchada por todas las estaciones conectadas a la barra.
- La red opera en semidúplex. Esto significa que una estación puede estar transmitiendo o recibiendo tramas, nunca las dos cosa simultáneamente.

Para distinguir las diferentes opciones disponibles, el Comité 802 desarrolló una notación de la forma "**[Velocidad de Transmisión, en Mbps][Método de Señalización][Longitud Máxima del Segmento, en centenas de metros]".** Por ejemplo, la forma 10BASE5 designa a una red de velocidad 10 Mbps, en Banda de Base y con una longitud de 500 metros, y la forma 10BROAD36 designa a una red de 10 Mbps, de Portadora Modulada y con una longitud de 3600 metros.

Las alternativas definidas son: 10BASE5, 10BASE2, 1BASE5, 10BROAD36 y las nuevas denominaciones, que no siguen exactamente la convención, 10BASET y 10 BASEFL, 100BASETX, 100BASEFX, donde T y F significan “par trenzado” y “fibra óptica”, respectivamente. En la Tabla siguiente se muestra las características de algunas de estas alternativas.

OPCIONES DEL ESTANDAR LAN IEEE 802.3

Parámetro	10Base5	10Base2	10BaseT	10BaseFL	100BaseTX	100BaseFX	10Broad36
Velocidad Mbps	10	10	10	10	100	100	100
Longitud metros	500	185	100	2000	100	400	1800
Medio	Coaxial Grueso 50 Ohm	Coaxial Fino 50 Ohm	UTP CAT3/5	Fibra Optica MM	UTP CAT5	Fibra Optica MM	Coaxial RG-59 75 Ohm
Topología	Barra	Barra	Estrella	Estrella	Estrella	estrella	Barra

La especificación 10BASE5 fue la primera establecida por el Comité 802 en 1985; esta configuración se puede extender con cuatro repetidoras hasta un máximo de 2500 m (5 segmentos de 500 m) con una separación mínima entre estaciones de 2,5 m; los segmentos deben estar terminados en ambos extremos con resistencias de 50 Ohm, una de las cuales está conectada a tierra. Si se utilizan repetidores remotos y las longitudes máximas permitidas para los cables AUI (50 m), la longitud total de la red puede extenderse aún más. Una desventaja del cable grueso es que debido a su rigidez es más difícil de instalar, además de que es muy costoso.

Más tarde apareció una nueva versión, la 10BASE2, que utiliza cable coaxial fino, que es más flexible y menos costoso que el cable grueso, pero con la desventaja de que la longitud del segmento es solamente de 185 m con un máximo de 28 estaciones por segmento y una separación mínima entre estaciones de 0,5 m. Igual que en 10BADSE5, los segmentos deben terminarse con resistencias de 50 Ohm, una de las cuales está conectada a tierra.

El cable coaxial siempre ha sido una fuente de problemas en Ethernet debido a su carácter "broadcast". Una rotura del cable, la desconexión abrupta de una estación o la falta de una resistencia de terminación ocasionan el desplome de la red.

Las especificaciones 10BASET y 10BASEFL, para topologías barra en estrella, fueron las siguientes en aparecer. En el caso más sencillo, estas configuraciones consisten de un número de estaciones conectadas a un punto central, algunas veces denominado repetidor multipuerto o "hub"; el número de estaciones depende del número de puertos del repetidor. En 10BASET la distancia entre la estación y el repetidor multipuerto está limitada a 100 m, mientras que en 10BASEF, la longitud puede alcanzar los 500 m. La ventaja de los hub con topologías en estrella es que las conexiones son independientes y una falla en un cable no afecta a los demás, solamente a la estación afectada.

Una ventaja en el uso de repetidores multipuerto a una velocidad de 10 Mbps es que la configuración 10BASE5 se puede combinar con las configuraciones 10BASET y 10BASEFL. En efecto, en la red básica 10BASE5 los repetidores multipuerto 10BASET y 10BASEFL son vistos como simples estaciones, de modo que la red se puede extender con menos costo para su utilización en otras aplicaciones. Esta es una forma de distribución muy utilizada en oficinas y laboratorios.

Configuración Física de la Red LAN IEEE 802.3

La configuración física de esta red es muy similar a la de la red Ethernet, y a tal punto que la palabra "Ethernet" ya ha pasado a ser la denominación común de la Red LAN IEEE 802.3. Nosotros seguiremos esa costumbre y utilizaremos la forma "**Ethernet (802.3**)" para designarla.

En la Fig. 6.22 se muestra una implantación típica de las tarjetas de red Ethernet (802.3) cuyas características se muestran en la Tabla de la Fig. 6.21.

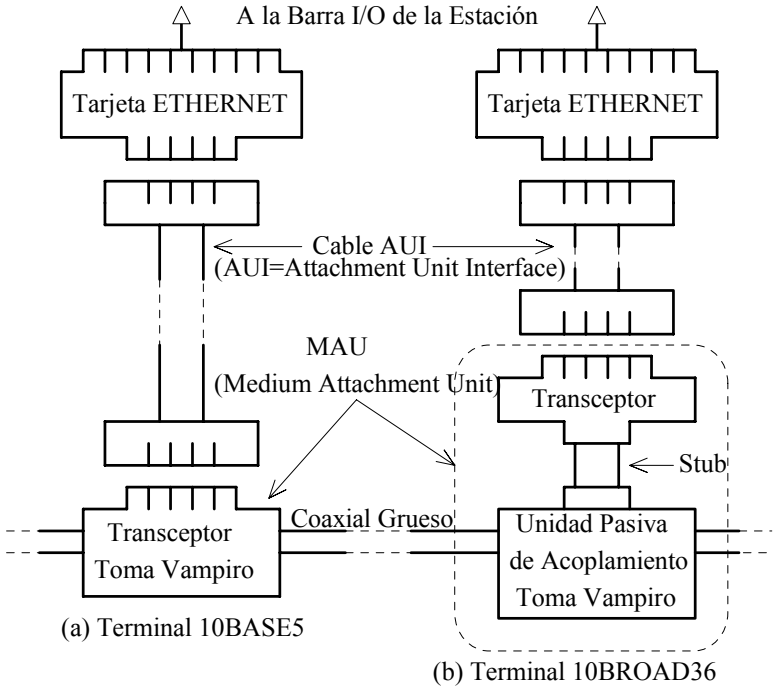


Fig. 6.22. Soporte Físico de la Red Ethernet (802.3)

La instalación del soporte físico en la red Ethernet (802.3) es relativamente fácil y adaptable para una gran cantidad de aplicaciones. Para la instalación de una red en particular, el lector debe seguir con cuidado las instrucciones que el fabricante incluye en la documentación de la red. Estos aspectos prácticos están fuera del propósito de este libro.

Una de las grandes ventajas de la red Ethernet (802.3) es su conectabilidad y capacidad para soportar diversos ambientes sobre un mismo medio. En la Fig. 6.23 se muestra un ejemplo de una red real.

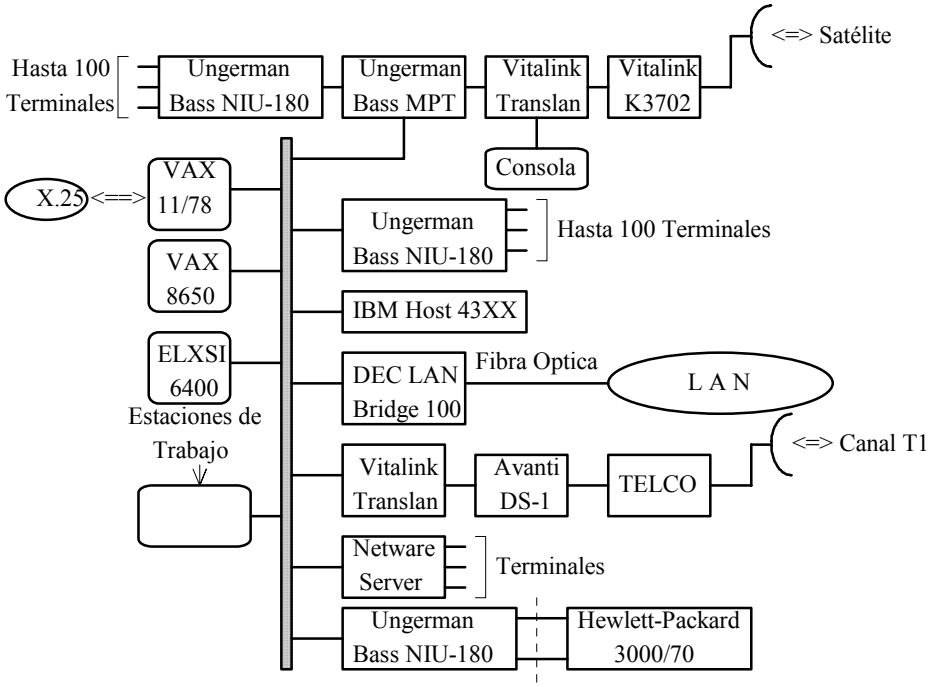


Fig. 6.23. Ambiente Operativo Multiproveedores y Conectabilidad.

En Ethernet (802.3) las estaciones no necesariamente están conectadas al mismo cable. Puede conectarse hasta 5 segmentos de cable de 500 metros a través de repetidoras, como se muestra en la Fig. 6.24.

Sin embargo, las especificaciones imponen límites a estas configuraciones. Por ejemplo, la máxima trayectoria de extremo a extremo es de 1500 metros y un segmento individual no puede tener una longitud superior a los 500 metros. Tampoco se puede usar más de dos repetidoras en la trayectoria que media entre dos estaciones. El número máximo de estaciones en cualquiera configuración es de 1024, con no más de 100 estaciones en cada segmento; de hecho, el número máximo de estaciones en una configuración de 5 segmentos prácticamente es de 500. En el caso de repetidoras remotas, el enlace entre punto a punto no puede tener más de 1000 metros. Sin embargo, en las redes prácticas no es conveniente ni deseable llegar a estos límites; por razones que veremos más adelante, es preferible extender la red mediante puentes y no con repetidoras.

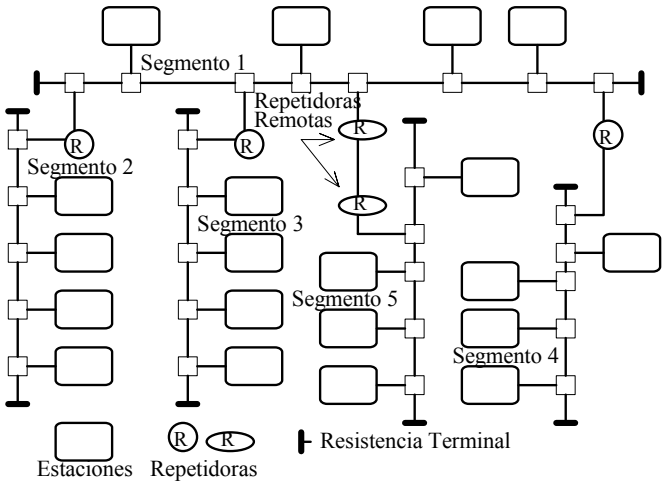


Fig. 6.24. Configuración Extendida de una Red Ethernet (802.3).

En la LAN IEEE 802.3 hay una norma conocida como la "Regla 5-4-3" para la estimación del número de segmentos y repetidoras en una red local. La Regla 5-4-3 divide la red en dos tipos de segmentos: segmentos de usuario y segmentos de enlace. Los segmentos de usuario tienen estaciones conectadas a ellos, mientras que los segmentos de enlace son utilizados por las repetidoras para interconectar los segmentos de usuario. La regla establece que "entre dos nodos cualesquiera pueden haber como máximo **cinco** segmentos a través de **cuatro** repetidoras o concentradores, y solamente **tres** de los cinco segmentos pueden contener estaciones de usuario". La Regla 5-4-3 asegura que las señales transmitidas se propaguen por toda la red dentro de un tiempo especificado. Como cada repetidora agrega un tiempo de propagación dado, la regla está diseñada para minimizar el tiempo de transmisión de las señales dentro de la red y disminuir el riesgo de colisiones.

Arquitectura de la Red LAN IEEE 802.3

La arquitectura de la Red LAN IEEE 802.3 comprende las subcapas LLC y MAC, correspondientes a la Capa Enlace ISO/OSI, y la Capa y Medio Físico correspondientes. En la Fig. 6.19 se muestra esta arquitectura y en la Fig. 6.25 la configuración de la subcapa MAC.

En la Fig. 6.25 se muestra la configuración de la subcapa MAC (802.3). Esta subcapa comprende los siguientes campos:

Preámbulo. Este campo de siete octetos es una secuencia de dígitos que tiene la forma 10101010……10101011 y se utiliza para la sincronización de bit de la trama.

Inicio de Trama (SFD). Este es un campo de 1 octeto de la forma 10101011 que se utiliza para la sincronización de la trama; indica simplemente el comienzo de una trama.

Dirección de Destino (DA). Este es un campo de 2 ó 6 octetos. Nótese que con 6 octetos se puede direccionar hasta $2^{48} = 2{,}81 \times 10^{14}$ destinos. Esto se hizo con el objeto de que cada usuario pudiera tener una dirección única; la red viene ya con estas direcciones

incorporadas en cada tarjeta. Nótese que esta dirección es la dirección de una estación en la red local. Como ésta es una red difusora ("Broadcast"), todas las estaciones escuchan las transmisiones y si una estación reconoce su dirección, ella acepta el resto de la trama; si nó, la ignora.

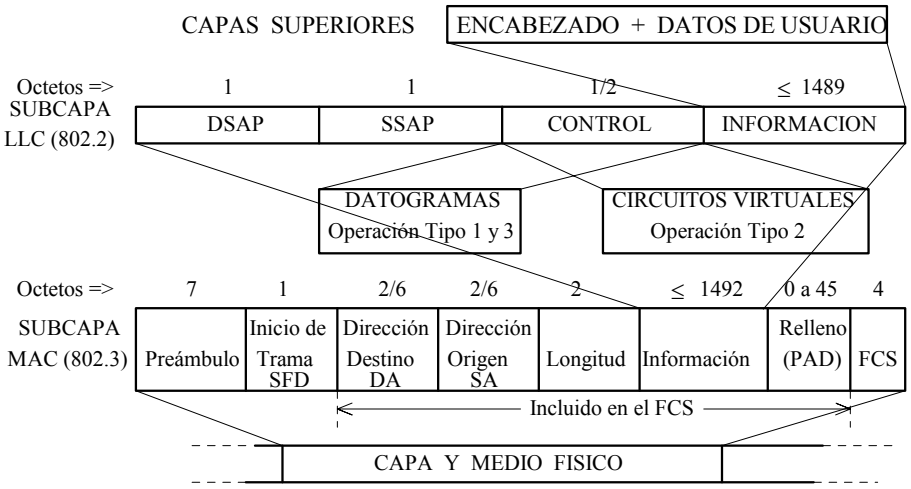


Fig. 6.25. Arquitectura del Estándar LAN IEEE 802.3.

Dirección de Origen (SA). Dirección local de la estación que transmite la trama. La longitud es igual a la de DA.

Longitud. Campo de 2 octetos que especifica el número de octetos en el campo Información (Subcapa LLC). La longitud máxima de la trama MAC desde el inicio de DA hasta el final de FCS es de 1518 octetos, mientras que la longitud mínima es de 64 octetos. Esta característica clasifica a la LAN IEEE 802.3, a nivel de enlace, como un protocolo por conteo de caracteres.

Información. En este campo se encapsula el contenido de la subcapa LLC.

Relleno o PAD. El relleno o "padding" es una secuencia de longitud variable que se transmite para asegurar que el valor mínimo de (Información + Relleno) ≥ 46 octetos.

FCS. Código de Redundancia Cíclica (CRC) de 32 dígitos utilizado para verificación de error.

Las funciones de la Capa Física comprende los medios de acceso (CSMA/CD), la sincronización, la generación del código Manchester, la modulación y demodulación DPSK, etc. cuyas características conocemos y no las describiremos aquí. Tampoco describiremos lo relacionado a la gestión de la red. Para más información, el lector puede consultar [Stallings, 1993] y los catálogos de los fabricantes de las redes.

La Red Ethernet (802.3) es la red más popular en aplicaciones en oficinas y en laboratorios. Sin embargo, en aplicaciones críticas como por ejemplo, en el control de procesos, la red tiene la desventaja de la incertidumbre del acceso; en un proceso crítico no

se puede permitir retardos en los instantes de ejecución de un comando. Por ejemplo, si un proceso por alguna razón entra en un lazo de inestabilidad, los sensores y controladores experimentarán un aumento en sus comandos con una gran probabilidad de que se produzca colisiones. Como consecuencia, una estación dada puede fallar en su acceso a la red en un momento crucial. En un ambiente de oficinas, por el contrario, una situación de congestión no tiene graves consecuencias: simplemente, el operador puede esperar a que la situación se normalice o dejar la tarea para después.

Tecnologías Ethernet de Alta Velocidad

Desde que la Red Ethernet (802.3) se desarrolló en la década de los 80, la potencia de procesamiento de los computadores personales y estaciones de trabajo se ha incrementado en forma exponencial, y la cantidad de aplicaciones y estaciones ha aumentado dramáticamente. Esto trajo como consecuencia una limitación en el ancho de banda disponible para cada estación. Para compensar esta limitación en el ancho de banda se han propuesto varias soluciones:

- Aumentar la velocidad de procesamiento sobre los 10 Mbps actuales
- Segmentar la red mediante puentes y enrutadores
- Instalar conmutadores LAN

Aumentar la velocidad sobre los 10 Mbps es una solución cara, porque significa prácticamente la instalación de una nueva red, aunque con las técnicas emergentes en fulldúplex se puede alcanzar 20 MHz. Con las nuevas tecnologías las velocidades han aumentado a 100 Mbs, 1 Gbps y 10 Gbps, pero esto implica nuevos equipos y tarjetas de red, así como disponer de un cableado normalizado que pueda soportar esas velocidades.

La segmentación de la red mediante puentes y enrutadores divide una LAN en múltiples LANs más pequeñas o subLANs. Por ejemplo, si 100 estaciones comparten una barra de 10 Mbps, las 100 estaciones estarán compitiendo por el acceso al canal y la velocidad neta de transmisión de cada estación será muy baja. Si se agregan, por ejemplo, tres puentes, se formarán cuatro subLANs de 10 Mbps y en cada subLAN estarán compitiendo ahora solamente 25 estaciones por el acceso al canal; por consiguiente, la velocidad neta en las estaciones aumenta. La operación de los puentes y enrutadores la veremos más adelante.

La operación de los conmutadores LAN es similar a la de los puentes. Los conmutadores LAN son dispositivos muy inteligentes que pueden leer las direcciones de una trama y la retransmiten a otra LAN o la bloquean o filtran si es necesario. Como consecuencia, la velocidad neta de transmisión en las estaciones aumenta. Los conmutadores son muy fáciles de instalar y generalmente utilizan el mismo cableado de 10 Mbps. Los conmutadores LAN permiten el establecimiento de enlaces de alta velocidad con otros conmutadores o servidores, al mismo tiempo que permiten el tráfico de estaciones de 10 Mbps. Esta tecnología se conoce actualmente como Ethernet Conmutada.

Como la Red Ethernet (802.3) no ha seguido este mismo tren, los fabricantes de sistemas han desarrollado nuevos estándares que aumentan la velocidad de transmisión hasta 100 Mbps y 1000 Mbps. Estos nuevos estándares definen la denominada Ethernet

Rápida (Fast Ethernet, FE), la Ethernet Conmutada (Switched Ethernet) y la Ethernet de Alta Velocidad (High Speed Ethernet, HSE) para operar a 100Mbps, y la Ethernet Gigabit para operar a 1 Gbps (la Ethernet a 10 Gbps está actualmente en estudio).

Las redes FE, Ethernet Conmutada, HSE y la Ethernet Gigabit utilizan el mismo metodo de acceso CSMA/CD que la Ethernet (802.3), lo cual es de gran importancia para la migración de la Ethernet estándar hacia las tecnologías Ethernet de Alta Velocidad; sin embargo, es necesario que el cableado sea el apropiado para operar a estas altas velocidades. En estos casos se tiene:

Para operar a 100 Mbps (Fast Ethernet, Ethernet Conmutada y HSE):

100BASETX, dos pares UTP, Categoría 5, distancia máxima: 100 m

100BASET4, 4 pares UTP, Categorías 3, 4 y 5, distancia máxima: 100 m

100BASEFX, fibras ópticas cable NA, distancias máximas: en HDX 412 m y en FDX 2000 m

Para operar a 1000 Mbps (Ethernet Gigabit):

1000BASESX, fibra óptica multimodo a 850 nm, distancias máximas: 260 m en HDX/FDX

1000BASELX, fibra óptica multimodo a 1300 nm, distancias máximas: 320 m en HDX y 420 m en FDX

1000BASECX, Par Trenzado STP, distancia máxima: 25 m

En el caso de la Ethernet Gigabit, el IEEE ha establecido un grupo de tareas, el IEEE 802.3z, para estudiar todos los aspectos del desarrollo de la Ethernet Gigabit.

Las mejoras introducidas en las prestaciones de la Red HSE a 100 Mbps ha permitido su aplicación a nivel industrial, lo cual no era posible con la Ethernet (802.3) estándar a 10 Mbps. En estos momentos en la red de campo Fieldbus Foundation se está introduciendo una barra o LAN HSE que reemplazará eventualmente a la Barra H2.

El lector puede descargar desde Internet mucha información sobre las tecnologías Ethernet de Alta Velocidad.

6.3.6. El Estándar LAN IEEE 802.4

La red MAP de la General Motors, cuya topología es en barra física y anillo lógico, ha sido estandarizada por el Comité IEEE 802 con la denominación LAN IEEE 802.4 (Token Bus). Como lo mencionamos anteriormente, en esta técnica las estaciones conectadas a la barra forman un anillo lógico, es decir, a las estaciones se les asigna posiciones en secuencia que se repiten cíclicamente. El ordenamiento físico de las estaciones es irrelevante e independiente de su ordenamiento lógico.

Arquitectura de la Red LAN IEEE 802.4

El principio de acceso al medio se basa en la utilización de una contraseña, la cual regula el derecho de acceso y cuya estructura se muestra en la Fig. 6.26.

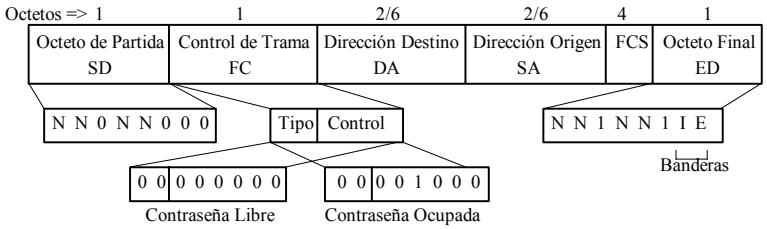


Fig. 6.26. Estructura de la Contraseña o Token. LAN IEEE 802.4.

La contraseña contiene los siguientes campos:

Octeto de Partida (SD). Este octeto indica el comienzo de la trama. Los dígitos N de este octeto violan el código Manchester para poder identificar unívocamente el octeto SD.

Control de Trama (FC). Este campo indica si es una trama que incluye al LLC; esta es la condición de "contraseña ocupada". Los dígitos en este campo controlan la operación de la trama MAC. Por ejemplo, para indicar "contraseña libre" o "contraseña ocupada".

Dirección de Destino (DA). Esta es la dirección de la próxima estación que debe tomar posesión de la contraseña. Esta estación toma el control del medio durante un tiempo especificado; en este lapso ella puede transmitir una o más tramas o puede interrogar estaciones y recibir respuestas. Cuando la estación no tiene más información para transmitir o cuando el tiempo de posesión de la contraseña ha expirado, ella retransmite la contraseña, ahora libre, con la dirección de la próxima estación permitida.

Dirección de Origen (SA). Dirección de la estación que emitió la contraseña.

FCS. Campo de verificación de error.

Octeto Final (DE). Este campo indica el final de la trama. Igual que en el octeto SD, los dígitos N violan el código Manchester a fin de poder identificar el octeto DE. Asimismo, se tiene las banderas I para indicar tramas intermedias y E para indicar errores en el FCS. Si I = 1, vienen más tramas; en la última trama de una serie se coloca I = 0. Si E = 0, indica que hubo error detectado por el FCS.

Normalmente la contraseña libre posee también un preámbulo, pero no lo representamos en la Fig. 6.26, pues este campo es para sincronización solamente; no lleva información.

Una vez que una estación entra en posesión de una contraseña libre, ella elabora la

trama MAC (que contiene al LLC), cuya configuración se muestra en la Fig. 6.27.

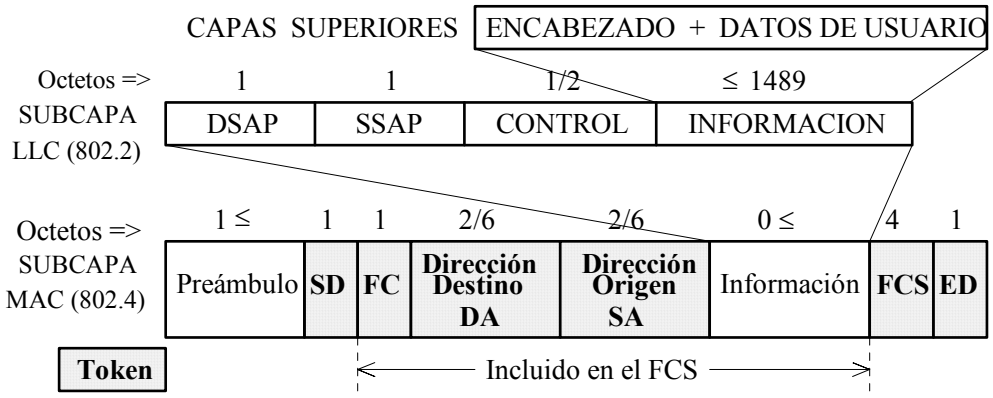


Fig. 6.27. Arquitectura del Estándar LAN IEEE 802.4

Nótese la forma como la contraseña (los campos sombreados) queda incorporada dentro de la trama MAC/LLC; la dirección de destino de la contraseña libre es ahora la dirección de origen de la trama MAC/LLC.

Los campos de la trama MAC/LLC son los siguientes:

Preámbulo. Este campo contiene uno o más octetos que son utilizados por los receptores como sincronización de bit y de trama. Se utiliza también en la contraseña libre.

Campos SD, FC y DE. Estos campos forman parte de la contraseña.

Dirección de Destino (DA). Igual que en el estándar LAN IEEE 802.3.

Dirección Origen (SA). Igual que en el estándar LAN IEEE 802.3.

Información. En este campo se encapsula el contenido de la subcapa LLC.

FCS. Igual que en el estándar LAN IEEE 802.3. Una condición de error se indica en la contraseña haciendo E = 0.

Nótese que la contraseña libre es básicamente una trama MAC pero sin el LLC.

El esquema de anillo lógico con pase de contraseña (token bus) es muy utilizado en sistemas de automatización de procesos pero requiere mucho mantenimiento. Como mínimo, las siguientes funciones deben ser efectuadas por una o más estaciones:

- Inicialización del anillo. Cuando se arranca la red o después de una falla total, la red debe ser inicializada. En este caso, una de las estaciones establece un algoritmo para establecer el orden o secuencia de acceso de las estaciones.
- Inserción y Remoción de una Estación. Debe establecerse mecanismos para la inserción de nuevas estaciones o para que una estación se retire de la red.

- Recuperación de errores. Algunas veces una dirección se duplica (dos estaciones aparecen con el mismo turno) o el anillo lógico se ha roto (ninguna estación cree que le llegó su turno). En estos casos, la red establece mecanismos para la recuperación de la condición normal de operación. Como en esta red no hay una estación monitora, todas las estaciones deberán ser capaces de tomar el control y efectuar las tareas de mantenimiento y de detección de posibles anormalidades operacionales.

La Red Token Bus (802.4) es bastante compleja por la variedad de técnicas de modulación que utiliza; en efecto, el código de línea básico es el Manchester Diferencial con modulación de portadora en FSK y PSK sobre un cable coaxial de banda ancha. Pero justamente este cable de banda ancha es una de las mejores ventajas del esquema token bus, pues como el ancho de banda es muy grande, tiene la capacidad para soportar diferentes tipos de tráfico por diferentes gamas de frecuencia. Por ejemplo, es posible agregar, sobre el mismo cable, canales de voz y de video para su uso en coordinación con un control de procesos o como funciones de comunicación independientes. Asimismo, la longitud del cable es potencialmente mayor que la de otras redes pues no está limitada por la necesidad evitar o detectar colisiones rápidamente.

6.3.7. El Estándar LAN IEEE 802.5

La técnica de la red en anillo tuvo sus comienzos en 1969 cuando se propuso el denominado “anillo de Newhall” como un prototipo experimental. Posteriormente, en 1986, la IBM desarrolló su IBM Token Ring Network, la cual fue la base para que el Comité IEEE 802 emitiera el estándar LAN IEEE 802.5, cuyo método de acceso ya hemos descrito anteriormente. Este mecanismo se puede entender mejor si observamos la configuración de la contraseña y los formatos LLC/MAC, en las Fig. 6.29 y Fig. 6.30.

El principio del sistema se basa en la circulación de una secuencia de datos, la contraseña, por un anillo físico al cual están conectadas las estaciones mediante interfaces conocidas como “unidades de acceso”. Como ya lo explicamos anteriormente, una estación que desea transmitir espera la llegada de la contraseña a la cual marca (haciendo T = 1) y le agrega la información que desea transmitir. Esta trama (la trama MAC) circula a través de todas las unidades de acceso, y aquella unidad que reconoce su dirección en la trama, copia la información, vuelve a marcar la trama (banderas A y C) y la retransmite. Cuando esta trama llega a la estación de origen, se verifica que ha sido recibida y se le elimina toda la información adicional a la contraseña; esta contraseña libre se retransmite y en la primera estación que tiene información para transmitir se repite el proceso. Nótese que una estación puede transmitir más de una trama consecutivamente; esta operación se controla mediante un temporizador de posesión de la contraseña: la estación puede transmitir tramas consecutivamente hasta que el tiempo de posesión expira, emitiendo ahora una contraseña libre.

Aunque el control está distribuido entre las estaciones conectadas al anillo, a una de las estaciones se la designa como “monitora activa” de la red. Sus funciones son las de asegurar la operación correcta del anillo; en operación normal, la estación monitora coloca el dígito M = 1 en la contraseña y un número de prioridad mayor que cero en el campo

Prioridad. Si en el siguiente paso el dígito M aún está a UNO, la estación monitora coloca un valor de cero en el campo Prioridad ya que la prioridad no fue utilizada.

Configuración Física de la Red LAN IEEE 802.5

La red Token Ring (802.5) tiene una topología básica en anillo, pero puede configurarse como un anillo en estrella mediante el uso de las Unidades de Acceso Multiestación (MAU). La red original IBM fue diseñada para trabajar a 4 Mbps sobre par trenzado apantallado, pero al ser estandarizada, se repotenció para trabajar entre 4 y 16 Mbps sobre par trenzado apantallado y no apantallado, fibras ópticas y cable coaxial.

Los equipos básicos de esta red son las MAU, las cuales permiten la interconexión al anillo de estaciones de trabajo, servidores, computadoras de gran capacidad (Main Frames), etc. Las MAU generalmente vienen con ocho entradas y tienen mecanismos para mantener cerrado el anillo en caso de falla en alguna de las estaciones. Cuando se aumenta la distancia o el número de estaciones, las señales que circulan en el anillo generalmente experimentan degradación y distorsión siendo necesaria la utilización de repetidoras. En Token Ring (802.5) se utiliza repetidoras para cable trenzado (TCR), repetidoras para fibras ópticas (TFR), repetidoras de ramal (TLR), además de protectores de falla en los cables (TCP). Estos dispositivos pueden estar incorporados dentro de la MAU o pueden ser unidades separadas. Igual que con las Tarjetas Ethernet, mediante las Tarjetas de Interfaz Token Ring (TRIC) un computador personal corriente puede convertirse en una estación Token Ring.

En la Fig. 6.28 se muestra una configuración típica de una red Token Ring (802.5).

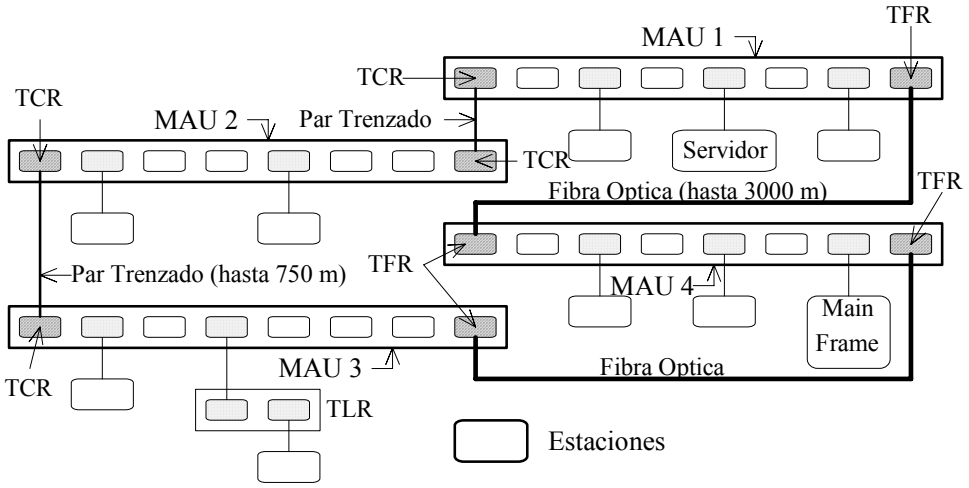


Fig. 6.28. Configuración Típica de una Red LAN IEEE 802.5 (Token Ring).

Arquitectura de la Red LAN IEEE 802.5

La contraseña está formada por los siguientes campos, Fig. 6.29:

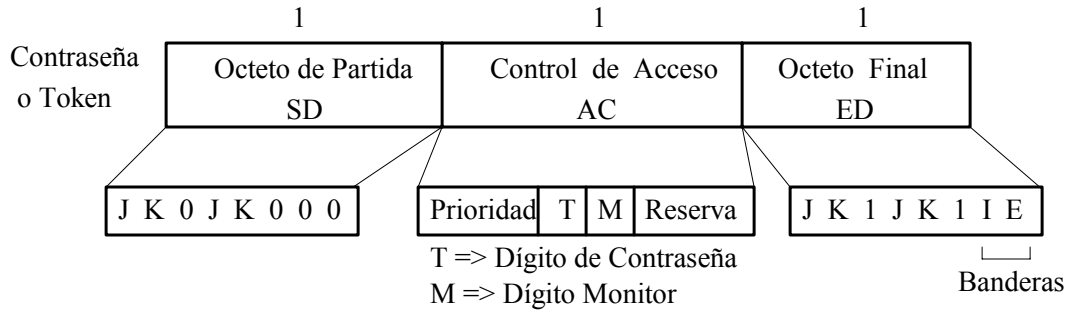


Fig. 6.29. Estructura de la Contraseña o Token. LAN IEEE 802.5.

Octeto de Partida (SD). Este octeto indica el comienzo de una trama MAC. Los dígitos J y K de este octeto violan el código Manchester para poder identificar unívocamente el octeto SD.

Control de Acceso (AC). Este campo contiene varios subcampos de control: (a) el subcampo de Prioridad, de 3 dígitos, para indicar el orden de prioridad de una contraseña y cuál estación la puede utilizar para transmitir; (b) el dígito monitor M, que se utiliza para la recuperación de fallas de señal, y (c) el dígito T, el cual cuando T = 0 indica que la contraseña está libre, y cuando $T = 1$, es que la contraseña está ocupada; (d) tres dígitos de reserva que se pueden utilizar para permitir que estaciones con mensajes de alta prioridad soliciten en una trama que la próxima contraseña les sea adjudicada; esta adjudicación la hace la estación monitora.

Octeto Final (DE). Este campo indica el final de la trama. Igual que en el octeto SD, los dígitos J y K violan el código Manchester a fin de poder identificar el octeto ED. Asimismo, se tiene las banderas I para indicar tramas intermedias y E para indicar errores en el FCS. Si I = 1, vienen más tramas; en la última trama de una serie se coloca I = 0. Si E = 0, indica que hubo error detectado por el FCS.

Una vez que una estación entra en posesión de una contraseña libre, ella elabora la trama MAC, cuya configuración se muestra en la Fig. 6.30.

Nótese la forma como la contraseña (los campos sombreados) queda incorporada dentro de la trama MAC.

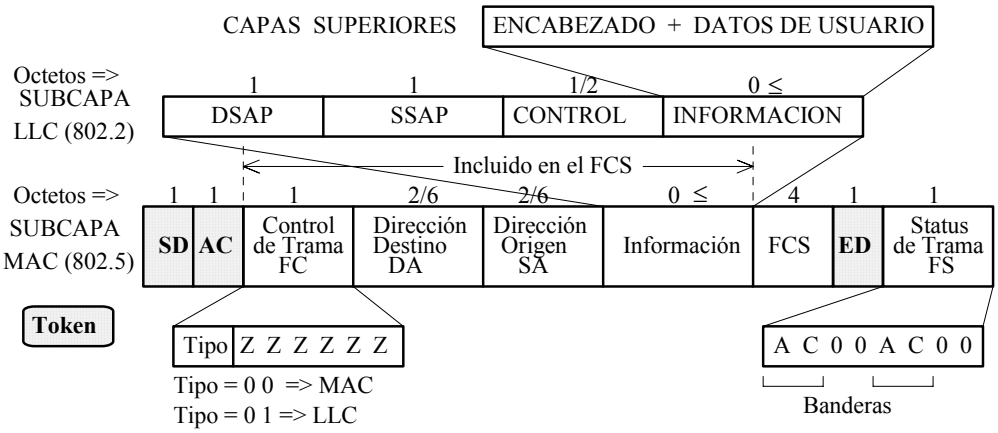


Fig. 6.30. Arquitectura del Estándar LAN IEEE 802.5 (Token Ring).

Los campos de la trama MAC son los siguientes:

Campos SD, AC y ED. Conforman la contraseña.

Control de Trama (FC). Indica si la trama contiene un LLC con Información, si nó, los dígitos en este campo controlan la operación del protocolo MAC.

Campos DA y SA. Descripción igual que en Token Bus.

Información. En este campo se encapsula el contenido de la subcapa LLC.

Campo FCS. Igual que en Token Bus.

Estatus de Trama (FS). Contiene los dígitos de reconocimiento A y C; con estos dígitos se pueden diferenciar tres condiciones en la estación de destino:

(a) Estación de destino inactiva o no existente: A = 0 y C = 0

(b) Condición de "ocupado"; estación de destino activa pero no puede copiar la trama: A = 1 y C = 0

(c) Condición normal; estación activa y trama copiada: A = 1 y C = 1.

La red Token Ring (802.5) ofrece algunas ventajas sobre las otras redes de área local vistas; entre ellas la facilidad de instalación y la confiabilidad. La facilidad de instalación es consecuencia de la topología anillo en estrella, que es la forma de instalación normalmente utilizada. Esta red es muy fácil de instrumentar y de modificar, y además tiene la habilidad de operar sobre distintos tipos de medio. La confiabilidad se alcanza debido a su diseño redundante y tolerante a fallas lo cual asegura una operación continua aún en caso de falla en alguna estación. La principal desventaja de esta red frente a la red Ethernet (802.3) es su costo.

Para más información, el lector puede consultar [Stallings, 1993; Barksdale, 1986] y los correspondientes catálogos de los fabricantes de las redes, cuya cobertura de estas redes es muy completa.

6.4. REDES DE AREA METROPOLITANA

6.4.1. Introducción

La Red de Area Metropolitana, MAN, es un nuevo concepto dentro del área de las Telecomunicaciones. En términos generales, una MAN es un sistema de red que puede proveer facilidades de conmutación (switching) a alta velocidad (100 o más Mbps) a distancias típicas propias de un área metropolitana (por ejemplo, una ciudad y su vecindad inmediata), y a diferencia de las LANs, su conectabilidad es de una naturaleza tal que permite simultáneamente el tráfico de voz, datos y video.

Pudiera pensarse que la MAN es simplemente una LAN extendida para cubrir una superficie del tamaño de una ciudad. Esto no es exactamente así, pero algunos conceptos y técnicas desarrollados para las LANs se aplican también en la MAN.

Estructura de la MAN

Una MAN tiene una estructura similar a una LAN distribuida. Los nodos o estaciones están conectados a un medio común de alta velocidad, y cada nodo recibe todas las transmisiones (como en una barra o un anillo) pero solamente acepta aquellos mensajes o paquetes dirigidos a él. Este procedimiento se denomina algunas veces "conmutación mediante escucha selectiva". Generalmente la dirección está contenida en el paquete; sin embargo, en algunos casos no es así, de modo que el nodo debe utilizar otros métodos para determinar cuales son los paquetes dirigidos a él.

Las normas para la MAN han sido establecidas por el Comité Proyecto 802 de la IEEE y se originaron cuando se presentó el problema de cómo interconectar redes de área local a distancias mayores de unos cuantos kilómetros sin que se produjera retardos o congestión causados por señales de baja velocidad. Consecuentemente, la interconexión de las LANs ha sido uno de los objetivos del Comité IEEE 802 que con el agregado de la telefonía digital y video, generó el concepto de la red de área metropolitana.

Características

El Comité IEEE 802 estableció que una MAN debería proporcionar un "soporte masivo a las señales de voz, datos y video" y que tendría que ser "optimizada para distancias entre 5 y 50 km". Hasta el presente se ha presentado diferentes soluciones y las investigaciones inherentes siguen en progreso. En este libro solamente describiremos dos de estas soluciones que han sido estandarizadas: la FDDI y la DQDB, las cuales veremos más adelante.

El Comité IEEE 802 ha formulado una norma general como definición y objetivos de las MAN. Esta norma define un nivel o protocolo de control de acceso al medio y un nivel físico, similares a los dos primeros niveles de la X.25. La norma establece las directivas para el intercambio en fulldúplex de señales digitales entre nodos, separados hasta 50 km, que comparten el mismo medio de transmisión, y que proporcionan servicios que requieren un ancho de banda garantizado y un retardo restringido. Las velocidades de transmisión pueden ir desde 1 Mbps hasta el valor límite del medio utilizado (del orden de los 100 Mbps). Esta norma es el Estándar IEEE 802.6 de la DQDB.

Las características claves de la Red de Area Metropolitana son:

- Alta velocidad. Una MAN está diseñada para soportar un número relativamente grande de dispositivos de diferentes velocidades, incluso redes de área local. Por lo tanto, su capacidad debe ser alta. Las líneas de acceso y las velocidades de transmisión van desde 1,5 Mbps hasta 2,4 Gbps.
- Gran Cobertura Geográfica. Como su nombre lo indica, una MAN está diseñada para cubrir un área que se extiende desde unas pocas cuadras hasta el área de una ciudad de buen tamaño.
- Soporte Integrado para Voz /Datos. En muchos casos, una MAN será usada no solamente para interconectar LANs y grandes computadores, sino también como una alternativa o complemento del servicio telefónico local. Por lo tanto, la MAN puede soportar trafico de redes de conmutación de paquetes como de redes de conmutación de circuitos. Esta última capacidad le permite la transmisión de imágenes estáticas o video de banda angosta y la interconexión directa entre grandes computadores para la transmisión de grandes volúmenes de datos.
- Reducción de los Costos de Comunicación. Los costos de comunicación se pueden reducir en una MAN al compartirse canales de alto ancho de banda y mediante la reducción de los costos de la interfaz usuario/red o de los nodos de red.
- Tecnologías de banda ancha multiradiante (Fast Packet). Es una red multicorporativa tanto pública como privada y la gestión de red es distribuida.

El concepto de MAN todavía está en proceso de consolidación y debido a la rápida evolución de la tecnología, aún puede presentarse nuevas soluciones. Algunas de estas soluciones ya han sido estandarizadas por los Organismos Internacionales, pero el concepto de MAN sigue siendo objeto de intensas investigaciones pues es el nexo que llevará a la consolidación de la Red Digital de Servicios Integrados de Banda Ancha (BISDN).

Modelos de Referencia

En las páginas siguientes describiremos algunas de las Redes de Area Metroplitana actuales y también algunas de las tecnologías de alta velocidad (Fast Packet) y los estándares de transmisión más recientes. En la Fig.6.31 se muestra los correspondientes modelos de referencia en relación con el Modelo de Referencia ISO/OSI.

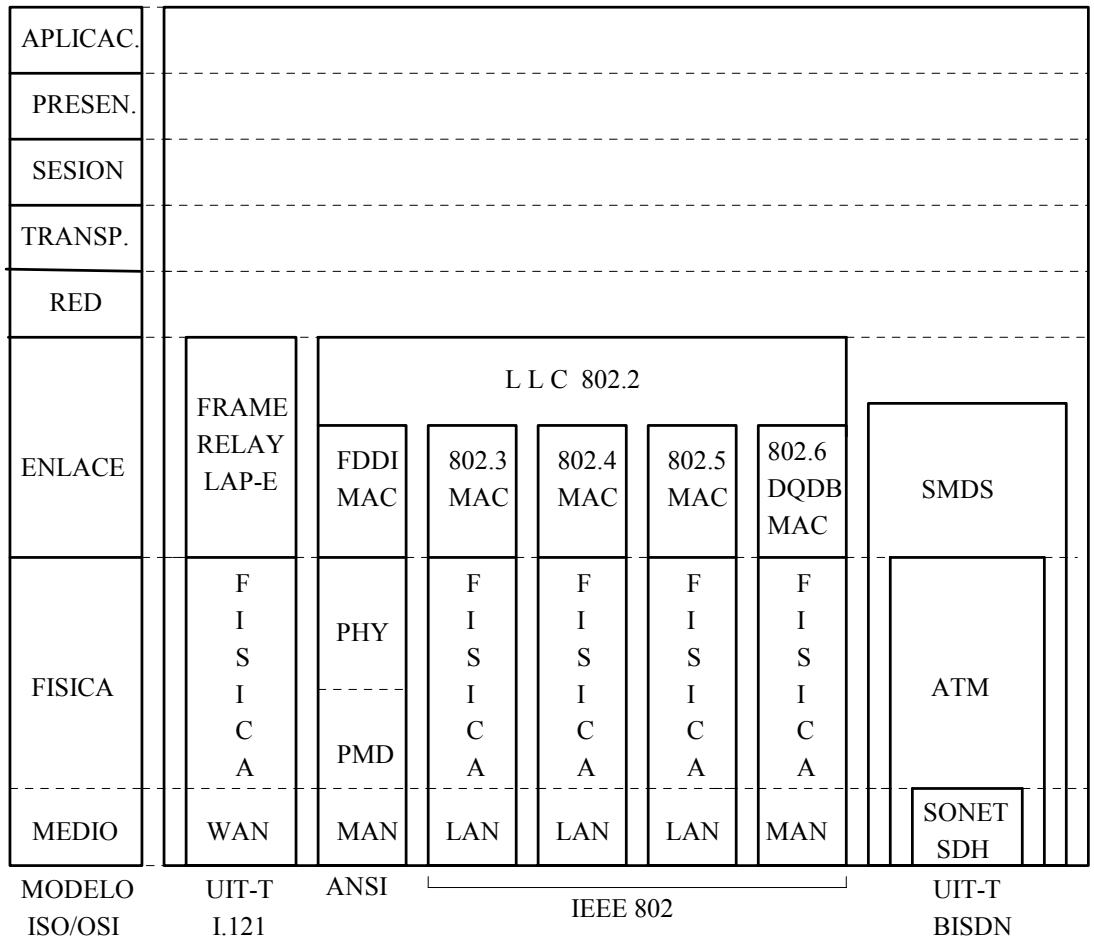


Fig. 6.31. Modelos de Referencia.

6.4.2. El Estándar FDDI

La FDDI (Fiber Distributed Data Interface) es un sistema de transmisión óptico, en la forma de un anillo doble con una topología similar al Estándar IEEE 802.5 Token Ring. La FDDI fue propuesta por el Grupo de Trabajo X3T9.5 de la ANSI y se aplica como un "backbone" para interconectar redes de área local, computadores de alta capacidad y grandes sistemas de almacenamiento de información. A la FDDI original algunas veces se la considera como una LAN, pero por sus nuevas características agregadas (FDDI-II), velocidad, capacidad y tamaño la podemos considerar más bien como una MAN.

Características

La velocidad de transmisión básica es de 100 Mbps, pero mediante el código de línea 4B/5B se produce en el medio una velocidad de modulación de 125 Mbaudios con una longitud de onda óptica de 1300 nm y un porcentaje de error (BER) de 10^{-9}. Esta codificación facilita la extracción y la sincronización de reloj. Es un sistema muy confiable. La red puede soportar un total de 500 estaciones con una separación máxima de 2 km entre

estaciones adyacentes dentro de un radio de 100 km. El tamaño máximo de los paquetes es de 4500 octetos. La tolerancia a fallas permite el funcionamiento de la red aún cuando se rompa un enlace o falle una estación. Aunque la FDDI original contemplaba únicamente conmutación por paquetes, posteriormente el estándar se extendió para incluir también la conmutación por circuitos con lo que se facilita la transmisión de voz y video de banda angosta; ésta es la FDDI-II.

Una de las características más importantes de la FDDI es la utilización de las fibras ópticas como medio de transmisión

Configuración

La FDDI emplea una topología en doble anillo que permite una mayor flexibilidad y confiabilidad. Como veremos a continuación, hay estaciones, denominadas de Clase A, que se conectan a los dos anillos; mientras que hay estaciones, denominadas de Clase B, que se conectan a un solo anillo, Fig. 6.32.

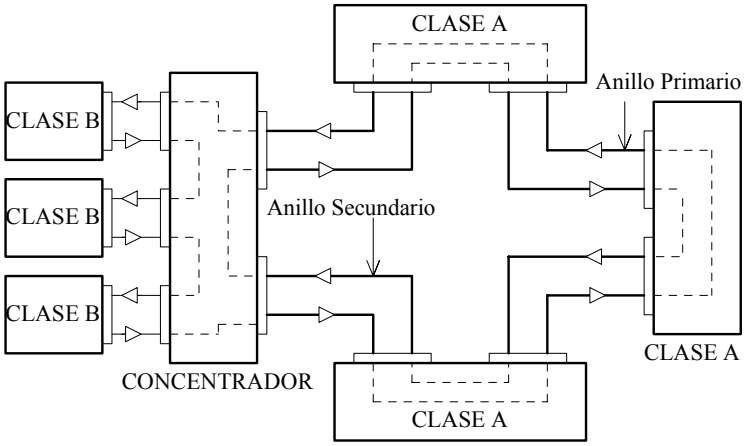


Fig. 6.32. Configuración Física de la FDDI.

Como puede observarse en la Fig. 6.32, la FDDI está compuesta por un anillo primario y un anillo secundario en los cuales la información viaja en sentidos contrarios. Las estaciones Clase A están conectadas a los dos anillos y tienen la capacidad de reconfigurar la red en caso de rotura de los anillos o falla en una estación. Por otro lado, las estaciones de Clase B están conectadas solamente al anillo primario a través de un concentrador y no pueden reconfigurar al anillo aún si ocurre una falla. La reconfiguración, algunas veces denominada “capacidad de cicatrización”, solamente puede ser efectuada por las estaciones Clase A o por los concentradores. El concentrador es una forma especial de estación de Clase A utilizado para conectar todas las estaciones de Clase B en una configuración de anillo en estrella.

Modelo de Referencia y Arquitectura

La FDDI posee una arquitectura estratificada, Fig. 6.33, que ocupa las capas correspondientes a las capas Física y Enlace del Modelo ISO/OSI.

Como puede observarse en la Fig. 6.33, la FDDI está compuesta por las subcapas MAC, PHY, PMD y SMT, cuyas funciones son:

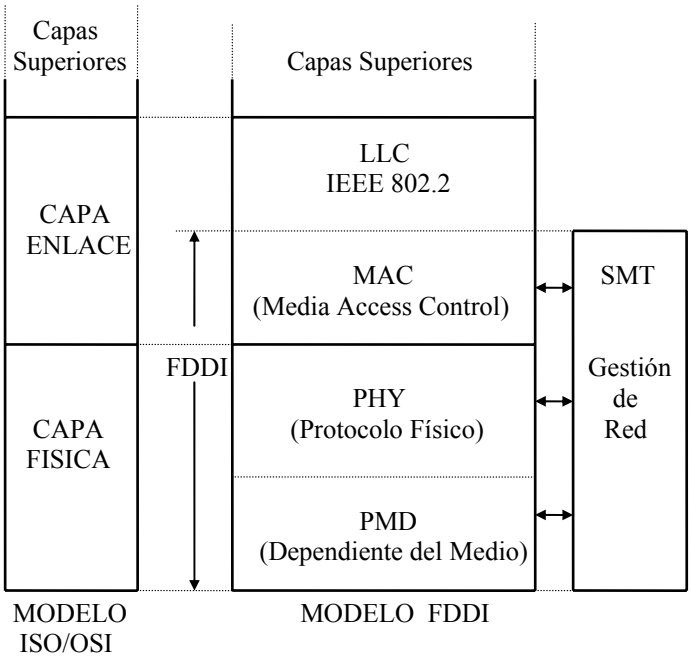


Fig. 6.33. Modelo de Referencia del Estándar FDDI.

Subcapa MAC:

- Descripción e interpretación de la trama
- Generación y repetición de tramas
- Emisión y captura de Tokens
- Control de los temporizadores
- Monitoreo de los anillos
- Direccionamiento
- Detección y Recuperación de errores

Subcapa PHY:

- Regulación y sincronización del reloj de 125 MHz
- Codificación 4B/5B y control de los símbolos. La codificación 4B/5B convierte grupos de 4 dígitos en grupos de 5 dígitos; los grupos de 5 dígitos se denominan "símbolos". Esta codificación se hace para mejorar el balance en CC y para simplificar la sincronización
- Definición del Protocolo Estación-Estación (Hand-Shaking)
- Establecimiento de los límites de la trama para transmisión a y desde las capas superiores

Subcapa PMD:

- Control del enlace electro-óptico
- Codificación de línea NRZI
- Selección de la potencia y la longitud de onda para la transmisión óptica
- Establecimiento de los requerimientos de cableado y conectores

- Limitación de la atenuación y del jitter.
- Establece el método para aislar una estación en caso de falla

Capa de Gestión SMT:

- Inserción y remoción de estaciones
- Configuración del anillo
- Servicios generales de gestión de la red

En la FDDI no se prescribe un protocolo para la subcapa LLC; sin embargo, siempre se utiliza el protocolo LLC IEEE 802.2. En este caso, las funciones de la subcapa LLC son:

- Servicio sin Conexión y sin Reconocimiento (LLC Tipo 1)
- Solamente puede enviar y recibir tramas
- Transmisión punto a punto, multipunto y radiante (broadcast)
- Servicio con Conexión (LLC Tipo 2)
- Transmisión punto a punto entre puntos de acceso al servicio
- Permite Control de Flujo y Recuperación de Errores
- Procedimientos de Control
- Utiliza un protocolo Tipo HDLC
- Tramas de Información, Supervisión y No Numeradas
- Secuenciamiento y Reconocimiento en “piggyback”
- Control de Flujo

En cuanto a la arquitectura de la FDDI, ella es muy parecida la del estándar IEEE 802.5 Token Ring, pero difiere un poco de ella en lo que se refiere al manejo de la contraseña, a la asignación de prioridades y en la gestión del protocolo.

En la Fig. 6.34 se muestra la forma de la contraseña o token en la FDDI.

Símbolos (*) =>	16	2	2	2
	Preámbulo PA	Octeto de Partida SD	Control de Trama FC	Octeto Final ED

(*) Un "símbolo" equivale a 4 dígitos de datos ó 5 dígitos de código

Fig. 6.34. Estructura de la Contraseña o Token en FDDI.

Una estación en posesión de la contraseña tiene el derecho de transmitir datos y puede transmitir una cantidad de tramas dentro de un intervalo de tiempo dado. Cada estación deja libre a la contraseña cuando no tiene más información para transmitir o cuando el tiempo de posesión de la contraseña ha expirado. Asimismo, cada estación retransmite tramas de las estaciones anteriores y copia toda aquella trama que tiene su propia dirección. La estación de destino establece el estado de la detección de error, la dirección de los reconocimientos, el estado de la duplicación de tramas, la información propiamente, y retransmite la trama a la próxima estación. La estación que ha transmitido una trama debe removerla una vez que ella ha dado una vuelta completa al anillo. La recuperación de errores es manejada por las capas superiores.

En la Fig. 6.35 (a) a (h) se muestra el mecanismo de circulación de la contraseña.

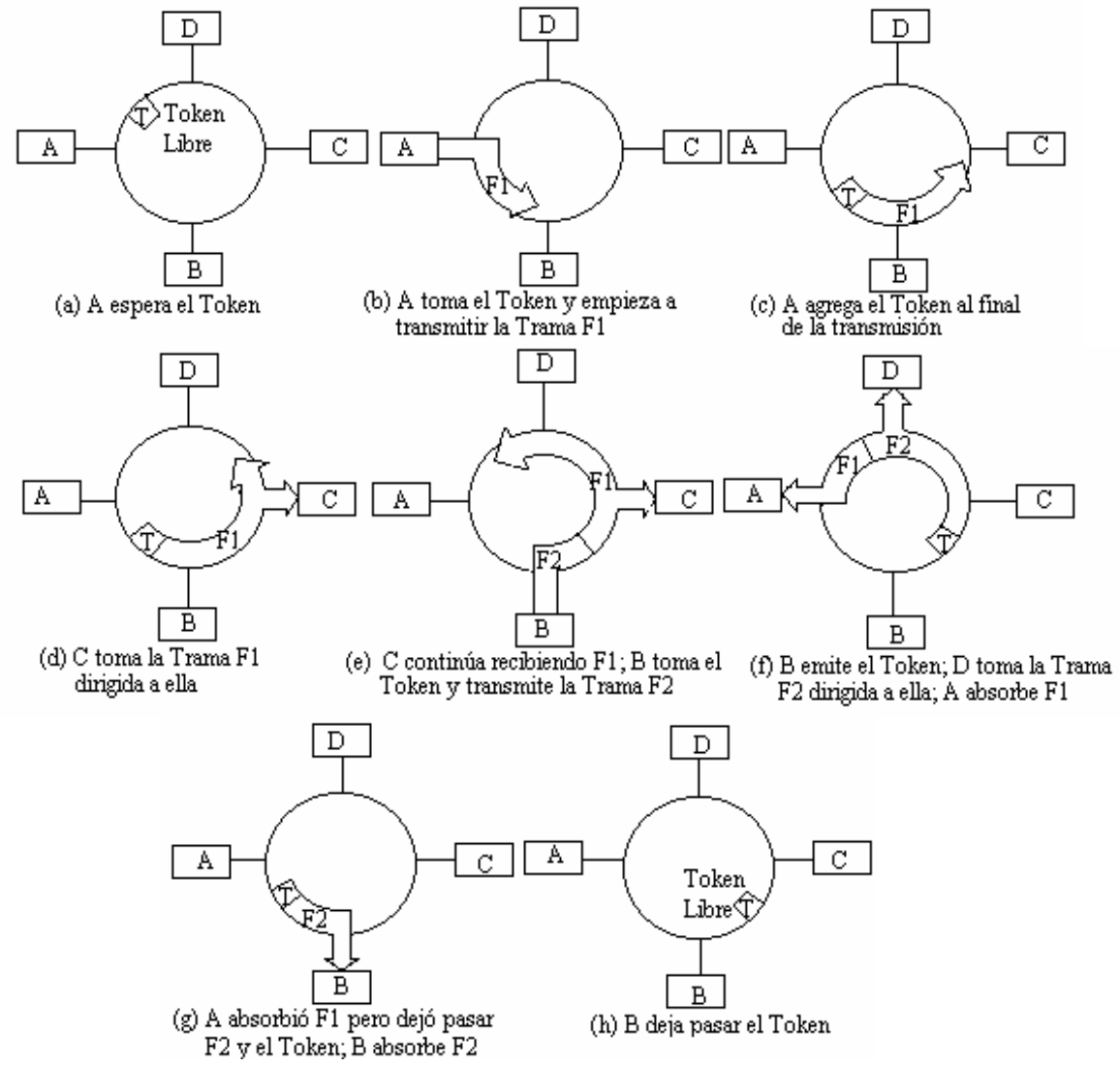


Fig. 6.35. Mecanismo de Circulación de la Contraseña o Token en FDDI.

Arquitectura de la FDDI

El formato de la arquitectura en FDDI se muestra en la Fig. 6.36.

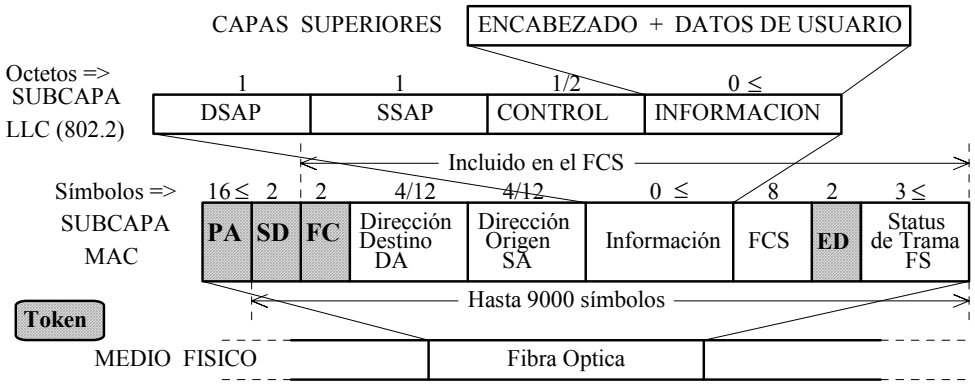


Fig. 6.36. Arquitectura del Estándar FDDI.

Nótese el parecido con la arquitectura del estándar LAN IEEE 802.5 Token Ring.

La Red FDDI-II

La FDDI-II es una extensión de la FDDI que permite además la transmisión por conmutación de circuitos. En FDDI, toda la información es transmitida en tramas de duración variable. Cada trama incluye los octetos limitadores de trama y la dirección de las estaciones de destino MAC; pero la FDDI no es apropiada para la transmisión de datos en forma continua y a velocidad constante entre dos estaciones. Aún la denominada clase de tráfico sincrónico de la FDDI apenas soporta un mínimo de velocidad fija sostenida. Este tipo de transmisión es típico en las aplicaciones de conmutación de circuitos, tales como la voz y el video digitalizados. FDDI-II provee entonces un servicio de conmutación de circuitos mientras que mantiene también el servicio de transmisión por paquetes basado en contraseñas de la FDDI original. Con FDDI-II es posible entonces establecer y mantener una conexión a una velocidad fija entre dos estaciones. En la fase de establecimiento de la conexión se negocia el tipo de transmisión que se va a efectuar: modo paquetes (FDDI) o modo circuitos (FDDI-II).

En FDDI-II se crea hasta un máximo de 16 canales isocrónicos de 6144 kbps cada uno. Cada canal se puede distribuir entre tres enlaces FDX de 2048 kbps o entre cuatro enlaces de 1536 kbps para satisfacer tanto a las jerarquías europeas (E1/E4) como las norteamericanas (T1/T4). En esta disposición queda un canal residual para transmisión por paquetes a una velocidad de por lo menos 1000 kbps, aún cuando se haya adjudicado todos los 16 canales isocrónicos. Los canales isocrónicos pueden ser reasignados dinámicamente en tiempo real y el ancho de banda que no se esté utilizando se adjudica automáticamente al canal de contraseña (token). Los canales conmutados por circuitos se imponen en el anillo cada 125 microsegundos por medio de una estación denominada “Maestra del Ciclo (Cycle Master)” cuando ella está en posesión de la contraseña.

Arquitectura de la FDDI-II

En la Fig. 6.36 se muestra la arquitectura de la FDDI-II.

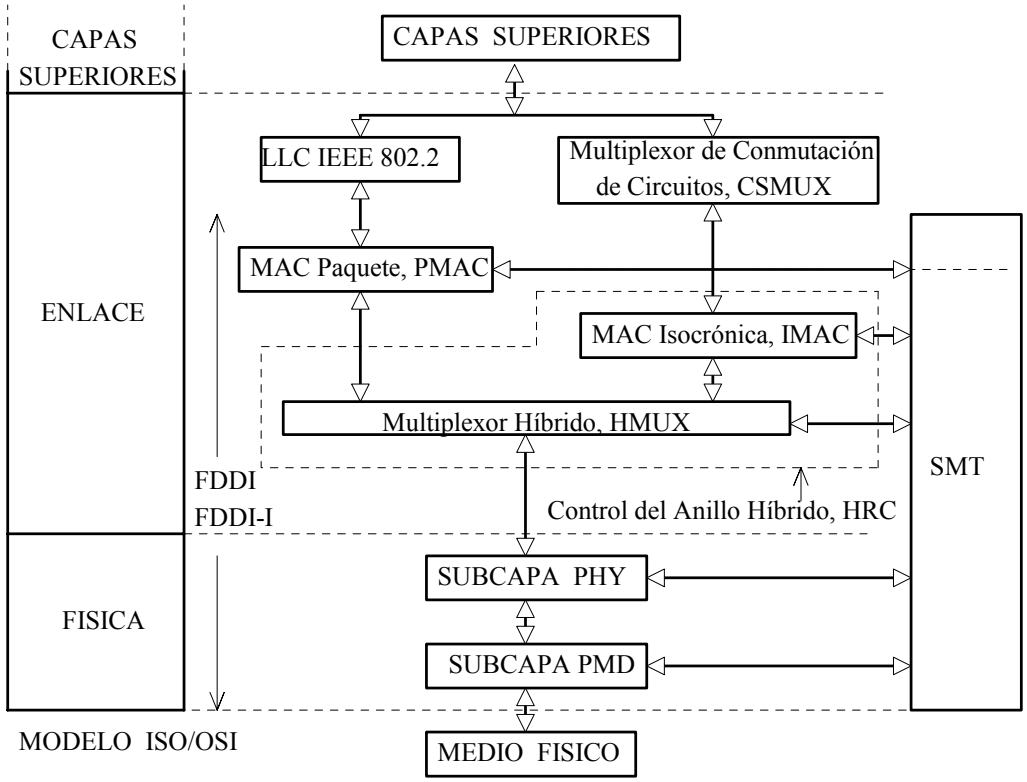


Fig. 6.37. Arquitectura de la FDDI-II.

La capa física (PHY + PMD) y la presencia de la capa SMT son las mismas de la FDDI. A nivel MAC aparecen dos nuevos componentes, denominados colectivamente "control de anillo híbrido (Hybrid ring control, HRC): el multiplexor híbrido HMUX y la subcapa MAC Isocrónica (IMAC). El módulo IMAC provee la interfaz entre FDDI y el servicio isocrónico, representado por el multiplexor de conmutación de circuitos CSMUX. El HMUX efectúa la multiplexación de los paquetes de datos que vienen desde el MAC y los datos isocrónicos que vienen del IMAC.

Una FDDI-II puede operar en Modo Básico o en Modo Híbrido. Cuando opera en modo básico solamente se dispone del servicio de conmutación de paquetes controlado por la contraseña circulante; este modo es el de la FDDI original. Cuando trabaja en modo híbrido, se dispone de servicios de conmutación de paquetes y de conmutación de circuitos. La FDDI-II arranca generalmente en el modo básico para inicializar temporizadores y establecer los parámetros apropiados y luego pasa al modo híbrido.

Cuando opera en modo híbrido, la FDDI-II emplea un protocolo repetitivo denominado "ciclo". El ciclo es una trama similar en principio a las utilizadas en los sistemas de transmisión sincrónica. El contenido de cada ciclo es visto por todas las

estaciones a medida que circula en el anillo, y la estación Maestra del Ciclo genera un nuevo ciclo a una velocidad de 8000 por segundo, o lo que es lo mismo, cada 125 microsegundos. Para una velocidad de 100 Mbps, la longitud del ciclo es de 12500 dígitos. Cuando el ciclo completa una revolución en el anillo, la estación maestra de ciclo lo absorbe y emite un nuevo ciclo.

Durante la operación normal, sobre la red circulan los ciclos generados por la estación maestra. Las estaciones se comunican compartiendo la utilización de un canal dedicado isocrónico. La estación maestra regula en general la actividad en la red. Para más información, el lector puede consultar [Stallings, 1993; Lee Byeong y otros, 1993]

En la integración de servicios requerida en los ambientes modernos de procesamiento de la información, donde se combina aplicaciones de alto poder gráfico, así como video y sonido interactivos (multimedia), se necesita una plataforma de alta capacidad de transmisión de por lo menos un orden de magnitud superior al que proporcionan las actuales tecnologías de redes locales. La red FDDI/FDDI-II cumple con estos objetivos pues ella satisface una gran variedad de requerimientos por sus características físicas de velocidad y confiabilidad, como por su capacidad de transmisión de información, utilizando tanto técnicas de conmutación por paquetes como de conmutación por circuitos. Sin embargo, su alto costo actual limita su uso sólo a sistemas compuestos por grandes computadores (main frames) como es el caso de las redes corporativas.

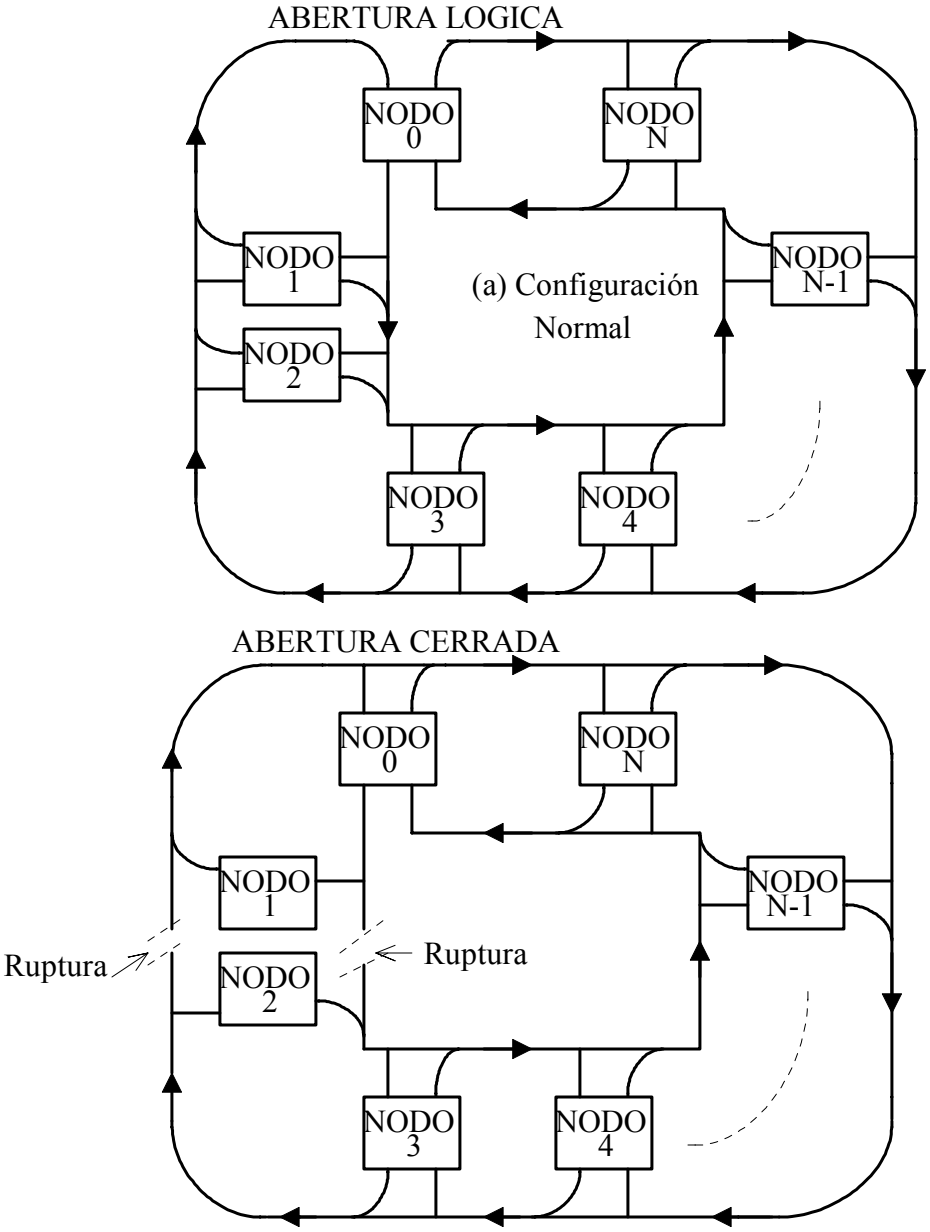
6.4.3. El Estándar DQDB

Características

La Red de Cola Distribuida y Barra Doble DQDB (Distributed Queue Double Bus) fue desarrollada en Australia con el nombre de Red QPSX (Queued Packet Synchronous Switch) y es la base de la Norma MAN IEEE 802.6 aprobada en 1990.

La DQDB incluye salvaguardas contra accesos maliciosos o accidentales y es altamente tolerante a fallas debido a su capacidad de reconfiguración automática o autocicatrización.

En la Fig. 6.38 se muestra la configuración física de la Red DQDB.



(b) Red Reconfigurada debido a la Ruptura

Fig. 6.38. Configuración de la Red DQDB.

La estructura física consiste en dos lazos unidireccionales que circulan en sentido opuesto, formando un anillo físico como una barra lógica doble. Las barras operan independientemente una de la otra, a velocidades de hasta 150 Mbps soportando tráfico tanto asincrónico como sincrónico (voz y video interactivos). Una unidad, que funciona

como maestra, no repite los datos que recibe en cualquiera de las dos direcciones, como se muestra en la Fig. 6.38(a).

El lazo funciona como una barra lógica eliminando la necesidad de remover los datos del canal lo que ocurriría en un anillo lógico. La inserción de datos en la barra se hace solamente en ranuras vacías mediante una función lógica OR que combina los "1" de los datos con los "0" de la barra. Esto simplifica los circuitos que están en serie con la barra, donde una falla podría interrumpir el servicio. El resto del protocolo de acceso se instrumenta externamente a la barra, con lo que una falla en esta lógica más complicada no afecta la operación de la red.

El hecho de que el lazo siempre tiene una apertura proporciona un mecanismo de tolerancia a las fallas. Si se produce una ruptura del cable o una falla en un nodo que no sea "puenteable", la apertura lógica puede cambiarse hacia el sitio donde se produjo la falla. La terminación original de la barra ahora pasará los datos y la nueva terminación se ubicará en el punto donde se produjo la ruptura, con lo que la red continuará funcionando sin pérdida de velocidad ni aumento del tiempo de acceso. Este proceso se ilustra en la Fig. 6.38(b).

El mecanismo de autocicatrización asegura la confiabilidad y la preferencia de las administraciones de comunicaciones. El sistema permite también una gran flexibilidad en cuanto a velocidades de operación, diversidad de rutas y grado de redundancia. Aunque el medio físico preferido es la fibra óptica, el estándar no la exige.

Control de Acceso al Medio (MAC)

El acceso al medio se hace enviando reservaciones de ranura "río arriba" cuando una estación desea transmitir "río abajo". Cada estación posee dos contadores "hacia arriba/hacia abajo" (up/down) funcionando continuamente, uno por cada dirección de transmisión. Cuando un "pedido de reservación de ranura" circula río arriba, el contador se incrementa en 1. Cuando una ranura vacía circula río abajo, el contador se decrementa en 1. Un valor diferente de cero en el contador indica que hay requerimientos insatisfechos río abajo; un valor de cero implica que no hay pedidos insatisfechos. Las ranuras tienen una longitud fija de 53 octetos.

Cuando la estación quiere transmitir, lee el contador de pedidos de reservación. Si la lectura es cero, transmite en la próxima ranura vacante que pasa. En condiciones de carga bajas el retardo es despreciable, tal como ocurre con el protocolo CSMA/CD. Si el contador no está a cero, la lectura va disminuyendo a medida que aparezcan ranuras vacías viajando río abajo que van satisfaciendo a los nodos que están en la cola. En la próxima ranura vacía disponible se puede efectuar la transmisión. En condiciones de alta carga la eficiencia se acerca al 100%, en forma similar a lo que ocurre en los protocolos de circulación de contraseña (token), por lo que el protocolo DQDB combina las ventajas de esos protocolos y lo hace con unos pocos dígitos de control (overhead).

Esta combinación de acceso rápido en condiciones de baja carga y espera determinística en carga alta, hace a este protocolo muy adecuado para la configuración de Redes MAN, y puede ser útil también en redes más pequeñas cuando se requiere altas velocidades y tolerancia a las fallas. El protocolo también puede ser extendido para permitir

la asignación de prioridades en el acceso a las ranuras de tiempo. Esto se logra con colas separadas para cada nivel de prioridad por medio de contadores independientes.

Otra ventaja de este sistema es la segmentación de los paquetes grandes que se quieran transmitir, con lo que se evita que un paquete muy grande cause a los demás paquetes un retardo de transmisión considerable.

Arquitectura

La arquitectura del Estándar DQDB es mucho más compleja que las vistas anteriormente, como puede observarse en la Fig. 6.39.

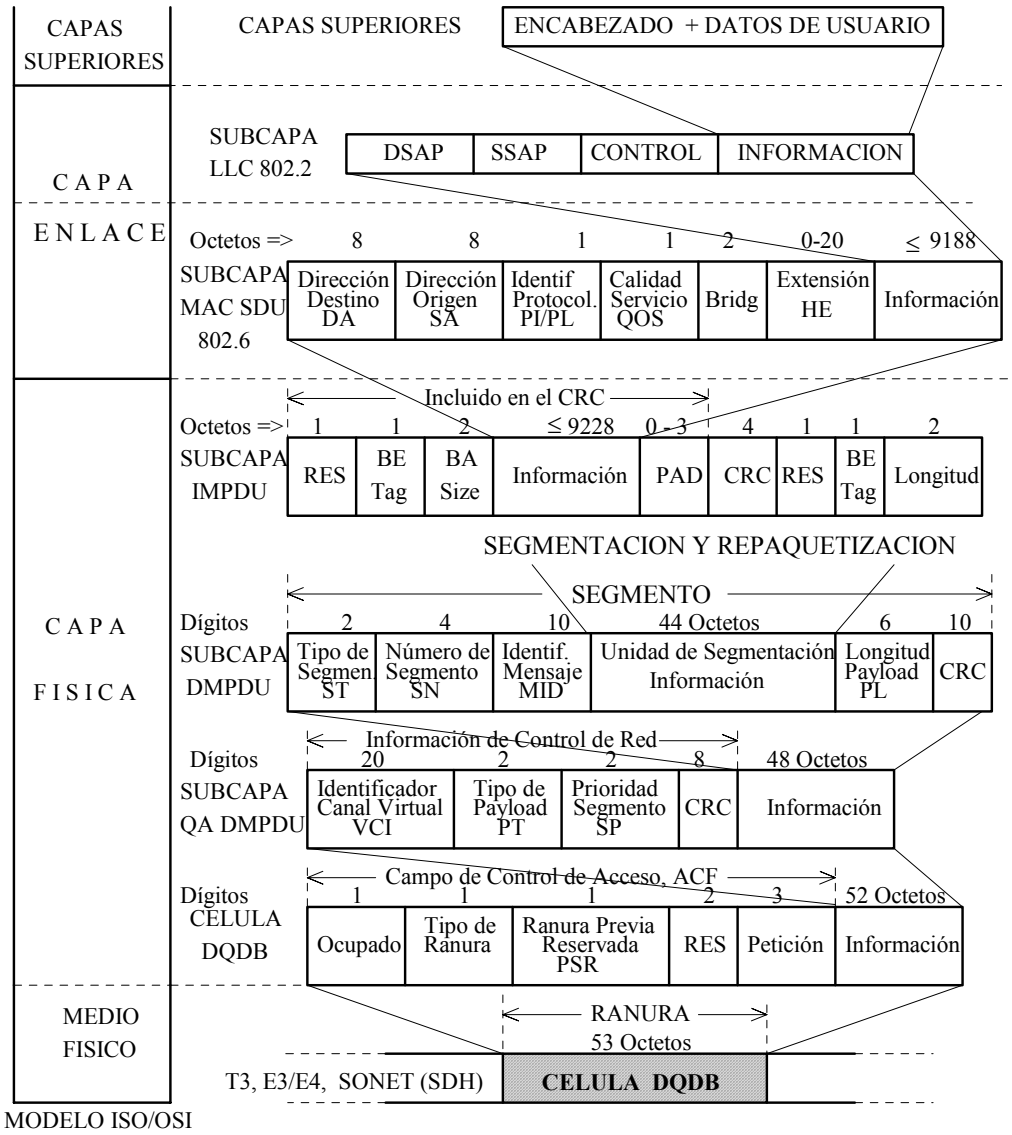


Fig. 6.39.Arquitectura del Estándar DQDB.

En DQDB se emplean dos métodos de control de acceso: (a) el acceso por cola arbitrada (QA) para servicios con conexión y servicios asincrónicos sin conexión, utilizados en la transferencia de archivos y en procesos de transacción; y (b) el acceso prearbitrado (PA) para servicios isocrónicos con conexión, utilizado para la transmisión de voz y video a velocidad fija.

Nótese que las funciones del estándar DQDB se desarrollan bajo la subcapa LLC 802.2, que es común con las redes de área local 802.3/4/5; esto permite la interconexión casi directa entre las LAN 802.3/4/5 y la DQDB.

La subcapa MAC SDU 802.6 encapsula la subcapa LLC 802.2 la cual puede contener hasta 9188 octetos. La subcapa MAC SDU está conformada por los siguientes campos:

Dirección Destino (DA). Es la dirección del nodo de destino.

Dirección Origen (SA). Es la dirección del nudo fuente.

Identificación del Protocolo (PI). Este campo identifica el usuario del servicio a quien se le está enviando el contenido del campo Información. Este octeto contiene dos dígitos para indicar la longitud del campo PAD en la subcapa IMPDU.

Calidad de Servicio (QOS). Este campo indica la calidad de servicio para la subcapa IMPDU en lo relacionado con el retardo de acceso a una subred. Este valor está basado en la prioridad solicitada por el usuario MAC.

Bridging. Campo reservado para uso futuro para la utilización de puentes a nivel MAC.

Extensión (HE). Longitud del Encabezado, de 0 a 20 octetos con pasos de 4 octetos. Se puede utilizar para información de control adicional de uso futuro.

Información. Contiene la subcapa LLC 802.2 cuyas funciones ya conocemos.

Las subcapas LLC 802.2 y la subcapa MAC SDU 802.6 juntas son equivalentes a la Capa Enlace del Modelo ISO/OSI.

Como los datos son transmitidos en tramas o células de 53 octetos, y por cuanto la trama MAC SDU puede contener hasta 9228 octetos, es necesario efectuar a nivel de capa física un proceso de segmentación y repaquetización para generar las células de 53 octetos. La trama MAC SDU se encapsula previamente en una nueva trama a nivel de capa física denominada IMPDU (Initial MAC PDU) con el agregado de algunos elementos de servicio. La trama IMPDU contiene entonces los siguientes campos:

RES. Reservado para uso futuro.

BE Tag (Beginning-end Tag). Es una secuencia de un octeto asociado con un IMPDU dado y que se incrementa en 1 módulo 256; este número se utiliza en la segmentación y en la repaquetización, y se utiliza para numerar los IMPDU enviados por el nodo.

BA Size (Buffer allocation size). Es la longitud total de la trama IMPDU. Sirve para anunciar los requerimientos de memoria para almacenar el IMPDU. Se utiliza también en la segmentación y repaquetización.

Los campos RES + BE Tag + BA Size conforman el Encabezado de la trama IMPDU.

Información. Contiene la trama MAC SDU.

PAD. Contiene un número mínimo de octetos de manera que la longitud total de los campos sea un múltiplo de 4, ó, si es posible, que la longitud total de la trama IMPDU sea un múltiplo entero de 44.

CRC. Código CRC-32 que opera sobre Encabezado + Información + PAD. Este campo es opcional.

RES + BE Tag + Longitud. Esta es la cola de la trama IMPDU; los valores contenidos en ella son los mismos que los del Encabezado.

La trama IMPDU puede contener hasta 9240 octetos siendo necesario efectuar sobre ella un proceso de segmentación y repaquetización. En efecto, cada trama IMPDU se fragmenta en segmentos de 44 octetos, denominados Unidades de Segmentación, y con el agregado de algunos elementos de servicio se forma el Segmento o trama DMPDU (Derived MAC PDU). Esta trama, de 48 octetos, contiene los siguientes campos:

Tipo de Segmento (ST). Hay cuatro tipos de Segmentos DMPDU que se pueden codificar con los dos dígitos binarios. Cuando el DMPDU contiene un IMPDU completo, se produce un solo segmento o mensaje; en este caso se tiene el Segmento SSM (single segment messaje). Si el IMPDU se fragmenta en dos o más DMPDU, el primer DMPDU es el "principio del mensaje (Segmento BOM)"; el último DMPDU es el "final del mensaje (Segmento EOM)", y cualquier otro DMPDU intermedio es la "continuación del mensaje (Segmento COM)".

Número de Segmento (SN). Se utiliza para la paquetización del IMPDU a fin de verificar que todas las Unidades de Segmentación se han recibido y ordenado en forma apropiada. Un valor de segmento (generalmente 1) se establece para el BOM y se incrementa para cada COM o EOM sucesivos de un IMPDU.

Identificador del Mensaje (MID). Este es un identificador asociado con el conjunto de DMPDU que contienen un IMPDU completo. Este número es necesario para la reordenación apropiada de los IMPDU.

Los campos ST + SN + MID constituyen el Encabezado del DMPDU para información de control de red.

Unidad de Segmentación. Este es uno de los segmentos de la trama IMPDU; generalmente contiene 44 octetos, excepto en los segmentos EOM o SSM que contengan menos de 44 octetos..

Longitud Payload (PL). Indica el número (entre 4 y 44) de octetos venidos del IMPDU que ocupan la Unidad de Segmentación del DMPDU. Este número será siempre 44 para los BOM y COM. Será menor que 44 en el SSM si el IMPDU tiene menos de 44 octetos. Puede también ser menor que 44 en un EOM cuando el IMPDU no es un entero múltiplo de 44 octetos de longitud.

CRC. Código CRC-10 que opera sobre ST + SN + MID + Información + PL.

El proceso de elaboración de la célula DQDB continúa con la generación de la Subcapa QA DMPDU de 52 octetos, cuyos elementos son:

Identificador del Canal Virtual (VCI). Identifica al canal virtual o enlace lógico al cual pertenece el segmento. Un valor del VCI de puros "1" corresponde a un servicio MAC sin conexión. Cualquier otro valor del VCI distinto de cero está disponible para servicios isocrónicos y servicios de datos con conexión.

Tipo de Payload (PT). Indica la naturaleza de los datos a transferir. El valor por defecto en transmisión de datos es 00; los otros valores (01, 10 y 11) están en estudio para uso futuro, por ejemplo, para indicar señalización de red o datos de gestión.

Prioridad del Segmento (SP). Reservado para uso futuro con puentes multipuerto. Un puente multipuerto permite interconectar tres o más LANs.

Los campos VCI + PT + SP constituyen el Encabezado QA DMPDU y se denomina "campo de control de acceso (ACF)".

CRC. Código CRC-8 que opera sobre el ACF. Se utiliza para la detección de errores y la corrección de errores sencillos.

La subcapa QA DMPDU se encapsula finalmente para producir la Célula o Ranura DQDB de 53 octetos. La Célula DQDB de 53 octetos es la unidad básica de transferencia de información en el estándar DQDB.

La Célula DQDB contiene un encabezado que contiene los siguientes elementos de servicio:

Ocupado (Busy). Indica si la célula contiene información o es una célula libre (o vacía).

Tipo de Ranura. Indica si se trata de una ranura QA o PA.

Ranura Previa Reservada (PSR). Indica si el segmento en la ranura anterior se puede o nó borrar. Este dígito se coloca a "1" en un nodo dado cuando la ranura precedente contenía un segmento QA destinado solamente para ese nodo. La aplicación de este dígito está en estudio.

RES. Reservado para uso futuro; por ahora se coloca en 00.

Petición. Estos tres niveles se utilizan para establecer tres niveles de prioridad.

La formación de una célula de 53 octetos no es una característica intrínseca del protocolo DQDB. La utilización de una célula de 53 octetos es parte de un plan global de estandarización, en el cual todo tipo de información se transmitirá en paquetes pequeños de 53 octetos, de acuerdo con los estándares SONET/SDH y ATM, que veremos más adelante.

La capa física DQDB es independiente del medio físico de transmisión; por lo tanto, se puede instrumentar una variedad de redes DQDB usando la misma capa física sobre diferentes sistemas de transmisión. El estándar contempla tres sistemas de transmisión:

ANSI DS3(T3): para transmitir a 44,736 Mbps sobre cable coaxial o fibra óptica.

UIT-T G.703: para transmitir a 34,368 Mbps y 139,264 Mbps sobre cable coaxial.

SONET/SDH: para transmitir a 155,520 Mbps sobre fibra óptica monomodo.

En [Stallings, 1993 y Kessler, 1992] el lector encontrará un excelente tratamiento de estos temas.

6.5. ESTANDARES, TECNOLOGIAS, Y SERVICIOS DE ALTA VELOCIDAD

6.5.1. Introducción

La necesidad de aumentar cada vez más la velocidad de transmisión sobre las velocidades existentes estimuló en los entes de normalización internacionales la creación de nuevos estándares para la transmisión de información a grandes velocidades, pues las actuales jerarquías plesiocrónicas no eran apropiadas. Con las jerarquías plesiocrónicas, que mostramos en la Fig. 6.2, la comunicación entre varias redes diferentes es muy costosa debido a las diferencias entre las técnicas de codificación y las estrategias de multiplexación. Por ejemplo, una señal DS1, Fig. 6.3, consiste de 24 señales de voz con un dígito de sincronización de trama, y su velocidad es de 1544 kbps. Además, utiliza el código de línea AMI y un dígito de cada octeto para señalización, lo que significa 56 kbps por canal. Sin embargo, cuando utiliza el código de línea B8ZS, se pueden utilizar todos los dígitos del octeto para información lo cual aumenta la velocidad a 64 kbps por canal para uso internacional. Por otro lado, la señal CEPT-1 contiene 30 canales de voz y dos canales para señalización y entramado, una velocidad de 2048 kbps, y el código de línea HDB3. Esto en cuanto a las técnicas de codificación, porque si observamos los procedimientos de multiplexamiento, nos encontramos con diferentes técnicas de entrelazado de dígitos y entrelazado de octetos.

En resumen, la tecnología plesiocrónica tiene las siguientes desventajas:

- Los sistemas europeos y norteamericanos tienen muy poco en común. Para la comunicación entre Europa y los Estados Unidos, por ejemplo, se requiere la utilización de convertidores de muy alto costo.
- Los equipos producidos por diferentes fabricantes no son compatibles por más que se diga que están estandarizados.
- No contienen sistemas de autoverificación o “chequeo en línea”. La verificación y las reparaciones hay que hacerlas manualmente.
- No hay estándares para velocidades más altas; todos los sistemas son propietarios.
- No hay sincronización más arriba de los sistemas DS1 o CEPT-1

El hecho de que los sistemas no sean sincrónicos es de capital importancia; en efecto, en los sistemas sincrónicos se puede agregar o separar (Add/Drop) canales individuales en cualquier punto de la cadena de multiplexamiento, pues la localización de un canal cualquiera está plenamente identificada. Esto no se puede hacer en las jerarquías plesiocrónicas; para extraer una señal DS0 de una señal DS3, por ejemplo, hay que efectuar todos los pasos de desmultiplexamiento: DS3 => DS2 => DS1 => DS0. Nótese que

"plesiocrónico" significa "cuasi-sincrónico", y debido a la inserción y remoción de dígitos la ubicación de un canal determinado puede variar de una trama a otra.

6.5.2. Los Estándares SONET/SDH

Introducción

La denominación SONET/SDH (Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy) representa a un conjunto de normas americanas especificadas por la ANSI T1.105/106/107 que son las de SONET y por el UIT-T G.707/708/709 para Europa, que son las de SDH. Las normas SONET y las SDH son consistentes y por ello se utiliza la denominación compuesta SONET/SDH para designarlas. El proceso de aprobación de estas normas finalizó en 1988.

Los estándares SONET/SDH definen las velocidades y formatos, los elementos arquitecturales de red, los enlaces ópticos de capa física y los procedimientos de multiplexamiento y sincronización.

Todas las funciones de SONET/SDH corresponden a la Capa Física del Modelo ISO/OSI, como se puede apreciar en la Fig. 6.31.

Características

Las características más importantes son las siguientes:

- Transmisión por fibras ópticas monomodo con interfaces eléctricas
- La transmisión se efectúa mediante células básicas de 53 octetos, como las vistas en DQDB
- Velocidades jerárquicas que son múltiplos enteros de una velocidad básica de 51,84 Mbps y velocidades de transmisión desde 155,52 Mbps hasta 2,48832 Gbps
- Como sistema de transporte de información:

  --- Flexibilidad de interfaz con los nuevos estándares de alta velocidad (DQDB, ATM, SMDS, B-ISDN, etc.)

  --- Capacidad de Diagnóstico incorporada
- En tanto que Sistema Sincrónico:

  --- Facilidad para inserción y extracción económica (Add/Drop) de canales de tráfico de bajo volumen de datos y bajas velocidades

  --- Retardo de transmisión muy pequeño
- Del Sistema Optico:

  --- Capacidad de transmisión a largas distancias

  --- Alto Ancho de Banda

- Naturaleza de la Información:

  --- Voz, Datos, Imágenes y Video interactivos

Estructura

El transporte de una señal desde una red a una red diferente requiere procedimientos muy complicados de multiplexamiento y codificación, como es el caso de la conversión de una señal DS1 en una señal CEPT-1. Para resolver este problema, en SONET/SDH se estandarizan los formatos y las velocidades. El primer paso es la formación de un bloque básico denominado STS-1 (Synchronous Transport Signal) con una velocidad básica de 51,84 Mbps. El bloque STS-1 puede contener hasta 28 señales DS1 ó 1 señal DS3 ó 20 señales CEPT-1; incluye también capacidad para mantenimiento, operación, administración y supervisión del sistema. En la Fig. 6.40 se muestra la forma del bloque STS-1.

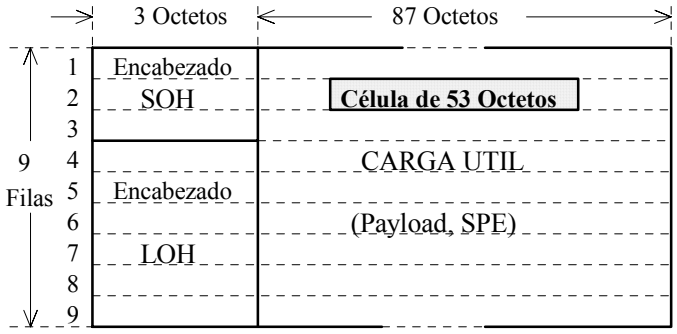


Fig. 6.40. Formato SONET/SDH STS-1

El bloque STS-1 contiene los siguientes elementos:

Encabezados SOH (Section Overhead) y LOH (Line Overhead). En estos encabezados va la información de sincronización y servicio, incluyendo un canal de voz para mantenimiento. La descripción detallada de estos campos está fuera de los objetivos de este libro.

Carga Util Sincrónica (SPE). Este campo se llena con las células básicas de 53 octetos, que contienen la información de las señales DS1 o CEPT-1.

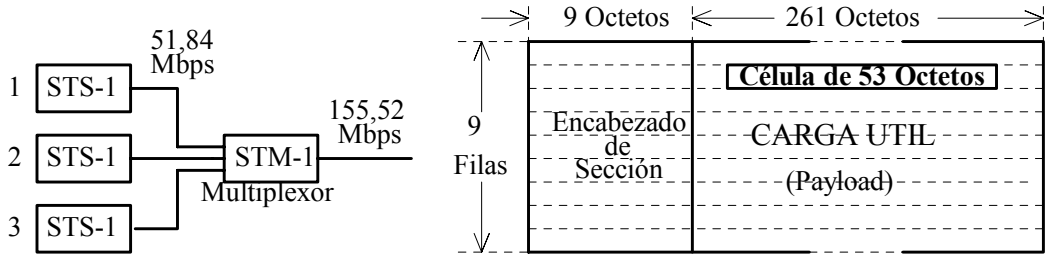
El bloque STS-1 contiene entonces 810 octetos, su duración es de 125 μseg y su velocidad es de 51,84 Mbps. La transmisión se efectúa de arriba hacia abajo, fila por fila, de izquierda a derecha y el MSB de cada octeto se transmite de primero. Los encabezados llevan toda la información de sincronización y de servicio, mientras que la información útil va en el SPE. Esto permite la comunicación entre nodos de red inteligentes y facilita la administración, vigilancia y control desde un punto central.

Cuando el volumen de información a transmitir es muy grande, se elaboran los bloques STS-N. Estos bloques se forman mediante entrelazado de octetos de N señales STS-1; la duración de los bloques STS-N es siempre de 125 μseg, de modo que su

velocidad es N veces la velocidad básica de 51,84 Mbps. Los valores corrientes de N son 1, 3, 12 y 48.

Para su transmisión por un medio de fibra óptica, las señales STS-N se multiplexan para formar las señales o portadoras de línea STM-M (Synchronous Transmission Module) cuyas velocidades son también múltiplos enteros de la velocidad básica de 51,84 Mbps; en este caso M = N/3, con N ≥ 3. Por ejemplo, tres señales STS-1 forman una señal STM-1, cuya velocidad es de 155,52 Mbps.

En la Fig. 6.41(a) se muestra la multiplexación de tres señales STS-1 para formar una señal STM-1, y en la Fig. 6.41(b) la estructura del bloque STM-1.



(a) Formación de la portadora STM-1 (b) Bloque STM-1

Fig. 6.41. Formato SONET/SDH STM-1.

El bloque STM-1 consta de 2430 octetos, con una duración de 125 μseg y una velocidad de 155,52 Mbps. Nótese que el bloque STM-M, con M = N/3 ≥ 1, también tiene una duración de 125 μseg, pero su velocidad será igual a [3Mx51,84] Mbps. Por ejemplo, el bloque STM-16 tendrá una velocidad de 48 x 51,84 = 2,48832 Gbps.

El lector seguramente tendrá curiosidad por saber por qué la duración de todos los bloques es de 125 μseg. Este valor tiene su origen en el Teorema del Muestreo de Shannon y en el ancho de banda normalizado de los canales de voz. En efecto, si el ancho de banda normalizado del canal de voz es de 4 kHz, la Frecuencia de Muestreo de Nyquist será de 8000 muestras por segundo; pero como cada muestra se codifica en ocho dígitos binarios o bits (un octeto), entonces la señal de voz tendrá una velocidad de 64 kbps y cada muestra de señal de 8 dígitos binarios tendrá una duración de 125 μseg. La señal DS0 corresponde, pues, a un canal de voz y en un bloque STS-1 se puede transmitir hasta 672 canales de voz equivalente a una señal DS3. El canal de voz de 64 kbps es el canal básico para todos los sistemas de transmisión de información en banda ancha.

Puesto que la información se transmite por fibras ópticas, en SONET se definen las denominadas Portadoras Opticas OC-N (Optical Carriers, OC) que son las formas ópticas de las señales STS-N y que tienen la misma velocidad. Por ejemplo, la velocidad de la portadora óptica OC-1 es la misma que la de la señal STS-1. En SONET/SDH se tiene entonces las portadores eléctricas STM y STS y la portadora óptica OC. En la Tabla

siguiente se muestra la equivalencia entre estas tres portadoras y sus velocidades de transmisión correspondientes.

PORTADORAS Y VELOCIDADES EN SONET/SDH

PORTADORA OPTICA	PORTADORA ELECTRICA STS	STM	VELOCIDAD Mbps
OC-1	STS-1	----	51,84
OC-3	STS-3	STM-1	155,52
OC-9	STS-9	STM-3 (*)	466,56
OC-12	STS-12	STM-4 (*)	622,08
OC-18	STS-18	STM-6	933,12
OC-24	STS-24	STM-8	1244,16
OC-36	STS-36	STM-12	1866,24
OC-48	STS-48	STM-16 (*)	2488,32

(*) Actualmente disponibles comercialmente

La descripción de los estándares SONET/SDH que hemos mostrado es, lo reconocemos, muy escueta; pero el propósito principal ha sido el de ofrecer un conocimiento conceptual de los estándares y sus principales características. Un enfoque más avanzado de este tema está fuera de los límites de este texto.

6.5.3. El Modo de Transferencia Asincrónica (ATM)

Introducción

El Modo de Transferencia Asincrónica es una tecnología de conmutación y multiplexamiento de alta velocidad orientada a conexión. Se utiliza en aplicaciones de alta velocidad en telecomunicaciones, tales como telemedicina, educación a distancia, transmisión de grandes volúmenes de datos, videoconferencia, televisión, multimedia, etc.

Una red basada en ATM permite que los proveedores de servicios de telecomunicación ofrezcan múltiples servicios sobre una sola red ATM y bajo un solo sistema de gestión de red. Como resultado, sobre la misma red se puede transportar voz, datos, imágenes, video y multimedia en una forma sencilla y económica.

Características

Las principales características de ATM son:

- La transmisión se efectúa mediante células de longitud fija (53 octetos) con identificación de canal en el encabezado de la célula
- Combina las ventajas de la TDM y de la Transmisión por Conmutación de Paquetes
- Mediante acuerdo entre el UIT-T y la ANSI T1S1 se utilizará la transmisión ATM para el transporte de todos los servicios de la Red ISDN de Banda Ancha
- Las formas sencillas de Multiplexamiento y Conmutación conducen a

  --- Una arquitectura muy sencilla para todo tipo de tráfico

  --- Integración de los servicios de Transmisión de Información

--- Operaciones consistentes para servicios múltiples diferentes

--- Mayor disponibilidad de la red. Los conmutadores ATM son muy veloces porque la conmutación se hace con dispositivos físicos (hardware) y no mediante programas (software). El procesamiento y retardo en cada conmutador es mínimo, lo que aumenta la velocidad de transferencia

--- Ancho de Banda flexible (según demanda) y escalable, y altas velocidades de transferencia

--- Mayores beneficios en costo debido a: una relación costo/prestaciones mejorada, consolidación de aplicaciones, mejor utilización de las facilidades debido a la combinación de todos los servicios en una sola red, compatibilidad con los sistemas de comunicación actuales, costo de la gestión de red más simple y económico, una tecnología sencilla y uniforme, y un ciclo de vida que se espera sea alto.

La tecnología ATM combina la simplicidad de la conmutación de circuitos con la flexibilidad de la conmutación por paquetes.

Estructura

La tecnología ATM se basa en una célula básica de solamente 53 octetos especificada por la ANSI T1S1. Estas pequeñas células tienen ventajas para la transmisión a una velocidad fija, pues se puede conseguir un retardo mínimo cuando los octetos de una llamada dada se pueden ensamblar y desensamblar en células en los puntos de origen y destino, respectivamente. Por otro lado, como cada célula debe llevar información de enrutamiento, el encabezado puede ser desproporcionadamente alto. El compromiso alcanzado fue el de seleccionar una célula de 53 octetos con 48 octetos de información útil y 5 octetos de encabezado para campos de enrutamiento y otros usos. Si la duración de cada muestra de señal es de 125 μseg, el tiempo para paquetizarla y despaquetizarla es de 6 milisegundos, un retardo aceptable para la transmisión de voz.

La célula ATM básica especificada por la ANSI T1S1 se muestra en la Fig. 6.42. Esta célula es la correspondiente a la interfaz UNI, que veremos más adelante.

El Encabezado de la célula contiene los siguientes campos:

Control de Flujo Genérico (GFC). Encargado de ajustar las prioridades y la arbitración para el acceso entre varios terminales.

Identificador de la Trayectoria Virtual (VPI) y el Identificador de Canal Virtual (VCI). Estos campos conforman el Identificador de Conexión Virtual que es equivalente a un circuito virtual de conmutación por paquetes o a un enlace virtual en Frame Relay. La noción de trayectoria virtual permite al gestionador de la red organizar y dirigir sus recursos de transmisión por medio de enlaces virtuales permanentes o semipermanentes.

Tipo de Payload (PT). Describe el tipo de carga útil: información de usuario o mensaje de servicio de la red. En el primer caso, los dos últimos dígitos indican congestión, así como el tipo de unidad de datos cuya interpretación depende de las capas superiores.

Reservado. Puede contener dígitos para protección contra la congestión y tipos de prioridad.

CRC. Código de Redundancia Cíclica para la detección de errores y la corrección de un error sencillo. Opera sobre el Encabezado.

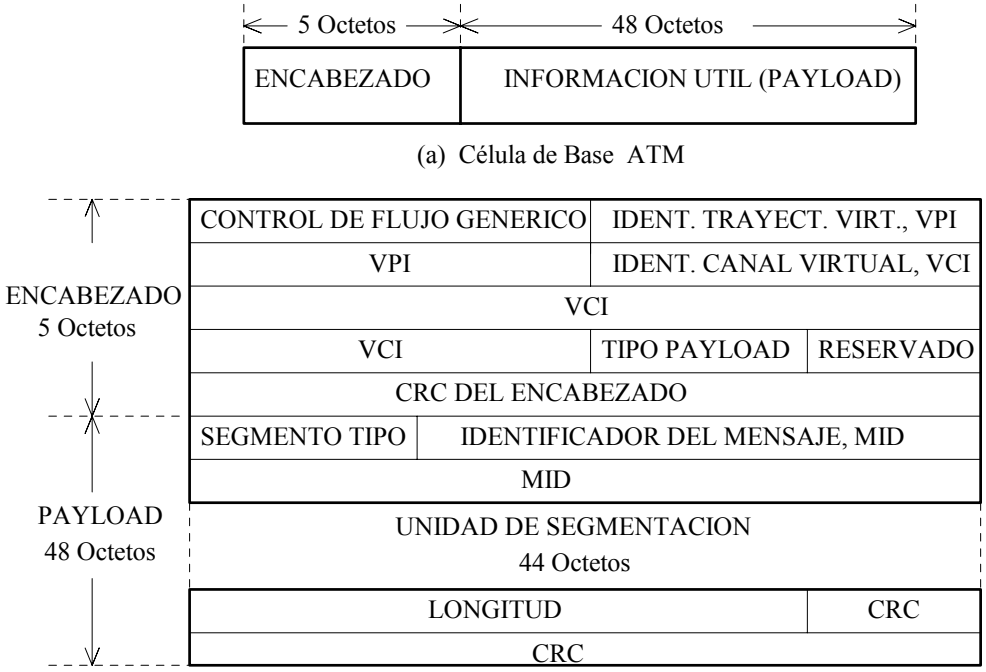


Fig. 6.42. Estructura de la Célula de Base UNI ATM.

Los 48 octetos del "payload" opcionalmente pueden contener una capa de adaptación de 4 octetos y 44 octetos de carga útil (voz, datos o video), o todos los 48 octetos pueden ser carga útil, según un dígito en el campo de control del encabezado. Esto permite la segmentación en células y la repaquetización de las células en grandes paquetes tanto en la fuente como en el destino, respectivamente. El campo de control puede contener también un dígito para indicar si la célula es una célula de control de flujo o una célula ordinaria; incluye también un dígito de aviso para indicar si la célula es descartable o nó en caso de congestión en la red.

Arquitectura

En la Fig. 6.43 se muestra una arquitectura ATM: DQDB/ATM/SONET. Nótese que ATM solamente comprende funciones correspondientes a la Capa Física del Modelo ISO/OSI.

En ATM se pueden distinguir tres capas, Fig. 6.43: la Capa de Adaptación AAL, la Capa ATM (Cédula ATM) y la Capa Física ATM, todas comprendidas dentro de la Capa Física ISO/OSI.

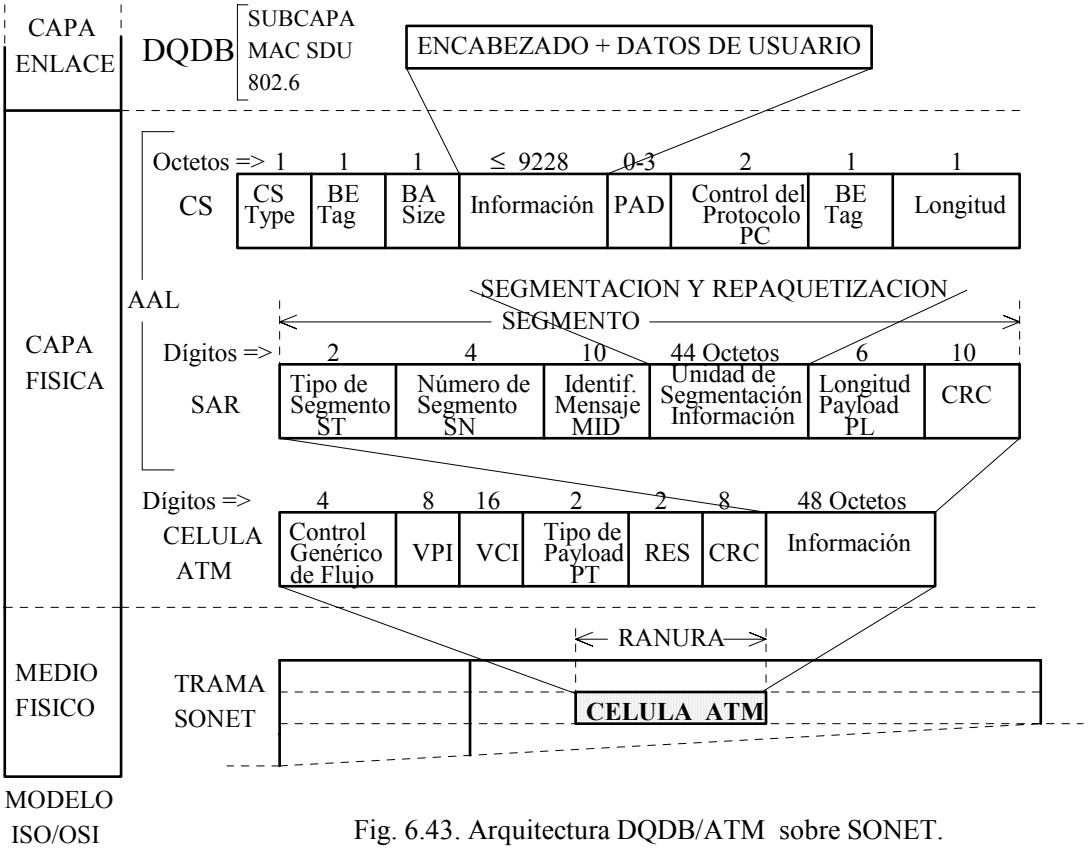


Fig. 6.43. Arquitectura DQDB/ATM sobre SONET.

La capa AAL proporciona una gama de clases y tipos de servicio para el transporte de los mensajes que vienen de las capas superiores. Los servicios se clasifican de acuerdo con tres criterios: (a) la existencia de una relación de tiempo entre los usuarios fuente y destino (por ejemplo, voz), (b) la velocidad (variable o constante) asociada con la transferencia, y (c) el modo de conexión. Esto permite definir cuatro clases de servicio: A, B, C y D; en la Tabla siguiente se muestra las relaciones entre los diferentes servicios.

SERVICIOS ATM

	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
Relación de Tiempo	Si		No	
Velocidad	Constante	Variable		
Modo	Orientado a Conexión			Sin Conexión

Como puede observarse en la Tabla, las Clases A y B están orientadas a conexión y existe una relación de tiempo entre los usuarios fuente y destino. Se diferencian en que la Clase A es a velocidad constante. Un ejemplo de transferencia en Clase A es la transmisión de voz a 64 kbps, mientras que la transmisión de video comprimido es un ejemplo de

transferencia en Clase B. Las Clases C y D se utilizan en aplicaciones más especializadas, por ejemplo, Ethernet, TCP/IP, IPX, transferencia de grandes archivos, etc.

Para ejecutar estas funciones, la capa AAL se subdivide en dos subcapas: la Subcapa de Convergencia (CS) y la Subcapa de Segmentación y Repaquetización (SAR). La subcapa CS efectúa la función de convergencia entre los servicios ofrecidos en la interfaz de usuario y aquellos provistos por la Capa ATM. La subcapa SAR efectúa las operaciones de ensamblado y segmentación de los datos de fuente que irán en el campo de información de la célula ATM. Como los campos contenidos en las subcapas CS y SAR son muy similares en estructura y contenido a los vistos en DQDB, no los vamos a describir aquí.

La Capa ATM efectúa todas las funciones relacionadas con el enrutamiento y multiplexamiento de las células sobre las conexiones virtuales. Toda esta información va en el Encabezado de la Célula ATM. Este encabezado caracteriza la denominada interfaz UNI utilizada por los dispositivos de usuario que generan y reciben directamente las células. La célula ATM tiene la misma estructura que las células DQDB y SONET ya vistas, lo cual está dentro de los principios y tendencias en la estandarización global en telecomunicaciones.

En cuanto a la Capa Física ATM, las normas no especifican un medio físico en particular; las alternativas pueden ser:

- SONET/SDH a 155, 52 Mbps o más sobre par trenzado UTP, categoría 5. En la Fig. 6.43 se muestra la arquitectura ATM sobre SONET.
- Líneas DS1(T1) de 1,544 Mbps para uso en interfaces en redes públicas
- Cable coaxial a 12 Mbps
- Líneas E1/E3 sobre par trenzado UTP, categoría 5
- Fibras Opticas

En el UIT-T y la ANSI se continúa estudiando nuevas alternativas para ATM.

Migración hacia la ATM

En muchas de las redes actuales se está imponiendo el concepto ATM, pues es una tecnología capaz de satisfacer tanto las aplicaciones de datos, como las aplicaciones multimedia o las de video interactivo. Esta elección presenta la ventaja suplementaria de ser tecnológicamente compatible con las actuales redes de larga distancia.

Sea, por ejemplo, un segmento de red como el mostrado en la Fig. 6.44, en el cual se quiere introducir la tecnología ATM. La interconexión actual entre los nodos de esta red se hace con troncales T1/E1, jerarquía plesiocrónica (PHD).

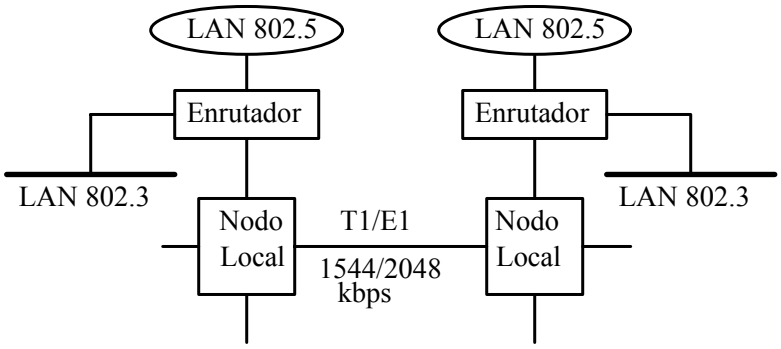


Fig. 6.44. Configuración Actual de un Sistema Local

Como se muestra en la Fig. 6.45, la primera fase consiste en interconectar un conmutador ATM con nodos locales compatibles ATM para dar una imagen de una red local continua que no ha sido fragmentada. Las redes de área local continúan trabajando, por ejemplo la IEEE 802.3, en cada segmento. Los nodos evolucionados (compatibles ATM) se conectan entre ellos mediante un conmutador ATM formando un ambiente ATM; los enlaces pueden ser SONET/SDH STM-1.

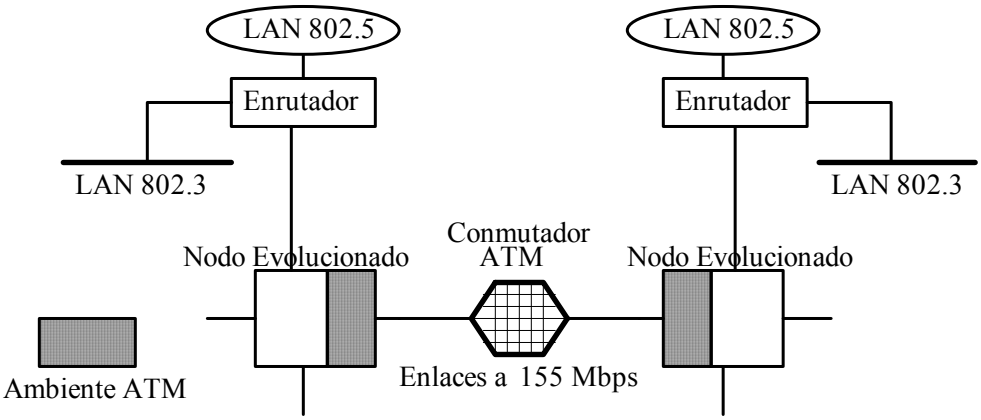


Fig. 6.45. Migración hacia ATM. Primera Fase.

En la segunda fase, Fig. 6.46, los nodos ATM suministran interfaces para las LAN y otros servicios, para quienes la red local ATM es transparente. La interconexión entre los diferentes servicios se hace ahora a la velocidad máxima de la interfaz física, en este caso 155 Mbps, jerarquía sincrónica (SDH), con posibilidad de acceso a la B-ISDN.

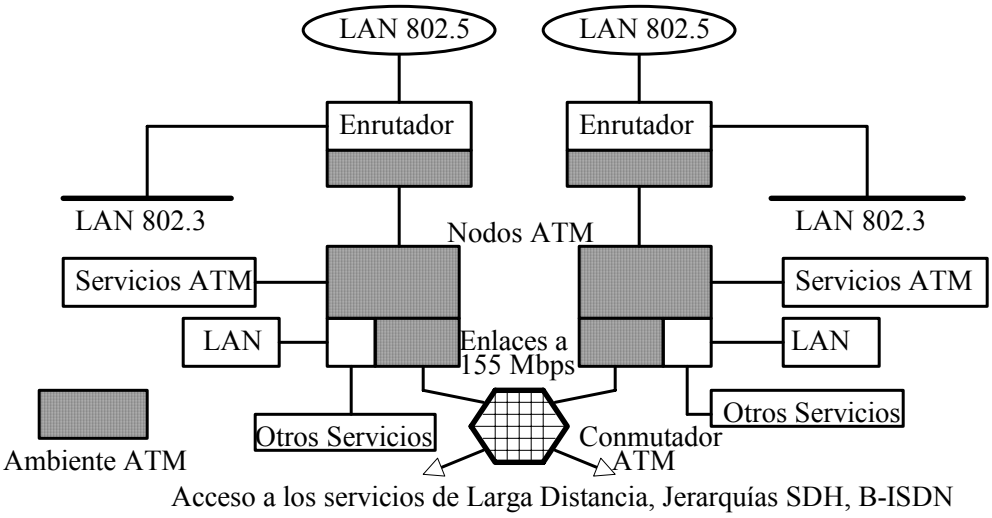


Fig. 6.46. Migración hacia ATM. Segunda Fase.

Un esquema de migración hacia ATM de este tipo se está llevando a cabo en la Universidad de Los Andes para interconectar todas las Facultades en un solo ambiente ATM de alta velocidad.

6.5.4. El Servicio de Datos Conmutados Multimegabit (SMDS)

Introducción

El Servicio de Datos Conmutados Multimegabit (Switched Multi-Megabit Data Service, SMDS), propuesto por la Bell Communications Research (Bellcore) en 1989, es un servicio de transmisión rápida de datos con las mismas características y prestaciones de una LAN. SMDS no es una tecnología, es un servicio sin conexión que se puede instrumentar con pocos cambios en los sistemas existentes.

El SMDS puede utilizar fibra óptica o par trenzado sobre redes de datos públicas. Puede soportar velocidades de 1544 kbps en troncales T1(DS1) o 44736 kbps sobre troncales T3(DS3). Las unidades de datos de SMDS pueden encapsular tramas IEEE 802.3, IEEE 802.4 y FDDI, así como tramas SONET/SDH STM-1.

El servicio SMDS está diseñado para ser integrado fácilmente en arquitecturas inter-red existentes con las mismas prestaciones de una LAN pero a nivel metropolitano. Una red SMDS puede operar como una subred transparente en una interconexión de dos usuarios a través de un conjunto de subredes, como se puede apreciar en la Fig. 6.47.

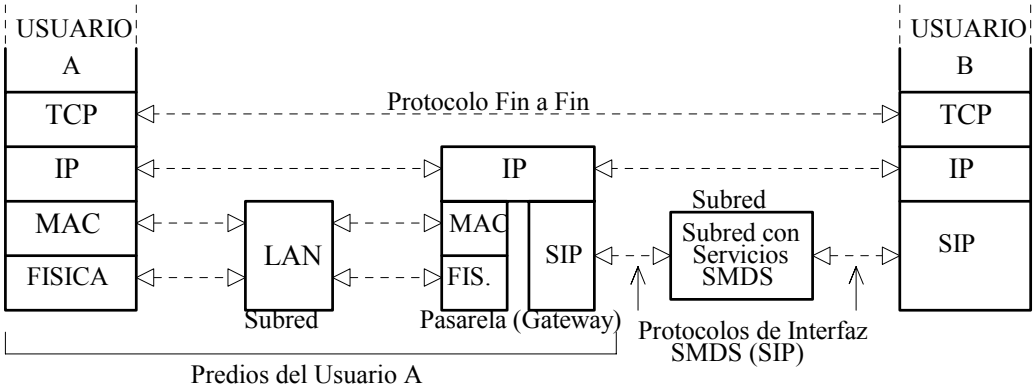


Fig. 6.47. Ejemplo de Aplicación del Servicio SMDS

Características

- Es un servicio público de conmutación de paquetes que puede operar sobre diferentes plataformas y a velocidades con soporte DS3 y SONET/SDH STM-1
- Prestaciones análogas a las de las LAN: alto ancho de banda, bajo retardo, acepta mensajes de gran volumen, direccionamiento multigrupo, procesamiento distribuido, etc.
- Por su cobertura geográfica puede considerarse como una MAN
- Puesto que es un servicio sin conexión, cada paquete es direccionado y transferido independientemente; esto implica:

  --- Las fases de establecimiento o terminación de llamadas no son necesarias

  --- Los reconocimientos no son necesarios

  --- No hay control de flujo explícito

  --- Puede manejar secuencias esporádicas (bursty) de alta velocidad
- La interfaz es estándar y el direccionamiento es el mismo E.164 de la ISDN

Arquitectura

En la Fig. 6.48 se muestra la arquitectura SMDS sobre SONET.

Nótese la semejanza con las arquitecturas DQDB y ATM que hemos descrito anteriormente y la facilidad de interconexión con las LANs 802.3/4/5 y DQDB. En la Fig. 6.49, mostramos las tres células DQDB, ATM y SMDS para que el lector pueda observar que sus diferencias están en los cuatro primeros octetos del encabezado.

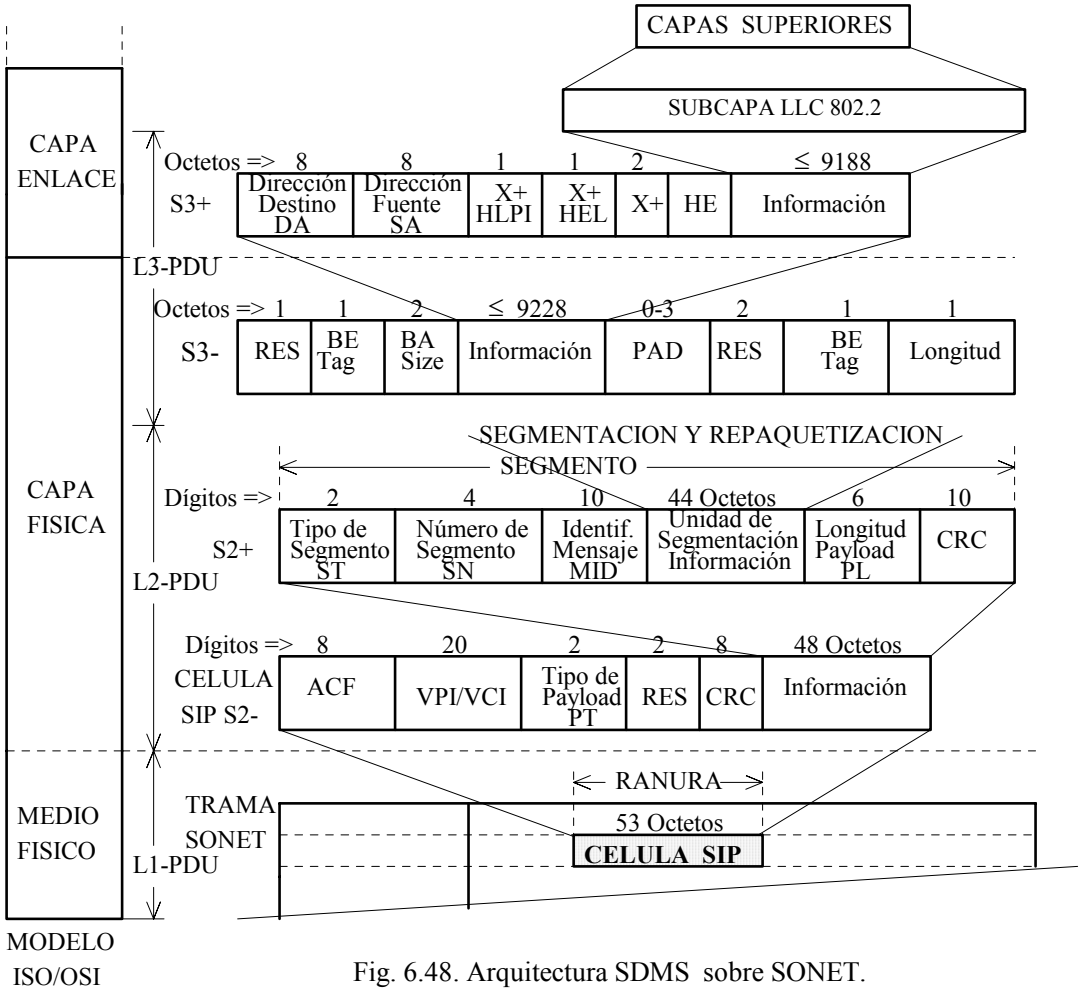


Fig. 6.48. Arquitectura SDMS sobre SONET.

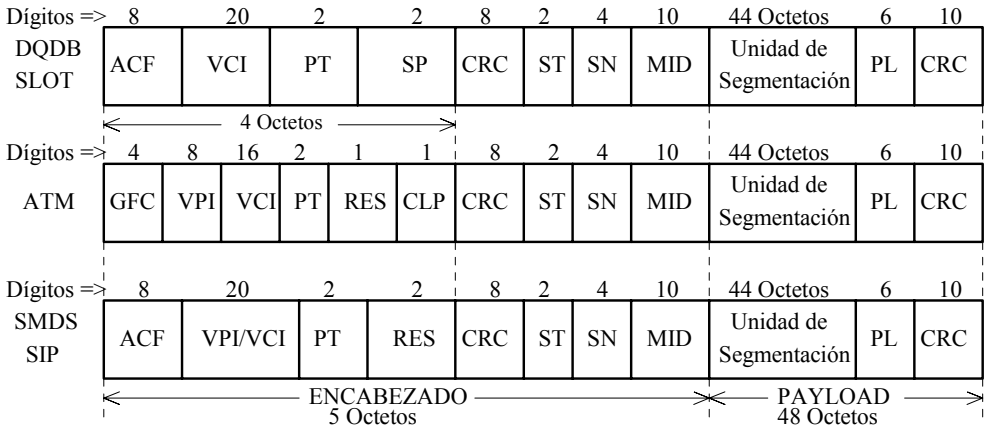


Fig. 6.49. Células DQDB, ATM y SMDS.

Aplicaciones

Las arquitecturas de red de las tecnologías de conmutación actuales son capaces de proveer los servicios SMDS, los cuales pueden ser soportados por diferentes tecnologías y diferentes fabricantes, y se pueden incorporar en las redes existentes y en la futuras sin perturbar el servicio a los usuarios. En la Fig. 6.50 se muestra un escenario de aplicaciones del servicio SMDS.

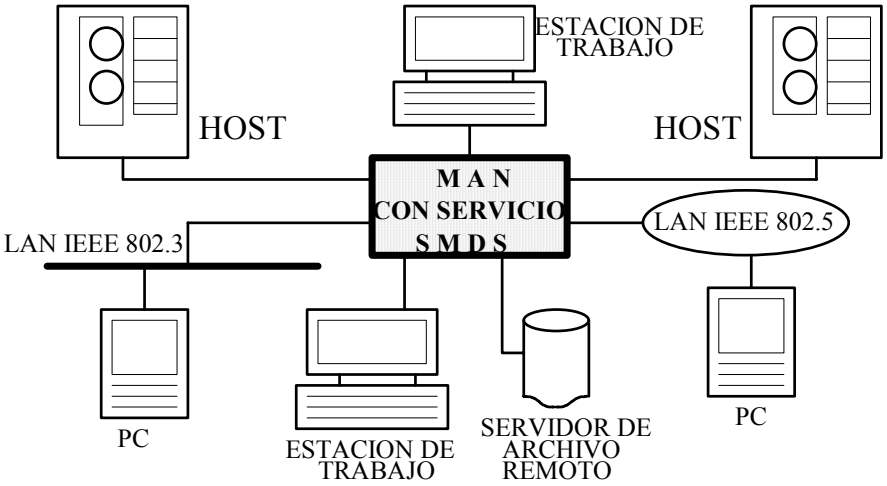


Fig. 6.50. Escenario Típico del Servicio SMDS.

La base del servicio SMDS está en la utilización de los Sistemas de Conmutación MAN (MSS) de las tecnologías de conmutación rápida de datos (Fast Packet). Un MSS es

un sistema de conmutación rápida que provee trayectorias y protocolos de acceso entre dos usuarios o entre dos nodos; en la trayectoria pueden haber varios MSS.

Actualmente hay dos tipos de conmutación rápida de paquetes que se pueden utilizar en los MSS: la tecnología METROCORE y la tecnología Batcher-Banyan. Con estas tecnologías se puede transmitir hasta 150 Mbps. Una descripción de estas tecnologías está fuera de los límites que nos hemos impuesto.

6.6. DISPOSITIVOS DE INTERCONEXION DE REDES

El aumento creciente dentro de una organización de las redes de área local durante la década de los 80 puso en evidencia la necesidad de buscar medios para interconectarlas en una gran red, pues estas redes, como ya lo hemos mencionado, tienen limitaciones en cuanto a la distancia. Por ejemplo, la longitud máxima de un segmento de red Ethernet (802.3) no puede ser mayor de 500 metros. Asimismo, algunas veces dentro de una misma organización se tenía redes locales de diferentes tipos y se necesitaba también una conexión a alguna WAN, generalmente del tipo X.25. Esto complicó mucho el problema de la interconexión de redes; sin embargo, muy pronto aparecieron soluciones que resolvieron este problema y que han sido propulsoras del inmenso progreso en la interconexión de redes, donde INTERNET es actualmente el paradigma.

Los elementos de interconexión de redes actualmente utilizados son los repetidores, los puentes (bridges), los enrutadores (routers) y las pasarelas (gateway) cuyas características veremos a continuación.

Repetidor

El repetidor es la forma más simple de dispositivo de interconexión. El repetidor opera a nivel de Capa Física del Modelo ISO/OSI, como se puede ver en la Fig. 6.51.

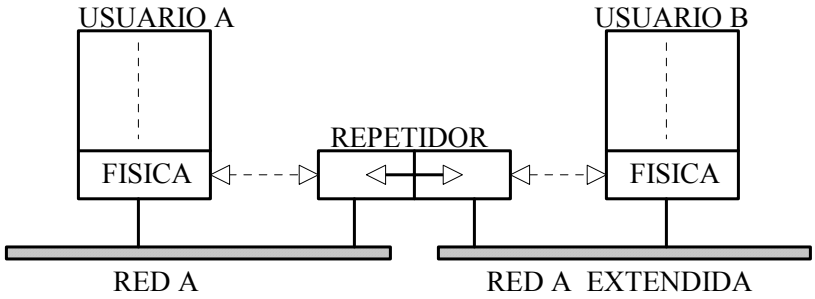


Fig. 6.51. Configuración de un Repetidor.

Al trabajar a nivel de Capa Física, el repetidor opera independientemente de los procesos y protocolos de capas superiores y la red extendida funciona a la misma velocidad que la red original. El repetidor actúa simplemente como un amplificador o convertidor: mantiene niveles de impedancia, voltajes, sincronización, etc., a ambos lados. Sin embargo, esto significa también, por un lado, que las dos redes tienen que ser iguales; pero por otro lado, y más importante aún, es que todos los problemas que se generan en un

lado (por ejemplo colisiones), son reflejados hacia el otro lado. A pesar de que las normas establecen el uso de repetidores, hay que ser muy cauteloso en su uso; recuérdese que la red Ethernet no permite más de dos repetidores entre dos estaciones cualquiera , aún utilizando los "repetidores remotos" que permiten extender una red hasta mil metros, como ya lo vimos en su oportunidad.

En general, los repetidores introducen factores limitativos en la funcionalidad de las redes de área local y las reglas para su aplicación son bastantes rigurosas. Esto hace que en la práctica la utilización de los repetidores sea bastante restringida, excepto en algunos casos muy sencillos como, por ejemplo, en la interconexión entre dos redes de oficinas.

Puentes (Bridges)

El repetidor establece una conexión física entre dos redes iguales; sin embargo, muy pronto surgió la necesidad de una conexión lógica entre dos redes adyacentes o geográficamente dispersas para formar una red más extensa. El primer dispositivo que se desarrolló fue el puente, el cual opera a nivel de Capa Enlace, específicamente en la Subcapa MAC, como se muestra en la Fig. 6.52. En los puentes las Capas Red y superiores deben ser idénticas en las dos redes.

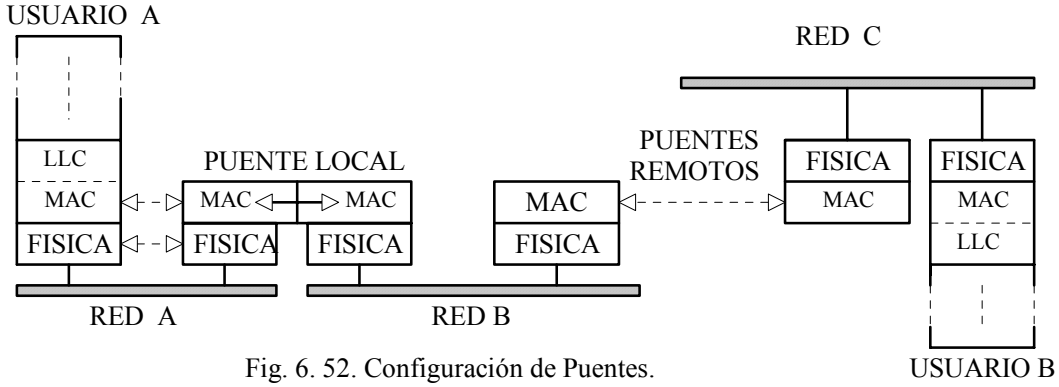


Fig. 6. 52. Configuración de Puentes.

A nivel de Subcapa MAC, los puentes examinan las direcciones de fuente y destino de todo el tráfico de la red. Si el destino está en la otra red, el puente retransmite el paquete correspondiente; el puente actúa entonces como una especie de filtro que no deja pasar sino los paquetes con destino a la red siguiente. Las dos redes mantienen cada una su propia identidad, pero están interconectadas mediante el puente. Los puentes proporcionan un buen aislamiento entre las dos redes y los problemas que se presentan en una red no afectan la otra. Los puentes se utilizan para convertir una LAN grande en múltiples LANs más pequeñas, lo cual aumenta la velocidad neta de transmisión en las estaciones involucradas.

Como el puente opera bajo el nivel de Capa Red, ellos son independientes de los protocolos de Capa Transporte y Red. Por ejemplo, un puente puede soportar protocolos tales como TCP/IP, DECnet, XNS, etc. El puente no efectúa ninguna conversión de protocolos y por ello puede soportar cualquier tipo de protocolo.

Los puentes locales fueron la solución para extender, conectar y segmentar LANs en un ambiente local. Sin embargo, muy pronto surgió la necesidad de interconectar redes distantes. Esto trajo como consecuencia el desarrollo de los "puentes remotos", los cuales operan igual que un puente local, pero además ofrecen facilidades para interconectar redes remotas. En este caso, en cada lado habrá un puente (llamados algunas veces "semipuentes"), como los mostrados en la Fig. 6.52, que permiten interconectar las redes B y C.

En resumen, los puentes o bridges operan a nivel de Capa Enlace para interconectar redes similares. Ellos transmiten tramas de acuerdo con las direcciones indicadas en la trama que corresponden a destinatarios del otro lado. Ellos impiden también la propagación de las transmisiones locales hacia otras redes y son independientes de los protocolos utilizados.

Enrutadores (Routers)

El segundo dispositivo de interconexión lógica que se desarrolló fue el Enrutador o Router. Este dispositivo opera a nivel de la Capa Red del Modelo ISO/OSI, como se muestra en la Fig. 6.53. Las capas superiores a la Capa Red deben ser las mismas en las dos redes.

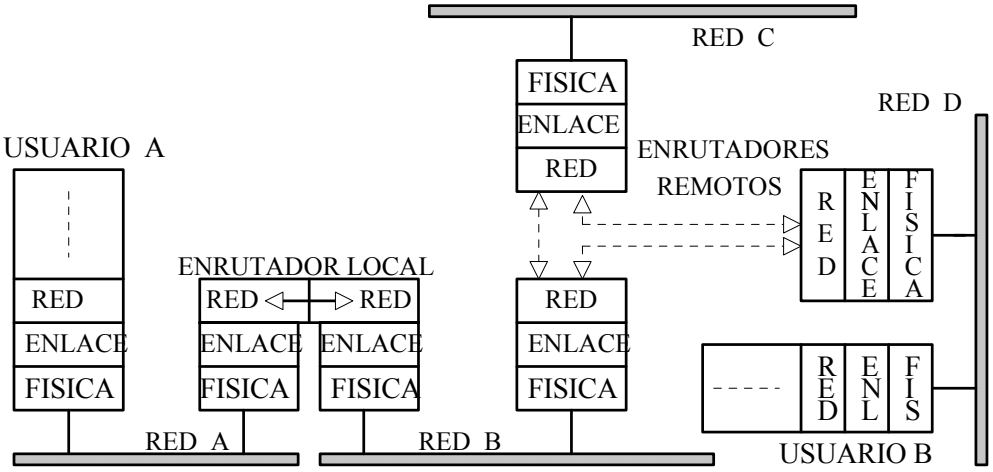


Fig. 6.53. Configuración con Enrutadores.

Los enrutadores transmiten paquetes de datos por diferentes trayectorias sobre redes similares de acuerdo con las prioridades de la red; incluye también tablas de enrutamiento para la selección de la trayectoria menos costosa o la más rápida o la más directa de un conjunto de múltiples trayectorias.

El procesamiento extra requerido por los enrutadores introduce retardos que pueden o no ser críticos según el tipo de información transmitido. Sin embargo, el enrutador puede identificar y sintonizar ciertos parámetros que hacen más eficiente el proceso de interconexión. En cambio, los puentes, por el hecho de que ellos ignoran el contenido de los paquetes, están forzados a soportar toda clase de tráfico.

El enrutador es entonces un dispositivo de Capa Red que enruta paquetes entre redes de acuerdo con las direcciones indicadas en el Encabezado del paquete. Los enrutadores dependen del protocolo utilizado; sin embargo, con el agregado de mucha inteligencia computacional los enrutadores actuales de segunda generación pueden manejar diferentes protocolos y tecnologías, y pueden reconfigurarse automáticamente.

Pasarela (Gateway)

La pasarela o "gateway" es el tercer tipo de dispositivo de interconexión que fue desarrollado al mismo tiempo que los primeros tipos de puente. La pasarela puede operar hasta la misma Capa de Aplicación, como se muestra en la Fig. 6.54 en la interconexión entre una red X.25 y una red Ethernet (802.3). La pasarela se utiliza cuando dos aplicaciones desean intercomunicarse pero ellas contienen diferentes protocolos en sus diferentes capas.

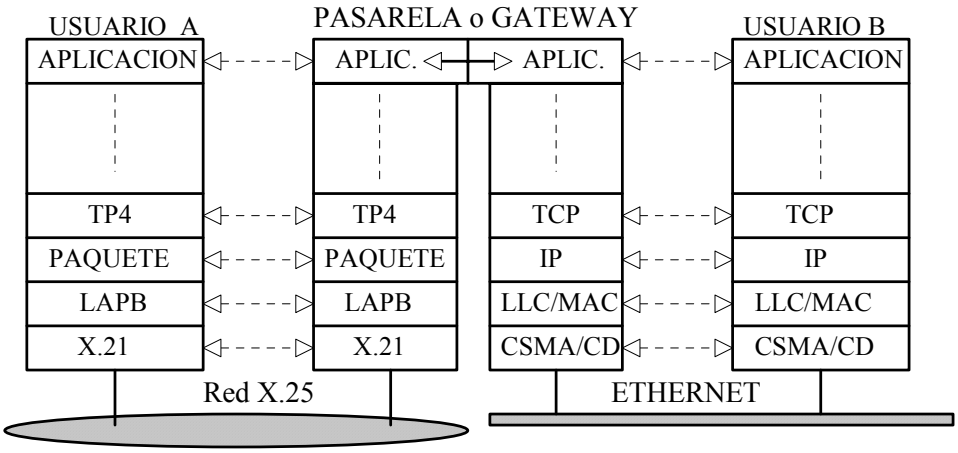


Fig. 6.54. Pasarela entre una Red X.25 y una Red ETHERNET.

Las pasarelas llevan a cabo funciones de conversión de protocolos permitiendo que redes diferentes se puedan interconectar; por ejemplo, redes NetBios y SNA, o entre terminales IBM con computadoras IBM mediante emulación de protocolos. En estos casos la conversión de protocolo se hace a un nivel más bajo que la Capa de Aplicación. Cuando trabaja a nivel de Capa de Aplicación, la pasarela permite el intercambio de protocolos con diferentes arquitecturas, por ejemplo, puede intercambiar paquetes desde SNA o DECnet a través de una red X.25. En la Fig. 6.54 se muestra un ejemplo de este tipo de intercambio. Otro ejemplo a nivel de Capa de Aplicación es el intercambio de correo electrónico.

Las pasarelas fueron diseñadas originalmente para servicios de gran área a velocidades bajas y no para la interconexión de redes de área local. Por eso es que las pasarelas son más lentas, menos transparentes, menos flexibles y la más dependiente de los protocolos utilizados. Las pasarelas son típicamente dispositivos más especializados y están diseñadas para efectuar tareas muy específicas. La aplicación de pasarelas en la interconexión de redes de área local eventualmente desaparecerá con la introducción de dispositivos más evolucionados que trabajarán directamente con protocolos estandarizados.

Los grandes sistemas de red presentes actualmente en la práctica se han logrado gracias a los dispositivos de interconexión y el ejemplo más patente es la INTERNET, que es una interconexión de redes informáticas que permite a las computadoras conectadas comunicarse directamente. El término INTERNET suele referirse a una interconexión en particular, de carácter planetario y abierto al público, que conecta redes informáticas de organismos oficiales, educativos, empresariales y domésticos. También existen sistemas de redes más pequeños llamados INTRANET, generalmente para el uso de una única organización.

La tecnología de INTERNET es la precursora de la llamada "superautopista de la información", un objetivo de las comunicaciones informáticas que permitirá proporcionar a universidades, colegios, bibliotecas, empresas y hogares acceso universal a una información de calidad que eduque, informe y entretenga.

En la Fig. 6.55 se muestra un ejemplo de aplicación de los repetidores, puentes, enrutadores y pasarelas en la conformación de una internet. Los dos usuarios A y B se están comunicando a través del complejo de redes.

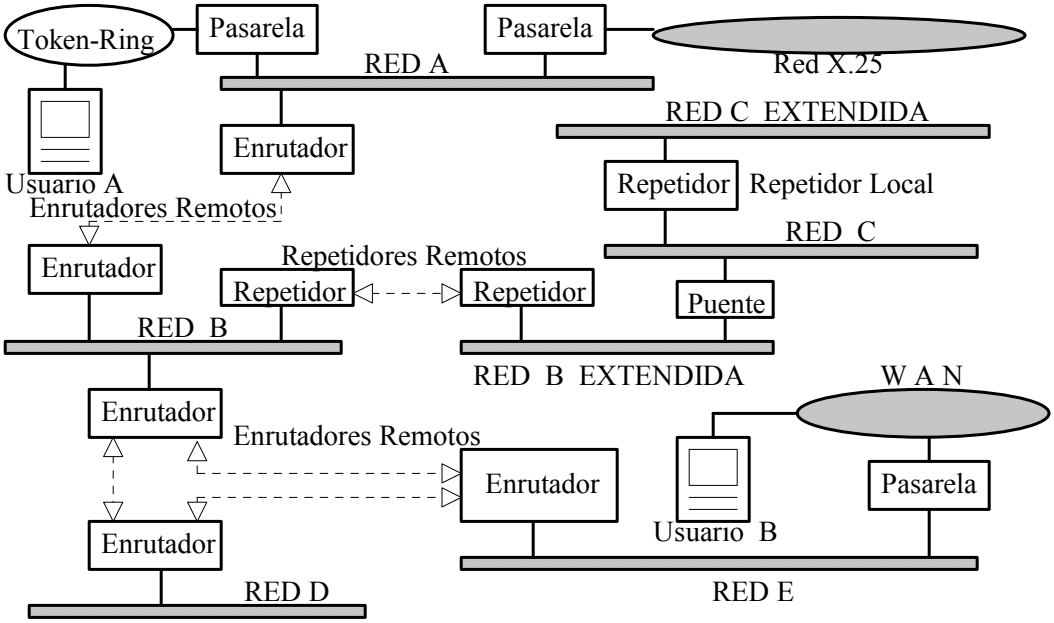


Fig. 6.55. Ejemplo de Interconexión de Redes.

El lector interesado en el tema de la interconexión de redes puede consultar [Stallings, 1993] quien ofrece un tratamiento mucho más completo y en una forma muy sencilla.

6.7. GESTION DE REDES

6.7.1. Introducción

El desarrollo y crecimiento experimentado por las redes de área local ha sido extremadamente acelerado. Cuando aumenta la cantidad de nodos y usuarios en una red, en la misma medida aumentan la complejidad y la aparición de problemas de todo género, y sin un sistema que maneje todas estas situaciones, el resultado final sería el desplome completo de la red. Para que una red se mantenga operativa y con altos niveles de productividad y eficiencia, es necesario disponer de un conjunto de herramientas y procedimientos para el monitoreo y control de la red. Este conjunto de herramientas y procedimientos es lo que comúnmente se denomina "Sistema de Gestión de Red (Network Management System)".

Un sistema de gestión de red está diseñado para observar toda la red como una arquitectura unificada, con direcciones y etiquetas asignadas a cada punto y con el conocimiento completo de todos los atributos específicos de cada elemento o enlace. La gestión está centralizada en un punto de la red y todos los elementos activos de la misma se mantienen en estrecho contacto con ese centro de control.

El sistema de gestión de una red consiste entonces en un conjunto de elementos de equipo y programas (hardware y software) que están integrados y distribuidos en la red misma y en el cual uno de los nodos existentes puede actuar como centro de control. Los programas utilizados en las tareas de gestión residen en computadoras o en procesadores específicos (servidores de comunicación, controladores de grupo, puentes, enrutadores, etc.) que interactúan con el centro de control.

Algunas de las tareas de gestión pueden ser:

- Coleccionar y almacenar localmente estadísticas sobre todas las actividades de la red
- Responder a comandos emitidos desde el centro de control incluyendo comandos para (a) transmitir las estadísticas locales hacia el centro de control, (b) cambiar parámetros, por ejemplo, un tiempo de retardo en un protocolo dado, y (c) proveer información sobre el estatus local, por ejemplo, valores de parámetros, enlaces activos, porcentaje de errores, etc.

6.7.2. Gestión de Red OSI

La ISO ha emitido un conjunto de normas para la gestión de red, cuyo primer estándar (ISO 7498-4) especifica una estructura de gestión para el Modelo de Referencia ISO/OSI. Este documento establece el soporte para aquellas actividades de usuario que permitan a los administradores de redes

(a) Planificar, organizar, supervisar, controlar, cobrar por el uso de los dispositivos de interconexión y responder a requerimientos de cambio

(b) Disponer de facilidades para asegurar un comportamiento predecible del sistema

(c) Disponer de facilidades para proveer protección para la información y para la autenticación de las fuentes y destinos de los datos transmitidos

En la Fig. 6.56 se muestra la arquitectura del Sistema de Gestión OSI.

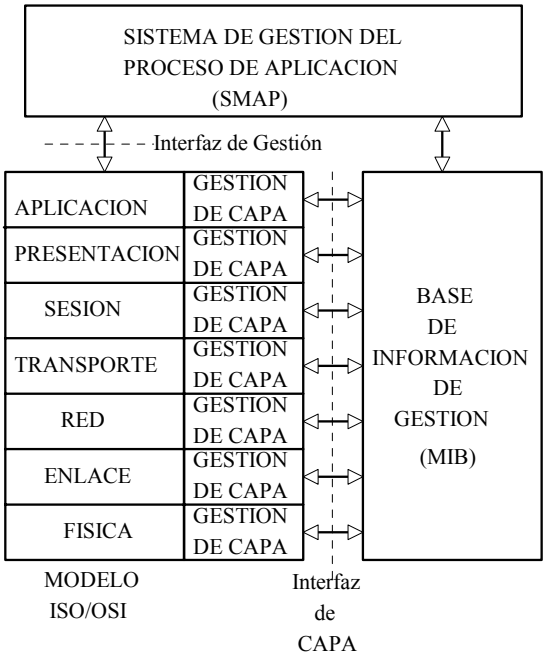


Fig. 6.56. Arquitectura del Modelo de Gestión OSI.

Los elementos clave de esta arquitectura son:

El Sistema de Gestión del Proceso de Aplicación (System Management Application Process, SMAP). Este es el software local que es responsable de la ejecución de las funciones de gestión en un simple sistema (computador, procesadores, servidores, enrutadores, etc.). Tiene acceso a todos los parámetros y capacidades del sistema, y puede operar en coordinación con los SMAP de otros sistemas

La Gestión de Capa (Layer Management Entity, LME). Es la lógica dentro de cada capa que provee las funciones de gestión propias de la capa.

La Base de Información de Gestión (Management Information Base, MID). Es la colección de información de cada nodo que tiene que ver con los procedimientos de gestión de la red.

El Modelo OSI se divide básicamente en cinco áreas funcionales:

(a) Gestión de Configuración. Responsable de la instalación y modificaciones realizadas sobre la red, así como el manejo de configuraciones tanto lógicas como físicas. El sistema permite:

- Crear mapas de red donde se muestran todos los elementos integrantes de la red

- Activación y desactivación de puertos para conexión de usuarios remotos
- Incorporación al mapa de red de cualquier equipo compatible

(b) Gestión de Fallas. Se refiere a la detección, aislación y control de comportamientos anormales de la red, tales como niveles excesivos de error o altos o bajos niveles de tráfico. Por ejemplo, puede detectar problemas por incrementos no esperados en errores de CRC, paquetes desalineados, paquetes demasiado largos o cortos, paquetes fragmentados, etc.

(c) Gestión de Seguridad. Se refiere a los procesos para control de acceso, registro y modificación de los privilegios y prioridades de los usuarios, y monitoreo de la red para evitar violaciones específicas de seguridad. El sistema mantiene un control absoluto sobre todas las conexiones a la red y tiene capacidad para desconexión automática en aquellos casos de violación de la seguridad a nivel de conexión física.

(d) Gestión de Prestaciones. Se refiere al monitoreo de la capacidad y carga de los componentes de la red, tales como enlaces de comunicación, segmentos de una red de área local, puentes, enrutadores, pasarelas, etc. Involucra también la recolección y análisis de datos relacionados con las prestaciones de los equipos con el fin de estar en capacidad de predecir o planificar futuros requerimientos, y/o cambios o actualizaciones cuando así se requiera.

(e) Gestión de Cuentas. Responsable de la recolección y procesamiento de la información relacionada con el costo del uso de los recursos disponibles en la red. El administrador de una red necesita conocer las diferentes clases de información contable que hay que almacenar en cada nodo, así como los intervalos para la entrega de esa información a los niveles superiores de gestión. El sistema debe poseer entonces procedimientos para el cálculo de los cargos y para la emisión de los informes contables correspondientes.

Nótese que un Sistema de Gestión de Red normalmente proveerá solamente algunas facilidades para cada una de estas áreas. Igualmente se puede disponer de herramientas específicas de gestión de red dirigidas a uno o dos de los servicios mencionados.

En resumen, un sistema de gestión de red permite

- Identificar problemas tales como conexiones erróneas entre máquinas, que generan grandes cantidades de errores
- Identificar problemas potenciales o en etapa de formación
- Mejorar los tiempos de respuesta de conexión a los usuarios y una mejora en la distribución de los servidores para estaciones de trabajo
- Identificar lazos cerrados entre máquinas y los problemas de carga de algunos servidores

- Garantizar la integridad y la seguridad de la información transmitida, recibida o almacenada
- Controlar la capacidad de crecimiento de cada una de las subredes que conforman la red total
- Mejorar la administración de los recursos de la red y la optimización del recurso Hora/Hombre.

El lector puede encontrar en [Stallings, 1993] mucha más información sobre este tema.

6.8. RESUMEN

En este capítulo se describen las características y principios de operación de las principales redes de transmisión de datos. Esta descripción se hará desde el punto de vista del Modelo de Referencia ISO/OSI.

Siguiendo la costumbre actual, las redes se clasifican de acuerdo con su extensión geográfica en (a) Redes de Gran Area (WAN), (b) Redes de Area Local (LAN) y (c) Redes de Area Metropolitana (MAN).

Antes de comenzar la descripción de las redes propiamente, primero se tratan algunos tópicos relacionados con las redes. En primer lugar, se recuerdan las dos formas de multiplexamiento TDM y FDM, el proceso de asignación de canales en los sistemas telefónicos y las jerarquías plesiocrónicas normalizadas por el UIT-T y otros entes internacionales. Asimismo, se describen los sistemas troncales T1 y E1 y las leyes de compansión utilizadas en los sistemas de transmisión internacionales.

Se define lo que es una Red de Gran Area o WAN, sus características, facilidades, medios y velocidades de transmisión. Se describe también la aplicación de las líneas DDS, los multiplexores corrientes y los multiplexores estadísticos, así como los DSU y CSU, de gran aplicación en los enlaces troncales de la WAN.

Como primer ejemplo de una WAN se describe con un poco de detalle la Red Digital de Servicios Integrados (ISDN), una red global de comunicaciones que permitirá la integración de servicios de comunicación diferentes (voz, texto, video y datos) en una sola red, sobre una sola línea, bajo el mismo número y a nivel mundial. El acceso a esta red será una simple “acometida de comunicaciones” a nivel de cada usuario.

La Red ISDN ha sido ya normalizada por el UIT-T en las Recomendaciones I Series I.100 a I.600, cuyas características principales se describen. En particular, se hace énfasis en la Serie I. 400, Interfaces Usuario-Red, en la cual se presentan los grupos funcionales, la Interfaz Básica y las Interfaces Primarias, y los correspondientes formatos y recomendaciones relativas a la Capa Física, Capa Enlace y Capa Red. Se describen también los diferentes Canales ISDN, sus estructuras y velocidades, y se hace una breve mención del Sistema de Señalización No. 7 del UIT-T y del Sistema Frame Relay.

En cuanto a las Redes de Area Local (LAN), se describe sus características principales, topologías, métodos de acceso al medio y los medios de transmisión. Se estudia con más atención las redes locales estandarizadas: el Estándar LAN IEEE 802.3

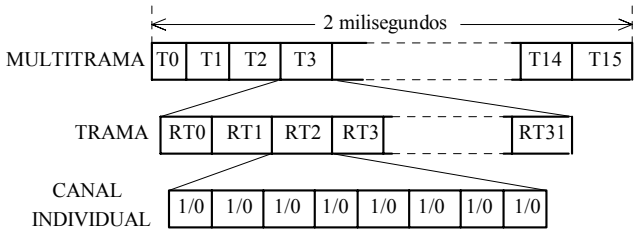
(ETHERNET), el Estándar LAN IEEE 802.4 (Token Bus) y el Estándar LAN IEEE 802.5 (Token Ring). Se describe sus arquitecturas, configuraciones físicas y algunas de sus aplicaciones principales.

Se define el concepto de Red de Area Metropolitana (MAN) y se dan sus características principales. Como ejemplo de MAN se describen las características y arquitecturas de las redes FDDI, FDDI-II y DQDB.

El capítulo finaliza con una breve descripción de los dispositivos de interconexión de redes (repetidores, puentes, enrutadores y pasarelas), así como las nuevas tendencias de alta velocidad (SONET/SDH, ATM y SMDS) y el concepto de gestión de red.

6.9. CUESTIONARIO

1. Estudie el mecanismo de formación de los grupos, subgrupos, grupos master y supergrupos master; en particular, determine el ancho de banda de un supergrupo master e investigue el número de subportadoras de modulación que se necesitan.
2. ¿Cómo se comparte el ancho de banda y el tiempo en los sistemas TDM y FDM?
3. Explique los mecanismos de formación de la Jerarquía Europea. Dibuje los formatos correspondientes.
4. Explique los mecanismos de formación de las Trocales T1 y E1. Dibuje los formatos correspondientes.
5. En la figura se muestra la multitrama para el formato de transmisión CEPT-1, de acuerdo con la Recomendación UIT-T G.732.



Demuestre que la velocidad de transmisión del sistema es de 2048 kbps.

6. Defina lo que es una WAN y diga sus características, facilidades, medios y velocidades de transmisión.
7. Explique lo que es una Red de Valor Agregado.
8. Describa las funciones de los multiplexores estadísticos (STMUX), las DSU y CSU.
9. Defina lo que es una ISDN y describa las diferentes fases para su implantación.
10. Dibuje las configuraciones de referencia de la Recomendación I.411 y describa las funciones de cada elemento: puntos de acceso, grupos funcionales y puntos de referencia.

11. Defina lo que son la Interfaz Básica y las Interfaces Primarias. Diga también las capacidades de transmisión correspondientes.
12. Defina lo que son los Canales ISDN B, D y H, y sus diferentes combinaciones y velocidades de transmisión correspondientes.
13. Investigue las características del Sistema de Señalización N° 7 (SS7) del UIT-T.
14. Explique los principios de operación del Sistema Frame Relay.
15. Explique las diferencias en la Capa Enlace entre Frame Relay y X.25.
16. ¿Cómo se efectúa el control de flujo y congestión en Frame Relay?
17. En Frame Relay explique la diferencia entre las Velocidades de Acceso y las Velocidades CIR.
18. En Frame Relay explique por qué el retardo nodal es mucho más pequeño que en X.25.
19. En relación con el Sistema Frame Relay, investigue el contenido de las Recomendaciones UIT-T I.122, Q.922 y Q.933.
20. Describa las topologías y medios de transmisión de las redes de área local.
21. Explique los métodos de acceso al medio tanto aleatorios como por pase de contraseña utilizados en las redes de área local.
22. Para las LAN estandarizadas IEEE 802.3/4/5, describa sus características, configuraciones físicas, arquitecturas, métodos de acceso al medio y aplicaciones.
23. En el lenguaje de las LAN se emplean los términos BaseBand, BroadBand, 10Base5, 10Base2, 10Broad36, 10BaseT, 20BaseF, 100BASETX, 100BASET4, 100BASEFX, 1000BASESX, 1000BASELX y 1000BASECX. ¿Cuál es el significado de estos términos y dónde se aplican?
24. Defina lo que es una Red de Area Metropolitana (MAN) y describa sus características y arquitecturas en relación con el Modelo ISO/OSI.
25. Describa las Redes FDDI, FDDI-II y DQDB: características, configuraciones físicas, formatos, arquitecturas y aplicaciones.
26. Describa las características y aplicaciones de los repetidores, puentes, enrutadores y pasarelas.
27. Describa los Estándares, Tecnologías y Servicios de Alta Velocidad: SONET/SDH, ATM y SMDS.
28. Vamos a utilizar la trama SONET STS-1 para transmitir únicamente canales de voz digitalizados de 64 kbps. Se utilizan células ATM en la cual la información útil va en la Unidad de Segmentación de 44 octetos. El número de células en la trama STS-1 es un número entero.

    Demuestre que en la trama STS-1 se puede transmitir hasta 572 canales de voz.
29. Describa los objetivos, características y funciones de un sistema de gestión de red.

CAPITULO VII

TECNICAS DE CONTROL DE ERROR

7.1. INTRODUCCION

Durante la transmisión de información digital a través de un sistema o canal se producen errores prácticamente inevitables debido a la presencia de ruido y a otros factores tales como la interferencia intersímbolo, la intermodulación y los ecos. Es por ello necesario establecer maneras, si nó para evitar los errores, por lo menos para poder reconocer su presencia y si es posible corregirlos. El proceso de control de error es de gran importancia pues debido a la baja redundancia de los datos digitales, un grupo de números o símbolos alfanuméricos erróneo puede parecerse a otro significando algo muy diferente.

El concepto de redundancia lo podemos entender mejor mediante un sencillo ejemplo: el conjunto [00, 01, 10, 11] de palabras o mensajes binarios no es redundante porque todas las palabras posibles de dos dígitos binarios están contenidas en el conjunto; un error de transmisión en cualquiera de las palabras la convierte en otra palabra válida del conjunto y no habría manera de detectar el error. La redundancia es de capital importancia en el control de error pues, como lo estableció Shannon, no es posible transmitir sin error si los códigos utilizados tienen cero redundancia.

El primer método de control de error que se utilizó fue el denominado "ecoplex". En este método el transmisor envía un carácter, el cual es recibido en el receptor y retransmitido como un eco hacia el transmisor, de aquí el nombre de ecoplex. En el transmisor se examina el carácter eco recibido para ver si difiere del carácter original; si es diferente simplemente se corrige el error y se transmite de nuevo. Como un error de transmisión puede ocurrir en cualquiera dirección, es posible que un carácter erróneo en una dirección se convierta en el carácter correcto al regresar como eco y viceversa. Este método fue muy popular en los sistemas de teletipo, aunque todavía se utiliza en algunos sistemas de transmisión asincrónica.

En los sistemas de comunicación actuales el control de error se efectúa mediante la aplicación de códigos especiales que agregan redundancia; estos códigos son de la clase de "códigos de canal" para diferenciarlos de los códigos de línea, vistos en el Capítulo II. Esta redundancia agregada permite detectar y/o corregir los errores ocurridos durante la transmisión de los bloques de datos. En este capítulo vamos a describir en forma algorítmica algunos de los códigos más utilizados para la detección y/o corrección de errores. La teoría de los códigos es una materia muy compleja y altamente matemática y un estudio más detallado de estos códigos está fuera de los alcances de este libro.

7.2. DETECCION Y CORRECCION DE ERROR

Cuando se recibe un bloque de dígitos binarios es necesario asegurarse de que no contiene errores de transmisión. Si se detecta que el bloque está en error, se tiene dos opciones: una es corregir el error en el sitio y la otra solicitar la retransmisión del bloque. Esta situación ha producido las dos técnicas de control de error comúnmente utilizadas: la

"Corrección Directa de Error (Forward Error Correction, FEC)" y la "Solicitud de Repetición Automática (Automatic Repeat Request, ARQ)". En la técnica FEC se utilizan códigos para detectar y corregir los errores en el receptor; mientras que en la técnica ARQ los códigos solamente detectan la presencia de errores en los datos recibidos y se solicita en alguna forma la repetición de los bloques que vienen en error. La técnica ARQ es la que se utiliza comúnmente en los protocolos de comunicación, vistos en los Capítulos IV y V.

Cualquiera que sea la estrategia de control de error, FEC o ARQ, la secuencia transmitida debe ser codificada, es decir, se le debe agregar una cierta redundancia. Esta codificación se efectúa en los CODEC y se localiza en la forma mostrada en la Fig. 7.1.

Fig. 7.1. Control de Error (FEC o ARQ).

El diseñador de sistemas de control de error se enfrenta entonces a dos problemas fundamentales:

(a) Cómo sintetizar un código con la redundancia deseada o las características FEC o ARQ requeridas y, por supuesto, cómo diseñar e instrumentar el codificador y el descodificador (el CODEC) en una forma eficiente y sencilla.

(b) Cómo hacer que el código total (incluidos los dígitos redundantes) sea lo más eficiente posible, es decir, que la redundancia agregada sea mínima y máximo el rendimiento.

7.2.1. Rendimiento y Redundancia de un Código

La inclusión de redundancia en la transmisión de datos tiene como consecuencia un aumento en la velocidad de modulación de las secuencias transmitidas, lo cual se traduce en un aumento del ancho de banda requerido. Se puede definir entonces dos parámetros de gran interés en la codificación: el rendimiento E del código, y la redundancia R. En efecto:

$$\text{Rendimiento del Código} = E\% = \frac{\text{Información realmente transmitida}}{\text{Máxima información posible de transmitir}} 100 \quad (7.1)$$

y la Redundancia, $R\% = [1- E]100$ (7.2)

Por ejemplo, para el código [00, 01, 10, 11] se tiene:

$$E\% = \frac{2 \text{ bits}}{2 \text{ bits}} 100 = 100\% \quad \text{y} \quad R\% = 1 - 1 = 0\%$$

En este código es fácil observar que el conjunto de mensajes o palabras no tiene redundancia; esto quiere decir que cualquier error en un dígito convierte la palabra en otra palabra válida pero diferente. En este caso no hay manera de detectar, y mucho menos corregir, cualquier error ocurrido en la transmisión. Comparemos esta situación con la transmisión del idioma español que es altamente redundante; es evidente que al recibirse, por ejemplo, la palabra "**veloicdad**", se puede detectar que hubo una permutación entre la

"i" y la "c", pues la palabra tal como está escrita no existe en español. Por otro lado, un conjunto de mensajes puede ser parcialmente redundante, pero con una estructura que lo hace ineficiente en cuanto a la protección contra errores. Por ejemplo, en el caso de los números telefónicos se puede decir que son parcialmente redundantes, pues no todas las combinaciones de números son utilizadas o que en algunos casos el orden de los dígitos pudiera tener algún significado. Este tipo de secuencias no es apropiado para ser protegido eficientemente contra errores de transmisión.

Si mediante alguna forma controlada se le agrega dígitos de redundancia a una secuencia que necesita protección, la información adicional proporcionada por esos dígitos se puede utilizar para detectar y/o para corregir errores. Por ejemplo, en el código [00, 01, 10, 11] se le agrega a cada palabra un dígito extra de acuerdo con las siguientes condiciones: un CERO si el número de UNOS en la palabra original es par o ausencia de UNOS, o un UNO si el número de UNOS en la palabra original es impar. Esta es la denominada "paridad par". El dígito extra se denomina "dígito de paridad" y el número de UNOS de la palabra resultante es el "peso" o "ponderación" del código. En la Fig. 7.2 se muestra este proceso.

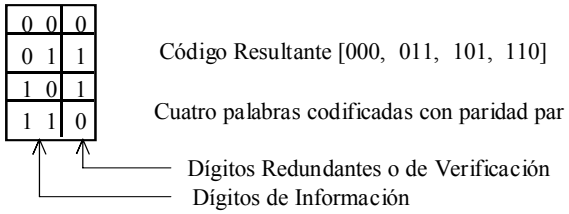


Fig. 7.2. Mecanismo de Codificación con Paridad Par

En general, se dice que hay "paridad par" cuando la ponderación (número de UNOS) de la palabra codificada es cero o par. Si la ponderación es impar, se tiene la "paridad impar".

El código tiene ahora la forma [000, 011, 101, 110] y se puede detectar un simple error en cualquiera de las cuatro palabras del código. En efecto, supóngase que se transmitió la palabra 101 y que debido a las condiciones de transmisión se recibió la palabra 111. En el receptor se recalcula el dígito redundante con base en los dos primeros obteniéndose un CERO, pero esto está en conflicto con el dígito redundante recibido que es un UNO, de modo que el receptor deduce que hay un error presente, aunque no sabe si lo que se transmitió fue 101 ó 011. De todas maneras, se ha detectado la presencia de un error que se puede corregir solicitando la repetición o tomando alguna acción predeterminada.

♣ Ejemplo 7.1

En las siguientes secuencias codificadas el dígito de paridad está en **negrita**. Diga qué tipo de paridad (Par o Impar) es:

100101110**1**, 010111001010**0**, 1010011101110010011101, 0111100101000110100101000

Solución:

Recordemos la Regla de Paridad: "Si la Ponderación (número de UNOS en la palabra codificada) es cero o par, se tiene la Paridad Par. Si la ponderación es impar, se tiene la Paridad Impar".

Primera secuencia ➔ 5 UNOS ➔ paridad impar

Segunda secuencia ➔ 6 UNOS ➔ paridad par

Tercera secuencia ➔ 12 UNOS ➔ paridad par

Cuarta secuencia ➔ 11 UNOS ➔ paridad impar

♣

La verificación efectuada por el receptor en el código de la Fig. 7.2 se denomina "prueba de paridad (parity check)" y ella permite detectar errores sencillos o triples (error también en el dígito redundante), pero no errores dobles (por ejemplo, enviado 101, recibido 011). Nótese que esta prueba de paridad no permite la corrección ni de un simple error, pues no hay información suficiente en la redundancia agregada que permita hacerlo. El precio que se paga al agregar redundancia es una disminución del rendimiento de transmisión y una exigencia mayor sobre el ancho de banda del sistema, pues si la velocidad de información se mantiene constante, hay que aumentar la velocidad de modulación. Para el caso de la Fig. 7.2, se puede ver que el rendimiento y la redundancia son E% = (2/3)100 = 66,6% y R% = 33,3%; sin embargo, el ancho de banda requerido es 1,5 veces el ancho de banda original.

El proceso de agregar redundancia se denomina "codificación" y el de deducir la presencia o ausencia de errores, "descodificación". Hemos utilizado estos términos pues son la traducción literal de las correspondientes inglesas ("encoding" y "decoding"), pero debe tenerse en cuenta que la palabra binaria ella misma es producida por otro proceso de codificación previo.

Los códigos de detección solamente (ARQ) o de detección y corrección de error (FEC) se denominan, en general, "Códigos de Bloque". La redundancia se agrega a cada "palabra de datos" (o "palabra mensaje") y la expresión total [datos + redundancia] se denomina "palabra código" o "palabra codificada". El número de dígitos en cada palabra código es la "longitud de bloque", y habrá tantas palabras código como palabras mensaje o palabras de datos. Si la palabra mensaje tiene m dígitos y la redundancia agregada es de k dígitos, la longitud de bloque de la palabra código será de $n = (m + k)$ dígitos.

Sería muy interesante poder calcular la probabilidad de error en un bloque de datos en un enlace dado, pero desafortunadamente esto es muy difícil. En primer lugar, porque los errores en los enlaces tienden a ser dependientes y ocurren en ráfagas; no hay modelos matemáticos apropiados para determinar la longitud o la intensidad de estas ráfagas, las cuales varían ampliamente dentro de un mismo enlace. En segundo lugar, porque para cualquier código razonable la frecuencia de errores es muy pequeña y muy difícil de medir experimentalmente debido a sus características aleatorias. Como resultado de estas dificultades, la efectividad de un código FEC o ARQ se caracteriza mediante tres parámetros: (1) la distancia mínima del código, (2) la capacidad de detección de ráfagas, y

(3) la probabilidad de que una secuencia aleatoria de datos sea aceptada como libre de errores. La distancia mínima de un código se define como el mínimo número de errores necesarios para convertir una palabra código en otra. La longitud de una ráfaga de errores en un bloque es el número de dígitos desde el primer dígito en error hasta el último, ambos inclusive. La capacidad de detección de ráfagas de un código se define como el entero B más grande tal que el código pueda detectar todas las ráfagas de longitud $\leq$ B. Todos estos parámetros se pueden calcular, pero eso está fuera de los propósitos de este libro.

7.3. ESQUEMAS DE DETECCION Y/O CORRECCION DE ERROR

La necesidad de saber si los datos recibidos están o nó correctos impulsó el diseño de numerosos esquemas o códigos para la detección y/o corrección de errores. A continuación vamos a describir algunos de los esquemas más conocidos utilizados en las telecomunicaciones.

7.3.1. Repetición

La repetición es la forma más simple de detección de error. La redundancia consiste en transmitir cada dígito de información dos veces y las dos versiones se comparan en el receptor. En esta forma se puede detectar errores en alguno de los dígitos. Los dígitos de información se pueden repetir también dos o más veces, y en el receptor se hace una prueba de mayoría (O-exclusivo o módulo 2) para establecer el valor correcto del dígito de información si por lo menos uno de los ellos llegó en error. En general, m transmisiones del mismo dígito permite detectar (m – 1) errores y corregir $\text{ent}\left[\frac{m-1}{2}\right]$ errores. Sin embargo, el precio a pagar en términos del rendimiento es alto. En efecto,

para m = 2 $\rightarrow$ E = 1/2

para m = 3 $\rightarrow$ E = 1/3

para m transmisiones $\rightarrow$ E = 1/m

pero la técnica de detección y corrección es sumamente sencilla aunque lenta.

7.3.2. Códigos de Ponderación Constante

Los códigos de ponderación constante son códigos de bloque con N palabras código que consisten en todas las secuencias binarias posibles de longitud n que contienen m UNOS. Por ejemplo, sea el código siguiente donde:

n = 4 ; m = 2 ; N = 6

Secuencias posibles:

1 1 0 0
1 0 1 0
1 0 0 1
0 1 0 1
0 0 1 1
0 1 1 0

N es el número de palabras código y viene dado por

$$N = \frac{n!}{m!(n-m)!} \qquad (7.3)$$

Las N secuencias particulares se obtienen desarrollando las 2^n secuencias binarias tomándose aquellas que contienen m UNOS.

Con este tipo de código se puede detectar errores simples, y errores dobles si los errores son ambos en los UNOS o ambos en los CEROS. Un esquema frecuentemente utilizado es aquel para el cual m = 3, n = 7 y N = 32, aplicado en la telegrafía.

Estos códigos se conocen también con las denominaciones "código m-de-n" y "código de relación fija o constante". Son de fácil instrumentación, pero su rendimiento es relativamente bajo.

♣ Ejemplo 7.2

En el Código de Ponderación Constante, escriba todas las secuencias de longitud 5 que contienen tres UNOS.

Solución:

n = 5; m = 3. Se desarrollan todas las 2^n secuencias y de allí se extraen aquellas que contienen tres UNOS; son 2^5 = 32 secuencias:

00000	00001	00010	00011	00100	00101	00110	**00111**
01000	01001	01010	**01011**	01100	**01101**	**01110**	01111
10000	10001	10010	**10011**	10100	**10101**	**10110**	10111
11000	**11001**	**11010**	11011	**11100**	11101	11110	11111

Las secuencias que contienen tres UNOS están remarcadas en negrita; son 10. Por lo tanto,

Número de palabras codificadas N = 10.

Verificación, expresión (7.3): $N = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 2} = 10$

♣

7.3.3. Suma de Verificación (Checksum)

En este método la palabra mensaje forma un bloque sobre el cual se efectúa una cierta operación. El resultado de esta operación se agrega como redundancia formando la palabra código la cual se transmite. En el destino se repite la misma operación sobre la palabra mensaje y el resultado de esa operación se compara con la redundancia transmitida. Si los dos resultados son iguales, se estima que el bloque de datos fue recibido correctamente, y se reconoce la recepción correcta del mensaje; pero si los resultados no son iguales se considera que el mensaje está en error y se pide la retransmisión del mismo. Este es el procedimiento más utilizado en los protocolos de comunicación vistos.

Uno de los esquemas más conocido es la "suma de verificación (checksum)" que se utiliza en el protocolo XMODEM. La operación consiste en sumar los valores de los caracteres contenidos en el campo Información y dividir la suma por 255. El cociente se

descarta y lo que se transmite como BCC es el resto de la división. Matemáticamente, el BCC se puede generalizar mediante la expresión

$$BCC = \text{Resto}\left|\frac{\sum_{1}^{N} \text{Valor de los caracteres ASCII}}{2N-1}\right| \qquad (7.4)$$

donde N es el número de caracteres de la palabra mensaje; el número n de dígitos del BCC es igual a $n = \log_2(N) + 1$. En el caso del protocolo XMODEM, $N = 128$ y $n = 8$ dígitos; el BCC irá en un octeto.

♣ Ejemplo 7.3

Durante un intercambio de información en XMODEM la suma de los valores de los 128 caracteres contenidos en el campo Información es igual a 10850. Determine el BCC correspondiente.

Solución:

En el CODEC se efectúa la siguiente operación (que para más claridad la efectuamos en decimal, aunque en la práctica las operaciones son binarias o hexadecimales):

10850 |255
0650 42 El cociente no se utiliza
$\boxed{140}$ => Resto => BCC = $\underset{\text{MSB}}{1}000110\underset{\text{LSB}}{0}$

El BCC que se le agrega a la trama es entonces 00110001. Nótese que el LSB se envía de primero. ♣

7.3.4. Código de Prueba de Paridad Sencilla

Este es el tipo de código detector de error que introducimos someramente en la Sección 7.1. Un código de prueba de paridad sencilla ("simple redundancy check, SRC") de longitud de bloque n se puede establecer efectuando una prueba de paridad sobre los m dígitos de información de la palabra de datos o palabra mensaje.

El dígito de paridad es la suma módulo 2 de los valores de los m dígitos de la palabra mensaje, es decir, sea c el dígito de paridad, entonces,

$$c = d_1 \oplus d_2 \oplus d_3 \oplus .... \oplus d_m = \sum_{j=1}^{m} d_j \text{ módulo } 2; \quad n = m + 1 \qquad (7.5)$$

donde $\oplus \equiv$ suma módulo 2 [recuérdese que $A \oplus B = \overline{A}B + A\overline{B}$]; d_1 es el dígito de menor peso (LSB) y m el número de dígitos de información. El dígito de paridad c se agrega a la

palabra mensaje y se transmite de último, siendo n = m + 1 la longitud de la palabra código; la paridad es par. La palabra transmitida tiene entonces la forma $[d_1 d_2 d_3 \cdots d_m c]$.

Con este código se puede detectar errores sencillos, triples, en general, un número impar de errores en una palabra código; sin embargo, si el número de errores es par, los errores no pueden ser detectados. En consecuencia, se puede decir que este código detectará solamente el 50% de los errores de transmisión. El rendimiento es bueno: E = m/n y $R = 1/n$; si m >> 1, el aumento en el ancho de banda es despreciable y el rendimiento es casi del 100%.

7.3.5. Código de Prueba de Paridad Vertical y Horizontal

La prueba de paridad vertical (VRC) es un esquema de detección de error similar a la prueba de paridad sencilla aplicada a cada uno de los caracteres de un bloque de datos. Por su parte, la prueba de paridad horizontal o longitudinal (HRC o LRC) se utiliza para determinar si un error de transmisión ha ocurrido en un mensaje compuesto por caracteres. La secuencia de dígitos en el LRC se calcula en el transmisor y se transmite como el último carácter del mensaje; es el carácter BCC visto en el Capítulo III . En el receptor el BCC se recalcula y el BCC recalculado se compara con el BCC transmitido. Si son iguales, se supone que no hubo errores en la transmisión; si son diferentes, hubo error en la transmisión y se puede solicitar la retransmisión del bloque completo. En la Fig. 7.3 se muestra el mecanismo de generación de las paridades VRC y LRC, en ASCII. El BCC contiene 8 dígitos.

	← Sentido de Transmisión						LRC (par)→	
Caracteres ……	E	L	[ ]	B	I	T ……		BCC
b_0	1	0	0	0	1	0	→	0
b_1	0	0	0	1	0	0	→	1
b_2	1	1	0	0	0	1	→	1
b_3	0	1	0	0	1	0	→	0
b_4	0	0	0	0	0	1	→	1
b_5	0	0	1	0	0	0	→	1
b_6	1	1	0	1	1	1	→	1
VRC↓ Paridad (impar)	0	0	0	1	0	0	→	1

Fig. 7.3. Mecanismo de paridad vertical impar y paridad horizontal par

7.3.6. Códigos Matriciales (Array Codes)

Los códigos matriciales son códigos de detección y corrección de error , y en su forma más sencilla, son una generalización del código SRC pero extendido a dos dimensiones. En efecto, a la prueba de paridad horizontal se le agrega una prueba de

paridad vertical y una prueba de prueba, lo que permite no sólo detectar sino corregir un error en el bloque transmitido. En estos códigos se utiliza la paridad par. En la Fig. 7.4 se muestra la Matriz Principal, la Submatriz y el mecanismo de codificación.

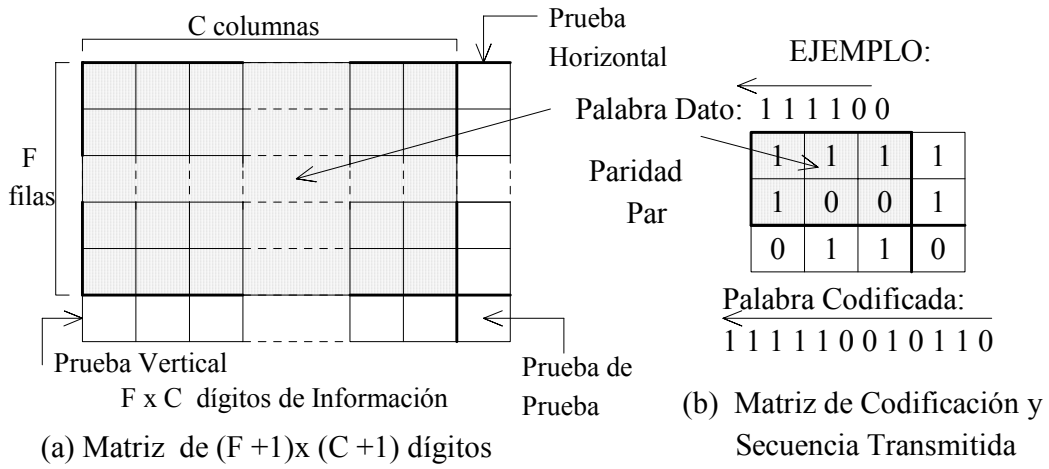


Fig. 7.4. Generación del Código Matricial

La palabra dato se distribuye en la Submatriz de F filas y C columnas.

En los códigos matriciales la matriz principal generalmente es rectangular y C > F; la matriz será cuadrada cuando C = F. El rendimiento y la redundancia serán

$$E = \frac{C \cdot F}{(C+1)(F+1)}; \qquad R = 1 - E = \frac{C+F+1}{(C+1)(F+1)} \tag{7.6}$$

Sea m el número de dígitos de información y k el de redundancia. Se tiene entonces,

$$n = m + k = (C+1)(F+1); \quad m = C \cdot F; \quad k = C + F + 1; \quad E = \frac{m}{n} \text{ y } R = \frac{k}{m}$$

Para la matriz de la Fig. 7.4(b),

m = 6; k = 6; n = m + k = 12; C = 3; F = 2; E =1/2 ; R = 1/2.

La palabra código de longitud n se puede transmitir en un formato apropiado, por ejemplo, serialmente por filas o columnas, o paralelamente en (F+1) secuencias paralelas. Cuando las pruebas de paridad vertical y horizontal fallan, es decir, que se detecta un error en un dígito, este error puede ser corregido de inmediato pues su emplazamiento se conoce con exactitud, como se puede apreciar en la Fig. 7.5.

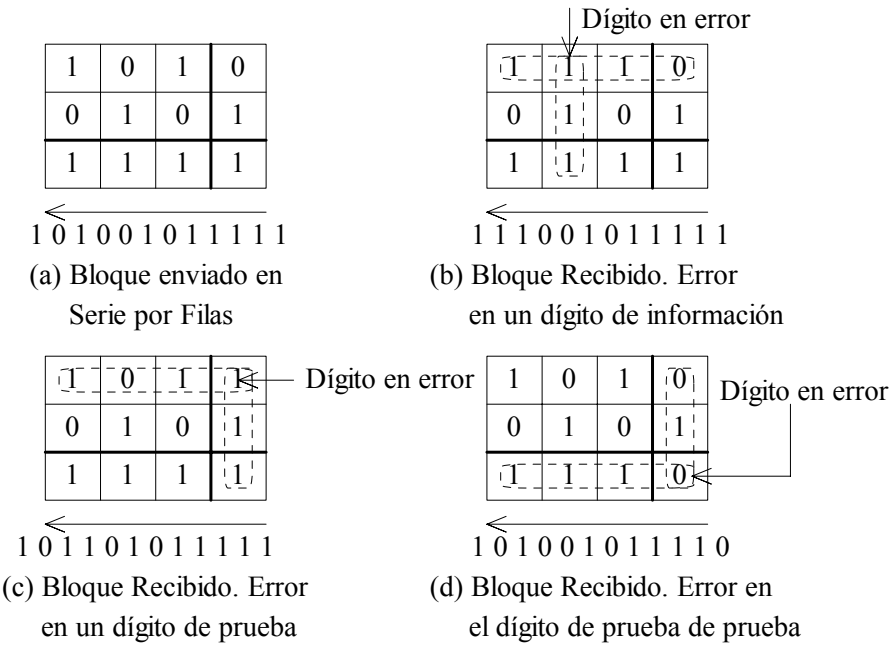


Fig. 7. 5. Mecanismo de Corrección de Error.

Los códigos matriciales son muy eficientes en lo que se refiere a la corrección de errores, particularmente si la matriz es cuadrada. Estos códigos pueden extenderse también a más de dos dimensiones.

♣ Ejemplo 7.4

Código Matricial. Se recibió la siguiente secuencia codificada

011011101100111001011011011101

Diga cuál fue la palabra mensaje transmitida y el rendimiento de transmisión.

Solución:

011011101100111001011011011101

Son 30 dígitos = 5 filas x 6 columnas

Los 30 dígitos se colocan en una matriz de 5 filas por 6 columnas y se verifica la paridad tanto horizontal como verticalmente. Puede observarse que la paridad no se verifica en el dígito B3 que debe entonces ser CERO. Por lo tanto, la palabra mensaje transmitida fue

011011001011100011010111 0

	1	2	3	4	5	6
A	0	1	1	0	1	1
B	1	0	1	1	0	0
C	1	1	1	0	0	1
D	0	1	1	0	1	1
E	0	1	1	1	0	1

En cuanto al rendimiento, $E\% = \frac{4x5}{5x6}100 = 66{,}6\%$

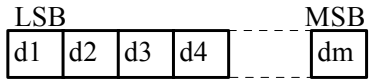
♣

7.3.7. Código de Hamming

Dentro de la clase de códigos detectores/correctores de error el código Hamming es un código óptimo aún más eficiente que los códigos matriciales. La teoría de este código es muy compleja pero vamos a explicar su aplicación en una forma algorítmica. Los pasos de aplicación del algoritmo de Hamming son los siguientes (ver la TABLA No. 1):

Algoritmo de Codificación Hamming

(1) Considere que la palabra dato tiene la forma



donde m es el número de dígitos de la palabra dato.

(2) Con este valor de m seleccione la longitud n del bloque en la columna 1 de la Tabla No.1 o en la Tabla No. 2. Por ejemplo, para m = 8 $\rightarrow$ n = 12.

(3) En la columna 2, Tabla No. 1, identifique las posiciones que son potencias enteras de 2^i (i = 0, 1, 2,….), es decir, $2^0 = 1 \rightarrow$ posición 1; $2^1 = 2 \rightarrow$ posición 2; $2^2 = 4 \rightarrow$ posición 4; etc.

TABLA No. 1. CODIFICACION DE HAMMING

←	7	6	5	4	3	2	1
	c_4	c_3	c_2	c_1	c_k/d_m	2^i	n
	0	0	0	1	c_1	2^0	1
	0	0	1	0	c_2	2^1	2
	0	0	1	1	d_1	-	3
	0	1	0	0	c_3	2^2	4
	0	1	0	1	d_2	-	5
	0	1	1	0	d_3	-	6
	0	1	1	1	d_4	-	7
	1	0	0	0	c_4	2^3	8
	1	0	0	1	d_5	-	9
	1	0	1	0	d_6	-	10
	1	0	1	1	d_7	-	11
	1	1	0	0	d_8	-	12
	1	1	0	1	d_9	-	13
	1	1	1	0	d_{10}	-	14
	1	1	1	1	d_{11}	-	15

(4) En la columna 3 coloque los dígitos de paridad c_1, c_2, c_3, …… en las posiciones identificadas en (3), y en el resto de las posiciones coloque los dígitos de información d_1, d_2, d_3,…… La columna 3 constituye la "palabra codificada clave", la cual tendrá la forma (remarcada en la Tabla No.1)

← Sentido del Flujo de Datos

c1	c2	d1	c3	d2	d3	d4	c4	d5

m dígitos de información
k dígitos de paridad
n = m + k

Para facilitar la descodificación, se envía primero los m dígitos de información seguidos de los k dígitos de paridad. La palabra codificada transmitida tendrá entonces la forma

← Sentido del Flujo de Datos

DATOS					BCC			
d1	d2	d3	- - - -	dm	c1	c2	- - -	ck

LSB MSB

(5) En las columnas 4 en adelante escriba en binario los números del 1 al n, e identifique la columna 4 con c_1, la 5 con c_2 y así sucesivamente, como se muestra en la Tabla No. 1.

(6) La ecuación para cada dígito de paridad c_i, se obtiene directamente de las columnas 4 en adelante. Por ejemplo, se suman en módulo 2 todos los dígitos de información d_j cuya expresión en la columna 4 contiene un UNO. El cálculo de los Dígitos de Paridad para $n \le 15$, $m \le 11$ y $k \le 4$ nos da:

$$\begin{aligned} c_1 &= d_1 \oplus d_2 \oplus d_4 \oplus d_5 \oplus d_7 \oplus d_9 \oplus d_{11} \\ c_2 &= d_1 \oplus d_3 \oplus d_4 \oplus d_6 \oplus d_7 \oplus d_{10} \oplus d_{11} \\ c_3 &= d_2 \oplus d_3 \oplus d_4 \oplus d_8 \oplus d_9 \oplus d_{10} \oplus d_{11} \\ c_4 &= d_5 \oplus d_6 \oplus d_7 \oplus d_8 \oplus d_9 \oplus d_{10} \oplus d_{11} \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \end{aligned} \tag{7.7}$$

Si $2^k \ge (n+1) > 2^{k-1}$ entonces $2^k \ge m+k+1$; también $k \ge \log_2(n+1)$.

La Tabla se puede extender para cualquier valor de n.

Estas relaciones nos permiten determinar m, k ó n cuando se conocen o establecen las otras dos. El rendimiento y la redundancia son:

$$E\% = \frac{m}{m+k}100 = \frac{m}{n}100; \quad R\% = \frac{k}{m+k}100 = \frac{k}{n}100 \tag{7.8}$$

En la Tabla 2 se muestra la relación entre estas variables.

TABLA No. 2. Relación entre m, k, n, E y R

m	k	n	E%	R%
3	3	6	50	50
4	3	7	57	43
5	4	9	56	44
6	4	10	60	40
7	4	11	64	36
8	4	12	67	33
9	4	13	69	31
10	4	14	71	29
11	4	15	73	27

Algoritmo de Descodificación Hamming

Para la descodificación y corrección de error se siguen los siguientes pasos:

(1) En el receptor se recalculan los dígitos de paridad a partir de los dígitos de información de la palabra codificada recibida.

(2) Los dígitos de paridad recalculados $c_i^{'}$ y los recibidos c_i se suman dígito a dígito en módulo 2 obteniéndose una expresión denominada "síndrome", es decir,

$$\text{Síndrome} = S = \sum_{i=1}^{k} c_i \oplus c_i^{'} \qquad (7.9)$$

(3) Si el síndrome S es una k-tupla formada por puros CEROS, entonces se supone que no hubo error en la transmisión.

(4) Si el síndrome S es distinto de CERO (contiene por lo menos un UNO), entonces se lee en sentido inverso (el dígito menos significativo pasa a ser el más significativo y así sucesivamente). El valor del inverso del síndrome indica la posición en la Tabla No. 1, columna 1, de un error sencillo en la palabra codificada clave de la columna 3, el cual se puede corregir.

♣ Ejemplo 7.5

Supongamos que la palabra codificada recibida fue la de la figura

DATOS				BCC		
d1	d2	d3	d4	c1	c2	c3
1	1	1	0	0	1	1

Recalculemos la paridad:

$c_1^{'} = 1 \oplus 1 \oplus 0 = 0;\quad c_2^{'} = 1 \oplus 1 \oplus 0 = 0;$

$c_3^{'} = 1 \oplus 1 \oplus 0 = 0$

Cálculo del síndrome:

Dígitos de paridad recalculados $c_i^{'}$ 0 0 0

Dígitos de paridad recibidos c_i 0 1 1

Síndrome S = 0 1 1 ≠ 0

Puesto que el síndrome es distinto de cero, hubo error en la transmisión.

Corrección del error:

Inversión del síndrome	c_3	c_2	c_1	
Síndrome invertido	1	1	0	≡ 6

Por consiguiente, en la Tabla No. 1, posición 6, columna 1, hay un error correspondiente al dígito d_3 de la columna 3, el cual se puede corregir cambiando el UNO por un CERO. La palabra codificada correcta transmitida fue entonces

d1	d2	d3	d4	c1	c2	c3
1	1	0	0	0	1	1

♣

Se han desarrollado otros códigos FEC y ARQ, entre los cuales se tiene los códigos cíclicos y los códigos convolucionales. Entre los códigos cíclicos el más conocido es el código CRC que describiremos a continuación.

7.3.8. Códigos de Redundancia Cíclica (CRC)

Uno de los esquemas de detección de error más eficiente en cuanto a su instrumentación (circuitería) es el denominado Código de Redundancia Cíclica (Cyclic Redundancy Code, CRC), que es uno de la clase de los códigos cíclicos.

La detección de errores se efectúa mediante un registro de desplazamiento de varias secciones que alimentan compuertas O-Exc, como se muestra en la Fig. 7.6.

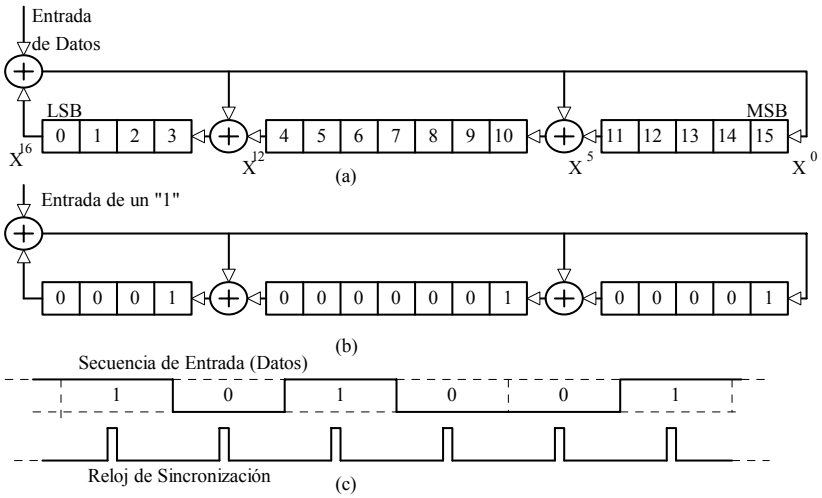


Fig. 7.6. Registro CRC UIT-T V.41. Utilizado en los Protocolos SDLC y HDLC

En la Fig. 7.6(a) se muestra la configuración normalizada por el UIT-T en su Recomendación V.41, aunque hay dos tipos más de configuración, llamadas CRC-16 y CRC-12, que veremos más adelante. Nótese que los dígitos LSB y MSB se refieren al registro: el lado LSB corresponde al término X^{16} y se envía de primero, es decir, es el primer dígito del BCC.

Previo a la codificación, el registro se inicializa a cero. A medida que cada dígito de datos se presenta en la primera compuerta O-Exc, se va desplazando el contenido del registro y se efectúan las operaciones correspondientes. En la Fig. 7.6(b) se muestra el contenido del registro cuando el primer dígito fue un UNO. Este dígito UNO se desplaza a cada impulso del reloj de sincronización y eventualmente llegará a las otras compuertas afectando el contenido del registro. La consecuencia general que debe tenerse en cuenta es que el efecto de un dígito cualquiera se refleja en las diferentes células del registro durante un tiempo bastante grande después que el mismo dígito fue transmitido.

Al finalizar la codificación de un mensaje, la estación transmisora envía el mensaje propiamente más el contenido del registro, el cual es el BCC correspondiente, formando el mensaje codificado.

En cuanto al receptor, la configuración del registro es idéntica a la del transmisor: el registro se inicializa a cero y los dígitos recibidos se aplican a su entrada. Finalizada la recepción del mensaje codificado, si el mensaje recibido es igual al mensaje transmitido, el contenido del registro será cero, es decir, el registro contendrá sólo CEROS. Esta situación se verifica no importa la forma de conexión de las compuertas O-Exc, de ahí que existan varios tipos de código CRC. Una excepción es en los protocolos SDLC y HDLC en los cuales el registro se inicializa con un valor predeterminado y al final de la codificación el contenido es distinto de cero $(0\,0\,0\,1\;\;1\,1\,0\,1\;\;0\,0\,0\,0\;\;1\,1\,1\,1)$. En los protocolos SDLC y HDLC a la secuencia BCC del registro se la denomina FCS (frame check sequence).

La característica más importante del CRC es que debido a su forma realimentada el estado exacto del registro depende en gran parte de su historia pasada. Como consecuencia, es muy poco probable que una ráfaga de errores pueda producir un cálculo en el CRC que sea igual a la secuencia de datos tal como fue transmitida antes de la ocurrencia de los errores.

La teoría matemática que justifica la utilización de este código es sumamente compleja y no se dará detalles de la misma. Sin embargo, vamos a explicar su aplicación práctica en una forma algorítmica y mediante ejemplos.

Un mensaje codificado en forma cíclica consiste en una secuencia específica de datos y un BCC. Sea n igual al número total de dígitos del mensaje codificado o palabra código, y m el número de dígitos de información; entonces, el BCC tendrá (n – m) dígitos.

El mensaje codificado se deduce de dos polinomios que son representaciones algebraicas de dos secuencias binarias: el polinomio generador PG(X) de k dígitos y el polinomio mensaje M(X) de m dígitos. El polinomio generador identifica el tipo de código (CRC UIT-T, CRC-12, CRC-16, etc.), y el polinomio mensaje es simplemente la secuencia de dígitos de información. Estos polinomios son expresiones algebraicas de la forma

$$X^p + X^{p-1} + X^{p-2} + \ldots + X^3 + X^2 + X^1 + X^0$$

Para su representación en forma binaria, se coloca un "1" en las posiciones donde $X \neq 0$, y un "0" cuando $X = 0$. La convención establecida es la de colocar el término X^0 (que es igual a 1) a la derecha. Por ejemplo, una expresión algebraica o polinomio de la forma $X^5 + X^3 + X + 1$ se representará en binario en la forma 1 0 1 0 1 1. El grado de este

polinomio es 5, el término X^p con p = 5 representa el LSB y la secuencia binaria correspondiente tendrá p + 1 = 6 dígitos. El LSB siempre se coloca a la izquierda.

El BCC está representado por un polinomio B(X) y el polinomio que representa la señal transmitida tendrá la forma $T(X) = M'(X) + B(X) = X^{n-m}M(X) + B(X)$ de n dígitos. El polinomio B(X) se elige de tal manera que el polinomio T(X) sea exactamente divisible por el polinomio generador PG(X). En otras palabras, B(X) es el resto que resulta cuando el polinomio M'(X) se divide por el polinomio generador PG(X), es decir,

$$\frac{M'(X)}{PG(X)} = \text{Cociente exacto de}\left[\frac{M(X)}{PG(X)}\right] + B(X) \qquad (7.10)$$

También, $T(X) = M'(X) + B(X)$, donde $M'(X) = X^{n-m}M(X)$ (7.11)

Las operaciones expresadas en (7.10) y (7.11) se pueden realizar en binario mediante el algoritmo siguiente:

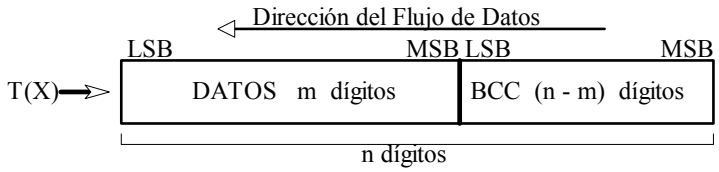
1. M'(X) se obtiene multiplicando el polinomio mensaje M(X) por X^{n-m} donde $(n - m)$ es el número de dígitos del BCC. La multiplicación de X^{n-m} por M(X) en binario equivale a agregar (n – m) ceros a la forma binaria de M(X).
2. El producto resultante X^{n-m} M(X) se divide por el polinomio generador PG(X) y se calcula el resto B(X), es decir, se efectúa una división módulo 2. Entonces,

   $$\frac{X^{n-m}M(X)}{PG(X)} = \text{Cociente exacto de}\left[\frac{M(X)}{PG(X)}\right] + B(X)$$

   La forma binaria de B(X) es el BCC.
3. En binario, el polinomio T(X) tendrá la forma siguiente:

   $T(X) = X^{n-m} M(X) + B(X) = M'(X) + B(X)$

   T(X) es el mensaje codificado que se transmite y que tendrá el siguiente formato Nótese que en la práctica m >> (n – m); por ejemplo, en transmision X.25 el



   valor de m puede llegar a 32808, mientras que (n – m) = 16.
4. En el receptor el mensaje codificado T(X) recibido se divide por el mismo polinomio generador PG(X). Si no hay errores en la transmisión, la división será exacta y el resto B(X) será cero. Si el resto B(X) es distinto de cero, hubo errores en la transmisión y se demandará la repetición del bloque correspondiente.

   Las operaciones 1 a 4 son efectuadas por el registro de la Fig. 7.6.

La división (paso 2) se efectúa en binario sin "excesos" (carriers) ni "defectos" (borrows). En este caso, el resto B(X) siempre tendrá un dígito menos que el polinomio generador PG(X). Por lo tanto, se verifica que n – m = k - 1, de donde n = m + k - 1. El número de dígitos de B(X) es k – 1 y su grado k - 2. En la práctica m >> k, lo que implica que el rendimiento de este código es muy bueno.

♣ **Ejemplo de aplicación del CRC UIT-T Rec. V.41, Fig. 7.6**.

Sea $M(X) = X^7 + X^5 + X^4 + X + 1$ => 1 0 1 1 0 0 1 1 ; m = 8 dígitos

X^7 corresponde al LSB de M(X).

$PG(X) = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$ => 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1; k = 17 dígitos

X^{16} corresponde al LSB de PG(X).

BCC → n – m = k - 1 = 16 dígitos y n = m + k - 1 = 24 dígitos

1. Producto $X^{n-m} M(X) = X^{16}(X^7 + X^5 + X^4 + X + 1)$

$$= X^{23} + X^{21} + X^{20} + X^{17} + X^{16}$$

$X^{n-m} M(X)$ => 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 → 24 dígitos

2. División del producto $X^{n-m} M(X)$ por PG(X):

```
10110011000000000000000   :   10001000000100001
10001000000100001
0011101100010000100          El Cociente no se utiliza
  10001000000100001
  011001000101001010
   10001000000100001
   010000001011010110
    10001000000100001
    00001001011110111000  => B(X) => 1001011110111000 → 16 dígitos
```

2. El resto B(X) se suma al producto X^{n-m} m(X) para obtener T(X):

```
X^(n-m) M(X) → 101100110000000000000000
   + B(X)  →          1001011110111000
      T(X) →  101100111001011110111000  => 24 dígitos
```

T(X) se transmite; es un bloque de 24 dígitos. Nótese que T(X) es ahora divisible (en módulo 2) por PG(x).

3. En el receptor se divide T(X) por PG(X):

```
101100111001011110111000     :     10001000000100001
10001000000100001
0011101110000111001
  10001000000100001                 El Cociente no se utiliza
  011001100000110001
   10001000000100001
   010001000000100001
    10001000000100001
    00000000000000000  =>  Resto  R(X) =  0
```

No hubo error en la transmisión. Si hubiera habido un error en el T(X) recibido, el Resto hubiera sido distinto de cero.

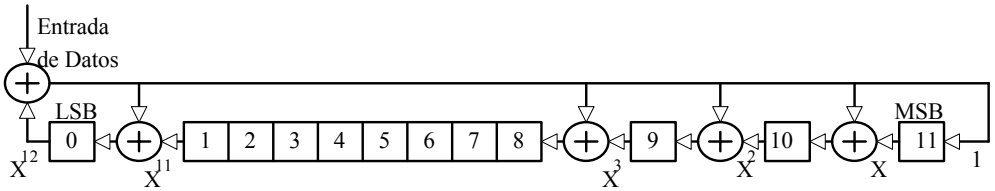
♣

En general, en el transmisor el BCC se calcula y se acumula en un registro de desplazamiento y se agrega al mensaje formando la palabra codificada a transmitir. La configuración del registro depende del código CRC que se quiere instrumentar. El número de etapas del registro es igual al grado k del polinomio generador y el número de compuertas O-Exc es también una función del polinomio.

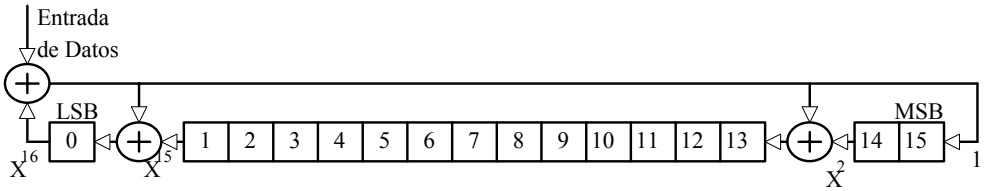
En la Fig. 7.6 se mostró el registro utilizado para el código CRC UIT–T cuyo polinomio es PG(X) = $X^{16} + X^{12} + X^5 + 1$. Cuando opera con caracteres de 8 dígitos (un octeto) el BCC tendrá 2 octetos, como se pudo apreciar en el ejemplo de aplicación. En la Fig. 7.7 se muestra los códigos CRC-12 y CRC-16; los polinomios correspondientes son:

CRC-12: PG(X) = $X^{12} + X^{11} + X^3 + X^2 + X + 1$

CRC-16: PG(X) = $X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$



(a) Código CRC-12. Utilizado en el Transcódigo de 6 dígitos



(b) Código CRC-16. Utilizado en los Protocolos BSC y DDCMP

Fig. 7.7. Codificadores CRC de aplicación práctica.

El polinomio generador del CRC utilizado en las Redes Ethernet tiene la forma

$$PG(X) = X^{32} + X^{26} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^{8} + X^{7} + X^{5} + X^{4} + X^{2} + X + 1$$

mientras que en el protocolo industrial DNP 3.0 se utiliza el polinomio

$$PG(X) = X^{16} + X^{13} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^{8} + X^{6} + X^{5} + X^{2} + 1$$

Los códigos CRC detectan todos los errores sencillos y dobles, todos los errores con un número impar de dígitos, todas las ráfagas de errores de longitud igual o menor de 16 dígitos, el 99,997% de las ráfagas de 17 dígitos y el 99,998% de todas las ráfagas iguales o superiores a 18 dígitos. Por esta razón, los códigos CRC son muy utilizados para el control de error en los sistemas de telecomunicaciones.

El rendimiento de los códigos CRC es excelente, casi del 100% puesto que $m >> k$. En general, la instrumentación de este código es muy sencilla, como se puede ver en las figuras 7.6 y 7.7.

Matemáticamente, los códigos CRC son códigos de bloque lineales. En la codificación lineal el grupo de m dígitos de información es aplicado al codificador, el cual responde con un bloque codificado de n dígitos que depende solamente de los m dígitos de entrada; cada bloque es procesado independientemente de los demás. Por esta razón estos códigos son llamados "códigos de bloque lineales (n, m)", y como siempre hay redundancia agregada, siempre se verifica que $n > m$.

El CRC no es el único código de bloque lineal; en la práctica se encuentran también los códigos Golay y BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) que solamente nombraremos.

Los códigos descritos hasta ahora, con la excepción del código de ponderación constante, son ejemplos de los códigos lineales cuyas palabras codificadas están formadas por los dígitos de información más los dígitos de redundancia. Los códigos de ponderación constante en general son códigos no lineales. Los códigos pueden ser no lineales ya sea porque ellos no tienen una estructura de " información + redundancia" o porque contienen dígitos de paridad no lineales, es decir, que no son módulo 2. Los códigos lineales tienen un alto grado de complejidad matemática, pero al mismo tiempo esa estructura matemática compleja los hace relativamente simples para sintetizar, codificar y descodificar. Por otro lado, los códigos no lineales son en general difíciles de sintetizar y procesar.

Para más información sobre los códigos cíclicos y convolucionales, ver la Bibliografía y la Recomendación UIT-T V.41.

7.4. PRINCIPIO DE LA ALEATORIZACION

7.4.1. Introducción

En los sistemas de transmisión digital se utiliza una técnica denominada "aleatorización" o "seudoaleatorización" (scrambling) que permite la regeneración de los impulsos del reloj de sincronización y por lo tanto previene la generación de errores en las secuencias recibidas. El "scrambling" es otra forma de codificación de canal.

La operación de un código no debería depender de las estadísticas de la secuencia binaria y no imponer restricciones sobre el tipo de información a transmitir; por ejemplo, no debería causar problemas de sincronización una secuencia de varios ceros seguidos. Muchos códigos funcionan de acuerdo con lo previsto por la teoría sólo cuando los UNOS y los CEROS ocurren con igual probabilidad, y cuando la ocurrencia de un CERO o un UNO cualquiera es independiente de los UNOS o CEROS anteriores o posteriores. Esta situación no siempre se da y por eso a veces es necesario utilizar técnicas que mezclan o desordenan (scramblers) los dígitos para que la secuencia parezca más aleatoria. Por supuesto, en el destino hay que "desaleatorizar" o reordenar los dígitos a su forma original para que la información no se destruya.

Un sistema de transmisión digital en principio acepta cualquiera secuencia arbitraria de dígitos y la reproduce exactamente a su salida sin más efecto en la secuencia que la introducción de un retardo fijo debido a la propagación. En la práctica, la secuencia se puede reproducir de manera inexacta, esto es, puede contener errores en la transmisión y el retardo puede variar originando una fluctuación de temporización. Si estos efectos se presentan aleatoriamente y son substancialmente independientes de la secuencia real transmitida, se dice que el sistema es independiente de las secuencias de dígitos y los errores se pueden detectar y/o corregir con los esquemas que hemos visto. Sin embargo, puede que en la práctica no suceda así y que se observe que la presencia de errores y de fluctuación depende de la configuración de los dígitos que constituyen la secuencia transmitida.

Vamos a ilustrar esta situación con un ejemplo sencillo. Supongamos que se transmite secuencias binarias NRZ. Si las secuencias contienen largas cadenas de sólo UNOS o sólo CEROS, el receptor será incapaz de regenerar los impulsos de reloj y se producirá errores en la secuencia recibida. La idea fundamental en que se basa la seudoaleatorizacion, es, pues, la de reducir la probabilidad de errores modificando la secuencia transmitida en tal forma que se reduzca la probabilidad de aparición de secuencias particulares que podrían causar dificultades, es decir, hay que hacer que la secuencia transmitida sea o parezca lo más aleatoria posible. Una ventaja adicional de la seudoaleatorización es que centra al espectro en el canal disminuyendo las componentes espectrales en los bordes de la banda que podrían producir interferencia en los canales adyacentes, y con la eliminación de componentes continuas se impide la aparición de impulsos periódicos en el espectro.

7.4.2. Seudoaleatorizador Autosincronizante

El seudoaleatorizador autosincronizante es un dispositivo comúnmente utilizado en los Módems de las Series V y X del UIT-T. Este es un dispositivo de realimentación hacia adelante en un registro de desplazamiento de varias secciones que alimentan compuertas O-Exc, como se muestra en la Fig. 7.8(a) y (b).

Esta configuración básica es la empleada en los Módems UIT-T V.27, en los cuales, mediante ciertos mecanismos de guarda, el sistema puede evitar secuencias repetidas de 1, 2, 3, 4 y 12 dígitos. En la práctica este circuito se construye de tal manera que no permite transiciones en la salida en los instantes de reloj. El reloj actúa solamente sobre el registro.

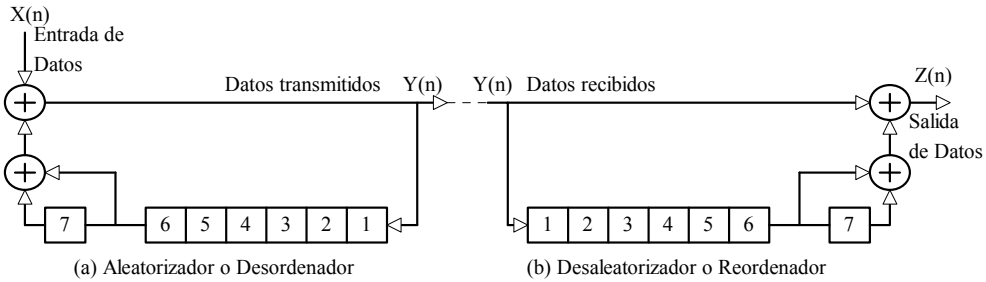


Fig. 7.8. Aleatorizador y Desaleatorizador UIT-T V.27.

La estructura de los aleatorizadores nos permite caracterizarlos mediante un polinomio generador, como se hizo para los códigos CRC. Por ejemplo, el aleatorizador V.27 de la Fig. 7.8 se puede caracterizar mediante el polinomio $PG(X) = X^7 + X^6 + 1$.

Podemos demostrar fácilmente que la secuencia Z(n) de salida es igual a la secuencia de entrada X(n). En efecto, sea X(n) la entrada en un intervalo n cualquiera. Como cada una de las células del registro produce retardos unitarios, entonces de la Fig. 7.8(a),

$$Y(n) = X(n) \oplus [Y(n-6) \oplus Y(n-7)] \qquad (7.12)$$

Donde Y(n) es la salida del aleatorizador y entrada del desaleatorizador. También, de la Fig. 7.8(b),

$$Z(n) = Y(n) \oplus [Y(n-6) \oplus Y(n-7)] \qquad (7.13)$$

Reemplazando (7.12) en (7.13),

$$Z(n) = X(n) \oplus Y(n-6) \oplus Y(n-7) \oplus Y(n-6) \oplus Y(n-7)$$

$$Z(n) = X(n) \oplus [Y(n-6) \oplus Y(n-6)] \oplus [Y(n-7) \oplus Y(n-7)]$$

Pero en la suma modulo 2 se verifica que

$$Y(n-6) \oplus Y(n-6) = Y(n-7) \oplus Y(n-7) = 0; \;\; 0 \oplus 0 = 0 \quad \text{y} \quad X(n) \oplus 0 = X(n)$$

Entonces, $\quad Z(n) = X(n) \oplus 0 \oplus 0 = X(n) \oplus 0 = X(n)$

El lector puede verificar que si la secuencia de entrada al aleatorizador tiene la forma 1 1 0 0 1 1 0 1, la secuencia de salida del aleatorizador será 0 0 0 0 1 1 0 1. Si esta secuencia se aplica al desaleatorizador, a su salida se recuperará la secuencia original (La flecha indica el sentido del flujo de datos, y se supone que el registro ha sido inicializado a cero antes de la codificación).

La ventaja de este tipo de seudoaleatorización consiste en que es autosincronizante, es decir, que no necesita ningún reloj suplementario para su sincronización. El mayor inconveniente estriba en que produce una extensión o aumento de los errores. Si durante la transmisión ocurre errores en los dígitos, la salida resultante después de suprimida la seudoaleatorización contendrá errores adicionales, uno por cada derivación utilizada en el registro de desplazamiento. Supongamos que el registro tiene una longitud de X elementos y contiene Y derivaciones (incluida la derivación de entrada). El efecto de la desaleatorización será aumentar la proporción de errores en un factor aproximadamente igual a Y y extender en X dígitos la longitud de toda ráfaga de errores.

Una solución para el problema de la extensión de errores con seudoaleatorizadores autosincronizantes es su emplazamiento en la cadena de transmisión. Normalmente el aleatorizador se sitúa inmediatamente antes del enlace de transmisión con el desaleatorizador inmediatamente después del enlace. Con esta disposición los descodificadores de control de error se encuentran antes del desaleatorizador con lo que la extensión de errores causada por este último no perturba el proceso de corrección de errores. Además, si el corrector de errores es capaz de corregir la mayoría de los errores de transmisión, habrá menos errores que lleguen al desaleatorizador para que éste los extienda. En la Fig. 7. 9 se muestra esta disposición.

Fig. 7.9. Emplazamiento de los Aleatorizadores/Desaleatorizadores.

En conclusión, los seudoaleatorizadores autosincronizantes son eficaces para suprimir la dependencia de la secuencia, pero introducen una extensión de los errores. La consecuencia es que cualquier dispositivo de corrección de errores que se utilice de esa forma para mantener un sistema de transmisión bastante flexible, tendría que ser mucho más complicado.

El problema de extensión de errores se puede evitar utilizando un tipo distinto de seudoaleatorizador, denominado “seudoaleatorizador de reposición” en el que se genera una secuencia seudoaleatoria de longitud máxima que se suma a la secuencia transmitida. En el receptor se genera una secuencia seudoaleatoria idéntica que se resta de la secuencia transmitida. Mientras las secuencias seudoaleatorias estén en fase, las dos operaciones se anulan mutuamente y se recupera la secuencia original transmitida. En esta forma no se produce extensión de error. Para mantener los generadores de secuencias seudoaleatorias en fase, es necesario enviar información adicional de sincronización, lo que se traduce en un

aumento de la velocidad de modulación y de la complejidad de los equipos para procesar la información de sincronismo. En ciertos casos se puede aprovechar señales existentes de alineación de trama para la sincronización del desaleatorizador.

Los procesos de aleatorización y desaleatorización son ampliamente utilizados en los Módems V.26, V.27, V.27 bis, V.27 ter, V.29, V.32, V.35 y V.36. En la Fig. 7.10 se muestra el circuito utilizado en el Módem V.27.

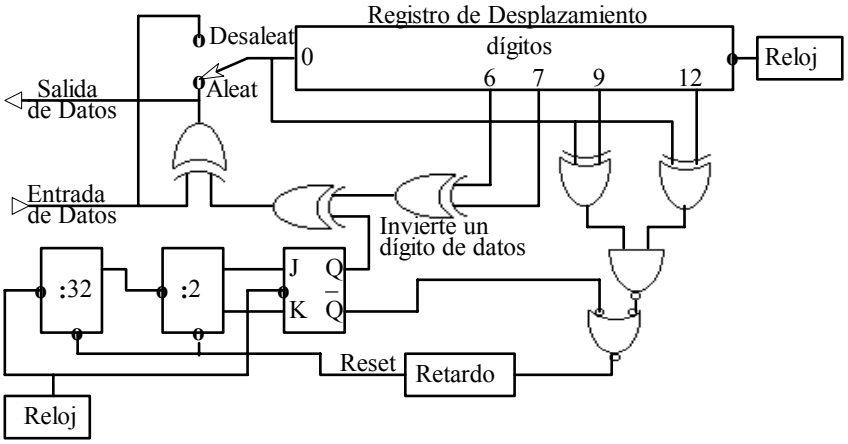


Fig. 7.10. Aleatorizador/Desaleatorizador del Módem UIT-T V.27.

7.5. Resumen

Durante la transmisión de información digital a través de un sistema o canal se producen errores prácticamente inevitables debido a la presencia de ruido y a otros factores tales como la interferencia intersímbolo, la intermodulación, la fluctuación de fase, ecos, etc. Es por ello necesario establecer maneras, si nó para evitar los errores, por lo menos para poder reconocer su presencia y si es posible corregirlos.

En los sistemas de comunicación actuales el control de error se efectúa mediante la aplicación de códigos especiales que agregan redundancia. Esta redundancia agregada permite detectar y/o corregir los errores ocurridos durante la transmisión de los bloques de datos. En este capítulo vamos a describir en forma algorítmica algunos de los códigos más utilizados para la detección y/o corrección de errores.

Cuando se recibe un bloque de dígitos binarios es necesario asegurarse de que no contiene errores de transmisión. Si se detecta que el bloque está en error, se tiene dos opciones: una es corregir el error en el sitio y la otra solicitar la retransmisión del bloque. Esta situación ha producido las dos técnicas de control de error comúnmente utilizadas: la "Corrección Directa de Error (Forward Error Correction, FEC)" y la "Solicitud de Repetición Automática (Automatic Repeat Request, ARQ)". En la técnica FEC se utiliza códigos para detectar y corregir los errores en el receptor; mientras que en la técnica ARQ los códigos solamente detectan la presencia de errores en los datos recibidos y se solicita en alguna forma la repetición de los bloques que vienen en error.

En este capítulo se define, en primer lugar, el rendimiento y la redundancia de un código, que son los parámetros para determinar la eficacia de un código determinado. Hay otros parámetros tales como la "distancia mínima", la "capacidad de detección de ráfagas" y otros que citamos pero que no describimos pues están fuera del marco de este libro.

Los esquemas para la detección y/o corrección que se describen en este capítulo son: código de repetición, códigos de ponderación constante, codigo de suma de verificación, código de prueba de paridad sencilla, código de prueba de paridad vertical y horizontal, códigos matriciales, código de Hamming y códigos de redundancia cíclica (CRC). Por ser el Código CRC muy utilizado en muchos de los protocolos de comunicación vistos hasta ahora, su descripción es más detallada, aunque no entramos en su justificación teórica.

Aunque la aleatorización no es un esquema de control de error, su descripción y operación descansa sobre los mismos principios de los códigos CRC. En particular, la aleatorización permite la regeneración de los impulsos de reloj y por lo tanto previene la generación de errores en las secuencias de datos transmitidas. En este capítulo se introduce solamente la noción de lo que es la aleatorización y sobre qué principios se basa, así como algunos tipos de aleatorizador utilizados en la práctica.

7.5. CUESTIONARIO

1. Explique las razones fundamentales para la utilización de la detección y corrección de errores, y en qué sitios del sistema deben colocarse los dispositivos que efectúan las funciones de codificación y descodificación.
2. Defina lo que es el "Rendimiento de un Código" y explique su significado. ¿Para qué se le agrega "Redundancia" a un código dado? Se observa una palabra codificada con paridad sencilla, ¿ Cómo se puede reconocer si la paridad es par o impar?
3. En control de error ARQ, se tienen diferentes formas para solicitar la repetición del bloque o bloques en error. Investigue los esquemas más utilizados en la práctica.
4. En el Código de Ponderación Constante, escriba todas las secuencias de longitud 6 que contienen 4 UNOS. ¿Cuál es el valor de la redundancia?
5. En el protocolo XMODEM determine el valor (en decimal) y la forma (en binario) del BCC cuando el campo Información contiene 38 caracteres X, 30 caracteres Y, 30 caracteres Z y 30 caracteres W.
6. La palabra MURCIELAGO se va a transmitir con codificación horizontal y vertical en la forma mostrada en la Fig. 7.3. Demuestre que el BCC es 0 0 0 0 0 0 0 0.
7. En un sistema que utiliza un código matricial se recibió la siguiente palabra código:

   1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 1 0 0 1 1 1 0 1 0

   Diga si hay error en la transmisión y cuál fue la palabra mensaje transmitida. ¿Cuál es el valor de la redundancia?
8. Utilizando el código matricial se quiere transmitir la palabra 10110011001001110111. Construya la matriz principal, muestre la forma de la palabra código transmitida y determine la redundancia.
9. En un sistema que utiliza el código Hamming se recibió siguiente la palabra código:

DATOS	BCC
1 0 0 1 1 1 1 0	0 0 0 0

   Verifique si hay error en la transmisión. Si ese es el caso, diga cuál dígito está en error.
   ¿ Cuál es el valor de la redundancia?

10. En un sistema que utiliza el código de Hamming la palabra mensaje tiene la forma 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 . Demuestre que la palabra codificada transmitida tiene la forma 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 1 0 1 0.
11. Diga las características principales de los Códigos CRC y los más utilizados en la práctica.
12. Dibuje el registro CRC cuyo polinomio generador es $PG(X) = X^8 + X^4 + X^2 + 1$.
13. Dibuje los registros CRC utilizados en la LAN Ethernet y en el protocolo industrial DNP 3.0.

14. En el código CRC-12 el polinomio generador es $PG(X) = X^{12} + X^{11} + X^3 + X^2 + X + 1$ y el polinomio mensaje es $M(X) = X^7 + X^4 + X^2 + X + 1$. Demuestre que el mensaje codificado transmitido T(X) es 1 0 0 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1.
15. Sea un código CRC cuyo polinomio generador es $P(X) = X^5 + X^4 + X + 1$ y el polinomio mensaje $M(X) = X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1$. Demuestre que el BCC tiene la forma B(X) => 01001
16. En el protocolo DNP 3.0 el polinomio mensaje es $M(X) = X^7 + X^5 + X^3 + X + 1$. Determine el mensaje codificado transmitido T(X).
17. Diga las características, funciones y aplicaciones de la aleatorización.
18. Dibuje el aleatorizador y el desaleatorizador de un sistema dado, si el aleatorizador se puede representar con un polinomio generador de la forma $PG(X) = X^7 + X^5 + 1$.

CAPITULO VIII

FACTORES LIMITATIVOS EN LA TRANSMISION DE DATOS

8.1. INTRODUCCION

La calidad técnica de las redes de comunicación es una característica relativa. Hay numerosos circuitos que poseen un óptimo rendimiento para el servicio telefónico, pero que no tienen una calidad satisfactoria para la transmisión de señales digitales binarias. Este problema carecía de importancia antes de comenzar la extraordinaria demanda de circuitos para servicios de telegrafía automática (telex y teletipo), fototelegrafía (facsímil, FAX), transmisión de datos de computadoras, servicios de automatización industrial y otras formas de transmisión de información digital.

La infraestructura telefónica es y seguirá siendo el medio más empleado para la transmisión de señales digitales a velocidades de transmisión menores de 64 kbps y por ello el UIT-T ha emitido una gran cantidad de normas para mejorar y mantener la calidad de los circuitos telefónicos de uso actual.

Básicamente, se pueden distinguir dos tipos de canal de transmisión en las redes telefónicas existentes: el canal telefónico básico de 3 kHz de ancho de banda especificado en las Recomendaciones M1020, M1025 y M1040, y el canal de banda de grupo (60-108 kHz) especificado en la recomendación H.14. Las características de transmisión dentro de estas bandas junto con las técnicas de modulación empleadas en los módems, determinan las velocidades máximas de transmisión, las cuales son cada vez más altas. En el último módem recomendado por el UIT-T, el V.90, la velocidad de transmisión es de 56 kbps, velocidad que cada vez se acerca más a los límites establecidos por Shannon. Pero estas velocidades se logran no solamente mediante técnicas sofisticadas de modulación, control de error y compresión de datos, sino también mejorando la calidad de los canales.

Para la transmisión de datos a velocidades superiores a los 1200 bps, es necesario mejorar la calidad de los canales existentes mediante un acondicionamiento apropiado. El acondicionamiento de línea o compensación se aplica en la forma mostrada en la Fig. 8.1.

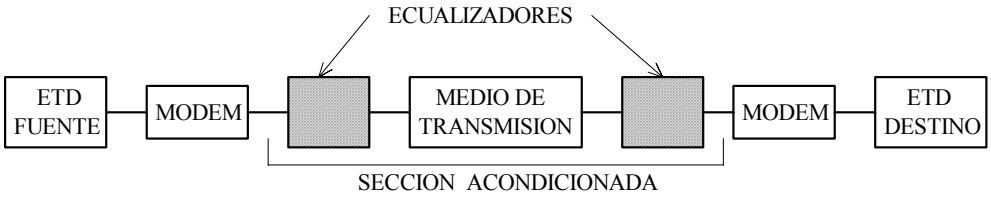


Fig. 8.1. Acondicionamiento de Línea

Los problemas que se presentan en los dos tipos de circuito de transmisión (vocal y de grupo) son similares. El primero es cómo reducir los factores de deterioro en la transmisión, los cuales, aunque de menor influencia en telefonía y transmisión de datos a

bajas velocidades, son decisivos y limitativos en relación con la máxima velocidad permitida. Estos factores limitativos son, entre otros,

- Distorsión de Fase o de Retardo
- Distorsión de Amplitud o Atenuación
- Ruido Impulsivo
- Ruido Errático de Espectro Uniforme
- Ecos
- Fluctuación de Fase

Es además necesaria la definición de un grupo de parámetros capaces de permitir una evaluación del comportamiento de la línea para el servicio de transmisión de datos, tales como:

- Distorsión Telegráfica
- Porcentaje de Dígitos y Bloques en Error
- Fallas de Línea

El segundo problema, el cual concierne especialmente a los circuitos de transmisión en banda ancha, es cómo obtener y mantener la calidad del circuito hasta el mismo terminal de datos o usuario. En efecto, se presenta el problema de la transmisión por un circuito en la banda de grupo desde el terminal del suscritor hasta la primera estación de portadora de larga distancia. Hay ya soluciones a este problema; pero, en general, son los proveedores de los servicios de transmisión quienes deben proporcionar los equipos correspondientes.

En cuanto a las dificultades con que se tropieza para la transmisión de información digital con canales de voz, ellas se deben principalmente a dos fenómenos eléctricos: la distorsión de fase y la distorsión de amplitud. Afortunadamente, ambos fenómenos son de naturaleza lineal y pueden superarse con un acondicionamiento adecuado de los canales mediante dispositivos especiales.

8.2. DISTORSION DE FASE

8.2.1. Introducción

La distorsión de fase, más conocida como “distorsión de retardo”, consiste en una deformación de la envolvente de onda de las señales producida en los canales de comunicación cuando la curva característica de fase en función de la frecuencia no es lineal. En este caso las diferentes componentes de frecuencia se desplazan a velocidades diferentes y, por supuesto, toman tiempos diferentes. Se puede demostrar analíticamente que las componentes de altas frecuencias se desplazan a más velocidad que las componentes de baja frecuencia.

En las líneas de transmisión telefónica la distorsión de retardo se debe principalmente a los efectos capacitivos e inductivos que tienen los transformadores y amplificadores en las frecuencias bajas de la banda de voz. En las frecuencias altas, la distorsión de retardo es causada por las bobinas de carga o la capacitancia de la línea.

En los sistemas de transmisión mediante portadora modulada los principales causantes de la distorsión de retardo son los transformadores y filtros de las unidades de canal de voz o las de grupo, supergrupo y grupo maestro de canales.

La distorsión de retardo sólo se convierte en problema cuando comienza a perjudicar la recepción de las señales, dificultando la comprensión de la información. En el caso de la transmisión telefónica, la distorsión de retardo pasa desapercibida debido a que el oído humano es relativamente insensible a las variaciones de fase en función de la frecuencia. En cambio, las señales digitales son muy vulnerables a los efectos de la distorsión de retardo. En efecto, los dígitos binarios normalmente se generan como impulsos de forma rectangular, los cuales para su transmisión modulan una portadora a una velocidad determinada. Las señales moduladas (FSK, PSK o DPSK) contienen numerosas componentes de frecuencia, y la envolvente de dichas señales es el resultado de la suma vectorial de la frecuencia fundamental y de sus armónicas. Las señales de esta clase llegan a experimentar una fuerte distorsión de retardo si se transmiten por un canal cuya característica de fase no es lineal. Aún más, la energía de la señal que se dispersa en el tiempo contribuye a la generación de una interferencia mutua entre impulsos contiguos, fenómeno denominado "interferencia intersímbolo". En estas circunstancias es difícil o imposible que el receptor pueda interpretar correctamente cada dígito; por ejemplo, un "1" es susceptible de interpretarse como un "0", o viceversa. A la interferencia intersímbolo la trataremos más adelante.

Al analizar las causas de la distorsión de retardo de una línea u otro medio de transmisión, debe tenerse en cuenta que las características se alteran cuando existe un considerable desequilibrio de impedancias entre secciones de la línea y los equipos de la central. La presencia de corrientes reflejadas suele causar una distorsión total muy diferente de la que indicaría el análisis independiente de los diversos componentes de la línea. Este efecto se observa principalmente a bajas frecuencias o en líneas de corta longitud, donde la pérdida es relativamente baja y por lo tanto los efectos de la reflexión o interacción son mayores. En el caso de largos circuitos de cable pupinizado, las tolerancias de fabricación y el tratamiento subsiguiente del cable pueden producir una variación considerable entre el retardo real y el valor calculado con fórmulas y gráficos. Otro problema que se presenta es el espaciamiento de las bobinas de carga, que generalmente varía del calculado teóricamente debido a la necesidad de espaciar las bobinas de acuerdo con la ubicación de las tanquillas de inspección o la separación de los postes telefónicos. La práctica normal para evitar estos problemas, es que cuando un canal se asigna para transmisión de datos se eliminan de él todas las bobinas de pupinización presentes en su trayectoria.

8.2.2. Definiciones

La función de transferencia de un canal viene dada por la expresión

$$H_c(f) = |H_c(f)| \exp[-j\beta(f)] \qquad (8.1)$$

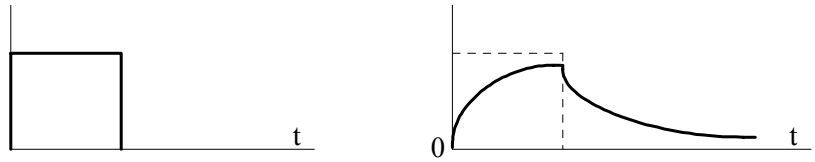
donde $|H_c(f)|$ es el módulo de la función de transferencia (ganancia o atenuación) y $\beta(f)$ su característica de fase, en radianes.

En el caso general tanto $|H_c(f)|$ como $\beta(f)$ son funciones de la frecuencia, pero podemos demostrar que para transmisión sin distorsión, la ganancia $|H_c(f)|$ debe ser constante (independiente de la frecuencia), y $\beta(f)$ una función lineal de la frecuencia de la forma

$$\beta(f) = 2\pi\tau f \pm n\pi \qquad n \text{ entero} \tag{8.2}$$

Esto significa que todas las componentes de frecuencia de una señal llegan al punto de destino al mismo tiempo, siendo τ el tiempo de propagación de las componentes de frecuencia a través del canal. En este caso se dice que el canal es lineal y de ganancia constante.

Pero en un canal real la situación está lejos de ser ideal. Por ejemplo, si por un filtro pasabajo real se transmite un impulso de la forma dada en la Fig. 8.2(a), en la salida aparecerá un impulso muy disperso como el mostrado en la Fig. 8.2(b). Nótese el efecto de la distorsión sobre el impulso: el impulso aparece deformado y se extiende o dispersa de tal manera que puede interferir con impulsos adyacentes. En la Fig. 8.2(b) hemos exagerado un poco la deformación, pero esto es para propósitos de ilustrar la situación. En la práctica la deformación producida por la distorsión de amplitud y fase se suma a la deformación producida por la limitación de banda del canal; los dos fenómenos producen la interferencia intersímbolo.



(a) Impulso Transmitido (b) Impulso Recibido con Distorsión de Amplitud y de Fase

Fig. 8.2. Efecto de la Distorsión de Fase y de Amplitud.

En la Fig. 8.3(a) se muestra la característica de fase de un canal dado. Obsérvese que la característica no es una línea recta y no cumple con las condiciones de transmisión sin distorsión, excepto quizás en la gama de frecuencias $f_1 < f < f_2$, en donde la característica de fase tiene la forma

$$\beta(f) = 2\pi\tau f + \beta_3 \quad \text{para} \quad f_1 < f < f_2$$

pudiéndose considerar que en esa gama la característica de fase es lineal; pero para que cumpla con las condiciones establecidas en la expresión (8.2), el ángulo β_3 debe ser cero o un múltiplo entero de π. Si no lo es, se introducirá un retardo o desfase constante aunque en el intervalo (f_1, f_2) la característica sea lineal.

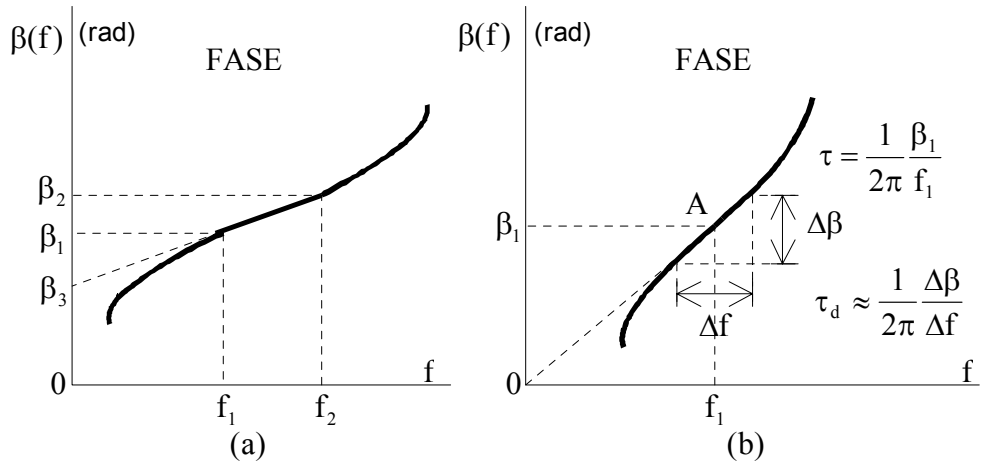


Fig. 8.3. Características de Fase

Para caracterizar la distorsión de fase, normalmente se consideran dos tipos de distorsión de retardo: el "retardo de fase" y el "retardo de envolvente".

El retardo de fase es entonces el tiempo de transmisión de las componentes de frecuencia a través de un medio dado. Por definición, el tiempo de retardo τ es

$$\tau = \frac{1}{2\pi}\frac{\beta(f)}{f} \quad \text{segundos} \tag{8.3}$$

Con referencia a la Fig. 8.3(b), el retardo de fase a la frecuencia f_1 es simplemente la pendiente de la característica en el punto A, con un factor de escala $1/2\pi$.

La segunda forma de retardo es el "retardo de envolvente" que se define como la derivada de la característica de fase. Sea τ_d el retardo de envolvente, entonces

$$\tau_d = \frac{1}{2\pi}\frac{d\beta(f)}{df} \quad \text{segundos} \tag{8.4}$$

El retardo de envolvente a una frecuencia dada f_1 se puede aproximar en la forma mostrada en la Fig. 8.3(b).

A esta forma de retardo se le ha llamado retardo de envolvente porque la envolvente de una portadora modulada es retardada por el medio de transmisión en una cantidad igual a la pendiente de la característica a la frecuencia de la portadora. Se supone que la frecuencia modulante es muy pequeña comparada con la frecuencia de la portadora. Esta es una de las suposiciones básicas que generalmente no es tomada en cuenta en la definición del retardo de envolvente.

El retardo de envolvente, denominado también "distorsión de retardo de grupo", es la forma de retardo más utilizada en la caracterización de un canal de comunicaciones, pues representa el verdadero retardo de la señal, sobre todo si la señal está modulada.

En la Fig. 8.4(a) y (b) se muestra las características típicas de un canal telefónico de 3 kHz de ancho de banda. La curva (b) o retardo de envolvente se puede obtener de la curva (a) mediante diferenciación gráfica.

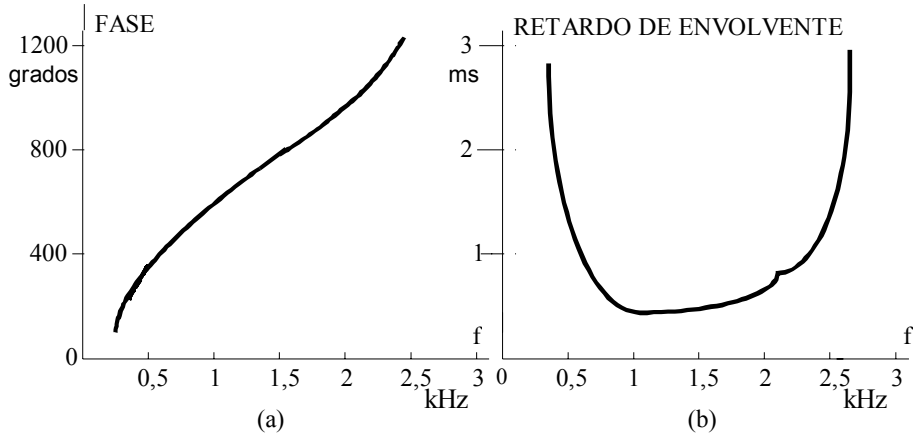


Fig. 8.4. Característica de Fase y de Retardo de un canal típico.

Hay que distinguir entre el "retardo de envolvente absoluto" y el "retardo de envolvente relativo". El retardo absoluto es la cantidad de retardo experimentado por una señal en toda la trayectoria de transmisión. Como las componentes de frecuencias son afectadas en forma distinta, cada frecuencia tendrá su propio retardo absoluto. El retardo relativo es la diferencia entre el retardo de la envolvente de una frecuencia dentro de la banda bajo medición y el retardo de una frecuencia usada como referencia dentro de la misma banda. En la práctica esta frecuencia es de 800 Hz.

En las normas de rendimiento, la distorsión de retardo de envolvente generalmente se expresa como la diferencia máxima de retardo (en microsegundos) que existe dentro de la banda de paso del canal. Por ejemplo, en los Estados Unidos las especificaciones estipulan que en un circuito de enlace entre centrales telefónicas la distorsión de retardo no debe exceder los siguientes valores:

80 μs para $1000 \leq f \leq 2600$ Hz
250 μs para $600 \leq f \leq 1000$ Hz
500 μs entre $500 \leq f < 600$ Hz y $2600 < f \leq 2800$ Hz

Esta estipulación significa que la diferencia de retardo de envolvente entre una frecuencia cualquiera y la frecuencia de referencia dentro de la banda de 1000 Hz a 2600 Hz no debe exceder 80 μs y así sucesivamente. El cumplimiento de las especificaciones se puede verificar con un instrumento de medición del retardo de envolvente. Si los valores medidos exceden los valores normalizados hay que incorporar dispositivos de compensación del retardo. Por su parte, el UIT-T, en su recomendación O.81, establece procedimientos para medir la distorsión de retardo.

8.2.3. Medición de la Distorsión de Retardo

En general, hay tres técnicas para la medición de la distorsión de retardo comúnmente utilizadas en la práctica.

Medición del Desfase

Esta medición se efectúa con un fasímetro o por medio de las figuras de Lissajous en un osciloscopio. Este es un método empleado en los laboratorios y es sumamente tedioso pues hay que calcular primero la relación desfase vs frecuencia y luego mediante diferenciación gráfica se obtiene el retardo de envolvente. Este método requiere una medición exacta de la frecuencia y es apropiado solamente cuando los terminales de transmisión y recepción están disponibles en un mismo punto. Algunas veces este método se utiliza cuando hay que probar dos circuitos similares; en este caso un canal es de ida y el otro canal es de retorno, asignándose la mitad del retardo a cada uno. Este método ya no emplea.

Empleo de Instrumentos de Medición

Esta es la forma de medición más utilizada. Se emplea instrumentos como, por ejemplo, el Lenkurt 26C, Western Electric Tipo 25A, Wandel y Golterman LD-30 Measuring Set, Hewlett Packard Modelo 3770A, y otros de más reciente factura. Estos aparatos utilizan, en general, un oscilador de frecuencia variable (VFO) y una frecuencia de modulación baja (del orden de 25 a 250 Hz) modula la portadora de salida del aparato. La baja frecuencia de modulación crea una envolvente que ocupa un ancho de banda muy angosto alrededor de la portadora. El retardo de envolvente es el tiempo relativo de llegada de la envolvente de modulación para diferentes valores de la frecuencia de portadora en la banda de interés, por ejemplo, entre 500 Hz y 3 kHz. Estos instrumentos deben cumplir con la Recomendación O.81 del UIT-T.

Método del Diagrama de Ojo

El método del “diagrama de ojo” se puede emplear para la determinación del efecto de la distorsión de retardo, pero su aplicación más importante es en el ajuste de los dispositivos de compensación de línea (ecualizadores) y para visualizar la calidad de la señal digital recibida, como veremos de inmediato.

Cuando se utiliza este método para la medición del retardo, es necesario desplegar en un osciloscopio la salida del sistema de transmisión bajo prueba. En esta forma los impulsos presentes en la señal se superpondrán creándose adrede una interferencia intersímbolo. La imagen en el osciloscopio tendrá la forma de ojos, como se muestra en la Fig. 8.5.

Para comprender e interpretar los diagramas de ojo, consideremos la Fig. 8.5(a) y (b), donde se muestra los diagramas de ojo de dos señales binarias bipolares: una sin distorsión y la otra con distorsión. En la forma sin distorsión, Fig. 8.5(a), cuando todos los segmentos de duración T de la señal están superpuestos, resulta un ojo con una abertura máxima. La distancia T entre los picos de los ojos es el período de muestreo, y los picos de los ojos son los instantes de muestreo de la señal.

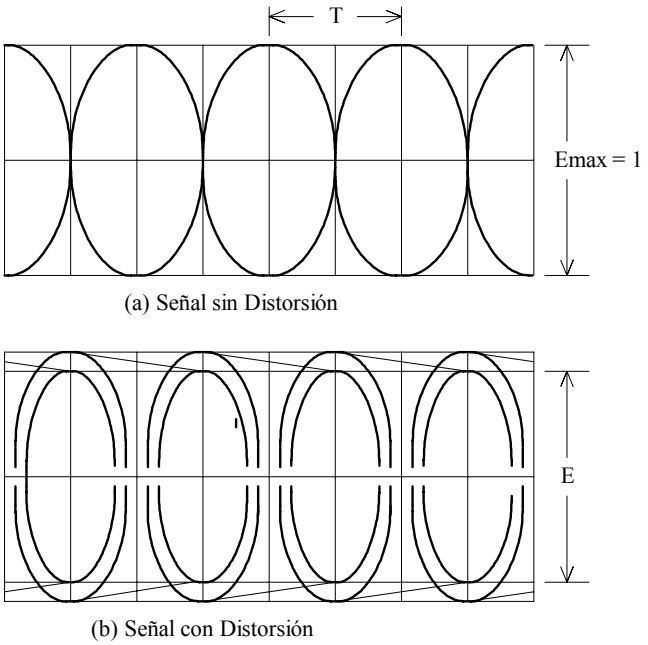
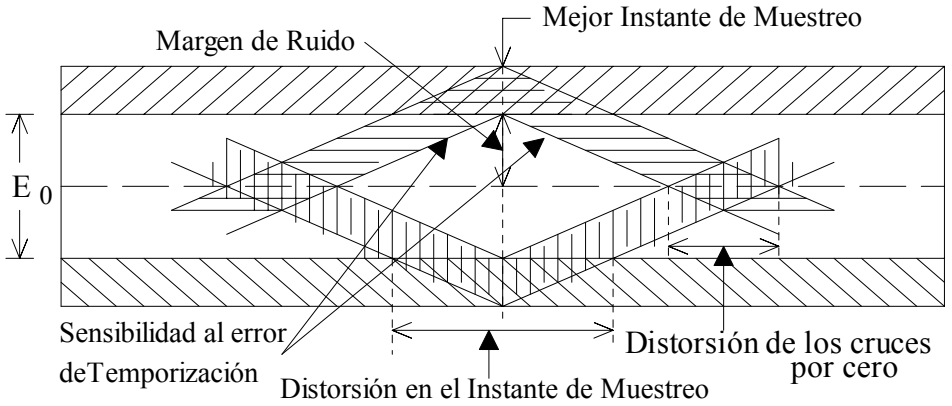


Fig. 8.5. Diagrama de Ojo de una Señal Digital Bipolar

En la Fig. 8.5(b) la forma del ojo está distorsionada debido a los efectos de la interferencia intersímbolo y el ruido. El ojo está parcialmente cerrado, su abertura E es menor y la detección será, evidentemente, más difícil.

El diagrama de ojo proporciona una gran cantidad de información relacionada con el comportamiento de un sistema de transmisión de datos. Si el ruido no es muy grande, el diagrama de ojo visto en un osciloscopio se puede representar esquemáticamente como en la Fig. 8.6.



8.6. Características del Diagrama de Ojo.

Del diagrama de ojo, Fig. 8.6, puede obtenerse la siguiente información: (a) el mejor instante de muestreo ocurre aproximadamente donde el ojo muestra su abertura máxima; (b) la sensibilidad del sistema a errores de temporización se revela observando la velocidad con que el ojo se cierra al variar los instantes de muestreo; (c) la máxima distorsión de la señal se manifiesta en el ancho vertical de las dos ramas de la figura en el instante de muestreo; (d) el margen mínimo contra el ruido equivale a la distancia desde la traza más cercana hasta el umbral en el instante de muestreo.

La separación entre canales, definida como el valor X por el UIT-R (Ex–CCIR), es uno de los parámetros importantes que hay que establecer cuando se diseña un plan de disposición de canales. Para reducir y optimizar el valor X hay que reducir también los anchos de banda de los filtros de canal para mantener en un nivel aceptable la interferencia entre canales y evitar una pérdida excesiva de la señal, pues esta señal es reflejada por los filtros de canal adyacentes. Esto produce una reducción de la amplitud E del diagrama de ojo.

Utilizando filtros ecualizadores se puede optimizar el diagrama de ojo. Por ejemplo, el empleo de filtros Chebychev o Bessel y de redes ecualizadoras permite obtener un ojo netamente simétrico. En el caso de demodulación coherente la abertura del ojo en los instantes de muestreo es una medida de la proporción de errores. Sin embargo, ante las imperfecciones del sistema, como por ejemplo, demodulación imperfecta, errores de temporización y fluctuación de fase, la abertura del ojo cobra importancia. Por consiguiente, debe evaluarse la calidad de funcionamiento del sistema de filtros no solamente en función de la amplitud de ojo máxima, sino también en función de la simetría y anchura de la región abierta. Esto último se indica en el diagrama de ojo mediante la anchura del punto de cruce por cero, como se puede observar en la Fig. 8.6.

En relación con el diagrama de ojo, el UIT-T ha definido la degradación de la relación Portadora/Ruido W en la forma

$$W = -20\log_{10}(E) \quad \text{dB} \tag{7.5}$$

donde E es la abertura del ojo, Figs. 8.5 y 8.6.

Esta relación se mide en ausencia de ruido o de interferencia externa en el canal. Cuanto más pequeña sea la amplitud de la abertura del ojo, mayor será la sensibilidad al ruido, interferencia y otros efectos.

En general, la amplitud E de la abertura del diagrama de ojo que puede obtenerse en la práctica no depende únicamente del filtrado y del grado de ecualización del tiempo de retardo, sino también de la calidad de los equipos. Además, puede requerir un filtrado adicional para separar los transmisores y receptores locales, y esto puede tener un efecto importante en las disposiciones de canales preferidas.

8.2.4. Interferencia Intersímbolo

La interferencia intersímbolo o distorsión entre símbolos es un efecto limitado dentro de un solo canal y determinado por las características de ese canal: ancho de banda, retardo de fase, ruido, etc. Esta interferencia es producida predominantemente por la

limitación de banda impuesta por los filtros de línea, cuyo ancho de banda está determinado por consideraciones de separación entre canales y de la interferencia proveniente de canales adyacentes. La distorsión de retardo también contribuye en la generación de la interferencia intersímbolo, pero su influencia es marginal.

Fundamentalmente, la interferencia intersímbolo se produce cuando en el instante de muestreo la señal es afectada por los lóbulos laterales o "ecos" de símbolos anteriores y posteriores. En los sistemas de transmisión de datos el ancho de banda se limita deliberadamente al valor necesario para transmitir únicamente la información binaria contenida en la señal y en el receptor se trata de detectar una presencia (o ausencia) de señal. En general, el ancho de banda del canal es mucho menor que el requerido para transmitir la forma perfecta de la señal, siendo inevitable la distorsión. Como regla general, si la duración de los impulsos de información es T, entonces la relación entre el ancho de banda B de los filtros de canal y la duración T para una interferencia intersímbolo aceptable es B = 1/2T, aunque algunas veces se utiliza la relación B = 1/T. Al proyectarse un canal de transmisión se debe fijar como objetivo la reducción al mínimo de la interferencia intersímbolo dentro de las limitaciones impuestas por las consideraciones sobre la separación entre canales y la interferencia procedente de canales adyacentes.

En la Fig. 8.7 se muestra el efecto sobre la secuencia binaria 1 0 1 de la interferencia intersímbolo producida por limitación de ancho de banda. No hay ruido ni interferencias externas.

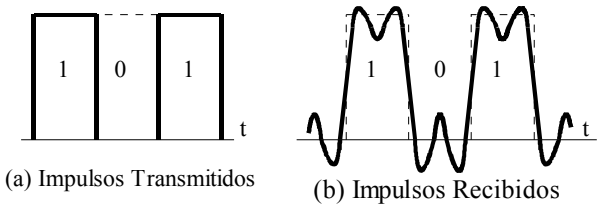


Fig. 8.7. Efecto de la Interferencia Intersímbolo.

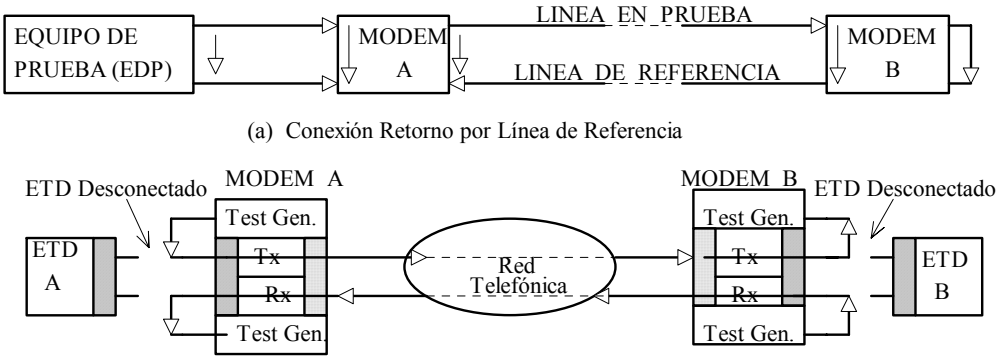
Los efectos de la interferencia intersímbolo se pueden estimar a partir de su distribución estadística y por simulación en computadora (caso de la Fig. 8.7(b)). Sin embargo, se ha observado que la proporción de errores de la secuencia de impulsos menos favorable predomina en relación con las otras secuencias de impulsos. Por consiguiente, la proporción promedio de errores es aproximadamente igual a la proporción de errores en la secuencia de impulsos menos favorable.

8.2.5. Compensación del Retardo

El acondicionamiento de los canales telefónicos para la transmisión de datos se ha simplificado y perfeccionado en gran parte gracias al empleo de probadores de retardo y compensadores variables. Asimismo, los módems más modernos poseen ciclos de prueba tanto analógicos como digitales para la verificación y compensación automática de la distorsión, entre ellas la distorsión de fase. La mayoría de los equipos de prueba suministra una tensión analógica de salida proporcional a la frecuencia de portadora y al retardo de

envolvente que se ha detectado en el receptor. Dicha tensión se aplica a un osciloscopio o un registrador XY a fin de obtener una indicación gráfica de las características de retardo relativo en función de la frecuencia. Esta información es de gran utilidad en la compensación.

Hay varias configuraciones de los equipos de prueba para medir las características de retardo de envolvente en los canales. Estas configuraciones han sido normalizadas por el UIT-T en sus Recomendaciones V.54 y V.56, y se muestran en la Fig. 8.8 y 8.9.

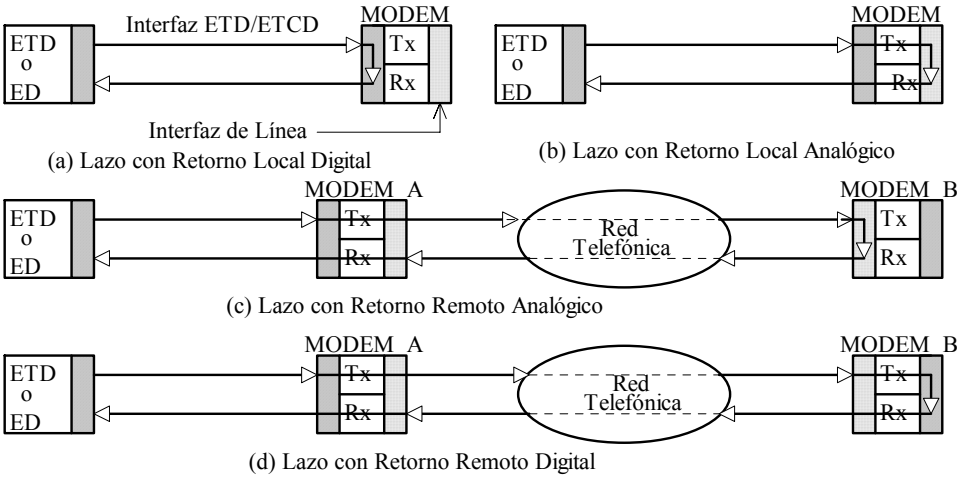


(a) Conexión Retorno por Línea de Referencia

(b) Medición Punto a Punto de la Proporción de Dígitos en Error (BER)

Fig. 8.8. Procedimientos de Medida, UIT-T V.54 y V.56

Asimismo, los ciclos de prueba normalizados se muestran en la Fig. 8.9.



(a) Lazo con Retorno Local Digital

(b) Lazo con Retorno Local Analógico

(c) Lazo con Retorno Remoto Analógico

(d) Lazo con Retorno Remoto Digital

Fig. 8.9. Ciclos de Prueba y Diagnóstico. UIT-T V.54 y V.56.

El método por lazo de retorno por línea de referencia se utiliza principalmente en pruebas de laboratorio o en verificación de fábrica para medir las características de los canales cuando ambos equipos terminales están disponibles en el mismo sitio. La conexión entre dos puntos terminales con retorno de referencia generalmente es el de mayor

precisión debido a que se obtiene una mejor sincronización entre las secciones transmisora y receptora del equipo de prueba.

En importante comprender que no se puede reducir el retardo absoluto dentro de un canal. Los compensadores solamente corrigen el valor relativo de la distorsión de retardo en la banda de paso, en un punto específico del canal. Dicho punto por lo general se ubica en el terminal de recepción. La distorsión de retardo relativo se corrige principalmente aumentando el retardo en las secciones de la banda donde la distorsión de la señal es baja. En esta forma los niveles de distorsión resultante en toda la banda se ajustan al valor más elevado de distorsión, con lo que resulta un alisamiento o aplanamiento eficaz de la respuesta en la banda de paso. Aunque el retardo absoluto (total) entre los extremos del canal haya aumentado ligeramente en ciertas gamas de la banda de paso, este tipo de distorsión pasará prácticamente desapercibido en la señal compensada.

Más adelante, en las Secciones 8.5 y 8.6, se describirán los procedimientos recomendados por el UIT-T para efectuar estas mediciones.

8.2.6. Recomendaciones del UIT-T

Para las líneas de calidad especial, Recomendaciones M.1020 ó H.12, el UIT-T ha establecido los límites máximos de la distorsión de retardo. Estos límites son:

Rango de Frecuencia Hz	Retardo ms
Menor que 500	No especificado
500 a 600	0 a 3
600 a 1000	0 a 1,5
1000 a 2600	0 a 0,5
2600 a 2800	0 a 3
Mayor que 2800	No especificado

Se puede transmitir hasta 9600 bps y los módems utilizados no necesitan compensación. En los grandes sistemas de telecomunicación provistos de centros de conmutación, es indispensable mantener una regulación estricta de la distorsión de retardo en todos los enlaces de la red. Esta regulación debe efectuarse a fin de que las secciones que entran a funcionar en tándem puedan cumplir con los requisitos necesarios para la transmisión. La Recomendación UIT-T M.1020 es equivalente a la especificación C2 norteamericana; en particular, la Recomendación UIT-T H.12 establece los valores tolerables de la distorsión de retardo de grupo. En la Fig. 8.10 se muestra la plantilla correspondiente a estos límites.

En la Recomendación M.1025 los límites de tolerancia son menos estrictos y con un acondicionamiento básico se puede alcanzar una velocidad de 2400 bps. En líneas sin acondicionamiento, cuyos límites de tolerancia se dan en la Recomendación M.1040, se puede alcanzar 1200 bps.

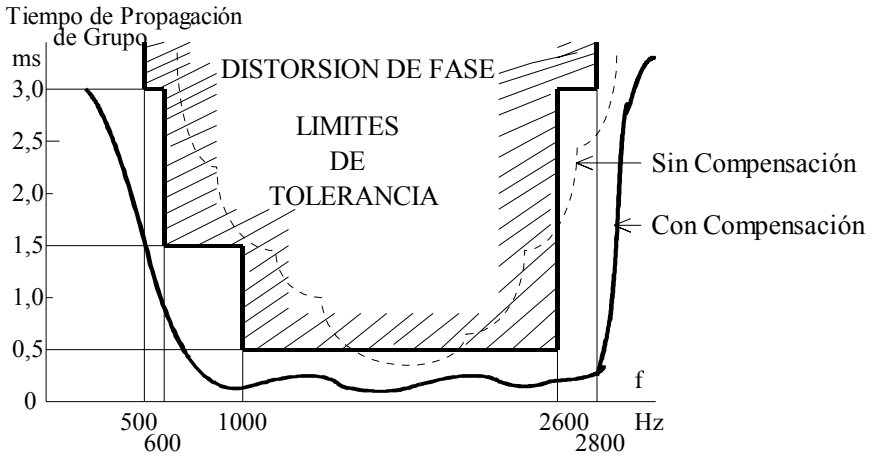


Fig. 8.10. Límites de Tolerancia. UIT-T Rec. M.1020.

En las Recomendaciones O.81 y O.82 se dan las especificaciones para los equipos de medición del retardo de grupo.

8.3. DISTORSION DE AMPLITUD O ATENUACION

8.3.1. Introducción

La distorsión de amplitud y la de retardo no tienen necesariamente una relación directa y no siempre aparecen juntas en un mismo canal, pero ambas se deben a causas muy similares. Sin embargo, debe observarse que se trata de dos fenómenos distintos e independientes y por lo tanto los métodos de corrección también son diferentes.

Se denomina distorsión de amplitud a la deformación de las señales cuando el módulo $|H_c(f)|$ no es constante sino que varía en función de la frecuencia. Esta forma de distorsión tiene dos características distintivas: un aumento de la atenuación (pérdida) en los bordes de la banda de paso y un rizado dentro de dicha banda.

En los sistemas multicanal telefónicos la atenuación en los bordes de la banda generalmente se debe a los filtros de línea, al cable pupinizado o a las características pasaalto de los transformadores y capacitores en serie. El rizado dentro de la banda es causado principalmente por desequilibrios de impedancia y la reflexión consiguiente.

8.3.2. Distorsión de Atenuación en Señales Digitales

En los sistemas multiplex por división de frecuencia (FDM), para transmisión de datos a baja velocidad, la distorsión en los bordes de la banda en los canales de voz puede llegar a tal grado que no resulta práctico aumentar el número de canales mediante ecualización. En cambio, el rizado dentro de la banda o la distorsión de retardo rara vez llegan a tal grado que perjudiquen los canales de baja velocidad. Por lo tanto, los compensadores que se insertan en los equipos FDM para servicio de datos sólo tienen que corregir la respuesta de amplitud en los bordes de la banda.

En los sistemas de transmisión de datos a velocidades más altas (sobre 1200 bps), por lo general predomina la distorsión de retardo y en consecuencia sólo se necesita una moderada corrección de amplitud. Comúnmente basta con una ecualización general de la pendiente de amplitud en toda la banda de paso.

Cuando el rizado dentro de la respuesta de amplitud dentro de la banda resulta más serio, debe introducirse algún tipo de compensación. Como ya se ha mencionado, el rizado se debe a falta de adaptación de las impedancias, aunque también puede ser causado por una imperfecta adaptación de los dispositivos de distorsión de retardo.

Generalmente la corrección de la distorsión de atenuación se efectúa a continuación de la compensación del retardo. Como se explicó en la Sección 8.2.2, el valor del retardo absoluto de un sistema no puede reducirse en el punto de origen, pero la distorsión de atenuación es susceptible de corrección con dispositivos de ganancia. Con este fin se puede emplear ecualizadores regulables para corregir la distorsión de amplitud, aparte de la distorsión de retardo. Con el uso de un compensador los canales de voz pueden satisfacer los requisitos establecidos por el UIT-T y la Norma C3 norteamericana para la transmisión de datos.

8.3.3. Recomendaciones del UIT-T

En la Recomendación M.1020 se establecen los límites de atenuación en canales acondicionados de calidad especial capaces de satisfacer las exigencias de transmisión hasta 9600 bps. Con un acondicionamiento menos estricto, cuyos límites están especificados en la Recomendación M.1025, se puede alcanzar 2400 bps. En los canales ordinarios, la Recomendación M.1040 especifica los límites de tolerancia para transmisión hasta 1200 bps.

En la Fig. 8.11 se muestra la plantilla para los límites de tolerancia establecidos por el UIT-T en su Recomendación M.1020.

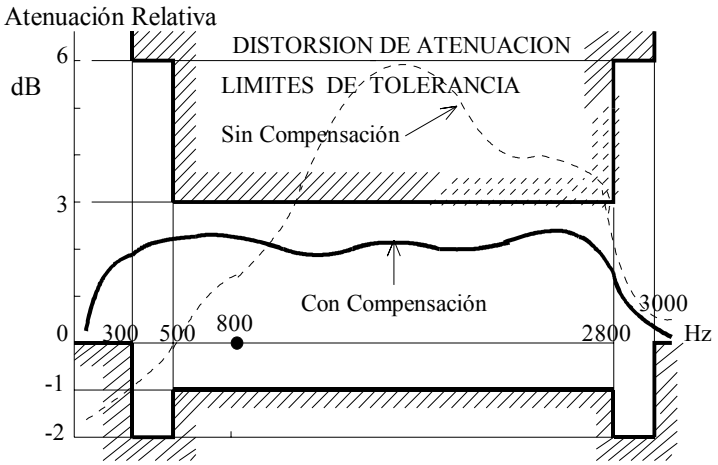


Fig. 8.11. Plantilla de Atenuación Relativa. UTI-T M.1020

La medición de la distorsión de atenuación se realiza respecto a una frecuencia de referencia de 800 Hz. El procedimiento para las mediciones y para las especificaciones de los equipos de medida se establecen en las Recomendaciones O.81 y O.82.

8.4. OTROS FACTORES DE DETERIORO

Aunque la distorsión de retardo de grupo y la distorsión de atenuación son los factores que más contribuyen al deterioro de las señales digitales, se tiene también otros factores limitativos tales como:

- Ruido Impulsivo
- Ruido Errático de Espectro Uniforme
- Ruido Sofométrico
- Picos de Ganancia
- Desplazamiento de Frecuencias
- Fluctuación de Fase
- Picos de Fase
- Ecos
- Fallas de Línea

En las siguientes páginas estaremos tratando continuamente con los diferentes niveles de potencia expresados en dB (dBm, dBm0, dBr, etc.). Para beneficio del lector en la Sección 8.8 de este mismo capítulo encontrará las definiciones correspondientes.

Ruido Impulsivo

Las señales digitales pueden soportar niveles relativamente altos de ruido de espectro uniforme (ruido blanco) pero son muy sensibles al ruido impulsivo cuando las espigas (impulsos esporádicos) pasan de cierto umbral. Los impulsos de ruido generalmente son de niveles altos y de corta duración (0,5 a 10 ms), pero esta duración puede ser relativamente larga cuando la velocidad de transmisión es alta. Por ejemplo, un impulso de ruido de 1 ms en un sistema de 9600 bps produce como mínimo una ráfaga de 10 dígitos en error.

El ruido impulsivo es generado por motores eléctricos, interruptores, tormentas eléctricas, y por las descargas producidas en los contactos mecánicos de los equipos de señalización y conmutación. Esta última causa puede reducirse mediante un buen mantenimiento.

Para las líneas de calidad especial, el UIT-T en su Recomendación M.1020 establece como límite que en un período de 15 minutos no podrá producirse más de 18 impulsos de ruido de picos superiores (umbral) a –21 dBm0. Este valor corresponde a una tensión sinusoidal con una amplitud de 98 mV en el punto de nivel relativo cero (PNR0).

Para las líneas telefónicas normales el umbral es de –18 dBm0.

En la Recomendación UIT-T O.71 se establece el procedimiento de medición del ruido impulsivo.

Ruido Errático de Espectro Uniforme

Para velocidades menores que 1200 bps su efecto es de menor cuantía. Para su medición se puede utilizar un trazador de niveles conjuntamente con el medidor de ruido impulsivo.

Su importancia radica en su efecto sobre la relación S/N y por lo tanto influencia notablemente la acción de los módems para velocidades superiores a 2000 bps. A estas velocidades los módems requieren relaciones S/N de 20 a 22 dB mínimo en las horas peores.

Para líneas de calidad especial, el valor de la potencia promedio del ruido errático es de aproximadamente 4 pW/km, para distancias hasta 2500 km.

Ruido Sofométrico

Este tipo de ruido tiene su origen en el movimiento browniano dentro de los conductores y su densidad espectral es uniforme, como el ruido blanco. Para su medición se emplea un sofómetro, de ahí su nombre. El nivel de potencia de este ruido se expresa en dBm0p (la "p" indica que éste es un ruido ponderado según una curva establecida por el UIT-T en su Recomendación P.53). El nivel de ruido depende de la longitud del circuito y de la capacidad del sistema; el UIT-T lo cuantifica mediante la expresión $N_p = 3L + 200$ pW, donde L es la longitud del circuito, en km. Esta expresión se emplea para sistemas con más de 200 canales y longitudes superiores a 50 km. Por ejemplo, en un circuito de 500 km la potencia de ruido sofométrico es de 1700 pWp ó -57.7 dBm0p. El nivel de ruido sofométrico no podrá ser mayor de –38 dBm0p.

Picos de Ganancia

Los picos de ganancia son alteraciones súbitas de la ganancia en un sistema. Los picos de ganancia, si son mayores que ± 3 dB, pueden causar errores en la transmisión de datos a 9600 bps o más. Los picos de ganancia aumentan o disminuyen la amplitud de la señal que en el caso de un diagrama de Fresnel V.29 o V.32, puede pasar de un valor a otro; por ejemplo, en el Módem V.29 el vector 0000 puede convertirse en el vector 0001 al producirse un pico de ganancia.

Los picos de ganancia se deben a transientes que ocurren cuando el sistema está pobremente estabilizado.

De acuerdo con la Recomendación UIT-T M.1060, no debe ocurrir más de 10 picos de ganancia de ± 2 dB dentro de un período de 15 minutos.

En la Recomendación UIT-T O.95 se establecen los correspondientes procedimientos de medición.

Desplazamiento de Frecuencias

En la transmisión de datos sobres redes telefónicas se utilizan varias modulaciones (grupo, supergrupo, RF, microndas, etc.) entre el ETD fuente y el ETD destino, y las diferentes frecuencias de portadora se pueden originar en puntos distintos de la trayectoria. Es posible entonces que se produzca un desplazamiento de frecuencia entre las diferentes portadoras. El UIT-T, en su Recomendación G.225, establece que el desplazamiento de frecuencia en sistemas de portadora no debe exceder ± 2 Hz, y para el caso específico de la transmisión de datos, la Recomendación M.1020 establece una variación de ± 5 Hz en 5 minutos de medición.

Para velocidades de transmisión iguales o superiores a 600 bps, un desplazamiento de ± 5 Hz casi no tiene efecto sobre el porcentaje de error. Sin embargo, un desplazamiento de solamente ± 2 Hz en un sistema telegráfico de banda angosta sobre un canal de voz, en donde se produce desviaciones de frecuencia de ± 40 Hz a 50 bps, puede producir una distorsión significativa.

En la Recomendación UIT-T O.111 se describen los procedimientos para la medición de los desplazamientos de frecuencia.

Fluctuación de Fase (Jitter)

Durante mucho tiempo el concepto de "fluctuación de fase (jitter)" llamado también "inestabilidad de fase" fue conocido solamente en el ámbito de los laboratorios de investigación y desarrollo, y se utilizaba para describir las variaciones rápidas de fase de poca significación en el aspecto práctico de entonces. La razón de esta poca atención se deriva del hecho de que las redes telefónicas estaban diseñadas para transmisión de voz y el oído puede tolerar fluctuaciones de fase considerables. Pero el advenimiento de la transmisión digital y las velocidades de transmisión cada vez más altas, han puesto de manifiesto la gran importancia de la fluctuación de fase. A velocidades superiores a 4800 bps, puede ser el principal factor limitativo en el comportamiento del sistema.

Las causas de la fluctuación de fase son muy variadas, pero podemos mencionar las siguientes:

(a) Filtrado insuficiente en la fuente de alimentación. Por efectos del filtraje insuficiente, la frecuencia de la red (60 Hz) y sus primeras armónicas (180 y 300 Hz) pueden modificar la fase de los osciladores presentes.

(b) Inestabilidad en la frecuencia.

(c) Variaciones de la carga de los osciladores.

(d) Diferencias en las distintas trayectorias de la señal.

En su Recomendación G.823, el UIT-T define la fluctuación de fase como las "variaciones a corto plazo de los instantes significativos de una señal numérica (digital) en relación con las posiciones que teóricamente debieran ocupar en el tiempo".

A fin de visualizar mejor los efectos de la fluctuación de fase en la transmisión de datos, consideremos una señal sinusoidal vista en un osciloscopio. Si la señal posee alguna modulación angular, la traza fluctuará sobre el eje X a una velocidad que dependerá de la frecuencia de modulación, como se muestra en la Fig. 8.12(a).

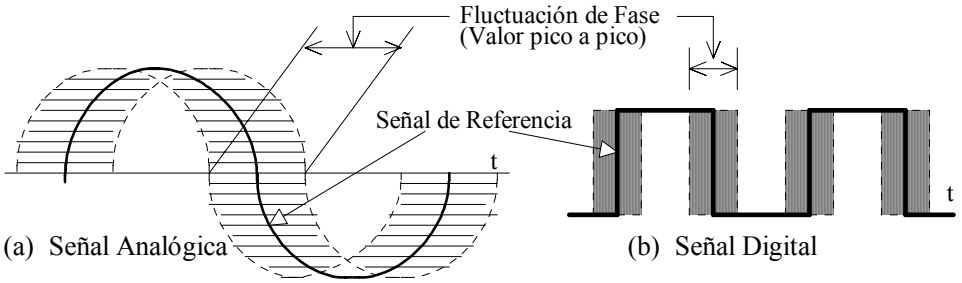


Fig. 8.12. Formas de la Fluctuación de Fase (Jitter)

Considérese ahora el efecto de esta fluctuación sobre una secuencia binaria, como se muestra en la Fig. 8.12(b); obsérvese la zona borrosa en los bordes de los impulsos cuya anchura es proporcional al valor pico a pico de la fluctuación. Esta zona de ambigüedad es de gran importancia, pues a medida que la velocidad de transmisión aumenta, los impulsos netos (sobre los cuales se efectúa el muestreo) serán más angostos y la probabilidad de error aumentará.

Como la fluctuación de fase es un proceso de modulación, una señal con fluctuación de fase tendrá asociada con ella un cierto número de bandas laterales indeseables. Esta situación podría aplicarse para la medición de la fluctuación mediante una relación portadora/bandas laterales, pero sería muy difícil establecer cuáles son las bandas laterales útiles y cuáles las indeseadas. La práctica aceptada actualmente es la de especificar la fluctuación de fase en grados. Esto generalmente se hace con un detector de cruces por cero cuya salida indica la fluctuación de fase directamente en grados o radianes.

En sus Recomendaciones G.823 y G.824, el UIT-T trata extensamente el problema de la fluctuación de fase. En la Recomendación O.91, se establece las especificaciones de un aparato de medida de la fluctuación de fase en circuitos telefónicos y en la Recomendación M.1020, para velocidades menores que 4800 bps, se permite hasta 15° en la banda comprendida entre 20 y 3000 Hz. En general, se requiere que la fluctuación de fase no exceda 15° pico a pico durante un período de medición de 5 minutos.

Picos de Fase (Phase Hits)

Fuertes variaciones en la fase tiene como consecuencia la aparición de errores en la señal digital recibida. Por ejemplo, un cambio en la frecuencia de portadora en un enlace dado puede producir picos de fase. Es posible también que un ruido interferente pueda tener una amplitud y fase tales que la variación total de fase sea muy grande, y el extremo del vector resultante caiga dentro de otra región. Esto se puede apreciar en la Fig. 8.13, en el

caso de un Módem V.27: se transmitió la secuencia 0 0 0 pero debido al ruido se recibió la secuencia 0 1 0.

La mayoría de los dispositivos de conmutación de portadora modernos están diseñados de tal manera que no pueda ocurrir desviaciones de fase superiores a los 30º pico a pico.

De acuerdo con la Recomendación UTI-T M.1060, en los circuitos de datos deben aparecer menos de 10 picos de fase que excedan los 15º dentro de un período de 15 minutos; sin embargo, generalmente se requiere que la desviación pico a pico no exceda los 10º; las normas norte-americanas especifican 6º para velocidades superiores a 4800 bps.

En la Recomendación O.95 se dan los correspondientes procedimientos de medición.

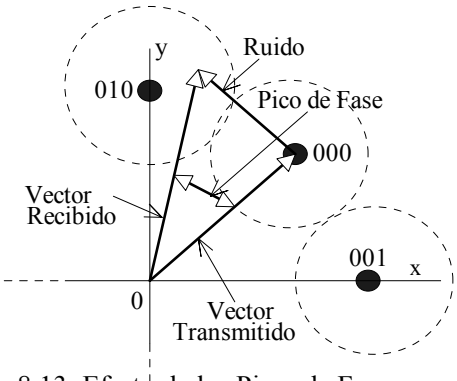


Fig. 8.13. Efecto de los Picos de Fase.

Ecos

En el caso de la transmisión digital, el eco es el efecto de una señal reflejada a partir de una señal primaria; esta señal secundaria llega a cualquier terminal del circuito con una magnitud y fase suficientes para confundirse con una señal primaria. En el terminal de transmisión el eco no tiene mucha importancia ya que mediante un diseño adecuado los módems pueden proporcionar un retardo adecuado al iniciar una transmisión. Pero el eco sí es de gran importancia en el terminal receptor. En efecto, a las velocidades de transmisión actualmente utilizadas, los ecos en el receptor afectan los impulsos siguientes recibidos. En circuitos mal balanceados de cuatro conductores se puede tener ecos con niveles que pueden alcanzar hasta 10 dB por debajo del nivel de la señal primaria, que afectarán severamente la calidad de los datos recibidos.

El eco en el extremo receptor es producido por desacoplamiento de impedancias (pérdidas de retorno), por conversiones de cuatro conductores a dos conductores, por repetidores de resistencia negativa, etc. Cada irregularidad en la línea produce reflexiones que pueden llegar a mutilar la señal.

El UIT-T, en sus Recomendaciones G.122, G.165 y G.171, trata extensamente este tema.

Fallas de Línea

Una atenuación súbita de más de 10 dB en el nivel de la señal digital se considera como una falla de línea o “dropout”. Condiciones de este tipo, causadas por fallas en la fuente de alimentación de potencia, por cortocircuito en los cables de la red y, en general, por cualquiera interrupción, producen errores en la recepción de datos. Sin embargo, como la respuesta transitoria de un canal telefónico es del orden de 200 μs (1/3300Hz), cualquiera interrupción menor de 100 μs no producirá efectos notorios en el nivel de la señal.

De acuerdo con la Recomendación UTI-T M.1060, durante un período de observación de 15 minutos no debe producirse interrupciones de 3 ms a 1 minuto de duración. Sin embargo, si se observa alguna interrupción aislada, el tiempo de medida se puede extender hasta una hora. Dentro de este período no debe producirse más de dos interrupciones.

En la Recomendación UIT-T O.61 se especifican los procedimientos de medición de las fallas de línea.

8.5. EVALUACION DE LA RED TELEFONICA CONMUTADA

La evaluación de la red telefónica conmutada consiste en (a) la determinación de los elementos cuya contribución permite estimar su capacidad para la transmisión de datos, y (b) la medición de los parámetros eléctricos del medio de transmisión.

8.5.1. Procedimientos de Medición

La red conmutada sin acondicionamiento puede transmitir señales desde 50 bps hasta un límite superior de 1200 bps, tal como se especifica en la Recomendación M.1040; pero debido al hecho de que las rutas seleccionadas por los centros de conmutación son aleatorias y las características de la red son muy variables, inclusive dentro de un mismo centro urbano, no es necesario efectuar la medición de los parámetros eléctricos del medio de transmisión (Mediciones de Carácter Telefónico).

De acuerdo con la recomendación UIT-T V.52, la evaluación consiste en la generación desde el extremo transmisor de una secuencia seudoaleatoria, de 511 dígitos cada una, en el rango de velocidad en el cual se está operando, por ejemplo, a 1200 bps. Esta secuencia se compara en el extremo receptor con una señal seudoaleatoria idéntica generada localmente. Secuencias de dígitos o de bloques que no coincidan en el receptor, son consideradas como errores que deben ser evaluados. Es importante también para la evaluación del comportamiento de la red el conocimiento de la distorsión telegráfica.

El tiempo promedio de medición de error para las secuencias es de 15 minutos durante las horas pico. La distorsión telegráfica debe evaluarse durante los primeros 20 segundos del mismo período.

Si la velocidad de prueba es de 1200 bps, en 15 minutos se transmitirá 1.080.000 dígitos y 2.113 bloques de 511 dígitos; por lo tanto, para el medio de transmisión utilizado y con el rango de modulación establecido, el límite del porcentaje de dígitos en error establecido es de 10^{-3}, lo cual significa que la cantidad total de dígitos en error no debe superar en ningún caso los 1.080.

Si se supone que la distribución de los dígitos en error es uniforme, es decir, un dígito en error en cada bloque de 511 dígitos, la cantidad máxima de bloques en error no podrá en ningún caso superar los 1.080 bloques; esto corresponde al 51,1% del total de 2113 bloques transmitidos.

Es importante tener presente la influencia que sobre las mediciones puede tener la utilización de un módem solamente; por ello se recomienda utilizar módems UIT-T de diferentes fabricantes. En el proceso de medición en lo posible se debe seguir las

instrucciones indicadas en el manual del módem con el fin de reducir potenciales fuentes de error.

En las Figs. 8.8 y 8.9 se muestra los diferentes lazos o ciclos de prueba y diagnóstico, de acuerdo con las Recomendaciones V.54 y V.56.

8.5.2. Mediciones sobre la Red Conmutada Urbana

En la red conmutada urbana es de particular importancia la medición de ciertos parámetros denominados "parámetros de carácter telegráfico". En la Fig. 8.14 se muestra la interconexión entre el ETD llamante y el ETD llamado; en la práctica estos ETDs son en realidad instrumentos de medición.

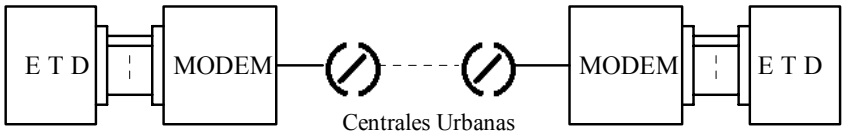


Fig. 8.14. Interconexión sobre la Red Conmutada Urbana

Las Mediciones de Carácter Telegráfico que se deben evaluar sobre la red pública conmutada son:

- Distorsión Telegráfica
- Proporción de Dígitos en Error (BER)
- Proporción de Bloques en Error (PBE)
- Fallas de Línea

Procedimiento de Conexión

En el procedimiento de conexión sobre la red conmutada hay que seguir los siguientes pasos:

1. Establecer la conexión telefónica normal entre llamante y llamado
2. Inhabilitar el teléfono activando el circuito de enlace 107/CC para que el módem tome la línea, sea en modo automático o en modo manual (con operadores)
3. Proceder a la transmisión a las velocidades asignadas (600/1200 bps) y medir los elementos que permitirán evaluar la aptitud de la red conmutable para la transmisión de datos hasta 1200 bps. El aparato de medición es el especificado en la Recomendación V.52, y se aplicarán los límites establecidos en la Recomendación V.53, cuyos aspectos más relevantes los veremos más adelante.

Localización de los Terminales de Medición

El extremo receptor quedará fijo durante todo el período de medición y deberá pertenecer a áreas de tráfico telefónico intenso. Este extremo es el encargado de realizar las mediciones.

El extremo transmisor se localizará en la central bajo prueba. En todo caso, deberá probarse la mayoría de las centrales pertenecientes al área bajo medición.

Establecimiento de las Conexiones

Por cada central se debe efectuar un mínimo de 12 pruebas alternadas de la siguiente manera:

(a) El extremo llamante establece la conexión telefónica y transmite las secuencias. El tiempo de prueba es de 15 segundos durante las horas pico (en este tiempo se puede transmitir hasta 35 bloques a 1200 bps). El extremo receptor computa las fallas de línea, la distorsión telegráfica y los bloques y dígitos en error.

(b) Se invierte el proceso: el extremo receptor establece la conexión telefónica, y el extremo transmisor inicia la transmisión de las secuencias. Los parámetros se miden en el extremo receptor.

La evaluación final consistirá en que por lo menos un 80% de las comunicaciones establecidas hayan producido un resultado satisfactorio, es decir, que estén dentro de los límites establecidos por las normas. Las mediciones se hacen siempre en el extremo receptor o remoto.

La comunicación entre redes interurbanas se efectúa mediante enlaces de microondas. En este caso se incorporan todos los enlaces entre diferentes localidades que utilizan sistemas de portadora modulada. Los procedimientos para estas mediciones son los mismos especificados para la red conmutable urbana, pero la trayectoria bajo medición deberá (si el área bajo medición es multicentral) recorrer todas las centrales pertenecientes al área.

8.5.3. La Recomendación V.53 para la Red Conmutada

Límites para la Distorsión Telegráfica y la Proporción de Dígitos en Error

Los límites para la distorsión telegráfica y para la proporción o porcentaje de dígitos en error (BER) se muestran en la Tabla siguiente:

Distorsión Telegráfica y Proporción de Dígitos en Error (BER). Rec. V.53

Velocidad, bps	Módem	Distorsión Telegráfica %	BER
300	V.21	20 ---- 25	5×10^{-5}
600	V.23	25 ---- 30	3×10^{-5}
1200	V.22/V.23	30 ---- 35	10^{-5}
2400	V.26	----	3×10^{-5}

Para la distorsión telegráfica el tiempo de medición son los primeros 20 segundos. Estos límites se aplican también al canal de retorno (si lo hay). Para el BER el tiempo de medición es de 20 minutos durante las horas pico.

Límites para la Proporción de Bloques en Error (PBE)

La información sobre la proporción de errores en las secuencias de 511 dígitos debe obtenerse en forma similar a la medición del BER, haciéndose las dos mediciones simultáneamente.

Para que las Administraciones puedan apreciar el interés de las mediciones del PBE en las secuencias, en la Tabla siguiente se indica los valores teóricos máximos y mínimos del PBE que corresponden a diferentes valores del BER. Estos valores teóricos no dependen de la velocidad de modulación. Los datos para la Tabla son:

Velocidad de Modulación = 1200 baudios; Tiempo de Medición = 15 min = 900 seg

Número de Secuencias Transmitidas = 2113 ; Número de Dígitos/Secuencia = 511

Número de Dígitos Transmitidos = 1.080.000

BER	Número de Dígitos Erróneos	Secuencias Erróneas			
		Número Máximo (1)	PBE Máxima, %	Número Mínimo (2)	PBE Mínima, %
1	2	3	4	5	6
2×10^{-3}	2160	2113	100	5	0,24
10^{-3} (3)	1080	1080	51,1	3	0,15
5×10^{-4}	540	540	25,5	2	0,10
10^{-4}	108	108	5,1	1	0,05
5×10^{-5}	54	54	2,5	1	0,05

Observaciones:

(1) El número máximo de secuencias erróneas, indicado en la columna 3, corresponde a una distribución uniforme de los dígitos en error (un dígito por secuencia)

(2) El número mínimo de secuencias erróneas, indicado en la columna 5, corresponde a una distribución agrupada de dígitos erróneos (paquetes de 511 dígitos que afectan a las secuencias)

(3) Se observa que para un BER de 10^{-3}, el PBE puede variar entre 0,15% y 51,1%. Esto demuestra la utilidad de las mediciones de PBE y no solamente para las Administraciones, quienes podrán extraer una valiosa información sobre las causas de los errores en los dígitos y en las secuencias, sino también para los usuarios.

Niveles de Potencia

De acuerdo con la Recomendación V.2, la máxima potencia de salida del módem no debe exceder 0 dBm0 (1 mW sobre 600 ohms) a cualquier frecuencia. Para FSK o PSK la potencia promedio de la señal a la entrada de los circuitos multicanal o transmisión no debe exceder:

- -10 dBm0 en transmisión Simplex
- -13 dBm0 en transmisión Fulldúplex

En sistemas multicanal AM/FDM la señal no debe exceder los –15 dBm0 en cada sentido de transmisión simultáneamente (fulldúplex).

Se debe ajustar la potencia de salida del módem en forma tal que compensando la atenuación de la línea se pueda llegar a las entradas de las centrales con un nivel de potencia fijado en el Plan de Transmisión de la respectiva Administración. Más adelante, en la Sección 8. 7, calculamos estos niveles con más detalle.

8.6. EVALUACION DE LA RED TELEFONICA DEDICADA

8.6.1. Introducción

Por un canal telefónico normal de 3 kHz de ancho de banda se puede transmitir sin dificultad hasta 1200 bps si el canal llena ciertas características especificadas en la Recomendación M.1040. Sin embargo, utilizando técnicas de modulación avanzadas se puede transmitir hasta 16800 bps previo acondicionamiento del canal (Rec. M.1020). Nótese que con técnicas de control de error y compresión de datos se puede alcanzar velocidades muy superiores (56 kbps con el Módem V.90).

La máxima velocidad de transmisión viene limitada no solamente por el ancho de banda del canal sino también por otros factores limitativos de gran importancia. Estos factores, denominados “parámetros de carácter telefónico”, son:

- La Atenuación a 800 Hz
- La Distorsión de Atenuación
- La Distorsión de Retardo de Fase
- El Ruido Impulsivo
- El Ruido Errático de Espectro Uniforme
- La Fluctuación de Fase

La medición de estos parámetros se denomina “Mediciones de Carácter Telefónico”

Otros factores no tan relevantes pueden contribuir también en la limitación de la velocidad de transmisión; éstos son:

- Desacoplamiento de Impedancias
- Baja Relación S/N en el Receptor
- Método de modulación y detección empleado, etc.

Para velocidades de transmisión superiores a 1200 bps, es necesario acondicionar el canal; este acondicionamiento consiste en la compensación de la atenuación relativa a 800 Hz y de la distorsión de fase relativa al mínimo valor encontrado en la banda bajo medición. En la Recomendación M.1020, ya citada, se dan los procedimientos de

compensación para transmisión hasta 9600 bps, y aunque no está especificado explícitamente, se puede transmitir hasta 16,8 kbps.

En la Recomendación M.1350 se establecen los límites de la proporción de errores hasta 9600 bps y en la Recomendación M.1370 se dan los límites para transmisión hasta 64 kbps.

En resumen, son dos las actividades específicas necesarias para evaluar el comportamiento de la red dedicada:

1. Medición de los parámetros eléctricos de la línea (mediciones de carácter telefónico)
2. Simulación de la Transmisión de Datos (mediciones de carácter telegráfico)

Dependiendo de la velocidad de transmisión, tipo de módem y otras consideraciones, se podrá utilizar una combinación de ambas actividades o cualquiera de ellas por separado. La forma de interconexión entre el ETD llamante y el ETD llamado es similar a la mostrada en la Fig. 8.13.

Los parámetros eléctricos de carácter telefónico son los de mayor incidencia en la transmisión de datos en la red dedicada y cada uno de ellos está normalizado por el UIT-T en las correspondientes recomendaciones.

8.6.2. Recomendaciones del UIT-T para la Red Telefónica Dedicada

En las Tablas siguientes se resume las normas establecidas en la Recomendaciones V.53, M.1350 y M.1370 para la red dedicada.

Recomendación V.53

Velocidad (bps)	Módem	Distorsión Telegráfica , %	BER
300	V.21	-----	5×10^{-5}
600	V.23	20 --- 30	3×10^{-5}
1200	V.22/V.23	25 --- 35	10^{-5}

Tiempo de medición: 20 minutos. Estos circuitos deben cumplir con la Recomendación M.1040 (H.12) para transmisión hasta 1200 bps.

Recomendación M.1350

Velocidad (bps)	BER	Errores en 15 minutos	Segundos libres de error, %
2400	10^{-5}	22	> 92 %
4800	10^{-5}	43	> 92 %
7200	10^{-5}	65	> 92 %
9600	10^{-5}	86	> 92 %

Tiempo de medición: 15 minutos. Estos circuitos deben cumplir con las Recomendaciones M.1025 y M.1020 para transmisión hasta 2400 bps y 9600 bps, respectivamente.

En la Recomendación M.1370 se dan los límites para transmisión por circuitos de banda ancha (60 a 108 kHz).

Recomendación M.1370

Velocidad	Sección Nacional		Sección Internacional	
kbps	BER	Errores en 15 minutos	BER	Errores en 15 minutos
48	10^{-6}	43	10^{-7}	4
50	10^{-6}	45	10^{-7}	4
56	10^{-6}	50	10^{-7}	5
64	10^{-6}	58	10^{-7}	6

Cuando se considera la Red de Abonado, los límites establecidos por la Recomendación M.1370 son:

Recomendación M.1370

Velocidad, kbps	BER	Errores en 15 minutos	Segundos Libres de Error, %
48	$2{,}1 \times 10^{-6}$	90	> 92 %
50	$2{,}1 \times 10^{-6}$	95	> 92 %
56	$2{,}1 \times 10^{-6}$	105	> 92 %
64	$2{,}1 \times 10^{-6}$	122	> 92 %

Tiempo de medición: 15 minutos. Los procedimientos de medición y las características de los equipos se dan en la Recomendación V.52.

En el caso de las mediciones de los circuitos privados punto a punto, los equipos de medición se colocan en los extremos representativos del suscriptor.

Una vez conocidas las características del enlace bajo estudio (mediciones de carácter telefónico), se puede evaluar su capacidad para la transmisión de datos efectuando las mediciones de carácter telegráfico. El procedimiento es válido para el área urbana como para el área interurbana.

8.7. NIVELES DE POTENCIA EN LA TRANSMISION DE DATOS

8.7.1. Introducción

Para establecer una transmisión de calidad satisfactoria y permitir la coordinación con dispositivos tales como equipos de señalización o supresores de eco, hay que controlar con la mayor exactitud posible la potencia de las señales transmitidas en un multicanal. Con el fin asegurar su funcionamiento correcto desde el punto de vista de la carga y del ruido, la potencia promedio de dichas señales no debe diferir mucho de ciertos valores convencionales adoptados por el UIT-T y el UIT-R. Estos valores convencionales permiten utilizar una proporción razonable de canales para la transmisión de datos y para otros usos como la telegrafía.

Las limitaciones de carga en sistemas multicanal para la transmisión de voz y datos son bastante complejas y cada sistema particular debe ser considerado individualmente. Las recomendaciones de carga del UIT-T, expresadas en unas pocas fórmulas, son de tipo general y el diseñador de un sistema debe interpretarlas debidamente y aplicarlas adecuadamente.

8.7.2. Niveles en Transmisión de Voz

La distribución de amplitudes, tanto en un simple canal telefónico como en una banda de base multicanal, ha sido objeto de investigaciones muy detalladas. Las mediciones originales de la relación entre el valor de cresta y el valor eficaz de una señal de voz fueron efectuadas por Holbrook y Dickson en 1938 [Holbrook y Dickson, 1938]. Estas mediciones se han repetido y se ha tratado de obtener un modelo matemático para el caso de combinaciones de diferentes tipos de voz [Richards, 1964].

Un canal telefónico debe ser capaz de soportar un volumen normal máximo esperado. Esta capacidad de carga debe ser función no solamente de la relación “valor de cresta/valor eficaz”, denominada “factor de cresta”, sino también de los niveles de potencia promedio de la señal de voz, lo cual permite el cálculo de los niveles de potencia promedio por canal [Tant, 1974].

El factor de cresta, sin embargo, es una función más compleja del número de canales activos ya que no todos los canales estarán cargados al mismo tiempo. A este efecto, ha sido necesario introducir los conceptos de “hora más cargada” y “coeficiente de actividad”, que junto con el factor de cresta son parámetros de gran importancia en el diseño de sistemas telefónicos.

El “coeficiente de actividad” es la relación “número de canales activos/número de canales del multicanal”. Mediante mediciones experimentales efectuadas por diferentes entidades, se ha determinado que un canal simple está ocupado un 70% a 80% durante la hora más cargada, con un 25% máximo de ocupación en promedio, tomado sobre un período largo. En sistemas con un gran número de canales, este valor de 0,25 es muy raras veces sobrepasado aún durante la hora de más tráfico. En efecto, si un canal está activo, en promedio, un 25%, el porcentaje de tiempo en que todos los canales estarán activos es de esperarse que sea muy pequeño. En sistemas de alta densidad ($N > 2700$ canales) el coeficiente de actividad es ligeramente superior a 0,27 [Tant, 1974]. Sin embargo, el UIT-T

toma un valor de 0,25, un nivel que puede esperarse que sea excedido el 1% del tiempo y que equivale a una potencia promedio, por canal, de –15 dBm0 discriminada en la forma siguiente (Recomendación IUT-T G.223):

Potencia promedio para señalización y tonos	10 μW
Potencia promedio para señales de voz, ecos, residuos de portadoras, etc.	22 μW
Potencia promedio por canal	32 μW

Esta potencia equivale a –15 dBm0 por canal.

El UIT-T y el UTI-R toman el valor del coeficiente de actividad de 0,25 para sistemas de 240 o más canales. En este caso el nivel de potencia promedio total de la banda de base, en transmisión de voz solamente, será (Rec. G.223):

$$P_{MV} = -15 + 10 \log_{10}(N) \quad \text{dBm0} \qquad (8.6)$$

para $N \geq 240$ durante el 99% de la hora más cargada.

En sistemas de baja capacidad ($N < 240$ canales), el coeficiente de actividad es superior a 0,317 y la expresión (8.6) ya no es aplicable. No obstante, mediante acuerdos internacionales se ha establecido que el nivel de potencia esté dado por

$$P_{MV} = -1 + 4 \log_{10}(N) \quad \text{dBm0} \qquad (8.7)$$

para $12 < N < 240$ canales durante el 99% de la hora más cargada

En la práctica esta expresión se extiende a sistemas con $N \leq 12$ canales.

Para el cálculo del ruido de intermodulación por debajo del punto de saturación, se supone que durante la hora más cargada la señal de banda de base multicanal puede estar representada por una señal constituida por un ruido aleatorio de densidad espectral uniforme (ruido blanco) cuyo nivel absoluto de potencia promedio en el punto de nivel relativo cero (PNR0) es P_{MV}, es decir, que P_{MV} es la potencia que hay que aplicar en el PNR0 cuando se simulan las condiciones de trabajo en el sistema multicanal (Rec. G.223).

En cuanto al valor de cresta, el UIT-T define una “potencia equivalente de cresta” de una señal multicanal como “la potencia de una señal sinusoidal de amplitud igual al valor de la tensión de cresta de la señal multicanal”, definición establecida a partir de los resultados de Holbrook y Dickson, ya citados.

El UIT-T, en la Recomendación G.223, establece una Tabla donde se dan algunos valores de la potencia equivalente de cresta para diferentes números de canales:

Potencia Equivalente de Cresta (UIT-T G.223)

Número de Canales	12	24	36	48	60	120	300	600	900	1800	2700
Potencia Equivalente de Cresta, dBm0	19	19,5	20	20,5	20,8	21,2	25	25	27	30	32

Una forma alterna de presentar estos resultados es mediante la relación "Valor de Cresta/Valor Eficaz" en función del número de canales activos. Esta relación usualmente se denomina "factor de cresta multicanal" y se expresa en dB. Se demuestra [Tant, 1974] que en 12 canales activos un valor de cresta de 9,5 dB será excedido solamente durante un 1% del tiempo. Para 100 o más canales, este factor se habrá reducido a aproximadamente 8,2 dB . Esto demuestra que no es conveniente ni deseable diseñar un equipo multicanal con los mismos factores de cresta de un canal simple.

Si ocurre una falla o se efectúa una operación falsa y el nivel de la señal excede los valores de diseño, se produce una sobrecarga que puede poner fuera de servicio un número dado de circuitos, sea a nivel de grupo o de supergrupo. Para prevenir esta situación, los equipos modernos poseen limitadores que introducen una cierta pérdida a fin de compensar el aumento en el factor de cresta o en la potencia promedio.

8.7.3. Niveles en Transmisión Digital

La capacidad o factor de carga de un sistema de comunicaciones es el volumen de tráfico que puede soportar sin sobrepasar los límites de tolerancia de ruido o distorsión establecidos para cada enlace. La constitución física de los diversos segmentos de un sistema es la que determina en definitiva la carga máxima admisible entre los puntos terminales.

Por lo general, la capacidad de carga en los sistemas multicanal se diseña para un número específico de canales de voz durante la hora más cargada, con un valor de carga derivado de evaluaciones estadísticas. Las fórmulas (8.6) y (8.7) indican el nivel de ruido blanco o ruido de fondo necesario para simular la carga de un determinado número de canales de voz, es decir, la capacidad de carga del sistema. Los sistemas calculados según estas fórmulas resultan adecuados si se utilizan para tráfico telefónico exclusivamente, o para telefonía y una pequeña proporción de señales de datos de –15 dBm0 por canal. A este nivel, el tráfico telefónico y de datos puede mezclarse en cualquiera proporción; sin embargo, restricciones de tipo operacional no permiten la ocupación completa de los grupos de 12 canales. Para niveles de datos superiores a –15 dBm0 la proporción Voz/Datos puede calcularse, como veremos más adelante.

En algunas aplicaciones el nivel de –15 dBm0 resulta insuficiente pues al restringir la potencia de la señal de datos a dicho nivel se afecta seriamente la relación Señal/Ruido. Esto es de particular importancia sobretodo en los servicios de comunicación militares y en los sistemas industriales. En estas circunstancias es necesario efectuar la transmisión a niveles superiores a los establecidos por UTI-T.

Hay que tomar en cuenta el hecho de que los datos se transmiten en forma de series de tonos que presentan una carga continua y no como en el caso de la transmisión de voz, en la que ocurren "silencios" o "pausas" con una gran probabilidad. De particular interés son los niveles con los cuales se aplican estos tonos y la relación entre la potencia máxima de la señal de datos y la potencia máxima de la señal de voz que reemplaza. En consecuencia, a medida que aumenta el número de canales que se transfieren del servicio telefónico al de datos, aumenta también la potencia global de la señal afectando, por lo tanto, a la capacidad de carga del sistema.

Como la transmisión de datos tiende a ser un flujo continuo de señales, el coeficiente de actividad es casi del 100% y las expresiones (8.6) y (8.7) recomendadas para los canales de voz deben ser modificadas.

Hay varias soluciones posibles para obtener un rendimiento satisfactorio de un sistema cuando se agregan canales de datos en altas proporciones. La solución más obvia consiste en retirar del sistema un número equivalente de canales telefónicos por cada canal de datos agregado de acuerdo con la capacidad de carga del sistema. También se puede limitar drásticamente el porcentaje de canales de datos distribuyéndolos en el sistema de manera que ningún elemento del equipo resulte sobrecargado. Una tercera solución es la utilización de equipos multicanal y de radio capaces de aceptar mayores cargas. Con esta disposición se obtiene una libertad completa en la asignación de canales para servicio de datos y se evita casi toda restricción en cuanto a los niveles relativos de voz y de datos. Sin embargo, estos sistemas no son susceptibles de interconexión directa con los sistemas públicos reglamentados por el UIT-T y el UIT-R. En efecto, de acuerdo con la Recomendación V.2, la potencia promedio de la señal de datos a la entrada de los circuitos de multicanal o transmisión no deberá exceder –13 dBm0.

A fin de centrar la discusión, supongamos que el nivel de potencia o capacidad de carga de la señal de datos viene dada por la expresión

$$P_{MD} = P_D + 10 \log_{10}(N) \qquad (8.8)$$

donde P_D es el nivel de potencia individual de los canales de datos y N el número de canales de voz utilizados para datos. En la expresión (8.8) se supone un coeficiente de actividad del 100% y que no hay correlación entre las señales de datos individuales. El valor P_D depende del sistema; en particular, la Dirección de Comunicaciones de la Defensa, de los Estados Unidos, recomienda un valor de – 10 dBm0, aunque en algunos sistemas tanto privados como militares o industriales se puede llegar hasta – 5 dBm0 por canal.

8.7.4. Capacidad de Carga en Transmisión de Voz o Datos

Para la transmisión puramente de voz o de datos, los niveles de potencia vienen dados por las expresiones (8.6), (8.7) y (8.8) que repetiremos a continuación utilizando la siguiente notación:

P_{MV} = Nivel de potencia compuesto de los canales de voz

P_{MD} = Idem para los canales de datos

P_{MM} = Capacidad de carga o nivel de potencia del sistema multicanal

N_{CV} = Número de canales de voz

N_{CD} = Número de canales de datos

N_{CM} = Número de canales del sistema multicanal

Entonces, para transmisión de voz o datos solamente,

$P_{MM} = P_{MV}$ y $N_{CM} = N_{CV}$ para voz solamente

$P_{MM} = P_{MD}$ y $N_{CM} = N_{CD}$ para datos solamente

Las expresiones (8.6), (8.7) y (8.8) se pueden escribir en la forma siguiente:

$$P_{MM} = -1 + 4 \log_{10}(N_{CV}) \text{ dBm0}; \quad N_{CV} < 240 \text{ canales} \tag{8.9}$$

$$P_{MM} = -15 + 10 \log_{10}(N_{CV}) \text{ dBm0}; \quad N_{CV} \geq 240 \text{ canales} \tag{8.10}$$

para transmisión de voz solamente, y

$$P_{MM} = P_D + 10 \log_{10}(N_{CD}) \text{ dBm0} \tag{8.11}$$

para transmisión de datos solamente.

Estas expresiones se grafican en las Figs. 8.14, 8.15, 8.16 y 8.17 para diferentes sistemas multicanal. A efecto de estas curvas, P_D tendrá los siguientes valores:

P_D = -5, -8, -10, -12 y –13 dBm0

Los canales de voz son siempre a –15 dBm0.

En la Fig. 8.15 se muestra la capacidad de carga en un grupo de 12 canales cuando se aplica hasta 12 canales de voz o datos. Puede observarse que el nivel recomendado por el UIT-T de + 3,317 dBm0 se excede si se aplica más de 6 canales de datos de –5 dBm0, pero puede utilizarse todos los canales para transmisión de datos si éstos son operados a –8 dBm0 o menos.

En la Fig. 8.16 se muestra la capacidad de carga en un supergrupo (60 canales). Se observa que un supergrupo estándar UIT-T solamente acepta un máximo de 12 canales de -5 dBm0, ó 25 canales de –8 dBm0, ó 40 canales a –10 dBm0, sin sobrecargarse. Para carga de datos individuales de –12 dBm0 o menos se puede utilizar los 60 canales.

En las Figs. 8.17 y 8.18 se muestra el caso para sistemas multicanal de 240 y 960 canales, respectivamente. Aquí la situación es más crítica, pues la capacidad de carga del multicanal se satura muy rápidamente con la consiguiente pérdida de rendimiento del sistema. En efecto, puede observarse que para cualquier nivel de datos superior a –15 dBm0 la cantidad de canales de datos que puede aceptar el sistema se reduce drásticamente. Por ejemplo, un multicanal de 300 canales con un nivel UIT-T de +9,7712 dBm0 puede aceptar cualquiera de las cargas mostradas en la siguiente Tabla, calculadas a partir de (8.10) y (8.11):

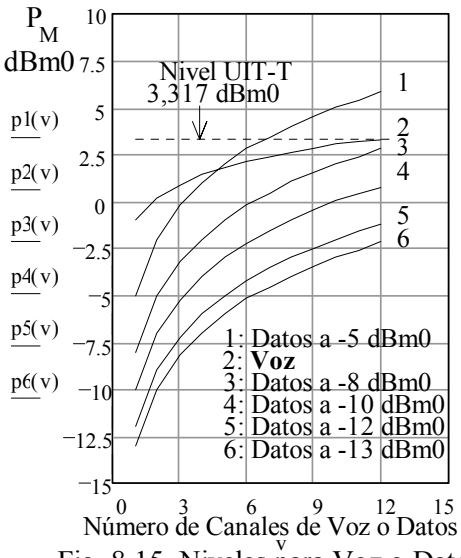
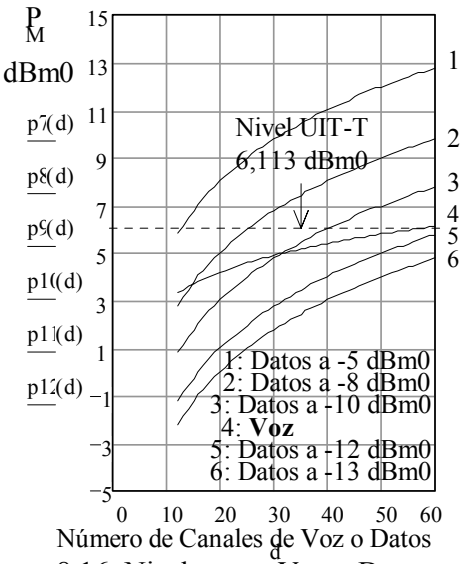


Fig. 8.15. Niveles para Voz o Datos en un Grupo de 12 Canales



8.16. Niveles para Voz o Datos en un Supergrupo de 60 Canales

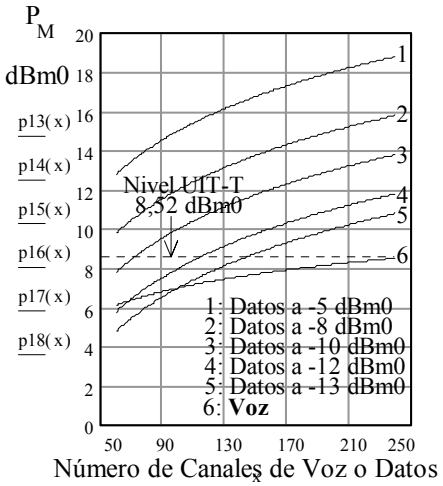


Fig. 8.17. Niveles para Voz o Datos en un Multicanal de 240 canales

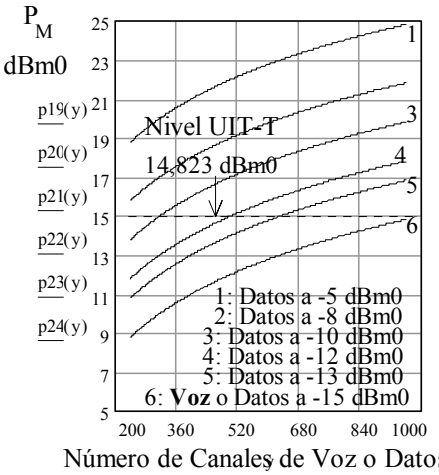


Fig. 8.18. Niveles de Voz o Datos en un Multicanal de 960 canales

Capacidad de Carga de un Multicanal de 300 canales

Potencia dBm0	Voz	Datos					
	-15	-15	-13	-12	-10	-8	-5
Número de Canales	300	300	189	150	94	59	30

Puede observarse cómo se ha reducido la capacidad porcentual con respecto al supergrupo de 60 canales, por ejemplo, de 20% a un 10% para canales de datos de –5 dBm0.

A pesar de que el UIT-T, el UIT-R y otros organismos internacionales recomiendan operar las señales de datos a niveles de –13 dBm0 o menos, hay una cantidad de fabricantes de equipos, sobretodo para uso privado o industrial, que requieren niveles de potencia superiores. Esto es de particular importancia en sistemas de alta confiabilidad, por ejemplo, militares, o sistemas en ambientes industriales hostiles en los cuales son necesarios altos niveles de potencia para disminuir o mantener un BER dado.

8.7.5. Capacidad de Carga en Transmisión Combinada de Voz y Datos

En la sección anterior vimos la situación en el caso de transmisión de voz o de datos solamente y observamos la disminución de la capacidad de los sistemas para la transmisión de datos con niveles de potencia superiores a los recomendados por UIT-T.

En esta sección veremos el caso de la aplicación combinada de voz y datos en un sistema multicanal.

Multicanal de menos de 240 Canales

En este caso los niveles de potencia para voz y datos son, respectivamente,

$$P_{MV} = -1 + 4 \log_{10}(N_{CV}) \quad \text{dBm0} \tag{8.12}$$

$$P_{MD} = P_D + 10 \log_{10}(N_{CD}) \quad \text{dBm0} \tag{8.13}$$

De (8.12) y (8.13), el nivel de potencia combinado de N_{CV} canales de voz y N_{CD} canales de datos de P_D dBm0 será:

$$P_{MM} = 10\log_{10}\left[10^{-0,1}(N_{CV})^{0,4} + 10^{0,1P_D} N_{CD}\right] \quad \text{dBm0} \tag{8.14}$$

para $(N_{CV} + N_{CD}) < N_{CM} < 240$ canales

La expresión (8.14) es una relación entre los términos P_{MM} , N_{CV} y N_{CD}. Conocidos dos de ellos se puede determinar el tercero.

Nótese que la condición $(N_{CV} + N_{CD}) < N_{CM}$ significa que el multicanal no tendrá ocupado todos los canales, es decir, que habrá que eliminar o dejar vacíos N_{CM}-(N_{CV}+N_{CD}) canales. La ocupación completa del multicanal no es posible de alcanzar; no se puede utilizar todos los canales de un multicanal para transmitir combinaciones de voz y datos sin que el sistema se sobrecargue. El lector lo puede demostrar reemplazando en la expresión (8.14) N_{CV} por $(N_{CM} - N_{CD})$; verificará que para $N_{CM} > 12$ canales el sistema se sobrecargará para cualquier valor de N_{CD} con $P_D > -15$ dBm0.

Puede establecerse también una relación entre el número de canales de voz y el número de canales de datos en el equipo multicanal. Sea K_{VD} esta relación, es decir,

$$K_{VD} = \frac{N_{CV}}{N_{CD}} \tag{8.15}$$

Introduciendo K_{VD} en la expresión (8.14), se obtiene la ecuación en N_{CD} siguiente:

$$N_{CD} + \left[10^{-0,1(1+P_D)}\right](K_{VD}N_{CD})^{0,4} - \left[10^{0,1(P_{MM}-P_D)}\right] = 0 \tag{8.16}$$

para $N_{CD} > 0$ y $(N_{CV} + N_{CD}) < N_{CM} < 240$ canales

Notese que, en general, P_{MM} es el nivel UIT-T del multicanal en consideración; por ejemplo, P_{MM} = 6,113 dBm0 en un canal de supergrupo. Asimismo, $N_{CM} > (N_{CV} + N_{CD})$, lo cual implica la necesidad de eliminar o dejar vacíos $[N_{CM} - (N_{CV} + N_{CD})]$ canales para compensar la sobrecarga.

En los sistemas telefónicos los conjuntos básicos son los grupos y los supergrupos, y sería de interés conocer, sin necesidad de cálculos, las combinaciones posibles de canales de voz y datos que ellos pueden soportar sin exceder los límites UIT-T. La expresión (8.14) nos permite determinar la relación entre N_{CD} y N_{CV}; en efecto, despejando N_{CD} y N_{CV} de (8.14),

$$N_{CD} = 10^{0,1(P_{MM}-P_D)} - 10^{-0,1(1+P_D)}(N_{CV})^{0,4} \tag{8.17}$$

$$N_{CV} = \left[10^{0,1(1+P_{MM})} - 10^{0,1(1+P_D)}N_{CD}\right]^{2,5} \tag{8.18}$$

Las expresiones (8.17) y (8.18) se aplican para cualquier multicanal de menos de 240 canales.

Estas expresiones se pueden graficar en la forma N_{CD} vs N_{CV} pero es más práctico expresarlas en forma de tablas. En la Tablas I y II siguientes se muestra la cantidad de canales y datos que en primera aproximación se pueden conectar a un grupo (12 canales) o a un supergrupo (60 canales). Combinaciones que no estén en las tablas, pueden calcularse a partir de (8.17) y (8.18).

Estas Tablas permiten estimar, por simple inspección, combinaciones posibles de canales de voz y de datos que se pueden conectar a un grupo o supergrupo, y son de mucha ayuda en la distribución de los canales de voz y datos en un multicanal.

TABLA I.

N_{CV}	N_{CD} -13	-12	-10	-8	-5
0	12	12	12	12	6
1	11	11	11	8	4
2	10	10	10	6	3
3	9	9	9	5	2
4	8	8	8	4	2
5	7	7	7	4	2
6	6	6	6	3	1
7	5	5	5	2	1
8	4	4	4	2	1
9	3	3	3	1	0
10	2	2	2	0	0
11	1	1	1	0	0
12	0	0	0	0	0

Combinaciones Voz/Datos en un Grupo

TABLA II.

N_{CV}	N_{CD} -13	-12	-10	-8	-5
0	60	60	40	25	12
3	56	45	28	18	9
5	51	40	25	16	8
10	41	33	20	13	6
15	34	27	17	10	5
20	28	23	14	9	4
25	24	19	12	7	3
30	19	15	9	6	3
35	15	12	7	4	2
40	12	9	6	3	1
45	8	7	4	2	1
50	5	4	2	1	0
55	2	2	1	0	0
60	0	0	0	0	0

Combinaciones Voz/Datos en un Supergrupo

Distribución de los Canales

La distribución de los canales de voz y datos se puede efectuar en forma uniforme o en forma concentrada. En el primer caso los canales de voz y datos se distribuyen uniformente a nivel de grupo cuidando de no exceder los niveles UIT-T. Por ejemplo, si en un supergrupo hay que distribuir 15 canales de voz y 10 canales de datos de –8 dBm0, cada grupo acomodará 3 canales de voz y dos canales de datos, lo que de acuerdo con la Tabla I no excede el nivel UIT-T del grupo; el supergrupo tampoco estará saturado, como se puede ver en la Tabla II. Los canales vacíos se pueden considerar como “bandas de guarda” entre canales ocupados y entre grupos.

En la forma concentrada de distribución, los canales de datos y de voz llenan completa y separadamente los grupos de acuerdo con los niveles UIT-T. Por ejemplo, los 15 canales de voz y los 10 canales de datos a –8 dBm0 del ejemplo anterior, se pueden acomodar en tres grupos: 12 canales de voz en un grupo, 3 canales de voz y 4 canales de datos en otro grupo, y los otros seis canales de datos en un tercer grupo. Ni en los grupos ni en el supergrupo se ha excedido los niveles UIT-T, como se puede observar en las Tablas I y II. Con esta forma de distribución se utiliza mejor el equipo, aunque en caso de falla de un grupo, más canales resultan afectados.

La selección de una u otra forma de distribución (o de cualquiera otra) dependerá de los criterios establecidos por las Administraciones locales.

Cuando se asigna canales telefónicos para transmisión de datos se recomienda, en general, retirar las bobinas de pupinización, los supresores de eco y los compansores. En el caso de los pares pupinizados, esto se hace con el objeto de respetar los límites de retardo de grupo especificados por el UIT-T los cuales son afectados por la pupinización. En cuanto a los supresores de eco, es conveniente retirarlos pues la transmisión de datos en fulldúplex no funcionaría con eficiencia debido a la fuerte atenuación en sentido inverso

por ellos producida. Los compansores son dispositivos que permiten mejorar la relación S/N, pero debido a que el compansor es un elemento no lineal, él introduce distorsión no lineal que afecta severamente las señales de datos; por ello es conveniente retirarlos también.

Las Administraciones locales establecen también otras restricciones en la asignación de canales. Por ejemplo, se recomienda utilizar entre el 20% al 25% de la capacidad total del multicanal para canales de datos, dejar vacíos los canales 1 y 12 de los grupos para respetar los retardos de grupo normalizados y porque en el canal 12 se encuentra la portadora piloto internacional de 104,8 kHz, y no utilizar el canal 6 pues allí se encuentra la portadora piloto nacional de 84,08 kHz. En general, cada Administración establecerá los criterios de asignación de canales de acuerdo con las normas del UIT-T y sus propias normas locales.

De acuerdo con los criterios anteriores, la ocupación máxima de los grupos es de 9 canales combinados de voz y datos.

♣ Ejemplo 8.1

En un multicanal se dispone de dos supergrupos: uno vacío y otro con dos grupos (24 canales) ocupados con canales de voz. Se desea conectar 15 canales de datos de -8 dBm0 y canales de voz. Vamos a determinar la distribución y el número máximo de canales de voz adicionales sin exceder los niveles UIT-T.

Solución:

Veamos primero el segundo supergrupo parcialmente ocupado y el cual se completará con canales de datos. La potencia disponible en el supergrupo es, de (8.9),

$P_{MM} = -1 + 4 \log_{10}(60) = 6{,}1126$ dBm0

El número de canales de datos de –8 dBm0 que puede aceptar el supergrupo, además de los 24 canales de voz existentes es, de (8.17),

$N_{CD} = 10^{0{,}1(6{,}1126+8)} - 10^{0{,}1(1-8)}(24)^{0{,}4} =$ 7 canales de datos

En el segundo supergrupo irán entonces 24 canales de voz y 7 canales de datos de -8dBm0, quedando vacíos 29 canales.

En el primer supergrupo habrá que conectar 8 canales de datos de –8 dBm0. El número de canales de voz adicionales que se puede conectar es, de (8.18),

$$N_{CV} = \left[10^{0{,}1(1+6{,}116)} - 10^{0{,}1(1-8)}(8)\right]^{2{,}5} = 23 \quad \text{canales de voz}$$

En el segundo supergrupo irán 23 canales adicionales de voz y 8 de datos, quedando vacíos 29 canales.

En resumen, en los dos supergrupos habrá 47 canales de voz y 15 canales de datos de –8 dBm0 quedando vacíos 58 canales.

La distribución de los canales puede ser la siguiente:

En el primer supergrupo se llenan dos grupos con los 23 canales de voz nuevos y dos grupos con 4 canales de datos cada uno; el quinto grupo no se utiliza. En el segundo supergrupo se llenan dos grupos con los 24 canales existentes, y los otros 7 canales de datos se colocan en dos grupos: uno con tres canales y otro con 4; el quinto grupo no se utiliza.

El lector puede ensayar alguna otra disposición siempre que no exceda los niveles UIT-T y se actúe de acuerdo con las disposiciones o normas de la Administración local respectiva. ♣

♣ Ejemplo 8.2

Se tiene un multicanal de 120 canales (2 supergrupos) y se quiere utilizar los canales para voz y datos de –10 dBm0 en una relación de 4 a 1. Vamos a determinar el número de canales de voz y de datos que se pueden conectar sin exceder los niveles UIT-T.

Solución

De (8.9), el nivel de potencia UIT-T de 120 canales es

$P_{MM} = -1 + 4 \log_{10}(120) = 7{,}3167$ dBm0

En este caso se puede aplicar las ecuaciones (8.15) y (8.16), donde

$K_{VD} = 4/1 = 4$; $P_{MM} = 7{,}3167$ dBm0; $P_D = -10$ dBm0 y

$N_{CD} + 13{,}83(N_{CD})^{0,4} - 54 = 0$

Resolviendo esta ecuación se obtiene:

$N_{CD} = 14$ canales de datos y $N_{CV} = 4 \times 14 = 56$ canales de voz

En los dos supergrupos se puede conectar 14 canales de datos de –10 dBm0 y 56 canales de voz, dejando vacíos 50 canales.

La distribución de los canales pudiera ser la siguiente:

Completar un supergrupo con los 56 canales de voz, es decir, cuatro grupos con 12 canales de voz cada uno, y el quinto con los 8 canales de voz restantes. Esto completa los 56 canales de voz calculados. Aquí quedan 4 canales vacíos.

En el segundo supergrupo los canales de datos se pueden distribuir en tres grupos con 5, 5 y 4 canales de datos, respectivamente, quedando vacíos 46 canales.

En ningún conjunto se exceden los niveles UIT-T. ♣

Multicanal de 240 o más Canales

En este caso se tiene que

$$P_{MV} = -15 + 10 \log_{10}(N_{CV}) \quad \text{dBm0} \tag{8.19}$$

$$P_{MD} = P_D + 10 \log_{10}(N_{CD}) \quad \text{dBm0} \tag{8.20}$$

El nivel de potencia combinado es

$$P_{MM} = 10 \log_{10}\left[10^{-1,5} N_{CV} + 10^{0.1 P_D} N_{CD}\right] \quad \text{dBm0} \tag{8.21}$$

para 240 canales $\leq (N_{CV} + N_{CD}) < N_{CM}$

Nótese que en este caso la ocupación completa del multicanal tampoco es posible.

Cuando se conoce la relación $K_{VD} = N_{CV}/N_{CD}$ en un sistema multicanal cuyo nivel de potencia UIT-T es P_{MM}, el número de canales de datos vendrá dado por la expresión

$$N_{CD} = \frac{10^{0,1P_{MM}}}{10^{-1,5} K_{VD} + 10^{0,1P_D}} \qquad (8.22)$$

para $N_{CD} > 0$ y 240 canales $< (N_{CV} + N_{CD}) <$ NCM ; $N_{CV} = K_{VD} N_{CD}$

Las combinaciones posibles de voz y datos en los conjuntos de banda de base de más de 240 canales, es decir, el grupo master y el supergrupo master, se pueden determinar en la misma forma como se hizo para los grupos y supergrupos, expresiones (8.17) y (8.18). En efecto, de (8.21) las relaciones entre N_{CD} y N_{CV} son

$$N_{CD} = 10^{0,1(P_{MM} - P_D)} - 10^{-0,1(15+P_D)} N_{CV} \qquad (8.23)$$

$$N_{CV} = 10^{0,1(15+P_{MM})} - 10^{0,1(15+P_D)} N_{CD} \qquad (8.24)$$

En las tablas siguientes se muestra las combinaciones de canales de voz y datos que se pueden conectar a multicanales de 300 y 600 canales. Combinaciones que no estén en las Tablas pueden calcularse a partir de (8.23) y (8.24).

TABLA III

	N_{CD}				
N_{CV}	-13	-12	-10	-8	-5
0	189	150	94	59	30
25	173	137	86	54	27
50	150	125	79	49	25
75	141	112	71	44	22
100	126	100	63	39	20
125	110	87	55	34	17
150	94	75	47	29	15
175	78	62	39	24	12
200	63	50	31	19	10
225	47	37	23	14	7
250	31	25	15	9	5
275	15	12	7	4	2
300	0	0	0	0	0

Combinaciones Voz/Datos en un Grupo Master (300 canales)

TABLA IV

	N_{CD}				
N_{CV}	-13	-12	-10	-8	-5
0	378	300	189	119	59
50	347	275	173	109	54
100	315	250	158	99	49
150	283	225	142	89	44
200	252	200	126	79	39
250	220	175	110	69	34
300	189	150	94	59	29
350	157	125	79	49	24
400	126	100	63	39	19
450	94	75	47	29	14
500	63	50	31	19	9
550	31	25	15	9	4
600	0	0	0	0	0

Combinaciones Voz/Datos en un Multicanal de 600 canales

Siguiendo el mismo procedimiento, a manera de ejercicio el lector puede construirse una tabla para un supergrupo Master (900 canales).

La aplicación de estas Tablas es similar a la de las Tablas I y II.

♣ Ejemplo 8.3

En un multicanal se dispone de dos grupos master: uno vacío y el otro con tres supergrupos ocupados con canales de voz; son 180 canales. Hay que conectar obligatoriamente 80 canales de datos de –12 dBm0 y se desea saber si se puede conectar 300 canales de voz adicionales sin exceder los niveles UIT-T. En caso de que no se pueda, determinar el número de canales de voz que se pueden conectar.

Solución:

En primer lugar, el segundo grupo master se puede completar con canales de voz, en este caso 120 canales. Queda por conectar 180 canales de voz en el primer grupo master (a fin de completar los 300 canales deseados).

La potencia de la combinación de 180 canales de voz y 80 canales de datos de –12 dBm0 es, de (8.21),

$$P'_{MM} = 10\log_{10}\left[10^{-1,5}\,x180 + 10^{0,1(-12)}80\right] = 10,3083 \quad \text{dBm0}$$

pero la potencia disponible en un grupo master es, de (8.19),

P_{MM} = -15 + 10 $\log_{10}$(300) = 9,7712 dBm0

Como $P'_{MM} > P_{MM}$, no se puede conectar los 300 canales deseados, pues el primer grupo master no podría soportar una combinación de 180 canales de voz y 80 canales de datos de –12 dBm0.

La combinación de canales de voz y 80 canales de datos de –12 dBm0 que se puede conectar a un grupo master se puede calcular entonces a partir de la expresión (8.24):

$N_{CV} = 10^{0,1(15 + 9,7712)} - 10^{0,1(15 - 12)}\,80 =$ 140 canales de voz

En el primer grupo master se puede conectar entonces 140 canales de voz y 80 canales de datos de –12 dBm0 quedando libres 80 canales.

Una distribución de los canales pudiera ser la siguiente:

Completar el segundo grupo master con 120 canales de voz; son dos supergrupos completos. Los 140 canales de voz restantes y los 80 canales de datos se conectan al primer grupo master en la forma siguiente:

En el nivel de supergrupo: 28 canales de voz y 16 canales de datos por supergrupo (son 5 supergrupos).

En el nivel de grupo: 3 grupos con 6 canales de voz y 3 de datos

1 grupo con 5 canales de voz y 3 de datos

1 grupo con 5 canales de voz y 4 de datos

En ningún nivel se sobrepasan las tolerancias UIT-T. Nótese que en los grupos se utiliza cuando máximo 9 canales por grupo a fin de dejar libres los canales 1, 6 y 12.

♣

♣ Ejemplo 8.4

Se quiere proyectar un sistema multicanal nuevo que pueda manejar un máximo de 60 canales de datos de –8 dBm0 y un máximo de 250 canales de voz. Determinar las características del sistema.

Solución:

En primer lugar, hay que determinar la potencia combinada requerida; son 250 canales de voz y 6 canales de datos de –8 dBm0. De (8.21),

$P_{MM} = 10 \log_{10}[10^{-1,5} \times 250 + 10^{-0,8} \times 60] = 12,409$ dBm0

Hay que determinar ahora un sistema equivalente de N'_{CM} canales UIT-T cuya potencia sea de 12,409 dBm0; de (8.9),

$12,409 = -15 + 10 \log_{10}(N'_{CM})$ de donde,

$N'_{CM} = 550$ canales

El sistema debe diseñarse para manejar el equivalente de por lo menos 550 canales UIT-T, es decir, el equipo de banda de base multicanal y de radio puede estimarse en 600 canales formado por dos grupos master, con lo cual se puede conectar 298 canales de voz y 60 canales de datos de –8 dBm0.

La distribución puede ser la siguiente:

Sobre el grupo master A: 4 supergrupos con 60 canales de voz cada uno, y un supergrupo con 30 canales de voz y 6 canales de datos.

Sobre el grupo master B: 1 supergrupo con 28 canales de voz y 6 de datos, y 3 supergrupos con 16 canales de datos cada uno.

La distribución en el nivel de grupo es directa y en ninguno se excederá la tolerancia UIT-T.

En este caso quedarán vacíos 242 canales de los 600 disponibles. ♣

Como podemos observar en los ejemplos anteriores, el acatamiendo de las normas del UIT-T tiene como consecuencia la eliminación de un gran porcentaje de canales a fin de compensar la sobrecarga. Cuando no es necesario seguir las normas del UIT-T como es el caso de sistemas privados o militares, se puede utilizar equipos diseñados para manejar cargas superiores que permiten combinaciones de voz y datos hasta –5 dBm0. Para el Ejemplo 8.4 puede utilizarse cualquier equipo comercial que pueda manejar combinaciones de datos a –8 dBm0 y voz, tanto en el nivel de grupo como de supergrupo. Los fabricantes de los equipos siempre proporcionan las combinaciones posibles. En definitiva, el diseñador del sistema establecerá las combinaciones más apropiadas.

8.7.6. Transmisión Combinada de Voz y Datos de diferentes Potencias

Las expresiones anteriores se han establecido para una cantidad de N_{CD} canales de datos de potencia fija P_D dBm0. Sin embargo, es posible que sea necesario conectar canales de datos con diferentes valores de potencia. En este caso, hay que modificar las expresiones anteriores, como veremos a continuación.

Supongamos que en un multicanal dado se quiere conectar N_{CD1} canales de datos de potencia P_{D1}, N_{CD2} canales de potencia P_{D2} y así sucesivamente. Las expresiones (8.13) o (8.20) se pueden reemplazar por la expresión

$$P_{MD} = 10\log_{10}\left[\sum_{k=1}^{K} 10^{0,1P_{Dk}} N_{CDk}\right] \qquad (8.25)$$

Entonces, si $N_{CD} = N_{CD1} + N_{CD2} + \ldots\ldots + N_{CDK}$, el nivel de potencia combinado de N_{CV} canales de voz y los N_{CD} canales de datos vendrá dado por

$$P_{MM} = 10\log_{10}\left[10^{-0,1}(N_{CV})^{0,4} + \sum_{k=1}^{K} 10^{0,1P_{Dk}} N_{CDk}\right] \qquad (8.26)$$

para $(N_{CV} + N_{CD1} + N_{CD2} + \ldots.. + N_{CDK}) < N_{CM} < 240$ canales

La expresión (8.26) reemplaza a la expresión (8.14).

El número de canales de voz correspondientes será

$$N_{CV} = \left[10^{0,1(1+P_{MM})} - \sum_{k=1}^{K} 10^{0,1(1+P_{Dk})} N_{CDk}\right]^{2,5} \text{ canales} \qquad (8.27)$$

Asimismo, para multicanales de más de 240 canales,

$$P_{MM} = 10\log_{10}\left[10^{-1,5} N_{CV} + \sum_{k=1}^{K} 10^{0,1P_{Dk}} N_{CDk}\right] \text{ dBm0} \qquad (8.28)$$

para 240 canales $\leq (N_{CV} + N_{CD1} + N_{CD2} + \ldots. + N_{CDK}) < N_{CM}$

La expresión (8.28) reemplaza a la expresión (8.21).

El correspondiente número de canales de voz será

$$N_{CV} = 10^{0,1(15+P_{MM})} - \sum_{k=1}^{K} 10^{0,1(15+P_{Dk})} N_{CDk} \text{ canales} \qquad (8.29)$$

♣

♣ Ejemplo 8.5

En una central telefónica se tiene un grupo master libre. Se desea conectar a él 2 canales de datos de –5 dBm0; 5 canales de –8 dBm0; 8 canales de –12 dBm0; 15 canales de –15 dBm0 y canales de voz. Vamos a determinar cuantos canales de voz se pueden conectar sin exceder la tolerancia UIT-T.

Solución:

La potencia del grupo master de 300 canales es, de (8.19),

$P_{MM} = -15 + 10 \log_{10}(300) = 9{,}771$ dBm0

Esta será la potencia del multicanal combinado. Entonces de (8.29),

$N_{CV} = 300 - [10 \times 2 + 10^{0,7} \times 5 + 10^{0,3} \times 8 + 15] = 224$ canales

En el grupo master en cuestión se puede conectar, además de los 30 canales de datos, 224 canales de voz dejando vacíos 46 canales.

Tomando en cuenta que en los grupos donde haya combinaciones de voz y datos la ocupación máxima es de 9 canales por grupo, una distribución de canales puede ser la siguiente (son 5 supergrupos: SG1, SG2, SG3, SG4 y SG5):

Supergrupos SG1, SG2 y SG3: completarlos con canales de voz (son 180)

Supergrupo SG4: 3 grupos con canales de voz (son 36 canales)
1 grupo con 3 canales de voz y 6 canales de datos de –15 dBm0
1 grupo con 9 canales de datos de –15 dBm0

Supergrupo SG5: 1 grupo con 5 canales de voz
1 grupo con 8 canales de datos de –12 dBm0
1 grupo con 5 canales de datos de –8 dBm0
1 grupo con dos canales de datos de –5 dBm0
1 grupo libre

En ningún grupo ni supergrupo se excede la tolerancia UIT-T. ♣

Los gráficos, fórmulas y tablas que hemos presentado se pueden utilizar para estimar a priori los efectos de una determinada carga en un sistema multicanal y para establecer las especificaciones del mismo. Sin embargo, el diseñador del sistema debe investigar las implicaciones que pueda tener un aumento de carga futuro e incorporarlo en las especificaciones, sobretodo si ese aumento de carga es debido a un incremento en canales de datos con niveles superiores a los –13 dBm0. Asimismo, debe respetar los criterios de asignación de canales establecidos por las Administraciones locales.

8.8. NIVELES DE POTENCIA EN DECIBELES

8.8.1. Unidades de Potencia

La potencia de señales de muy bajo nivel, por ejemplo el ruido, se expresa generalmente en términos de pW (10^{-12}W) y si la señal está ponderada sofométricamente, las unidades se expresan en pWp (la “p” indica ponderación sofométrica, UIT-T Rec. P.53).

Para expresar esos niveles tan bajos es muy útil definirlas mejor en forma logarítmica lo que permite hacer cálculos de potencias con relativa facilidad, como se pudo observar en la sección anterior.

8.8.2. Niveles de Potencia Relativos y Absolutos

El **dB**

Cuando la potencia absoluta P_x a definir está referida a un valor definido de potencia P_1, se utiliza la denominación "nivel de potencia relativo en dB". Entonces,

$$[P_x]_{dB} = 10\log_{10}(\frac{P_x}{P_1}) \text{ dB} \rightarrow \text{Nivel de Potencia Relativa en dB} \qquad (8.30)$$

El **dBW**

Cuando la potencia absoluta P_x es mayor que 1W se toma una potencia de referencia de 1W; en este caso se le agrega la letra W, es decir,

$$[P_x]_{dBW} = 10\log_{10}(\frac{P_x}{1}) \text{ dBW} \rightarrow \text{Potencia Absoluta referida a 1 W} \qquad (8.31)$$

El **dBm**

Para potencias absolutas P_x pequeñas la potencia de referencia es un milivatio (10^{-3} W); en este caso se agrega el subíndice m, es decir,

$$[P_x]_{dBm} = 10\log_{10}(\frac{P_x}{10^{-3}}) \text{ dBm} \rightarrow \text{Potencia Absoluta referida a 1 mW} \qquad (8.32)$$

En la práctica es corriente denominar los "dBm" como "potencia absoluta" de una señal.

Por ejemplo, si la potencia absoluta de una señal telefónica es de 32 μW, entonces su potencia absoluta en dB referida a 1 mW es

$$[P_x]_{dBm} = 10\log_{10}(\frac{32x10^{-6}}{10^{-3}}) = -14{,}949 \text{ dBm} \approx -15 \text{ dBm}$$

El **dBμ**

Cuando las potencias absolutas P_x son muy pequeñas, la potencia de referencia es un microvatio (10^{-6}W). En este caso,

$$[P_x]_{dB\mu} = 10\log_{10}(\frac{P_x}{10^{-6}}) \quad \text{dB}\mu \rightarrow \text{Potencia Absoluta referida a 1 } \mu\text{W} \qquad (8.33)$$

La siguiente expresión es muy útil para relacionar estos niveles

$$\text{dBW} = \text{dBm} + 30 = \text{dB}\mu + 60 \qquad (8.34)$$

En los ejemplos siguientes el lector puede apreciar las diferencias entre dB, dBW y dBm.

♣ **Ejemplo 8.6**

La relación de pérdidas de transmisión entre una antena transmisora y una receptora viene dada por la expresión $L = \left[\frac{4\pi d}{\lambda}\right]^2$, donde λ, en metros, es la longitud de onda a la frecuencia de operación, en Hz, y d, en metros, la separación entre las antenas transmisora y receptora. Estas pérdidas generalmente se expresan en dB en la forma $P_{erd(dB)} = 10\log_{10}(P_{erd})$ dB. Manipulando estas expresiones, vamos a demostrar que

(a) $L_{dB} = 32{,}44 + 20\log_{10}(f_{MHz}) + 20\log_{10}(d_{km})$ dB

donde f_{MHz} es la frecuencia de operación en MHz, y d_{km} es la separación entre las antenas, en kilómetros.

(b) $L_{dB} = 92{,}4 + 20\log_{10}(d_{km}) + 20\log_{10}(F_{GHz})$ dB

donde f_{GHz} es la frecuencia de operación en GHz, y d_{km} es la separación entre las antenas, en km.

Solución

(a) $L = \left[\frac{4\pi d}{\lambda}\right]^2$; $L_{dB} = 10\log_{10}\left[\frac{4\pi d}{\lambda}\right]^2 = 20\log_{10}\left[\frac{4\pi d}{\lambda}\right]$

$$L_{dB} = 20\log_{10}(4\pi) + 20\log_{10}(d) - 20\log_{10}(\lambda)$$

pero $d = 10^3 d_{km}$; $\lambda = \frac{3x10^8}{10^6 f_{MHz}}$

$\log_{10}(d) = 3 + \log_{10}(d_{km})$; $\log_{10}(\lambda) = \log_{10}(3x10^8) - \log_{10}(10^6) - \log_{10}(f_{MHz})$

Reemplazando valores numéricos, obtenemos finalmente

$$L_{dB} = 32{,}44 + 20\log_{10}(d_{km}) + 20\log_{10}(f_{MHz}) \quad \text{dB} \qquad (8.35a)$$

(b) En este caso, $\lambda = \frac{3x10^8}{10^9 f_{GHz}}$

$$\log_{10}(\lambda) = \log_{10}(3x10^8) - \log_{10}(10^9) - \log_{10}(f_{GHz})$$

Procediendo como en el ejemplo anterior y reemplazando valores numéricos, obtenemos

$$L_{dB} = 92{,}44 + 20\log_{10}(d_{km}) + 20\log_{10}(f_{GHz}) \quad \text{dB} \qquad (8.35b)$$

♣

♣ Ejemplo 8.7

La potencia disponible en una fuente de ruido viene dada por la expresión $P_N = kTB$ W, donde k es la constante de Boltzmann ($1{,}3805 \times 10^{-23}$ J/K), y T, en kelvins, la temperatura absoluta de la fuente. B es el ancho de banda de operación.

(a) Demuestre que $P_{N(dBW)} = -228{,}6 + 10\log_{10}(T) + 10\log_{10}(B)$ dBW

(b) Demuestre que a la temperatura ambiente ($T = T_o = 290$ kelvins) sobre un ancho de banda de 1 Hz la potencia disponible es $N_{(dBW)} = -204$ dBW

Solución

(a) $P_N = kTB$ W; $P_{N(dBW)} = 10\log_{10}(kTB)$ dBW

$$P_{N(dBW)} = 10\log_{10}(k) + 10\log_{10}(T) + 10\log_{10}(B) \text{ dBW}$$

$$P_{N(dBW)} = -228{,}6 + 10\log_{10}(T) + 10\log_{10}(B) \text{ dBW} \qquad (8.36a)$$

y en dBm, $P_{N(dBm)} = P_{N(dBW)} + 30 = -198{,}6 + 10\log_{10}(T) + 10\log_{10}(B)$ dBm (8.36b)

(b) T = 290 kelvins; B = 1

$$P_{N(dBW)} = -228{,}6 + 10\log(290) + 0 = -204 \text{ dBW}$$

♣

♣ Ejemplo 8.8

Al nivel de ruido térmico también se le conoce con el nombre de "Umbral de Ruido Térmico". Este umbral viene dado por la expresión $N_i = kTBF$ W donde F es la cifra de ruido del receptor (dada por el fabricante del receptor; es un dato de diseño). El ancho de banda B generalmente es el ancho de banda de frecuencia intermedia B_{IF}.

Demuestre que la potencia del umbral de ruido térmico, en dBW, es

$$N_{i(dBW)} = -228{,}6 + 10\log_{10}(T) + 10\log_{10}(B) + N_F \text{ dBW}$$

donde N_F es el equivalente, en dB, de la cifra de ruido F.

El lector puede demostrar también que el umbral de ruido térmico a la temperatura ambiente de un receptor con una cifra de ruido de 12 dB y un ancho de banda de frecuencia intermedia de 4,2 MHz es

$$N_{i(dBW)} = -125{,}74 \text{ dBW} \quad \text{ó} \quad N_{i(dBm)} = -95{,}74 \text{ dBm}$$

Solución

$N_i = kTBF$ W; $N_{i(dBW)} = 10\log_{10}(k) + 10\log_{10}(T) + 10\log_{10}(B) + 10\log_{10}(F)$ dBW

Haciendo $N_F = 10\log_{10}(F)$ dB

$$N_{i(dBW)} = -228{,}6 + 10\log_{10}(T) + 10\log_{10}(B) + N_F \quad \text{dBW} \qquad (8.37a)$$

y en dBm, $$N_{i(dBm)} = -198{,}6 + 10\log_{10}(T) + 10\log_{10}(B) + N_F \quad \text{dBm} \qquad (8.37b)$$

♣

8.8.3. Concepto de Punto de Referencia Cero y Nivel Relativo

En cualquier sistema en el que se produce pérdidas y se genera ganancias es muy conveniente definir un punto denominado "punto de nivel de referencia cero, PNR0", y expresar todas las ganancias y pérdidas en cualquier punto del sistema referidas a ese punto. Las ganancias o pérdidas del sistema se expresan normalmente en dB y la unidad de nivel relativo se denomina el dBr; en el PNR0 se tiene el "nivel relativo 0" ó 0 dBr. Por ejemplo, si en un punto del sistema una señal es 10 dB mayor que en el PNR0, se dice entonces que el nivel relativo en ese punto es de 10 dBr.

Nótese que las potencias relativas pueden tener signos negativos.

Si se conocen los niveles relativos de potencia en los diferentes puntos de un sistema y si se conoce también la potencia absoluta de una señal en el PNR0, entonces se puede determinar la potencia de la señal en cualquiera de los puntos del sistema. Por ejemplo, si la potencia de la señal en el PNR0 es de 5 dBm, entonces la potencia de la señal en un punto de nivel relativo de 10 dBr será de 15 dBm. El concepto de nivel relativo es muy útil también cuando se quiere expresar potencias referidas al PNR0; por ejemplo, si se observa que la potencia de una señal de 10 dBm en un punto cuyo valor relativo es de –8 dBr, entonces ese valor corresponde a una potencia de 18 dBm referida al PNR0, es decir, 18 dBm0; cuando las potencias se refieren al PNR0 las unidades se expresan en dBm0. Las potencias o las unidades dBm, dBm0 y dBr están relacionadas mediante la siguientes expresiones:

$$P_{dBm} = P_{dBm0} + P_{dBr} \quad \text{ó} \quad \text{dBm} = \text{dBm0} + \text{dBr} \qquad (8.35)$$

En resumen:

El **<u>dBr</u>**

Es la cantidad de dB relativos en un punto dado referidos al PNR0 donde el nivel dBr es cero. El PNR0 generalmente no es accesible a la medida.

El **<u>dBm0</u>**

Es el nivel absoluto de potencia en un punto referido al PNR0. Se expresa en dBm0.

Por ejemplo, en la Fig. 8.19 se tiene un sistema con dispositivos de ganancia (amplificadores) y de pérdidas (atenuadores). Se muestra los niveles relativos de potencia en los puntos A, B y C; asimismo, cuando en el punto PNR0 se aplica una potencia de 5 dBm, en los puntos A, B y C se tendrá los valores mostrados. Otro ejemplo: si en el punto C está presente una potencia de 10 dBm (cuya potencia absoluta es de 10 mW), esa potencia corresponderá a una potencia de 8 dBm referida al PNR0, es decir, 8 dBm0.

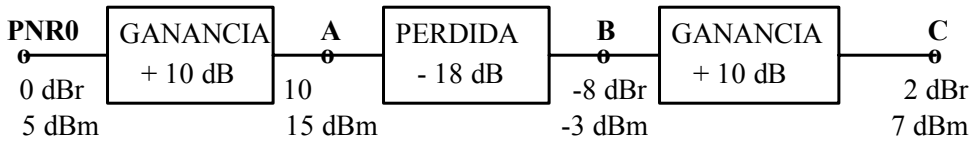


Fig.8.19. Niveles Relativos de Potencia

Nótese que si P_{dBm} es la potencia observada (o medida) en un punto cuyo nivel relativo es P_{dBr}, entonces P_{dBm0} será la potencia en ese punto referida al PNR0. En general, en cualquier punto del sistema se verifica siempre la expresión (8.35).

8.8.4. Medición del Ruido

La medición del ruido generalmente es muy difícil de efectuar por cuanto su forma de onda es muy compleja; sin embargo, la cantidad de interés no es tanto la potencia absoluta del ruido sino la medida de sus efectos interferentes tanto en recepción telefónica normal como en la recepción de datos. Como el efecto interferente de una señal de ruido depende de la frecuencia, hay que utilizar algún tipo de ponderación (weighting) para ecualizar o compensar sus efectos. Estas ponderaciones se han determinado experimentalmente y para el caso de la telefonía el UIT-T, en su Recomendación P.53, ha establecido un dispositivo de medida, denominado "sofómetro", que posee una característica de transferencia muy particular. Para el caso de la transmisión de datos, en la Sección 8.4 se dan algunos detalles pertinentes.

El ruido sofométrico se mide relativo al PNR0 utilizando una frecuencia de referencia de 800 Hz, y todas las unidades tienen la forma pW0p, dBmp, dBm0p, etc. Se tiene también el dBq, que es una unidad de medición para sistemas de sonido (audio) establecida por el UIT-R en su Recomendación 468-1. En los Estados Unidos se utiliza otras unidades para la medición del ruido; en efecto, en vez de referir la potencia de ruido a 1 mW, ellos lo refieren a 1 pW (10^{-12}W) de una señal de referencia de 1000 Hz, a fin de que todas las mediciones den valores positivos: la referencia es –90 dBm en vez de 0 dBm. Esta unidad se denomina dBrn (la "n" es por "noise", "ruido" en inglés). Con una ponderación denominada C-MESSAGE (que es similar a la del UIT-T), la unidad se denomina dBrnc y es de uso muy frecuente en los Estados Unidos. Otra unidad es el dBa la cual tiene una ponderación diferente denominada F1-A-LINE.

En resumen, los niveles de potencia en mediciones de ruido son entonces,

El **<u>dBmp</u>**

Es el nivel de potencia de ruido en un circuito telefónico, de acuerdo con la curva sofométrica del UIT-T, Recomendación P.53. Nótese que la ponderación sofométrica rebaja en 2,5 dB el nivel dBm del canal telefónico; es decir, dBmp = dBm – 2,5.

El **dBm0p**

Es el nivel de potencia sofométrica absoluto en un punto referido a PNR0.

El **dBq**

Son los niveles de potencia en canales de sonido, medidos sea con ponderación sofométrica o sin ella, de acuerdo con la Recomendación UIT-R 468-1 (1976).

El **dBrnc**

Denominación utilizada por la Bell, Estados Unidos, para mediciones con ponderación C-MESSAGE en vez de la ponderación sofométrica del UIT-T. La expresión de conversión entre dBnrc y dBmp es

$$dBnrc = dBmp + 90$$

El **dBrnc0**

Es el nivel dBrnc referido al PNR0.

El **dBa**

Se utiliza en los Estados Unidos con una ponderación denominada F1 A-LINE. La expresión de conversión entre dBa y dBmp es

$$dBa = dBmp + 85$$

La conversión entre dBa y dBrnc viene dada por la expresión

$$dBa = dBrnc - 5$$

Nótese que la diferencia entre las unidades dBa y dBrnc es de 5 dB, es decir, el dBrnc es superior al dBa en 5 dB.

8.9. RESUMEN

La calidad técnica de las redes de comunicación es una característica relativa. Hay numerosos circuitos que poseen un óptimo rendimiento para el servicio telefónico, pero que no tienen una calidad satisfactoria para la transmisión de señales digitales binarias. La infraestructura telefónica es y seguirá siendo el medio más empleado para la transmisión de señales digitales a velocidades de transmisión menores de 64 kbps y por ello el UIT-T ha emitido una serie de normas para mejorar y mantener la calidad de los circuitos telefónicos de uso actual.

Las características de transmisión de los canales telefónicos, junto con las técnicas de modulación empleadas en los módems, determinan las velocidades máximas de transmisión, las cuales son cada vez más altas. En el último módem recomendado por el UIT-T, el V.90, la velocidad de transmisión es de 56 kbps, velocidad que cada vez se acerca más a los límites establecidos por Shannon. Pero estas altas velocidades se logran no solamente mediante técnicas sofisticadas de modulación, control de error y compresión de datos, sino también mejorando la calidad de los canales.

En este capítulo se describen los problemas o factores que se presentan en la transmisión de datos y que son decisivos y limitativos en relación con la máxima velocidad

de transmisión permitida. Estos factores limitativos son, entre otros: Distorsión de Fase o de Retardo, Distorsión de Amplitud o Atenuación, Ruido Impulsivo, Ruido Errático de Espectro Uniforme, Ecos y Fluctuación de Fase. Se describe también un grupo de parámetros capaces de permitir una evaluación del comportamiento de los canales telefónicos para el servicio de transmisión de datos, tales como: Distorsión Telegráfica, Porcentaje de Dígitos y Bloques en Error y Fallas de Línea. En particular, se citan muchas de las recomendaciones del UIT-T pertinentes.

Un aspecto de gran importancia en la transmisión de datos por canales telefónicos, es el cálculo de la potencia en un multicanal cuando se transmite combinaciones de señales de voz y de datos. En este capítulo se presenta una serie de fórmulas y criterios con ejemplos de aplicación para la asignación de canales de voz y datos en un multicanal telefónico.

8.10. CUESTIONARIO

1. Describa brevemente lo que es la Distorsión de Fase y la Distorsión de Amplitud, cómo se compensan y cuáles son las recomendaciones del UIT-T aplicables.
2. Explique lo que es la interferencia intersímbolo y los problemas que ella produce en la transmisión de datos binarios.
3. Explique lo es el "diagrama de ojo" y sus aplicaciones.
4. Describa brevemente los otros factores limitativos señalados en el texto y diga en qué recomendaciones del UIT-T se dan los procedimientos de medición.
5. Diga cuáles son los parámetros bajo medición en el caso de: (a) Mediciones de Carácter Telegráfico. (b) Mediciones de Carácter Telefónico.
6. En los ciclos de prueba y diagnóstico (UIT-T V.54) se define: lazo con retorno local digital, lazo con retorno local analógico, lazo con retorno remoto digital y lazo con retorno remoto analógico. Dibuje cada una de estas configuraciones y explique sus funciones y objetivos.
7. La Recomendación UIT-T V.53 es muy importante para la medición de los parámetros para la transmisión de datos por la red telefónica. Investigue las características más importantes de esta recomendación.
8. Las Administraciones de Telecomunicaciones (por ejemplo, CANTV) generalmente establecen algunas normas propias para la distribución de canales de voz y datos en los multicanales. Diga algunas de estas normas.
9. En un multicanal se dispone de tres supergrupos, uno de los cuales tiene tres grupos ocupados completamente con canales de voz, y dos grupos con 4 canales de datos de $-10\,\text{dBm0}$ cada uno. Los otros dos supergrupos están vacíos.

   (1) Se desea agregar a los tres supergrupos 50 canales de voz y canales de datos de $-10\,\text{dBm0}$. Demuestre que:

   (a) Si se llena un supergrupo completamente con canales de voz y el resto de los canales de voz y datos se distribuyen por igual en los otros dos supergrupos,

entonces se puede agregar a todo el conjunto 28 canales de datos de –10 dBm0, para un total de 36 canales de datos y 86 canales de voz.

(b) Si los canales de voz y de datos se distribuyen por igual en los tres supergrupos, entonces se puede agregar a todo el conjunto 22 canales de datos de –10 dBm0, para un total de 30 canales de datos y 86 canales de voz. Nótese que esta distribución es menos eficiente.

(2) Se desea más bien agregar canales de voz y datos a fin de que la relación K_{VD} en el multicanal sea de 4 a 1. Los tres supergrupos se llenan uniformemente con canales de voz y datos. Demuestre que en cada supergrupo se puede conectar ahora 32 canales de voz y 8 canales de datos, para un total de 96 canales de voz y 24 canales de datos.

10. La relación S/N en un radioenlace de FM viene dada por la expresión

$$\frac{S}{N} = \frac{P_R}{2kTBF(\frac{\Delta f}{f_c})^2}$$

donde F = cifra de ruido del receptor

Δf = máxima desviación del tono de prueba, en kHz

P_R = nivel de la potencia recibida, en mW

f_c = frecuencia central del canal más alto dentro de la banda de base, en kHz

(a) Demuestre que esta relación, en dB, viene dada por

$$\left[\frac{S}{N}\right]_{dB} = P_{R(dBW)} + 225{,}6 - 10\log_{10}(T) - 10\log_{10}(B) - F_{dB} - 20\log_{10}(\frac{\Delta f}{f_c}) \quad dB$$

donde $F_{dB} = 10 \log_{10}(F)$ dB

(b) Demuestre que para P_R = 1 mW, Temperatura ambiente, Ancho de banda de 3,3 kHz, F = 15, Δf = 282,8 kHz, f_c = 1248 kHz,

se verifica que $[S/N]_{dB}$ = 130,48 dB

CAPITULO IX

MEDIOS PARA LA TRANSMISION DE DATOS

9.1. INTRODUCCION

Durante los últimos 100 años toda una serie de avances tecnológicos ha permitido establecer enlaces de transmisión de información con capacidades cada vez más altas y a distancias cada vez más largas (Los primeros enlaces telegráficos llevaban señales de aproximadamente 30 palabras por minuto, equivalente a unos 15 bps y a distancias de varios kilómetros).

El primer intento de utilización óptima de los canales de transmisión disponibles fue efectuado por Baudot en 1874. El esquema propuesto por Baudot permitía transmitir 6 mensajes simultáneamente por la misma línea física, elevando así la capacidad de transmisión del sistema a 90 bps.

El desarrollo de la electrónica permitió, a partir de la invención del triodo electrónico en 1906, el establecimiento de sistemas de portadora, mediante los cuales se podía enviar varias conversaciones en FDM sobre el mismo par de conductores. El número de canales de voz que podía concentrarse en conductores metálicos aumentó paulatinamente durante los años y con el empleo de las microondas y las fibras ópticas se puede obtener en la actualidad enlaces de muy alta capacidad de transmisión.

Los avances tecnológicos han permitido aumentar progresivamente el aprovechamiento de los medios de transmisión existentes (par de cobre, coaxial, radio), así como el desarrollo de otros totalmente nuevos, como la fibra óptica.

Todos los medios de transmisión tienen las siguientes características:

- Están basados en ondas electromagnéticas
- Transmiten a la velocidad de la luz en el medio considerado ($c = 300.000$ km/seg en el vacío). En guías de onda la velocidad disminuye en una tercera parte
- Presentan una atenuación proporcional a la distancia
- Están sujetos a interferencias y ruido
- Son limitados en el ancho de banda sobre el que pueden transmitir

9.1.1. Clasificación

Al establecer el medio de transmisión para una aplicación dada, el diseñador del sistema se enfrenta a una serie de decisiones críticas. Tanto el equipamiento como la propia instalación del medio de transmisión deberán satisfacer requisitos actuales y futuros relativos a la transmisión de datos, las características eléctricas y la topología. Como ayuda al diseñador del sistema de transmisión, actualmente se cuenta con toda una normativa para la selección y utilización del medio más apropiado en una aplicación dada. Entre ellas están las normas emitidas por la Asociación de Industrias Electrónicas (EIA) y la

Asociación de Industrias de Telecomunicaciones (EIA/TIA) en la norma EIA/TIA 568, a las cuales hay que agregar aquellas emitidas por el UIT-T y otras entidades, como la IBM.

Los medios de transmisión comúnmente utilizados en la transmisión de datos se pueden clasificar en la forma mostrada en la Fig. 9.1.

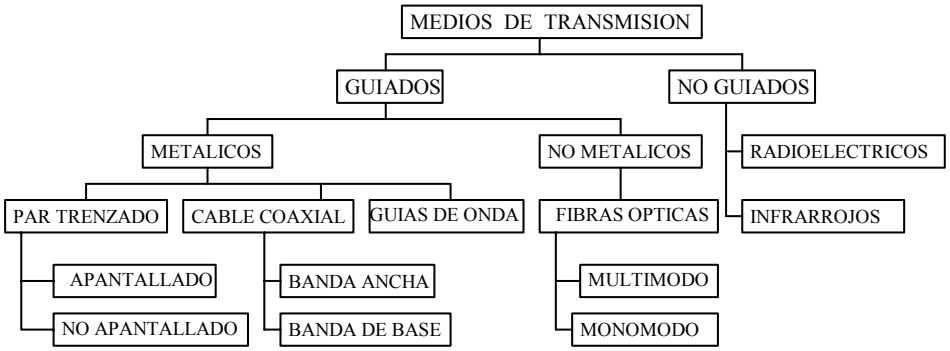


Fig. 9.1. Medios para la Transmisión de Datos.

Los medios de transmisión comúnmente utilizados en la transmisión de información se pueden clasificar en:

- Medios Guiados. Los medios guiados incluyen a los conductores metálicos (par trenzado, cable coaxial y guías de onda) y los conductores no metálicos como las fibras ópticas. Los medios de transmisión guiados presentan la ventaja de permitir un ancho de banda muy elevado y ser menos susceptibles a las interferencias; para distancias cortas pueden ser mucho más económicos que los medios inalámbricos. Sin embargo se requiere disponer del derecho de paso sobre la trayectoria de transmisión, lo cual puede ser costoso. Los medios guiados no permiten tampoco las comunicaciones móviles.
- Medios No Guiados. Los medios no guiados se transmiten por el espacio libre y comprenden las ondas radioeléctricas (HF, VHF, UHF y Microondas) los rayos o haces infrarrojos (actualmente está en desarrollo la transmisión mediante el láser).

Los medios de transmisión no guiados tienen las siguientes características:

- Las ondas electromagnéticas se pueden transmitir eficazmente mediante una antena que tenga dimensiones comparables a la longitud de onda de la señal que se quiere transmitir.
- El ancho de banda máximo sobre el cual se puede transmitir es proporcional a la frecuencia de la portadora. En general, a mayor frecuencia mayor ancho de banda disponible, pero menor alcance
- A frecuencias bajas las ondas son guiadas por la superficie terrestre y reflejadas por las capas ionosféricas

- A frecuencias altas, las ondas de radio se comportan como la luz, la propagación es rectilínea, por lo cual se requiere línea visual entre el transmisor y el receptor, especialmente en el caso de los rayos infrarrojos y el láser.

Cada estándar de red define el tipo de medio de transmisión que requiere y las especificaciones para la interconexión de los nodos. En la actualidad, a causa de las altas velocidades y los grandes volúmenes en la transmisión de datos, las especificaciones del medio de transmisión y las reglas para su utilización son muy estrictas. Aplicación de especificaciones incorrectas puede causar fallas en las comunicaciones de red. En la práctica el diseñador de un sistema deberá seguir estrictamente las recomendaciones especificadas por el fabricante de los equipos.

En este capítulo solamente vamos a describir a grandes rasgos el par trenzado, el cable coaxial, las fibras ópticas y las microondas. El lector puede encontrar en los catálogos de los fabricantes y vendedores información mucho más completa sobre todo tipo de medio de transmisión.

9.2. EL PAR TRENZADO

9.2.1. Introducción

El par trenzado consiste en un núcleo de hilos de cobre rodeados por un aislante. Los hilos se encuentran trenzados en espiral por pares, de forma que cada par se puede utilizar para la transmisión de datos. Un cable de par trenzado simplemente es un haz de uno o más pares rodeados por un forro de protección (metálico o no metálico). Sobre el par trenzado debidamente acondicionado se puede transmitir actualmente a velocidades hasta 100 Mbps, y el trenzado debe mantenerse por todo el recorrido del cable entre los puntos terminales de conexión.

El par trenzado se utiliza para transmitir señales tanto analógicas como digitales. En el caso de señales analógicas necesita amplificadores o repetidores cuando las distancias son mayores de 5 a 6 km. En el caso de señales digitales los repetidores están entre 2 a 3 km. En general, el par trenzado se utiliza en transmisión punto a punto hasta unos 15 km; en el caso de redes de área local las distancias son mucho menores: un edificio o un grupo de edificios cercanos, y puede utilizarse en configuraciones multipunto de acuerdo con la topología de la red.

Comparado con otros medios de transmisión, el par trenzado está limitado en distancia, ancho de banda y velocidad de transmisión. Es más susceptible a las interferencias y ruido externo debido a la su facilidad de acoplamiento con campos electromagnéticos externos. Por otro lado es más económico y fácil de conectorizar.

Se puede tomar algunas medidas para superar estas limitaciones; en efecto, el mismo trenzado reduce la interferencia en baja frecuencia y la utilización de diferentes longitudes en el trenzado en espiral (rizos) puede reducir la diafonía entre pares. Como norma práctica, no es conveniente instalar cables de par trenzado en las inmediaciones de los cables de potencia. Definitivamente no en el mismo ducto.

El par trenzado se presenta en dos formas: el par trenzado sin apantallar (unshielded twisted pair, UTP) y el par trenzado apantallado (shielded twisted pair, STP),

con diámetros típicamente de 0,4 a 0,8 mm. Nótese que el apantallado previene la irradiación de los conductores hacia el exterior, mientras que el trenzado previene los problemas de interferencia mutua entre pares (diafonía) o desde el exterior, lo cual mejora el BER del sistema. El cable UTP es el más utilizado y se encuentra especificado en la normativa de cableado EIA/TIA 568A, que describe al cableado estructurado.

9.2.2. Categorías del Par Trenzado

La EIA/TIA definió la especificación 568A con objeto de normalizar la instalación de cableado en edificios. Se aplica a todos los esquemas de cableado UTP que funcionan con redes basadas en Ethernet 10BaseT, Token Ring, PBX, ISDN y TP-PMD (twisted pair physical-media dependent). La norma EIA/TIA 568A presenta una serie de beneficios para los usuarios debido a que normaliza la instalación y el cableado de la red, lo que abre un gran mercado de productos y servicios de diseño, instalación y gestión de cableado.

En la norma EIA/TIA 568A se define las siguientes categorías de cables de par trenzado, aunque oficialmente las categorías 1 y 2 no forman parte de la norma:

- **Categoría 1**. Cable tradicional de par trenzado sin apantallar para teléfono, adecuado para la transmisión de voz pero no de datos. La mayoría del cable telefónico instalado hasta 1983 entra en esta categoría.
- **Categoría 2**. Cable UTP para la transmisión de datos hasta 4 Mbps. Similar al sistema de cableado Tipo 3 de IBM. Este cable tiene cuatro pares y su costo es comparativamente bajo. Los cuatro pares vienen con los siguientes colores estándar:

  Par 1. Blanco/Azul ---- Azul
  Par 2. Blanco/Anaranjado ---- Anaranjado
  Par 3. Blanco/Verde ---- Verde
  Par 4. Blanco/Marrón ---- Marrón

- **Categoría 3**. UTP. Admite una velocidad de transmisión de 10 Mbps. Se puede utilizar en las redes Token Ring a 4 Mbps y Ethernet 10BaseT a 10 Mbps. Este cable tiene cuatro pares con colores estándar y 10 rizos por metro.
- **Categoría 4**. UTP. Certificada la transmisión a 16 Mbps, lo que constituye la calidad mínima aceptable para redes Token Ring a 20 Mbps. El cable tiene cuatro pares con colores estándar.
- **Categoría 5**. UTP. Define un cable de cobre de 100 Ohm de cuatro pares con colores estándar para transmitir sobre 100 Mbps . Se puede utilizar en Ethernet, Token Ring, DQDB y en ATM. El cable tiene una baja capacitancia y exhibe un bajo nivel de diafonía.

El conector usado para el par UTP es el RJ-45, similar al empleado en telefonía. Las normas de conexión deben seguir las especificaciones EIA/TIA 568A.

La impedancia característica del par trenzado de las Categorías 3, 4 y 5 es de 100 ± 15 Ohm en la gama de frecuencias desde 1 MHz hasta la frecuencia de referencia más alta. Distancias normales de aplicación hasta 100 m con calibres 24 AWG y 22 AWG.

La atenuación se expresa normalmente en dB por unidad de longitud, y para el caso del par trenzado, en la tabla siguiente se da el coeficiente de atenuación típico en dB por cada 305 metros (1000 pies) de longitud a las frecuencias de referencia dadas.

PAR TRENZADO. Coeficiente de Atenuación Típico en dB/305 m

Frecuencia de Referencia, MHz	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
0,772	6,58	5,7	5,5
1	7,8	6,5	6,3
4	17	13	13
8	26	19	18
10	30	22	20
16	40	27	25
20	-	31	28
25	-	-	32
31,5	-	-	36
62,5	-	-	52
100	-	-	67

Las elevadas velocidades de transmisión de la Categoría 5 y otras normas en estudio, capaces de transmitir a cientos de Mbps, se pueden atribuir a un trenzado más fino de los pares de cobre, mejores materiales, mejoras en el diseño de equipos y nuevos métodos de acceso. Todos los cables, paneles de conexión y terminaciones deben satisfacer las especificaciones para eliminar la diafonía entre pares; asimismo, se dispone de cierto tipo de par trenzado, denominado de “grado plenum”, que no produce emanaciones tóxicas (humos o gases) en caso de incendio. Los conectores y clavijas más antiguos no son deseables en instalaciones de Categoría 5.

Las características y prestaciones del cableado y conexiones de la Categoría 5 pueden proporcionar un soporte apropiado para velocidades hasta 100 Mbps o más, según la topología y tipo de red. Cualquier tipo de red que pueda operar a estas velocidades puede aprovechar las excelentes prestaciones de la Categoría 5, pues el cable se ha diseñado para satisfacer las necesidades actuales y futuras inmediatas de las redes actuales. En el Comité IEEE 802.3 está en estudio un cable UTP de Categoría 5 para transmitir hasta 1000 Mbps (250 Mbps por cada par) a distancias del orden de los 100 metros en una red Ethernet 1000BaseT. Sin embargo, como norma de tipo práctico hay que seguir siempre las instrucciones de los fabricantes de las redes.

En general, el par trenzado es más económico, fácil de instalar y conectorizar; es muy popular en las redes de computadoras y es el único utilizado en redes telefónicas. Por otro lado, presenta una muy limitada resistencia al ruido y la diafonía y no es adecuado para altas velocidades de transmisión.

9.2.3. Recomendaciones del UIT-T

El UIT-T, en sus Recomendaciones G.950, G.951, G.952, G.953 y G.954, establece los requerimientos generales para la utilización de conductores metálicos en sistemas digitales. En las Recomendaciones V.10 y V.11 se dan algunas indicaciones acerca de las restricciones impuestas por la longitud, balance y resistencia terminal del conductor. Esto se sintetiza en las curvas de la Fig. 9.2 que muestran la longitud vs velocidad de modulación. Estas curvas han sido obtenidas mediante cálculos teóricos y mediciones experimentales utilizando par trenzado para uso telefónico, y tomando en cuenta los límites de atenuación y distorsión especificados en las recomendaciones. Sin embargo, en la práctica se ha demostrado que para velocidades de modulación bajas, la distancia de operación se puede aumentar en varios kilómetros.

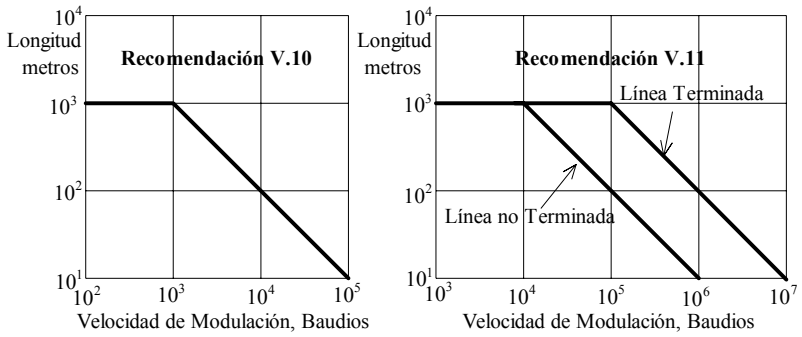


Fig. 9.2. Variación de la Longitud vs Velocidad de Modulación

9.3. EL CABLE COAXIAL

9.3.1. Introducción

El cable coaxial consta de un núcleo de cable sólido rodeado por un aislante o dieléctrico, una malla metálica que sirve de protección y como cable de tierra, y un forro o revestimiento protector exterior; el diámetro del cable coaxial típico es de 5 mm a 25 mm. En la Fig. 9.3 se muestra la estructura básica del cable coaxial.

Los conductores metálicos de señales eléctricas pueden ser balanceados o no balanceados (o desbalanceados). Por ejemplo, el par trenzado es de tipo balanceado, mientras que el cable coaxial, en el cual comúnmente se conecta la malla a tierra, es de tipo desbalanceado. Por esta razón, en sistemas FDM de altas velocidades y frecuencias se suele emplear dos cables coaxiales por circuito: uno para cada dirección de transmisión.

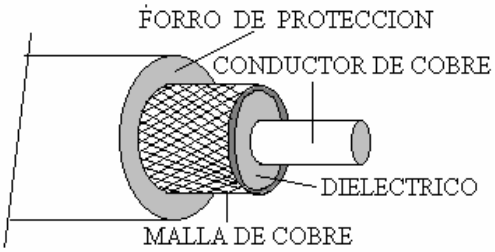


Fig.9.3. Estructura Básica del Cable Coaxial

El cable coaxial fue inventado en 1929 y es uno de los medios de transmisión más versátiles. Se emplea en casi todas las gamas de frecuencia para la transmisión de señales

tanto analógicas como digitales. Ellos se utilizan en una amplia variedad de instalaciones residenciales, comerciales e industriales; en radiodifusión, televisión por cable (CATV), redes de área local, circuitos cerrados de televisión y muchas otras aplicaciones.

El desarrollo inicial del cable coaxial fue acelerado y estimulado por sus aplicaciones en el ámbito militar. Las primeras especificaciones fueron establecidas para uso militar y fue clasificado con la denominación "RG/U" (Radio Guide Utility) para ser empleado en las transmisiones de radio de alta frecuencia. Después de un tiempo, la clasificación RG/U se diversificó de acuerdo con sus características de atenuación e impedancia, y actualmente se puede conseguir cables coaxiales casi para cualquiera aplicación en el área de las telecomunicaciones.

El cable RG-11, de 75 Ohm, es un cable apantallado similar al cable coaxial CATV utilizado en televisión y se utiliza principalmente en la opción Ethernet 10Base5 (cable grueso). Se tiene también el coaxial fino RG-58, de 50 Ohm, para la opción Ethernet 10Base2. En las opciones Ethernet 10Broad36 se utiliza cable coaxial RG-59, de 75 Ohm, para trabajar en banda ancha. En las redes de área local estandarizadas no hay problema en la selección de los cables pues todas las longitudes y tipos están también estandarizados.

En la Tabla siguiente mostramos las características de transmisión de algunos de los cables coaxiales utilizados en las redes de transmisión de datos.

CARACTERISTICAS DE TRANSMISIÓN DE CABLES COAXIALES

Tipo de Cable	Impedancia, Ohm	Diámetro Exterior mm	Características Eléctricas (*) α_r dB @ f_r; d_r
CATV	75	19	1 dB @ 5 MHz; 305 m
		12,7	1,5 dB @ 5 MHz; 305 m
		10,5	2 dB @ 4 MHz; 302 m
RG11/U	75	10,3	4,5 dB @ 4MHz; 305 m
			5,1 dB @ 5 MHz; 305 m
			0,66 dB @ 10 MHz; 30,5 m
RG59/U	75	6,25	8 dB @ 5 MHz; 305 m
			1.1 dB @ 10 MHz; 30,5 m
RG58A/U	50	5	6,2 dB @ 150 MHz; 30,5 m
			12,5 dB @ 450 MHz; 30,5 m
			20 dB @ 900 MHz; 30,5 m
RG213/U	50	10,3	2,3 dB @ 150 MHz; 30,5 m
			4,5 dB @ 450 MHz; 30,5 m
			7,6 dB @ 900 MHz; 30,5 m

(*) "α_r dB @ f_r ; d_r" significa que el cable experimenta una atenuación de α_r dB a una frecuencia f_r sobre una distancia d_r. Estos son los valores de referencia dados por el fabricante del cable.

9.3.2. Selección de Cables Coaxiales

Los cables coaxiales utilizados en las líneas de comunicación entre módems tienen una impedancia característica de 75 Ohm. El cable Tipo CATV, el de menor pérdida, posee una armadura de aluminio muy apropiada para las líneas troncales. Sin embargo, debido a su construcción rígida, no se utiliza en aquellos casos donde es necesario hacerle curvas de poco radio. Para este tipo de aplicación se utiliza el cable RG/U debido a su flexibilidad y facilidad de instalación, aunque tiene un factor de atenuación mucho más alto y no es tan durable como el cable CATV. Cuando se selecciona cable coaxial para las troncales y para las acometidas de servicio y ramales, debe tomarse en cuenta la atenuación, la frecuencia de trabajo y la longitud de la línea. Los fabricantes de los cables generalmente especifican las características de los cables dando la atenuación producida, en dB, a una frecuencia de referencia en un tramo de una longitud dada. Esto lo podemos escribir en la forma $<\alpha_r @ f_r ; d_r>$, donde α_r, en dB, es la atenuación de referencia producida a una frecuencia de referencia f_r y a una distancia de referencia d_r; en la Tabla anterior hemos utilizado esta convención.

Pero a menudo se desea conocer la atenuación para una frecuencia y longitud diferentes, así como las pérdidas del cable, en dB, sobre una longitud dada. La siguiente expresión aproximada [Bristol Babcock, 1989] nos permite relacionar todas estas magnitudes. En efecto:

$$\frac{\alpha_T}{d_T}\sqrt{\frac{1}{f_T}} = \frac{\alpha_r}{d_r}\sqrt{\frac{1}{f_r}} \qquad (9.1)$$

donde α_T, f_T y d_T son la atenuación (en dB), frecuencia y distancia de trabajo en una aplicación dada; nótese que α_T es también la pérdida correspondiente, en dB, en la longitud d_T a la frecuencia f_T. Las frecuencias y las longitudes en la ecuación anterior deberán estar expresadas en las misma unidades (Hz, kHz, MHz, etc. y metros, kilómetros, pies, millas, etc.). Como la dependencia de la atenuación respecto a la frecuencia es muy grande, hay que escoger la frecuencia de referencia dada por el fabricante lo más cerca posible de la frecuencia de trabajo. Esto es posible porque los fabricantes en la mayoría de las veces dan para un mismo cable los valores de atenuación para diferentes frecuencias; por ejemplo, General Cable da 7 valores desde 1 MHz hasta 1000 MHz.

♣Ejemplo 9.1

El cable coaxial CATV de 0,75” de diámetro e impedancia de 75 Ω, tiene las características <1 dB @ 5 MHz; 1000 pies (305 m)> dadas por el fabricante, y se desea saber la correspondiente atenuación cuando la frecuencia es de 10 MHz y la distancia es de 1000 metros. En este caso:

α_T = incógnita; f_T = 10 MHz; d_T = 1000 metros; α_r = 1 dB; f_r = 5 MHz; d_r = 1000 pies = 305 metros.

Solución:

De la expresión (9.1),

$$\alpha_T = \alpha_r \frac{d_T}{d_r}\sqrt{\frac{f_T}{f_r}} = 1\frac{1000}{305}\sqrt{\frac{10}{5}} = 4{,}637\ \text{dB}$$

Las características de trabajo para este cable son entonces

$< 4{,}637\ \text{dB} @ 10\ \text{MHz}; 1000\ \text{metros} >$

La pérdida en el tramo de 1000 metros a 10 MHz es de 4,637 dB ♣

Algunas veces es preferible normalizar la atenuación definiendo el "coeficiente de atenuación" que es la "atenuación por unidad de longitud" (por ejemplo, dB/metro) para una frecuencia f_T dada. Sea entonces α'_T esta atenuación por unidad de longitud.

De (9.1),

$$\alpha'_T = \frac{\alpha_T}{d_T} = \alpha_r \frac{1}{d_r}\sqrt{\frac{f_T}{f_r}} \quad \text{dB/unidad de longitud @ } f_T \qquad (9.2)$$

En este caso, la atenuación, en dB @ f_T de cualquier tramo de longitud d_T será:

$$\alpha_T = \alpha'_T \cdot d_T \qquad (9.3)$$

Nótese también que

$$\alpha_T = \text{ Pérdidas en el Cable en dB @ } f_T \text{ a una distancia } d_T \qquad (9.4)$$

Las longitudes y frecuencias deben estar expresadas en las misma unidades. Para el cable del ejemplo anterior el coeficiente de atenuación es

$$\alpha'_T = 1\frac{1}{305}\sqrt{\frac{10}{4}} = 4{,}637\text{x}10^{-3}\ \text{dB/metro @ 10 MHz}$$

Por ejemplo, en un tramo de 1500 metros, la pérdida en el cable a 10 MHz será de 6,995 dB.

9.3.3. Cálculo de los Niveles de Potencia

Consideremos un enlace punto a punto transmisor/receptor mediante cable coaxial, como se muestra en la Fig. 9.4.

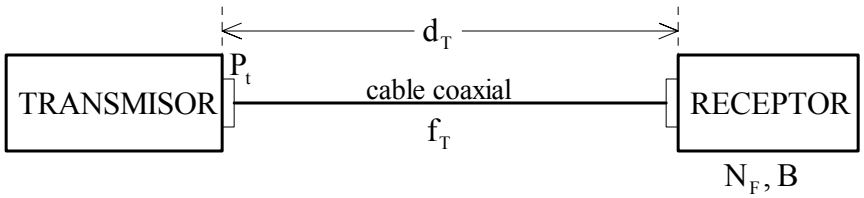


Fig. 9.4. Enlace Transmisor-Receptor mediante Cable Coaxial.

El sistema opera a una frecuencia de trabajo f_T, la longitud del cable es d_T, la potencia del transmisor es P_t, la cifra de ruido del receptor es N_F y el ancho de banda de operación es B.

El objetivo del diseño es el de determinar la potencia de salida del transmisor a fin de que a la entrada del receptor la relación S_i/N_i tenga un valor que asegure la calidad de la recepción, por ejemplo, que asegure un BER mínimo especificado.

Los efectos de todos los parámetros involucrados sobre la relación S_i/N_i se relacionan mediante un diagrama de niveles como el mostrado en la Fig. 9.5.

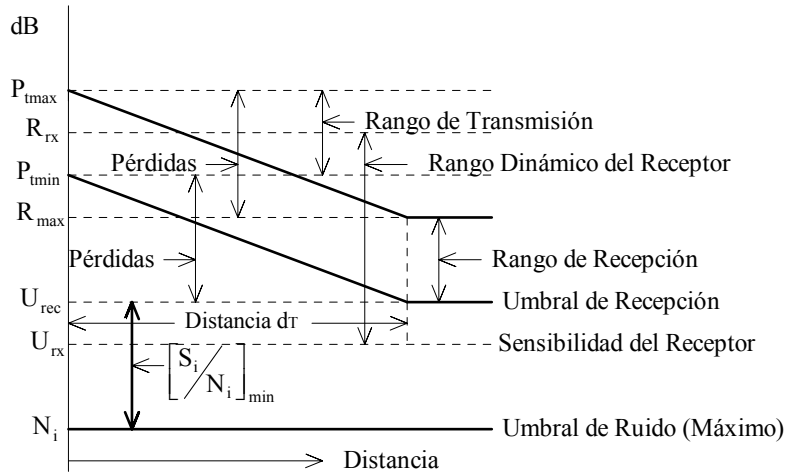


Fig. 9.5. Diagrama de Niveles en un Enlace Transmisor-Receptor

Sea entonces, de la Fig. 9.5:

P_{tmax} = Máxima Potencia de salida del Transmisor, en dBm

P_{tmin} = Mínima Potencia de salida del Transmisor, en dBm

R_{max} = Máxima potencia de entrada al Receptor, en dBm

R_{rx} = Límite superior del rango dinámico del Receptor, en dB

U_{rec} = Umbral de Recepción, en dB

U_{rx} = Sensibilidad del Receptor, en dB

$[R_{rx}, U_{rx}]$ = Rango Dinámico del Receptor

$[P_{tmax}, P_{tmin}]$ = Rango de Transmisión

$[R_{max}, U_{rec}]$ = Rango de Recepción

N_i = Umbral de Ruido Térmico o Potencia de Ruido máxima, en dBm

$\left[S_i/N_i\right]_{min}$ = Relación S_i/N_i mínima permitida, en dB

La relación $\left[S_i/N_i\right]_{min}$ generalmente es un dato de diseño; es el criterio de calidad del enlace.

De la Fig. 9.5, la relación S_i/N_i mínima es

$$\left[S_i/N_i\right]_{min} = P_{tmin} - (\text{Pérdidas} + N_i) \quad \text{dB} \tag{9.5}$$

Las "Pérdidas" se refiere a las pérdidas P_c en el cable y otras pérdidas varias P_v producidas en los empalmes, acopladores, etc. Entonces,

Pérdidas = $P_c + P_v$ dB

Pero, de (9.7) a (9.9), $P_c = d_T \cdot \alpha'_T$, de donde

$$\text{Pérdidas} = P_v + d_T \cdot \alpha'_T \quad \text{dB} \tag{9.6}$$

El umbral de ruido térmico N_i viene dado por la expresión (8.37b)

$$N_i = -198{,}6 + 10\log_{10}(T) + 10\log_{10}(B) + N_F \quad \text{dBm} \tag{9.7}$$

donde B es el ancho de banda de operación, en Hertz, y N_F la cifra de ruido del receptor, cuyo valor es de 6 a 12 dB. Este valor generalmente es proporcionado por el fabricante del receptor. Entonces, a la temperatura ambiente (T = 290 kelvins),

$$N_i = -174 + 10\log_{10} B + N_F \quad \text{dBm} \tag{9.8}$$

La expresión (9.5) queda en la forma

$$\left[S_i/N_i\right]_{min} = P_{tmin} - (P_v + d_T \cdot \alpha'_T - 174 + 10\log_{10} B + N_F) \quad \text{dB} \tag{9.9}$$

o también,

$$P_{tmin} = \left[S_i/N_i\right]_{min} + (P_v + d_T \cdot \alpha'_T - 174 + 10\log_{10} B + N_F) \quad \text{dBm} \tag{9.10}$$

Las expresiones (9.9) y (9.10) nos permiten determinar la potencia mínima del transmisor que nos asegura una relación S_i/N_i mínima a la entrada del receptor, y viceversa. Si se elimina el subíndice "min", las expresiones (9.9) y (9.10) se convierten en expresiones generales que relacionan la relación S_i/N_i a la entrada del receptor con la potencia de salida del transmisor para un sistema como el mostrado en la Fig. 9.4.

La sensibilidad del receptor es el umbral inferior de potencia que el receptor puede recibir sin pérdida de información. Es un parámetro dado por el fabricante.

Nótese que debe cumplirse que $U_{rec} \geq U_{rx}$, es decir, la sensibilidad del receptor U_{rx} debe ser menor que el umbral de recepción U_{rec}. Asimismo, el rango de recepción debe quedar dentro del rango dinámico del receptor.

♣ Ejemplo 9.2

Consideremos un enlace transmisor-receptor como el de la Fig. 9.4, en el cual:

Cable Coaxial RG213/U, 50 Ω, < 2,3 dB @ 150 MHz; 30,5 m>

f_T = 250 MHz; B = 6 MHz; N_F = 6 dB; d_T = 180 m; P_v = 4 dB.

Para asegurar una calidad mínima especificada (por ejemplo un BER $\leq 10^{-6}$), la relación S_i/N_i mínima debe ser de 40 dB.

Se quiere saber la potencia mínima del transmisor y los diferentes umbrales y rangos de operación.

Solución:

Calculemos:

$$\alpha'_T = \frac{2,3}{30,5}\sqrt{\frac{250}{150}} = 9,735\text{x}10^{-2} \quad \text{dB/m @ 250 MHz}$$

Pérdidas = 4 + 180 x 9,735x10^{-2} = 21,52 dB

N_i = -174 + 10 $\log_{10}(6\text{x}10^6)$ + 6 = - 100,2 dBm

La potencia de salida mínima del transmisor será, de (9.10),

P_{tmin} = 40 + (21,52 – 100,2) = -38,7 dBm = 135 mW

Los rangos de operación y los umbrales serán:

El rango de transmisión dado por el fabricante es ajustable y generalmente es de 15 a 20 dB. Si tomamos el valor de 20 dB, la potencia máxima del transmisor será

P_{tmax} = P_{tmin} + 20 = -38,7 + 20 = - 18,7 dBm = 13,49 W

El rango de transmisión será [13,49 W, 135 mW] ó [-18,7 dBm, -38,7 dBm]. El transmisor se seleccionará para trabajar dentro de estos valores.

U_{rec} = P_{tmin} – Pérdidas = -38,7 – 21,52 = - 60,22 dB

R_{max} = P_{tmax} – Pérdidas = -18,7 – 21,52 = - 40,22 dB

Los valores del rango de recepción son [-40,22 dB, -60,22 dB] ó 20 dB. El rango de recepción debe ser igual o menor que el rango de transmisión.

La sensibilidad del receptor deberá ser siempre menor que –60,22 dB y el rango dinámico del receptor deberá ser, como mínimo, igual al rango de recepción. El receptor se selecciona de acuerdo con estos criterios.

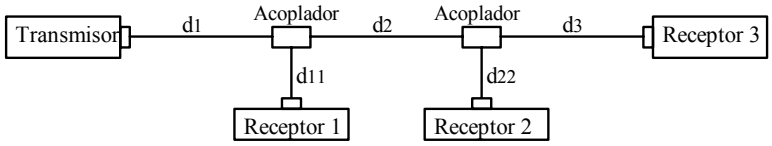
♣

En el caso de una configuración multipunto se calcula, mediante la ecuación (9.10), la potencia de transmisión mínima para el receptor más alejado cumpliendo con el criterio de la relación S_i/N_i mínima. Nótese que en este caso, para el cálculo de las "pérdidas varias P_v", hay que tomar en cuenta todos los empalmes y derivaciones de la línea troncal. Con

este valor de potencia mínima de transmisión se calcula, mediante la expresión (9.9), las relaciones S_i/N_i de los otros receptores; podrá observarse que esas relaciones serán mayores que la relación S_i/N_i mínima.

Ejemplo 9.3

Consideremos el sistema multipunto mostrado en la figura siguiente



Las distancias de los tramos de cable son:

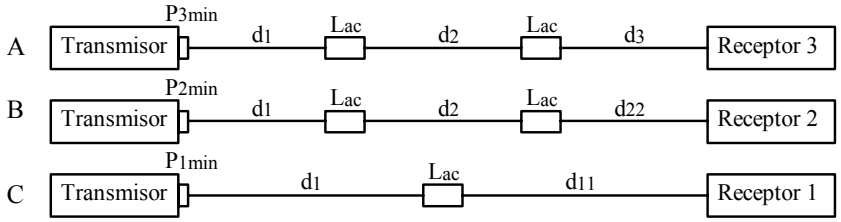
$d_1 = 200$ m; $d_{11} = 20$ m; $d_2 = 350$ m; $d_{22} = 30$ m; $d_3 = 200$ m

El sistema trabaja a la temperatura ambiente (T = 290 kelvins); la frecuencia de operación es de 400 MHz y se utilizará cable coaxial RG213U de 50 Ohm. Para asegurar una calidad mínima especificada, por ejemplo, un BER $\leq 10^{-6}$, la relación S/N mínima en el receptor más alejado (receptor 3) debe ser de 40 dB. Las cifras de ruido de los receptores son de 8 dB. La pérdida en cada acoplador es de 3 dB. Se desprecia cualquier otro tipo de pérdida (se supone que no hay empalmes en el cable).

Se quiere calcular la potencia mínima total del transmisor y la relación S/N a la entrada de los receptores 1 y 2.

Solución

La potencia mínima total del transmisor se puede calcular por superposición. En efecto, para los tres receptores se tendrá la configuración siguiente, comenzando por el receptor más alejado, el receptor 3.



L_{ac} es la atenuación de los acopladores, y para el cable coaxial RG231U las características aplicables en el presente caso son $< 4{,}5\ \text{dB} @ 450\ \text{MHz}; 30{,}5\ \text{m} >$.

Configuración A

$d_{T3} = d_1 + d_2 + d_3 = 750$ m; $f_T = 400$ MHz

De (9.2), $\alpha_T^{'} = \frac{4,5}{30,5}\sqrt{\frac{400}{450}} = 0,139\ \text{dB/m @ 400 MHz}$

$P_v = 2L_{ac} = 6$ dB; $N_F = 8$ dB; B = 6 MHz; T = 290 kelvins; $[S_i/N_i]_{min} = 40$ dB

De (9.10), $P_{3min} = 40 + (6 + 750x0,139-174 + 10 \log(6x10^6) + 8)$

$P_{3min} = 52,109$ dBm = 162,508 W

Configuración B

$d_{T2} = d_1 + d_2 + d_{22} = 580$ m

$P_{2min} = 40 + (6 + 580x0,139 - 174 + 10 \log(6x10^6) + 8)$

$P_{2min} = 28,461$ dB = 0,702 W

Configuración C

$d_{T1} = d_1 + d_{11} = 220$ m

$P_{1min} = 40 + (3 + 220x0,139 - 174 + 10 \log(6x10^6) + 8)$

$P_{1min} = -24,616$ dB = 3,455 μW

La potencia mínima total del transmisor será

$P_{min} = P_{1min} + P_{2min} + P_{3min} = 163,209$ W = 52,127 dBm

Esta es la potencia total mínima del transmisor que asegurará el BER especificado en el receptor más alejado.

Ahora podemos calcular las relaciones S/N a la entrada de los receptores 1 y 2.

De (9.9),

$$[S_i / N_i]_1 = P_{min} - (L_{ac} + d_{T1} \cdot \alpha_T^{'} - 174 + 10\log(6x10^6) + 8) = 116,743\ \text{dB}$$

$$[S_i / N_i]_2 = P_{min} - (2L_{ac} + d_{T2} \cdot \alpha_T^{'} - 174 + 10\log(6x10^6) + 8) = 63,666\ \text{dB}$$

Nótese lo holgados que trabajan los receptores 1 y 2.

La potencia máxima del transmisor será entonces mayor que P_{min}, es decir, $P_{max} > 163,209\ \text{W}$; en esta forma nos aseguraremos que la relación SN en el receptor más alejado sea siempre mayor que el valor especificado. Nótese que tanto P_{max} como P_{min} deben de estar dentro del rango de transmisión R_T del transmisor. Por ejemplo, si R_T = 10 dB, se puede elegir un transmisor con un rango de transmisión regulable de $[60\ \text{dBm}, 50\ \text{dBm}]$. El rango de transmisión de un transmisor lo da el fabricante.

Podemos estimar también los siguientes parámetros para el receptor más alejado:

Umbral de recepción, $U_{rec} = P_{3min} - P_{erd} = -58,218$ dB

La Sensibilidad del receptor U_{rx} deberá ser menor que el umbral de recepción U_{rec}, es decir, $U_{rx} < U_{rec} = -58{,}218$ dB . Cuanto mayor es la diferencia $[U_{rec} - U_{rx}]$, mejor será la capacidad del receptor para soportar caídas de potencia de la señal.

♣

9.4. TRANSMISION DE SEÑALES DIGITALES SOBRE FIBRAS OPTICAS

9.4.1. Introducción

Hace más de cien años Alexander Graham Bell transmitió una señal de voz a una distancia de 200 metros utilizando un rayo de luz como portadora. Puede decirse que este "Fotófono", como así lo denominó Bell, fue la primera demostración del principio básico de las comunicaciones ópticas, tal como lo conocemos actualmente. El fotófono no tuvo un interés de tipo práctico inmediato debido a la falta de una fuente de luz lo suficientemente confiable e intensa y a las pérdidas del medio de transmisión, en esa época el espacio libre.

La invención del láser en 1960 reactivó el interés en las comunicaciones ópticas reconociéndosele de inmediato como la fuente de luz apropiada para la transmisión óptica. Pero todavía no se disponía del medio de transmisión apropiado, pues los materiales entonces disponibles exhibían atenuaciones de hasta 1000 dB/km, superior en más de dos órdenes de magnitud a los medios de transmisión corrientes de esa época.

Fue en 1966 cuando Kao y Hockham [Kao y Hockhman, 1966] hicieron la primera propuesta de la utilización de una fibra de vidrio de alta pureza como guía de onda a frecuencias ópticas. El siguiente desarrollo de la tecnología de las fibras ópticas llevó la atenuación de 20 dB/km en 1970 a 0,16 dB/km en 1982; mediante la utilización de amplificadores ópticos, en 1992 se efectuó en los Estados Unidos una transmisión a una distancia de 20.000 km a 10 Gbps. En la actualidad las técnicas ópticas están invadiendo cada día áreas antes privativas de los conductores metálicos y de las microondas.

En 1994 se inició en Venezuela la instalación del cable de fibras ópticas Américas I, que unió nuestro país con Trinidad y de allí al resto del mundo a través del cable transatlántico Columbus II. Este cable tiene dos hilos de fibra óptica con una capacidad de 565 Mbps (Nivel E5 de la Jerarquía Europea). SIDOR fue la empresa pionera en instalar esta tecnología en Venezuela y las operadoras de PDVSA la siguieron con numerosas instalaciones en el país, en particular la Red FDDI de PEQUIVEN en Caracas. La CANTV ha instalado varias troncales por todo el país y un cable costanero que une Maracaibo con Puerto La Cruz. Asimismo, CADAFE y ENELVEN están utilizando fibras ópticas en sus sistemas de transmisión de potencia, con la particularidad de que la fibra óptica utiliza como soporte el cable de guarda de las líneas de transmisión. En el ámbito universitario, la Universidad de Los Andes fue la pionera en la instalación de enlaces con fibras en sus redes de datos a fin de lograr una red MAN que integrará los servicios de voz y datos a alta velocidad en todas las instalaciones universitarias de Mérida.

En este texto, como es obvio, solamente describiremos las fibras ópticas como un medio de transmisión de información en telecomunicaciones; sin embargo, las fibras ópticas tienen una multitud de aplicaciones en otras áreas. La aplicación más sencilla de las fibras ópticas es la transmisión de luz a lugares que serían difíciles de iluminar de otro

modo, como la cavidad perforada por la barrena de un dentista. También pueden emplearse para transmitir imágenes directamente; en este caso se utilizan haces de varios miles de fibras muy finas, situadas exactamente una al lado de la otra y ópticamente pulidas en sus extremos. Cada punto de la imagen proyectada sobre un extremo del haz se reproduce en el otro extremo, con lo que se reconstruye la imagen, que puede ser observada a través de una lente de aumento. La transmisión de imágenes se utiliza mucho en instrumentos médicos para examinar el interior del cuerpo humano y para efectuar cirugía con láser, en sistemas de reproducción mediante facsímil y fotocomposición, en gráficos de computadora y en muchas otras aplicaciones.

Las fibras ópticas también se emplean en una amplia variedad de sensores, que van desde termómetros hasta giroscopios. Su potencial de aplicación en este campo casi no tiene límites porque la luz transmitida a través de las fibras es sensible a numerosos cambios ambientales, entre ellos la presión, las ondas de sonido y la deformación, además del calor y el movimiento. Las fibras pueden resultar especialmente útiles cuando los efectos eléctricos podrían hacer que un cable convencional resultara inútil, impreciso o incluso peligroso. También se ha desarrollado fibras que transmiten rayos láser de alta potencia para cortar y taladrar materiales.

Características

La características más relevantes de las fibras ópticas son:

- Tiene la menor atenuación y el mayor ancho de banda entre todos los sistemas de transmisión guiados
- Es inmune a las interferencias electromagnéticas y al acceso no autorizado
- Aunque es más costosa que el par trenzado, se recomienda en instalaciones de altas prestaciones.

9.4.2. Mecanismos de la Propagación de la Luz en Fibras Opticas

Las fibras ópticas de interés en telecomunicaciones están fabricadas de vidrio de gran pureza con diámetros que van desde 50 micras a 300 micras.

Fundamentalmente, la fibra consiste en un núcleo de vidrio con un cierto índice de refracción envuelto por un revestimiento de vidrio o de plástico cuyo índice de refracción es menor que el del núcleo a fin de que se produzca una reflexión total del rayo incidente y su propagación, mediante reflexiones sucesivas, a lo largo de la fibra. El índice de refracción de un material es el cociente entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío y la velocidad de propagación en dicho material. Aun cuando el diámetro del núcleo de la fibra pudiera parecer muy pequeño, él es hasta centenares de veces más grande que la longitud de onda del espectro visible. Debido a esto, el mecanismo de propagación de la luz en la fibra se puede modelar aplicando los principios de la óptica geométrica (Leyes de Snell) en vez de la óptica ondulatoria.

La propagación de la luz en la fibra se efectúa en formas o “modos” diferentes que dependen de la relación y variación de los índices de refracción tanto del núcleo como del revestimiento. Se distingue entonces las formas:

- Propagación Multimodo con índice de refracción escalonado
- Propagación Multimodo con índice de refracción gradual
- Propagación Monomodo con índice de refracción escalonado

En la propagación multimodo con índice escalonado, Fig. 9.6, los rayos de luz viajan por trayectorias diferentes y llegan a destino con retardos diferentes, pues la velocidad de grupo es la misma para todos. Nótese que para ángulos mayores (en relación con el eje de la fibra) corresponden trayectorias más largas, con un retardo o tiempo de propagación mayor. Estas diferencias en los tiempos de propagación producen un ensanchamiento de los impulsos recibidos, como se muestra en la Fig. 9.6. Este ensanchamiento o dispersión del impulso se conoce como "dispersión modal", y es un fenómeno similar a la interferencia intersímbolo de los canales eléctricos. La dispersión modal limita la velocidad máxima de transmisión de la fibra y puede limitar también la distancia máxima entre repetidoras.

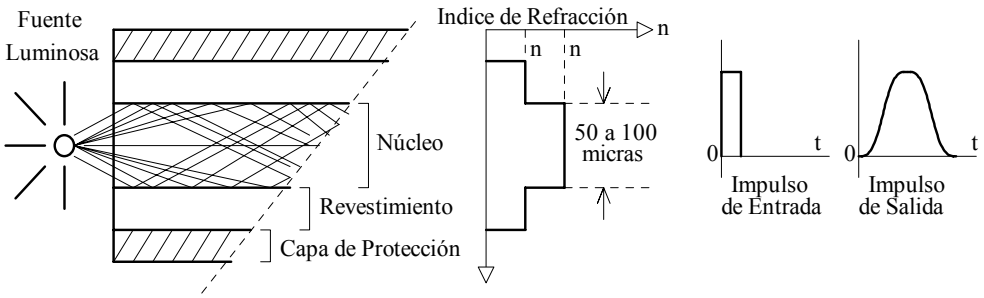


Fig. 9.6. Propagación Multimodo. Indice de Refracción Escalonado.

Con el fin de reducir la dispersión de los impulsos luminosos, se utiliza una fibra en la cual la variación del índice de refracción del núcleo es gradual: máxima en el centro y mínima en la frontera núcleo/revestimiento. Como consecuencia, la velocidad de grupo es diferente: mayor para los rayos más alejados del eje y menor para los cercanos. Los rayos adoptan ahora una trayectoria helicoidal y la relación de velocidades de grupo es tal que los rayos se curvan de tal manera que ellos pasan siempre por los mismos puntos, como se muestra en la Fig. 9.7. Mediante cuidadosos procesos de fabricación de la fibra, se puede obtener una reducción del retardo de hasta dos órdenes de magnitud (1 a 5 ns/km) en relación con la fibra de índice escalonado.

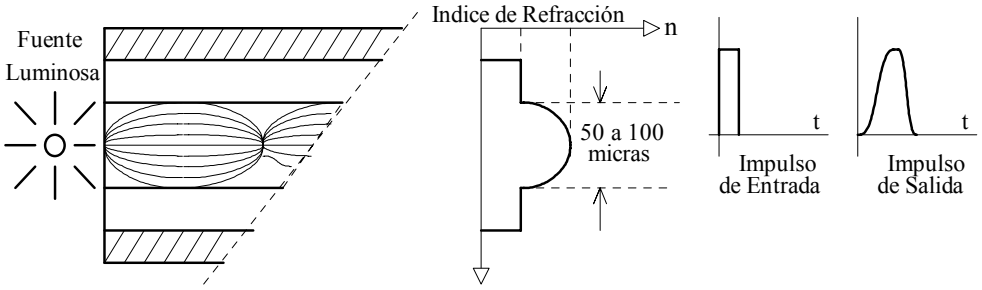


Fig. 9.7. Propagación Multimodo. Indice de Refracción Gradual.

En el modo único o monomodo el núcleo de la fibra es muy pequeño, casi del mismo orden que la longitud de onda de la luz transmitida. Solamente aquellos rayos cuyo ángulo respecto al eje es muy pequeño pueden propagarse axialmente; prácticamente es un solo rayo el que se propaga, como se muestra en la Fig. 9.8. En este modo de propagación el retardo es casi cero, pero por otro lado se presentan problemas, no sólo en la fabricación de la fibra sino en las dificultades de acoplamiento luz/fibra y en el empalmado. El modo único está reservado actualmente para aplicaciones más especializadas en donde se requiere retardos muy pequeños en enlaces de alta capacidad en los cuales se justifique las complicaciones y costo adicionales.

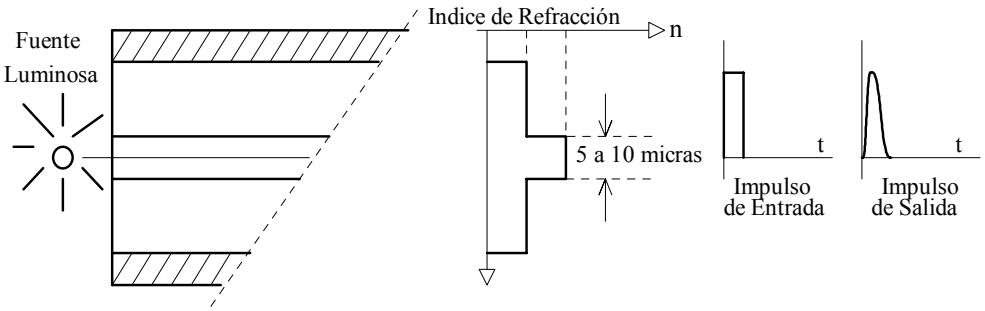


Fig. 9.8. Propagación Monomodo. Indice de Refracción Escalonado.

Hay otro mecanismo de ensanchamiento del impulso conocido como “dispersión cromática” o “dispersión intramodal”, que es independiente de la dispersión modal. La dispersión cromática se debe a dos factores: la “dispersión del material”, producida por la variación del índice de refracción con la longitud de onda, y la “dispersión de la guíaonda”, producida porque la constante de propagación modal depende del cociente entre el radio del núcleo y la longitud de onda.

Los dos tipos de dispersión (modal y cromática) podrían ser eliminados si se utilizara una fuente de radiación absolutamente monocromática. Este tipo de fuente no se ha realizado todavía, pero se ha podido eliminar totalmente la dispersión cromática a una sola longitud de onda, alrededor de 1,3 micras, donde los efectos de la dispersión del material y la distorsión de guíaonda son de igual magnitud y signo contrario por lo que se

anulan. Esto justifica el gran interés que existe en la actualidad en el desarrollo de componentes de transmisión óptica a 1,3 micras, pero todavía no se ha alcanzado el grado de madurez de los componentes de 0,8 micras.

La aplicación de los diferentes tipos de fibras ópticas en las telecomunicaciones ya ha sido normalizada por el UIT-T; en efecto, en las Recomendaciones G.651 y G.652 se establecen las características y especificaciones de estas fibras, y como ya lo hemos visto anteriormente, el Estándar SONET/SDH está basado en fibras ópticas.

Con el fin de proporcionarles protección y fuerza mecánica, a las fibras se las agrupa en forma de cables. En la práctica estos cables contienen comúnmente 1, 2, 6, 12 y

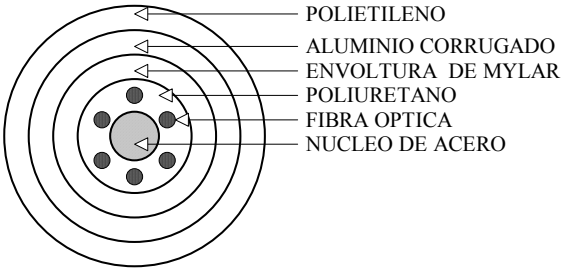


Fig. 9.9. Configuración Típica de un Cable de 6 Fibras Opticas.

16 fibras; en la Fig. 9.9 se muestra la configuración típica de un cable de 6 fibras. Como la fragilidad de las fibras es muy grande, el cableado es muy fuerte con el resultado que, en general, los cables de fibras ópticas son más rígidos y más difíciles de manipular comparado con los conductores metálicos convencionales (par trenzado y coaxial). Por otro lado, el empalmado de las fibras es complicado necesitándose equipos especiales y personal calificado.

Una descripción más completa de los mecanismos y caracterización de las fibras ópticas está fuera de los propósitos de este libro.

9.4.3. El Canal Optico

En la Fig. 9.10 se muestra la configuración típica de un sistema fulldúplex de transmisión por fibras ópticas a una longitud de onda dada.

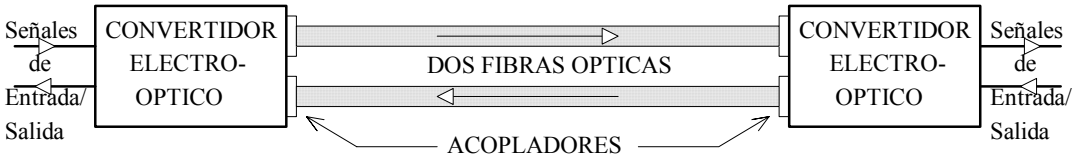


Fig. 9.10. El Canal Optico.

La señal de entrada puede ser analógica o digital. Sin embargo, nos limitaremos a la transmisión de señales digitales binarias. En este caso el canal óptico puede reemplazar, por ejemplo, a cualquiera de los canales troncales Ti de la jerarquía norteamericana. En la Fig. 9.11 se muestra el caso de una troncal T3 de 672 canales a una velocidad de 44736 kbps

con un repetidor óptico intermedio. En las Recomendaciones G.955 y G.956, el UIT-T establece las características de transmisión por fibras ópticas para las jerarquías europea y norteamericana.

Modulación y Detección Electro-Optica

La conversión electro-óptica consiste fundamentalmente en la modulación ON/OFF de una fuente luminosa. Este es el tipo de modulación directa empleado para la transmisión de señales digitales binarias; su principal limitación depende de cuan rápidamente se puede modular (encender y apagar) la fuente luminosa. En la Fig. 9.12 se muestra el mecanismo de modulación directa.

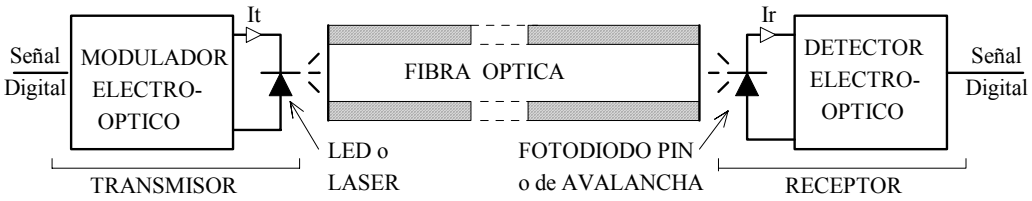


Fig. 9.12. Modulación y Detección Directas.

El modulador electro-óptico contiene una interfaz eléctrica para adecuar el mensaje a las características del canal óptico. Esta interfaz a menudo incorpora también un convertidor de código; por ejemplo, en la trocal E4 se utiliza el código 5B/6B. Las fuentes de luz comúnmente utilizadas son el diodo electroluminiscente (LED) y el láser de inyección, pues estos dispositivos se pueden modular en forma directa a velocidades apropiadas para la mayoría de las aplicaciones prácticas, el acoplamiento óptico fuente/fibra se puede realizar sin mucha pérdida de potencia luminosa y su costo es moderado.

Los LEDs son dispositivos más sencillos con una duración de vida superior a la de los láseres. El LED tiene una característica de transferencia Potencia Luminosa vs Corriente como se muestra en la Fig. 9.13(a).

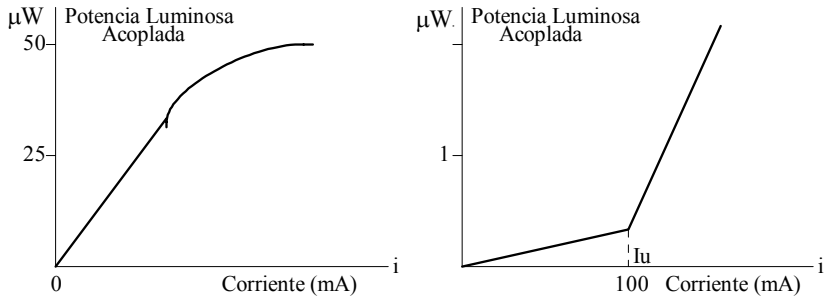


Fig. 9.13. Curvas Características de las Fuentes de Luz.

Un LED de alto rendimiento, con una corriente de accionamiento de 100 mA, puede acoplar hasta 100 μW de potencia luminosa en una fibra de 50 micras de diámetro a una longitud de onda de 0,8 micras. Como la caída de tensión de un LED de 100 mA es de unos pocos voltios, el rendimiento total del sistema es relativamente bajo: menos del 0,01%; pero, por otro lado, el LED se puede modular directamente variando la corriente de accionamiento hasta frecuencias de 200 MHz, dependiendo del grado de impurezas que son, en definitiva, las que afectan el tiempo de vida de la recombinación de portadoras. El ancho de banda espectral de un LED que emite a una longitud de onda de 0,8 micras es de alrededor de $2x10^{13}$ Hz a la temperatura ambiente y el retardo total de los impulsos luminosos es de aproximadamente 5 ns/km. Como la característica de transferencia del LED es casi lineal, se puede utilizar para modular analógicamente (direct intensity modulation, DIM) un rayo de luz. Este mecanismo se puede utilizar para la transmisión de señales de televisión, en dispositivos sensores y en telemetría. En general, los sistemas analógicos ópticos son más complejos y costosos que los digitales.

En cuanto al láser, su característica de transferencia se muestra en la Fig. 9.13(b). La salida del láser para corrientes de accionamiento superiores a la corriente umbral I_u es coherente y por lo tanto el rendimiento de acoplamiento es mucho mayor que el del LED pudiendo llegar a los 20 dB.

Como la anchura espectral del láser es muy pequeña, la dispersión o retardo se reduce bastante, lo cual permite velocidades de conmutación de la luz mucho mayores que con el LED. Pero, por otra parte, el láser requiere una circuitería más compleja para compensar las variaciones del umbral con respecto al tiempo y la temperatura, es más sensible a daños de tipo eléctrico y su duración es menor que la del LED. En general, el láser se utiliza para transmisión a alta velocidad y a grandes distancias para las cuales los LEDs no son efectivos. Actualmente se están desarrollando LEDs para emitir a una longitud de onda de 1,3 micras, que es la región en la cual la atenuación y el retardo son mínimos en la mayoría de las fibras comerciales.

La función del demodulador óptico o detector óptico, Fig. 9.10, es la de convertir los impulsos luminosos recibidos en impulsos eléctricos. Los dispositivos detectores utilizados en la práctica son el fotodiodo PIN y el fotodiodo de avalancha, los cuales convierten la luz en corriente eléctrica. En la literatura se les denomina "convertidores instantáneos fotón-electrón", pues los fotones incidentes generan pares electrón-hueco produciendo una corriente eléctrica.

En un fotodiodo PIN típico, los fotones incidentes generan pares electrón-hueco a una velocidad máxima de un par por fotón. Esto corresponde a una "relación de conversión" máxima (o "responsividad") de 0,8 μA/μW a una longitud de onda de 0,8 micras. Los fotones incidentes que no son absorbidos (por ejemplo, reflejados) o aquellos cuyos pares se recombinan antes de producir una corriente eléctrica, determinan el rendimiento del fotodiodo, denominado "rendimiento cuántico". En la práctica la responsividad y el rendimiento cuántico son menores que 6,5 μA/μW y 0,75, respectivamente.

En general, la potencia luminosa que llega al receptor es del orden de un nanovatio. A las longitudes de onda comúnmente empleadas, aun un fotodiodo PIN de alto rendimiento produciría corrientes del orden de un nanoamperio. Estas corrientes tan pequeñas son severamente contaminadas con ruido térmico del equipo electrónico asociado, que es necesario aumentar la salida del detector antes de las etapas de amplificación. Esto se consigue con el fotodiodo de avalancha, el cual posee un mecanismo de "ganancia" intrínseca en el proceso de multiplicación de portadoras, tal como se muestra en la curva característica de la Fig. 9.14.

Para altos valores de ganancia, la pendiente de la curva es muy grande lo que hace más complicada la utilización de los fotodiodos de avalancha en relación con los fotodiodos PIN. En transmisión de datos por fibras ópticas utilizando fotodiodos de avalancha que operan a una longitud de onda de 0,8 micras, los voltajes de polarización inversa son del orden de los 300 V para una ganancia de 120 y un rendimiento cuántico del 90%. En general, los fotodiodos de avalancha se utilizan en sistemas de grandes distancias y capacidades.

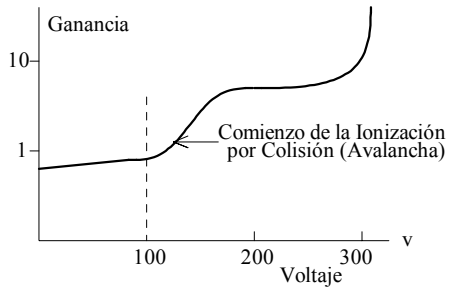


Fig. 9.14. Características del Fotodiodo PIN.

9.4.4. Areas de Aplicación

En general, las aplicaciones de las fibras ópticas se pueden considerar desde dos puntos de vista: uno desde el punto de vista del costo en relación con los sistemas existentes, y el otro desde el punto de vista de las características del ambiente de transmisión que "imponen" la utilización de las fibras ópticas.

Las aplicaciones en función del costo se caracterizan como una competencia de tecnologías, es decir, que siempre habrá formas alternas para efectuar alguna función siendo todas igualmente satisfactorias para el usuario. Cuando emerge una nueva tecnología, ésta debe poseer todas las ventajas de las tecnologías existentes y además poseer algunas ventajas adicionales que puedan compensar la diferencia de costo en relación con las existentes. Por ejemplo, para ser económicamente competitiva, el número de canales transmitidos por fibra debe ser de 10 a 100 veces superior al transmitido sobre un par de conductores metálicos. Esto quiere decir que las distancias deben ser lo suficientemente grandes para que el ahorro en costos de transmisión por medios ópticos compense el costo de los multiplexores requeridos para combinar esos canales. De allí la creciente aplicación de las fibras ópticas en sistemas troncales, por ejemplo, para reemplazar las troncales de las jerarquías norteamericana o europea.

Puede suceder también que una nueva tecnología posea atributos muy particulares que la hagan insustituible aunque su costo respecto a los sistemas existentes sea superior. Esos nuevos atributos permiten la aplicación de la nueva tecnología en funciones que anteriormente no eran posibles. Por ejemplo, las fibras ópticas, que no irradian energía, ofrecen grandes ventajas sobre los conductores metálicos en ambientes hostiles donde el

ruido eléctrico e interferencias de cualquier origen son muy severos, en donde haya peligro de explosión por altas concentraciones de gases, en atmósferas húmedas, calientes o altamente corrosivas, y en donde el espacio y peso son críticos. Además, los repetidores ópticos se pueden espaciar a mayores distancias (hasta 100 km) comparado con los 1800 metros de los sistemas digitales por cable convencionales. Otra de las ventajas de las fibras en comparación con los medios metálicos es su gran ancho de banda. Actualmente se puede alcanzar velocidades hasta 10^{14} bps; este gran ancho de banda hace posible la transmisión combinada de voz, datos y video. Estas características especiales imponen la aplicación de las fibras ópticas como un medio de transmisión seguro, confiable y económicamente rentable. Nótese, sin embargo, que el costo de un sistema de transmisión óptica de corta distancia y hasta una velocidad de 20 kbps generalmente es mucho más alto que si se utilizara medios metálicos. El lector debe estar atento entonces a estos aspectos económicos, a menos que se prevea un aumento futuro en la capacidad de transmisión o el medio así lo imponga.

En la Bibliografía el lector encontrará mucha más información.

9.5. TRANSMISION DE SEÑALES DIGITALES POR MICROONDAS

9.5.1. Introducción

La transmisión por radio en línea visual generalmente se efectúa en la gama de frecuencias de microondas. Las frecuencias de microondas comúnmente empleadas en sistemas públicos están en la gama de 2, 4, 6 y 11 GHz, mientras que los sistemas estatales y militares se ubican en la gama de 7 a 8 GHz. La transmisión depende primordialmente de la línea visual directa y libre de obstáculos entre las antenas transmisora y receptora. Las ondas reflejadas en la atmósfera (ondas celestes) pueden recibirse también, pero ello no es deseable ni práctico puesto que el desfase entre las ondas directa y reflejada produciría una gran interferencia destructiva (fading). Las únicas ondas reflejadas que se permiten y esto porque no pueden ser evitadas, son aquellas producidas por reflexión en el suelo; sin embargo, el efecto de esta interferencia se reduce utilizando antenas de gran directividad y ajustando las alturas correspondientes.

En transmisión en línea visual se puede permitir distancias, llamadas comúnmente “radioenlaces”, de hasta 180 km, dependiendo de la limpieza de la trayectoria, de la altura de las antenas y de las condiciones climáticas. La longitud de un enlace promedio es del orden de los 50 km con potencias en antena de 1 a 5W. En la Fig. 9.15 se muestra un radio enlace típico.

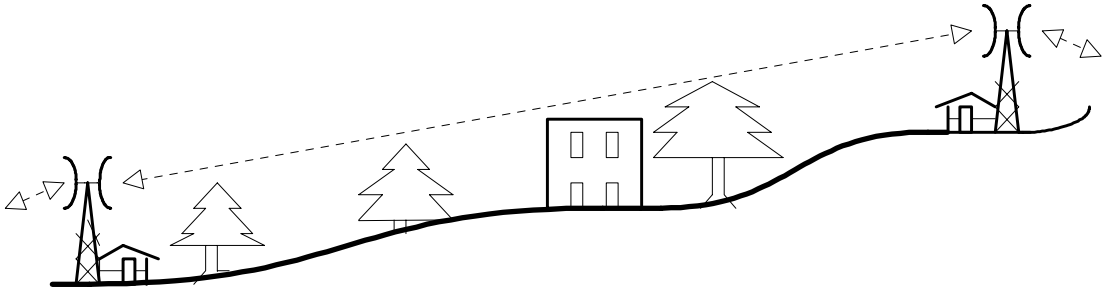


Fig. 9.15. Enlace Típico de Microondas

La descripción general de la propagación de microondas se aplica a todo tipo de sistema de microondas que funcione en línea visual, ya sea que esté destinado a la transmisión de señales digitales en TDM o señales analógicas en FDM. Las señales de información se pueden transmitir en diversas formas de modulación (amplitud, frecuencia o fase); sin embargo, en la práctica es más común el método de modulación de frecuencia o de fase porque facilita la aplicación del control automático de ganancia (CAG) y por cuanto la linealidad de los circuitos de radiofrecuencia (RF) o de frecuencia intermedia (FI) no es imperativa.

En la transmisión de señales digitales, por ejemplo datos o voz, también se prefiere la modulación de frecuencia o de fase pues la envolvente de la portadora es esencialmente constante. Por lo tanto, los equipos de microondas FM/FDM proyectados originalmente para transmitir señales analógicas (voz o video), también resultan apropiados para transmitir señales digitales. Estos equipos contienen todos los elementos necesarios para una transmisión digital satisfactoria y confiable. Evidentemente, hay que utilizar un módem para convertir las señales digitales en formas compatibles (FSK, PSK, DPSK, etc.) con el sistema de transmisión. En los equipos modernos, los multiplexores, los módems y los transceptores vienen ya integrados en una sola unidad.

9.5.2. Comportamiento de los Sistemas Digitales de Microondas

Los sistemas analógicos FDM de transmisión por microondas están expuestos a sufrir desmejoras debido a factores de retardo y distorsión producidos por no linealidades dentro del sistema de radio, por ruido de agitación térmica y desvanecimiento en el trayecto de propagación. Estos factores aumentan el ruido en el umbral o punto de silencio de los receptores afectando el nivel de interferencia de RF entre canales. Por otro lado, el desempeño de los sistemas de transmisión digital por cable está sujeto a sufrir deterioros por la presencia de señales eléctricas no gaussianas, tales como impulsos de ruido procedentes del equipo de conmutación, diafonía o intermodulación entre pares, y descargas producidas por disturbios atmosféricos.

En los sistemas digitales TDM de microondas, el comportamiento se ve afectado principalmente por las interferencias de RF de alto nivel entre canales y por desvanecimiento de propagación por trayectos múltiples, los cuales introducen un excesivo porcentaje de errores en los trenes de impulsos. La niebla y la lluvia afectan también el

comportamiento, pues producen una gran atenuación en la parte alta de la gama de frecuencias de microondas (sobre 10 GHz).

La medida más significativa del desempeño o comportamiento de un sistema de transmisión digital es el porcentaje de dígitos en error (BER) a la salida del desmultiplexor digital del receptor. El BER depende principalmente del valor de la relación S/N a la entrada del receptor. Por ejemplo, una relación S/N de 10 dB significa que el valor eficaz de la señal es 10 dB mayor que el valor eficaz del ruido de agitación térmica. El desempeño del sistema se determina midiendo la relación S/N con un BER determinado. Generalmente, la calidad de recepción de la voz en un sistema telefónico digital comienza a decaer notablemente cuando el BER baja de 10^{-3}; al llegar a ese punto se escuchan chasquidos (clicks) mezclados con la voz. Un BER de 10^{-6} es el mínimo aceptable como norma en los sistemas digitales para transmisión de datos a 2400 bps. Normalmente los sistemas digitales se proyectan de manera que el BER sea muy inferior a 10^{-9} la mayor parte del tiempo y sólo llegue a un nivel de 10^{-6} durante períodos muy cortos.

9.5.3. Comparación Transmisión Digital TDM vs Transmisión Analógica FDM

En los sistemas digitales de radioenlaces por microondas se puede especificar un bajo nivel de recepción de señales de RF (cerca del umbral de detección) cuando el sistema funciona en clima seco o a gran altura, en una atmósfera libre de desvanecimientos, como sucede en los trayectos cortos o que pasan por un terreno escabroso en donde se reflejan las ondas en múltiples direcciones. Este requisito es contrario al de los sistemas de radioenlaces analógicos FDM, en los que el nivel de las señales debe ser bastante elevado, aun cuando el ambiente de propagación sea ideal, con el fin de superar el nivel de ruido de agitación térmica y poder satisfacer las especificaciones de transmisión de alta calidad con bajo nivel de ruido. Sin embargo, igual a lo que sucede en los sistemas de transmisión por cable, el BER de los sistemas digitales desmejora cuando impulsos de interferencia se introducen en los trenes de impulsos de la información útil, porque dichos impulsos interferentes pueden descodificarse como si fueran dígitos de información.

En los sistemas digitales por microondas se produce un BER bajo el umbral de 10^{-6} cuando la relación S/N de entrada al receptor disminuye, ya sea porque el nivel de las señales desciende hasta el umbral por desvanecimiento o debido al elevado nivel de interferencia en RF dentro de la banda o entre canales. La relación S/N con respecto a un umbral de detección con un BER de 10^{-6}, es decir, el valor de pérdida de recepción de las señales, depende de la clase de codificación digital (PCM directa, duobinaria de tres niveles, HDB3, etc.) y del método de detección del receptor (discriminación, detección coherente, etc.). En general, existe una relación directa entre la relación S/N, decibel por decibel, con el nivel de recepción de las señales de RF. En los sistemas digitales por microondas esta relación sólo reviste importancia a un nivel próximo al umbral de ruido.

En comparación con los sistemas analógicos en FDM, el rendimiento de los sistemas digitales TDM no se perjudica mayormente durante períodos de desvanecimiento moderado. Los sistemas digitales son mucho más tolerantes a las interferencias y el BER sólo aumenta en forma considerable cuando la potencia de la señal útil es del mismo orden que la potencia del ruido en el umbral de error. Además, a diferencia de los sistemas

analógicos FM/FDM, el efecto de la interferencia de las señales es independiente, en gran parte, de las características espectrales de las señales interferentes.

En resumen, una señal digital TDM ocupará un ancho de banda mayor que una señal analógica AM/FDM equivalente (equivalente en el sentido de la misma cantidad de información transmitida) y pudiera pensarse que la transmisión de señales digitales TDM por microondas pudiera resultar no ser económica. Sin embargo, los sistemas digitales TDM tienen los mismos anchos de banda que los sistemas analógicos FM/FDM. Por consiguiente, hay en cierta forma un ahorro en espectro y las repetidoras intermedias son de diseño más sencillo y de desempeño más eficaz, lo cual compensa el costo más elevado de los equipos terminales digitales (multiplexores, conversores analógico-digitales y viceversa, etc.).

Considerando la probabilidad de error total BER y la complejidad de los equipos, el método de modulación digital más empleado en los radioenlaces de línea visual es el PSK 4-ario y 8-ario. Para altas velocidades de transmisión se utiliza esquemas M-QAM con $16 \leq M \leq 1024$.

9.5.5. Características de la Trayectoria de Propagación

Debido a su pequeña longitud de onda, las microondas poseen muchas de las propiedades de las ondas luminosas. En efecto, las microondas experimentan refracciones y desviaciones en la atmósfera y están sujetas a obstrucción, difracción y reflexión al encontrar obstáculos tales como montañas, edificios altos, grandes extensiones de agua o terreno plano y capas atmosféricas. Si bien estas ondas se desplazan a la velocidad de la luz en un vacío perfecto, en la atmósfera la velocidad se reduce y varía de acuerdo con los cambios de densidad y contenido de humedad del aire.

La variación gradual del aire puede producir una refracción o desviación continua de las ondas de radio, de manera que el haz de transmisión se curva gradualmente hacia la capa atmosférica más densa (las más bajas). Debido a que la atmósfera se rarifica a medida que aumenta la altura, las ondas de radio y en menor grado las ondas luminosas no siguen una trayectoria rectilínea sino que normalmente se desvían hacia la tierra. Los trayectos de propagación usualmente se prolongan más allá del horizonte o línea visual, debido a que las ondas de radio son más sensibles que las luminosas a las tres gradientes de densidad atmosférica: presión, temperatura y humedad, y generalmente la atmósfera no es homogénea sino que se estratifica en capas de diversa densidad o varía en forma continua. Esta falta de homogeneidad presenta un medio de propagación irregular a la parte frontal del haz de microondas, lo que produce una propagación no sólo del haz principal o rayo directo sino también muchos otros haces o rayos secundarios refractados o reflejados que llegan a la antena de recepción con diversas fases y amplitudes. La amplitud resultante de la señal recibida, que es la suma del rayo principal más los secundarios, está sujeta a variaciones en el tiempo desde 6 dB sobre el nivel normal de recepción hasta más de 40 dB bajo dicho nivel. Si la profundidad de desvanecimiento es mayor que el margen que para contrarrestarlo tiene el equipo, se introduce un BER mayor que 10^{-6} en el canal digital lo cual anula por completo la señal útil. El cálculo del punto de reflexión es de gran importancia en el diseño de radioenlaces.

Afortunadamente, la mayoría de los períodos de desvanecimiento se debe a trayectorias múltiples o reflexiones especulares del terreno y son de muy corta duración. Por ejemplo, en los sistemas de microondas de 2 GHz este tipo de desvanecimiento se presenta en raras ocasiones y no sería suficiente para tener que agregar protección mediante diversidad de espacio o de frecuencia o tomar otras medidas especiales. Aparte de estas pérdidas momentáneas de señal, puede ocurrir desvanecimientos por atenuación durante largos períodos debido a obstrucción parcial de la trayectoria o por atrapamiento del haz. Sin embargo, estas atenuaciones generalmente se producen en trayectos de poca altura libre sujetos a reflexiones en terrenos planos o por extensiones de agua, tales como pantanos, lagos, campos irrigados, etc. Un ingeniero de comunicaciones con suficiente experiencia puede reconocer estas condiciones geográficas y tomar las medidas correspondientes, como ser la de ajustar la altura de las antenas o simplemente desviar la trayectoria de propagación hacia otro punto.

En la Fig. 9.16 se muestra un radioenlace típico y su diagrama de niveles en el cual se indican todos los parámetros de diseño.

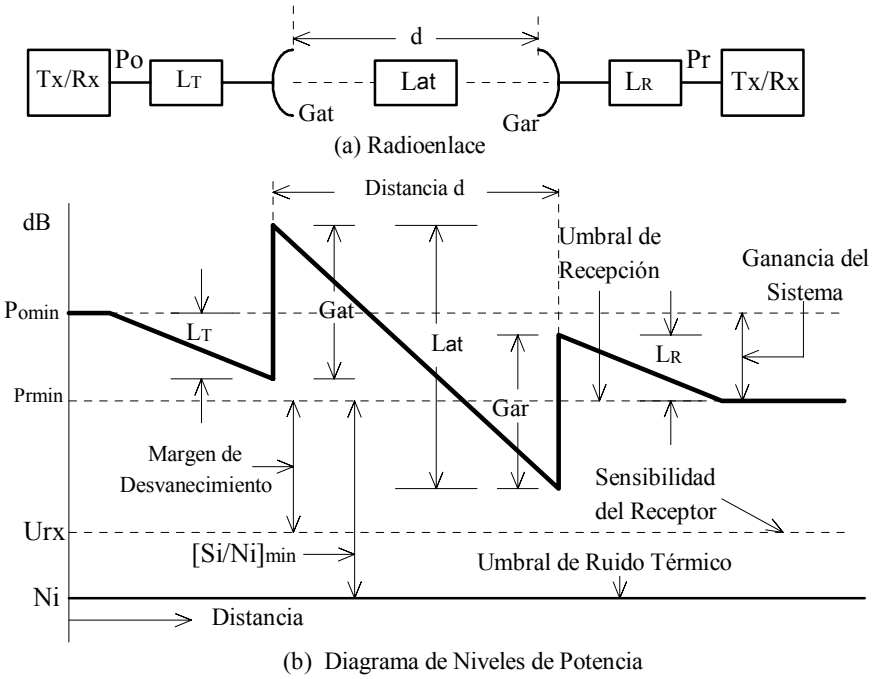


Fig. 9.16. Diagrama de Niveles en un Radioenlace de Microondas

De la Fig. 9.16,

P_{omin} = Potencia de salida mínima del transmisor, en dBm

P_{rmin} = Potencia de entrada al receptor, en dBm

L_T = Pérdidas en la línea de transmisión antena-transmisor, en dB

L_R = Pérdidas en la línea de transmisión antena-receptor, en dB

G_{at} y G_{ar} = Ganancias de las antenas transmisora y receptora, en dB

L_{at} = Pérdidas en la trayectoria, en dB

d = separación entre las antenas, en km

De la Fig. 9.16, podemos ver que

$$P_{o\,min} = \left[\frac{S_i}{N_i}\right]_{min} + \left[N_i + L_T + L_{at} + L_R\right] - \left[G_{at} + G_{ar}\right] \qquad \text{dBm}$$

A continuación vamos a describir brevemente algunos de los parámetros que afectan la transmisión de señales digitales por microondas. Las fórmulas para el cálculo de estos parámetros las puede encontrar el lector en, por ejemplo, [Freeman, 1987]. Un tratamiento más extenso está fuera de los límites que nos hemos impuesto.

Pérdidas en el Espacio Libre

La pérdida de trayectoria en el espacio libre se define como la pérdida incurrida por una onda electromagnética conforme se propaga en una línea recta a través del espacio libre sin ninguna absorción o reflexión de energía de los objetos cercanos. Esta pérdida, normalmente expresada en dB, depende de la frecuencia de la señal y de la distancia de la trayectoria y viene dada por la siguiente expresión vista en el Ejemplo 8.5 del Capítulo VIII:

$$L_{dB} = 92{,}44 + 20\log_{10}(d_{km}) + 20\log_{10}(f_{GHz}) \quad \text{dB} \qquad (9.11)$$

Por ejemplo, un enlace cuya frecuencia de portadora es de 6 GHz y cuya distancia es de 50 km, experimenta una pérdida de trayectoria de 142 dB.

Las pérdidas en el espacio libre incluyen también una componente de atenuación debida a la absorción gaseosa atmosférica, Lg, la cual se agrega a la pérdida L_{dB}. La absorción gaseosa depende de la longitud del enlace. Los valores estimados para la componente de absorción gaseosa son: 0,3 dB para trayectorias de hasta 30 km; 0,6 dB para trayectorias entre 30 y 60 km; 1,0 para trayectorias entre 60 y 100 km; 1,3 dB para trayectorias entre 100 y 130 km; y 1,6 dB para trayectorias de 130 a 160 km.

Las pérdida total en la trayectoria será entonces

$$L_{at} = L_{dB} + L_g \quad \text{dB} \qquad (9.12)$$

Ruido en el Receptor

Las fluctuaciones de nivel de las señales de radiofrecuencia, causadas por desvanecimiento, se eliminan en el receptor mediante circuitos de control automático de ganancia (CAG) antes de aplicar la señal al demodulador. La mayoría de los receptores de microondas están provistos de circuitos CAG en la etapa de frecuencia intermedia (70 MHz), que es la frecuencia de conversión de las señales en el mezclador. Por lo tanto, la

ganancia del receptor varía de acuerdo con el nivel de recepción de la señal, elevándose la ganancia cuando disminuye la intensidad de la señal debido a desvanecimiento, y disminuyendo cuando la intensidad aumenta. Cualquier ruido interferente que ingresa al receptor, así como el ruido que se genera en los circuitos de entrada, se amplifica junto con la señal útil, de manera que cuando baja la intensidad de señal el nivel del ruido sube proporcionalmente con lo que se afecta la relación S/N.

En la transmisión por microondas en línea visual se introduce un ruido de fondo procedente de la agitación térmica que es función de la temperatura, conocido también como el "umbral de ruido térmico", el cual viene dado mediante la expresión (9.7).

$$N_i = -198{,}6 + 10\log_{10}(T) + 10\log_{10}(B) + N_F \quad \text{dBm} \qquad (9.7)$$

Por ejemplo, de (9.7), a la temperatura ambiente (290 kelvins) este ruido es de –174 dBm por MHz dentro del ancho de banda del receptor; si el ancho de banda del receptor es de 10 MHz, la potencia de ruido será de –104 dBm. A este ruido de fondo debe agregarse el ruido inherente de la etapa de entrada del receptor y que se especifica como una cifra de ruido N_F en dB. Esta cifra sirve para indicar el nivel adicional de ruido que penetra en el mezclador en comparación con el ruido térmico de –174 dBm/MHz. La cifra de ruido varía entre 4 y 12 dB, y depende de la clase de receptor y la banda de operación utilizada. Por ejemplo, si la cifra de ruido es de 10 dB, la potencia total de ruido en el receptor a 10 MHz será de (-104 + 10) = -94 dBm.

En general, la relación S/N mínima debe quedar de 10 a 20 dB sobre el ruido de agitación térmica (valor que depende del método de codificación y detección de las señales digitales) para funcionar con un BER máximo permitido de 10^{-6} en el umbral de detección del receptor.

Umbral de Recepción

El umbral de recepción es la potencia mínima de la portadora a la entrada del receptor que proporcionará una relación S/N mínima y un BER máximo para recepción normal, como se muestra en la Fig. 9.16. Por ejemplo, si la relación S/N mínima requerida para un BER máximo de 10^{-6} en un sistema es de 24 dB y el ancho de banda es de 10 MHz con una potencia total de ruido de –94 dBm, el umbral de recepción es de $[24\,\text{dB} + (\text{-}94\,\text{dBm})] = \text{-}70\,\text{dBm}$. Valores de potencia de portadora superiores a –70 dBm asegurarán una recepción sin problemas.

Margen de Desvanecimiento

El margen de desvanecimiento es uno de los factores más importantes que determinan el rendimiento de los sistemas de microondas. Este margen es la reserva de potencia de que dispone el receptor para contrarrestar los efectos de desvanecimientos atmosféricos cualquiera que sea su origen, como se muestra en la Fig. 9.16. Por ejemplo, si el nivel normal de entrada de señales al receptor es de –40 dBm y la sensibilidad del receptor es de –70 dBm, el margen de desvanecimiento será de [-40 –(-70)] = 30 dB para mantener el BER máximo. Si el desvanecimiento es superior a los 30 dB, se sobrepasarán los límites del BER, pues el nivel de la potencia recibida será inferior a la sensibilidad del receptor.

Nótese que cuanto más baja es la sensibilidad del receptor, mayor será el margen de desvanecimiento.

El grado de protección contra el desvanecimiento depende de la disposición del sistema. Mientras más corto es el enlace o mientras más adecuados para la propagación sean el clima y el terreno, menor es el margen adicional de potencia para mantener la confiabilidad especificada. El margen de potencia contra el desvanecimiento debe ser apropiado para mantener al mínimo el BER especificado en la confiabilidad del sistema. El margen necesario se determina con base en las características del trayecto específico, la confiabilidad de propagación del sistema y el uso o la omisión de protección por diversidad. El margen de desvanecimiento se puede incluir como pérdida en el cálculo de la pérdida neta del sistema. Algunos de estos parámetros están especificados y normalizados por el UIT-R.

Pérdida Neta y Ganancia de la Trayectoria

La pérdida neta del trayecto estipula el total de atenuación o pérdida de intensidad que sufren las señales de microondas a lo largo de la trayectoria de propagación. Se compone de la pérdida en el trayecto, el margen de desvanecimiento, la ganancia de las antenas, las pérdidas en cables y guías de ondas, pérdidas en el equipo de radio y cualquiera otra pérdida entre las antenas de transmisión y recepción.

Asociada con la pérdida neta del trayecto se puede definir la "ganancia del sistema". En su forma más sencilla, la ganancia del sistema es la diferencia entre la potencia nominal de salida del transmisor y la potencia mínima de entrada requerida por un receptor. La ganancia del sistema debe ser mayor o igual que la suma de todas las ganancias y pérdidas incurridas por una señal a medida que se propaga desde el transmisor hasta el receptor. En esencia, representa la pérdida neta de un sistema de radio. La ganancia del sistema se utiliza para predecir la confiabilidad de un sistema para determinados parámetros del sistema. La ganancia Gs del sistema se puede definir mediante la expresión

$$Gs = P_{omin} - P_{rmin} \quad dB$$

Donde: Gs = ganancia del sistema, dB

P_{omin} = potencia mínima de salida del transmisor, dBm

P_{rmin} = potencia mínima de entrada al receptor para una relación S/N y BER especificados (por ejemplo: S/N = 20 dB y BER = 10^{-6}), dBm

Esta ganancia es constante, pues ella depende de las pérdidas y ganancias presentes en el enlace. Entonces, en general,

$$Gs = P_o - P_r \quad dB$$

Donde P_o y P_r son las potencias de salida del transmisor y de entrada al receptor, respectivamente. Entonces, de la Fig. 9.16,

$$Gs = \text{Pérdidas} - \text{Ganancias} = (L_R + L_{at} + L_T) - (G_{at} + G_{ar}) \quad dB$$

El término "Pérdidas" es simplemente la pérdida neta total del trayecto mientras que las "Ganancias" son las ganancias de las antenas transmisora y receptora. Debido a que la

ganancia del sistema indica una pérdida neta, las pérdidas están representadas con valores dB positivos mientras que las ganancias están representadas con valores dB negativos.

El lector interesado encontrará en [Freeman, 1987] una gran cantidad de información para el diseño de sistemas de radio desde 1 GHz hasta 100 GHz.

♣ **Ejemplo 9.4**

Consideremos un radioenlace de microondas, Fig. 9.16(a).

En este radio enlace se tiene:

Distancia entre antenas, $d = 43$ km

Frecuencia de operación, $f = 4{,}041$ GHz

Ancho de Banda, $B = 10$ MHz

Temperatura, $T = T_o = 290$ kelvins

Pérdidas en las líneas de transmisión, $L_T = L_R = 4{,}7$ dB

Ganancia de las antenas, $G_{at} = G_{ar} = 30$ dB

Cifra de Ruido del Receptor, $N_F = 10$ dB

Pérdidas por absorción gaseosa, $L_g = 0{,}6$ dB

Sensibilidad del Receptor, Urx = - 90 dB

Relación S/N mínima para un BER de 10^{-6}, $[S/N]_{min} = 20$ dB

Se pide:

(a) Calcular la potencia mínima necesaria del transmisor, la ganancia del sistema y el margen de desvanecimiento del receptor

(b) Si la potencia del transmisor aumenta al doble, calcular la nueva relación S/N en el receptor y el nuevo margen de desvanecimiento

Solución:

(a) Pérdidas en el espacio libre

$$L_{dB} = 92{,}4 + 20\log_{10}(d_{km}) + 20\log_{10}(F_{GHz}) \quad \text{dB}$$

$L_{dB} = 137{,}199$ dB

Pérdidas totales en la trayectoria,

$L_{at} = L_{dB} + L_g = 137{,}799$ dB

Umbral de Ruido a T = 290 kelvins

$N_i = -174 + 10\log_{10}(B) + N_F$ dBm

$N_i = -94$ dBm

Potencia mínima de salida del transmisor

$$P_{omin} = [S_i / N_i]_{min} + [N_i + L_t + L_{at} + L_r] - [G_{at} + G_{ar}] \quad \text{dBm}$$

P_{omin} = 13,199 dBm = 20,89 mW

De la figura, la ganancia Gs del sistema es

$$Gs = P_{omin} - P_{rmin} = (L_t + L_{at} + L_r) - (G_{at} + G_{ar})$$

Gs = 87,199 dB

También, $P_{rmin} = P_{omin}$ - Gs = -74 dBm

y el margen de desvanecimiento en el receptor,

$M_{rx} = P_{rmin} - U_{rx}$ = 16 dB

En la Fig. 9.17 se muestra el diagrama de niveles de potencia de este enlace.

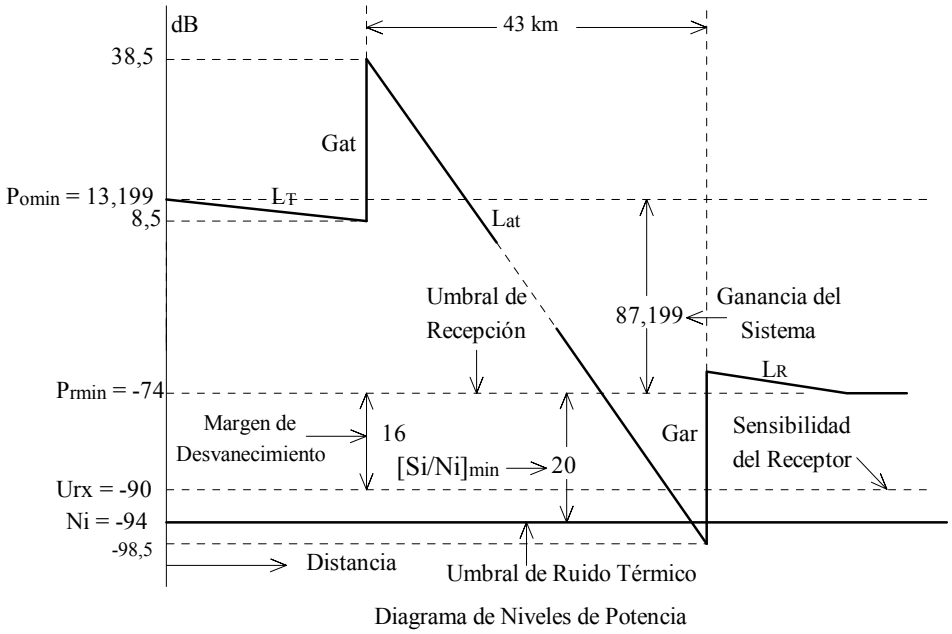


Fig. 9.17. Diagrama de Niveles de Potencia

(b) Aumentar la potencia del transmisor al doble de la potencia mínima equivale a un aumento de 3 dB; por lo tanto,

Po = P_{omin} + 3 = 16,199 dBm

Como la ganancia Gs del sistema es constante, se verifica que

Gs = Po - Pr, de donde Pr = Po - Gs; Pr es la potencia recibida en el receptor. Por lo tanto,

Pr = Po - Gs = - 71 dBm

La nueva relación SN vendrá dada por la expresión

S/N = Pr - Ni = 23 dB

El nuevo margen de desvanecimiento del receptor será

Mrx = Pr - U_{rx} = 11 dB

Nótese que el aumento de 3 dB en la potencia, inmediatamente se reflejó en la relación S/N y en el margen de desvanecimiento del receptor, los cuales aumentaron también en 3 dB.

♣

Ganancia de Antena

El rendimiento de una antena parabólica comercial está entre 55% y 65%, y generalmente es muy buena práctica en un primer análisis tomar el valor de 55%. En este caso, la ganancia de la antena se puede calcular a partir del diámetro del reflector y la frecuencia de operación mediante la fórmula [Freeman, 1987],

$$G_{adB} = 20 \log_{10} (D) + 20 \log_{10} (F_{GHz}) + 17{,}8 \quad \text{dB} \qquad (9.8)$$

Donde, D = diámetro del reflector, en metros

F_{GHz} = frecuencia de operación, en gigahertz

9.6. CONFIGURACION TIPICA DE UN SISTEMA DIGITAL DE MICROONDAS

En la Fig. 9.18 se muestra la configuración general de un sistema de transmisión digital típico basado en el multicanal de la jerarquía europea (30 canales básico).

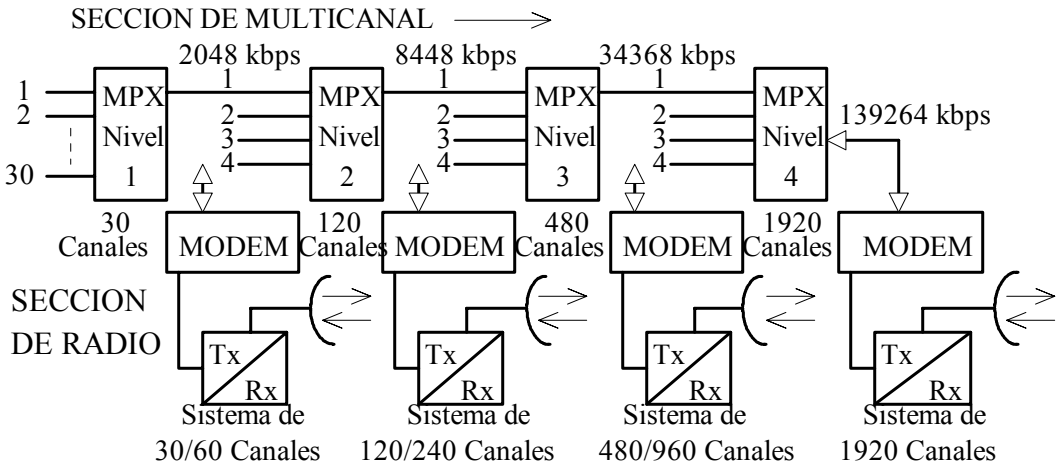


Fig. 9. 18. Configuración de un Sistema Digital de Microondas.

En los módems se efectúan las operaciones de modulación/demodulación digital en 4-PSK, 8-PSK, M-QAM y la traslación a una frecuencia intermedia en FM de 70 MHz. El

equipo de radio comprende principalmente los transceptores (Tx/Rx) de microondas, el equipo de supervisión y control, y el sistema de antenas.

En general, se emplean dos modalidades en la transmisión: con reserva y sin reserva. La transmisión con reserva es la más aceptada y ha sido adoptada por su confiabilidad. Este sistema comprende una o más rutas activas o de trabajo más las rutas de reserva (generalmente una). En este caso hay que utilizar un conmutador automático o combinador que engancha el canal de reserva en caso de falla en una ruta activa.

El equipo de supervisión y control se encarga de la supervisión remota y monitoreo de las diferentes funciones y condiciones de operación del sistema. En particular, es el encargado de detectar fallas en las rutas y la ejecución de las operaciones de conmutación correspondientes. Incluye también los canales de servicio y mantenimiento, los cuales se insertan o extraen antes o después de los módems, según el caso. En la mayor parte de los sistemas la supervisión y control remoto se operan desde una estación de control remota.

El equipo de antena comprende las antenas, las redes híbridas, los cables o guías de onda y su correspondiente equipo de presurización. Dependiendo del tipo de diversidad (frecuencia o espacio), se tendrá una o dos antenas por estación en cada dirección de la trayectoria del enlace.

9.6.1. Tipos de Estación

En un sistema digital de microondas se tiene tres tipos de estación: estaciones terminales (transmisión y recepción), estaciones repetidoras y estaciones de entrada/salida (drop/insert, D/I).

Estación Terminal

En la Fig. 9.19. se muestra una forma de estación terminal tipo 480 CH N+1 de la jerarquía europea.

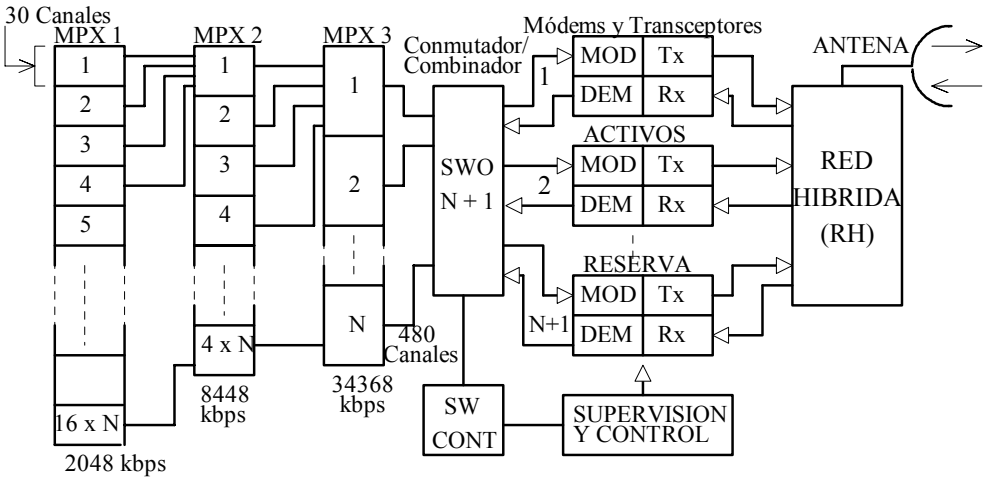


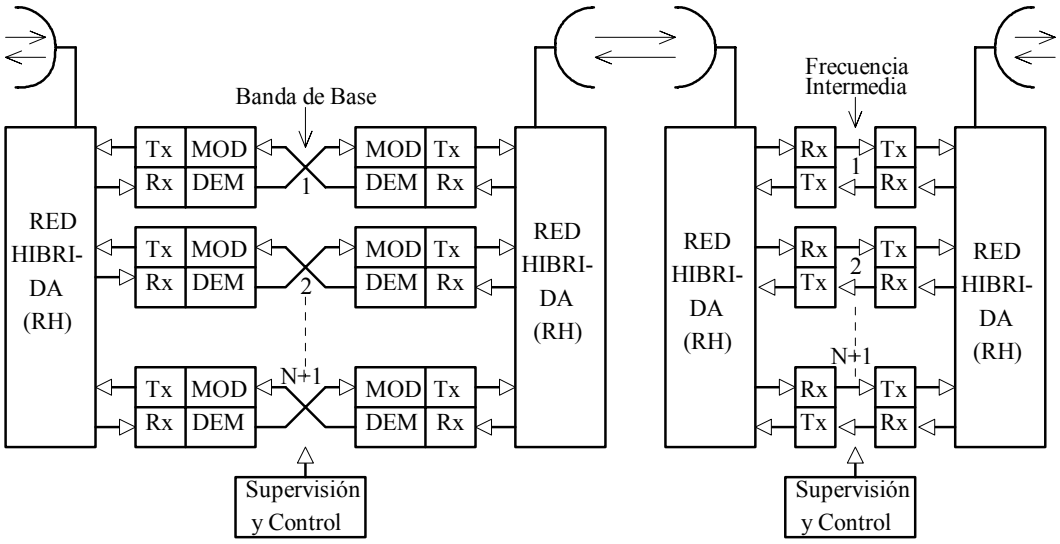
Fig. 9.19. Estación Terminal Transmisora. Sistema 480 CH N + 1.

N+1 indica que hay N vías o rutas activas de 480 canales más una vía o ruta de reserva también de 480 canales. Por ejemplo, en un sistema de 1980 canales, N = 4, de modo que habrá 4 rutas activas de 480 canales más la ruta de reserva. Las frecuencias de cada ruta dependerán de los planes de modulación empleados, de acuerdo con el UIT-R.

El equipo de control de conmutación (SW CONT) controla la conmutación automática entre las rutas activas y la de reserva. Sin embargo, en un sistema 1 + 1, que veremos más adelante, no se necesita equipos de conmutación en el terminal de transmisión sino solamente en el de recepción.

Estaciones Repetidoras

Las estaciones repetidoras se clasifican en dos tipos: repetidoras en banda de base (con módem) y repetidoras heterodinas (sin módem). En ninguna de estas repetidoras se efectúa operaciones de conmutación. En la Fig. 9.20 se muestra estos dos tipos de repetidora.



(a) Repetidora en Banda de Base (b) Repetidora Heterodina

Fig. 9. 20. Tipos de Repetidora.

El ruido en un sistema de transmisión digital se puede evitar demodulando y volviendo a modular las señales a nivel de banda de base; como consecuencia, el comportamiento de una repetidora en banda de base es mucho mejor que el de una repetidora heterodina. Sin embargo, las estaciones repetidoras en banda de base son más costosas pues hay que incorporarles los circuitos de modulación/demodulación digitales. Cuando en un sistema el número de repetidoras es alto y si la degradación producida por la heterodinación es aceptable, se puede utilizar repetidoras heterodinas para disminuir el costo del sistema.

Para evitar interferencias producidas por la misma estación, las frecuencias de recepción son diferentes de las frecuencias de transmisión. Estas frecuencias están

normalizadas por el UIT-R; por ejemplo, en su Recomendación 383-1 el UIT-R establece que en la banda de 6 GHz para la frecuencia de transmisión f_1 = 5945,2 MHZ, corresponde una frecuencia de recepción $f_1^{'}$ = 6197, 24 MHz. El UIT-R, en su Recomendación 383-1, establece una fórmula general para el cálculo de estas frecuencias.

Estación de Entrada/Salida (D/I)

En una estación D/I los equipos de radio están colocados espalda con espalda, como se muestra en la Fig. 9.21. Nótese que esta estación está formada por dos estaciones terminales espalda con espalda. Estas estaciones se utilizan cuando en un punto de la trayectoria hay que agregar o extraer canales del flujo principal.

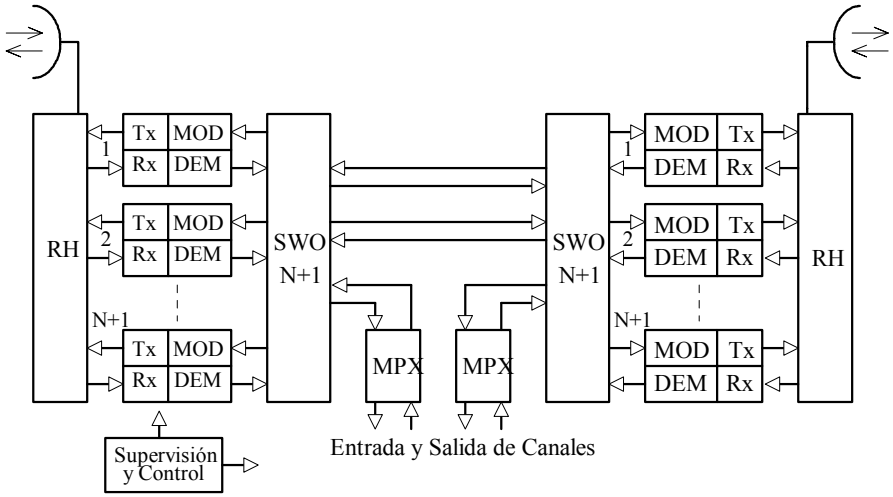


Fig. 9.21. Ejemplo de una Estación D/I.

9.6.2. Conmutación de las Rutas de Reserva

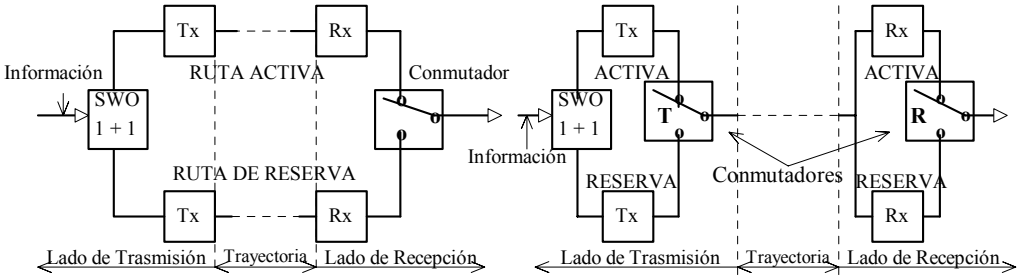
Con el fin de mantener alta la confiabilidad del sistema de transmisión, a las N rutas activas se le agrega una ruta de reserva, la cual es utilizada cuando falla alguna de las rutas activas. Dependiendo del numero de vías y de la forma de conmutación, se distingue dos clases: el Sistema 1 + 1 y el Sistema N + 1.

El Sistema 1 + 1

En el Sistema **1 + 1** se tiene una ruta activa y una de reserva, pero la forma de conmutación permite definir dos tipos de Sistema 1 + 1: el Sistema 1 + 1 de Trayectoria Gemela (Twin Path) y el Sistema 1 + 1 de Reserva en Caliente (Hot Standby). La configuración del Sistema 1 + 1 de Trayectoria Gemela se muestra en la Fig. 9.22(a).

En el Sistema 1 + 1 de Trayectoria Gemela se transmite la misma información sobre las rutas activa y de reserva, y el conmutador se coloca en el extremo receptor. Se utiliza dos frecuencias: una en la ruta activa y otra en la de reserva. Cuando en el lado de recepción se detecta una falla en la ruta activa, el conmutador pasa automáticamente a la ruta de reserva.

La configuración del Sistema 1 + 1 de Reserva en Caliente se muestra en la Fig. 9.22(b).



(a) Sistema 1+1 de Trayectoria Gemela (Twin Path) (b) Sistema 1+1 de Reserva en Caliente (Hot Standby)

Fig. 9.22. Sistemas de Reserva 1 + 1.

En el Sistema 1 + 1 de Reserva en Caliente (Hot Standby) se transmite solamente una salida de transmisor, generalmente el transmisor activo. Los transmisores y receptores trabajan a la misma frecuencia por lo que solamente se utiliza una sola frecuencia de transmisión. Si en el lado de recepción se detecta una falla en la vía activa, el conmutador R pasa al receptor de reserva. Si la falla es detectada en el lado de transmisión, el conmutador T pasa al transmisor de reserva.

El Sistema 1 + 1 Hot Standby es el más utilizado en la práctica.

En la Fig. 9.23 se muestra las estaciones terminales de un Sistema 1 + 1 Hot Standby típico.

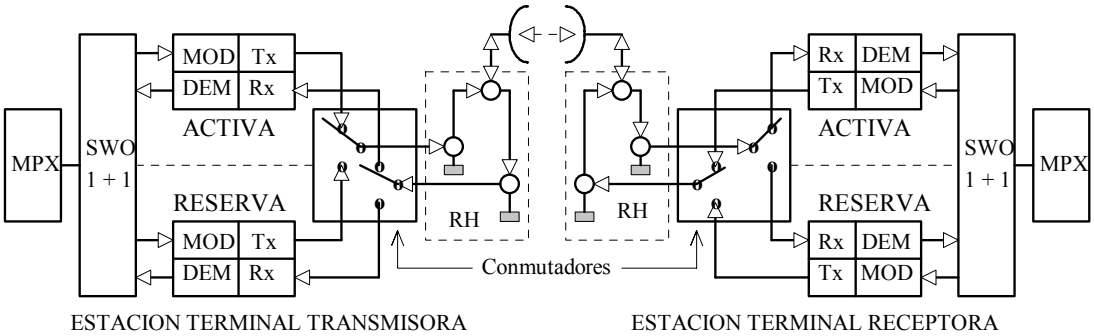


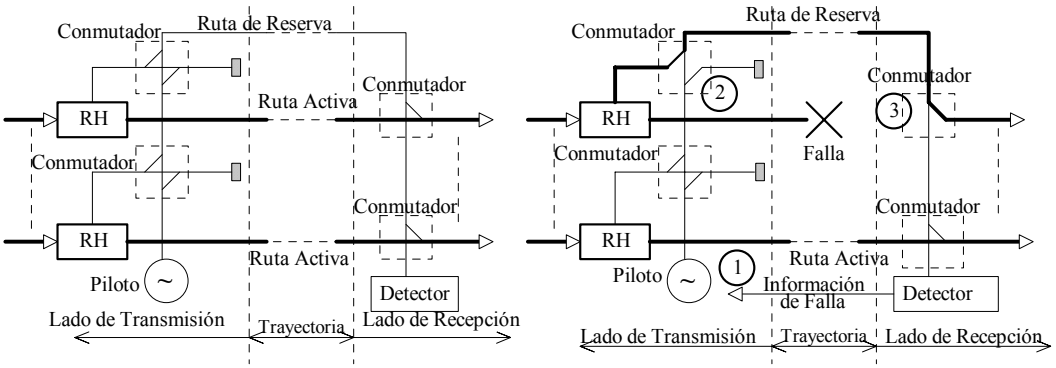
Fig. 9.23. Configuración práctica de un Sistema 1 + 1 Hot Standby

El Sistema N + 1

En el sistema **N + 1** tanto el lado de transmisión como el lado de recepción se conmutan a la ruta de reserva cuando ocurre una falla en una de las N rutas activas. En la Fig. 9.24(a) se muestra el Sistema N + 1 en condiciones normales de operación. Por la ruta de reserva se transmite una señal piloto para verificar constantemente su disponibilidad.

Cuando ocurre una falla en la ruta activa, Fig. 9.24(b), esta falla es detectada por el receptor de la correspondiente ruta, punto (1). Esta información se transmite al lado de

transmisión a fin de conmutar la ruta en falla hacia la ruta de reserva. Cuando la señal transmitida ha sido trasladada a la ruta de reserva, punto (2), el conmutador de recepción opera y completa la conmutación de la ruta en falla a la ruta de reserva, punto (3).



(a) Sistema N + 1 en Condición Normal (b) Sistema N + 1 en Condición de Falla

Fig. 9. 24. Método de Conmutación N + 1.

9.7. RESUMEN

Durante los últimos 100 años toda una serie de avances tecnológicos ha permitido establecer enlaces de transmisión de información con capacidades cada vez más altas y a distancias cada vez más largas. El desarrollo de la electrónica permitió el establecimiento de sistemas de portadora, mediante los cuales se podía enviar varias conversaciones en FDM sobre el mismo par de conductores. El número de canales de voz que podía concentrarse en conductores metálicos aumentó paulatinamente durante los años y con el empleo de las microondas y las fibras ópticas se puede obtener en la actualidad enlaces de muy alta capacidad de transmisión y a grandes distancias.

Como ayuda en el diseño de sistemas de transmisión, actualmente se cuenta con toda una normativa para la selección y utilización del medio más apropiado en una aplicación dada. Entre ellas están las normas emitidas por la Asociación de Industrias Electrónicas y la Asociación de Industrias de Telecomunicaciones (EIA/TIA) en la norma EIA/TIA 568A, a las cuales hay que agregar aquellas emitidas por el UIT-T.

En este capítulo solamente se describe a grandes rasgos el par trenzado, el cable coaxial, las fibras ópticas y las microondas.

El par trenzado es uno de los medios más utilizados para la transmisión de señales tanto analógicas como digitales y su alcance puede llegar a 15 km. El par trenzado se presenta en dos formas: el par trenzado sin apantallar (unshielded twisted pair, UTP) y el par trenzado apantallado (shielded twisted pair, STP), con diámetros típicamente de 0,4 a 0,8 mm. El cable UTP es el más utilizado y se encuentra especificado en la normativa de cableado EIA/TIA 568A, la cual establece un cable estándar de cuatro colores y contempla cinco categorías.

El cable coaxial es uno de los medios de transmisión más versátiles. Se emplea en casi todas las gamas de frecuencia para la transmisión de señales tanto analógicas como

digitales. Ellos se utilizan en una amplia variedad de instalaciones residenciales, comerciales e industriales; en radiodifusión, televisión por cable (CATV), redes de área local, circuitos cerrados de televisión y muchas otras aplicaciones. En este capítulo se describe sus principales características y se dan algunos ejemplos de su aplicación.

En este capítulo se describe las características de las fibras ópticas, sus mecanismos de propagación y la generación y detección de señales en sistemas de fibras ópticas. Se describe también el canal óptico y la modulación y detección electro-óptica, y algunas de sus ventajas y aplicaciones en la transmisión de información por las grandes troncales.

La transmisión por radio en línea visual generalmente se efectúa en la gama de frecuencias de microondas. Las frecuencias de microondas comúnmente empleadas en sistemas públicos están en la gama de 2, 4, 6 y 11 GHz, mientras que los sistemas estatales y militares se ubican en la gama de 7 a 8 GHz. En este capítulo se describe el comportamiento de los sistemas digitales por microondas, las características de propagación, los parámetros principales en un radioenlace (pérdidas, ruido, umbral de recepción, el margen de desvanecimiento y la pérdida y ganancia neta de la trayectoria).

Para complementar este tema, se muestra la configuración típica de un sistema digital por microondas; en particular, se describen los diferentes tipos de estación y los métodos usuales para la conmutación de las rutas de reserva en caso de falla de las rutas principales.

9.8. CUESTIONARIO

1. Investigue las características físicas y eléctricas (resistencia óhmica, impedancia, ancho de banda, atenuación, tipos, etc) de los conductores metálicos (par trenzado y cable coaxial). En particular, investigue las características normalizadas por el UIT-T en sus Recomendaciones V.10, V.11 y G.950/951/952/953/954. Investigue otros aspectos, no mencionados en este libro, especificados en la Norma EIA/TIA 568A.
2. Escoja un catálogo de cable coaxial (por ejemplo, el General Cable) y repita los ejemplos dados en las Secciones 9.3.2 y 9.3.3 para diferentes tipos de cable RG/U, a diferentes frecuencias y distancias. En particular, extienda el procedimiento mostrado en la Sección 9.3.3 para una instalación multipunto que Ud. mismo se proponga.
3. Explique los modos de propagación en fibras ópticas y los dispositivos que se emplean para la modulación y demodulación electro-óptica.
4. Investigue las características principales de las Recomendaciones UIT-T G.651/652 y G.655/656, aplicables a las fibras ópticas.
5. Diga, como mínimo, cuatro ventajas de las fibras ópticas sobre los conductores metálicos.
6. En relación con la fibras ópticas, defina lo que es “relación de conversión o responsibidad” y “rendimiento cuántico”, y diga cuáles son los valores más comunes en la fibras ópticas utilizadas en la práctica.
7. Dibuje un esquema de transmisión digital que contenga un tramo de fibra óptica y un repetidor para una troncal europea E3.

8. Investigue las tres formas de multiplexamiento utilizados en fibras ópticas: multiplexamiento de longitudes de onda, multiplexamiento espacial de fibras (transmisión óptica sin multiplex) y multiplexamiento FDM o TDM (eléctrico).
9. Diga las características y limitaciones de la transmisión digital por microondas en línea visual.
10. Compare el comportamiento en TDM respecto a FDM en transmisión por microondas.
11. Defina lo que es el "margen contra el desvanecimiento", y los medios para contrarrestarlo.
12. La ganancia de una antena parabólica se puede determinar mediante la siguiente expresión [Freeman, 1987]:

    $G_{adB} = 20 \log_{10}(D) + 20 \log_{10}(f_{GHz}) + 17{,}8$ dB

    Donde: D = diámetro del reflector, en metros
    f_{GHz} = frecuencia de operación, en GHz

    Para un enlace de microondas se requieren antenas con una ganancia de 32 dB, siendo la frecuencia de operación de 6 GHz.

    Demuestre que el diámetro del reflector necesario es D = 85,35 cm.
13. En un radioenlace de microondas se define la potencia radiada isotrópica efectiva P_{ir}, como la potencia a la salida de la antena de transmisión, Fig. 9.16(a), mediante la expresión

    $P_{irdBW} = P_{odBW} + L_t + G_{at}$ dBW

    Nótese que las pérdidas se expresan con números negativos, mientras que las ganancias son números positivos.

    Si la potencia a la salida del transmisor es de 1 W, las pérdidas en la línea de transmisión son de 3 dB, la frecuencia de operación es de 7 GHz y se utilizan reflectores de 2 metros de diámetro, determine la potencia P_{ir} en vatios (W).
14. En un enlace de microondas se tiene:

    T = 320 kelvins; Ganancia del sistema G_s = 20 dB; Relación $[S/N]_{min}$ = 20 dB

    B = 32 MHz; Cifra de ruido F = 4; Margen de Desvanecimiento = 10 dB.

    Determine la sensibilidad del receptor, el umbral de recepción y la potencia de salida del transmisor, en vatios (W).
15. Dibuje la configuración típica de un sistema PCM por microondas 240 CH N + 1.
16. Defina los tipos de estaciones repetidoras y compare sus ventajas y desventajas.
17. Dibuje una Estación Terminal y una Estación D/I de un sistema 240 CH 3 + 1. Dibuje también el correspondiente sistema de reserva 1 + 1 Hot Standby.

APENDICE A
MISCELANEOS

A1. EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

Frecuencia	Longitud de Onda	Designación	Medio de Transmisión	Aplicaciones
3 Hz-30 kHz	10^8 -10^4 m	Frecuencia muy Baja **VLF**	Conductores Metálicos, Radio	Audio, Telefonía, Transmisión de Datos, Radionavegación
3 kHz-300 kHz	10^4-10^3 m	Frecuencia Baja **LF**	Conductores Metálicos, Radio	Radioayudas, Radiofaros, Transmisión por Portadora (PLC)
300 kHz-3 MHz	10^3 - 10^2 m	Frecuencia Media **MF**	Cable Coaxial, Radio de Onda Corta	Radiodifusión Comercial, Defensa Civil, Radioaficionados
3 MHz-30 MHz	10^2 - 10 m	Frecuencia Alta **HF**	Cable Coaxial, Radio de Onda Corta	Radioaficionados, Radiodifusión Comercial, Comunicaciones Militares
30 MHz-300 MHz	0 - 1 m	Frecuencia Muy Alta **VHF**	Cable Coaxial, Radio de Onda Corta	Televisión VHF, Radio FM, Control de Tránsito Aéreo, Radiotaxis, Policía, Radioayudas
300 MHz-3 GHz	100 - 1 cm	Frecuencia Ultra Alta **UHF**	Radio de Onda Corta, Guías, Microondas	Televisión UHF, Telemetría Espacial, Comunicaciones Militares, Banda Ciudadana
3 GHz-30 GHz	10 - 1 cm	Frecuencia Super Alta **SHF**	Guías de Onda, Microondas	Radar, Comunicación por Satélite, Radioenlaces de Microondas
30 GHz-300 GHz	< 1 cm	Frecuencia Extra Alta **EHF**	Guías de Onda, Microondas, Fibras Opticas	Radioastronomía, Servicio de Ferrocarriles, Sistemas Experimentales, Comunicaciones Opticas (Laser e Infrarrojo)

A2. DESIGNACION DE LAS BANDAS DE MICROONDAS

BANDA (GHZ)	DESIGNACION	BANDA (GHZ)	DESIGNACION
1.0-2.0	L	12.0-18.0	Ku
2.0-4.0	S	18.0-27.0	K
4.0-8.0	C	27.0-40.0	Ka
8.0-12-0	X		

A3. BANDAS DE TELEVISION (NTSC, CATV) y FM EN VHF (*)

Canal	Banda (MHz)	Portadora de Video, MHz	Canal	Banda (MHz)	Portadora de Video, MHz
1	----	No se utiliza	7	174-180	175,25
2	54-60	55,25	8	180-186	181,25
3	60-66	61,25	9	186-192	187,25
4	66-72	67,25	10	192-198	193,25
5	76-82	77,25	11	198-204	199,25
6	82-88	83,25	12	204-210	205,25
FM	88-108	----	13	210-216	211,25

(*) En VHF los sistemas NTSC y CATV utilizan las mismas bandas de frecuencia.

A4. BANDAS DE TELEVISION (NTSC, CATV) EN UHF (*)

	NTSC	CATV		NTSC	CATV		NTSC	CATV
Canal	Banda (MHz)	Banda (MHz)	Canal	Banda (MHz)	Banda (MHz)	Canal	Banda (MHz)	Banda (MHZ)
14	470-476	120-126	44	650-656	342-348	74	--	522-528
15	476-482	126-132	45	656-662	348-354	75	--	528-534
16	482-488	132-138	46	662-668	354-360	76	--	534-540
17	488-494	138-144	47	668-674	360-366	77	--	540-546
18	494-500	144-150	48	674-680	366-372	78	--	546-552
19	500-506	150-156	49	680-686	372-378	79	--	552-558
20	506-512	156-162	50	686-692	378-384	80	--	558-564
21	512-518	162-168	51	692-698	384-390	81	--	564-570
22	518-524	168-174	52	698-704	390-396	82	--	570-576
23	524-530	216-222	53	704-710	396-402	83	--	576-582
24	530-536	222-228	54	710-716	402-408	84	--	582-588
25	536-542	228-234	55	716-722	408-414	85	--	588-594
26	542-548	234-240	56	722-728	414-420	86	--	594-600
27	548-554	240-246	57	728-734	420-426	87	--	600-606
28	554-560	246-252	58	734-740	426-432	88	--	606-612
29	560-566	252-258	59	740-746	432-438	89	--	612-618
30	566-572	258-264	60	746-752	438-444	90	--	618-624
31	572-578	264-270	61	752-758	444-450	91	--	624-630
32	578-584	270-276	62	758-764	450-456	92	--	630-636
33	584-590	276-282	63	764-770	456-462	93	--	636-642
34	590-596	282-288	64	770-776	462-468	94	--	642-648
35	596-602	288-294	65	776-782	468-474	95	--	90-96
36	602-608	294-300	66	782-788	474-480	96	--	96-102
37	608-614	300-306	67	--	480-486	97	--	102-108
38	614-620	306-312	68	--	486-492	98	--	108-114
39	620-626	312-318	69	--	492-498	99	--	114-120
40	626-632	318-324	70	--	498-504			
41	632-638	324-330	71	--	504-510			
42	638-644	330-336	72	--	510-516			
43	644-650	336-342	73	--	516-522			

(*) La frecuencia de portadora está a 1,25 MHz por encima de la frecuencia inferior de la band**a**

A5. CODIGO EBCDIC

	8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Bits →	**7**	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
	6	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
↓	**5**	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
4321	Col → Fila ↓	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0000	0	NUL	DLE	DS		SP	&	-								\	0
0001	1	SOH	DC1	SOS				/		a	j			A	J		1
0010	2	STX	DC2	FS	SYN					b	k	s		B	K	S	2
0011	3	ETX	TM							c	l	t		C	L	T	3
0100	4	PF	RES	BYP	PN					d	m	u		D	M	U	4
0101	5	HT	NL	LF	RS					e	n	v		E	N	V	5
0110	6	LC	BS	ETB	UC					f	o	w		F	O	W	6
0111	7	DEL	IL	ESC	EOT					g	p	x		G	P	X	7
1000	8		CAN							h	q	y		H	Q	Y	8
1001	9	PLF	EM							i	r	z		I	R	Z	9
1010	A	SMM	CC	SM		c	!	1p	:								
1011	B	VT				.	$	,	#								
1100	C	FF	IFS		DC4	<	*	%	@								
1101	D	CR	IGS	ENQ	NAK	(	)	_	‘								
1110	E	SO	IRS	ACK		+	;	>	=								
1111	F	SI	IUS	BEL	SUB	∫	⎤	¿	“								

A6. CODIGO BAUDOT

Caja de Caracteres Superior	Caja de Caracteres Inferior	Codificación 5 4 3 2 1	Caja de Caracteres Superior	Caja de Caracteres Inferior	Codificación 5 4 3 2 1
A	-	1 1 0 0 1	Q	1	1 0 1 1 1
B	?	0 0 0 1 1	R	4	0 1 0 1 0
C	:	0 1 1 1 0	S	‘	0 0 1 0 1
D	$	0 1 0 0 1	T	5	1 0 0 0 0
E	3	0 0 0 0 1	U	7	0 0 1 1 1
F	!	0 1 1 0 1	V	;	1 1 1 1 0
G	&	1 1 0 1 0	W	2	1 0 0 1 1
H	#	1 0 1 0 0	X	/	1 1 1 0 1
I	8	0 0 1 1 0	Y	6	1 0 1 0 1
J	BELL	0 1 0 1 1	Z	“	1 0 0 0 1
K	(	0 1 1 1 1	Letras ↓		1 1 1 1 1
L	)	1 0 0 1 0	Cifras ↓		1 1 0 1 1
M	.	1 1 1 0 0	Espacio		0 0 1 0 0
N	,	0 1 1 0 0	Retorno de carro		0 1 0 0 0
O	9	1 1 0 0 0	Feed Line		0 0 0 1 0
P	0	1 0 1 1 0	En Blanco		0 0 0 0 0

APENDICE B
FORMULAS MATEMATICAS

B.1. IDENTIDADES TRIGONOMETRICAS

FUNCION	n	n PAR	n IMPAR	n/2 PAR	n/2 IMPAR
$\mathrm{sen}(n\pi)$	0	0	0	0	0
$\cos(n\pi)$	$(-1)^n$	+1	-1	+1	+1
$\mathrm{sen}(n\pi/2)$		0	$(-1)^{(n-1)/2}$	0	0
$\cos(n\pi/2)$		$(-1)^{n/2}$	0	+1	-1
$\mathrm{sen}[(n\pm1)\pi/2]$		$\pm(-1)^{n/2}$	0		
$\cos[(n\pm1)\pi/2]$		0	$\pm(-1)^{(n+1)/2}$		
$\mathrm{sen}[(2n\pm1)\pi/2]$	$\pm(-1)^n$				
$\cos[(2n\pm1)\pi/2]$	0				

$$\cos(\omega t) = \mathrm{sen}(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \frac{1}{2}[\exp(j\omega t) + \exp(-j\omega t)] \qquad \cos(\omega t/2) = \sqrt{[1+\cos(\omega t)]/2}$$

$$\mathrm{sen}(\omega t) = \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = \frac{1}{2j}[\exp(j\omega t) - \exp(-j\omega t)] \qquad \mathrm{sen}(\omega t/2) = \sqrt{[1-\cos(\omega t)]/2}$$

$$\exp(\pm j\omega t) = \cos(\omega t) \pm j\,\mathrm{sen}(\omega t) \qquad \cos^2(\omega t) = [1+\cos(2\omega t)]/2$$

$$\mathrm{sen}^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1 \qquad \mathrm{sen}^2(\omega t) = [1-\cos(2\omega t)]/2$$

$$\cos(2\omega t) = 1 - 2\,\mathrm{sen}^2(\omega t) = \cos^2(\omega t) - \mathrm{sen}^2(\omega t) \qquad \cos^3(\omega t) = [\cos(3\omega t) + 3\cos(\omega t)]/4$$

$$\mathrm{sen}(2\omega t) = 2\,\mathrm{sen}(\omega t)\cdot\cos(\omega t) \qquad \mathrm{sen}^3(\omega t) = [-\mathrm{sen}(3\omega t) + 3\,\mathrm{sen}(\omega t)]/4$$

$$\cos(\omega_1 t \pm \omega_2 t) = \cos(\omega_1 t)\cos(\omega_2 t) \mp \mathrm{sen}(\omega_1 t)\,\mathrm{sen}(\omega_2 t)$$

$$\mathrm{sen}(\omega_1 t \pm \omega_2 t) = \mathrm{sen}(\omega_1 t)\cos(\omega_2 t) \pm \cos(\omega_1 t)\,\mathrm{sen}(\omega_1 t)$$

$$\cos(\omega_1 t)\cos(\omega_2 t) = \frac{1}{2}\{\cos[(\omega_1+\omega_2)t] + \cos[(\omega_1-\omega_2)t]\}$$

$$\mathrm{sen}(\omega_1 t)\cos(\omega_2 t) = \frac{1}{2}\{\mathrm{sen}[(\omega_1+\omega_2)t] + \mathrm{sen}[(\omega_1-\omega_2)t]\}$$

$$\mathrm{sen}(\omega_1 t)\,\mathrm{sen}(\omega_2 t) = \frac{1}{2}\{\cos[(\omega_1-\omega_2)t] - \cos[(\omega_1+\omega_2)t]\}$$

B.2. INTEGRALES INDEFINIDAS

$$\int \operatorname{sen}(ax)dx = -\frac{1}{a}\cos(ax)$$

$$\int e^{ax}dx = \frac{1}{a}e^{ax}$$

$$\int \cos(ax)dx = \frac{1}{a}\operatorname{sen}(ax)$$

$$\int xe^{ax}dx = \frac{1}{a^2}e^{ax}(ax-1)$$

$$\int \operatorname{sen}^2(ax)dx = \frac{x}{2} - \frac{\operatorname{sen}(2ax)}{4a}$$

$$\int x^2e^{ax}dx = \frac{1}{a^3}e^{ax}[a\operatorname{sen}(ax) - 2ax + 2]$$

$$\int \cos^2(ax)dx = \frac{x}{2} + \frac{\operatorname{sen}(2ax)}{4}$$

$$\int e^{ax}\operatorname{sen}(bx)dx = \frac{1}{a^2+b^2}e^{ax}[a\operatorname{sen}(bx) - b\cos(bx)]$$

$$\int \operatorname{sen}(ax)\cos(ax)dx = \frac{1}{2a}\operatorname{sen}^2(ax)$$

$$\int e^{ax}\cos(bx)dx = \frac{1}{a^2+b^2}e^{ax}[a\cos(bx) + b\operatorname{sen}(bx)]$$

$$\int x\operatorname{sen}(ax)dx = \frac{1}{a^2}[\operatorname{sen}(ax) - ax\cos(ax)]$$

$$\int \frac{dx}{a^2+b^2x^2} = \frac{1}{ab}\operatorname{arctg}(\frac{bx}{a})$$

$$\int x\cos(ax)dx = \frac{1}{a^2}[\cos(ax) + ax\operatorname{sen}(ax)]$$

$$\int \frac{x^2dx}{a^2+b^2x^2} = \frac{x}{b^2} - \frac{a}{b^3}\operatorname{arctg}(\frac{bx}{a})$$

$$\int x^2\operatorname{sen}(ax)dx = \frac{1}{a^3}[2ax\operatorname{sen}(ax)2\cos(ax) - a^2x^2\cos(ax)]$$

$$\int x^2\cos(ax)dx = \frac{2x\cos(ax)}{a^2} + \left[\frac{x^2}{a} - \frac{2}{a^3}\right]\operatorname{sen}(ax)$$

B.3. INTEGRALES DEFINIDAS

$$\int_0^\infty \frac{x^{m-1}}{1+x^n}dx = \frac{\pi/n}{\operatorname{sen}(m\pi/n)} \qquad n > m > 0$$

$$\int_0^\infty \operatorname{sen}(x^2)dx = \int_0^\infty \cos(x^2)dx = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

$$\int_0^\infty \frac{\operatorname{sen}(x)}{x}dx = \int_0^\infty \frac{\operatorname{tg}(x)}{x}dx = \frac{\pi}{2}$$

$$\int_0^\infty x^ne^{-ax}dx = \frac{n!}{a^{n+1}} \qquad n \geq 1,\ a > 0$$

$$\int_0^\infty \frac{\operatorname{sen}(x)\cos(nx)}{x}dx = \begin{cases} \pi/2 & n^2 < 1 \\ \pi/4 & n^2 = 1 \\ 0 & n^2 > 1 \end{cases}$$

$$\int_0^\infty e^{-a^2x^2}dx = \frac{1}{2a}\sqrt{\pi} \qquad a > 0$$

$$\int_0^\infty x^2e^{-x^2}dx = \frac{1}{4}\sqrt{\pi}$$

$$\int_0^\infty \frac{\operatorname{sen}^2(x)}{x^2}dx = \frac{\pi}{2}$$

$$\int_0^\infty e^{-ax}\cos(x)dx = \frac{a}{1+a} \qquad a > 0$$

$$\int_0^\infty \frac{\cos(nx)}{1+x^2}dx = \frac{\pi}{2}\exp(-|n|)$$

$$\int_0^\infty e^{-ax}\operatorname{sen}(x)dx = \frac{1}{1+a^2} \qquad a > 0$$

$$\int_0^\infty \operatorname{sinc}(x)dx = \int_0^\infty \operatorname{sinc}^2(x)dx = \frac{1}{2}$$

$$\int_0^\infty e^{-a^2x^2}\cos(bx)dx = \frac{1}{2a}\sqrt{x}\cdot e^{-(b/2a)^2}$$

B.4. LA FUNCION ERROR

La Función Error erf(x) y la Función Error Complementaria erfc(x) se definen mediante las integrales [Korn y Korn, 1968],

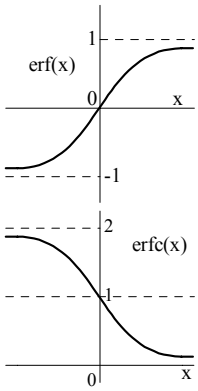
$$\mathrm{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x \exp(-z^2)dz\,; \quad \mathrm{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^\infty \exp(-z^2)dz; \quad \mathrm{erf}(x) + \mathrm{erfc}(x) = 1$$

$$\mathrm{erf}(\infty) = 1;\ \mathrm{erf}(-\infty) = -1;\ \mathrm{erf}(-x) = -\mathrm{erf}(x);\ \mathrm{erfc}(-\infty) = 2; \mathrm{erfc}(\infty) = 0; \mathrm{erfc}(0) = 1$$

En la figura se muestra erf(x) y erfc(x) para $-\infty < x < \infty$

En algunos textos, en vez de la función erfc(x),

se utiliza la función $Q(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_y^\infty \exp(-\frac{z^2}{2})dz$



Las funciones Q(y) y erfc(x) se pueden relacionar mediante las expresiones

$$\mathrm{erfc}(x) = 2\cdot Q(\sqrt{2}x) \quad \text{o} \quad Q(y) = \frac{1}{2}\mathrm{erfc}(\frac{y}{\sqrt{2}})$$

En la Tabla siguiente se dan algunos valores de erfc(x) para $1{,}5 \le x \le 4{,}45$ (Calculados con el programa MATHCAD)

TABLA DE VALORES DE erfc(x)

x	erfc(x)	x	erfc(x)	x	erfc(x)	x	erfc(x)
1,50	0,034	2,25	0,001	3,00	1,608E-5	3,75	7,7E-8
1,55	0,028	2,30	8,893E-4	3,05	1,165E-5	3,80	5,189E-8
1,60	0,024	2,35	6,885E-4	3,10	8,398E-6	3,85	3,479E-8
1,65	0,02	2,40	5,306E-4	3,15	6,026E-6	3,90	2,322E-8
1,70	0,016	2,45	4,07E-4	3,20	4,303E-6	3,95	1,542E-8
1,75	0,013	2,50	3,107E-4	3,25	3,058E-6	4,00	1,019E-8
1,80	0,011	2,55	2,36E-4	3,30	2,162E-6	4,05	6,7E-9
1,85	0,009	2,60	1,785E-4	3,35	1,522E-6	4,10	4,385E-9
1,90	0,007	2,65	1,343E-4	3,40	1,066E-6	4,15	2,855E-9
1,95	0,006	2,70	1,006E-4	3,45	7,431E--7	4,20	1,851E-9
2,00	0,005	2,75	7,501E-5	3,50	5,155E-7	4,25	1,193E-9
2,05	0,004	2,80	5,566E-5	3,55	3,559E-7	4,30	7,659E-10
2,10	0,003	2,85	4,11E-5	3,60	2,445E-7	4,35	4,892E-10
2,15	0,002	2,90	3,02E-5	3,65	1,672E-7	4,40	3,109E-10
2,20	0,001	2,95	2,209E-5	3,70	1,137E-7	4,45	1,966E-10

BIBLIOGRAFIA

AARON, M.R. y TUFTS, D. W., "Intersymbol Interference and Error Probability", IEEE Trans. on Information Theory, Vol.IT-12, Enero 1966.

ABBOT, G., "Digital Space Division: A Technique for Switching High Speed Data Signals", IEEE Communitations Magazine, Abril 1984.

ABRAMSON, N., " The ALOHA System – Another Alternative for Computer Communications, Proceedings, Fall Joint Computer Conference, 1970

AMOROSO, F., "The Bandwidth of Digital Data Signals", IEEE Communications Magazine, Vol. 18, No. 6, Noviembre 1980.

.APRILLE, T. J., "Filtering and Equalization for Digital Transmission", IEEE Communications Magazine, Marzo 1983.

ARRL SPREAD SPECTRUM SOURCEBOOK, The American Radio Relay League, Inc., 1991.

BACKES, F., "Transparent Bridges for Interconnection of IEEE 802 LANs", IEEE Network, Enero 1988.

BARKSDALE, W., "Practical Computer Communications", Plenum Press, Nueva York, 1986.

BARNOSKI, M.K., (Editor), "Fundamental of Optical Fiber Communications", Academic Press, Nueva York, 1975.

BENDAT, J. S. y PIERSOL, A. G., "Random Data: Analysis and Measurements Procedures", Wiley-Interscience, Nueva York, 1971.

BENEDETTTO, S., BIGLIERI, E. y CASTELLANI, V., "Digital Transmission Theory", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1987.

BENNET, W. R. y DAVEY, J. R., "Data Transmission", McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1965.

BERSEKAS D. y GALLAGER, R., "Data Networks", Prentice-Hall International, Inc., Simon & Shuster Co., Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1992.

BEUERMAN, S. y COYLE, E., "The Delay Characteristics of CSMA/CD Networks", IEEE Transactions on Communications, Mayo 1988.

BRICEÑO, J., "Principios de las Comunicaciones", Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, ULA, Edición Digital, Mérida 2004.

BRICEÑO, J., "Capacidad de Carga en Sistemas Multicanal de Pequeña y Mediana Densidad", Nota de Aplicación, Escuela de Ingeniería Eléctrica, ULA, Mérida 1982.

BURG, F., CHEN, C. y FOLTS, H., "Of Local Networks, Protocols, and the OSI Reference Model", Data Communications, Noviembre 1984.

CARDENAS, O. y MEDINA, C., "Transductores Industriales", Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, ULA, Mérida, 1997.

CREUS, A., "Instrumentación Industrial", Editorial Marcombo, Barcelona, España, 1988.

COUCH, L. W., "Digital and Analog Communication Systems", Maxwell Macmillan International Editions, Macmillan Publishing House, Nueva York, 1990.

CURTIS, J. y OWEN, J., "Data Loading Considerations for Private Microwave Systems", Telecommunications Magazine, Mayo 1968.

DAVEY, J. R., "Modems", Proc. IEEE, Vol. 60, Noviembre 1972.

El DEMODULADOR, "Carga de Datos en los Sistemas Comunicaciones Militares", No. 148, GTE Lenkurt, California, Julio 1968.

EL DEMODULADOR, "Data Modem Developments", GTE Lenkurt, California, Febrero 1976.

EL DEMODULADOR, "PCM Over Microwaves, Part. 3", GTE Lenkurt, California, Noviembre 1974.

EL DEMODULADOR, "Digital Radio ans Data Set Interfaces", GTE Lenkurt, California, Diciembre 1977.

FRANKS, L. E., "Carrier and Bit Synchonization in Data Communications: A Tutorial Review", IEEE Trans. on Communications, Vol. COM-28, Agosto 1980.

FREEMAN, R. L., "Reference Manual for Telecommunication Engineering". Segunda Edición. John Wiley and Sons, Nueva York, 1994.

GARDNER, F. M. y LINDSEY, W. C., (Editores), "Special Issue on Synchronization", IEEE Transacctions on Communications", Vol. COM. 28, No. 8, Agosto 1980.

HOLBROCK, B.D. y DIXON, J.T., "Load Rating Theory for Multichannel Amplifiers", BSTJ 17, 1938.

HELD, G., "Data Communications Networking Devices", John Wiley & Sons, Nueva York, 1992.

IEEE Communications Society, "100 Years of Communications Progress", IEEE Communications Magazine, Vol. 2, No. 5, Mayo 1984.

KAO K. y HOCKHAM, G., "Dielectric Surface Waveguides for Optical Frequencies", Proc. IEEE 133, Julio 1966.

LUCKY, R. W., SALZ, J. y WELDON, E. J., "Principles of Data Communication", McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1968.

Mc NAMARA, J.E., "Technical Aspects of Data Communications", Digital Press, Bedford, Massachusets, 1982.

MILLER, M.G., "Modern Electronic Communication", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1993.

OPPENHEIM, A.V. y SHAFER, R. W., "Digital Signal Processing", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1975.

PERSONICK, S.D., "Optical Fiber Transmission Systems", Plenum Press, Nueva York, 1983.

PIETROSEMOLI, E., "Transmisión por Fibras Opticas", Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, ULA, Mérida, 1994.

PROAKIS, J. G., "Digital Communication", McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1989.

RABINER, L. R. y GOLD, B., "Theory and Application of Digital Signal Processing", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1975.

RICHARDS, D.L., "Transmission Performance Assessment for Telephone Network Planning", Proc. IEE, 106B, Abril 1964.

RISTENBATT, M. P., "Alternatives in Digital Communications", Proc. IEEE, Junio 1973.

RODEN, M. S., "Digital Communication Systems Design", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1988.

SHANNON, C.E., "Communications in the Presence of Noise", Proc. IRE, Vol. 37, Enero 1949.

SPRAGINS, J., HAMMOND, J. y PAWLIKOWSKI, K., "Telecommunications Protocols and Design", Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass., 1991

STALLINGS, W., "Local and Metropolitan Area Networks", Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs , Nueva Jersey, 1993.

SKLAR, B., "A Structured Overview of Digital Communications: A Tutorial Review", Partes I y II, IEEE Communications Magazine, Agosto y Octubre, 1983.

TANT, M.J., "Multi-Channel Communications Systems and White Noise Testing", Marconi Instruments, Julio 1974.

TOMASI, W., "Sistemas de Comunicaciones Eléctrónicas", Prentice-Hall Hispano-Americana, S.A., México, 1996.

UIT-T, Sector de Normas de Telecomunicaciones, Unión Internacional de Comunicaciones, Volúmenes III y VIII, Libro Azul, 1988.

VAN TREES, H.L., "Detection, Estimation, and Modulation Theory", Vols. I – III, John Wiley & Sons, Nueva York, 1971.

ZIEMER R.E. y PETERSON, R. L., "Digital Communication and Spread Spectrum Systems", Macmillan Publishing Company, Nueva York, 1985.