



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

REDES CON TECNOLOGIA ATM A TRAVES DE SATELITES DE TELECOMUNICACIONES

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO EN COMPUTACION PRESENTA: JUAN FRANCISCO JIMENEZ TREJO



DIRECTOR DE TESIS: DR. SALVADOR LANDEROS AYALA

MEXICO, D.F.

OCTUBRE 2000

284329



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico este Trabajo de Tesis a.....

LA UNAM

Nunca podré regresarle todo lo que me ha dado.....

Mi Papá

Gracias por tu sabia guía y apoyo en los momentos difíciles

Mi Mamá

Sin tus cuidados y dedicación a mí, no sería quien soy

Mi madrina

Por tu amor, tu ejemplo y por permitirme todo

A mis maestros, a todos, desde el Kinder hasta la UNAM

En especial a los Ingenieros

José Manuel Covarrubias S.

Salvador Landeros A.

Rául Carvajal M.

Javier Villazón S.

A mi novia

Nancy, sin ti este trabajo no lo hubiera acabado nunca

A mis amigos

Por su apoyo en las buenas y en las malas y por compartir su inteligencia

Gerardo, Wilfrido, Leonel, Alejandro, José, Raúl, Memo, Manuel, Raúl

INDICE

INDICE.....	1
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	9
MOTIVACIÓN.....	9
ALCANCES Y LIMITACIONES.....	9
ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	10
CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA ATM	13
ATM Y LA RED DE LA "SIGUIENTE GENERACIÓN"	13
ATM COMO UNA TECNOLOGÍA "ASÍNCRONA".....	13
PROBLEMAS QUE RESUELVE ATM	13
LA DIVERSIDAD DE LAS REDES	14
PARÁMETROS DE SERVICIO.....	14
LA SOLUCIÓN ATM	15
REDES ATM, CONCEPTOS Y ARQUITECTURA	15
LAS SEIS FUNCIONES PARA EL TRANSPORTE DE LAS CELDAS	15
LAS CAPAS ATM Y SUS FUNCIONES	17
LOS CANALES Y CAMINOS VIRTUALES DE ATM	20
PARÁMETROS DE DESEMPEÑO EN ATM.....	24
CONTROL DE TRÁFICO EN ATM	25
LA OPERACIÓN Y EL MANTENIMIENTO DE LAS REDES ATM.....	26
EL CONJUNTO DE PROTOCOLOS ATM: LAS CAPAS INFERIORES.....	26
LA CAPA FÍSICA DE ATM Y SUS MEDIOS DE TRANSPORTE	26
SONET/SDH	27

INTERFASE DE DATOS DISTRIBUIDA DE FIBRA FDDI (FIBER DISTRIBUTED DATA INTERFASE)	32
100 MBPS TAXI (FDDI)	32
<i>Codificación 4B/5B</i>	34
155 MBPS CODIFICACIÓN (8B/10B) (CHANNEL FIBER)	34
<i>La arquitectura del Channel Fiber</i>	35
LA SUBCAPA DE CONVERGENCIA DE TRANSMISIÓN DE ATM	37
<i>Desacoplamiento de la tasa de celdas</i>	38
<i>Control de error de encabezado</i>	39
<i>Delineado de celda</i>	40
<i>Adaptación/generación/recuperación del marco de transmisión</i>	42
EL CONJUNTO DE PROTOCOLOS ATM: LA CAPA ATM	48
LA CAPA ATM	48
<i>La estructura de las celdas ATM en detalle</i>	49
<i>Tipos de celdas ATM</i>	50
<i>Tipos de conexiones ATM</i>	51
<i>Multiplexación de celdas en ATM</i>	52
<i>Administración del tráfico en ATM</i>	53
<i>Calidad del servicio en ATM y la administración de tráfico</i>	55
EL PRINCIPIO DE LA CONMUTACIÓN EN ATM	57
<i>Dispositivos de conmutación ATM</i>	58
<i>El Conmutador ForeRunner ASX-100 ATM</i>	61
<i>Flujo de las celdas OAM</i>	64
<i>Tipos de funciones OAM</i>	65
<i>Formatos de los tipos de celdas OAM</i>	66
SEÑALIZACIÓN	68
<i>Metaseñalización</i>	68
<i>Señalización ATM</i>	69
<i>Señalización del Foro ATM y direcciones de red</i>	69
<i>Flujo de los mensajes de señalización en ATM</i>	71

EL CONJUNTO DE PROTOCOLOS ATM: LAS CAPAS SUPERIORES	73
TIPOS Y CLASES DE CAPAS DE ADAPTACIÓN ATM	73
<i>Los servicios y las funciones de AAL-1</i>	73
<i>Recuperación del reloj en AAL-1</i>	76
<i>Transferencia de datos estructurada de AAL-1 (SDT)</i>	77
<i>AAL-5 (SEAL Simple And Efficient Adaptation Layer) servicios y funciones</i>	77
CAPÍTULO III. EL SATÉLITE. CONCEPTOS BÁSICOS	79
LA ARQUITECTURA DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES SATELITAL	79
EL SEGMENTO ESPACIAL	79
EL SEGMENTO TERRESTRE	81
TIPOS DE ÓRBITAS	82
PROGRESO TECNOLÓGICO	84
EL DESARROLLO DE SERVICIOS.....	85
ANÁLISIS DEL ENLACE	86
EL ENLACE BÁSICO DE RF	86
LIMITACIONES EN EL DESEMPEÑO DEL ENLACE. CASO SATELITAL	88
ENLACES SATELITALES.....	89
<i>General</i>	89
<i>Enlace de subida</i>	90
<i>Enlace de bajada</i>	91
<i>Desempeño compuesto</i>	91
TEMPERATURA DEL RUIDO.....	92
<i>General</i>	92
<i>Figura de ruido</i>	94
TEMPERATURAS DE ANTENA.....	95
<i>Temperatura compuesta de la antena</i>	95
<i>Temperatura con cielo limpio</i>	96
<i>Temperatura del sol</i>	98

TEMPERATURA TOTAL DEL SISTEMA	99
FACTORES DE PROPAGACIÓN	100
MODELO DE ATENUACIÓN POR LLUVIA	102
TRANSPONEDORES.....	104
INTRODUCCIÓN.....	104
FUNCIÓN DEL TRANSPONDEDOR.....	105
TIPOS DE TRANSPONEDORES	106
ESTACIONES TERRENAS.....	110
INTRODUCCIÓN.....	110
TRANSMISORES	112
RECEPTORES	114
ANTENAS.....	116
ANTENAS DE CORNETA.....	117
ANTENAS DE REFLECTOR	118
DESEMPEÑO DE LA ANTENA.....	121
TIPOS DE ANTENAS EN EL SATÉLITE.....	121
ANTENAS DE COMUNICACIÓN.....	124
<i>Sistema de antena de lente/reflector.....</i>	<i>125</i>
<i>Sistema de antena de formación de haz con el reflector.....</i>	<i>127</i>
<i>Sistemas de antena de arreglo en fase.....</i>	<i>128</i>
ANTENA DE RASTREO, TELEMETRÍA Y COMANDO Y ANTENAS ESPECIALES.....	129
<i>Antena de rastreo, telemetría y comando</i>	<i>129</i>
<i>Antenas para enlace intersatelital</i>	<i>129</i>
<i>Antenas de autorastreo</i>	<i>129</i>
CAPÍTULO IV. MODULACIÓN, MULTIPLEXACIÓN Y PROTOCOLOS DE ACCESO MÚLTIPLE.....	130
MODULACIÓN Y MULTIPLEXACIÓN	130

<i>Codificación de fuente</i>	131
<i>Multiplexación por división de tiempo (TDM)</i>	134
<i>Técnicas de Modulación Digital</i>	138
PROTOCOLOS DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO	151
INTRODUCCIÓN	151
CLASIFICACIÓN DE LOS PROTOCOLOS MAC	152
<i>Protocolos MAC de asignación fija</i>	152
<i>Protocolos MAC de asignación bajo demanda</i>	161
<i>Protocolos MAC de acceso aleatorio</i>	162
<i>Protocolos MAC de reservación</i>	167
<i>Protocolos MAC híbridos de acceso aleatorio y reservación</i>	167
<i>Protocolos MAC adaptables</i>	169
DIRECTIVAS DE SELECCIÓN DE LOS PROTOCOLOS DE ACCESO AL MEDIO MAC	170
CONSIDERACIONES DE INGENIERÍA DEL SISTEMA	171
CAPÍTULO V. SISTEMAS ATM VÍA SATÉLITE. LAS BASES	173
INTRODUCCIÓN	173
EL EQUIPAMIENTO DE COMUNICACIONES DEL SATÉLITE	173
DIRECTIVAS DE DISEÑO	173
<i>La ingeniería del sistema</i>	173
<i>Tecnologías de equipamiento satelital para la banda Ka</i>	175
EL CONMUTADOR ATM EN EL SATÉLITE	178
CAPACIDAD Y CONFIGURACIÓN DEL CONMUTADOR	178
LA TOLERANCIA A FALLOS	178
EL RETRASO EN LA CONMUTACIÓN	179
LAS TECNOLOGÍAS	179
LA ESTRUCTURA DE SOPORTE Y LA POTENCIA DEL EQUIPAMIENTO SATELITAL	179
DISEÑOS PROPUESTOS	180

ARQUITECTURA DE UN CONMUTADOR ATM EN EL SATÉLITE	181
<i>El conmutador Alcatel 1000 AX</i>	182
<i>Temas principales</i>	183
<i>Adecuación del conmutador a la arquitectura ATM vía satélite</i>	184
LA ARQUITECTURA DE LA RED ATM SATELITAL	187
ARQUITECTURA DE LA RED SATELITAL	188
<i>Terminal del usuario (UT)</i>	188
<i>Unidad de Adaptación del Satélite (SAU)</i>	188
<i>El equipamiento del satélite (Payload P/L)</i>	188
<i>Estaciones gateway (GTW)</i>	189
<i>Estación de Control de la Red (NCS)</i>	189
<i>Interfases de comunicación</i>	189
IMPLEMENTACIÓN ATM VÍA SATÉLITE 1. ENCAPSULAMIENTO DEL PROTOCOLO ATM	191
<i>Señalización de la terminal del usuario y puntos de terminación del protocolo</i>	193
<i>Control Lógico del Enlace y las capas MAC</i>	193
<i>Consideraciones sobre la capa LLC del protocolo</i>	194
<i>Mecanismo de retransmisión basado en eliminación parcial de paquetes</i>	195
IMPLEMENTACIÓN ATM 2. ARQUITECTURA ATM PURA	197
<i>La capa S-ATM</i>	199
<i>Dimensionamiento de los campos SVPI y SVCI</i>	199
EL DESARROLLO DE ESTÁNDARES.....	199
LOS NIVELES DE ERROR EN LA TRANSMISIÓN Y LA CALIDAD EN EL SERVICIO	200
MODELO DE REFERENCIA	200
OBJETIVOS DE CALIDAD DE FUNCIONAMIENTO ATM DE LOS ENLACES POR SATÉLITE.....	201
<i>Principios de atribución de la calidad de funcionamiento ATM</i>	203
<i>Objetivos de calidad de funcionamiento ATM de los sistemas de satélites</i>	204
CONVERSIÓN ENTRE PARÁMETROS DE LA CAPA ATM Y DE LA CAPA FÍSICA.....	204
<i>Características de los errores de transmisión por satélite</i>	204

CALIDAD DE FUNCIONAMIENTO SIMULADA DEL ATM POR SATÉLITE	214
<i>Parámetros de calidad de funcionamiento ATM en los sistemas de satélites</i>	214
CER	215
<i>Característica de la CER para códigos concatenados</i>	215
<i>Resultados de la simulación con respecto a la E_b/N_0 del satélite</i>	217
RESULTADOS DE LA MEDICIÓN REAL DE LA CAPA FÍSICA EN FUNCIÓN DE LA CAPA ATM	219
<i>Resultados de las mediciones a 45 Mbit/s</i>	219
<i>Pruebas entre AT&T y KDD</i>	220
<i>Pruebas ATM efectuadas por EUTELSAT</i>	224
<i>Pruebas ATM efectuadas por INTELSAT</i>	231
ESQUEMAS TIPO DE CORRECCIÓN Y DETECCIÓN DE ERRORES	234
<i>Esquema de codificación FEC para el encabezado de la celda ATM</i>	234
<i>Esquema de codificación FEC para los servicios de datos de la AAL5</i>	237
<i>Esquema de codificación FEC integrado</i>	237
REQUISITOS PARA LAS APLICACIONES ATM Y CALIDAD DE LA CAPA FÍSICA	242
APLICACIONES VOCALES Y DE DATOS EN BANDA VOCAL	242
APLICACIONES DE VÍDEO	242
<i>Compresión audio/video MPEG-2 y transporte por ATM</i>	242
<i>Tren de transporte MPEG-2</i>	243
<i>MPEG-2 por ATM</i>	244
APLICACIÓN DATOS	244
<i>Tráfico Internet en ATM por satélite</i>	244
RESULTADOS DE MEDICIONES DE QoS DE LAS APLICACIONES QUE UTILIZAN ATM	247
<i>Resultados de QoS de AT&T-Telstra de aplicaciones ATM por un enlace IDR</i>	247
<i>MPEG-2 de la NASA por pruebas de laboratorio en ATM por satélite</i>	249
CAPÍTULO VI. ARQUITECTURAS ATM VÍA SATÉLITE	251
TIPO DE CONMUTADORES ATM DE ACUERDO AL TRÁFICO	251
TIPOS	251

<i>Conmutadores nivel workgroup</i>	251
<i>Conmutador ATM nivel Campus</i>	251
<i>Conmutador ATM nivel Enterprise</i>	252
CARACTERÍSTICAS DE LOS CONMUTADORES ATM	252
CONMUTADORES ATM CASO SATELITAL	253
TIPOS DE CONEXIÓN ATM OFRECIDAS	253
GATEWAY NIVEL ENTERPRISE	255
<i>Configuración del satélite para comunicaciones en banda ancha</i>	256
<i>El sistema de conmutación a bordo</i>	256
<i>El enlace intersatelital</i>	257
<i>Método de acceso al satélite</i>	258
<i>Subsistema de Conmutación ATM a bordo</i>	260
MATRIZ DE CARACTERÍSTICAS DE LOS SATÉLITES S-ATM	262
PUNTOS CRÍTICOS PARA EL DESARROLLO DE LA ARQUITECTURAS S-ATM	263
PROCOLOS MAC, LATENCIA Y ENCAPSULAMIENTO	263
CÓDIGOS DE PROTECCIÓN CONTRA ERRORES	263
TÉCNICAS PARA POTENCIAR LA CALIDAD DE FUNCIONAMIENTO ATM POR SATÉLITE	264
<i>Reducción de CER, SECBR y CLR</i>	264
SISTEMAS ATM PROPUESTOS Y EN DESARROLLO	266
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES	267
BIBLIOGRAFÍA	270
LIBROS	270
ARTÍCULOS	270
RECURSOS WWW	272

Capítulo I. Introducción

El advenimiento de los sistemas de fibra óptica, la necesidad cada vez mayor de anchos de banda más grandes para la transmisión de datos multimedia y la agregación de las redes locales han originado el desarrollo de las arquitecturas de red de banda ancha. Por otro lado la Internet y su impresionante crecimiento y la diversidad de protocolos y formatos de transmisión multimedia (MP3, MPEG, RealAudio, Quicktime, etc) han originado que la demanda de los usuarios finales por un ancho de banda cada vez más grande se incrementa día con día, aunado a esto, factores como los niveles de servicio, la flexibilidad en el acceso y la configuración de la red se han convertido en críticos. Para satisfacer dicha demanda existen varios sistemas de comunicación, en los últimos años los más explotados han sido los sistemas de redes por cable. Sin embargo existen dos sistemas más que tendrán un desarrollo muy importante en el futuro debido esencialmente a dos características que las redes por cable no tienen: la capacidad de establecer comunicaciones móviles y la flexibilidad de cobertura. Los sistemas aludidos son las redes celulares digitales y los satélites de telecomunicaciones.

Motivación

El presente trabajo lo motiva por un lado la importancia central de las redes de banda ancha en el futuro que utilizarán la arquitectura ATM o arquitecturas similares que necesariamente estarán caracterizadas por la flexibilidad y la garantía de niveles de servicio y por otro el avance en los sistemas satelitales que prometen ofrecer un desempeño similar al de las redes terrestres de fibra óptica, un mayor flexibilidad en el equipo de banda base a bordo, el manejo de banda ancha y las ventajas que por si misma una arquitectura satelital ofrece.

Alcances y limitaciones

El trabajo explora la posibilidad de transmitir información multimedia a través de satélites de telecomunicaciones utilizando el protocolo ATM, obteniendo un desempeño similar al de las redes de fibra óptica terrestres. Pretendo comprobar de forma general que la transmisión de datos utilizando el protocolo ATM es posible y que su desempeño es aceptable. Por otro lado deseo identificar los elementos críticos en el diseño de este tipo de arquitecturas y finalmente establecer en forma general cual será su composición y funcionamiento a nivel de infraestructura satelital, arquitectura y protocolos.

La estructura de los capítulos obedece principalmente al planteamiento del problema central y a los conocimientos que son indispensables para entenderlo. El planteamiento del problema se basa en las siguientes preguntas

- ¿Cómo funciona el protocolo ATM?
- ¿Qué necesito para transmitir datos a través de un satélite utilizando el protocolo ATM?
- ¿Será posible que utilizando el satélite se obtenga el mismo desempeño y capacidad que tienen las redes terrestres?
- ¿Cómo estará formada la arquitectura de red ATM utilizando un satélite como elemento de una arquitectura terrestre?
- ¿Qué necesito para hacerle llegar al usuario final conexiones de banda ancha usando ATM?
- ¿Cuáles serán los nichos y necesidades que una arquitectura de este tipo atacará?
- ¿Qué tan flexible será dicha arquitectura, en términos de cobertura, número de usuarios y tipos de datos a transmitir?
- ¿Cuáles serán las características principales de los satélites con conmutadores ATM a bordo?
- ¿Cómo interactuarán los distintos protocolos y capas de red en una arquitectura de este tipo?
- ¿Cuándo estarán dichas arquitecturas productivas?

Organización del trabajo

La organización de los capítulos es la siguiente:

En el primer capítulo se exponen las generalidades del desarrollo de la tesis.

El segundo capítulo describe los elementos principales de la arquitectura ATM, analizando las funciones de las diferentes capas del protocolo a saber: capa física, capa ATM y las capas de adaptación superiores. Se hace especial énfasis en la exposición de las diferentes opciones de transporte que existen para enviar las celdas ATM. Se explica de forma detallada el proceso de conmutación y de señalización. En la sección de las capas de adaptación se profundiza la explicación de aquellas que se utilizan para la transmisión de datos que requieren un tasa de bits constante y las que se utilizan para servicios de tasa de bits no garantizada, especialmente la capa AAL-5 que ha probado ser la más flexible.

El tercer capítulo expone los conceptos básicos de los sistemas satelitales, entre ellos se encuentran, el enlace satelital y los parámetros principales para establecer su desempeño, los componentes del traspondedor y sus características principales, las estaciones terrenas, sus componentes y los tipos más comunes de antenas satelitales.

El cuarto capítulo presenta los elementos básicos de las comunicaciones digitales enfocándose a la transmisión vía satélite, se presentan los esquemas básicos de modulación y su desempeño, las jerarquías básicas de multiplexación de datos, así como los protocolos de acceso múltiple al satélite. Se hace una revisión de dichos protocolos y se clasifican en base a las necesidades principales de los sistemas satelitales. De forma especial se analizan los protocolos TDMA y ALOHA.

En el quinto capítulo se establecen las bases para el desarrollo de un sistema ATM vía satélite. Se inicia con la descripción de los elementos tecnológicos básicos que debe integrar el sistema de comunicaciones de un satélite para transmitir ATM. Se dedica una sección especial a estudiar la arquitectura y características del conmutador a bordo tomando como base la funcionalidad de los conmutadores terrestres mencionándose las posibles adaptaciones que tendrían que realizarse al funcionamiento del conmutador para poderlo utilizar en el satélite. Posteriormente se establece la arquitectura básica a nivel protocolo de una arquitectura ATM vía satélite y se establecen los elementos esenciales necesarios para la transmisión de las celdas ATM a través del espacio, tales como: tamaño de marco y campos de la celda adaptados al protocolo de transmisión satelital. Se realiza un estudio detallado sobre los niveles de error necesarios para los diferentes tipos de transmisión ATM, se establece la relación entre la tasa de bit en error y la tasa de celdas en error y se presentan los experimentos realizados para establecer de forma práctica dichos niveles de error para distintos tipos de servicios, incluyendo datos y multimedia. Asimismo se revisa el desempeño de distintos códigos de error y se presenta el diseño de un código de corrección específico para la transmisión de celdas ATM.

En el sexto capítulo se presentan las arquitecturas satelitales que caracterizarán a las redes ATM vía satélite del futuro. Se describe una arquitectura en específico y se comentan los elementos de diseño críticos de una arquitectura ATM.

Finalmente en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones del presente trabajo sugiriendo temas de estudio posteriores.

Capítulo II. Descripción de la Tecnología ATM

ATM y la Red de la "Siguiete Generación"

Si observamos la evolución desde el telégrafo digital al teléfono analógico y al teléfono digital, el origen de las redes ATM es obvio y natural. ATM es la culminación de la aplicación de la tecnología de computo a la red telefónica digital.

En 1988 los libros azules de la CCITT (Consultative Committee For International Telephone And Telegraph) describían a ATM como una tecnología de conmutación de enlaces de alta velocidad no canalizados. Los enlaces eran de fibra óptica, punto a punto, configurados en una jerarquía de velocidades en el rango de 1 gigabit por segundo. Conocida en los Estados Unidos como SONET (Synchronous Optical Network), estos enlaces de fibra óptica serían acoplados con conmutadores ATM para formar una nueva generación de red que se llamaría B-ISDN (Broadband Integrated Services Digital Network).

ATM como una tecnología "asíncrona"

ATM es capaz de mezclar diferentes tipos de información (voz, video, datos) en una red física no canalizada. El método de multiplexación de las celdas ATM es lo que define el concepto de un modo de transferencia asíncrono. En este contexto la palabra asíncrono se refiere a la habilidad de la red ATM para mandar sólo los datos asociados con una conexión cuando estos son generados. En las redes canalizadas aún cuando un canal está inactivo, un patrón especial de bits debe ser enviado en cada ranura de tiempo que representa un canal. Esta es la esencia de los modos de transferencia síncronos.

Problemas que resuelve ATM

Un "modo de transferencia" es una técnica para transmitir, multiplexar, conmutar y recibir información en una red.

En el caso del modo circuito para voz en la red telefónica y del modo paquete para LANs (Local Area Networks) ambos modos están especializados para las funciones de la red que los utiliza. Además implican la utilización síncrona de la red. ATM por el contrario, está estructurado para trabajar en forma

asíncrona. Los términos síncrono y asíncrono aplicados a modos de transferencia, se refieren al esquema de multiplexación: mezclar tráfico de diferentes fuentes en el mismo camino físico de la red.

En un modo de transferencia síncrono a cada fuente se le asigna un ancho de banda fijo basado en la posición: una banda de frecuencia en FDM (Frequency Division Multiplexing) o una ranura de tiempo en TDM (Time División Multiplexing). ATM no se basa en la posición; un encabezado identifica el tipo de tráfico y el destino. Todo el tráfico es enviado en base a la demanda. Por lo tanto la red ATM no es dependiente del servicio, trabaja bien en voz, video y datos. No es inflexible pues los requerimientos de ancho de banda son fácilmente ajustables. Todo en ATM se realiza basado en conexiones, no en canales.

La Diversidad de las Redes

Uno de los problemas más serios con las redes hasta ahora es que existen demasiadas y casi todas sustancialmente diferentes entre sí.

La capacidad de una red no puede ser utilizada para otra. Por otro lado, cada red está diseñada con respecto al tráfico de la hora/día más ocupados, es decir, valores pico lo cual representa un desperdicio de ancho de banda bajo operación normal.

Parámetros de Servicio

Todas éstas redes están basadas en parámetros de servicio diferentes, tales como tasa de bits, tolerancia a la variación del retraso, etc. De acuerdo a la figura 2.1 tenemos:

Teléfono	Datos	TV por cable	Video conferencia
Orientado a conexión	Orientado a conexión No orientado a conexión	No orientado a conexión	Orientado a conexión
Sensible a la variación del retraso	Sensible a la variación del retraso	Sensible a la variación del retraso	Sensible a la variación del retraso
Ancho de banda pequeño	Ancho de banda pequeño/grande	Ancho de banda grande	Ancho de banda pequeño/grande
CBR (Constant Bit Rate)	VBR (Variable Bit Rate)	CBR	CBR y VBR

Figura 2.1. Parámetros de servicio

Servicios orientados a conexión: requieren el establecimiento de la conexión entre el receptor y el emisor, antes de enviar la información.

Servicios no orientados a conexión: El receptor no tiene que ser contactado antes del envío de la información.

Sensibilidad a la variación del retraso: Se refiere a cuanto se deben de retrasar los datos en una red antes de que el receptor identifique una falla en la transmisión.

Ancho de banda: Se refiere a la tasa de bits requerida por el servicio.

Servicios CBR: Servicios que envían la información a una tasa de transmisión constante.

Servicios VBR: Servicios que envían la información a una tasa de transmisión variable.

La solución ATM

Las redes ATM están basadas en la celda como unidad de intercambio de datos. Una celda es un bloque de información de tamaño fijo. Todas las redes anteriores utilizan un simple flujo de 1s y 0s que está organizado en diferentes estructuras dependiendo de los servicios y la red. Esta organización se utiliza en ATM, pero sólo en los extremos finales de la red. A nivel físico, todo se envía y se recibe en celdas. A pesar de que las redes ATM son capaces de integrar voz y video, la fuerza inicial para su desarrollo es la necesidad de incrementar el ancho de banda y la interconexión entre LANs.

En el caso de las necesidades de las redes de datos, ATM está diseñado para intervenir en tres áreas:

- Ancho de banda para interconexión de LANs
- Eficiencia de las redes LAN en términos del número de enlaces para conectar múltiples LANs.
- Aplicaciones gráficas y de imágenes.

Redes ATM, Conceptos y Arquitectura

Las seis funciones para el transporte de las celdas

La red ATM tiene por objetivo transportar celdas a través de la red. Lo que se necesita hacer para transportar dichas celdas en la red se puede expresar por medio de seis funciones elementales.

Las capas del conjunto de protocolos ATM implementan cada una ellas.

1. **El ruteo de las celdas debe de ocurrir en una forma no orientada a conexión.** Esto no se realiza con todas las celdas en todas las conexiones, así que esta función no se necesita en todos los casos.

A pesar de que ATM es un avance lógico de los protocolos orientados a conexión, las redes ATM deben ofrecer todavía servicios no orientados a conexión para aquellos usuarios que los requieran. En las redes ATM, una capa separada es necesaria para establecer las tablas en los conmutadores ATM que asocian las direcciones lógicas de destino de los sistemas finales con las conexiones a los nodos de la red. Incluso en este caso de servicio no orientado a conexión las celdas deben seguir el mismo camino de conexión a través de la red.

2. **Se deben de realizar tareas de administración para establecer y mantener las conexiones ATM y para manejar los diferentes requerimientos de los servicios de voz, video y datos.** Esta tarea es descrita usualmente como adaptación porque este término enfatiza el hecho de que servicios tan diferentes como voz y video deben ser adaptados a un flujo de celdas donde todo será mezclado en celdas de datos en la red ATM
3. **La segmentación y el reensamblado deben de realizarse para romper marcos, paquetes u otras unidades de datos en celdas en el emisor y reconstruirlas otra vez en el receptor.**
4. **El manejo de celdas, o conmutación ATM, debe de llevarse a cabo etapa por etapa a través de la red y debe de realizarse en la misma forma en cada ruteador/conmutador.** En los sistemas finales esta capa debe multiplexar los diferentes tipos de conexiones de servicio en un flujo de celdas que preserve los requerimientos de servicio de la conexión. Esta capa construye los encabezados en el sistema emisor y los interpreta en el sistema receptor. En cada nodo de la red o conmutador, esta capa debe examinar los encabezados de la celda y tomar decisiones de conmutación basadas en los valores de los campos del encabezado, también es posible que modifique el contenido de los campos.
5. **Las técnicas de convergencia proveen las funciones para que diferentes tipos de medios de transporte físicos para las celdas puedan ser utilizados.** Las celdas pueden no ser enviadas por medio de un enlace ATM debido a que la mayoría de los medios de transporte físicos hoy en día son de marcos, los marcos de transporte físico T-1 (First-Level T-Carrier Digital Trunk), por ejemplo.
6. **El envío de los bits como unos y ceros a través del medio físico.** Las celdas, los marcos o los paquetes, deben de enviarse en la mayoría de los enlaces de red como una secuencia de ceros y unos. Esta capa debe de generar la codificación apropiada para representar los ceros y unos de forma que sean entendidos por el receptor.

Las capas ATM y sus funciones

OSI Capa	ATM Capa	ATM subcapa	Función
3/4	AAL	CS	Convergencia
		SAR	Segmentación y reensamblado
2/3	ATM		Control genérico de flujo Extracción-Generación del encabezado de celda Traducción de VPI/VCI Multiplexación y desmultiplexación de celda
2	Físico	TC	Desacoplamiento de celda Verificación y generación de la secuencia del HEC Delineamiento de celda Adaptación al marco de transmisión Generación y recuperación del marco de transmisión
1		PMD	Medio físico temporización de bit

Figura 2.2. Funciones de las capas ATM.

Las capas del conjunto de protocolos ATM y las funciones de cada una de ellas se muestran en la figura 2.2.

Es importante notar que la administración de las capas, es una función que involucra a todas las capas y al uso de varios componentes de convergencia en varias de ellas.

La convergencia es un concepto importante en ATM. Significa que existen múltiples opciones que pueden ser utilizadas en la parte superior o inferior de algunas capas en el modelo. Los bits pueden ser enviados en marcos o ráfagas. Pueden ser enviados por fibra óptica o cable coaxial. Pueden llegar con una tasa de transmisión constante o variable. Sin importar las diversas opciones de una capa o de otra, las capas de convergencia ayudan a presentar una interfase uniforme a las capas adyacentes.

La capa más baja del modelo ATM es la capa física PHY (Physical Layer), la cual está dividida en dos subcapas: la subcapa de Convergencia de la Transmisión TC (Transmission Convergence) y la subcapa del Medio Físico PM (Physical Media). La PHY abarca sólo las funciones que dependen completamente del medio físico por sí mismo. Estas funciones dependientes del medio físico incluyen las funciones transmisión y alineamiento de los bits para transmitir a través del enlace; por lo tanto la codificación de la línea se realiza aquí y si la señal eléctrica es enviada utilizando una fibra óptica, la conversión también se realiza aquí.

La subcapa de convergencia de la transmisión es la más baja de las capas de convergencia de ATM.

Esta realiza cinco funciones específicas para la capa ATM superior que son:

1. **Generación y recuperación del marco de transmisión.** Si el flujo de celdas se envía a través de un sistema de transmisión por marcos, como el T-3 (Third-Level T-Carrier Digital Trunk), la subcapa TC empaqueta las celdas en un marco en el emisor y las desempaqueta en el receptor.
2. **Adaptación del marco de transmisión.** El proceso arriba mencionado requiere de un conocimiento del tipo de codificación de marco empleado en el enlace. La estructura del marco debe de ser adaptada para la transmisión de celdas ATM.
3. **Delineamiento de las celdas.** En marco o no, la subcapa TC debe proveer algún mecanismo para que el receptor detecte los límites de las celdas del flujo de bits que recibe.
4. **Generación y verificación de la secuencia del encabezado de control de error HEC (Header Error Control).** El control de errores en ATM se realiza sólo en el encabezado. Un byte del HEC se utiliza para este propósito. El transmisor genera el byte del HEC y el receptor lo verifica. Si una celda no pasa la revisión del byte del HEC, se descarta para prevenir que la celda sea conmutada a un destino incorrecto.
5. **Desacoplamiento de la tasa de transmisión de la celda.** Un servicio de datos por ráfagas, puede estar mucho tiempo inactivo y tratar de enviar una gran cantidad de información de un solo golpe. Durante los periodos de inactividad, la subcapa de TC insertará celdas especiales, "inactivas", y las retirará en el receptor. Sólo las celdas "no inactivas" pasarán a la capa ATM.

La capa ATM es la parte central de las redes ATM y sus funciones son:

1. La capa ATM multiplexa las celdas en el mismo medio físico. Las celdas multiplexadas son distinguidas por los nodos de la red (conmutadores ATM) en el destino utilizando los campos del encabezado que identifican a los caminos virtuales VP (Virtual Path) y a los canales virtuales VC (Virtual Channel).
2. La capa ATM debe trasladar el identificador VP (VPI, Virtual Path Identifier) entrante y el identificador VC (VCI, VIRTUAL Channel Identifier) de un enlace a un par VPI/VCI para el enlace de salida. Los nuevos pares se colocan en la celda cuando esta es conmutada al enlace de salida. Los valores se obtienen de una tabla en el conmutador. Esta tabla se construye en el tiempo de conexión, utilizando

mensajes del protocolo de señalización en el plano de administración de ATM. (Los ruteadores no tratan de la misma forma con la conexión).

3. En los puntos finales de la red, la capa ATM genera e interpreta los encabezados de las celdas. Sólo el campo de carga útil es enviado a las capas superiores.
4. La capa ATM provee un mecanismo de control de flujo, sin embargo dicho protocolo no está claramente definido y se pueden utilizar otros esquemas.

La capa de adaptación ATM (AAL, ATM Adaptation Layer) se requiere en el sistema terminal pero no siempre es requerida en los nodos internos de la red. La AAL está dividida en dos subcapas: la subcapa de segmentación y reensamble SAR (Segmentation And Reassembly) y la subcapa de convergencia CS (Convergence Sublayer).

La SAR proporciona la función necesaria para que el receptor pueda asociar una secuencia de celdas con el marco o la unidad de datos original que el emisor dividió en celdas. La CS provee el mecanismo para mezclar los diferentes requerimientos de voz, video y datos mediante la definición de un cierto número de clases de servicio, cada una con los parámetros apropiados para el servicio. Estos están diseñados para proveer los parámetros de calidad de servicio apropiada QoS (Quality Of Service) de una conexión en particular. Las cuatro clases de servicio actualmente definidas corresponden a seis tipos de AAL para una implementación ATM.

Las cuatro clases de servicio están definidas por tres parámetros que las capas superiores pueden requerir del transporte.

1. **Relación de tiempo entre la fuente y el destino.** También conocidas como aplicaciones en tiempo real, el tráfico tal y como el de la voz digitalizada a 64 kbps debe mantener la relación de tiempo a lo largo de la red ATM. Esta relación de tiempo es esencial en la transmisión de voz y en otras aplicaciones de tasa de transmisión constante (CBR). Las aplicaciones de CBR no funcionarán correctamente si el emisor genera 64 kps pero la red ATM entrega al receptor 32 kbps y después 96 kbps aunque el número de bits en términos globales es el mismo.
2. **Tasa de transmisión.** Algunos servicios tienen una tasa de transmisión constante, otros tienen una tasa de transmisión variable (VBR). Las aplicaciones de CBR incluyen la voz y el video digitalizados,

no comprimidos. Es importante hacer notar que los servicios de CBR automáticamente se convertirán en servicios de VBR con la utilización de la compresión.

3. **Modo de conexión.** Algunos servicios tales como la voz siempre están orientados a conexión. Esto es, una conexión debe de establecerse a través de la red con el destino antes de que la transferencia se pueda llevar a cabo. Algunos servicios están no orientados a conexión. La transferencia de datos se puede realizar en cualquier instante. Otros, incluyendo muchos tipos de transferencia de datos pueden ser de ambos tipos.

	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
Relación de tiempo entre la fuente y el destino	Requerido	Requerido	No requerido	No requerido
Tasa de bits	Constante	Variable	Variable	Variable
Modo de conexión	Orient. a conexión	Orient. a conexión	Orient. a conexión	No orient. a conex.

Figura 2.3. Las cuatro clases de servicios de la AAL

Las clases de servicio de la AAL establecidas por la ITU y los tipos de AAL se muestran en la figura 2.3.

Los servicios típicos que utilizan estas clases pueden ser:

Clase A: Emulación de circuito, video y voz de tasa de transmisión constante.

Clase B: Video y Audio de tasa de transmisión variable (comprimido)

Clase C: Transferencia de datos orientada a conexión

Clase D: Transferencia de datos no orientada a conexión.

Debe de hacerse notar que las clases de servicio han sido modificadas por el Foro ATM. El Foro ATM reconoce cinco categorías de servicio de AAL.

Los Canales y caminos virtuales de ATM

ATM es una arquitectura que utiliza transportes de red no canalizados. Sin duda el tráfico debe seguir siendo identificado como voz, video o datos debido a que se tienen que preservar los parámetros de calidad de cada servicio por separado. Como no existen canales físicos para distinguir el tráfico en una red ATM, su lugar es tomado por conexiones lógicas. En lugar de canales de voz y video, las redes ATM tienen conexiones de voz o video. En las redes ATM estas conexiones lógicas se establecen y mantienen por medio de una estructura de identificación que consta de dos partes: el canal virtual y el camino virtual.

Los canales virtuales (VC) y los caminos virtuales (VP) forman las funciones de la capa de transporte de ATM en un nivel lógico. Un canal virtual "es un concepto utilizado para describir el transporte unidireccional de celdas ATM asociado con un valor que lo identifica" (CCITT I.113). Este identificador único es el VCI (VIRTUAL Channel Identifier). Nótese que el VCI es válido en una sola dirección. Un camino virtual es "un concepto utilizado para describir el transporte unidireccional de celdas pertenecientes a canales virtuales que están asociados por un valor del identificador en común

"(CCITT I.113). Este es el VPI (Virtual Path Identifier). Este identificador es válido para una sola dirección.

Los VCI y los VPI están contenidos en el encabezado de las celdas y son jerárquicos. Muchos VC pueden formar un VP. Las celdas fluyen a través del camino de transmisión en una red ATM.

En el encabezado de la celda existen campos para el VCI y el VPI. El camino de transmisión por sí mismo puede estar comprendido de varios VCs. El propósito de los VP y los VC, además de ser una forma muy útil para distinguir los diferentes tipos de tráfico y los diferentes destinos, forman un método para establecer y utilizar otros dos conceptos en ATM: la idea del enlace virtual y de la conexión virtual.

Un enlace virtual de canal es un transporte de celdas unidireccional desde el lugar donde el VCI se asignó al lugar donde este es traducido (conmutado) o removido. Del mismo modo un enlace de camino virtual está limitado por los puntos dentro de la red donde el valor del VPI es asignado, removido o traducido. Por lo tanto los enlaces en los VC o en los VP son los caminos de la red ATM donde los valores de los VCI y VPI permanecen constantes. Los puntos donde cambian establecen los puntos finales del enlace.

Obviamente los sistemas del usuario final estarán separados por más de un enlace de VC y de VP en la mayoría de los casos. En este contexto, la concatenación de estos enlaces de canal virtual es llamada conexión de canal virtual VCC (Virtual Channel Connection) y una concatenación de enlaces de camino virtual es llamada conexión de camino virtual (VPC, Virtual Path Connection) Por esto una conexión en una red ATM guía a todas las celdas a lo largo del mismo camino en la red ATM, y cada conexión consiste en una serie de enlaces, todos ellos con un valor consistente en los campos de VCI o de VPI en el encabezado de la celda. Una conexión tiene muchos valores consecutivos en los campos de VCI y VPI en los encabezados de las celdas, pero siempre la misma serie conforme avanzan a través de la red. La

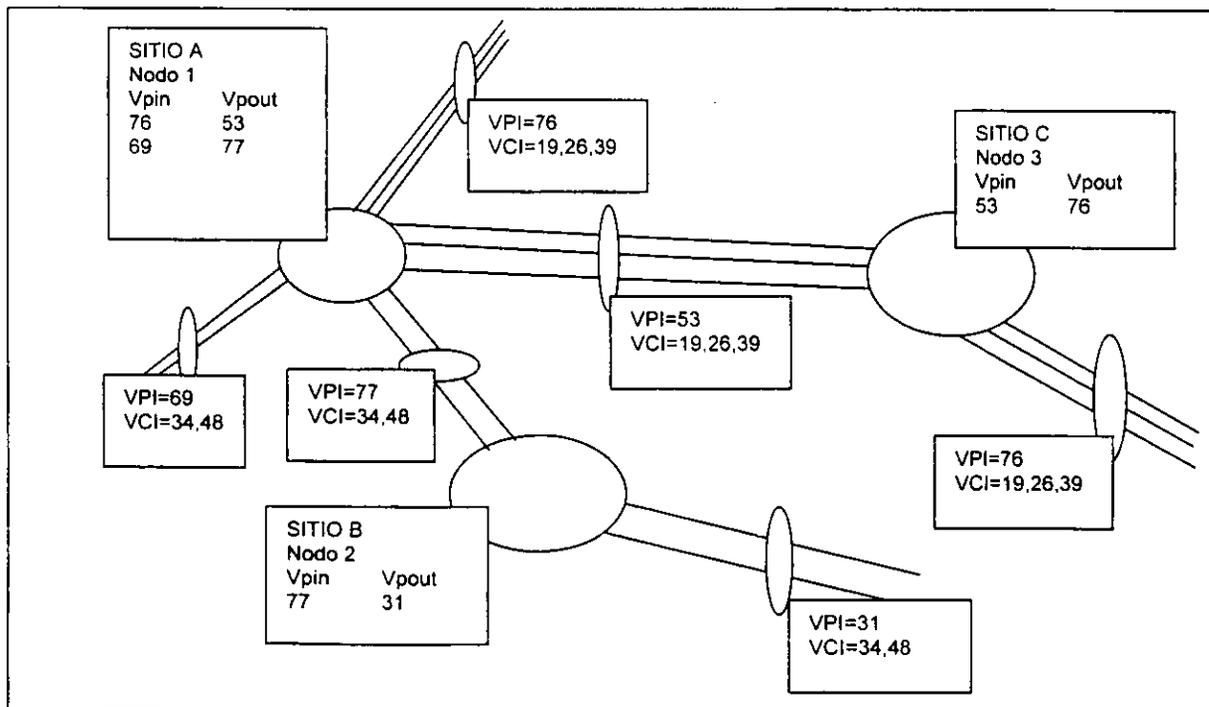
multiplexación y la conmutación son realizadas primero en los VCs y luego en los VPs. Esto se basa en su relación jerárquica.

La función del campo de VCI es identificar las conexiones asignadas de forma estática.

En una red ATM orientada a conexión un VCI es asignado al momento del establecimiento de la conexión via el canal de señalización. Este sólo tiene un significado local para el enlace entre los conmutadores ATM (otros conmutadores pueden utilizar los mismos valores de la conexión en otros enlaces) y es traducido conmutador por conmutador, mediante búsquedas realizadas en las tablas de cada uno de ellos a lo largo de la red. Cuando la conexión es liberada, el VCI puede ser reutilizado por otras conexiones. Sin embargo B-ISDN también permite conexiones semipermanentes entre puntos terminales. Los nodos ATM utilizarán los valores de los VCI asignados a los clientes para conmutar el tráfico entre los sitios ATM de los clientes. De esta forma será más fácil para el nodo ATM conmutar un camino entero entre los sitios de los clientes en lugar de conmutar canal por canal. El uso típico de los valores de los VCI y los VPI se muestran en la figura 2.4.

La figura 2.4 muestra una versión simplificada de una red ATM que consta de tres nodos ATM (conmutadores) y tres sitios del cliente.

Figura 2.4. Utilización de los VPI y VCI



Además dicha figura muestra la entrada de la tabla de traducción que necesitamos de VCI e VPI en cada conmutador de acuerdo a la visión del usuario A.

A continuación describiremos la utilización de los valores de los VCI y los VPI en los encabezados de la celda para entregar el flujo de datos a través de la red ATM. El proveedor del servicio de red ha acordado con los usuarios en el sitio A que cuando el sitio A mande celdas al sitio B, el sitio A genere celdas con el valor de 69 en el campo VPI del encabezado. Del mismo modo las celdas enviadas por el sitio A con el VPI igual a 76 serán entregadas al sitio C. Por lo tanto las conexiones indicadas en el campo VPI toman el lugar de los destinos de los canales físicos. Esto es el equivalente de un circuito virtual permanente en una red de paquetes conmutados.

Los canales están representados por los valores del campo VCI. Los valores del VCI pueden ser establecidos mediante una negociación previa a la conexión actual o por señalización como los VPI. Pero debido a que los VCI existen para representar recursos dinámicos, es más conveniente que estos sean establecidos mediante el protocolo de señalización durante cada conexión (circuitos virtuales conmutados) mientras que los VPI se establecerán cuando el servicio sea proporcionado por primera vez (circuitos virtuales permanentes)

En la figura 2.4 el sitio A ha definido al VCI=34,48 contenidos dentro del VPI=69 dirigido hacia el sitio B. El sitio A también ha definido VCI=19,26 y 39 contenidos dentro del VPI=76, terminándose este en el sitio C.

Por lo que respecta a las celdas, el nodo ATM 1 procesará todas las celdas recibidas del sitio A hacia la capa física. La tabla mostrada en la figura 2.4. como (VPI_{IN}/VPI_{OUT}) es una tabla abreviada de la información clásica del enlace físico del sitio A al nodo 1. El conmutador ATM traducirá el campo VPI de la celda que viene del sitio A basado en la tabla y la colocará en la línea apropiada de salida. En este caso una celda con el VPI=76, será colocada en el enlace al nodo 3 con el VPI=53. En el nodo 3, la celda con el VPI=53 será enviada al sitio C con el VPI=76.

Es importante hacer notar que no existe ningún requerimiento que indique que el VPI del emisor tenga que ser el mismo que el del receptor. Ningún tipo de conmutación o procesamiento se llevó a cabo en los campos VCI. Sin embargo existen ciertas limitaciones. Por ejemplo, puede haber muchos enlaces de sitios de usuarios entrando en el nodo ATM 1, pero el campo VPI sólo tiene 8 bits, pudiéndose utilizar como máximo 256 VPI. Si se necesita uno más, un segundo enlace tiene que ser instalado. Los VCI son

más flexibles debido a que su campo consta de 16 bits, tenemos 64000 conexiones de sitio a sitio, pudiéndose de esta forma utilizar subconjuntos de ellos para conectar cantidades más grandes de sitios. Otra solución es permitir la conmutación en los VPI, pero esto implica demasiado trabajo para los nodos.

Parámetros de Desempeño en ATM

De acuerdo a la recomendación I.35B de la ITU-T (International Telecommunications Union – Telecommunications Standardization Sector) se definen cuatro posibles situaciones que pueden ocurrir cuando una celda entra a una red ATM:

1. **Celda entregada exitosamente.** La celda llega al destino con un tiempo de retardo menor a T (tiempo límite establecido en los QoS). Ningún error es identificado al explorar la información en la celda (sólo el encabezado). Nótese que, para que una celda sea considerada entregada exitosamente, debe de llegar dentro de un periodo de tiempo específico y no sólo sin errores.
2. **Celda con error.** La celda llega con al menos un bit en error detectado en la información que contiene. Otra posibilidad es una celda con error severo, donde el campo de bits en error de la celda es igual a N ($N > 1$, no especificado por la ITU, pero se utiliza $N = 2$).
3. **Celda perdida.** La celda no llega o llega después del tiempo permitido de retardo de celda T, en este caso la celda es descartada en el destino.
4. **Celda insertada.** La celda contiene un error no detectable en el encabezado o es desviada por un nodo ATM por lo que llega al destino equivocado.

A continuación se mencionan los parámetros que se utilizan para caracterizar totalmente el Desempeño de cualquier red ATM.

1. **Razón de pérdida de celdas.** Es la razón dada por el número de celdas perdidas entre la suma del número de celdas perdidas más las celdas que han sido entregadas con éxito.
2. **Tasa de inserción de celdas.** Es el número de celdas insertadas en la red ATM en un determinado periodo de tiempo. Este es el parámetro de desempeño definido oficialmente por la ITU. El Foro ATM ha redefinido la tasa de inserción de celdas como una razón, la cual es medida dividiendo el total de celdas desviadas entre la suma del número total de celdas desviadas más el número total de celdas enviadas a la conexión
3. **Razón de celdas severamente dañadas.** Es la razón dada por el número de celdas severamente dañadas entre el número de celdas entregadas con éxito.

4. **Capacidad de transferencia de celda.** Es el número máximo de celdas entregadas exitosamente por unidad de tiempo en una conexión ATM.
5. **Retraso en la transferencia de celda.** Este parámetro tiene dos componentes, el retraso en la transferencia medio y el promedio aritmético de un número específico de retrasos de celdas. La variación en el retraso de la celda CDV (Cell Delay Variation) es más crítico. Esta es la diferencia entre un retraso de celda específico y el promedio. Esta variación causa la mayoría de los problemas en la transmisión de voz y video.

Control de tráfico en ATM

La ITU, en su recomendación I.311, ha definido un conjunto de funciones que todas las redes ATM deben de implementar para llevar a cabo el control del tráfico. Estas son:

1. **Control de admisión de la conexión.** Las redes ATM deben de destinar la cantidad de recursos apropiada para atender una conexión. Si no se le pueden dar estos recursos a la conexión, la red ATM no la aceptará.
2. **Parámetro de control de uso.** Las redes ATM deben vigilar la interfase de red con el usuario para asegurarse de que los volúmenes de tráfico de celdas son los acordados.
3. **Control de prioridad.** Las redes ATM deben ofrecer buffers en los nodos de la red bajo cualquier tipo de condiciones. Si existen condiciones de congestión, cuando existen demasiadas celdas en la red, puede utilizarse un mecanismo de prioridad para remediar la situación de congestión. Dicho mecanismo contempla el que alguna celdas puedan ser descartadas bajo estas condiciones. Debe existir un método para que los nodos de la red ATM identifiquen las celdas que pueden ser descartadas y a las que sólo bajo condiciones muy estrictas se les puede descartar.
4. **Control de congestión.** Las redes ATM deben prevenir que las condiciones de congestión se difundan en la red. La congestión es un concepto muy confuso dentro de los círculos de diseño de redes. Si bien está relacionado con el control de flujo no es sólo eso. El control de flujo se refiere a la idea de que el emisor no debe ser capaz de enviar información a mayor velocidad de la que el receptor puede recibir. La congestión, por otra parte, es una propiedad global de la red, no una propiedad de un usuario.

La operación y el mantenimiento de las redes ATM

En ATM se definen un conjunto de acciones que deben ser ejecutadas para asegurar que los componentes de la red funcionen apropiadamente. Estas acciones se conocen como operaciones de administración y mantenimiento OAM (Operations And Maintenance). Dichas funciones son implementadas por celdas ATM especiales que fluyen periódicamente entre varios componentes de la red.

Se han definido cinco funciones que deben realizar las celdas OAM:

1. **Monitoreo del desempeño.** El monitoreo del desempeño asegura el funcionamiento normal de la red, llevando a cabo revisiones periódicas de las entidades de la red.
2. **Detección de fallas y defectos.** Dicha detección produce alarmas en caso de que ocurran fallas.
3. **Protección del sistema.** El sistema de protección excluye los componentes dañados de la red para prevenir que el problema se extienda.
4. **Información de desempeño o fallas.** Esta información son códigos de error o reportes que responden a las peticiones de la administración de la red y que procesan las indicaciones provenientes de las alarmas.
5. **Localización de errores.** La localización de errores realiza diagnósticos internos o externos en componentes sospechosos de la red.

El conjunto de protocolos ATM: Las capas inferiores.

La Capa Física de ATM y sus medios de transporte

La ITU -T, en el material de definición de B-ISDN acerca de ATM, especifica sólo dos transportes físicos para las celdas ATM. El primero es para la transmisión de celdas ATM en dos cables coaxiales de 75 Ω , uno para transmitir y otro para recibir a una velocidad de 155.520 Mbps (la tasa del STS-3c (Synchronous Transfer Signal level 3 Concatenated) de SONET). El segundo es para la transmisión de celdas ATM a través de dos fibras ópticas monomodo a 622.080 Mbps (la tasa del STS-12c (Synchronous Transfer Signal level 12 (622.08 Mbps)) de SONET).

El Foro ATM ha aprobado 4 mecanismos estándares de transporte de alta velocidad para las celdas ATM. Estos son:

1. 155.520 Mbps en fibra multi-modo o mono-modo (STS-3c).

2. 155.520 Mbps en fibra multimodo o par trenzado blindado STP utilizando codificación de 8B/10B (basado en la arquitectura "Channel Fiber" de ANSI (American National Standards Institute))
3. 100 Mbps en fibra multimodo utilizando codificación 4B/5B (basado en la arquitectura FDDI (Fiber Distributed Data Interfase) de IEEE y ANSI llamada TAXI (Transparent Asynchronous Exchange Interfase) por el Foro ATM).
4. 44.736 Mbps en cable coaxial (DS-3 (Digital Signal 3 Level (45 Mbps)) conocido como T-3 (Third-Level T-Carrier Digital Trunk)).

SONET/SDH

En 1985 el brazo para investigación de las RBOCs empezó a trabajar en un estándar llamado SONET. Después la CCITT se unió a dicho esfuerzo, el cual dio como resultado el estándar SONET y un conjunto de recomendaciones paralelas (G.707, G.708 y G.709) en 1989. Las recomendaciones de la CCITT se llamaron SDH (Synchronous Digital Hierarchy) pero difieren de SONET en detalles menores. Prácticamente todo el tráfico telefónico de larga distancia en los Estados Unidos y en otras partes del mundo utiliza troncales de SONET en la capa física.

El diseño de SONET tiene cuatro metas principales. La primera y más importante, SONET tiene que hacer posible que diferentes transportes trabajen juntos. Para lograr esta meta es necesario definir un estándar de señalización común con respecto a la longitud de onda, la temporización, la estructura del marco y otros aspectos.

La segunda, algún medio era necesario para unificar los sistemas de Estados Unidos, Europa y Japón, todos ellos basados en canales PCM de 64 kbps, pero con combinaciones incompatibles.

La tercera SONET tenía que proveer una forma de multiplexar múltiples canales digitales. En el momento que SONET fue diseñada, el transporte de mayor velocidad en los E.U era el T3 a 44.736 Mbps. Parte la misión de SONET es continuar la jerarquía al orden de gigabits/s y mayores velocidades. Una forma estándar de multiplexar canales más lentos también era necesaria.

La cuarta, SONET tenía que proveer soporte para operaciones, administración y mantenimiento (OAM). Una de las primeras decisiones fue el hacer a SONET un sistema TDM (Time-Division Multiplexing) tradicional, con todo el ancho de la fibra dedicado a un solo canal que contiene ranuras de tiempo para

los diferentes subcanales. Por lo tanto SONET es un sistema síncrono. Es controlado por un reloj maestro con una exactitud de 1 parte en 10^9 . Los bits en una línea SONET son enviados en intervalos extremadamente precisos, controlados por el reloj maestro.

Un sistema SONET consiste de conmutadores, multiplexores y repetidores, todos conectados por la fibra. Un camino de la fuente al destino y un repetidor y un multiplexor intermedio se muestran en la figura 2.5.

En la terminología SONET una fibra que va de un dispositivo a otro sin nada en medio se llama sección. Un enlace entre dos multiplexores (con posibilidad de repetidores entre ellos) se llama línea. Finalmente la conexión entre la fuente y el destino (con posibilidad de multiplexores y repetidores) se llama camino. La topología de SONET puede ser de red, pero usualmente es un anillo dual.

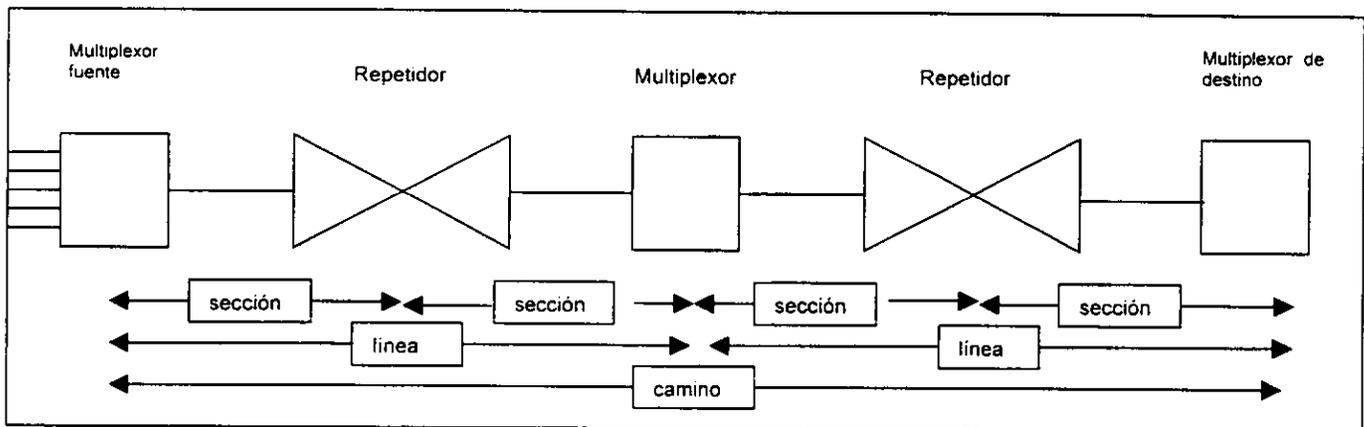


Figura 2.5. Camino SONET.

El marco básico de SONET es un bloque de 810 bytes enviado cada $125 \mu\text{s}$. Como SONET es síncrona, Los marcos son emitidos aunque no exista información relevante dentro de ellos. El tener 8000 marcos/s se ajusta a la tasa de muestreo de los canales PCM utilizados por los sistemas telefónicos digitales.

El marco de 810 bytes de SONET se puede describir como un rectángulo de bytes de 90 columnas de ancho por 9 columnas de alto. Por lo que 6480 bits son transmitidos 8000 veces por segundo, para lograr una tasa de transmisión de 51.84 Mbps. Este es un canal básico de SONET y es llamado Señal de Transporte Síncrono-1 STS-1 (Synchronous Transfer Signal Level 1). Todos los troncales de SONET son múltiplos de STS-1.

Las tres primeras columnas de cada marco están reservadas para información de administración del sistema, como se muestra en la figura 2.6. Los primeros tres renglones contienen el sobreencabezado de la sección, las siguientes seis contienen el sobreencabezado de la línea. El sobreencabezado de la sección es generado y revisado al inicio y al final de cada línea.

En las 87 columnas restantes se transmiten 50.112 Mbps de datos del usuario. De cualquier modo los datos de usuario, llamados SPE (Synchronous Payload Evelope) no siempre empieza en el renglón 1, columna 4. El SPE puede empezar en cualquier parte dentro del marco. Un apuntador al primer byte está contenido en el primer renglón del sobreencabezado de la línea. La primera columna del SPE es el sobreencabezado de camino o ruta.

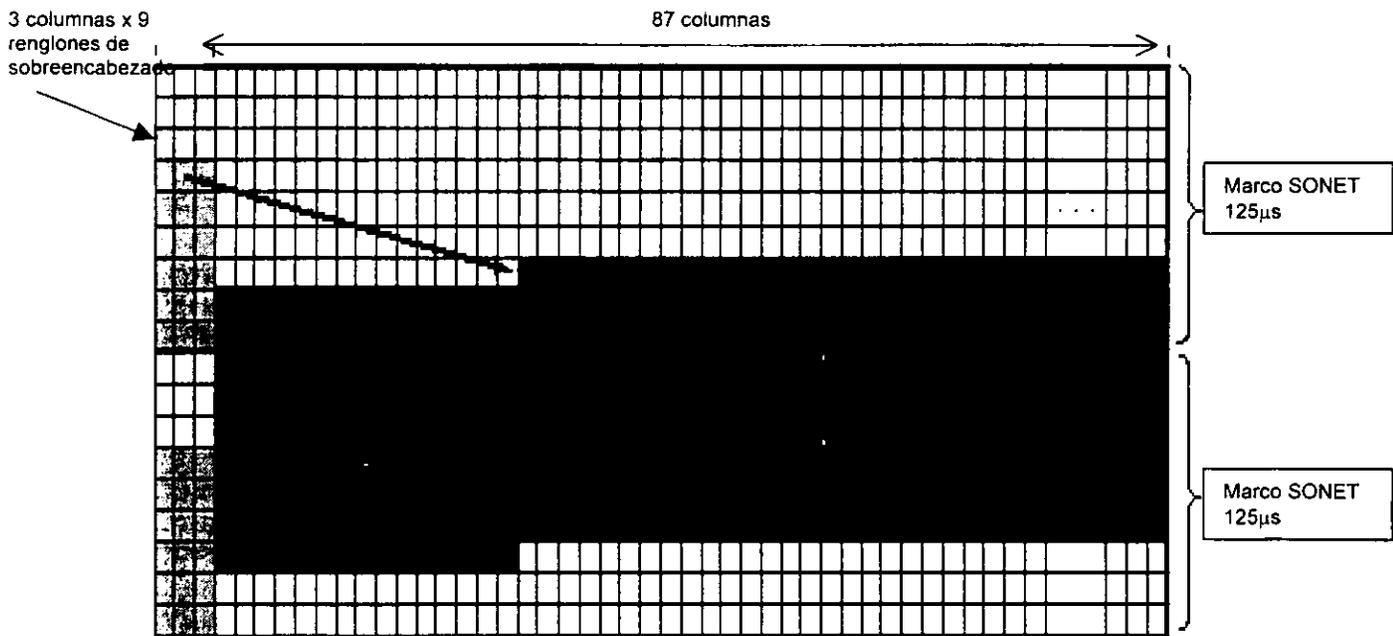


Figura 2.6. Dos marcos SONET concatenados

- Sección de sobre encabezado
- Sobreencabezado de línea
- Sobreencabezado de camino
- Paquete de carga útil síncrono SPE

La habilidad de permitir al SPE que inicie en cualquier lugar dentro del marco SONET e incluso expandirse a dos marcos, mostrada en la figura, agrega flexibilidad extra al sistema. Por ejemplo, si una carga útil llega al destino mientras un marco neutro de SONET se construye, la carga puede ser insertada en dicho marco, en lugar de esperar a que empiece el siguiente. Esta característica es útil también cuando la carga útil no se ajusta exactamente a un marco, como en el caso de una secuencia de 53 bytes de una celda ATM. El primer renglón del sobreencabezado de línea puede entonces apuntar al inicio de la primera celda completa para proveer sincronización.

Los sobreencabezados de sección, línea y camino contienen un conjunto de bytes utilizados para operaciones, administración y mantenimiento. Como cada byte ocurre 8000 veces por segundo, esto representa un canal PCM (Pulse-Code Modulation). Tres de estos son, de hecho, para proveer canales de voz para el personal de mantenimiento de la línea, sección y camino. Otros bytes son utilizados para el monitoreo de errores de paridad y de marco, sincronización, reloj y otras funciones.

El multiplexaje de múltiples flujos de datos, llamados tributarios juega un papel importante en SONET. El multiplexaje se ilustra en la figura 2.7. A la izquierda, empezamos con varios flujos de bits de baja velocidad, que se convierten a la tasa básica de SONET STS-1 (Synchronous Transfer Signal level 1 (51.84 Mbps)), los tributarios se multiplexan en un flujo de salida STS-3 (Synchronous Transfer Signal level 3 (155.52 Mbps)) de 155.52 Mbps. Este flujo, a su vez, es multiplexado con otros tres hasta el flujo de salida final que tiene 12 veces la capacidad del flujo STS-1 (Synchronous Transfer Signal level 12 (622.08 Mbps)). En este punto la señal se mezcla para prevenir que series largas de unos y ceros interfieran con el reloj y se convierte la señal eléctrica a óptica.

El multiplexaje es realizado byte por byte. La jerarquía de multiplexaje de SONET se muestra en la siguiente figura.

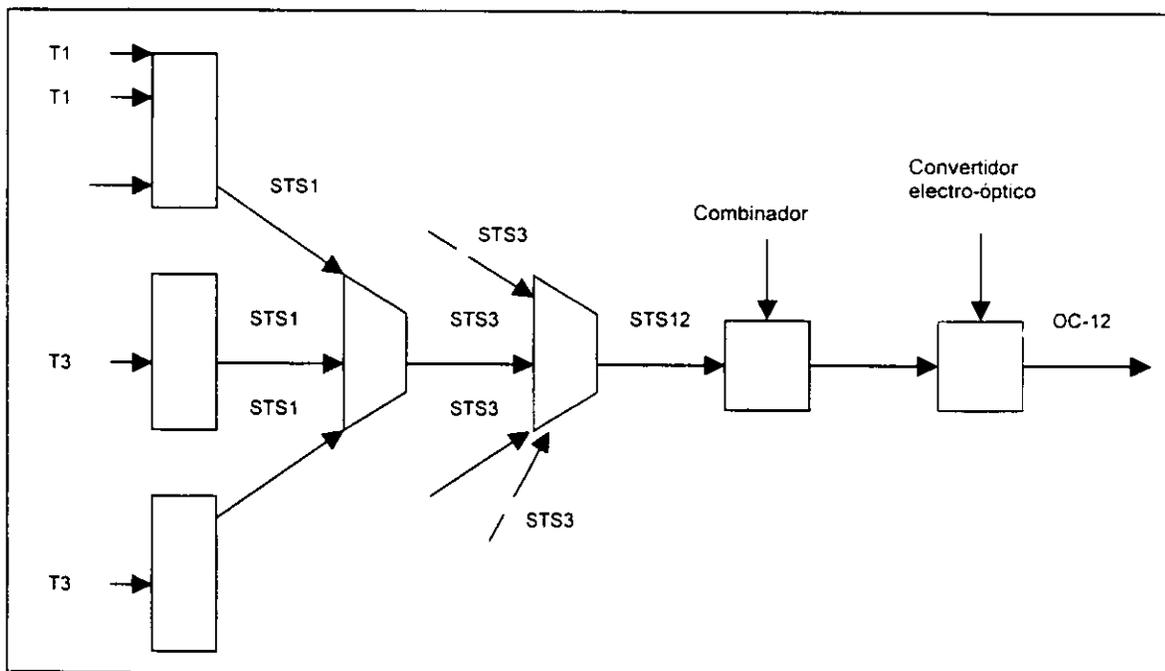


Figura 2.7. Multiplexación en SONET

Se han definido tasas desde STS-1 (Synchronous Transfer Signal level 1 (51.84 Mbps)) hasta STS-48 (Synchronous Transfer Signal level 48 (2488.32 Mbps)). El transporte óptico que corresponde a STS-n se

llama OC-n (Optical Carrier Level n, $n=1.256$) pero es exactamente igual excepto por el mezclado. Los nombres de SDH son diferentes. empiezan con OC-3 porque los sistemas basados en la CCITT no tienen una tasa cercana a los 51.48 Mbps. El transporte OC-9 existe porque se asemeja al troncal de mayor velocidad que se usa en Japón. El OC-18 y el OC-36 se utilizarán en Japón en el futuro. La tasa neta incluye todos los sobreencabezados. La tasa SPE excluye los sobreencabezados de línea y de sección. La tasa de usuario excluye todos los sobreencabezados y sólo cuenta las 86 columnas disponibles para la carga útil.

Cuando un transporte como el OC-3 no se multiplexa sino que contiene datos de la misma fuente la letra c se agrega a su designación, así que OC-3c indica un flujo de datos desde una fuente única a 155.52 Mbps. Los tres flujos OC-1 dentro del flujo OC-3c están separados por una columna, la primera columna del primer flujo, luego la primer columna del segundo flujo seguida por la primer columna del flujo 3, así sucesivamente, teniendo un marco de 270 columnas de ancho y 9 columnas de profundidad.

La cantidad de datos de usuario en un OC-3c es ligeramente mayor que en una cadena OC-3 (149.760 Mbps vs. 146.608 Mbps) debido a que la columna de sobrecarga de camino se incluye en el SPE sólo una vez, en lugar de tres si hubieran sido tres flujos OC-1 independientes. En otras palabras, 260 de las 270 columnas están disponibles para datos del usuario en un OC-3c mientras que en un OC-3 sólo se dispone de 258 columnas.

SONET			Índice de Datos (Mbps)		
Eléctrica	Óptico	Óptico	Bruto	SPE	Usuario
STS-1	OC-1		51.84	50.112	49.536
STS-3	OC-3	STM-1	156.52	150.336	148.608
STS-9	OC-9	STM-3	466.56	451.008	445.824
STS-12	OC-12	STM-4	522.08	601.304	594.432
STS-16	OC-18	STM-8	933.12	902.016	891.648
STS-24	OC-24	STM-9	1244.16	1202.688	1188.884
STS-36	OC-36	STM-12	1866.24	1804.032	1793.298
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32	2405.376	2377.728

Figura 2.8. Tasas de transmisión de SONET/SDH

Es claro ahora porque ATM corre a 155 Mbps, la intención es transportar celdas ATM a través de troncales OC-3c de SONET.

La capa física de SONET está dividida en cuatro subcapas. La capa más baja es la capa fotónica y tiene que ver con las propiedades de la luz y la fibra que se utilizarán.

Las tres capas restantes corresponden a las secciones, líneas y caminos.

La capa de sección maneja un enlace de fibra punto a punto, generando un marco estándar en un extremo y procesándolo en el otro. Las secciones pueden empezar y terminar en los repetidores, cuya función es amplificar y regenerar la señal pero no la cambian o la procesan.

La subcapa de línea se refiere al multiplexaje de tributarias en una línea y el desmultiplexaje de ellas en el otro extremo.

Interfase de Datos Distribuida de Fibra FDDI (Fiber Distributed Data Interfase)

FDDI es una interfase para redes locales de alto desempeño que corre a 100 Mbps para distancias de hasta 200 km con hasta 1000 estaciones conectadas. Puede ser utilizada del mismo modo que cualquier otra red 802 (Estándar IEEE). Pero con su ancho de banda se puede utilizar como red de respaldo para conectar redes locales basadas en cobre como se muestra en la figura 2.9

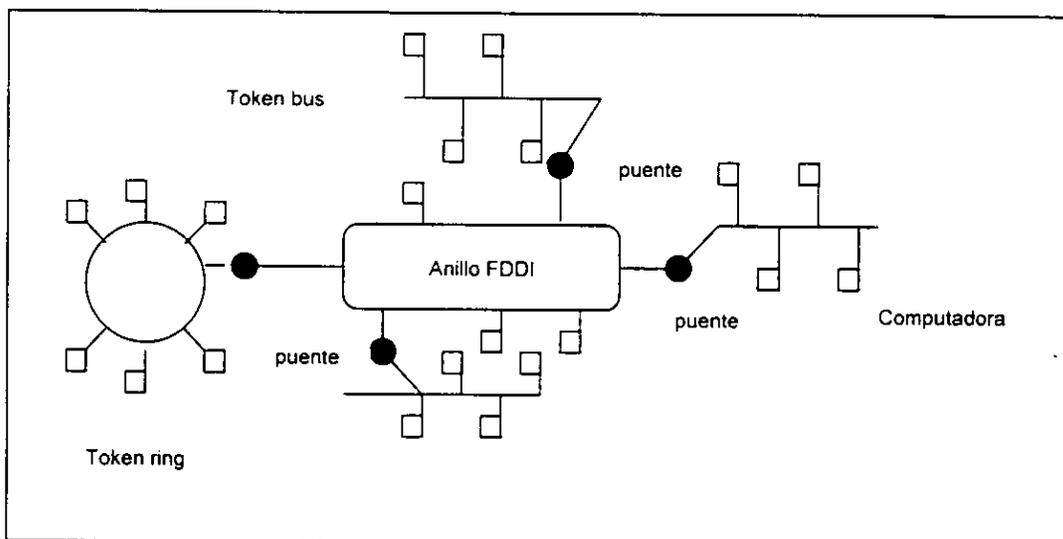


Figura 2.9. Red FDDI de respaldo.

100 Mbps TAXI (FDDI)

Esta versión de Token Ring de 100 km fue desarrollada por ANSI (American National Standards Institute) con el nombre de X3T9.5 y adoptada por la IEEE como 802.8. FDDI es una serie de estándares desarrollados por ANSI, pero es común hablar de FDDI como si sólo fuera un solo estándar. FDDI corre como un protocolo en la capa MAC (Medium Access Control) bajo el control de enlace lógico LLC (Logical Link Control) IEEE 802.2 en la capa 2 del modelo OSI (Open Systems Interconnect). FDDI corre a 100 Mbps, utilizando la codificación (4/5) corre a 125 Mbps.

En los documentos del Foro ATM, el ATM a 100 Mbps es conocido comúnmente como TAXI, porque el modelo de chip usado inicialmente era el TAXI Chip de AMD.

El transporte TAXI de 100 Mbps usa codificación 4B/5B de FDDI. Sin embargo no utiliza la arquitectura de anillo y los protocolos de FDDI completamente. La instalación física es la misma, pero corre protocolos que cumplen con el estándar ATM y genera celdas sobre la red FDDI. En otras palabras, las celdas ATM no se pueden mezclar con el tráfico FDDI en una red TAXI a 100 Mbps.

FDDI fue desarrollada por los fabricantes de computadoras con el objetivo de compartir periféricos y respaldar datos entre centros de procesamiento conectados por fibra óptica. Adaptado por ANSI a finales de los 80s, así como por ISO (International Standards Organization), está relacionado con las redes locales 802.2 y Token Ring. Con FDDI un centro de procesamiento satélite no tenía que tener la misma capacidad de disco o cinta que el centro principal. FDDI actuando como una red de conectividad en segundo plano, podía respaldar rápidamente a disco o cinta.

En los últimos años la filosofía de la computación corporativa ha cambiado, debido principalmente, al incremento en el uso de las PCs y las redes locales. FDDI ha retomado importancia como proveedor de redes de respaldo para interconexión de redes locales. FDDI es un medio confiable y sus altas velocidades la hacen un medio excelente para interconexión de redes locales 802.5 y 802.3.

FDDI es una extensión lógica de la tecnología Token Ring 802.5 y aunque no es un estándar de la IEEE, utiliza la capa LLC (Logical Link Control) de 802.2. La velocidad que ofrece es de 100 Mbps con una distancia de 100 km y utilizando fibras multimodo configuradas en un anillo dual.

Los marcos de datos son de un tamaño variable de hasta 4500 bytes, y con una posesión del token más de un marco puede ser enviado. Utilizando fibra multimodo, los nodos se pueden separar hasta por dos kilómetros sin utilizar repetidores. La utilización de fibra monomodo incrementa la distancia hasta 60 km, pero se necesitan hacer cambios en los parámetros y la utilización. FDDI es un estándar ANSI (X3T9) e ISO.

La figura 2.10 muestra la arquitectura de una red de respaldo FDDI que conecta redes de área local. Los nodos son las estaciones conectadas duales DAS (Dual Attached Station) porque todos los nodos de este tipo tienen dos conjuntos de puertos. Un puerto es para la salida/entrada del anillo activo y el otro es para la entrada/salida del anillo de respaldo. Todo el tráfico normalmente es enviado por el anillo activo,

pero si este se rompe, el anillo de respaldo es utilizado para asegurar la operación continua de la red FDDI. Las DASs adyacentes se cambiarían a los puertos duales para realizar esta operación.

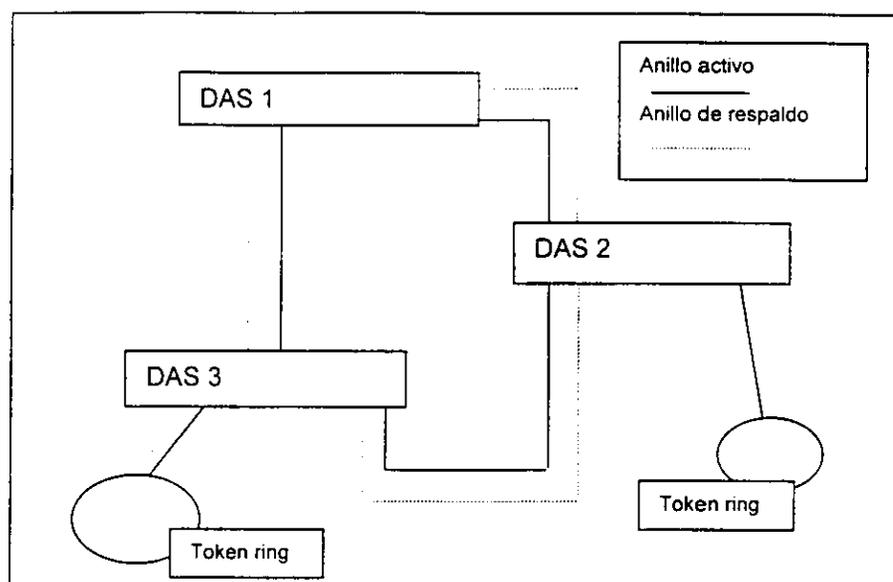


Figura 2.10. 100 Mbps TAXI (FDDI)

Además de los nodos DAS, también existen concentradores conectados dualmente que permiten que más de una red o dispositivo FDDI se conecte a ellos. Un DAS se conecta a una estación conectada simple ECS, que puede ser un puente o un ruteador de la red. ECSs sólo tienen un juego de puertos, entrada/salida activa.

Codificación 4B/5B

FDDI tiene una tasa de transmisión de 100 Mbps, pero el anillo tiene una tasa de transmisión de 125 Mbps. La diferencia radica en que FDDI utiliza algo llamado codificación de grupo 4B/5B, lo que significa que los bits son tomados cuatro a la vez y enviados en el anillo como 5 bits, así que el código de 5 bits representa 4 bits de datos. Esto asegura suficientes transiciones para que el receptor no se preocupe por los ceros consecutivos. Los receptores pueden extraer el reloj del flujo de datos.

155 Mbps Codificación (8B/10B) (Channel Fiber)

Otra posibilidad interesante para el transporte de las celdas ATM es el Channel Fiber un producto del grupo X3T9 de ANSI.

Debido a que no hay celdas, el Channel Fiber a veces se considera como una tecnología que rivaliza con ATM, pero existen ciertas diferencias. ATM se considera como una arquitectura, no sólo un transporte y por lo tanto puede utilizar el Channel Fiber o FDDI o cualquier otro medio físico para el transporte de celdas, por lo que las comparaciones directas no son válidas.

Una red de Channel Fiber está diseñada para ser literalmente un canal. No existen bits dedicados para un protocolo en la transmisión. Este tipo de redes sólo transmiten los datos de un buffer a otro. El canal no se preocupa por el formato o el significado de los bits, sólo controla la transferencia de los datos y provee un mecanismo muy simple para detectar errores.

La velocidad del canal de comunicación y sus flexibles dispositivos de conexión independientes de protocolo lo hacen muy atractivo como una alternativa a los protocolos de red de software intensivo. Aunque existen conmutadores, una red de Channel Fiber consiste, básicamente, una serie de enlaces punto a punto entre N-puertos. Existe una configuración con conmutador, que considera la conmutación entre puertos.

La arquitectura del Channel Fiber

La figura 2.12 muestra la arquitectura en capas del Channel Fiber (PHY). Existen cinco capas. La capa más baja, FC-0, define el enlace físico, conectores y medio. El medio es distinguido por tipo, velocidad, tipo de transmisor, y distancia. Para el transporte de celdas en ATM, se consideran la fibra multimodo y el par trenzado blindado, pero en la práctica el par trenzado se utiliza en distancias de 100 m o menos.

Arriba de la capa FC-0 está la FC-1 que define la señalización eléctrica (protocolo de transmisión) utilizada en el enlace. Es aquí donde las celdas ATM utilizarán la codificación 8B/10B.

La capa FC-2 define las reglas y los formatos para enviar y recibir varios tipos de mensajes entre los nodos. La función de esta capa es similar a la de las subcapas MAC en las redes locales de IEEE. Existen varios formatos de marco en la capa FC-2. Las celdas ATM utilizan su propio formato para empaquetar las celdas dentro de un marco FC-2.

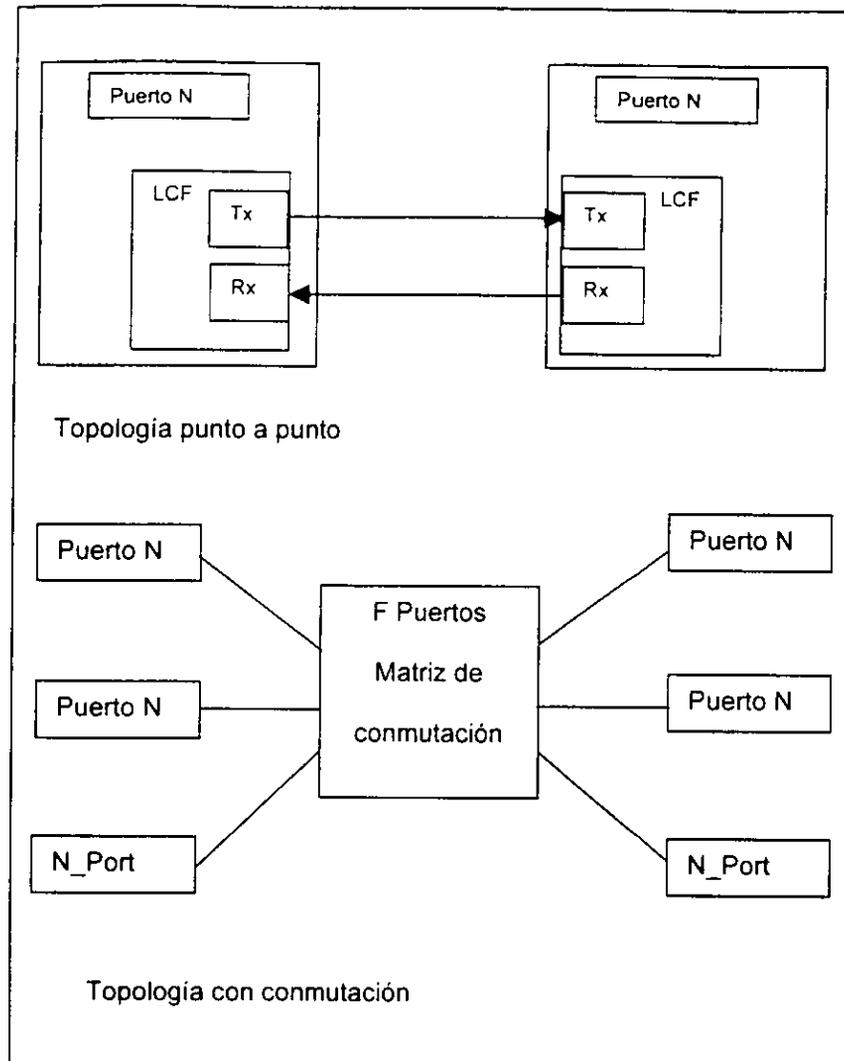


Figura 2.11. Red de Channel Fiber

Las capas FC-0, FC-1 y FC-2 forman juntas la capa física del Channel Fiber, la FC-PH, los estándares actuales se detienen en este punto pero existen otras capas que no están totalmente especificadas.

La capa FC-3 define un conjunto de servicios comunes que este tipo de redes soportará. La capa FC-4 define una forma de realizar la interfase con varios protocolos existentes.

ULPs	IPI-3	SCSI	HIPPI	IP	Otros
FC-4	Mapeo IPI-3	Mapeo SCSI	Mapeo HIPPI	Mapeo IP	Otros mapeos
FC-3	Servicios Comunes				
FC-2	Protocolo de Señalización				
FC-1	Protocolo de Transmisión				
FC-0	Interfase				
	Medio Físico				

Figura 2.12. Arquitectura del Channel Fiber

La subcapa de convergencia de transmisión de ATM

La siguiente subcapa en el modelo de referencia ATM es la subcapa de convergencia de transmisión (TC). Ésta forma la parte superior de la capa física ATM. La tarea de dicha capa es el cargar apropiadamente las celdas ATM en el marco del transporte de transmisión físico del lado del emisor y removerlas en el lado del receptor. De forma alternativa, para algunos transportes físicos las celdas deben asociarse en bloques (4B/5B, 8B/10B) para poder ser transmitidas.

Las cinco funciones definidas en la subcapa TC son:

1. **Desacoplamiento de la tasa de celdas.** Debido a que muchos transportes de marcos deben generar un número fijo de bits cada segundo, la capa TC debe inventar celdas especiales inactivas con el fin de cumplir con la tasa de transmisión requerida, dichas celdas son removidas por el receptor.
2. **Generación y verificación de la secuencia HEC.** El encabezado de código de error (HEC) se genera en los campos de la celda ATM por el emisor y es verificado por el receptor. Esto es, el HEC es regenerado y comparado con el valor recibido. Si es posible, los errores en el encabezado se corrigen y se reprocesa la celda, si el error no se puede corregir, la celda se descarta.
3. **Delineado de celda.** Los receptores deben ser capaces de detectar los límites de la celda dentro de un flujo continuo de bits. Para prevenir un delineado falso, la carga útil de la celda es rearmada por el emisor y rearmada por el receptor.
4. **Adaptación al marco de transmisión.** Dependiendo del tipo de transporte físico, puede ser necesario que el emisor empaquete las celdas ATM en un marco de transmisión y que las celdas sean desempaquetadas en el lado del receptor.
5. **Generación y recuperación del marco de transmisión.** Generalmente, la utilización de un marco de transmisión involucra otras tareas además del empaquetado de las celdas ATM. Esta función define los procesos adicionales.

Con respecto a los tipos de celdas ATM, la figura 2.13 muestra la estructura de los encabezados de los dos tipos posibles. Las posiciones marcadas con P, se utilizan para funciones especiales de la capa TC y las marcadas con A se utilizan por la capa ATM. El quinto byte es una secuencia HEC para todo el encabezado. Para poder distinguir los dos tipos de celdas, en la recepción la capa TC, después de obtener un HEC de encabezado válido con VPI=0 y VCI=0 (valores reservados para funciones

especiales) se verifica el valor del último bit en el cuarto byte, si el bit es 1, entonces la celda ha sido enviada por la capa física y contiene información para la capa física receptora, por lo que esta celda no se envía a la capa ATM. Una celda con el último bit del cuarto byte igual a 0 se pasa a la capa ATM

	OCTETO 1	OCTETO 2	OCTETO 3	OCTETO 4
Reservado para la capa física	PPPP0000	O0000000	O0000000	0000PPP1
Celdas sin asignar (ATM)	AAA00000	O0000000	O0000000	0000AAA0

Figura 2.13. Celdas de la capa física y celdas ATM

Desacoplamiento de la tasa de celdas.

En cualquier medio de transmisión a base de marcos, un número determinado de bits debe ser enviados en un determinado lapso de tiempo. Considérese el sitio de un cliente conectado a un nodo de una red ATM con un enlace SONET de 155 Mbps. (STS-3c). Se observa claramente que si un emisor en este enlace genera bits de datos para ser enpaquetados en celdas a 100 Mbps, el equipo ATM debe ajustar esta tasa de transmisión a la tasa de 155 Mbps utilizada por la línea.

Los 55 Mbps extra son llenados por el emisor con celdas de la capa física con un patrón de bits especial y son removidas por el receptor basado en este patrón de bits. Esta característica da a las redes ATM gran flexibilidad en las velocidades de conexión sobre la misma tasa de transmisión de la línea física. Ancho de banda baja demanda, en algunos servicios. Este proceso se muestra en la figura 2.14.

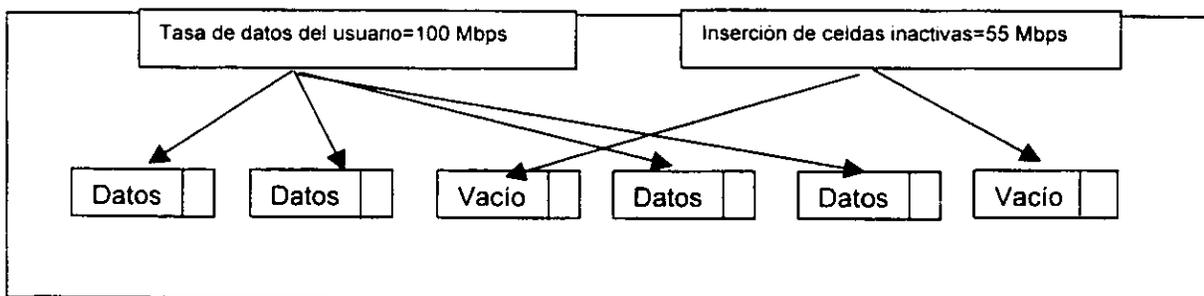


Figura 2.14. Desacoplamiento de la tasa de celdas.

La figura 2.15 muestra el formato de una celda inactiva de la capa TC. Nótese que el encabezado está formado por ceros excepto el último bit del cuarto byte. El campo de información contiene un patrón de 01101010 (6C en hexadecimal) que se repite a lo largo de la celda. El receptor descartará cualquier celda

inactiva y analizará cualquier otra celda con el último bit del cuarto byte del encabezado puesto en 1, buscando información de la capa física. Sólo las celdas con el último bit del cuarto byte puesto en 0 se pasarán a la capa ATM.

OCTETO 1	OCTETO 2	OCTETO 3	OCTETO 4	OCTETO 5
00000000	00000000	00000000	00000001	Código HEC válido

Campo de información =01101010 (repetido)

Figura 2.15. Celda inactiva de la capa TC

Control de error de encabezado

El último byte en el encabezado de la celda ATM es el campo de error de encabezado. Está detallado en la especificación CCITT I.432, y es utilizado para la detección y corrección de errores en el encabezado de la celda ATM. La tarea principal del HEC es la de proveer una detección y corrección confiable de errores en el direccionamiento de la celda.

HEC ofrece corrección de errores de bit simples y detección de errores de bit dobles. Como la mayoría de los errores de fibra óptica son errores de bit simples, esta es una solución óptima, pero puede perder efectividad en otro medio.

La documentación del Foro ATM recomienda que cualquier celda recibida en la que se detecten errores usando los transportes FDDI y Channel Fibber sean descartadas. Incluso el soporte para corrección de errores de bit simples en SONET es opcional según el Foro ATM.

Acciones HEC del receptor

El algoritmo utilizado tiene dos modos: Puede corregir los errores de bit simples o puede detectar los errores de bit dobles. Normalmente utiliza el modo de corrección. Si ningún error es detectado cuando el receptor calcula el valor del HEC en el encabezado de la celda recibida y lo compara con el valor recibido en la celda, ninguna acción se lleva a cabo. Aún después de que el receptor ha corregido el error de bit simple y recalculado el HEC apropiado, el receptor pasará al modo de detección. Cuando un error de bit triple se detecta el receptor pasa al estado de detección después de haber descartado la celda.

En el modo de detección los errores no son corregidos y todas las celdas con error son descartadas. Esto significa que todas las secuencias de celdas que contengan errores no se propagan en la red. Cuando

una celda con un HEC válido es encontrada en el modo de detección, el receptor pasará al modo de corrección.

Es importante señalar que los errores que afectan a más de dos bits en el encabezado de 40 bits pueden no ser detectados, en este caso aunque el receptor piensa que la celda es válida, está será conmutada al enlace equivocado. Esta es la fuente primaria de celdas insertadas en las redes ATM.

Desempeño del HEC

El HEC está diseñado para corregir errores de bit simple y desechar las celdas con más errores.

El algoritmo utilizado es "el residuo de la división modulo 2 del generador polinomial x^8+x^2+x+1 entre el producto de x^8 por el contenido del encabezado excluyendo el campo HEC".

El método HEC con una tasa de bit en error de 10^{-8} , la probabilidad de descartar celdas es de 10^{-13} y la probabilidad de pasar celdas a la capa ATM con errores es de 10^{-20} .

Delineado de celda

El delineado de celda es el proceso de determinar, en el receptor, donde están los límites de la celda. Las celdas son enviadas por el emisor sin ningún delimitador o campo de tamaño (todas son del mismo tamaño). Es por esto que una vez que una celda es encontrada, es para el receptor relativamente fácil encontrar las celdas subsecuentes que siempre están a 53 bytes de distancia. El problema radica en encontrar la primer celda dentro del flujo de bits que llega a la subcapa TC de la subcapa de medio físico. Al menos existe un medio de detectar los límites de las celdas, estos pueden ser encontrados vía el apuntador H4 que está disponible en la sobrecarga del marco SONET/SDH. Sin embargo, este método presupone el uso de SONET/SDH como transporte físico de las celdas.

El método de la ITU-T y el Foro ATM utilizan al HEC. Si en el HEC no se detecta ningún error, entonces el receptor asume que ha encontrado un encabezado válido y por extensión, el resto de la celda. Las otras celdas están a 53 bytes de distancia en cualquier dirección del buffer del receptor.

Si los datos contenidos en la celda reproducen una secuencia HEC, se puede detectar un límite de celda donde no existe. Por esta razón el método HEC requiere que la información de la celda sea mezclada. Este es el equivalente de ATM a la inserción de bits en SDLC (Synchronous Data Link Control). Este proceso introduce una cantidad de procesamiento importante en la subcapa TC de ATM.

Delineado de celda HEC

Este método requiere un elaborado mecanismo para asegurar su correcto funcionamiento. Existen tres estados principales y cuatro transiciones. Inicialmente en el estado de HUNT, el receptor checa bit por bit una secuencia HEC válida. Una vez que un HEC es encontrado, se pasa al estado de PRESYNCH, si fue una detección en falso, el siguiente HEC inválido provoca el retorno al estado de HUNT, pero después de δ HEC consecutivos correctos, se pasa al estado de SYNCH, que es el estado deseado. Si α HEC consecutivos incorrectos son encontrados, no sólo serán descartadas las celdas, además, el receptor regresa al estado de HUNT. El desempeño del receptor depende de los valores de δ y α . Probablemente los valores sean $\alpha=6$ y $\delta=7$ pero estos varían de acuerdo a los fabricantes del equipo.

Mezcla o rearreglo HEC

El rearreglo de la información se lleva a cabo para incrementar el desempeño del proceso de delineado HEC. Una secuencia válida HEC puede ser reproducida por el campo de datos en la celda.

Los campos del encabezado (los primeros 5 bytes) no son rearreglados por el emisor, pero el campo de datos es sometido a un mezclador auto-sincronizable de la forma polinomial $x^{43}+1$. Al menos esta es recomendada para los transportes SONET/SDH.

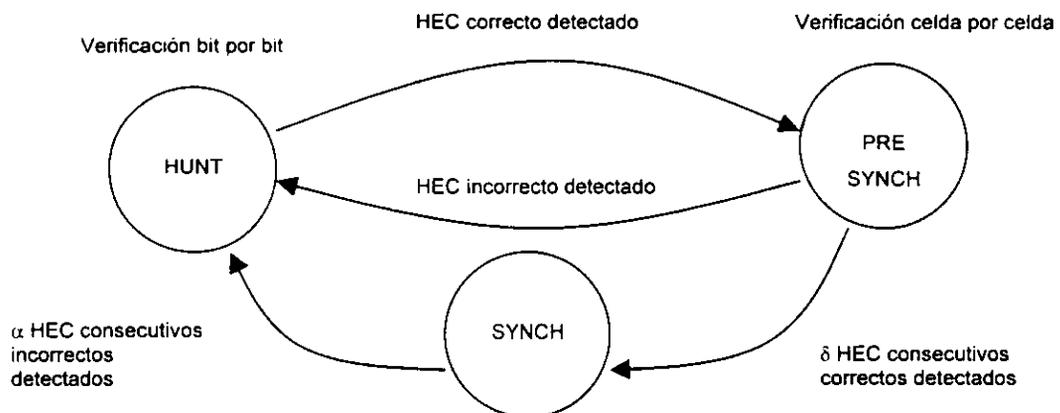


Figura 2.16. Proceso de delineado de celda

La figura 2.16 muestra el proceso de delineado de celda HEC que realiza el receptor. Inicialmente el receptor se encuentra en el modo HUNT, no se realiza ningún proceso para invertir el rearreglo, y el receptor realiza una revisión bit a bit del flujo que recibe. En otras palabras el receptor busca una secuencia de 40 bytes y presume que esa secuencia es potencialmente un encabezado de celda válido. Si esto es cierto, entonces el último byte debe ser el campo HEC y los primeros 4 bytes deben ser el

resto del encabezado. Después el receptor recalcula el campo HEC y lo compara con los últimos 8 bits. Si el HEC es incorrecto, el receptor recorre un bit y vuelve a tratar. Eventualmente una secuencia válida es encontrada, pero puede deberse al azar, con todo y el rearmado, por eso el receptor pasa al estado de PRESYNCH.

En el estado de PRESYNCH, el receptor revisa los siguientes 53 bytes en el buffer. Si la secuencia HEC fue un delineado falso, existe una muy pequeña posibilidad de que se repita cada 53 bytes. Si el siguiente HEC falla, el receptor regresa al estado HUNT y continúa la verificación bit por bit. Si la secuencia HEC válida es el límite de una celda, se repetirán secuencias válidas exactamente cada 53 bytes. Está es la verificación celda por celda realizada en el modo PRESYNCH.

Los estándares actuales ATM mencionan que el valor de δ debe ser 6 o menos. La mayoría de las implementaciones escogen 6. Después de δ HEC consecutivos correctos, el receptor cambia al modo SYNCH, que es la forma normal de operar del receptor en la red ATM.

En el modo SYNCH el receptor invierte la operación de rearmado de la carga útil de información. Todavía pueden ocurrir algunos errores. Si el receptor calcula α encabezados consecutivos con secuencias HEC inválidas, el receptor debe asumir que ha perdido los límites de celda. El receptor debe empezar todo de nuevo. La mayoría de los fabricantes escogen un valor de $\alpha=7$.

La delimitación HEC a una tasa de bit en error de 10^{-4} a 155 Mbps con $\alpha=7$ y $\delta=6$, el sistema ATM estará en SYNCH por más de un año, y después de una pérdida de SYNCH, puede resincronizarse en el tiempo de 10 celdas, 28 μ s.

Adaptación/generación/recuperación del marco de transmisión

La adaptación al marco de transmisión es el proceso de empaquetar celdas en transportes a base de marcos para la subcapa de medio físico y de remover las celdas en el receptor.

La generación del marco de transmisión se realiza en el lado del emisor y la recuperación del marco de transmisión se realiza en el lado del receptor. Esta se refiere a la producción de marcos por el emisor que sean aceptados por cualquier equipo intermedio de transporte.

Existen dos métodos principales para empaquetar celdas ATM en la subcapa TC para ser transportadas por la subcapa de medio físico. El primer método es utilizado con transportes de marcos (SONET, DS-3) y el segundo se utiliza con los transportes TAXI y Channel Fiber. Para transportes de marcos, las celdas

B2 BIP-24: BIP 24 para la carga útil del marco STS-3c previo, menos los bytes de sobrecarga.

Byte apuntador H1(los 4 bits iniciales): 0110 indica operación normal; 1001 indica un cambio en el valor del apuntador. Valido en la primer sobrecarga del STS-1.

Bytes apuntadores H1, H2 (últimos 10 bits): El apuntador al primer byte de sobrecarga del SPE. Válidos en la sobrecarga del primer STS-1.

Bytes apuntadores H1, H2 en los últimos dos STS-1: Puestos en 93FF en las últimas dos sobrecargas de los STS-1 para formar el indicador de concatenación. Si estos dos bytes se colocan en FF, indican una señal de alarma, la cual es equivalente a la condición de alarma azul (una señal de entrada de bajo nivel ha sido perdida).

Byte apuntador de acción H3: Se utiliza para indicar cambios en la posición del SPE, válido en todas las sobrecargas de STS-1.

Byte interruptor de protección automática K2: Si todos están en 1 indican el nivel de señal AIS de SONET; 110 indican el nivel de línea remoto del indicador por defecto.

Byte de crecimiento Z2 sólo en el tercer STS-1 (últimos 6 bits): se utiliza para indicar un error de conteo B2 (verificación BIP-24). El bloque de error más apartado de nivel de línea de SONET (FEBE, Far End Block Error), el cual es el número de posiciones de bit en que difiere el campo STS-3c B2 recibido del valor calculado en el receptor. Debido a que esta es una verificación bit por bit, los valores mayores de 25 son válidos.

La figura 2.17 muestra además los bytes de sobrecarga que se utilizan en el transporte de celdas ATM. Estos aparecen sólo una vez en el SPE concatenado del STS-3c, la codificación y las funciones son las siguientes:

J1 byte de trazo de camino: Utilizado para indicar el destino de las celdas. Contiene la dirección ATM de la fuente.

B3 byte BIP: Verificación BIP (Bit Interleaved Parity) en el SPE del STS-3c previo.

Indicador de nivel de señal de camino C2: Codificado como 00010011.

Byte de estatus de camino G1: Los primeros 4 bits indican el conteo de error B3 (FEBE del camino). Los valores hasta 9 son válidos. El quinto bit es 0 ó 1, dependiendo del RAI (Remote Alarm Indicator) del camino de SONET. Un bit 1 indica una pérdida del delineado de celdas en el extremo del receptor.

DS-3 PLCP

Las celdas ATM serán cargadas en el marco DS-3 (Digital Signal 3 Level (45 Mbps)) en espacios de 84 bits entre los bits de sobrecarga del marco DS-3 en cada submarco. Los bits serán cargados en una unidad PLCP DS-3 y luego mapeados en el marco DS-3. Nótese que la característica soportada por DS-3 llamada C-bit de paridad, puede utilizarse.

La figura 2.18 muestra la estructura del PLCP DS-3. Doce celdas ATM son empaquetadas con un campo de 4 bytes adelante de cada celda. Los primeros dos bytes repiten el patrón de marco de SONET A1 y A2, conteniendo F6 28. El byte de sobrecarga de camino POI (Path Overhead Indicator) es un contador que ciclicamente va de un valor alto a uno bajo y permite que el receptor sepa cual es la función del siguiente byte.

Proceso de adaptación de marco PLCP		POI	POH	Carga útil PLCP	
A1	A2	P11	Z6	1ª CELDA ATM	
A1	A2	P11	Z5	CELDA ATM	
A1	A2	P11	Z4	CELDA ATM	
A1	A2	P11	Z3	CELDA ATM	
A1	A2	P11	Z2	CELDA ATM	
A1	A2	P11	Z1	CELDA ATM	
A1	A2	P11	X	CELDA ATM	
A1	A2	P11	B1	CELDA ATM	
A1	A2	P11	G1	CELDA ATM	
A1	A2	P11	X	CELDA ATM	
A1	A2	P11	X	CELDA ATM	
A1	A2	P0	C1	12ª CELDA ATM	COLA
1 OCTETO	1 OCTETO	1 OCTETO	1 OCTETO	53 OCTETOS	13 o 14 NIBBLES

Figura 2.18. Marco DS-3 PLCP

Seis de estos bytes de sobrecabecera están reservados para uso futuro (Del Z1 al Z6) y todos tienen el valor de cero. Los otros tres bytes (los bytes X) están sin asignar y son ignorados por el receptor.

Los últimos tres bytes se utilizan para:

Byte B1: Verificación BIP-8 en las 12 celdas ATM y los bytes de sobrecarga asociados en el marco PLCP previo.

Byte de estatus de camino G1: Los primeros 4 bits forman un conteo FEBE de errores BIP-8. Los valores válidos son de 0 a 8. Si no está implementado, el campo se interpreta como 0 errores. El siguiente bit indica una señal remota de alarma RAI que equivale a una alarma amarilla en los T-carriers.

(Pérdida de la señal de entrada en el receptor). Un valor de 1 en 10 marcos consecutivos indica una RAI. Un valor de 0 en 10 marcos consecutivos remueve la RAI. Los últimos 3 bits se ignoran.

Byte de conteo de ciclo/inserción C1: El DS-3 PLCP terminará con 13 o 14 nibbles codificados como 1100. La inserción de bits se utiliza para alinear el marco PLCP con el marco físico DS-3. Una oportunidad de inserción ocurre cada tercer marco (375 μ s). El byte C1 se codifica con unos en el primer marco del ciclo, y la cola es de 13 nibbles. El byte C1 se codifica como ceros en el segundo marco del ciclo y la cola es de 14 nibbles. Si el byte C1 es codificado en el tercer marco del ciclo como 01100110, entonces no hay inserción, y la cola es de 13 nibbles. Si se codifica como 10011001, entonces una inserción ha ocurrido, y la cola es de 14 nibbles.

El delineado de celdas con el PLCP de DS-3 es relativamente sencillo porque las celdas ATM ya tienen una localización predeterminada. La detección de los bytes de marco A1 y A2 determina la posición de las celdas ATM en el PLCP. El rearrreglo de la carga útil de la celda está desactivado por omisión en el DS-3.

Bloque codificado 4B/5B de 100 Mbps (FDDI/TAXI)

Transportar celdas ATM en un transporte 4B/5B a 100 Mbps (FDDI/TAXI) es una tarea simple. Se utiliza una técnica conocida como codificación de bloque, debido a que las celdas son enviadas como un bloque de bytes que incluye algunos bytes adicionales de sobreencabezado.

En los transportes de 100 Mbps 4B/5B, las celdas ATM se envían de forma totalmente asíncrona, sin necesidad de efectuar el desacoplamiento de celdas. Cuando se está en estado inactivo, el emisor genera códigos inactivos (código sync JK). Esta secuencia de bits se utiliza normalmente en FDDI como un delimitador de inicio de marco (codificado 11000 10001). Un símbolo JK debe ser enviado cada 1/2 segundo. Esto mantiene viva la señal, permitiendo que el receptor detecte que la línea no se ha desactivado.

Cuando las celdas ATM contienen datos que deben ser enviados, deben ser precedidos por un código TT (inicio de celda), que se utiliza en FDDI normalmente como un delimitador de final de marco (codificado en FDDI como 01101 01101 utilizando codificación 4B/5B). Por esto la celda codificada en bloque es de 54 bytes.

La secuencia HEC es generada, pero sólo se utiliza para detectar errores en el encabezado, no para corregirlos. Las celdas con errores se descartan en el receptor.

Bloque Codificado de 155 Mbps. Channel Fiber.

En este caso, las celdas se agrupan en bloques de 26 celdas con una celda especial al frente que es una unidad de sobrecarga de la capa física (PL-OU).

El bloque es por lo tanto de 27 celdas: 26 para datos y una de sobrecarga que está a su vez dividida en dos campos. El primero es el campo delimitador de celda, que substituye al encabezado ATM. El segundo es el campo de la capa física para operaciones y mantenimiento (PLOAM), el cual contiene un subconjunto de los campos de sobrecarga de SONET.

La estructura del bloque del Channel Fiber se muestra en la figura 2.19, la celda de sobrecarga de la capa física es sólo una celda ATM especial para el Channel Fiber.

Unidad de sobrecarga de la capa física (53 bytes)		Celdas 1-25			
Delimitador de marco 5 bytes	48 bytes de PL OAM	53 bytes	53 bytes	*****	53 bytes

Figura 2.19 Bloque codificado de Channel Fiber

En lugar de un encabezado normal, los primeros 5 bytes son utilizados para símbolos de sincronización. Sólo tres de los símbolos totales de la codificación 8B/10B son utilizados para el transporte de las celdas ATM: el símbolo K28.2, el símbolo K28.5 y el símbolo K28.7. El primero es utilizado para propósitos especiales. La PL-OU inicia con cuatro símbolos K28.5 consecutivos y un símbolo K28.7. Los siguientes 48 bytes son utilizados en la PL-OU para el campo PLOAM.

Sólo el primer byte de la PLOAM tiene una función definida. Los otros 47 bytes deben tener el valor de 0. En el primer byte de la PLOAM los primeros 5 bits son 0, y los últimos 3 bits son utilizados para indicaciones de alarma. Las señales de indicación de alarma AIS (Alarm Indication Signal) cuando son 1, indican al emisor la pérdida de la señal o la pérdida de la sincronización del marco por el receptor. El indicador de marco con error, cuando es 1, le indica al emisor la presencia de una violación de código. La falla de recepción en el extremo FERF (Far End Receive Failure) cuando está en 1, le indica al emisor que el receptor no está recibiendo bits. Todos estos bits son utilizados para indicar el estado de la celda en el lado del receptor. El receptor las envía al emisor. El resto del contenido del PLOAM está en estudio.

Las demás celdas ATM en el marco se envían en la forma estándar. La secuencia HEC se utiliza, pero los errores de bit simples no son corregidos y las celdas con errores son descartadas. El rearmado en la carga útil de la celda está indefinido.

El conjunto de protocolos ATM: La capa ATM

La capa ATM

La capa ATM trabaja con un flujo de celdas. El encabezado de la celda puede ser inspeccionado por la capa ATM, pero los 48 bytes de carga útil no son inspeccionados por dos razones. Primera, el nodo de la red ATM debe operar muy rápido y segunda, el tamaño pequeño de la celda hace muy difícil que su contenido tenga significado para la capa ATM.

En la capa ATM algunas celdas tienen cierta función, otras sólo contienen datos. Otro tipo importante de celda es la celda OAM (Operation And Maintenance) que tiene una estructura especial y es identificada por ciertos valores que toma el encabezado. Las celdas se mandan del bit más significativo, al menos significativo. En la capa física ATM, se utilizan celdas inactivas especiales para la función de desacoplamiento. Estas celdas no son vistas por la capa ATM, si logran pasar la capa ATM las debe declarar ilegales y descartarlas. Finalmente existen celdas de señalización.

Otras funciones de la capa ATM son críticas para la red, es aquí donde se lleva a cabo el control genérico de flujo GFC (Generic Flow Control). Los VPI y los VCI son interpretados y la celda es enviada al destino apropiado. Finalmente es aquí donde las celdas de voz, video y datos son mezcladas y separadas en el destino.

A continuación se enlistan las funciones de la capa ATM según el Foro ATM agregando la función de desacoplamiento de celdas.

- **NRM: Administración de los Recursos de la Red**
- **CAC: Control de Conexión y Admisión**
- **OAM: Controles retroalimentados**
- **UPC/NPC Control de Parámetros de Uso/Red**
- **Control de Prioridad**
- **Agregados del Foro ATM**
- **Desacoplamiento de celdas**

La meta principal de las funciones genéricas de la capa ATM es la de proveer a los usuarios de las conexiones a la red ATM la calidad de servicio (QOS del Foro ATM) que esperan y necesitan. El proceso de determinar y entregar los parámetros QOS requeridos para cada conexión es identificada por el Foro ATM como la especificación de contrato de tráfico.

La estructura de las celdas ATM en detalle

La figura 2.20 muestra la estructura de un encabezado de celda ATM UNI (User-Network Interfase). Existen dos formatos de celdas en ATM: el formato B-ISDN (Broadband Integrated Services Digital Network) de interfase usuario-red (UNI) y otro llamado la interfase de nodo de red NNI (Network-Node Interfase).

8	7	6	5	4	3	2	1	Bit/byte
GFC				VPI				1
VPI				VCI				2
				VCI				3
VCI				PTI		CLP		4
				HEC				5

Figura 2.20. Encabezado de la celda ATM UNI

8	7	6	5	4	3	2	1	Bit/byte
				VPI				1
VPI				VCI				2
				VCI				3
VCI				PTI		CLP		4
				HEC				5

Figura 2.21. Encabezado de la celda ATM NNI

En la figura 2.21 la única diferencia es el campo GFC (Generic Flow Control). A continuación se describen cada uno de los campos.

Campo HEC. EL HEC ya ha sido discutido. Si el HEC detecta más de un error en el encabezado de la celda, el receptor descartará la celda. Ese es todo el trabajo del nodo. La filosofía de ATM dice que los controles de error y detección se deben mover a los extremos de la red.

Campos VPI y VCI. El encabezado de las celdas tiene dos campos para identificar el destino de las celdas. Estos son el campo del identificador de camino virtual (VPI) y el campo del identificador de canal virtual (VCI). El VPI es de 8 bits y el VCI es de 16 bits. ATM permite agrupar hasta 64000 VCIs en hasta 256 VPIs. Este agrupamiento de canales en caminos es realizado para propósitos de conmutación.

La ITU recomienda la utilización de los VPIs para conexiones semipermanentes entre sitios. La ITU recomienda que los VCIs se utilicen para conexiones dinámicas. Estas son las conexiones utilizadas para aplicaciones de cualquier índole.

Control genérico de flujo. Este se refiere al hecho de que el GFC utilizado en una red UNI o ATM debe realizar el control de flujo de las celdas a través de la conexión para todos los tipos de conexión posibles.

Otros campos de la celda ATM UNI. Los otros dos campos del encabezado ATM es el **indicador de tipo de carga útil PTI (Payload Type Indicator)** y el **bit de prioridad de pérdida de celda CLP (Cell Loss Priority)**. El PTI permite que la capa ATM conozca si la celda contiene información de usuario o de red.

El CLP indica si la celda puede ser descartada bajo ciertas condiciones (CLP=1). Las celdas con CLP=0 son descartadas como último recurso.

Encabezado de celda NNI. El encabezado NNI es prácticamente igual al encabezado UNI, pero tiene una diferencia muy importante. No existe el campo GFC en el encabezado NNI. Estos bits son asignados a la capa ATM para tener un número mayor de identificadores VPI.

Tipos de celdas ATM

Las celdas inactivas se utilizan en la capa física de ATM, ya han sido comentadas. Las celdas sin asignar son celdas vacías, son enviadas cuando el usuario no tiene datos que mandar y son generadas por la capa ATM. Su contraparte en la capa física se utiliza para realizar el desacoplamiento de celdas en la capa ATM.

Un tipo distinto de celdas es utilizado para realizar las operaciones de camino virtual, de administración y mantenimiento.

Dependiendo de las combinaciones de VPI/VCI existe un tipo especial de celdas conocidas como celdas de tráfico VP/VC. Los tipos de celdas que caen dentro de esta categoría son celdas de metaseñalización, celdas de señalización, celdas de canal virtual OAM, celdas SMDS (Switched Multimegabit Data Service), ATM no orientado a conexión y celdas de administración de interfase de la capa interna (LMI (Interim Local Management Interfase)).

La figura 2.22 muestra en con mayor detalle algunos de estos tipos de celdas. La figura 2.23 muestra los valores definidos actualmente para las combinaciones reservadas de VPI/VCI.

	OCTETO 1	OCTETO 2	OCTETO 3	OCTETO 4
Reservada para la capa física	PPPP0000	O0000000	O0000000	0000PPP1
OAM de la capa física	O0000000	O0000000	O0000000	O001U01
Celdas inactivas	O0000000	O0000000	O0000000	O000001
Celdas sin asignar ATM	AAAA0000	O0000000	O0000000	0000AAA0

Figura 2.22. Celdas de la capa física y celdas ATM

Tipo de celda	VPI	VCI
Datos de usuario	Cualquiera	Cualquiera
Celda sin asignar	0	0
Metaseñalización	0	1
Remota	N	1
Señalización de broadcasting	0	2
Remota	N	2
Señalización PT-PT	0	5
Remota	N	5
VC OAM	0	3 o 4
Celda SMDS	0 o N	15
Celda ILM1	0	16

Figura 2.23. Valores predefinidos de VPI/VCI

La celda SMDS es utilizada para cualquier servicio no orientado a conexión. El ILM1 se utiliza como método de señalización en ATM. También provee un método para administrar un nodo de la red ATM con métodos estándares de la industria tal y como SNMP (Simple Network Management Protocol) y MIB (Management Information Base).

Tipos de conexiones ATM

La capa ATM debe mantener diferentes tipos de conexión así como diferentes números de conexión. Tanto los VPI como los VCI puede ser:

Punto a punto: Para la conectividad directa, este tipo de conexión es el bloque fundamental de construcción en las redes ATM, enlazando nodos de la red adyacentes.

Punto a multipunto: Para los servicios de multitransmisión/transmisión abierta. Esta conexión será especialmente útil para conexiones de video donde una celda en una conexión sencilla debe resultar en el envío de celdas múltiples a diferentes conexiones.

Multipunto a multipunto: Para arreglos de conferencias. La idea es similar a la conexión anterior pero con una diferencia importante. Las celdas pueden ser enviadas por cualquier punto a destinos múltiples.

El nodo ATM es responsable de todas las conexiones multipunto y por lo tanto debe ser capaz de enviar copias múltiples de una sola celda recibida en un puerto de entrada.

Estas conexiones ATM pueden tener:

Ancho de banda asimétrico: 155 Mbps dentro de la red y 600 Mbps fuera de la red (las conexiones son unidireccionales). Esto podría ser útil en el ambiente cliente-servidor, donde los servidores reciben gran cantidad de mensajes pequeños de los clientes pero envían como respuesta mensajes muy grandes.

Estas conexiones ATM puede también ser:

Especificadas por clase: Por ejemplo una conexión para "un servicio clase 57". Esta clase es definida y entregada por el proveedor del servicio ATM.

Especificada por parámetro: Por ejemplo, una conexión con 52ms de retraso máximo entre extremos. De nuevo, el proveedor del servicio ATM es el responsable de establecer las conexiones con los parámetros requeridos.

Multiplexación de celdas en ATM

La última función de la capa ATM es la multiplexación y desmultiplexación de celdas. Los flujos de celdas de varias fuentes son multiplexadas en el mismo enlace ATM. El proceso de multiplexación y desmultiplexación se lleva a cabo entre el equipo del usuario final y el nodo de la red ATM. Las celdas pueden representar voz, video o datos. A pesar de que la capa ATM está presente en el equipo del usuario y los conmutadores ATM, la principal tarea de la capa ATM en el equipo del usuario es multiplexar y desmultiplexar a las celdas y no conmutar, y la función más importante de los nodos es conmutar y no multiplexar y desmultiplexar.

La capa ATM debe generar un flujo continuo de celdas cuando no hay celdas con datos disponibles.

En el proceso de multiplexación la capa ATM en el emisor debe enfrentarse con el arribo asíncrono de las cargas útiles para las celdas de las diferentes capas de adaptación ATM (AALs) y además la capa ATM del emisor debe asegurarse que el patrón resultante formado por las celdas intercaladas de las diferentes AAL de a cada una el QOS apropiado para su correcto funcionamiento. Además se debe considerar que cada AAL tiene múltiples instancias ejecutándose al mismo tiempo.

La desmultiplexación es un proceso relativamente simple en donde se leen los encabezados de las celdas conforme llegan de la interfase usuario-red UNI (User Network Interfase) del nodo de la red y se distribuyen a la AAL correspondiente de acuerdo al mapeo establecido por los valores VPI/VC1.

Administración del tráfico en ATM

Cuando existe un ancho de banda constante, como es el caso de las redes canalizadas, la red no necesita preocuparse por como se utilizan estos canales. Si la utilización en términos de la demanda de ancho de banda para la transferencia de la información está por debajo del ancho de banda asignado, se deben generar patrones inactivos. Si la demanda de uso está por encima del ancho de banda designado, es elección del usuario el usar un buffer o descartar el exceso de información.

En ATM las cosas son diferentes. No existe un ancho de banda predefinido para las conexiones individuales y el ancho de banda de una conexión puede variar considerablemente en un período muy corto de tiempo debido a las necesidades de la conexión en un momento en particular. Debido a que la multiplexación en ATM es una forma muy sofisticada de multiplexación estática varias conexiones pueden estar activas al mismo tiempo, mientras que no todas demanden el nivel de servicio máximo al mismo tiempo. Cualquier perfil de ancho de banda de una conexión debe de exhibir una tasa de bits pico, una tasa de bits promedio y una tasa de bits sostenible y un flujo máximo de bits que puede ser generado sin hacer una pausa. La administración de tráfico en ATM existe para prevenir que una conexión utilice continuamente el ancho de banda disponible en la UNI.

Parámetros y descriptores de tráfico en ATM

El Foro ATM ha definido varios parámetros y descriptores para caracterizar el comportamiento de una conexión en la UNI.

Los parámetros del Foro ATM son:

Razón de pérdida de celda (CLR). Es la razón entre la suma de las celdas con error y las celdas correctas que se envían en una conexión.

Razón de inserción incorrecta de celda (CMR): Es la razón entre las celdas insertadas y la suma de las celdas insertadas y el total de celdas enviadas en una conexión.

Razón de bloque de celdas severamente dañado: Es la razón entre el número de bloques de celdas severamente dañados y el número total de bloques enviados en una conexión. Una celda severamente dañada esta definida por el Foro ATM como una celda perdida o insertada, esta definición varía de la de la ITU que se basa en el número de bits en error encontrados en el encabezado de la celda. Si el número de celdas perdidas o insertadas en un bloque dado excede M, ese bloque es considerado como un

bloque severamente dañado. Un bloque está definido por el Foro ATM como el número de celdas enviadas entre celdas OAM consecutivas, las cuales se supone que son generadas una vez por segundo.

Razón de celda con error (CER): Una medición de prueba de la razón de celdas con error con respecto a las celdas enviadas.

Retraso promedio de transferencia de celda (MCTD): Es el tiempo promedio que pasa desde la inserción del primer bit de la celda a través de la UNI hasta la salida del último bit de la celda a través de la UNI en el destino. Este retraso tiene dos componentes: el retraso de propagación (efectos de retraso debidos a la velocidad finita de la luz o de la electricidad) y retraso de procesamiento (debido al tiempo que le toma al nodo de la red ATM procesar y conmutar la celda). Generalmente la conexión tendrá un tiempo de propagación fijo (debido a los caminos de conexión constantes) y un tiempo de procesamiento variable (debido a la conmutación y la congestión de la red). Este tiempo de procesamiento es introducido y varía en cada nodo de la red ATM.

Variación del retraso de celda (CDV, Cell Delay Variation): Debido a que el tiempo de procesamiento varía con el tiempo, el retraso de transferencia de celda de extremo a extremo también varía. Para algunas clases de QOS un CDV de más de algunos milisegundos puede ser notorio en el equipo final. No se han especificado valores absolutos, sin embargo un valor de ± 5 por ciento del retraso de transferencia de celda se ha mencionado como guía.

Dos mediciones de las variaciones en el CDV se han propuesto, una se enfoca hacia las conexiones clase A (sensible a la variación del retraso - tasa de bits constante) y otra hacia las conexiones clase B (sensible a la variación del retraso - tasa de bits variable). CDV-1 (CDV de un punto) se basa en la tasa de bits pico (que debe ser igual a la tasa sostenible de celdas en conexiones CBR). Se mide como la diferencia entre el tiempo de llegada esperado y el tiempo de llegada real de la siguiente celda. Debe de ser siempre igual a cero. En la práctica un valor mayor que cero indica un fenómeno conocido como "clumping" (las celdas llegan cada vez más juntas) y un valor menor a cero indica dispersión (las celdas llegan cada vez más alejadas).

CDV-2 (CDV de dos puntos) compara el retraso actual (intervalo donde no llegan celdas) entre dos puntos en la red ATM con el retraso de una celda de referencia (en la mayoría de los casos pero no necesariamente la celda previa. CDV-2 es más adecuado para las clases VBR porque las llegadas de las celdas no pueden conocerse.

La tolerancia al CDV en una conexión es una parte importante del contrato de servicio.

Razón de no-conformidad de celda: El bit CLP en el encabezado de celda ATM es utilizado para priorizar a las celdas. Todo el tráfico en una conexión tiene este bit activado o desactivado. En el momento de la conexión el usuario puede acordar enviar algunas celdas con este bit activado y otras no. La razón de no-conformidad de celda es la razón entre el número observado de celdas con CLP=1 y el número acordado de celdas con el CLP =1.

Conexiones ATM y parámetros de tráfico

El concepto de garantizar un QOS contratado en una conexión de una red ATM involucra dos procesos: decidir si una conexión debe ser aceptada en la red ATM, basándose en algunos parámetros iniciales de tráfico y luego asegurarse de la conexión mantenga estos parámetros. Es un asunto crítico no sólo que la conexión tenga los recursos que necesita sino que además no deteriore las capacidades de transmisión de celdas de las conexiones ya instaladas. En el caso de los PVCs dichos procesos eran más sencillos de realizar, sin embargo con los SVCs (Switched Virtual Channel or Switched Virtual Circuits) la situación es diferente. El protocolo de señalización será capaz de manejar los valores de los parámetros que han sido definidos con anticipación. Para los protocolos de señalización el Foro ATM sólo utiliza tres parámetros: la tasa pico de celda, la tasa de celda sostenida y el tamaño máximo de ráfaga. La mayoría de las implementaciones interpretan estos parámetros como sigue: La tasa pico de celda será el número máximo de celdas de 53 bytes que pueden ser generadas por el usuario final o que pueden ser enviadas a través de la UNI (45 Mbps DS-3 (Digital Signal 3 Level (45 Mbps))). La tasa de transmisión sostenida será el promedio de la tasa de celdas en un período largo de tiempo y el tamaño máximo de ráfaga se calcula de la unidad de datos más grande que el usuario puede generar (marco Token Ring de 4500 bytes) dividida por la tasa de bit de la UNI.

Calidad del servicio en ATM y la administración de tráfico

La forma en que los parámetros de tráfico se traducen en la clase apropiada de QOS para una conexión dada se realiza por medio de dos métodos, que son Control de Admisión de Conexión (CAC, Connection Admission Control) y la Utilización del Parámetro de Control (UPC, Usage Parameter Control). El término UPC es utilizado en el Foro ATM. LA ITU se refiere al mismo proceso como utilización del parámetro de control/ parámetro de control de red (UPC/NPC). El Foro ATM reserva el término NPC para un proceso UPC realizado en una NNI pública y no a través de la UNI.

Control de admisión de la conexión

Cuando un nodo local ATM (definido como el nodo que tiene una conexión UNI directa al CPE (Customer Premises Equipment) del usuario) recibe una petición de conexión (llamada de establecimiento de conexión) de un usuario, varios pasos deben de llevarse a cabo. El conmutador ATM debe decidir si los recursos disponibles en el nodo en ese momento serán capaces de soportar la QOS requerida por el usuario de la nueva conexión. Esta pregunta tiene que ver con la capacidad de conmutación y con la variación del retraso de celda. Además cada nueva conexión afectará a las conexiones ya establecidas.

Se necesita un método para realizar el control de admisión de la conexión (CAC) en forma rápida. Los parámetros proporcionados por el usuario de acuerdo al Foro ATM son: la clase de servicio (A, B, C, D), la tasa pico de celdas (PCR, Peak Cell Rate), la tasa de celdas sostenible (SCR, Sustainable Cell Rate), el tamaño máximo de ráfaga (MBS), y la variación de retraso de celda (CDV). De estos, solo el PCR (Peak Cell Rate) y el CDV son obligatorios. SCR y MBS son parámetros opcionales.

El conmutador debe de determinar rápidamente cuanto ancho de banda y recursos necesitará la nueva conexión y posteriormente verificar si dichos recursos están disponibles.

Una vez que se ha tomado la decisión de admitir una conexión, el conmutador local ATM puede establecer un camino para la conexión a través de la red. La sensibilidad a la variación del retraso se manejará limitando los tamaños de los buffers en los conmutadores involucrados en la conexión.

Control de utilización de los parámetros

Este proceso se inicia cuando el proceso CAC ha admitido y establecido una nueva conexión en la red ATM. Esto es llamado el contrato de tráfico y obliga al proveedor del servicio ATM a entregar el QOS que necesita el usuario. También obliga al usuario a respetar los parámetros de conexión entregados por la red, a cualquier tráfico que no los cumpla no le será garantizado el QOS acordado y dicho tráfico puede ser descartado por la red. Debido a que las redes ATM carecen de un mecanismo de control de flujo, la función de UPC debe de descartar las celdas para prevenir una congestión en la red que ocasione la negación del servicio adecuado a las otras conexiones.

El Foro ATM recomienda que los proveedores del servicio de red ATM, ya sean públicos o privados, establezcan valores específicos para los parámetros y descriptores de tráfico. Estos valores deben proveer la QOS adecuada para los tipos de conexión A a D.

Sin embargo la información a cerca del tráfico de la red siempre será necesaria, especialmente para las conexiones de datos. El proceso de UPC debe asegurarse que el tráfico en cada conexión permanezca

dentro de los parámetros establecidos por el proceso CAC. Esto se realiza para prevenir que los usuarios degraden las conexiones de otros usuarios y que obtengan un mayor servicio del acordado. UPC verificará que cada celda este conforme a la QOS establecida por la conexión.

Para llevar a cabo dicha verificación, el UPC puede tomar una opción de tres posibles:

1. Pasar la celda a la red sin cambiar el bit CLP en el encabezado.
2. Cambiar el bit CLP en el encabezado a 1 (tagging).
3. Descartar la celda.

Algoritmo de tasa de celdas genérico (GCRA, Generic Cell Rate Algorithm)

El Foro ATM se refiere a este algoritmo como un algoritmo de programa virtual de cubeta con fuga de estado continuo. Pero es ampliamente conocido como el algoritmo de la doble cubeta con fuga.

Las celdas llegan del CPE del usuario a través de la UNI en tiempos incontrolables. Generalmente todas las celdas que buscan entrar a la red ATM se envían con el CLP=0. Mientras las celdas que están llegando no excedan cierta tasa, todas son admitidas en la red sin sufrir cambio alguno. Si la llegada de las celdas sobrepasa el límite L impuesto por la red, llamada la tasa de celdas sostenible (SCR) de la conexión, su bit CLP es puesto en 1. Las celdas con el bit CLP=1 entran a otra cubeta con fuga con otro límite L. Ahora el límite L corresponde al tamaño máximo de ráfaga de la conexión. Las celdas por debajo de este MBS son admitidas en la red, las demás son descartadas.

GRCA está completamente caracterizado por dos parámetros: el límite L y el incremento I. El incremento puede ser el inverso de tres parámetros $1/SCR$, $1/PCR$ y $1/MBS$.

En el sitio del usuario donde el equipo CPE debe multiplexar las celdas se utiliza un GCRA con el objetivo de suavizar el flujo de las celdas de todas las diferentes fuentes asíncronas y cambiar el estado de los bits CLP dentro de la red en lugar de descartar las celdas.

Utilizando este algoritmo existen tres configuraciones permitidas:

1. PCR de todos los CLP=0+1 celdas y entonces el PCR del CLP=0 celdas
2. PCR del CLP=0+1 celdas y entonces el SRC del CLP=0 celdas
3. PCR del CLP=0+1 celdas y entonces el SRC del CLP=0+1 celdas

El principio de la conmutación en ATM

Existen diferentes tipos de conmutadores ATM, pero todos siguen un modelo general, conocido como el principio de la conmutación, ilustrado en la figura 2.24. Un cierto número de enlaces de entrada

transportan celdas dentro del conmutador ATM. Dependiendo del valor del encabezado, esta información es conmutada a un enlace de salida y la celda es provista de un nuevo valor en el encabezado, basándose en la información contenida en una tabla de traducción.

El equipo de conmutación conecta de alguna manera los puertos de entrada con los puertos de salida.

El principio de conmutación ATM se basa en la lectura de los campos del encabezado de las celdas en cada puerto de entrada. Las celdas de propósito especial se procesan de acuerdo a procedimientos especiales. Las demás celdas se conmutarán a un puerto de salida. Se utiliza una tabla para determinar a cual puerto de salida se debe de transferir la celda y que valor de VPI/VCI debe ser colocado en el encabezado. La tabla está organizada por puerto de entrada y luego se divide en los valores de VPI/VCI.

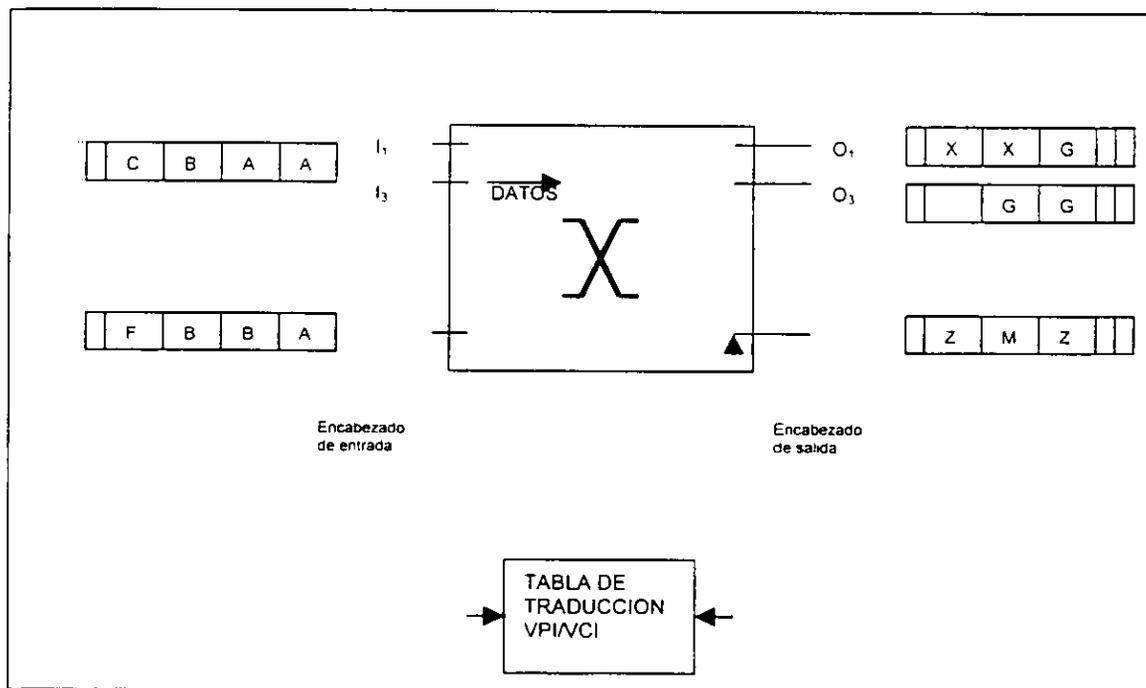


Figura 2.24 Principio de conmutación en ATM

Dispositivos de conmutación ATM

Existen varios aspectos que afectan el desempeño, la confiabilidad y el precio de los conmutadores ATM.

Los cuatro más importantes son:

- La estructura de la tabla de traducción de celdas
- Donde se localiza la tabla de traducción
- Como se le da mantenimiento a la tabla de traducción

- Cuál es el mecanismo de conmutación

La estructura de las tablas puede ser una tabla plana de dos dimensiones, pero existen configuraciones más complejas (bases de datos relacionales), listas ligadas.

La localización y el mantenimiento de la tabla son aspectos más importantes. La tabla puede estar localizada en el conmutador, en un modulo separado, o centralizada.

El mantenimiento se puede realizar a mano o por medio de un protocolo especial (el protocolo de señalización).

Actualmente existen tres arquitecturas utilizadas por los dispositivos ATM:

1. Conmutación a través de bus con un microprocesador central
2. Conmutación por matriz distribuida
3. Conmutación óptica

Conmutación ATM de bus compartido

Esta opción se basa en la arquitectura tradicional ruteador/concentrador que emplea tarjetas de interfase y un procesador central CPU. Esta arquitectura se muestra en la figura 2.25. Para los requerimientos de velocidad de ATM se utilizan chips RISC (Reduced Instruction Set Computing). Las tablas de traducción ATM se encuentran en las tarjetas. El bus tiene una velocidad de hasta 2 Gbps y puede ser accedido por cada tarjeta que se conecte. Debido a que la tecnología de estos conmutadores es muy utilizada su costo es relativamente bajo. Una de las limitaciones de este sistema es que al incrementar las líneas de entrada también se debe incrementar la velocidad del procesador central.

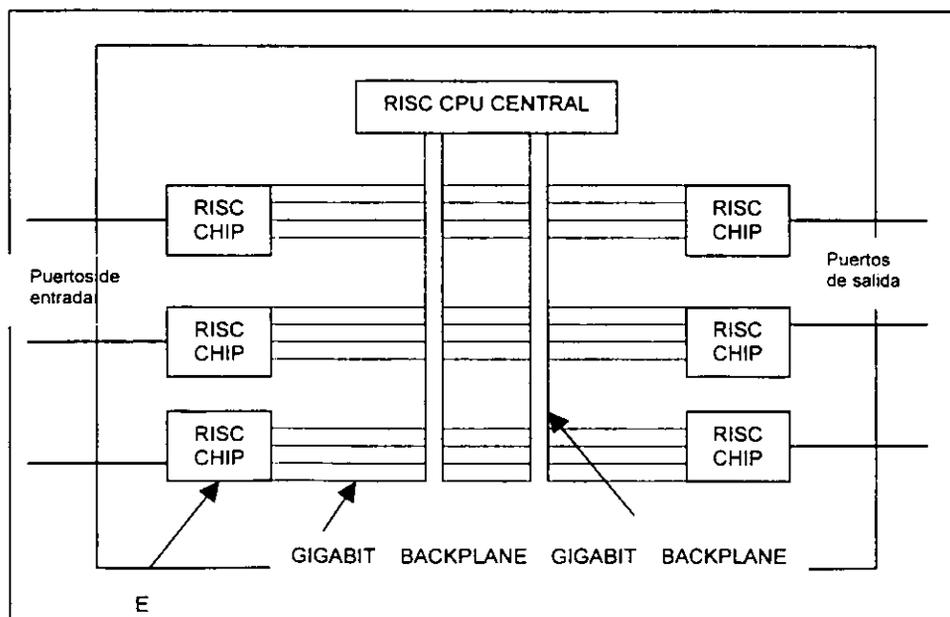


Figura 2.25 Arquitectura del conmutador de bus compartido

Conmutador de matriz distribuida

Este tipo de conmutador también conocido como el conmutador Banyan o Delta reúne una serie de características que lo hacen adaptarse bien a la tecnología ATM.

El conmutador está construido con una serie de elementos de conmutación idénticos lo que permite incrementar su capacidad fácilmente y tiene la propiedad de autoruteo por lo que no se necesita de un programa de control especial. La figura 2.26 muestra la arquitectura básica de este tipo de conmutador. La porción D de la entrada representa la celda ATM completa. Los primeros 3 bits de la celda indican el puerto de salida. En este punto la pareja VPI/VCI de entrada ya han sido sustituidos por la pareja de salida.

Las celdas de entrada entran a un arreglo de elementos de conmutación, cada elemento sólo toma una decisión basada en cada bit del puerto de salida indicado por la celda. El conmutador del ejemplo sólo puede manejar 8 direcciones pero el principio se aplica a direcciones reales aumentando las etapas de conmutación.

Las celdas de entrada entran a un arreglo de elementos de conmutación, cada elemento sólo toma una decisión basada en cada bit del puerto de salida indicado por la celda. El conmutador del ejemplo sólo puede manejar 8 direcciones pero el principio se aplica a direcciones reales aumentando las etapas de conmutación.

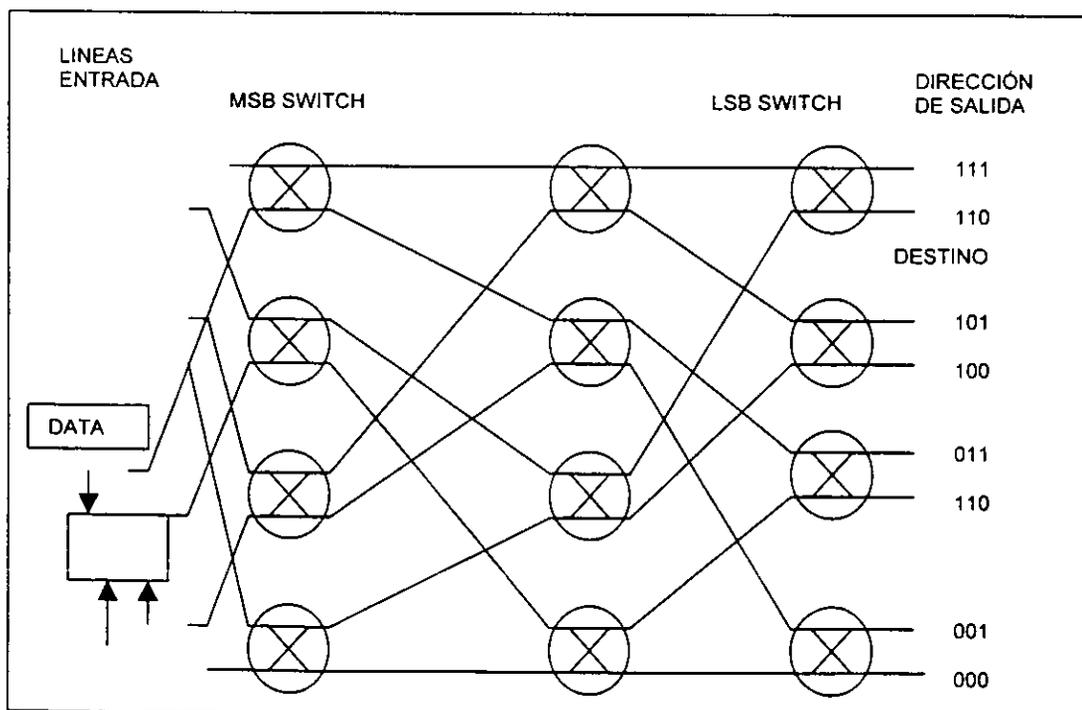


Figura 2.26. Conmutador de matriz distribuida

Conmutación óptica

Una propuesta todavía en estudio para un conmutador óptico se basa en la sustitución de la matriz distribuida por una matriz óptica que transferirá las celdas en forma de luz directamente del enlace de entrada al de salida en una red de fibra óptica basada en SONET. Esos conmutadores serán capaces de manejar hasta 10000 interfases de usuario a 150 Mbps, 622 Mbps o más.

Debido a la eliminación de la conversión óptico-eléctrica y viceversa estos conmutadores deben ser capaces de operar a velocidades de terabits.

El Conmutador ForeRunner ASX-100 ATM

Con la finalidad de tener una visión clara de la arquitectura de un conmutador real se estudiará la arquitectura del ASX-100. El ASX-100 es un conmutador de bus compartido de 16 puertos. El bus tiene una velocidad de 2.5 Gbps y utiliza una cola de salida como buffer. Soporta SPANS (Simple Protocol For ATM Network Signaling) el protocolo de señalización propietario de Fore para establecer las conexiones PVC (Permanent Virtual Circuit) y SVC (Switched Virtual Channel or Switched Virtual Circuits) con la UNI. Soporta una variedad de interfases incluyendo TAXI, Fibre Channel, DS-3 y STS-3c (todos transportes estándar definidos por el ATM Forum). El conmutador tiene un retraso de procesamiento de celda de 10µs. También incluye soporte para transmisión punto-multipunto.

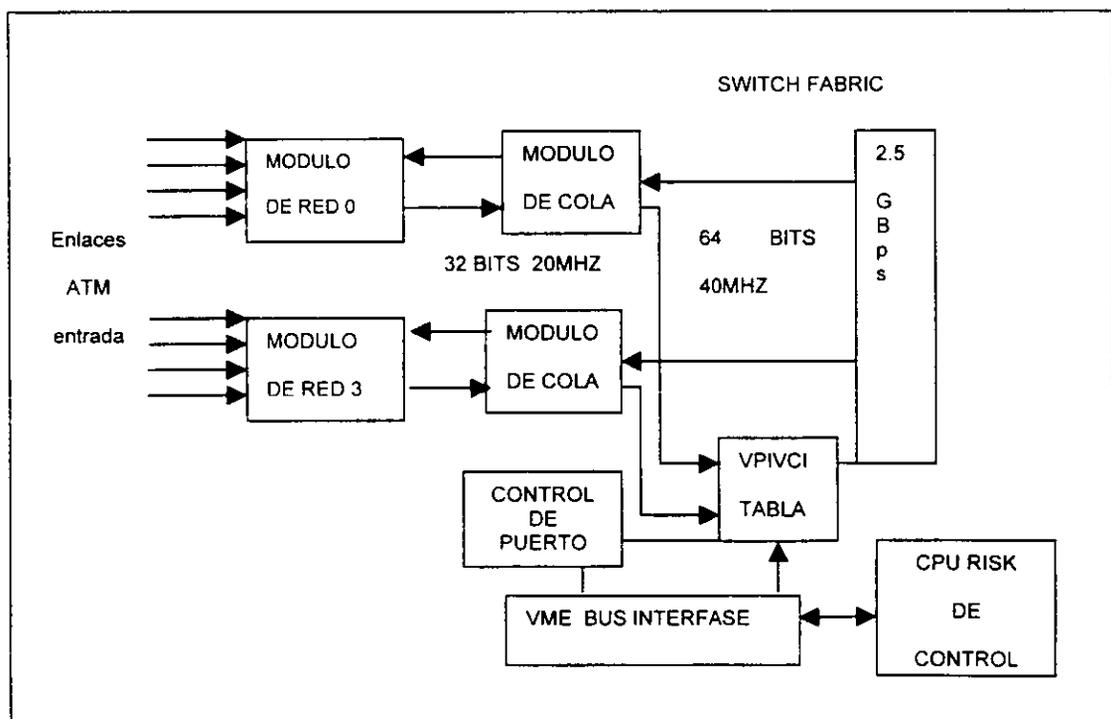


Figura 2.27. Arquitectura del conmutador

La arquitectura del conmutador

La figura 2.27 muestra la arquitectura del conmutador. Consta de 4 módulos de entrada, cada uno soporta 4 enlaces. Estos módulos se conectan a los módulos de buffer con buses de 32 bits a 20 MHz. El bus de respaldo es de 64 bits a 40 MHz. El puerto de control interpreta y genera el protocolo de señalización para establecer la tabla de traducciones de los VPI/VCI. El sistema trabaja bajo una arquitectura SPARC y utiliza un puerto Ethernet con interfase no-ATM adicional.

El módulo de buffers de entrada y salida del conmutador se muestra en la figura 2.28, se emplea el algoritmo de "cubeta con fuga". El bus de respaldo genera una salida de 2.5 Gbps, lo que significa que las celdas deben ser almacenadas temporalmente en los puertos de salida si las celdas generadas no pueden ser entregadas en el tiempo de un marco. Se utiliza un método de división por prioridad para formar dos colas una de alta y otra de baja prioridad. El tamaño del buffer es determinado por software y su tamaño es un múltiplo de 64 celdas con un máximo de 512.

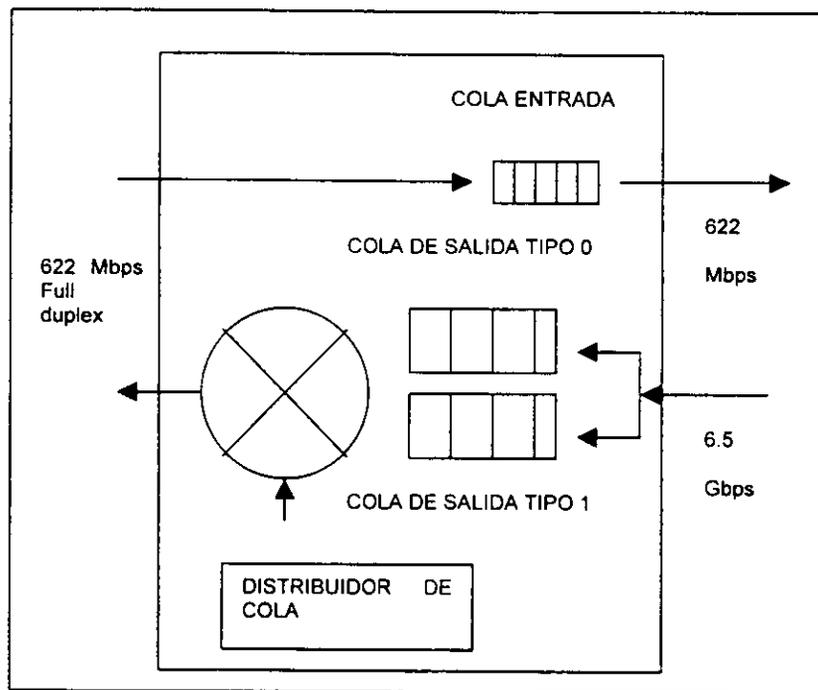


Figura 2.28. Estructura de los buffers

Tablas VPI/VCI

El ASX-100 es un conmutador tanto de VPI como de VCI. Ambos valores pueden cambiar dentro del conmutador. Los puertos están numerados del 0 al 15 y los VPIs tienen un índice asociado a una tabla de ruteo. La tabla de ruteo tiene registros de 64 bits en donde está la nueva combinación VPI/VCI, el número del puerto de salida y el tipo de cola que le corresponde a la conexión. Sólo se utilizan 10 bits para los

VPI para la NNI dando 1024 VPIs entre conmutadores en lugar de 4096. La tabla de ruteo para todo el conmutador está limitada a 128 000 registros. Esto significa que no todos los 64000 VCIs pueden utilizarse en todos los VPI. La estructura de los registros de las tablas de ruteo se muestra en la figura 2.29

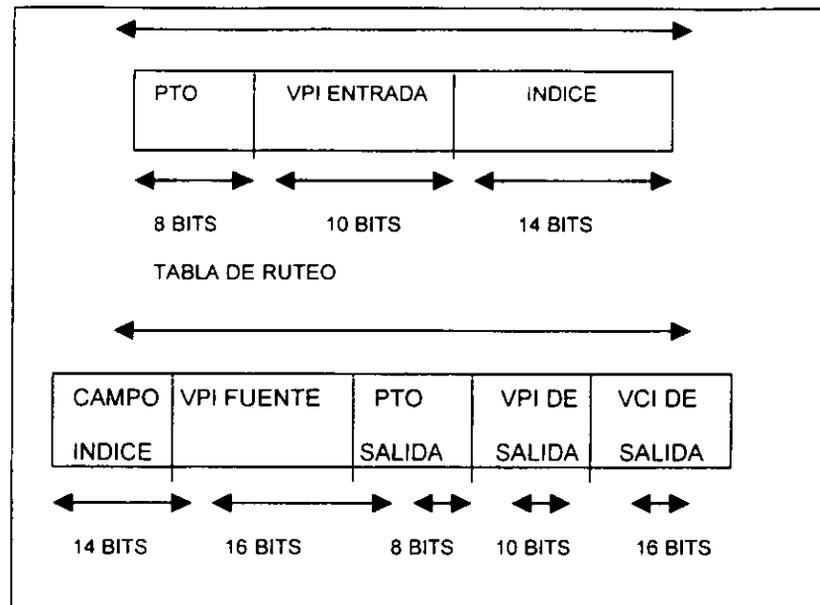


Figura 2.29. Formato de las tablas de ruteo

El formato interno de la celda ATM en el conmutador

La celda ATM de 53 bytes es manejada por el conmutador como 14 palabras consecutivas de 32 bits. Dos campos adicionales redondean la diferencia. Los restantes 3 bytes se dividen en PAD 1 de 8 bits y PAD 2 de 16 bits.

Las celdas se transmiten a través del conmutador en este formato. El byte PAD 1 es un CRC (Cyclical Redundancy Check) de los primeros 5 bytes del encabezado. El byte PAD 2 tiene una serie de campos:

Bit 0. Es 1 si existe un error de selección en la cola.

Bit 1. Si el CRC del encabezado (PAD 1) es correcto este bit es 0

Bit 2. Si el CRC de la sección de datos de la AAL-3/4 es correcto, este bit es 0 sino es 1.

Bit 3 a 5. No se utilizan, son 0

Bit 6 a 15. El conmutador computa su propio CRC-10 para la carga útil de la celda, incluyendo su propio CRC. Si son 0 indican que no hay error.

Interfases del conmutador Fore

El conmutador soporta una serie de interfases físicas. Todos los transportes del Foro ATM son utilizables. El NM-4MM/155 tiene 4 puertos de 155 Mbps SONET STS-3c. El NM-4MM/125 tiene cuatro puertos de 100 Mbps FDDI (TAXI). El NM-4MM/175 tiene cuatro puertos de 140 Mbps Fiber Channel.

Funciones OAM en ATM

Las redes deben de ser operadas y administradas. Este proceso es conocido como operaciones y mantenimiento (OAM, el término oficial de la ITU) o como operaciones, administración y mantenimiento (OA&M, un término más reciente del Foro ATM). La capa ATM provee mecanismos para realizarlo. Las celdas especiales OAM proveen los medios para detectar la degradación del desempeño de la red ATM. Las celdas OAM se generan por todos los equipos ATM y realizan el monitoreo, la detección y reporte de errores utilizando celdas.

El centro de operaciones de la red debe tener acceso y utilizar la información en éstas celdas para aislar las causas de las fallas cuando estas ocurren. Por esta razón, la estandarización del formato de éstas celdas es crucial

Flujo de las celdas OAM

Existen dos flujos principales de celdas OAM en la red ATM. El flujo tipo A es para los flujos F4 (VP) y el tipo B es para los flujos F5 (VC).

Los flujos de tipo A utilizan un conjunto separado de VCIs en el mismo camino como la conexión de camino virtual (VPC). Esta conexión de canal virtual (VCC) enlaza lógicamente los dispositivos del usuario final que terminan las conexiones en la red ATM. Por eso, para cada valor distinto de VPI establecido en una interfase ATM, existirá un valor de VCI estándar asignado para el flujo F4 de celdas OAM. Los flujos tipo B se utilizan en cada VCC. Como cada VCC está determinada localmente por una combinación única de VPI/VCI, una combinación separada de VPI/VCI no puede ser utilizada para el flujo F5 de celdas OAM.

De hecho existen dos tipos de flujo F4 y F5: uno que verifica un segmento ATM en particular y otro que verifica el camino extremo a extremo. Estos se conocen como flujos de segmento y de extremo a extremo. Se distinguen haciendo uso de los valores de encabezado especiales de las celdas ATM. Las celdas de segmento OAM F4 VP utilizan VCI=3, y las celdas de extremo a extremo OAM F4 VP utilizan VCI=4. El VPI será diferente en el encabezado de la celda OAM, uno por cada VPC que se establezca.

Las celdas de segmento OAM F5 VC utilizan el indicador de carga útil en la celda ATM (PTI) = 4 (100) para distinguirlas de las celdas de datos del usuario. Las celdas de extremo a extremo OAM F5 VC utilizan el PTI (Payload Type Indicator) = 5 (101).

Las celdas de segmento OAM F4 VP se generan cada vez que un nuevo VPI es asignado a una celda. Son regresadas al extremo del segmento donde el VPI cambia de nuevo. Las celdas de extremo a extremo OAM F4 VP siguen las traducciones de VPI a través de la red. Las celdas de segmento OAM F5 VC son generadas cada vez que un VCI es asignado a una celda. Y las celdas de extremo a extremo OAM F5 VC siguen las traducciones de VPI/VCI a través de la red. El formato general de estas celdas se muestra en la figura 2.30.

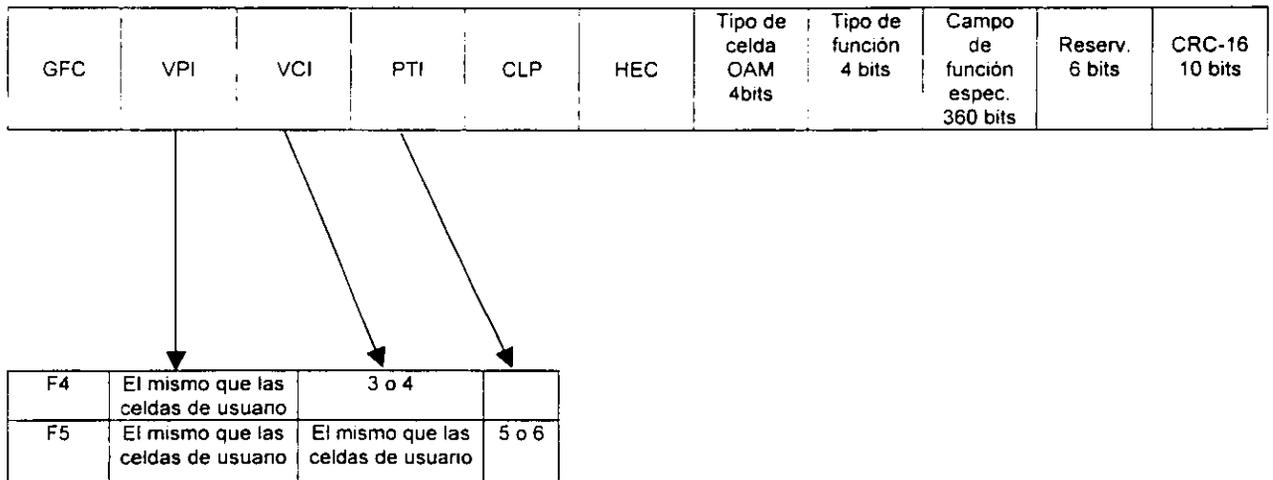


Figura 2.30. Estructura de las celdas OAM

Tipos de funciones OAM

El equipo ATM generará periódicamente éstas celdas. El intervalo más común es una por segundo. En la carga útil de la celda OAM, los primeros 4 bits indican el tipo de celda OAM: administración de fallas (0001), administración del desempeño (0010) o activación/desactivación (1000). Otros cuatro bits indican el tipo de función: señales de indicación de alarma (AIS, codificadas 0000), falla del receptor final (FERF, codificadas 0001) o verificación de continuidad (0100) para la administración de errores, etc. Una lista completa de los identificadores de tipo se muestra en la figura 2.31.

Tipo OAM	Codificación de 4 bits	Tipo de función	Codificación de 4 bits
Administración de errores	O001	AIS	O000
	O001	FERF	O001
	O001	Continuidad	O100
Administración de desempeño	O010	Monitoreo hacia delante	O000
	O010	Reporte hacia atrás	O001
	O010	Monitoreo/Reporte	O010
Activación/Desactivación	1000	Monitoreo de desempeño	O000
		Verificación de continuidad	O001

Figura 2.31. Identificadores de tipo OEM

En una red ATM, cualquier nodo que utilice flujos OAM debe generar una alarma al detectar una falla. La AIS es enviada por la red en la misma dirección que el flujo de celdas de todos los VPCs y VCCs afectados para indicar a los otros nodos por donde la conexión pasa, que ha habido una falla en la dirección opuesta de donde reciben la celda. Las alarmas pueden ser disparadas por la pérdida de la señal, la pérdida del marco o la pérdida del delineado de celda.

El FERG, es lo opuesto, se genera en la dirección opuesta a la que la celda de alarma fue recibida. Para evitar una inundación de celdas de alarma en la red, el Foro ATM las limita al 1 por ciento del total de las celdas generadas por el nodo ATM.

Los nodos ATM utilizan las alarmas para pasar del estado de operación normal al estado de alarma. Un nodo regresará a su estado normal si no recibe celdas de alarma por tres segundos o recibe una celda OAM sin indicaciones de alarma.

Formatos de los tipos de celdas OAM

Cada uno de los tipos de celdas OAM tiene un formato específico en los 45 bytes de carga útil. Se han definido 3 formatos: celdas OAM de administración de fallas, celdas OAM de administración de desempeño y celdas OAM de activación/desactivación.

Celdas OAM de administración de fallas

Los campos propuestos para este tipo de celdas son:

Tipo de falla: Un campo de 8 bits opcional que indica la naturaleza de la falla. No existen recomendaciones de código.

Localización de falla. Un campo de 9 bytes opcional para la dirección del equipo ATM que ha fallado.

Para la administración de fallas los otros 35 bytes están indefinidos. Cuando el campo de tipo de error comienza con siete ceros, este es un indicador especial de regreso y se definen otros campos:

Indicación de retorno (LBI): Un campo de 1 bit que es puesto en cero cuando se regresa la celda y toma el valor de uno cuando esta retorna.

Indicador de correlación: Un campo de 4 bytes que le da al emisor una forma de distinguir sus celdas de retorno de las demás.

ID de localización de retorno: Un campo de 12 bytes que contiene la dirección ATM del dispositivo que debe regresar la celda. Una codificación de 1s indica un retorno de extremo a extremo.

ID de fuente: Un campo de 12 bytes que contiene la dirección ATM de la fuente.

Los demás campos están indefinidos (16 bytes) y contienen un valor de 6A en notación hexadecimal.

Celdas OAM de administración del desempeño

Los campos de estas celdas son:

Número de secuencia de monitoreo de celda (MCSN): Un campo de 8 bits que va de 0 a 255 una y otra vez.

Conteo de celdas totales del usuario (TUC): Un campo de 16 bits que indica el número total de celdas del usuario transmitidas (un ciclo de 64000).

BIP-16: Una verificación BIP de 16 bits en los campos de información es realizada en el bloque del usuario. Los bloques pueden ser de 128 a 1024 celdas, agrupadas en 128.

Etiqueta de tiempo (TS, Transport Stream): Una etiqueta opcional de tiempo de 32 bits.

Resultado del error de bloque: Un campo de b bits al final de la celda de monitoreo que contiene el número de errores BIP-16 en la última celda de entrada revisada.

Conteo de celdas perdidas o insertadas: Un campo de 16 bits que contiene el conteo de las celdas perdidas o insertadas erróneamente identificadas en el último bloque revisado.

Celdas OAM de activación/desactivación

Los campos de las celdas son:

ID de mensaje: Un campo de 6 bits que indica en que dirección está viajando el mensaje: hacia el activador A o hacia el desactivador B. Cuando se codifica 01 la dirección es de B a A, cuando se codifica 10, la dirección es de A a B. La codificación 11 es para una comunicación bidireccional y la codificación 00 se utiliza cuando no es aplicable.

Indicador de correlación: Un campo de 8 bits es utilizado para hacer coincidir las peticiones con las respuestas de un nodo en particular. Se elige un número en este campo cuando la celda es enviada, si una celda llega con el mismo número, corresponde a la respuesta de la petición.

Tamaño de bloques PM: Estos dos campos de 4 bits se utilizan por el activador para proveer el tamaño de los bloques de administración de desempeño (el número de celdas de usuario entre celdas OAM). Funciona para ambas direcciones. Cada bit indica un bloque de tamaño 128, 256, 512 o 1024 bit. El valor por omisión es 0000.

En el resto de los bits se envía un 6A hexadecimal.

Señalización

Este tópico se refiere a como se realizan las tareas de inserción, mantenimiento y eliminación de los registros en las tablas de traducción a través de la red. Así como el establecimiento de servicios SVC (Switched Virtual Channel or Switched Virtual Circuits). Para lograr lo anterior ATM introduce un nuevo concepto llamado metaseñalización.

Metaseñalización

Las conexiones virtuales conmutadas (SVC) de la red se establecen vía una llamada de instalación, pero las redes ATM necesitan trabajar con conexiones punto a punto y con conexiones difundidas para audio y video y con conexiones multipunto a multipunto para conferencias.

La metaseñalización en la capa ATM es un protocolo simple para establecer y desconectar los canales de señalización. Toda la información de la metaseñalización se hace utilizando mensajes de una celda.

Sólo se requieren tres funciones en la metaseñalización para ATM. Estas se muestran en la figura 2.32.

Primero el canal de metaseñalización puede establecer un nuevo canal de señalización con la operación de asignación de VC por medio de un intercambio de celdas de dos fases. Segundo, el canal de metaseñalización puede eliminar un canal de señalización existente con la operación de remoción de VP en un intercambio de celdas de 3 fases. Finalmente, la red puede verificar el estado de los canales de señalización con la operación de verificación de VC.

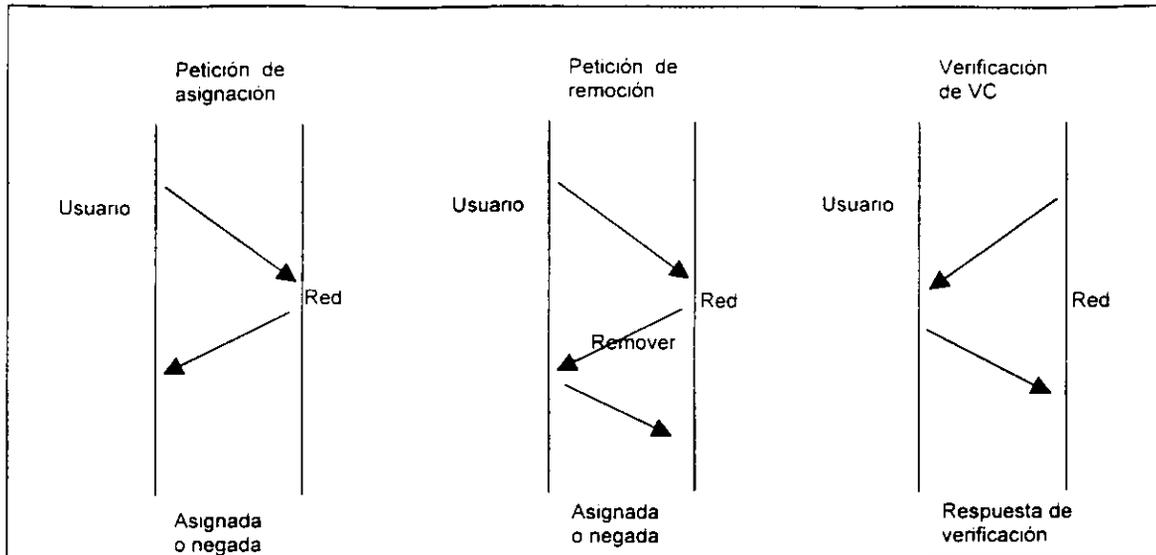


Figura 2.32. Mensajes de metaseñalización.

Señalización ATM

Además de la metaseñalización, las redes ATM deben implementar la señalización utilizada en otras redes orientadas a conexión. Es protocolo en esencia es una petición formal de recursos del usuario. Tres estándares se han propuesto para la señalización de la red ATM con el usuario. El primero es Q.93B de la ITU. El segundo es la señalización del Foro ATM, que es un subconjunto del Q.93B. El último es el B-ISUP (Broadband Interim Signaling User Protocol), que es esencialmente el SS7 (Signaling System Number 7).

Señalización del Foro ATM y direcciones de red

El protocolo de señalización ofrece una forma estándar para expresar el tipo de conexión (PVC o SVC), la QOS y los parámetros de servicio a un nodo local ATM. El protocolo de señalización es un marco de tamaño variable con un protocolo definido.

Existen algunos conceptos importantes respecto a la señalización. La conexión que el protocolo de señalización está instalando debe utilizar alguna forma de dirección de red. Existen cuatro formas de direcciones de red soportadas por el Foro ATM, todas basadas en el formato ISO NSAP (Network Service Access Point).

Las cuatro formas son:

1. Formato DCC (Data Communications Channel) ATM
2. Formato ICD (International Code Designator) ATM

3. Formato privado E.164 ATM
4. Formato público E.164 ATM

En detalle los formatos son los siguientes

1. El código de datos de país (DCC) Formato ATM. El primer campo es el identificador de autoridad y formato (AFI, Authority And Format Identifier), que tiene un valor de 39. El campo DCC de 2 bytes especifica el país donde la dirección esta registrada. El campo de identificador de especificación de dominio (DFI, DSP Format Identifier) (1 byte) especifica la estructura de los campos restantes. El campo de la autoridad administrativa (AA, Administrative Authority) de 3 bytes indica la autoridad responsable del resto de la dirección. Después esta un campo reservado de 2 bytes para uso futuro. El campo de dominio de ruteo (RD, Routing Domain) es utilizado para especificar un dominio de ruteo único. El campo de área (2 bytes) identifica un área única dentro de un RD (Routing Domain). El campo de identificador de sistema final (ESI, End System Identifier) (6 bytes) identifica al sistema final dentro de un área y el campo del selector (SEL, Selector (NSAP)) (1 byte) se utiliza por el sistema final para seleccionar un punto final.
2. El código de designación internacional (ICD, International Code Designator). Formato ATM. El primer campo es un AFI (Authority And Format Identifier) de valor 47. El siguiente campo es un ICD de 2 bytes que identifica a la organización internacional. Los códigos son administrados por el Instituto Británico de Estándares, el resto de los campos son idénticos al formato DCC (Data Communications Channel).
3. El formato privado E.164 ATM. Los dos formatos E.164 se especifican en recomendaciones de la ITU-T y fueron planeados originalmente para las redes ISDN. El primer campo es un AFI con valor de 45. El siguiente campo es una dirección E.164 (8 bytes) que puede contener hasta 15 valores decimales codificados. El nibble inicial es puesto en 0000 y si la dirección es menor de 15 dígitos, los bits restantes son puestos en 1111. El resto de los campos es igual que en el formato DCC o ICD.
4. El formato público E.164 ATM. Es idéntico al formato privado E.164. es asignado y administrado públicamente conforme al formato internacional E.164.

Generalmente, el nodo ATM de la red entregará la información necesaria para los campos de las direcciones excepto el ID del sistema y el selector.

Flujo de los mensajes de señalización en ATM

Los sistemas de señalización utilizados en ATM están basados en la señalización Q.931 para ISDN (Integrated Services Digital Network) y Q.933 para Frame Relay. El protocolo definido es el Q.2931.

El Q.2931 trabaja intercambiando mensajes de longitud variable. Cada uno tiene un campo de tipo y de tamaño y elementos de información (IEs). Cada IE (Information Element) tiene valores de los parámetros que definen los atributos del circuito que se está negociando.

Los mensajes del Q.2931 son familiares a los mensajes de los protocolos mencionados tales como: ALERTING, DISCONNECT, CALL PROCEEDING, etc. El estándar está definido como punto a punto y punto a multipunto. Las conexiones multipunto a multipunto se agregarán después.

El ATM fórum decidió estandarizar un subconjunto del protocolo Q.2931 conocido como Q.93B. No utiliza metaseñalización y se utilizan los valores VPI=0, VCI=5 para todas las operaciones.

La figura 2.33 muestra un ejemplo del flujo de mensajes de señalización para establecer una conexión entre la UNI y la NNI.

La figura 2.34 muestra el procedimiento inverso, es decir la desconexión o liberación de la conexión.

Finalmente la figura 2.35 muestra como la red ATM puede terminar una conexión en caso de que falle.

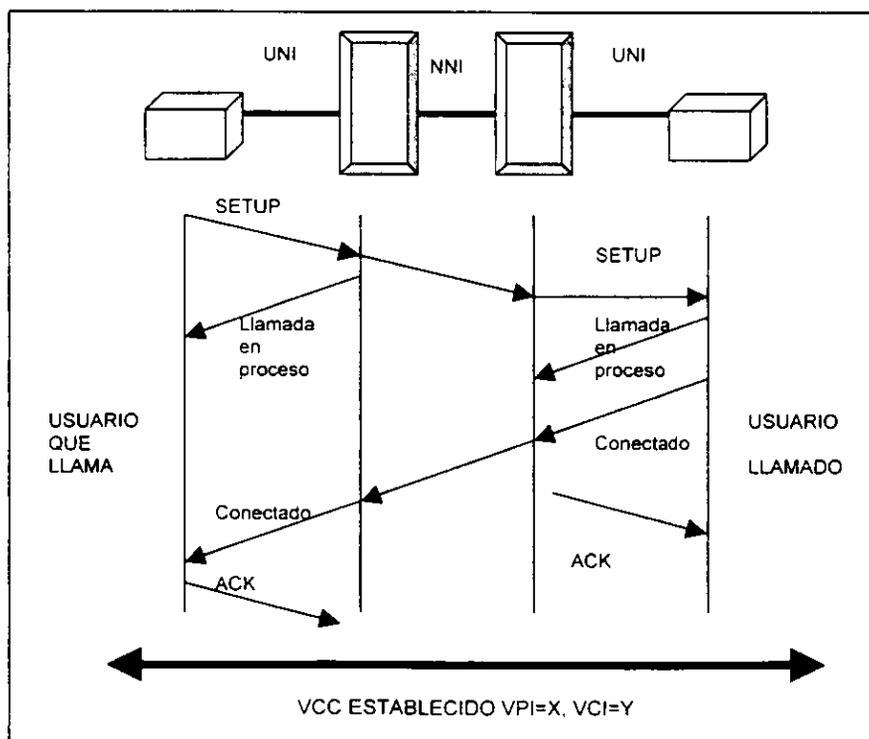


Figura 2.33. Establecimiento de la conexión

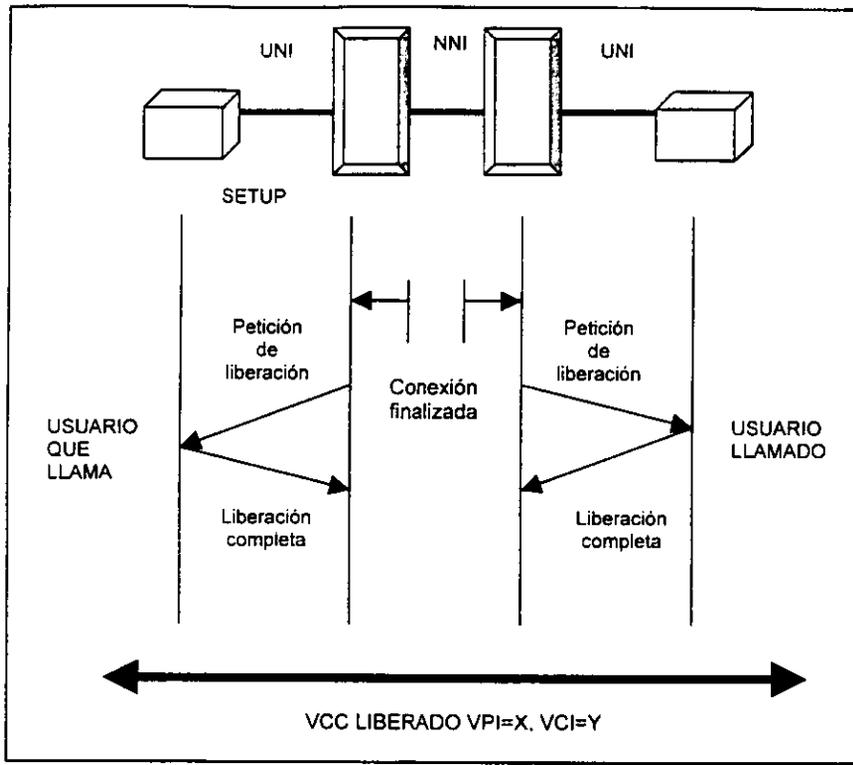


Figura 2.34. Liberación de la conexión

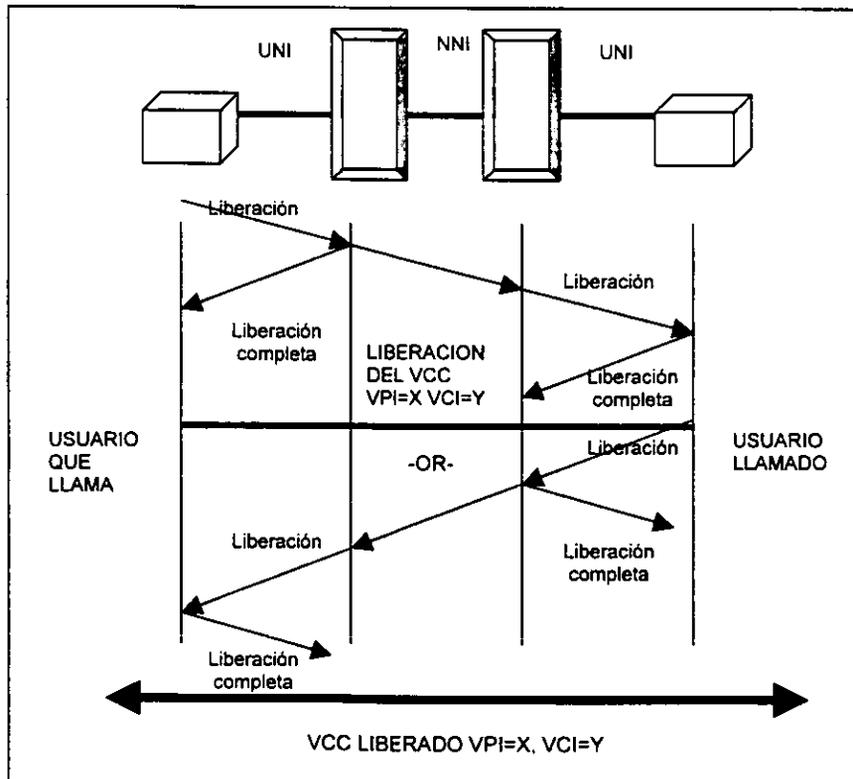


Figura 2.35. Terminación de la conexión por la red

El conjunto de protocolos ATM: Las capas superiores

Tipos y clases de capas de adaptación ATM

La documentación del ITU-T define cuatro tipos de servicio basados en tres parámetros. Estos son la tasa de bits (variable o constante) el modo de conexión (orientada a conexión y no orientada a conexión) y la compensación de tiempo.

El parámetro de compensación de tiempo se refiere a la variación del retraso que es aceptable para la conexión. En el caso de la voz digitalizada a 64 kbps las muestras PCM deben ser enviadas a 8000 bits por segundo, una pequeña variación es tolerable, pero una variación mayor es perjudicial.

Otras aplicaciones tales como la transferencia de archivos son más tolerantes.

Las cuatro clases de la ITU A, B, C y D corresponden a seis tipos de AAL. Al principio existía una correspondencia uno a uno, pero debido a complicaciones en las definiciones no existe una relación preestablecida entre las clases AAL y los tipos AAL.

La AAL-1 se utiliza para transportar los circuitos E-1 (ETSI Level 1 Digital Carrier Trunk (2.048 Mbps)) y T-1 (First-Level T-Carrier Digital Trunk) existentes. La AAL-2 está diseñada para aplicaciones de tasa de bits variable, como el video y el audio comprimidos.

La AAL-3 ya no existe. Ahora se ha combinado con la AAL-4 y fue diseñada para ser utilizada por los transportes de datos orientados a conexión. La AAL-4 tampoco existe por separado. Se diseñó para transportes de datos no orientados a conexión.

La AAL-5 se utiliza para transportar tráfico TCP/IP y Frame Relay a través de la red.

Los servicios y las funciones de AAL-1

AAL-1 se utiliza en los flujos de bits síncronos. AAL-1 provee una tasa de bits constante para la transferencia y la entrega de las SDUs (Service Data Unit). Por esto debe existir alguna forma de información de temporizado entre la fuente y el destino así como de la estructura de la celda.

Para poder entregar estos servicios la AAL-1 debe realizar una serie de funciones como: segmentación y reensamblado, manejo de la variación de retardo (CDV), manejo de celdas perdidas e insertadas, recuperación de la frecuencia del reloj de la fuente en el destino y el manejo de los errores de bits.

La figura 2.36 muestra la estructura de la carga útil de la AAL-1 en la subcapa SAR.

SAR-PDU (48 bytes)				
Encabezado SAR-PDU				
SN 4 bits	SNP 4 bits	Carga útil SAR-PDU 47 bytes		
CSI	Conteo de secuencia 3 bits	CRC 3 bits	Bit de par.	

Figura 2.36. Campos de la PDU de AAL-1

Esta carga útil de 48 bytes se conoce como SAR-PDU (Protocol Data Unit) y está dividida en dos secciones. Existe un encabezado SAR-PDU (distinto al encabezado ATM pero inmediatamente después de este) el cual es de un 1 byte y una carga útil SAR-PDU que abarca los 47 bytes restantes. El encabezado SAR-PDU contiene dos campos: el número de secuencia (SN) de 4 bits y la protección de número de secuencia (SNP) de 4 bits. El campo SN de 4 bits también tiene una estructura. El primer bit es la indicación de la subcapa de convergencia (CSI). El valor de este bit por default es de 0. Los últimos 3 bits en el campo SN (Sequence Number) forman el campo de conteo de secuencia, que va de 0 a 7 en forma repetida. Esto provoca que las celdas en AAL-1 sean separadas en unidades de 8 celdas o bloques. El propósito de este campo es el detectar cualquier pérdida.

El campo de SNP de 4 bits también se divide, los primeros 3 bits forman un campo CRC y el último bit forma un bit de verificación de paridad par sobre los otros 7 bits del encabezado SAR-PDU.

La utilización de estos campos en el encabezado AAL-1 SAR-PDU permite al receptor corregir los errores de bit simples y detectar los errores de bit múltiples. El encabezado SAR-PDU es construido en el emisor de la siguiente forma: Primero, el bit CSI y el campo SN son cargados. Después un valor CRC es calculado con estos 4 bits y el campo de CRC es cargado. Por último el emisor inserta un bit de paridad par para todo el encabezado.

El receptor en AAL-1 tiene dos modos de operación: modo de corrección y modo de detección. El receptor inicia en el modo de corrección, el receptor AAL-1 es capaz de realizar correcciones de errores de bit simples en el encabezado SAR-PDU. Si no se detecta ningún error en el modo de corrección no se realiza otro procedimiento. Si se detecta un error de bit sencillo y se corrige o si se detecta un error de bit múltiple, el receptor pasa al modo de detección. En el modo de detección todas las celdas con error subsecuentes son descartadas. Un SN válido ocasionará la transición del receptor al modo de corrección. Una presentación detallada de las acciones del receptor se muestra en la figura 2.37 para las operaciones de corrección y en la figura 2.38 para las operaciones de detección.

Síndrome del CRC	Bit de paridad	Acción a ejecutar	Reacción
Cero	Correcto	No hay Declarar SN válido	Permanecer en el modo de corrección
Distinto de cero	Incorrecto	Corregir el bit simple Declarar SN válido	Cambiar a detección
Cero	Correcto	Corregir paridad Declarar SN válido	Cambiar a detección
Distinto de cero	Incorrecto	No hay Declarar SN inválido	Cambiar a detección

Figura 2.37 Operaciones en el modo de corrección

Síndrome del CRC	Bit de paridad	Acción a ejecutar	Reacción
Cero	Correcto	No hay Declarar SN válido	Cambiar a corrección
Distinto de cero	Incorrecto	No hay Declarar SN inválido	Permanecer en detección
Cero	Correcto	No hay Declarar SN inválido	Permanecer en detección
Distinto de cero	Incorrecto	No hay Declarar SN inválido	Permanecer detección

Figura 2.38 Operaciones en el modo de detección

AAL-1 necesita para funcionar una CS (Capa de Convergencia) especial. Mientras el encabezado SAR-PDU se genera en la subcapa SAR, la información en el encabezado viene de la CS colocada arriba.

Para un servicio de clase A, existe la necesidad de un reloj para la CS.

Además de los procesos de generación y recuperación de reloj en la capa CS de AAL-1, es aquí donde se debe de trabajar con las celdas pérdidas e insertadas detectadas por la subcapa SAR. La CS de AAL-1 no puede pedir al emisor que retransmita las celdas perdidas debido a que el servicio A está diseñado para emular los circuitos DS-0 (Digital Signal 0 Level (64 Mbps)) y DS-1 (Digital Signal 1 Level (1.544 Mbps)). En lugar de ello la AAL-1 debe ser capaz de generar cargas útiles SAR-PDU inactivas. Estas obviamente no contendrán los datos correctos, pero es mejor que cancelar la conexión. Si las celdas inactivas son poco utilizadas, el efecto que producen se asemejará a los errores de ráfaga tradicionales en las redes DS-1. La tasa de bit en error del transporte físico de las redes ATM debe ser lo suficientemente bajo para que este método pueda utilizarse.

La CDV es manejada por medio de un buffer el cual es vaciado a una tasa constante. La CS de la AAL-1 debe crear bits inactivos en caso de que el buffer se vacíe y vaciar todo el contenido del buffer en caso de que se llene.

Recuperación del reloj en AAL-1

La relación de tiempo en los servicios clase A y clase B puede interpretarse como un número constante de bits entrando a la red ATM por unidad de tiempo y en el lado del receptor se tiene el mismo número de bits por unidad de tiempo. Para una conexión DS-1 el número de bits por segundo es de 1544000. Los bits están organizados en unidades AAL-1 de 47 bytes, lo que significa que la variación en el tiempo de llegada se mide en unidades de 376 bits. Para emular exitosamente un circuito definido en la jerarquía digital de ITU, la variación en el tiempo de llegada de bit debe ser de ± 50 partes por millón.

Es por esta razón que se necesita un método para informar no sólo que una celda viene atrasada sino de cuanto es el atraso.

AAL-1 tiene dos métodos para darle al receptor dicha información. El primero es conocido como el método del Indicador de Tiempo de Residuo Síncrono (SRTS, Synchronous Residual Time Stamp) y el segundo es el método de reloj auto adaptable. El método de reloj autoadaptable es la detección de la CDV mediante el nivel de llenado del buffer de recepción y se limita a permitir que el receptor tenga un medio de compensar las diferencias en tiempo de forma muy burda.

El SRTS permite marcar con el tiempo de salida un bloque de celdas AAL-1 (un grupo de 8) y permite al receptor determinar que tan lejos está el bloque de entrada del tiempo esperado de llegada. Esto permite que el receptor conozca si la celda viene atrasada y por cuanto tiempo. Tanto el receptor como el emisor deben tener acceso a un reloj de referencia común.

La recuperación del reloj se realiza mediante el campo RTS de 4 bits enviado en una secuencia AAL-1 de 3008 bits que es utilizada por la red ATM para duplicar el tiempo del reloj de origen en el receptor. En este método, 4 bits son tomados del indicador CS para formar el campo de la marca de tiempo residual. Lo que se codifica en el campo RTS es la diferencia entre el tiempo esperado de llegada y el tiempo de llegada real.

El RTS de 4 bits es enviado en la posición del bit CSI. El campo SN proporciona 8 bits potenciales en cada bloque de celdas AAL-1. Cuatro de estos bits son utilizados por el RTS. Los 4 bits utilizados para el RTS son enviados en las SAR-PDUs con los valores de SN 1, 3, 5 y 7. El bit más significativo del RTS tiene el valor de SN =1.

Transferencia de datos estructurada de AAL-1 (SDT)

La utilización de la SDT debe de ser estipulada explícitamente al momento de la conexión. La SDT involucra el envío de celdas parcialmente llenas.

STD permite que la carga útil de entrada sea enviada sin tener que esperar a que la información se acumule para poder llenar una celda. Este es un método para mantener la relación de tiempo entre el emisor y el receptor y es en realidad la única solución para el caso del atraso ocasionado en el empaquetamiento de voz.

Para emplear SDT (Structured Data Transfer), una AAL-1 emisora debe de utilizar una forma especial de SAR-PDU llamada el formato P. Este es el uso estándar para las cargas útiles pares (0, 2, 4, 6) del bloque AAL-1 de 8 celdas. Si la STD no es utilizado, estos bits deben de ser cero. Cuando se utiliza SDT un bit 1 en el campo CSI del SAR-PDU indica el uso del formato P.

Cuando se emplea la SDT, las celdas impares (1, 3, 5 y 7) del bloque AAL-1 tienen un formato diferente al P por lo que tienen una carga útil de 47 bytes. En el formato P el primer byte de la carga útil de la SAR-PDU no se utiliza para datos del usuario cuando el bit CSI es uno, en su lugar es un apuntador de un byte.

El apuntador de 7 bits contiene una referencia que indica donde empiezan los datos de usuario dentro del campo de la carga útil tomando como referencia dicho apuntador. Si los 47 bytes de carga útil son datos de usuario, el formato no es necesario. Si menos de 47 bytes de datos están disponibles para ser enviados el formato P es utilizado, teniendo una carga útil de 46 bytes.

AAL-5 (SEAL Simple And Efficient Adaptation Layer) servicios y funciones

A veces se hace referencia a esta capa con el nombre de Capa de Adaptación Simple y Eficiente (SEAL).

La figura 2.39 muestra la estructura del SAR-PDU de la AAL-5 y de la CPSC-PDU.

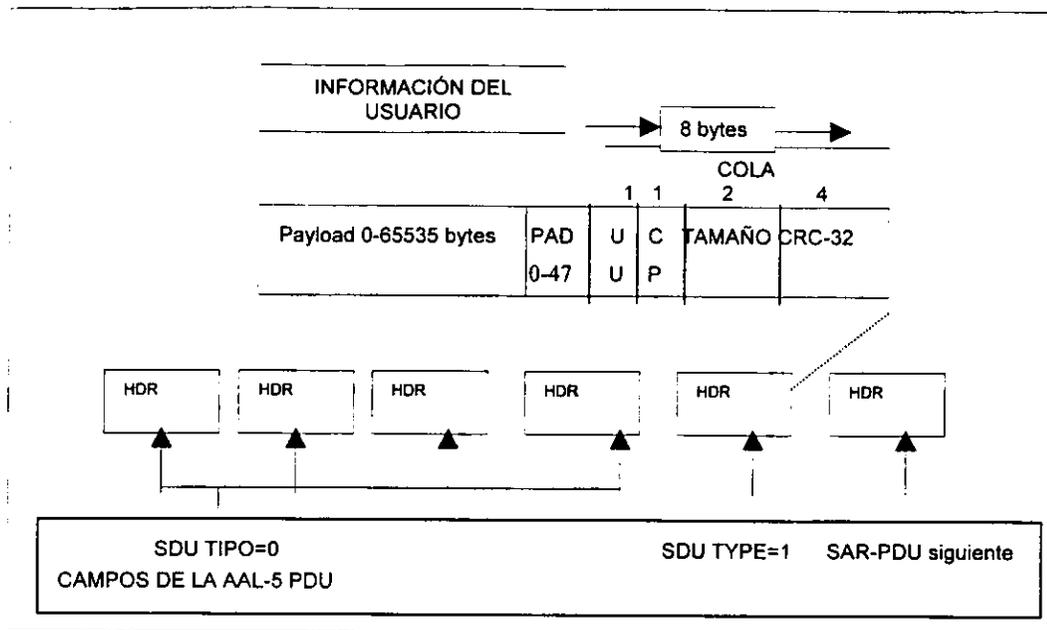


Figura 2.39. Estructura del SAR-PDU y de la CPSC-PDU

Cuando se utiliza la AAL-5 el emisor debe realizar la inserción de bits necesaria para que, la cola de la AAL-5 se encuentre en la última celda de la secuencia. Estos bits son ignorados por el receptor. La cola de la AAL-5 tiene un campo de usuario a usuario (UU, User-User Interfase) de un byte. El campo UU puede contener información para ser transferida de forma transparente a la capa ATM entre los usuarios finales del servicio de la AAL-5. Existe un campo de indicador de parte común (CPI, Common Part Indicator) de un byte que es utilizado para alinear a la cola con una frontera de 64 bits. Existe un campo de 2 bytes utilizados para indicar el número de bytes en el campo de información del usuario. Finalmente existe un código verificador de errores para toda la CPSC-PDU. Para que el receptor pueda saber con que cola de celda está trabajando, se utiliza la figura 2.39.

Capítulo III. El Satélite. Conceptos Básicos

La arquitectura de un sistema de comunicaciones satelital

La figura 3.1 muestra los componentes de un sistema de comunicación satelital, el cual esta formado por un segmento espacial y un segmento terrestre.

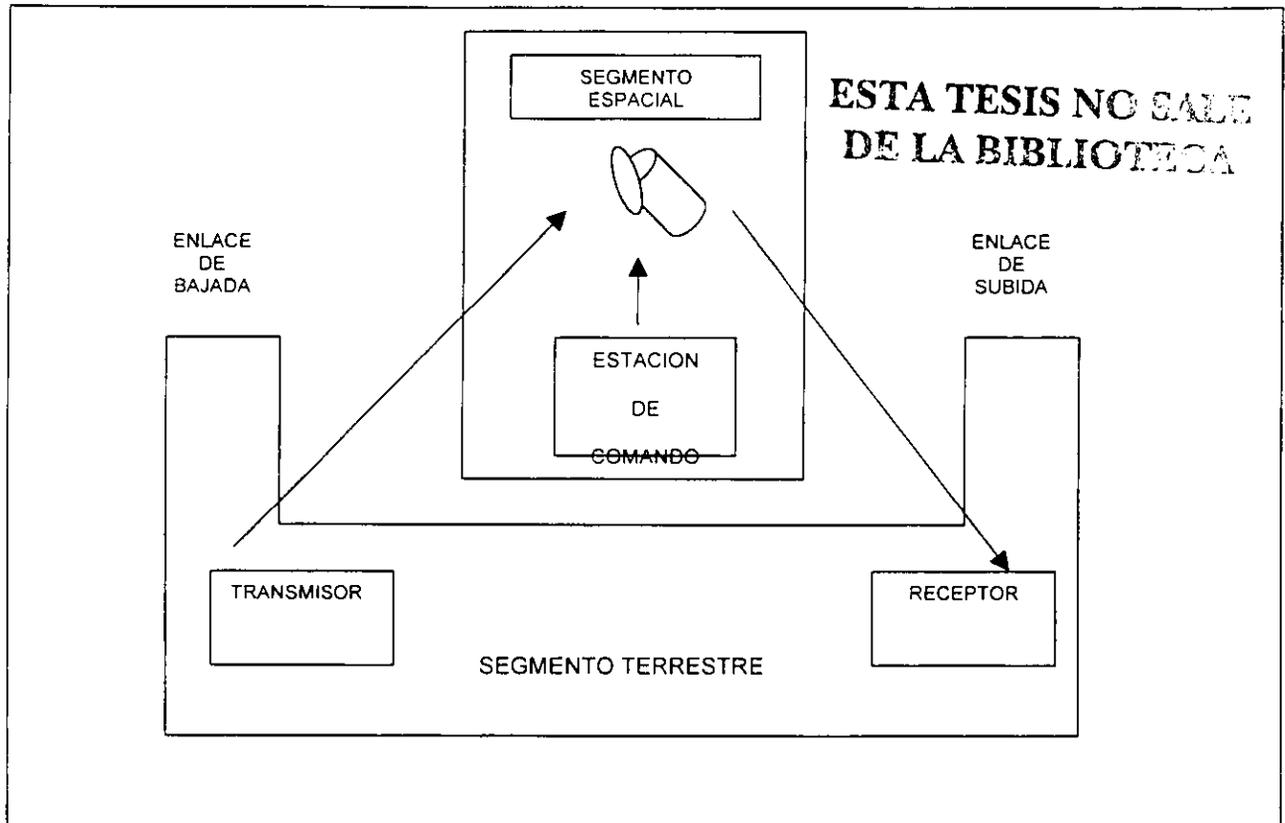


FIGURA 3 1 Componentes de un sistema de comunicación satelital.

El segmento espacial

El segmento espacial consiste de los satélites en órbita y de los equipos terrestres para el control y monitoreo del satélite. Esto incluye las estaciones de seguimiento, telemetría y comando junto con el centro de control desde donde se realizan todas las operaciones asociadas con la verificación y el mantenimiento de las funciones vitales del satélite.

Las ondas de radio son transmitidas por las estaciones terrestres y recibidas por el satélite, esto se conoce como el enlace de subida. El satélite, transmite a las estaciones terrestres receptoras, esto forma el enlace de bajada. La calidad del enlace de radio es especificada por la razón portadora a ruido. El factor importante es la calidad del enlace total, de estación a estación, la cual es determinada por la

calidad del enlace de subida, del enlace de bajada y de la intermodulación en el satélite. La calidad del enlace total determina la calidad de la señal que es entregada al usuario de acuerdo con el tipo de modulación y codificación utilizado.

El satélite forma un paso obligado para un grupo de enlaces simultáneos. En este sentido puede ser considerado como un nodo de la red. El acceso de varias portadoras al satélite y a su transpondedor implica el uso de técnicas específicas, llamadas técnicas de acceso múltiple. El modo de operación dependerá de las necesidades de una red en términos de arquitectura, volumen, tráfico, etc.

El satélite consiste de una carga útil o equipamiento y una plataforma. La plataforma está formada por las antenas de recepción y transmisión y por todo el equipo electrónico que soporta la transmisión de las portadoras. La plataforma consiste en todos los subsistemas que permiten que la carga útil opere. Estos incluyen:

- Estructura
- Alimentación eléctrica
- Control de temperatura
- Control de altitud y órbita
- Equipo de propulsión
- Equipo de seguimiento, telemetría y comando (TT&C, Telecommunications Technical Committee).

El satélite tiene una doble función:

- Amplificar a las portadoras recibidas para su retransmisión por el enlace de bajada. La potencia de la portadora a la entrada del receptor del satélite es del orden de 100 pW a 1 nW. La potencia de la portadora a la salida del amplificador de transmisión es del orden de 10 a 100 W, por lo que la ganancia en potencia es del orden de los 40 a 60 dB.
- Cambiar la frecuencia de la portadora para evitar la reinyección de una fracción de la potencia transmitida en el receptor; la capacidad de rechazo de los filtros de entrada a la frecuencia del enlace de bajada combinada con la baja ganancia en la antena entre la salida de transmisión y la entrada de recepción aseguran el aislamiento

Para cumplir con esta función el satélite puede operar como un simple repetidor. El cambio en la frecuencia se logra por medio de un convertidor de frecuencia. Este es el caso de la mayoría de los satélites comerciales en operación. Sin embargo, una nueva generación de satélites está emergiendo,

estos son llamados satélites regenerativos y están equipados con demoduladores, por lo que las señales en banda base están disponibles a bordo. El cambio de frecuencia se logra modulando una nueva portadora para el enlace de bajada. La operación dual de modulación y demodulación se puede acompañar de un procesamiento en la señal en banda base con diferentes grados de complejidad.

Para asegurar el servicio con una disponibilidad específica, un sistema de comunicación satelital debe utilizar varios satélites para asegurar la redundancia. Un satélite puede dejar de funcionar debido a una falla o porque ha alcanzado el final de su vida útil. En este sentido es necesario distinguir entre la confiabilidad y el tiempo de vida de un satélite. La confiabilidad es una medida de la probabilidad de falla y depende de la confiabilidad del equipo y de los esquemas que proveen redundancia. El tiempo de vida está condicionado por la habilidad para mantener a un satélite en la altitud nominal, esto es la cantidad disponible de combustible en el sistema de propulsión y en el control de órbita y altitud.

El segmento terrestre

El segmento terrestre está formado por todas las estaciones terrestres, éstas están conectadas al equipo del usuario final por una red terrestre o en el caso de estaciones pequeñas (Terminales de Apertura muy Pequeña, VSATs) se encuentran conectadas directamente al equipo del usuario final. Las estaciones se distinguen por su tamaño que varía de acuerdo al volumen de tráfico que será transmitido por el enlace espacial y a su tipo (teléfono, televisión, datos).

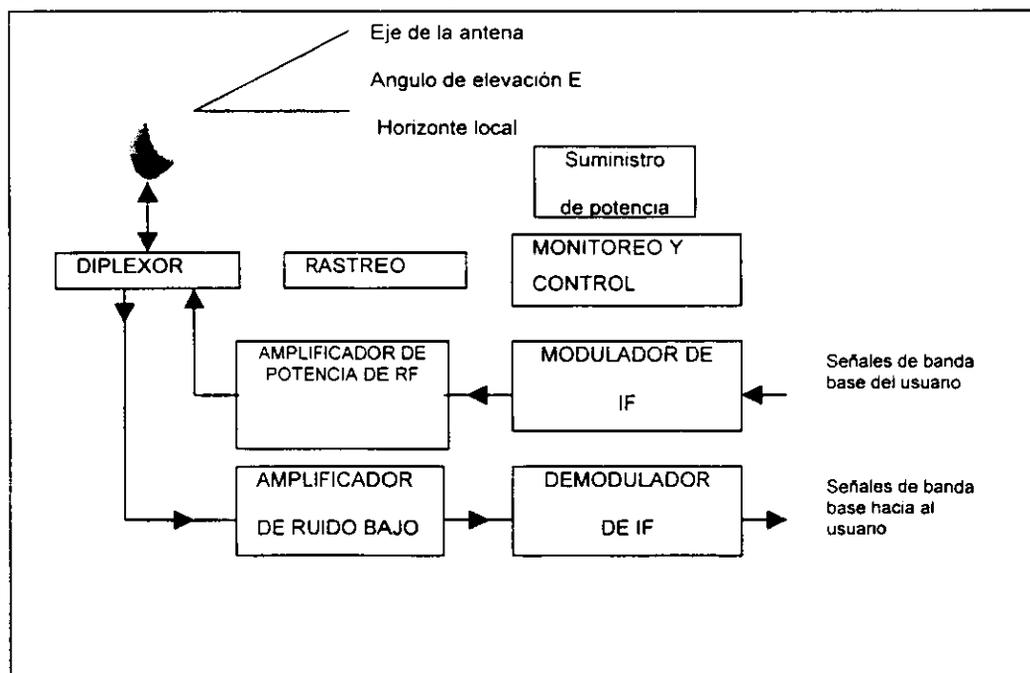


Figura 3.2. Arquitectura de una estación terrena

La figura 3.2 muestra la arquitectura típica de una estación terrestre para transmisión y recepción. Las más grandes están equipadas con antenas de 30 m de diámetro (Estándar A de la red INTELSAT). Las más pequeñas tienen antenas de 0.6 m (estaciones receptoras de TV directa). Algunas estaciones son tanto transmisores como receptores, otras son sólo receptores.

Tipos de órbitas

La órbita es la trayectoria seguida por el satélite definida por el equilibrio de dos fuerzas opuestas. Estas son la fuerza de atracción gravitacional, debida a la masa de la Tierra y la fuerza centrífuga asociada con la curvatura de la trayectoria del satélite como se muestra en la figura 3.3. La trayectoria está contenida en un plano elíptico con extensión máxima en el apogeo y mínima en el perigeo. El satélite se mueve más lentamente en su trayectoria conforme la distancia a la Tierra aumenta.

Las órbitas más favorables son las siguientes:

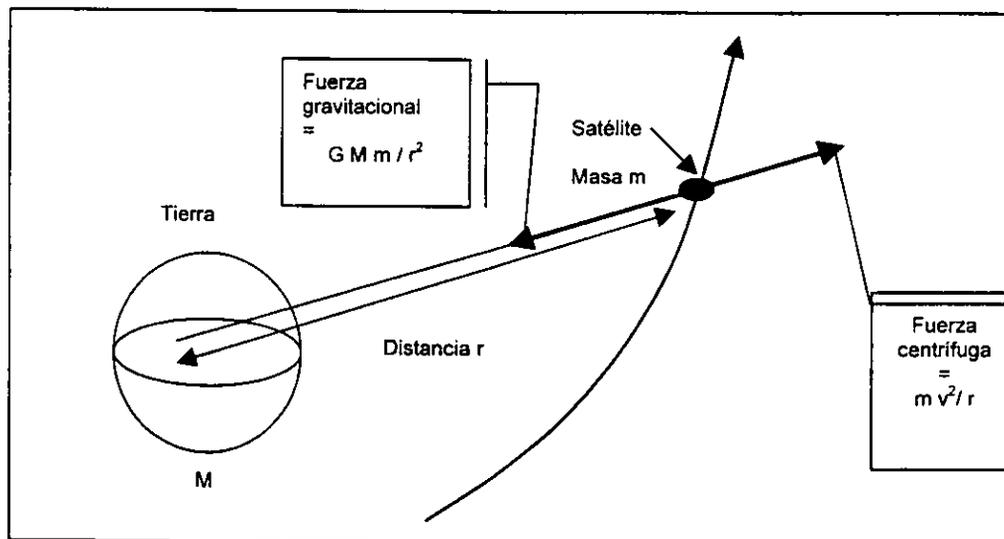


Figura 3.3. Fuerzas que determinan la trayectoria de un satélite

- **Órbitas elípticas inclinadas con un ángulo de 64° respecto al plano del Ecuador.** Este tipo de órbita es particularmente estable con respecto a las irregularidades del potencial gravitacional terrestre, debido a esta inclinación, el satélite cubre regiones de alta latitud en una fracción grande del periodo orbital cuando pasa por el apogeo.

- **Órbitas circulares inclinadas.** La altitud del satélite es constante e igual a varios cientos de kilómetros. El periodo es del orden de una hora y media. Con una inclinación de cerca de 90° , este tipo de órbitas garantiza que el satélite pasará por toda región de la Tierra. Esta es la razón por la que se escoge este tipo de órbita para los satélites de observación. Varios sistemas con cobertura mundial utilizarán constelaciones de satélites en órbitas circulares bajas, del orden de 1000 km.
- **Órbitas circulares con inclinación cero (Órbitas ecuatoriales).** La más popular de las órbitas de los satélites geostacionarios; el satélite órbita alrededor de la Tierra con una altitud de 35786 km y en la misma dirección que la tierra. Su periodo es igual al periodo de rotación de la Tierra y en la misma dirección, por lo que el satélite aparece como un punto fijo en el cielo y asegura su operación continua como repetidor de radio en tiempo real para el área de visibilidad del satélite (43% de la superficie terrestre).

La elección de la órbita depende de la naturaleza de la misión, la interferencia aceptable y el desempeño de los lanzadores.

- **La extensión y latitud del área a ser cubierta;** contrario a la opinión generalizada, la altitud del satélite no es un factor determinante en el presupuesto del enlace para una cierta área a cubrir. La atenuación por propagación varía con el inverso del cuadrado de la distancia y esto favorece a un satélite con una órbita baja debido a su altitud; pero no se toma en cuenta el hecho de que el área cubierta se observa a través de un ángulo sólido más grande, lo que resulta en una reducción en la ganancia de la antena del satélite que contrarresta la ganancia obtenida por la distancia. Un satélite de órbita baja provee una cobertura limitada en un cierto tiempo y un tiempo de acceso limitado en un lugar determinado. A menos que se utilicen antenas de ganancia muy baja, que tengan baja directividad y por lo tanto radiación omnidireccional, las estaciones terrestres deberán estar equipadas con dispositivos de rastreo, lo cual incrementa el costo. Es por esto que los satélites geostacionarios resultan particularmente efectivos para la cobertura continua de áreas extensas.
- **El ángulo de elevación de las estaciones terrestres;** un satélite en una órbita inclinada o elíptica polar puede tomar una posición en algunas ocasiones que le permite establecer comunicación con áreas urbanas sin encontrar obstáculos como los edificios muy altos que interfieren entre los 0° y los 70° . Con un satélite geostacionario, el ángulo de elevación se decrecienta conforme la diferencia en la latitud o longitud entre la estación terrestre y el satélite se incrementa.

- **La duración de la transmisión y el retraso:** un satélite geostacionario provee un repetidor continuo para las estaciones dentro de su cobertura, pero el tiempo de propagación de las ondas entre una estación y otra es del orden de los 0.25s. Por lo que se requiere la utilización de dispositivos de control de eco en transmisiones telefónicas o protocolos especiales para la transmisión de datos. Un satélite de órbita baja produce un tiempo de propagación reducido. El tiempo de transmisión es menor entre las estaciones cercanas y mutuamente visibles por el satélite, pero puede ser muy largo para las estaciones distantes.
- **Interferencia:** los satélites geostacionarios ocupan una posición fija en el cielo con respecto a las estaciones con las que se comunican. La protección contra la interferencia entre los sistemas se logra planeando las bandas de frecuencia y las posiciones orbitales. Un espacio orbital pequeño entre satélites adyacentes que operan en las mismas frecuencias origina un incremento en el nivel de interferencia y esto impide la instalación de nuevos satélites. Los diferentes sistemas pueden utilizar frecuencias diferentes pero su uso está restringido por el número de frecuencias asignado para la radiocomunicación espacial por las normas de radiocomunicación internacionales. En el caso de satélites que orbitan, la geometría de cada sistema cambia con el tiempo y las geometrías relativas de un sistema respecto de otro son variables y difíciles de sincronizar. Por lo que la probabilidad de interferencia es mayor.

Progreso tecnológico

El inicio del satélite de telecomunicaciones comercial se remonta a la concesión del INTELSAT I en 1965. Hasta el inicio de los 70s los servicios proveídos eran la transmisión de señales de teléfono y televisión entre continentes. El satélite se diseñó para complementar el cable submarino y actuar como un troncal telefónico. La necesidad de mayor capacidad ha ocasionado la instalación de satélites de haz múltiples y la reutilización de frecuencias primero por polarización ortogonal y después por separación espacial. Las técnicas de transmisión eran analógicas y cada transporte contenía señales de TV o canales telefónicos utilizando FDM. El acceso múltiple al satélite se resolvió utilizando FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia). La demanda creciente de un gran número de enlaces de baja capacidad se resolvió utilizando FDMA con SCPC/FM (canal único por modulación de transporte/frecuencia) o PSK, posteriormente TDMA/PSK (Acceso Múltiple por División de Tiempo) para obtener provecho de las técnicas digitales. De forma simultánea, el progreso en la tecnología de antenas permitió que el haz

múltiple se ajustara al área de cobertura. de esta forma el desempeño del enlace se mejoró al reducir la interferencia entre sistemas. La figura 3.4 muestra los desarrollos tecnológicos desde el inicio de la era de los satélites de telecomunicaciones.

Tecnología	Técnicas				Servicios
	FDMA/FM SCPC/FM	Reuso de frecuencia	TDMA/PSK CDMA/PSK	Procesamiento a bordo	
			Comutación a bordo	ISL	
Haz con capacidad de rastreo 30/20 Ghz ISL óptico				Red global	Comunicaciones de banda ancha ATM, conmutación de paquetes, TCP/IP
Matriz de conmutación					Servicios de conexión móvil
14/12 Mhz					Difusión directa
Formación de haz					Telefonía doméstica y regional, TV y datos
Polarización dual	INTELSAT I, II, III	Haz múltiple y áreas de cobertura múltiples	Comutación en el transpondedor	ACTS, ITALSAT	Servicios móviles marítimos
6 / 4 Ghz		INMARSAT			Troncales de TV y teléfono
Monopolarización	Haz global				
	1965	Pasado	Presente	Futuro	Incremento en la capacidad del satélite, decremento en el tamaño de la estación terrena

Figura 3.4. Evolución de las técnicas de comunicación satelital

El futuro traerá un rápido desarrollo en las siguientes áreas:

- Procesamiento a bordo, aprovechamiento de la posibilidad de equipar a los satélites con demoduladores a bordo.
- Enlaces intersatelitales
- Haz dirigible
- La utilización de frecuencias más altas (30/20 Ghz y 50/40 Ghz) a pesar de los problemas de atenuación causados por la lluvia.

El desarrollo de servicios

Un sistema de telecomunicaciones satelital tiene tres propiedades que no se encuentran en las redes terrestres:

- La posibilidad de transmisión por difusión
- Una ancho de banda amplio

- Instalación rápida y facilidad de reconfiguración

Inicialmente un sistema satelital estaba constituido por un pequeño número de estaciones terrestres. Con el tiempo, el número de estaciones terrestres ha aumentado debido a una reducción en su tamaño y una mejor dispersión geográfica. Las estaciones se han acercado al usuario, en algunos casos sólo se utilizan para recepción. El potencial de los servicios ofrecidos por los satélites de telecomunicaciones se ha diversificado. Existen tres clases de servicio que se pueden distinguir:

- Troncales telefónicos, y transmisión de TV, esta es una continuación del servicio original.
- Sistemas de telefonía y datos para grupos de usuarios.
- Sistemas de terminales de apertura muy pequeña, transmisión de datos de baja capacidad, televisión o sonido digital directo al usuario.

Análisis del enlace

El enlace básico de RF

Iniciando con la radiación isotrópica de una potencia P_T en ondas esféricas concéntricas y definiendo la ganancia G_T como la relación de la potencia de la señal en una dirección dada entre la que sería radiada isotrópicamente, podemos escribir la potencia de la señal C (portadora) interceptada por un receptor a una distancia R , teniendo una antena con apertura efectiva A_{eff} , como:

$$C = \frac{P_T}{4\pi R^2} G_T A_{eff} \dots\dots\dots(3.1)$$

Ya que

densidad de flujo x apertura efectiva = nivel de portadora

Por lo que, los parámetros que afectan a la potencia recibida real en cualquier enlace son: la potencia del transmisor, la ganancia de la antena de transmisión, la distancia entre el transmisor y el receptor y el tamaño (efectivo) de la antena receptora, un término útil es la "fórmula universal de la antena" (Jasik 1961)

$$A_{eff} = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \dots\dots\dots(3.2)$$

Donde G es la ganancia de la antena y $\lambda=c/f$; c es la velocidad de la luz = 3×10^8 m/s y f es la frecuencia de la onda electromagnética.

Entonces

$$C = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \left(\frac{G_R \lambda^2}{4\pi} \right) \dots \dots \dots (3.3)$$

La potencia requerida para la transmisión de información puede ser determinada en base a una relación portadora a ruido (C/N) por arriba del ruido total existente. El valor de (C/N) depende de la tasa de transmisión de información requerida, la relación señal a ruido requerida (para las señales analógicas) o la tasa de bit en error (para las señales digitales), el sistema de modulación y el ancho de banda asociado.

El ruido térmico disponible se puede escribir como:

$$N = kT_s B \dots \dots \dots (3.4)$$

En donde T_s , se define como la temperatura total del sistema receptor que incluye los efectos de los ruidos térmicos, de los dispositivos, atmosférico y cósmico. Discutiremos todas las fuentes de ruido mencionadas más adelante. B es el ancho de banda determinado por el método de modulación y la tasa de transmisión de datos. La potencia requerida de la portadora es:

$$C = \frac{C}{N} N = \frac{C}{N} kT_s B$$

Por lo que podemos escribir

$$\frac{C}{N} = \frac{P_T G_T}{(4\pi R \lambda)^2} \left(\frac{G_R}{T_s} \right) \frac{1}{kB} \dots \dots \dots (3.5)$$

Los siguientes factores en esta ecuación se definen convencionalmente como:

$$P_T G_T = EIRP \quad (\text{Equivalente isotrópico de la potencia radiada})$$

$$\left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 = L_s \quad (\text{Pérdida en el espacio libre})$$

Donde λ es la longitud de onda de la señal.

La pérdida en el espacio libre es un término tradicional definido que permite realizar los cálculos del enlace de RF en términos de las ganancias de ambas antenas. La relación por medio de la que la densidad de radiación electromagnética disminuye con la distancia, llamada pérdida por esparcimiento, es el inverso de la relación $1/4\pi R^2$ y no depende de la longitud de onda.

Reescribiendo la ecuación (3.5) utilizando estos términos, obtenemos

$$\left(\frac{C}{N}\right) = \frac{EIRP}{L_s} \left(\frac{G_R}{T_s}\right) \frac{1}{kB}$$

Por lo que el desempeño del receptor, determinado por (C/N) , está caracterizado por el factor (G_R/T_s) , un factor (llamado G/T) que es ampliamente mencionado para los sistemas de recepción vía satélite. Como muchas relaciones se expresa en decibeles, utilizando la unidad dB/K, decibel por Kelvin. Pero debe ser entendida como dB con respecto a una referencia de 1 K.

La ecuación (3.5) puede ser reexpresada en una forma más general, independiente del ancho de banda, como

$$\boxed{\left(\frac{C}{N_0}\right) = \frac{EIRP}{L_s} \left(\frac{G}{T}\right) \frac{1}{k} \dots\dots\dots(3.6)}$$

Esta es la relación fundamental para el desempeño de un enlace de RF y será utilizada en los desarrollos siguientes.

Limitaciones en el desempeño del enlace. Caso Satelital

Este análisis se aplica directamente al caso del enlace de bajada de un sistema satélite-tierra en donde la ganancia de la antena transmisora se fija en base a los parámetros del ancho de haz y por los requerimientos de cobertura terrestre y donde la antena receptora se considera tan grande como sea posible. Iniciaremos con la ecuación (3.5), utilizando la relación ganancia universal de la antena - área y la relación con el ángulo sólido Ω , la distancia R , y el área S en una superficie esférica concéntrica.

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \text{ steradianes} \dots\dots\dots(3.7)$$

Por definición, $\Omega=4\pi$ para la esfera completa.

Si asumimos que la energía está concentrada en el haz principal, la ganancia G_T de la antena transmisora es inversamente proporcional al ángulo sólido del haz,

$$G_T = \frac{K_1}{\Omega} = \frac{K_1 R^2}{S} \dots\dots\dots(3.8)$$

Sustituyendo en la ecuación (3.5), tenemos:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{\eta K_1 A_R}{4\pi k T_s S} P_T \dots\dots\dots(3.9)$$

Para el enlace de bajada.

Nótese que el desempeño del enlace todavía depende de la potencia transmitida P_T y es inversamente proporcional a la temperatura del sistema T_s pero, asumiendo que el área S a ser cubierta está definida, el desempeño ya no depende de la longitud de onda o de la distancia. Ni la altura de la órbita del satélite ni la frecuencia de la portadora son importantes si sólo se consideran efectos de primer orden. Efectos como el desempeño de los dispositivos, las pérdidas por efectos atmosféricos y la interferencia con otros sistemas son factores significativos que afectan la elección de la frecuencia de la portadora. Nótese que es el tamaño físico de la antena es lo que importa y no su ganancia. El uso de G/T como figura de mérito, a pesar de ser conveniente, sólo permite comparar sistemas receptores diferentes operando a la misma frecuencia.

La ecuación (3.9) es aún más interesante cuando se aplica al enlace de bajada bajo la restricción de que la cobertura de la antena del satélite, ahora para la recepción, es especificada.

$$G_R = \frac{K_1}{\Omega} = \frac{K_1 R^2}{S} \quad \text{y} \quad G_T = \frac{\eta 4\pi A_T}{\lambda^2}$$

sustituyendo en la ecuación (3.5), llegamos a

$$\frac{C}{N_0} = \frac{\eta K_1 A_T}{4\pi k T_s S} P_T \dots \dots \dots (3.10)$$

Para el enlace de subida.

Esta ecuación es idéntica a la expresión previa del enlace de bajada excepto que el área de la antena que está involucrada es la de la antena transmisora. La potencia del transmisor P_T ahora se refiere al de la estación terrena y la temperatura del sistema T_s es la del receptor del satélite, pero el tamaño de la antena involucrado es el de la antena de la estación terrena, como en el caso del enlace de bajada.

En otras palabras, el desempeño de cualquier sistema satelital de comunicaciones en donde exista una cobertura terrestre fija depende del tamaño de la antena de las estaciones terrenas para los dos enlaces.

Enlaces satelitales

General

Es conveniente escribir la ecuación (3.6) en decibeles tomando logaritmos en ambos lados y multiplicando por 10. Entonces

$$\left[\begin{matrix} C \\ N_0 \end{matrix} \right] = [EIRP] - [L_s] + \left[\begin{matrix} G_R \\ T_s \end{matrix} \right] - [k] \dots \dots \dots (3.11)$$

Los corchetes nos recuerdan que se utilizará la forma en decibeles del factor.

Esta ecuación es correcta tanto para el enlace de bajada como el de subida, con la precaución de utilizar los valores de operación de G / T y de $EIRP$ en cada caso. Las unidades son importantes y deben de ser consistentes.

- $[C N_0]$ en dBHz
- $[EIRP]$ en dBW
- $[L_s]$ en dB
- $[G T]$ en dB. K

$$[k] = -228.6 \text{ dBJ K (ya que } k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K)}$$

$$[B] \text{ en dBHz}$$

Enlace de subida

El enlace de subida se analiza introduciendo un parámetro intermedio, Ψ , a la densidad de flujo requerida para producir la salida máxima o saturada del transpondedor, P_T , para una portadora única. Este es un parámetro satelital y su uso separa convenientemente el nivel requerido en el satélite del resto del enlace. El valor ϕ de la densidad de flujo recibida se encuentra mediante

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{EIRP(\text{estación terrena})}{4\pi R^2} \\ &= \frac{EIRP}{L_s} \frac{4\pi}{\lambda^2} \dots \dots \dots (3.12) \end{aligned}$$

En decibeles,

$$[\phi] = [EIRP] - [L_s] + \left[\frac{4\pi}{\lambda^2} \right] \text{ dBW} \cdot \text{m}^2 \dots \dots \dots (3.13)$$

Si $\phi = \Psi$, esta ecuación puede ser utilizada para calcular el valor del $EIRP$ requerido en la estación terrena para proveer un valor específico de densidad de flujo saturada Ψ en el satélite. Utilizando la ecuación (3.11) tenemos

$$\left[\frac{C}{N_0} \right]_t = [\phi] - \left[\frac{4\pi}{\lambda^2} \right] + \left[\frac{G}{T} \right]_u - [k] \dots \dots \dots (3.14)$$

Enlace de bajada

Para el enlace de bajada tenemos directamente.

$$\left[\frac{C}{N_0} \right]_D = [EIRP]_D - [L_s]_D + \left[\frac{G}{T_s} \right]_D - [k] \dots \dots \dots (3.15)$$

Desempeño compuesto

El desempeño total de la conexión satelital depende del desempeño del enlace de subida y del enlace de bajada, de los efectos no lineales del transpondedor y de la interferencia. Un esquema de ruido total se muestra en la figura 3.5

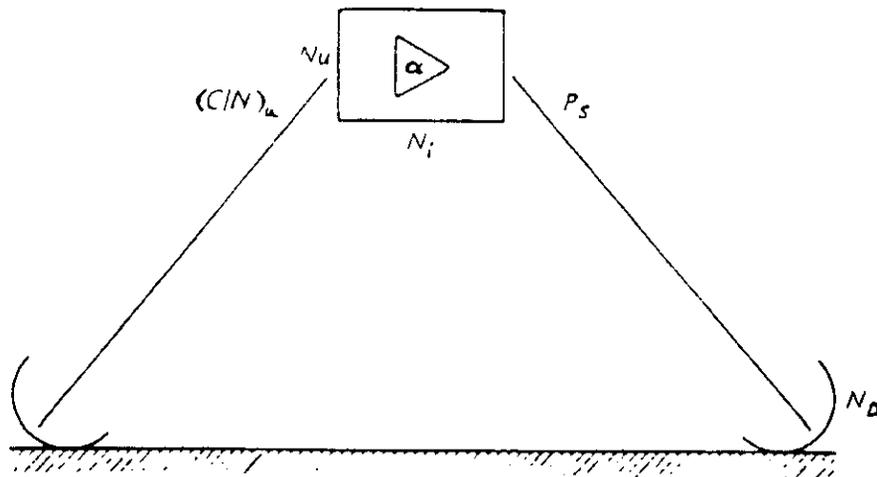


Figura 3.5. Esquema de Ruido Total

T = razón de transmisión del enlace de bajada, $T < 1$

α = amplificación del transponder, $\alpha > 1$

N_T = ruido total en el receptor de bajada

N_u = Ruido de subida en el receptor del satélite

N_D = Ruido de bajada en la estación terrena

N_i = Ruido de intermodulación generado en el transponder

P_s = Potencia del transmisor del satélite

Las no linealidades en el amplificador de alta potencia generan productos de intermodulación que son tratados como ruido. Podemos hacer una aproximación de este ruido agregando su potencia a la del ruido térmico. Posteriormente asumimos que la potencia transmitida P_s es la potencia amplificada recibida y que no hay reducción ocasionada por el transpondedor al retransmitir.

Nótese que el ruido de subida y cualquier señal de interferencia, son amplificadas por el transpondedor porque forman parte de la señal de subida. La interferencia en la bajada debida a satélites adyacentes se agregaría al ruido térmico en el receptor de la estación terrena. Considerando los casos de intermodulación y ruido térmico N_i , podemos escribir

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T = \frac{TP_s}{N_D + \alpha TN_L + N_i T}$$

donde

$$\left(\frac{C}{N}\right)_D = \frac{TP_s}{N_D} \quad \left(\frac{C}{N}\right)_L = \frac{P_s \alpha}{N_L}$$

y

$$\left(\frac{C}{N}\right)_i = \frac{P_s}{N_i}$$

lo que podemos escribir como

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T^{-1} = \left(\frac{C}{N}\right)_D^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_L^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_i^{-1} \dots\dots\dots(3.16)$$

De acuerdo al resultado anterior se puede generalizar que una señal de interferencia I en el enlace de subida o de bajada puede ser considerada utilizando

$$\left(\frac{C}{N}\right)_T^{-1} = \left(\frac{C}{N}\right)_D^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_L^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_i^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)^{-1} \dots\dots\dots(3.17)$$

Términos similares pueden agregarse para considerar la interferencia intersatelital y otros tipos de interferencia.

La forma de la ecuación es el resultado de considerar todos estos efectos como aditivos.

Temperatura del ruido

General

El cálculo del desempeño del enlace de RF se realiza en términos de una temperatura de ruido equivalente del sistema T_s . Esta temperatura es a la cual una resistencia a la entrada de un receptor libre de ruido con la misma ganancia que el receptor real, debería de ser calentada para producir un nivel de ruido a la salida del receptor equivalente al que se observa en el sistema real. La temperatura de ruido es una medida compuesta del desempeño del receptor del sistema y comprende el ruido térmico del

enlace, el ruido de radio de la atmósfera y el espacio exterior, y el ruido producido por los dispositivos del sistema. Esta temperatura es utilizada en la figura de mérito final (G / T_s).

Los puntos individuales del sistema se caracterizan por una temperatura de ruido T_N . Esta temperatura es la de un resistor pasivo que produce una potencia de ruido por unidad de ancho de banda igual a la potencia existente en el punto en cuestión a una frecuencia específica. La temperatura de la antena T_a es la temperatura de un resistor que tiene la misma potencia de ruido a la salida que la que se mide en las terminales de la antena. Depende del patrón de radiación, de la temperatura física de los alrededores con los que la antena intercambia energía y del ruido recibido del espacio. Esta cambia con el ángulo de elevación, la pérdida por lluvia y la hora del día.

Otro concepto que facilita el cálculo de T_s dadas las características de las etapas individuales. Las etapas individuales se caracterizan por una temperatura de exceso T_e . Esta temperatura conocida también como temperatura de ruido a la entrada efectiva o equivalente, es la diferencia entre la temperatura del sistema T_s y la temperatura de ruido T_N a la salida de la etapa, donde T_s se observa con respecto a la salida de la etapa.

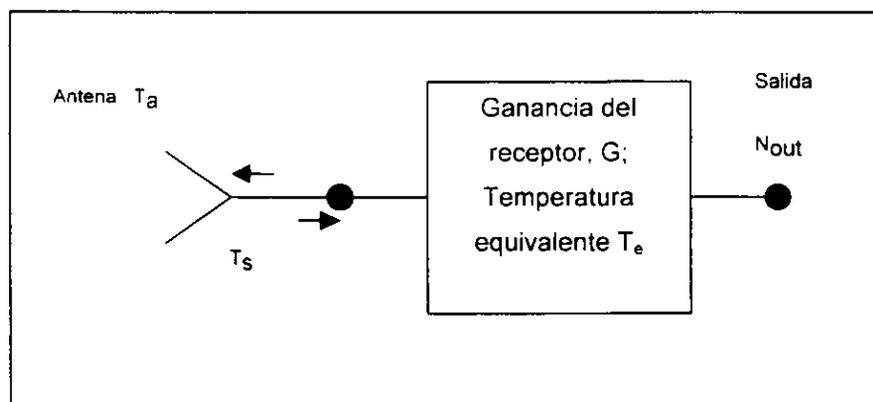


Figura 3.6. Sistema de recepción básico

En la figura 3.6 se muestra un sistema de recepción elemental que consta de una antena y un receptor.

Por definición,

$$N_{out} = kGT_sB \dots \dots \dots (3.18)$$

y

$$T_s = T_a + T_e \dots \dots \dots (3.19)$$

Para dos redes en serie (figura 3.7) con temperaturas de exceso T_{e1} y T_{e2} , su temperatura de ruido compuesta T_e está dada por:

$$T_e = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} \dots\dots\dots(3.20)$$

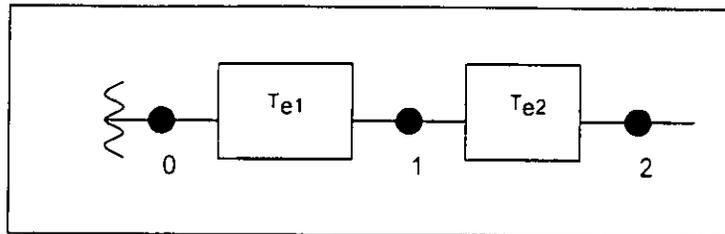


Figura 3.7. Dos redes en tandem

En el caso de un atenuador acoplado puramente resistivo a una temperatura T cuando se conecta a una entrada a una temperatura T_0 su temperatura de exceso puede ser calculada como

$$T_E = T(L - 1) \dots\dots\dots(3.21)$$

Y su temperatura de ruido correspondiente es

$$T_N = \frac{T_0 + (L - 1)T}{L} \dots\dots\dots(3.22)$$

Donde L es la pérdida en el atenuador, definida como el inverso de su ganancia.

Figura de ruido

El concepto clásico de figura de ruido (o factor de ruido) se basa en la idea de que el deterioro de la razón señal a ruido a través de un dispositivo era una medida de su nivel de ruido. Por lo tanto:

$$\frac{C_{in}}{N_{in}} = F \frac{C_{out}}{N_{out}} \dots\dots\dots(3.23)$$

Donde F es la figura de ruido.

Si los niveles de la entrada y la salida de la portadora están relacionados por la ganancia de potencia disponible G y si el nivel de ruido a la entrada es $kT_{in}B$, entonces:

$$N_{out} = FGkT_{in}B \dots\dots\dots(3.24)$$

Esto se puede escribir como:

$$N_{out} = (F - 1)GkT_{in}B + GkT_{in}B \dots\dots\dots(3.25)$$

El segundo término se puede identificar como el ruido incrementado por la ganancia del dispositivo y el primer término como un ruido de exceso generado por el dispositivo. Un defecto en la definición es la dependencia de F en el nivel de entrada del ruido. Si ese nivel se incrementa, el deterioro en C/N parecerá ser menor.

Para evitar que la figura de ruido se defina de tal modo que su valor sea función de la temperatura de entrada, el IEEE ha estandarizado la definición de tal forma que T siempre se toma a una temperatura de entrada de $T_0=290$ K. Nótese que esta temperatura de entrada es sólo para la definición estándar y con fines de medición. Si la temperatura de operación de entrada, usualmente T_e en un problema de satélites, es diferente de T_0 , el ruido de salida se convierte en:

$$N_{out} = GkT_e B + (F - 1)GkT_0 B \dots \dots \dots (3.26)$$

De la definición de la temperatura del sistema en términos de N_{out} , podemos igualar los dos valores de ruido de salida y escribir:

$$\begin{aligned} kGT_s B &= GkT_e B + (F - 1)GkT_0 B \\ T_s &= T_e + (F - 1)T_0, \quad T_0 = 290K \dots \dots \dots (3.27) \end{aligned}$$

Y de la definición de temperatura de exceso T_e :

$$T_e = (F - 1)T_0 \quad T_0 = 290K \dots \dots \dots (3.28)$$

La ecuación anterior es útil para cambiar la caracterización de un dispositivo de su figura de ruido a una temperatura de exceso equivalente.

Utilizando las ecuaciones 3.18 y 3.28 podemos observar que la figura de ruido de dos redes en serie está dada por:

$$F_{12} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} \dots \dots \dots (3.29)$$

Temperaturas de antena

Temperatura compuesta de la antena

La antena recibe energía y radia energía al cielo, a la tierra y a veces al sol.

En principio, T_a , la temperatura de antena, debe ser evaluada utilizando una integración en todo el ángulo sólido de la antena (4π steradianes) entonces:

$$T_a = \int_{\Omega_1} G_1 T_{sky} d\Omega_1 + \int_{\Omega_2} G_2 [(1 - \rho^2) T_g + \rho^2 T_{sky}] d\Omega_2 \dots \dots \dots (3.30)$$

donde

G_1 = ganancia de la antena en las direcciones del cielo

G_2 = ganancia de la antena en las direcciones de la tierra

Ω_1 = región del ángulo sólido en las direcciones del cielo

Ω_2 = región del ángulo sólido en las direcciones de la tierra

T_0 = temperatura de lluvia o troposférica, normalmente 290 K

T_g = temperatura de tierra, normalmente 290 K

ρ = factor de reflexión de voltaje de la Tierra

Una aproximación para la temperatura de antena se puede encontrar utilizando:

$$T_a = a_1 T_{sky} + a_2 T_g + a_3 T_{sun} \dots \dots \dots (3.31)$$

donde :

$$a_1 = \Omega_{sky} 4\pi(1 - \rho^2)$$

$$a_2 = (\Omega_g 4\pi)(1 - \rho^2)$$

$$a_3 = p(\Omega_s 4\pi)(G_s L_R)$$

p = factor de polarización

Ω_{sky} y Ω_g son los ángulos sólidos totales del patrón de la antena que interceptan el cielo y la tierra respectivamente. El término en a_3 se aplica sólo cuando el sol está en la vista de la antena, ya sea en el lóbulo principal o lateral. Se asume que el ancho de haz de la antena es mucho mayor que Ω_s , el ángulo sólido ocupado por el sol. G_s es la ganancia de la antena en la dirección del sol. Si el ancho de haz de la estación terrena es comparable al del sol (2° aproximadamente), el incremento en el nivel de ruido puede ser tolerable. Con un ancho de haz de alrededor de 2° en la banda K, el incremento del ruido solar en clima despejado causaría el mismo deterioro que la pérdida por lluvia.

Temperatura con cielo limpio

La temperatura del cielo, T_{sky} , se encuentra a partir de T' , la temperatura en cielo limpio debida al ruido galáctico, el historial de microondas y las pérdidas por vapores de O_2 y H_2O de acuerdo con las curvas de las figuras 3.8 y 3.9. Si tenemos una pérdida por lluvia L_R , la temperatura del cielo se calcula de T' utilizando la ecuación 3.22. Por lo tanto

$$T_{\text{sky}} = \frac{T' - (L_R - 1)T_0}{L_R} \quad T_0 = 290K \dots \dots \dots (3.32)$$

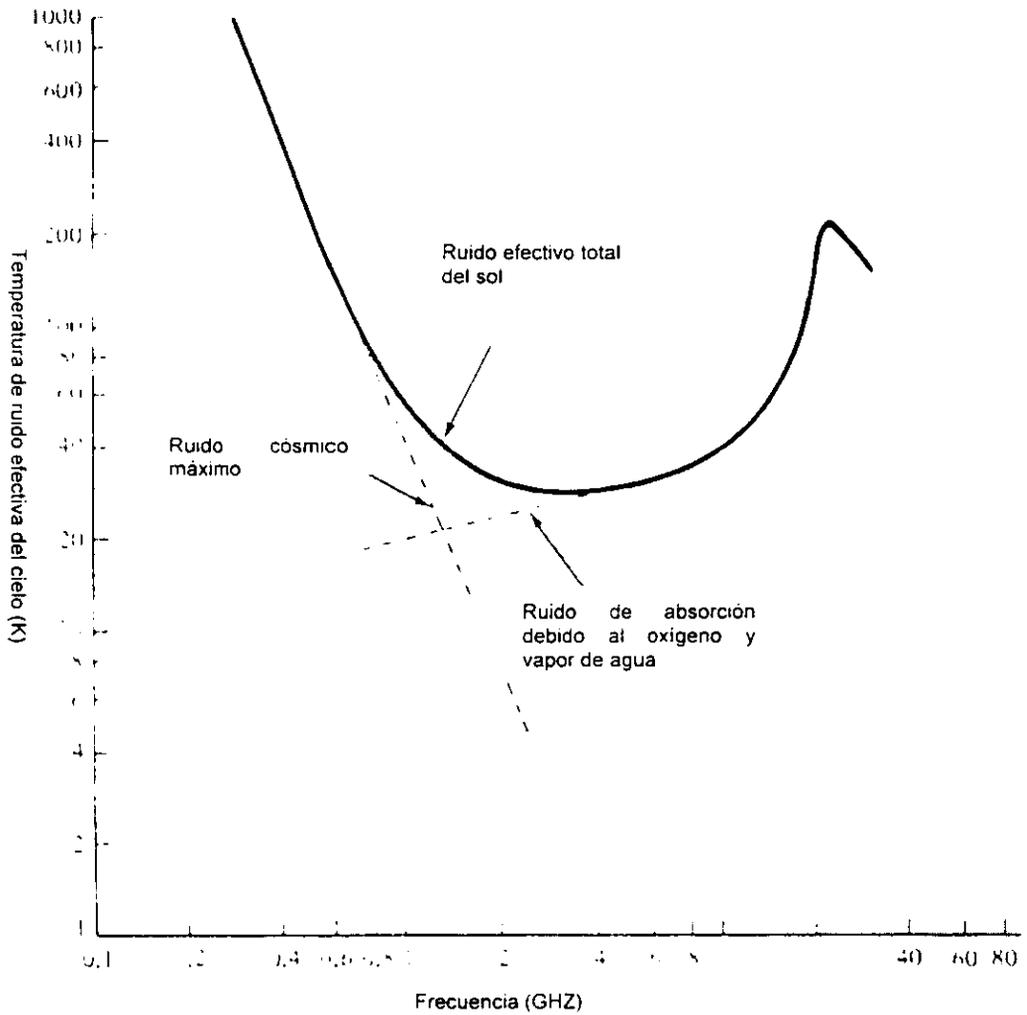


Figura 3.8 Temperatura del cielo a un ángulo de elevación de 5°

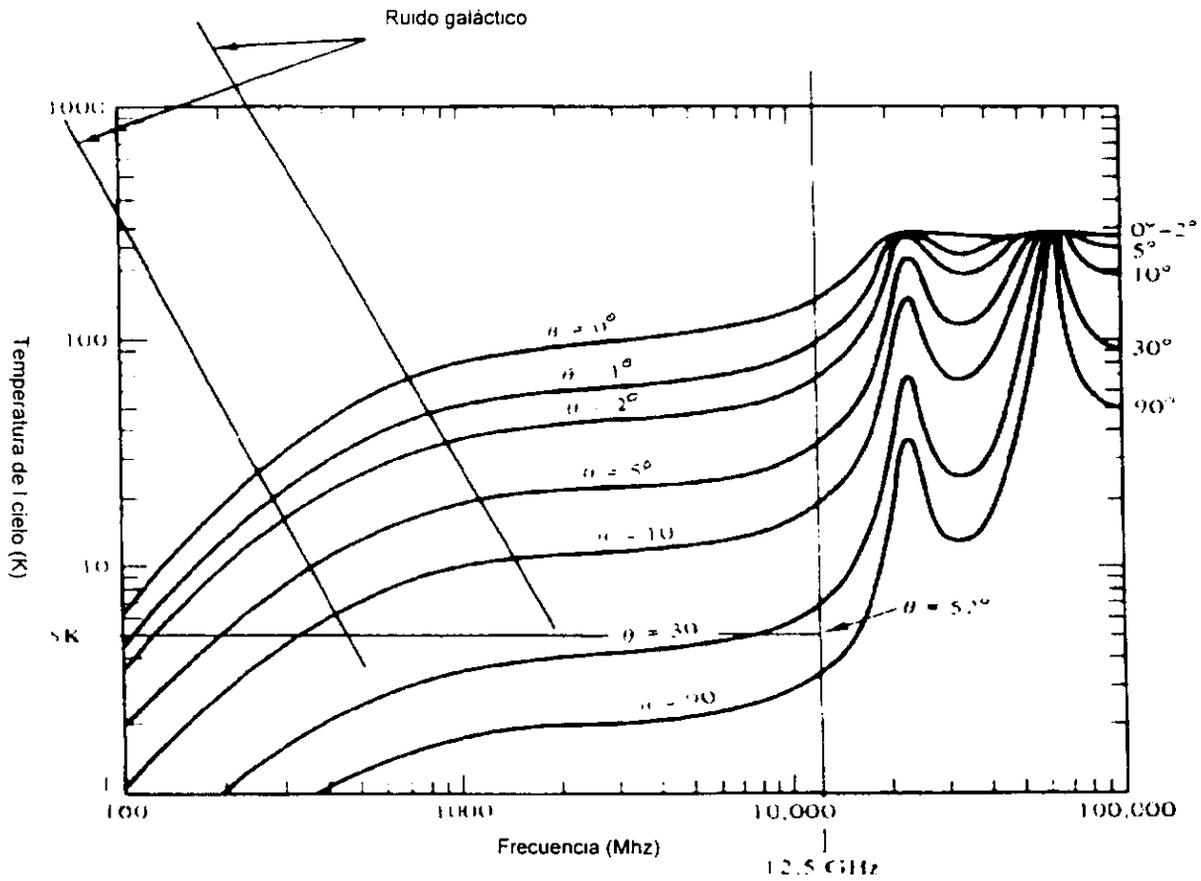


Figura 3.9. Temperatura del cielo calculada para varios ángulos de elevación

Temperatura del sol

La temperatura del sol T_{sun} se puede encontrar utilizando las curvas de densidad de ruido recibida de la totalidad del sol por una sección de la antena mediante la siguiente ecuación. Figura 3.10

$$N_{s1} = kT_{sun} \dots \dots \dots (3.33)$$

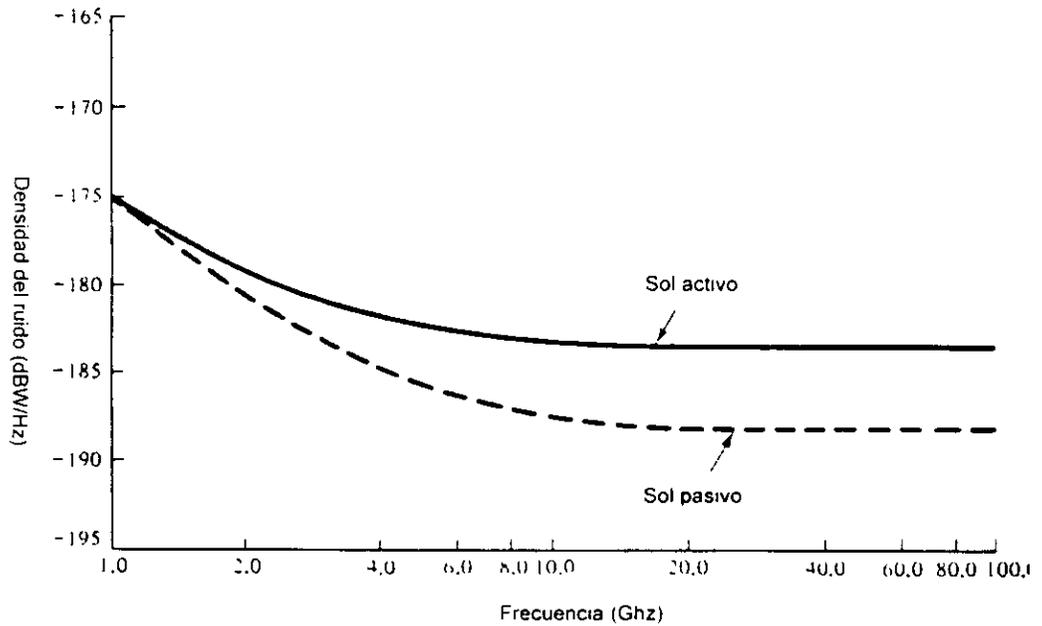


Figura 3 10 Valor del ruido del sol activo y pasivo. El sol comprende el haz completo de la antena

Temperatura total del sistema

La figura 3.11 muestra una cadena receptora de microondas típica, que puede ser la del satélite o la de la estación terrena. Si T_0 es la temperatura ambiente de la pérdida L , es la temperatura de la antena T_a , T_R es la temperatura efectiva del receptor y F es la figura de ruido del convertidor de bajada, entonces

$$T_1 = (L - 1)T_0 \quad T_2 = T_R \quad T_3 = (F - 1)T_0 \dots \dots \dots (3.34)$$

La temperatura del sistema es

$$T_s = T_a + (L - 1)T_0 + LT_R + L(F - 1) \frac{T_0}{G_R} \dots \dots \dots (3.35)$$

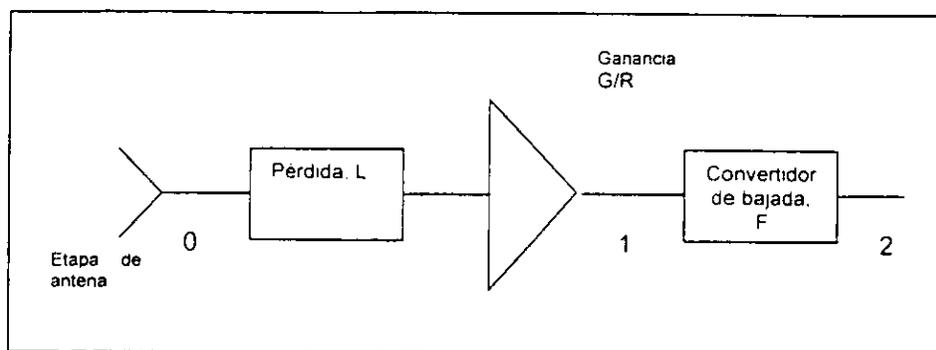


Figura 3 11 Cadena típica de recepción de microondas

Aquí la temperatura del sistema se toma de las terminales de la antena. A veces esta se especifica en las terminales de entrada del receptor, en cuyo caso se elimina L .

Factores de propagación

La transmisión de la señal de un satélite a través de la ionósfera y la atmósfera esta sujeta a una serie de efectos cuya importancia depende de la frecuencia de la portadora, el ángulo de elevación, el estado de la atmósfera y la ionósfera y la actividad solar. La atenuación por lluvia es, tal vez, el fenómeno más importante, sin embargo existen otros efectos que se deben mencionar:

1. *Absorción gaseosa atmosférica.* La absorción debida al oxígeno, el vapor de agua y otros gases atmosféricos, es inevitable. Su magnitud es pequeña hasta que llegamos a la región de los 30 GHz, a partir de aquí su valor puede ser considerable. El reporte 204-5 de la CCIR proporciona las curvas de la figura 3.12 para el espectro de microondas completo en dos condiciones de humedad. La escasez del espectro hace que el uso de estas ondas milimétricas sea inevitable y estas curvas son importantes.

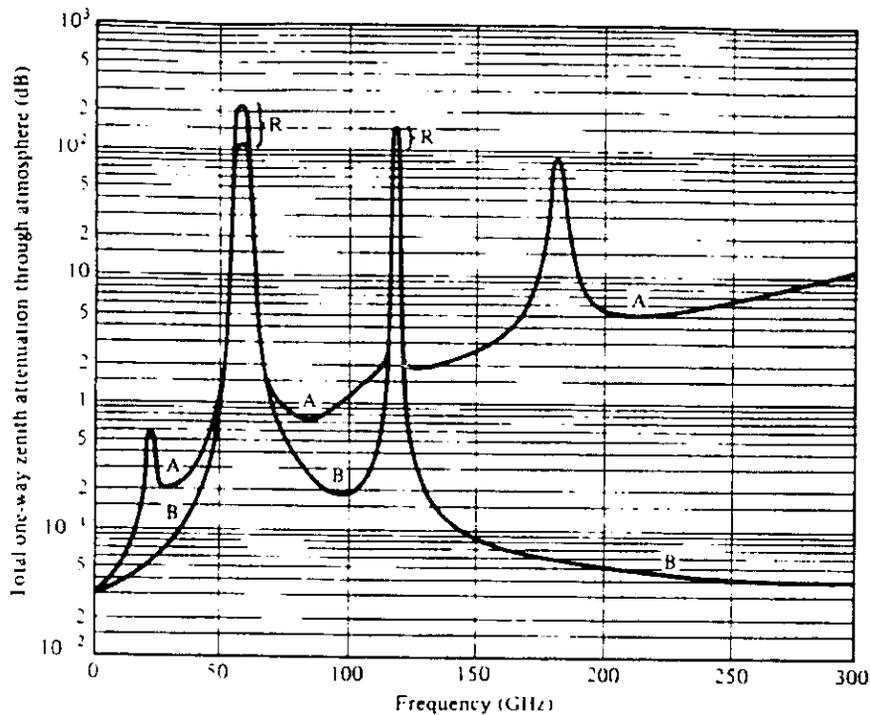


Figura 3 12 Atenuación total en una vía en el zenit, a través de la atmósfera, como función de la frecuencia

2. *Refracción ionosférica.* Debido a las variaciones en el índice de refracción en la ionósfera, especialmente a frecuencias por debajo de los 1000 MHz, pueden existir fluctuaciones de corta duración en amplitud y fase que necesitan un margen pequeño. Inclusive a frecuencias más altas, los ángulos de elevación menores a 10° pueden experimentar altos niveles de refracción. Los detalles cuantitativos se pueden encontrar en el reporte 263 de la CCIR.
3. *Rotación de Faraday.* Los electrones en la ionósfera y el campo magnético de la tierra causan una rotación del plano de polarización conocida como rotación de Faraday que puede llegar hasta 150° en la banda UHF. La rotación disminuye de forma inversa con el cuadrado de la frecuencia y es despreciable alrededor de los 10 GHz.
4. *Refracción atmosférica variable.* Las variaciones en el índice de refracción conforme varía la altitud, y las reflexiones de la tierra, o el mar pueden causar multicaminos en la atmósfera, especialmente en ángulos de elevación bajos y bajas frecuencias. Estos problemas son frecuentes en los sistemas de comunicación móvil.

5. *Despolarización por lluvia.* El efecto dominante de la lluvia es atenuar la señal y como su efecto es el de un atenuador con pérdidas, incrementa la temperatura del sistema. Además de estos efectos la lluvia tiene un efecto despolarizador el cual crea una componente cruzada con la polarización lineal y una pérdida en la circularidad con la polarización circular.

Modelo de atenuación por lluvia

El cálculo de la atenuación por lluvia se puede dividir en dos pasos. El primer paso es estimar la tasa puntual de la lluvia en milímetros por hora como una función de la probabilidad acumulada de ocurrencia. Esta probabilidad nos ayuda a determinar el grado de servicio que se deberá proveer y por lo tanto la atenuación por lluvia que será requerida como margen. El segundo paso es calcular la atenuación que resulta de dichas tasas de lluvia, dado el ángulo de elevación y las latitudes de las estaciones terrenas.

La primer parte del problema se resuelve utilizando los mapas de precipitación por región.

Numerosos estudios teóricos y prácticos han mostrado que la atenuación por lluvia A_R , puede ser modelada de forma adecuada con la expresión

$$\alpha = aR_p^b$$

$$A_R = \alpha L \dots \dots \dots (3.36)$$

Donde α es la atenuación específica (dB/km) y R_p es la tasa de punto de lluvia (mm/hr).

Frecuencia (Ghz)	A	b	a	B
1	0 0000387	0 0000352	0 912	0 880
2	0 000154	0 000138	0 963	0 923
4	0 000650	0 000591	1 121	1 075
6	0 00175	0 00155	1 308	1 265
7	0 00301	0 00265	1 332	1 312
8	0 00454	0 00395	1 327	1 310
10	0 0101	0 00887	1 276	1 264
12	0 0188	0 0168	1 217	1 200
15	0 0367	0 0335	1 154	1 128
20	0 0751	0 0691	1 099	1 065
25	0 124	0 113	1 061	1 030
30	0 187	0 167	1 021	1 000
35	0 263	0 233	0 979	0 963
40	0 350	0 310	0 939	0 929
45	0 442	0 393	0 903	0 897
50	0 536	0 479	0 863	0 868
60	0 707	0 642	0 826	0 824
70	0 851	0 784	0 793	0 793
80	0 975	0 906	0 769	0 769
90	1 06	0 999	0 753	0 754
100	1 12	1 06	0 743	0 744
120	1 18	1 13	0 731	0 732
150	1 31	1 27	0 710	0 711
200	1 45	1 42	0 689	0 690
300	1 36	1 35	0 688	0 689
400	1 32	1 31	0 683	0 684

Figura 3.13. Coeficientes de atenuación por lluvia.

Los valores para a y b se reproducen en la figura 3.13.

La mayoría de los modelos prácticos para la pérdida por lluvia se originan de la ecuación anterior.

Algunos valores de R_p se muestran en la figura 3.14.

Lugar	Camino de lluvia promedio Anual(cm)
San Diego, California	28.00
Santiago, Chile	35.8
Madrid	42.0
Paris	56.7
London	76.0
Seattle, Washington	85.0
Buenos Aires	95.4
New York	110.0
Rio de Janeiro	118.0
Jacksonville, Florida	148.0
San Juan, Puerto Rico	150.0
New Orleans, Louisiana	170.0
Ho Chi Mihn City	198.0
Manila	208.0
Singapore	240.0

Figura 3.14 Precipitación anual en algunas ciudades

Los coeficientes para una onda polarizada circularmente se pueden calcular con las siguientes ecuaciones:

$$a_c = \frac{(a_h + a_v)}{2} \dots\dots\dots(3.37)$$

$$b_c = \frac{a_h b_h + a_v b_v}{2a_c} \dots\dots\dots(3.38)$$

La atenuación de lluvia específica y la longitud geométrica del camino de lluvia pueden ser utilizadas para calcular una buena aproximación de la pérdida por lluvia en la mayoría de los casos.

L puede calcularse a partir de la siguiente gráfica 3.15 por medio de la siguiente ecuación

$$L_0 = \frac{H_0 - H_g}{\text{sen } \theta} \dots\dots\dots(3.39)$$

Donde H_0 es la altura de congelación, θ es el ángulo de elevación, H_g es la altitud de la estación terrena.

En términos de la latitud ϕ .

$$\begin{aligned}
 H_0 &= 7.8 - 0.1\phi & \phi &\geq 30^\circ \\
 H_0 &= 4.8\text{km} & \phi &< 30^\circ \dots\dots\dots(3.40)
 \end{aligned}$$

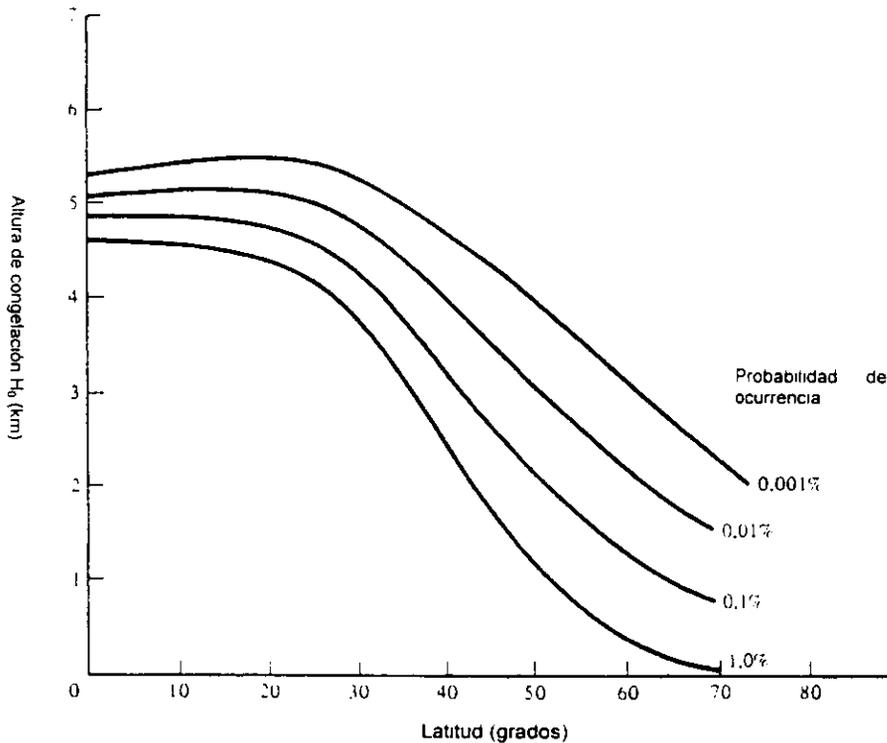


Figura 3.15. Dependencia de la lluvia con la latitud como una función de la probabilidad de ocurrencia

En 1979 se generó otra fórmula empírica para el cálculo de \$L\$

$$L = \frac{L_0}{1 + \frac{L_0(R - 6.2)}{2636}} \dots\dots\dots(3.41)$$

En la mayoría de los casos, especialmente en la banda K, este método resulta adecuado.

Transpondedores

Introducción

Un satélite de comunicaciones se puede considerar como un repetidor distante cuya función es recibir las portadoras a través del enlace de subida, procesarlas, y retransmitir la información a través del enlace de bajada. Los satélites de comunicaciones modernos contienen repetidores multicanal formados por

diversos componentes, incluyendo filtros, amplificadores, convertidores de frecuencia, conmutadores, multiplexores, etc.

Función del Transpondedor

La figura 3.16 muestra un diagrama de bloques generalizado de un repetidor multicanal tal y como se implementa en los satélites. El camino de cada canal de la antena receptora a la antena transmisora se denomina *transpondedor*. Las funciones básicas de cada transpondedor son: la amplificación de la señal, el aislamiento de los canales de RF vecinos y la conversión de la frecuencia.

La Figura 3.17 resume las bandas de frecuencia usadas comúnmente para la comunicación vía satélite. En forma general, mientras más alta es la frecuencia, es mayor la susceptibilidad a la atenuación por lluvia y más elevado el costo del equipo necesario.

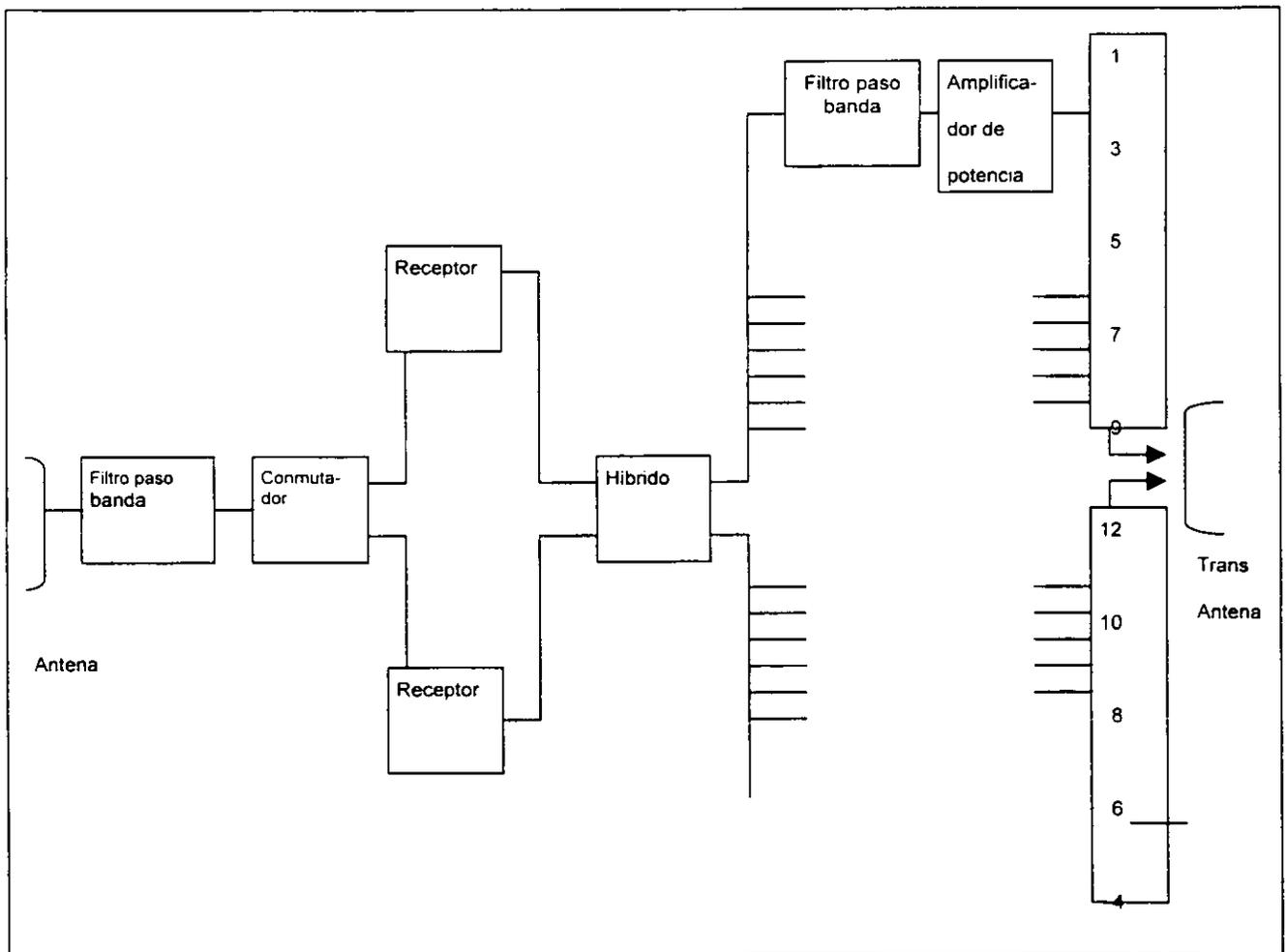


Figura 3.16. Repetidor Multitranspondedor.

Uso	Frecuencia de bajada (Mhz)	Frecuencia de Subida(Mhz)
Servicio Fijo		
Comercial (Banda C)	3700-4200	5925-6425
Militar (Banda X)	7250-7750	7900-8400
Servicio Móvil		
Comercial (Banda K)		
Doméstico	11700-12200	14400-14500
Internacional	10950-11200 11450-11700 17700-21200	27500-31000
Servicio de Radiodifusión		
Marítimo	1535-1542.5	1635-1644
Aeronáutico	1543.5-1558.8	1645-1660
Telemetría, Seguimiento y comando		
	2500-2535 11700-12750	2655-2690
Telemetría, Seguimiento y comando		
	137-138, 401-402, 1525-1540	

Figura 3.17. Localización de las frecuencias para comunicación satelital.

De cualquier forma la congestión general a frecuencias más bajas promueve de forma definitiva la utilización de frecuencias más altas.

Las frecuencias de subida se encuentran separadas de las frecuencias de bajada para minimizar la interferencia entre señales transmitidas y recibidas. El enlace de bajada comúnmente utiliza la frecuencia más baja que sufre de menor atenuación y por lo tanto facilita los requerimientos de potencia de salida en el satélite. El ancho de banda disponible en cada transpondedor puede ser utilizado por múltiples portadoras en FDMA o por una sola en TDMA.

Los transpondedores están sujetos a efectos nocivos de transmisión que son funciones de la potencia disponible y del ancho de banda así como de la forma de operación del sistema. Debido al alto costo de la potencia y de la masa del transpondedor en órbita, se debe balancear la potencia, el ancho de banda y la confiabilidad contra el impacto de la distorsión. La distorsión produce efectos como la intermodulación, conversión de AM a PM, ruido de impulso e interferencia. Además de estos efectos no lineales, la operación del transpondedor está sujeta a los efectos lineales comunes, tales como, ruido térmico, y desviaciones de la amplitud y fase ideales.

Tipos de transpondedores

El término cuasilineal describe el hecho de que los amplificadores del transpondedor, como todos los amplificadores, exhiben respuestas no lineales cerca de su potencia máxima de salida y un comportamiento lineal en los niveles de potencia más bajos. La ganancia total del transpondedor se logra

colocando varias etapas de amplificación que proveen los niveles de operación interna necesarios como se muestra en la figura 3.18

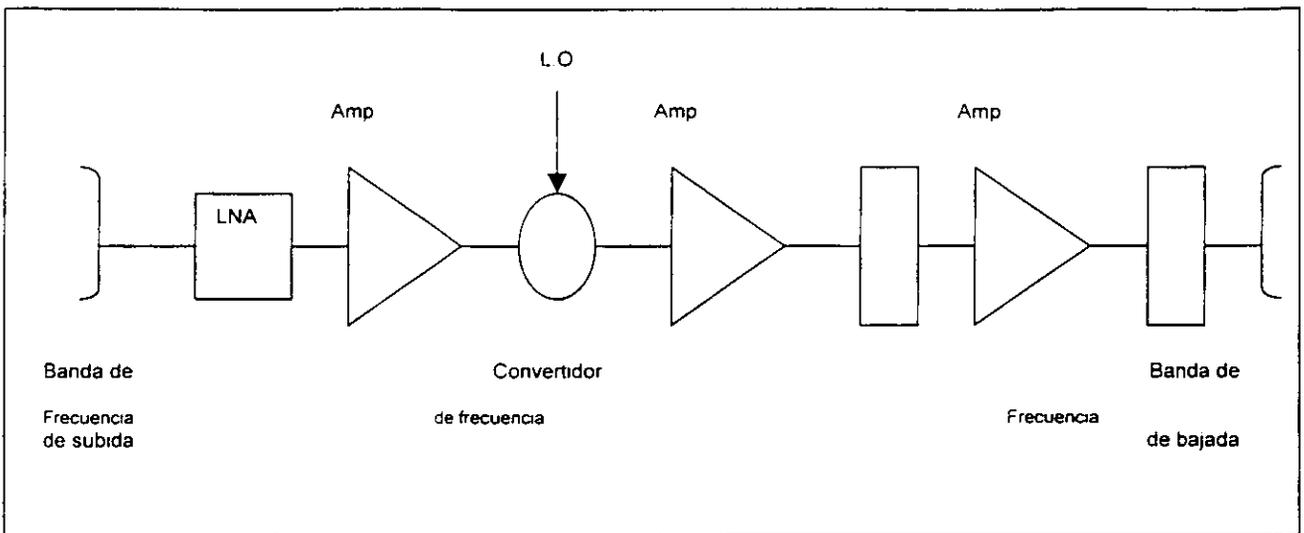


Figura 3.18 Transpondedor de conversión cuasilineal

La selección del punto de operación de la característica de entrada-salida del transpondedor es una de las tareas más importantes. La figura 3.18 muestra un diagrama de bloques genérico de un transpondedor cuasilineal. Este recibe, separa y amplifica los enlaces de subida que se le han asignado, traslada la frecuencia a la banda del enlace de bajada y amplifica la señal para su retransmisión a través del enlace de bajada. Este diseño de transpondedor se conoce como de conversión sencilla porque traslada de la frecuencia de subida a la frecuencia de bajada en un paso. La etapa de salida de alta potencia del transpondedor se construye utilizando un amplificador de tubo de onda viajera.

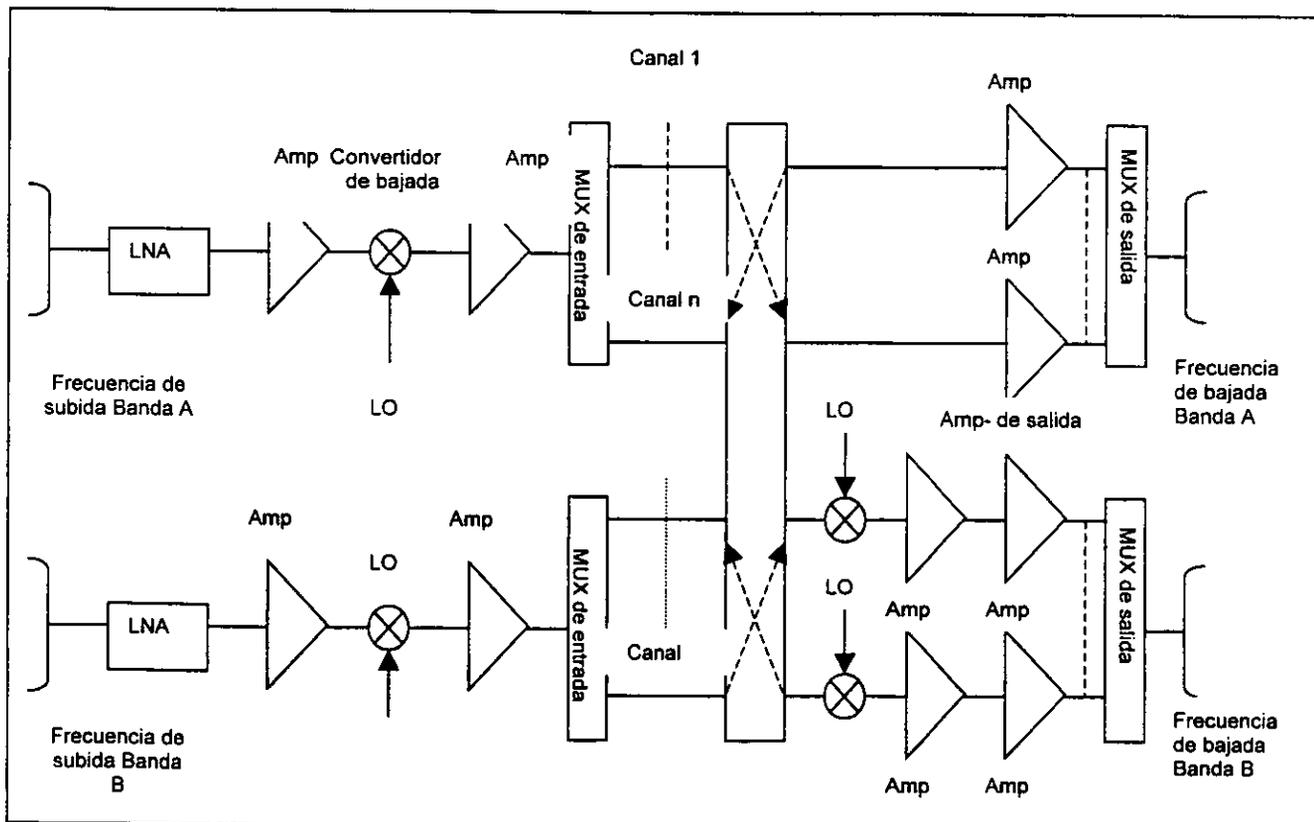
Típicamente, se utiliza equipamiento común en las primeras etapas del transpondedor y es usado por más de un canal de RF. Las primeras etapas las constituyen un filtro para eliminar la energía fuera de la banda de operación, un amplificador de bajo nivel de ruido (LNA), un convertidor de frecuencia de banda ancha para trasladar la banda del enlace de subida a la banda del enlace de bajada.

El ancho de banda operacional completo se separa después por medio de filtros en las bandas de los canales individuales. Los anchos de banda de los transpondedores varían desde algunos megahertz hasta 100 Mhz o más. Sin embargo los anchos de banda predominantes son de 36 y 72 Mhz. Cada canal es amplificado por un amplificador de alta potencia individual (HPA), posiblemente precedido por un amplificador de control. La salida de cada HPA pasa a través de un filtro pasobanda que elimina los productos fuera de banda debidos a la no linealidad del amplificador. La salida de varios HPAs de canal

se combina en un multiplexor de salida (utilizando circuladores de microonda) y después se alimentan a un sistema común de antena para su transmisión.

En la práctica, se utiliza un solo sistema de antena para recibir y transmitir las señales. En ese caso se utiliza un diplexor para separar los caminos de recepción y transmisión.

Otro diseño de transpondedor es el de tipo conversión dual. La Figura 3.19 muestra un sistema operando en dos bandas, A y B. Cada banda tomada por separado puede ser amplificada y transmitida utilizando un traslado de frecuencia entre la banda del enlace de subida y la banda del enlace de bajada asociados. Si existe una necesidad de interconectividad entre las dos bandas de frecuencia, se traslada la frecuencia de subida de la banda B a la frecuencia de bajada de la banda A la cual se utiliza como frecuencia universal intermedia. Cuando ambas bandas A y B tienen planes de frecuencia y canalización correspondientes, cualquier canal en particular puede ser conectado a través de su frecuencia de bajada conectada en forma cruzada con la frecuencia de bajada correspondiente en la otra banda.



3.19. Transpondedor de conversión dual

Repetidor regenerativo

En las aplicaciones de transmisión digital existe un tipo más complejo de transpondedor que se puede emplear para incrementar el desempeño. La figura 3.20 es un diagrama de bloques de un transpondedor

diseñado como *repetidor regenerativo*. Un repetidor regenerativo realiza las funciones de transmisión y recepción de la misma forma que un repetidor cuasilineal. Sin embargo, el repetidor regenerativo contiene un demodulador que demodula la señal de subida y un modulador que remodula la señal para el enlace de bajada. La señal demodulada se retemporiza y se restaura a su forma original. Este método aísla definitivamente el desempeño del enlace de bajada del desempeño del enlace de subida.

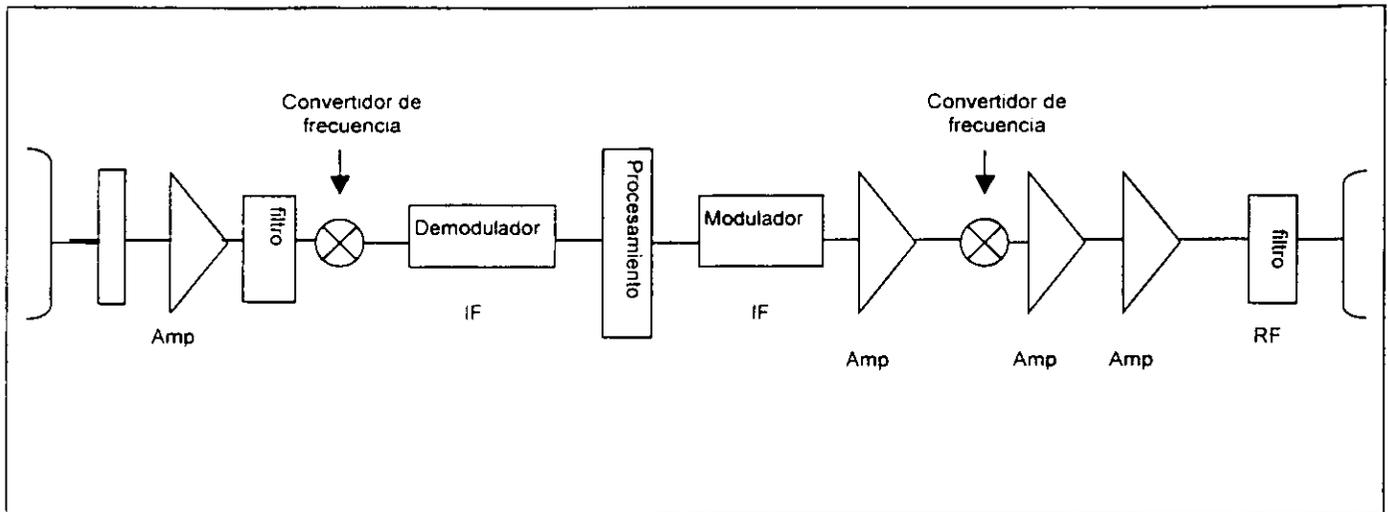


Figura 3 20. Transpondedor satelital regenerativo

En los cálculos del sistema cuando se utiliza un repetidor regenerativo, el desempeño se mide en términos de la tasa de bits en error total de todo el enlace. Sea P_U y P_D la probabilidad de que un bit esté en error en el enlace de subida y en el enlace de bajada. Entonces la probabilidad de que un bit no esté en error en el enlace total está dada por:

$$P_C(1 - P_U)(1 - P_D) = 1 - (P_U + P_D) + P_U P_D \dots \dots \dots (3.42)$$

Por lo tanto, la probabilidad de bit en error en el enlace total es

$$P_E = P_U + P_D - P_U P_D$$

Siempre y cuando la tasa de error sea lo suficientemente baja, la tasa de error total es esencialmente

$$P_E = P_U + P_D \dots \dots \dots (3.43)$$

Esta ecuación ilustra la independencia entre el enlace de subida y el enlace de bajada.

Estaciones terrenas

Introducción

Al conjunto de equipo en la superficie de la Tierra que sirve para comunicarse con el satélite le llamamos estación terrena. La figura 3.21 muestra un diagrama de bloques general de una estación terrena capaz de realizar las funciones de transmisión, recepción y seguimiento. Podemos identificar los siguientes subsistemas:

- **Transmisor.** Pueden existir una o varias cadenas de transmisión, dependiendo del número de frecuencias portadoras separadas y satélites que la estación recibe y de consideraciones de operación.
- **Receptor.** Una vez más, pueden existir una o varias cadenas receptor/convertidor de bajada, dependiendo del número de frecuencias y satélites que la estación recibirá.
- **Antena.** Usualmente una antena se utiliza tanto para la transmisión como para la recepción, pero no necesariamente. En el subsistema de antena se encuentran la antena (típicamente un reflector), la alimentación y un arreglo de multiplexión para permitir la conexión simultánea de varias cadenas recibidas en la misma antena.
- **Sistema de seguimiento.** Este comprende todos los dispositivos y circuitos necesarios para mantener la antena apuntando al satélite.
- **Interfase terrestre.** Es la interconexión con el sistema terrestre.
- **Potencia primaria.** Este sistema incluye la potencia primaria para operar la estación terrena.
- **Equipo de prueba.** Esto incluye el equipo necesario para las revisiones de rutina de la estación terrena y la interfase terrestre, el posible monitoreo de las características del satélite.

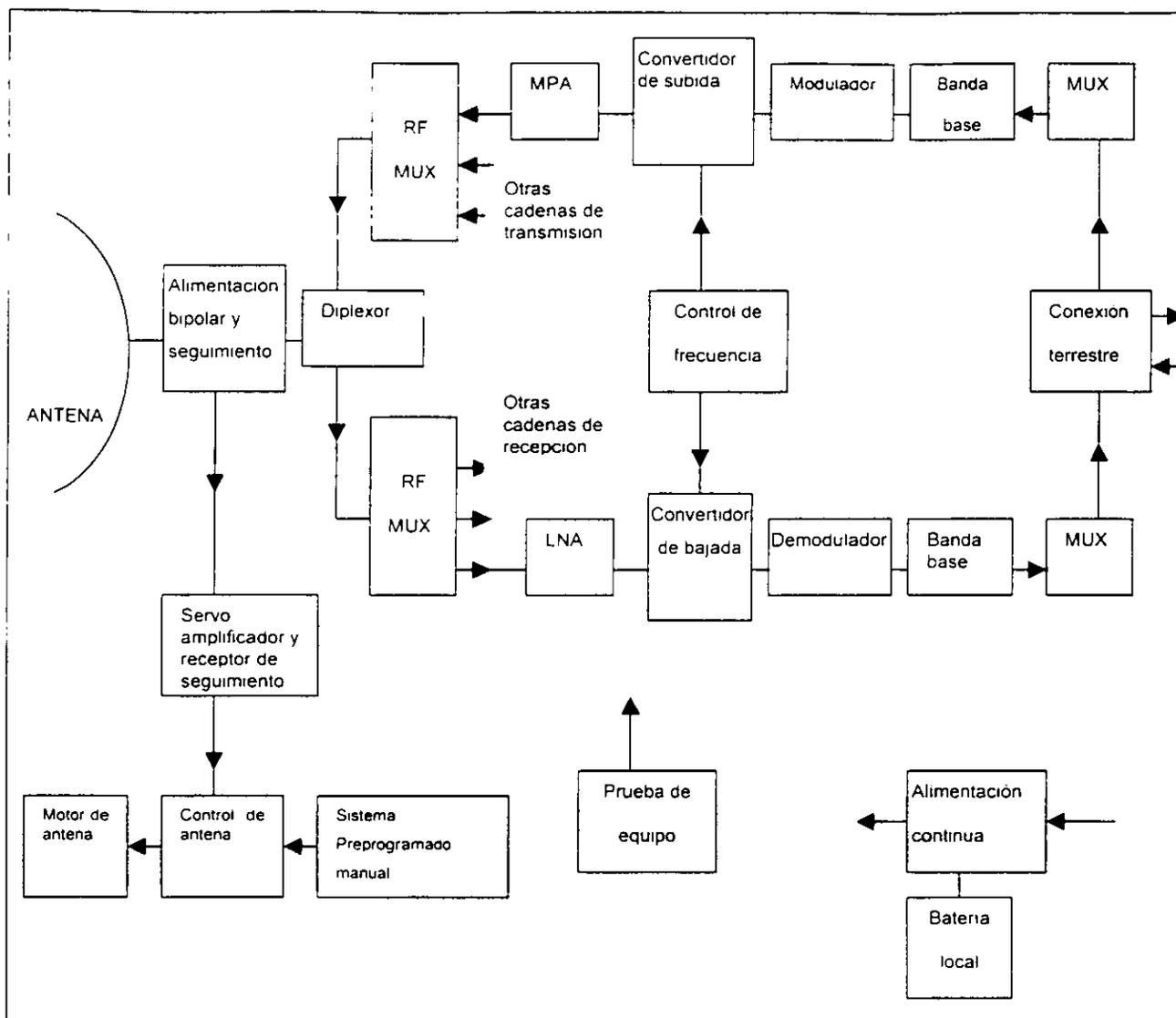


Figura 3 21 Estación terrestre general

La Figura 3.22 muestra algunas características de las estaciones terrenas más comunes.

	Internacional	Troncal doméstico	Distribución de video	DBS	VSAT
Banda de frecuencia	C, Ku	C, Ku	C, Ku	Ku, Ka	C, Ka
Tamaño de la antena (m)	5-20	5-12	5-10	0.5-1.5	1.2
Temperatura del sistema (K)	35-60	60-200	100-300	200-600	100-300
Potencia del transmisor(W)	1000-10000	100-5000	N/A	N/A	0.1-10
Método de acceso	FDMA, TDMA	FDMA, TDMA	FDMA	FDMA	FDMA, TDMA, CDMA

Figura 3 22 Estaciones terrenas para servicio fijo y de radiodifusión

Transmisores

El sistema de transmisión puede variar de simples transmisores de sólo algunos watts para la adquisición de datos hasta transmisores multicanal, utilizando amplificadores de 10 kW, como los que se encuentran en las estaciones A de Intelsat. Cuando se requieren cadenas de transmisores múltiples, se pueden utilizar amplificadores de tubo de onda viajera comunes, como en el arreglo mostrado en la figura 3.23, o cada canal puede utilizar un amplificador de alta potencia por separado como se muestra en la figura 3.24

Aquí se muestra un conmutador de redundancia dos a uno, existen varias configuraciones de redundancia. De forma similar, los arreglos de multiplexores y filtros son diversos y sólo se muestra un esquema. El amplificador de banda ancha común es el más utilizado.

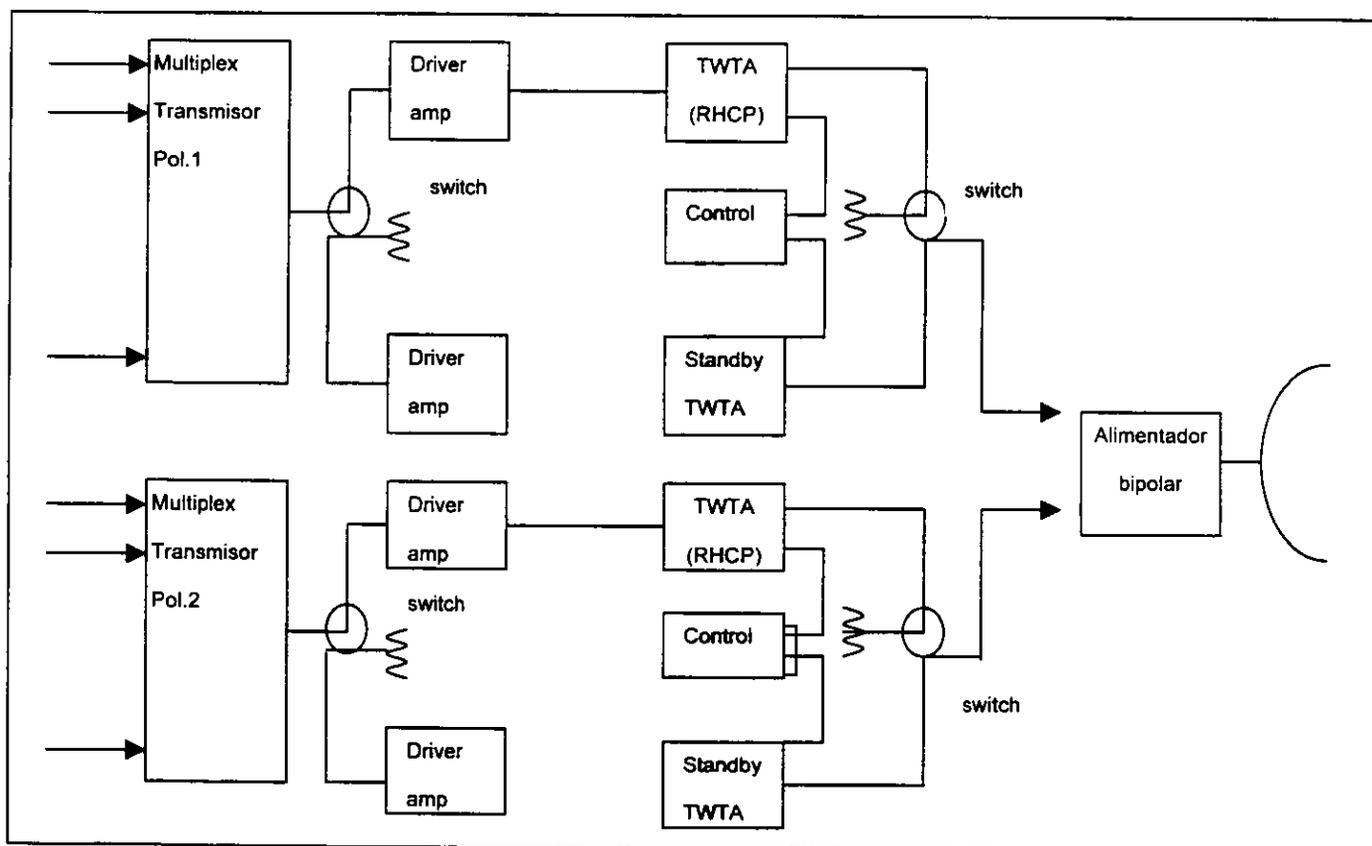


Figura 3.23. TWTA común transmitida con redundancia

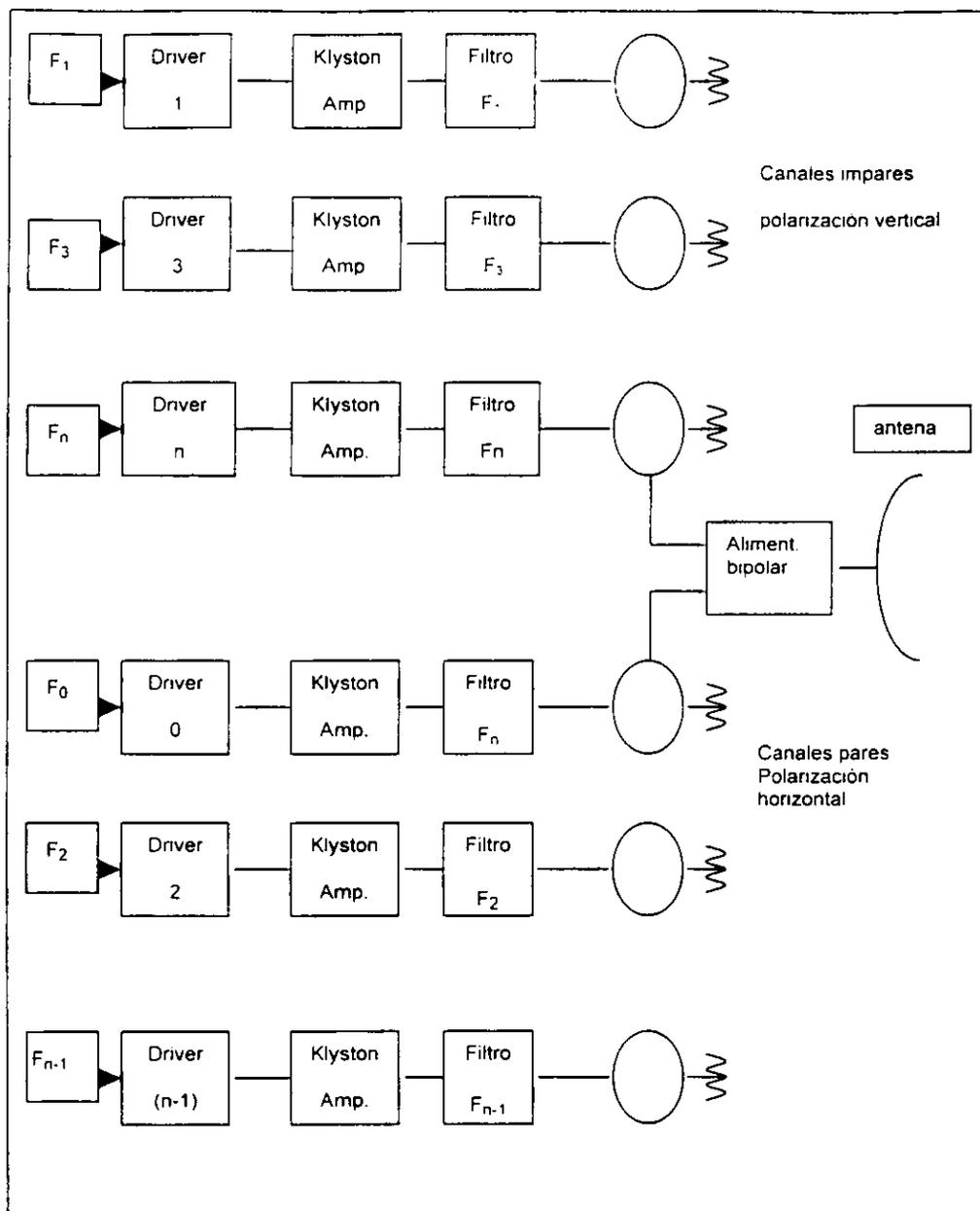


Figura 3 24 Transmisor múltiple klystron

En la siguiente figura 3.25 se muestran las principales características de los amplificadores de alta potencia más utilizados, los TWTA (Travelling Wave Tube Amplifier) y los SSPA (Solid State Power Amplifier).

	TWTA	TWTA	TWTA	SSPA	SSPA
Banda de Frecuencia	C	Ku	Ka	C	Ku
Potencia(W)	600	300	100	25	16
Eficiencia (%)	25	22	18	15	5
Ancho de banda (Mhz)	500+	500+	2500	500	500
Ganancia (dB)	50	70	50	50	50
Figura de ruido(dB)	25	28	35	6	12
Efectos de tercer orden	10	10	10	20	20
Intercepción AM-PM (dBm)	2°/dB	2°/dB	2°/dB	0.5°/dB	0.5°/dB
Tiempo medio antes de una falla (MTTF) (hrs)	15-30000	15-30000	15-30000	150000	150000

Figura 3.25 Características de los amplificadores de alta potencia

Receptores

Para recibir la señal del satélite se deben realizar diferentes operaciones. La señal debe ser amplificada, después reducida a una frecuencia lo suficientemente baja para una segunda amplificación y demodulación, después demodulada y entregada al equipo destinatario en banda base. La cadena receptora hace referencia a los amplificadores de nivel bajo de ruido LNA, a los convertidores de bajada y a los demoduladores. La conversión de bajada puede realizarse en un paso, desde el enlace de bajada del satélite a una frecuencia intermedia de demodulación (típicamente 70 Mhz), o en varias etapas. La conversión de dos etapas se realiza cuando el mismo receptor será sintonizado en una multiplicidad de canales. La figura 3.26 muestra una cadena receptora prototipo para un caso general. La redundancia de los LNA se muestra para observar los conmutadores pero se pueden utilizar otros esquemas de redundancia. En el caso de los transmisores, la variedad de configuraciones para la conmutación y la multiplexación es muy grande.

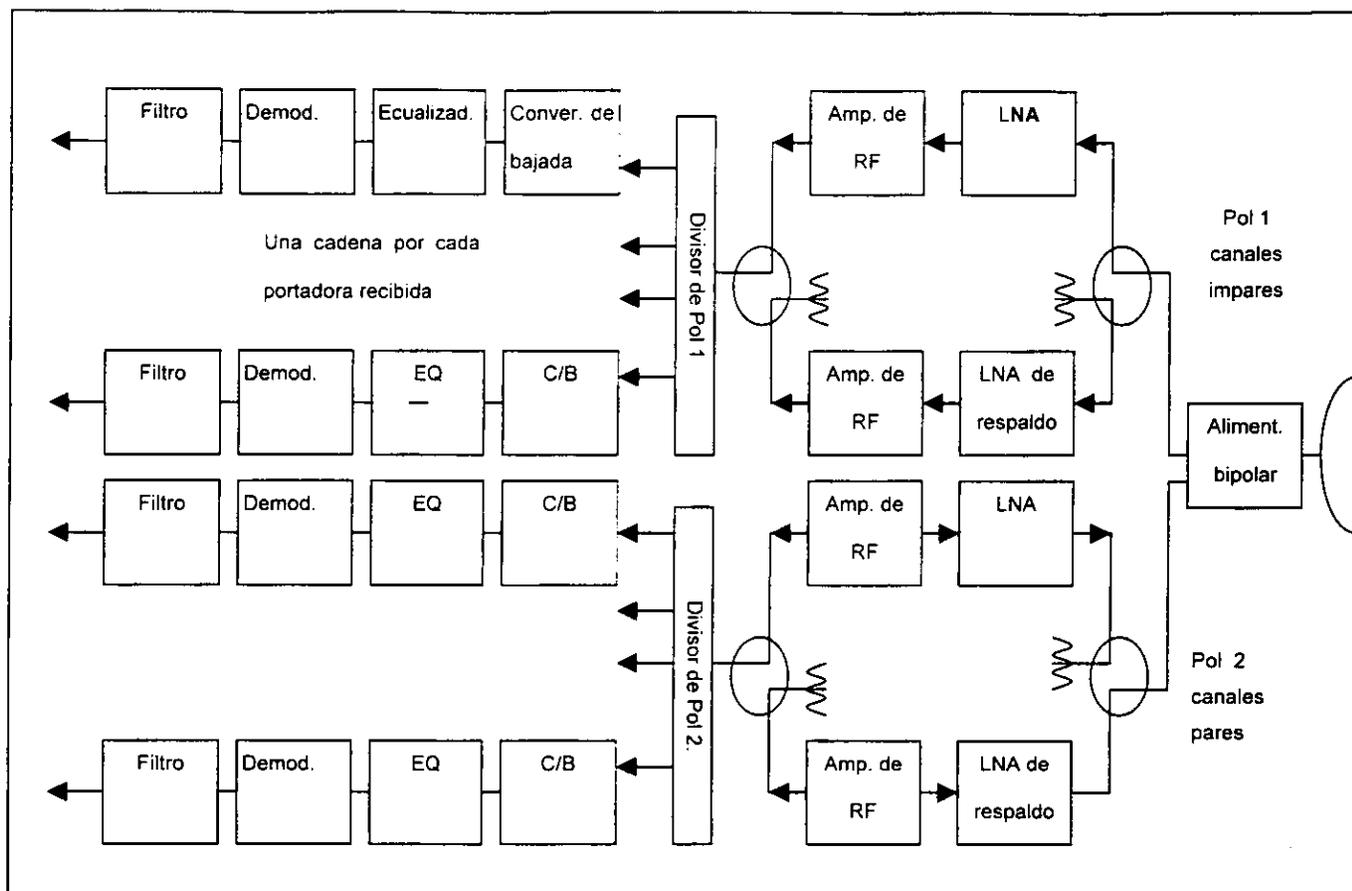


Figura 3.26. Subsistema receptor de una estación terrena multiportadora.

En la figura 3.28 se muestran las características más comunes de los amplificadores de nivel bajo de ruido.

	Banda C	Banda Ku	Banda Ka
Sistema de enfriamiento	Sin enfriamiento/con enfriamiento	Sin enfriamiento/con enfriamiento	Sin enfriamiento/con enfriamiento
Rango de frecuencia (GHz)	3-5	10-14	11-20
Ancho de banda (Mhz)	500	1000	1000
Temperatura de Ruido (K)	35-60	65-130	200-300
Ganancia (dB)	50-60	50-60	20-25
Salida con compresión de 1 dB (dBm)	13	13	10
Intercepción en dB AM-PM (°/dB)	0.03-0.5	0.03-0.5	0.03-0.5

Figura 3.28. Características de los amplificadores de nivel bajo de ruido.

Antenas

Las características de la antena que están involucradas en el desempeño del satélite son las siguientes

Un par de ecuaciones para el diseño del patrón de radiación de la antena que son útiles son:

$$\text{En el lóbulo principal: } \frac{G}{G_m} = \left[\frac{\text{sen } 1.39(\theta - \theta_0)}{1.39(\theta - \theta_0)} \right]^2 \dots\dots\dots(3.44)$$

$$\text{Alejado del lóbulo principal: } \frac{G}{G_m} = \frac{1}{1 + (\theta - \theta_0)^{2.5}} \dots\dots\dots(3.45)$$

Nótese que θ_0 es la mitad de la mitad de la potencia del ancho de haz.

La ganancia se define como la razón de la intensidad de la radiación en una dirección dada con respecto a la potencia total radiada de forma isotrópica. Está constituida de dos elementos: la directividad, la componente de la razón determinada por la geometría de la antena y el efecto de pérdida debida a factores tales como disipación y derrama. La parte de directividad es la más importante y podemos utilizar para tal efecto

$$G \approx \frac{4\pi}{\theta_1\theta_2} \approx K \frac{41253}{\theta_1^0\theta_2^0} \dots\dots\dots(3.46)$$

donde K es un factor que permite considerar a la energía no contenida en el haz principal (de aproximadamente 0.65). θ_1 y θ_2 son los anchos de haz de la antena en radianes o grados. La ecuación se obtiene de asumir que la potencia radiada está confinada principalmente en el lóbulo principal, en lugar de ser radiada en los 4π steradianes de forma isotrópica.

A pesar de que el reflector parabólico es el tipo más importante de antena utilizada en las estaciones terrenas y en los satélites, existen otros tipos como las cornetas y los arreglos. Las cornetas se utilizan ampliamente como alimentadores primarios para los reflectores y ocasionalmente como radiadores principales. Existen otros dos tipos que se utilizan en el satélite. Estos son los tipo lente (dieléctricos o de onda dirigida) y los arreglos. El último tipo es un arreglo de elementos individuales que pueden ser cornetas, dipolos e inclusive reflectores parabólicos. El arreglo se controla variando la fase y la amplitud de la excitación de los elementos individuales. En la siguiente figura se resumen las características de las antenas y que parámetro del sistema afectan.

Característica	Efectos
Ganancia Total, G	La relación G/T_s del sistema
Temperatura de antena, T_s	G/T_s
El nivel de los lóbulos laterales (incluyendo derrama)	Interferencia (C/I), temperatura de antena
Respuesta a la polarización cruzada	C/I y C/N del sistema
Ancho de haz	Cobertura geográfica (antena del satélite), requerimientos para el seguimiento

Figura 3.29 Tabla de características y sus efectos

Antenas de corneta

Las antenas de corneta se utilizan comúnmente como radiadores primarios en un sistema de reflector, como elementos en arreglos y a veces como radiadores completos en donde anchos de haz grandes son requeridos.

Existen dos tipos de cornetas: la *corneta piramidal* como una extensión de la onda guía rectangular y el *corneta cónica* como una extensión de la onda guía circular. Las cornetas piramidales se diseñan más fácilmente y las ecuaciones siguientes se aplican a aquellas cornetas que se comparan en longitud con la longitud de la onda

$$\begin{aligned}
 G &= 10 \frac{AB}{\lambda^2} \\
 \theta_E &= 51 \frac{\lambda}{B} \\
 \theta_H &= 70 \frac{\lambda}{A}
 \end{aligned}
 \tag{3.47}$$

donde A es la dimensión más grande de la apertura de la corneta. Si se desea tener la menor longitud posible, esa longitud L_1 , está dada por

$$L_1 = L \left(1 - \frac{a}{2A} - \frac{b}{2B} \right) \dots \dots \dots (3.48)$$

La figura 3.30 facilita el diseño de una corneta de longitud óptima.

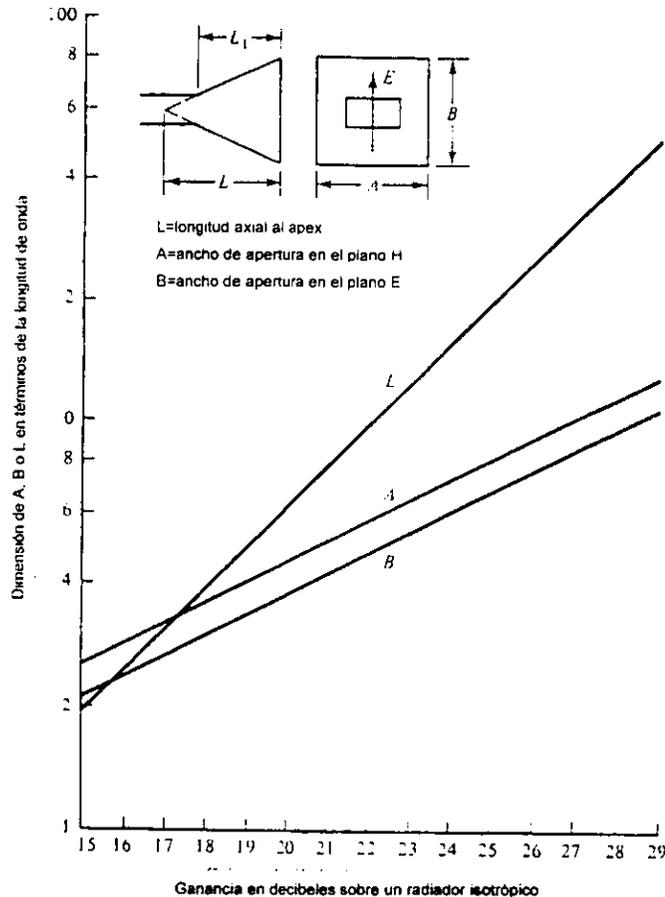


Figura 3.30. Diseño de un radiador de corneta

Antenas de reflector

Las antenas de reflector se dividen en dos categorías, las que usan un reflector sencillo y alimentación por corneta y las que usan reflectores múltiples. En la primer categoría tenemos los reflectores de alimentación en el foco y de alimentación offset; en el segundo tenemos la antena Newtoniana, Cassegrainiana y Gregoriana. Las últimas categorías dependen si el subreflector es plano, hiperbólico o elipsoidal. Estas antenas se muestran en la figura 3.31 y en más detalle de la figura 3.32 a la 3.34. Existen muchas variaciones de estos arreglos. Existen elementos que debemos de considerar para entender las variaciones. El primero es que un reflector parabólico tomará ondas esféricas originadas de un punto en el foco del paraboloide y las convertirá en una onda de frente plano. La distancia del foco del paraboloide al reflector, más la distancia del punto de reflexión a cualquier superficie plana normal al eje, debe ser constante. Este es de hecho el requerimiento óptico fundamental de todos los sistemas de antenas reflectoras. Si se utilizan subreflectores las distancias multireflejadas se deben de agregar para

satisfacer ésta condición. Mientras el reflector parabólico convertirá una onda esférica en una onda plana, los reflectores hiperbólicos y elipsoides dejarán a las ondas circulares que emergen del foco sin cambio. Sólo parecerán haberse originado en un foco distinto.

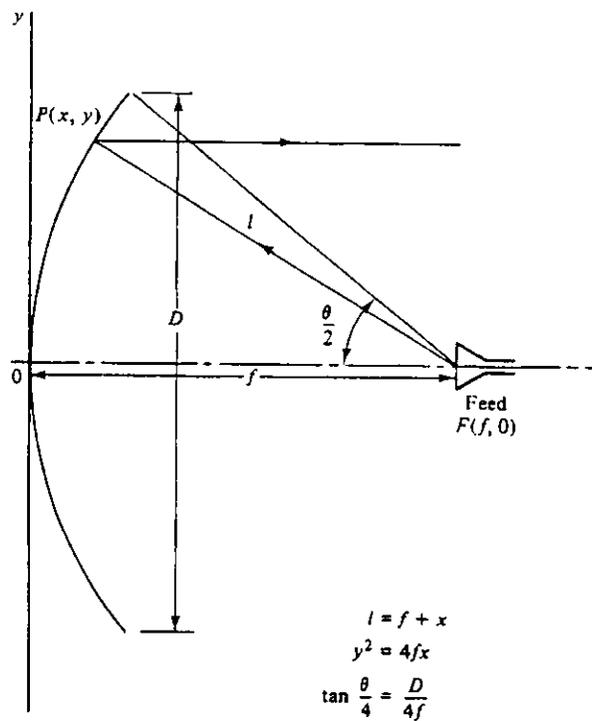


Figura 3.31. Geometría básica de un reflector parabólico con alimentación en el foco

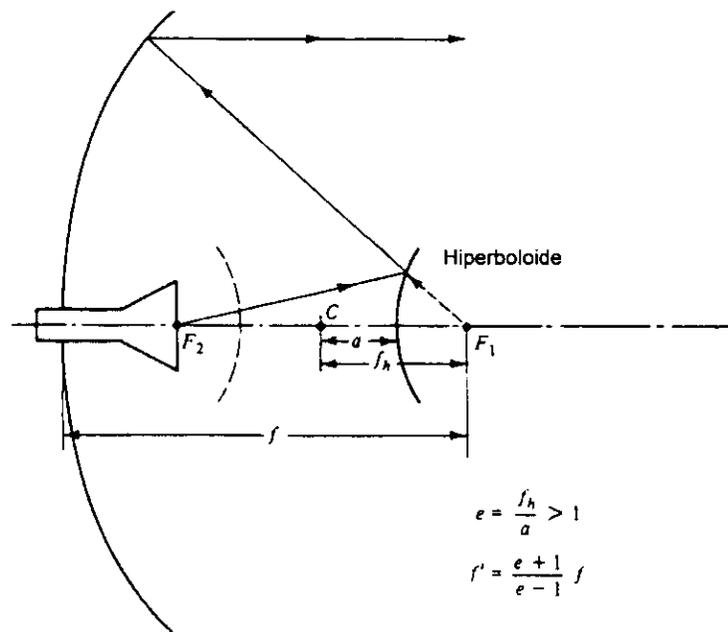


Figura 3.32. Antena Cassegrainiana básica.

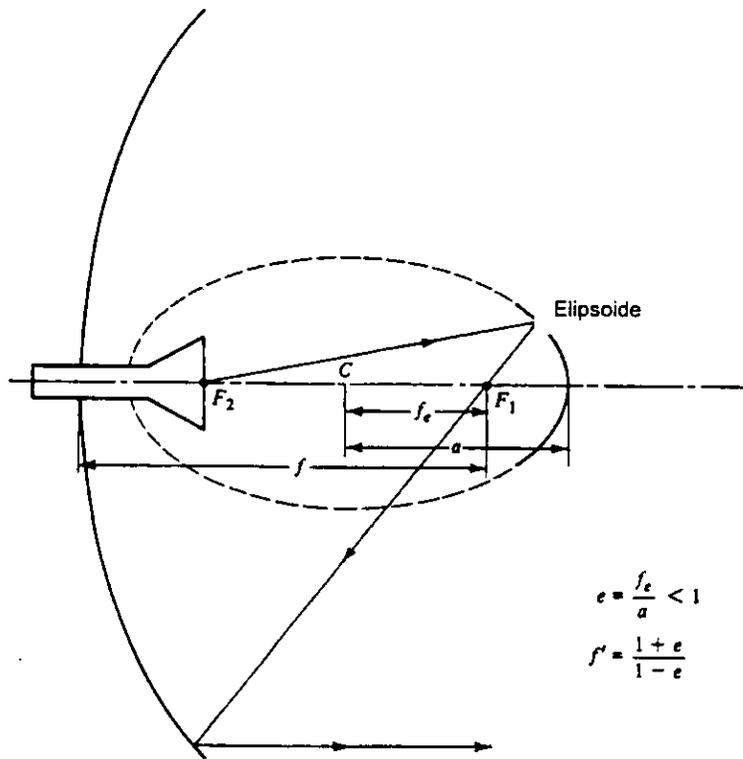


Figura 3.33. Antena Gregoriana básica.

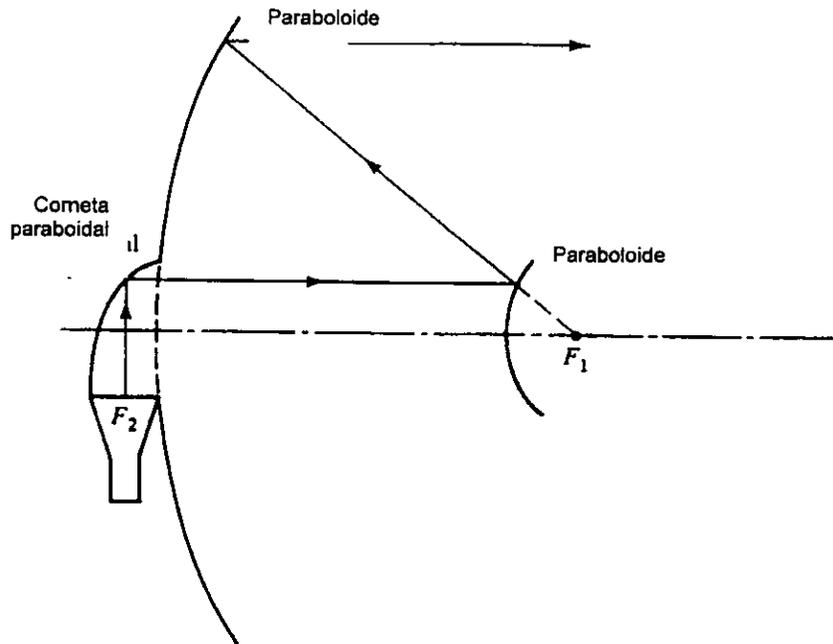


Figura 3.34. Antena Cassegrainiana modificada.

Desempeño de la antena

Una forma de comparar el desempeño de diferentes antenas en un sistema es considerándolas como aperturas iluminadas. La fórmula universal de la antena que relaciona el área efectiva de la antena (sección de captura) A_{eff} y su ganancia y longitud de onda es

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} = \eta A \dots \dots \dots (3.49)$$

El área de captura efectiva está relacionada con el área física A por la eficiencia total η . Esta eficiencia total se utiliza para calcular el nivel de la portadora recibido, es por sí misma un producto de varias eficiencias por lo que

$$\eta = \eta_a \eta_b \eta_s \eta_p \eta_e \eta_L \dots \dots \dots (3.50)$$

Donde

η_a =eficiencia de apertura, el resultado de la iluminación no uniforme, errores de fase, etc; se incrementa cuando el nivel del lóbulo lateral aumenta.

η_b =eficiencia de bloqueo, la que resulta del bloqueo del reflector principal por los subreflectores o alimentadores.

η_s =eficiencia de derrama, la pérdida de energía debido a que los subreflectores y el reflector principal no intersectan toda la energía que está dirigida hacia éstos.

η_p =eficiencia de polarización cruzada, la pérdida de energía debida a la energía acoplada en la polarización ortogonal de acuerdo a la deseada.

η_e =eficiencia de superficie, la pérdida en la ganancia que se ocasiona debido a las irregularidades en la superficie.

η_L =eficiencia ohmica y de diferencia, la pérdida de la energía reflejada en las terminales de entrada y la que se disipa en las superficies conductoras, lentes dieléctricos, etc.

Tipos de antenas en el satélite

Las antenas satelitales tienen ciertas diferencias con respecto a otras antenas. La radiación de la antena cambia de omnidireccional a altamente direccionable y puede ser ajustada para cubrir necesidades específicas. Una antena satelital está diseñada para soportar la tensión térmica y mecánica del ambiente

satelital. Las limitantes de diseño del satélite tales como tamaño, forma y peso son también factores importantes a considerar en el diseño.

Existen dos métodos básicos para lograr la estabilización del satélite, la estabilización por giro y la estabilización triaxial.

- En la estabilización por giro, la estabilidad giroscópica la provee toda o parte del cuerpo satelital. El cuerpo satelital consiste de un cilindro giratorio cubierto con celdas solares y una plataforma fija para que la antena de los sistemas de comunicación apunte a la Tierra.
- En la estabilización triaxial, el cuerpo satelital es estabilizado por dos arreglos de celdas solares autodirigibles. Las antenas están montadas en el cuerpo principal del satélite.

La figura 3.35. muestra las configuraciones típicas de las antenas para ambas configuraciones.

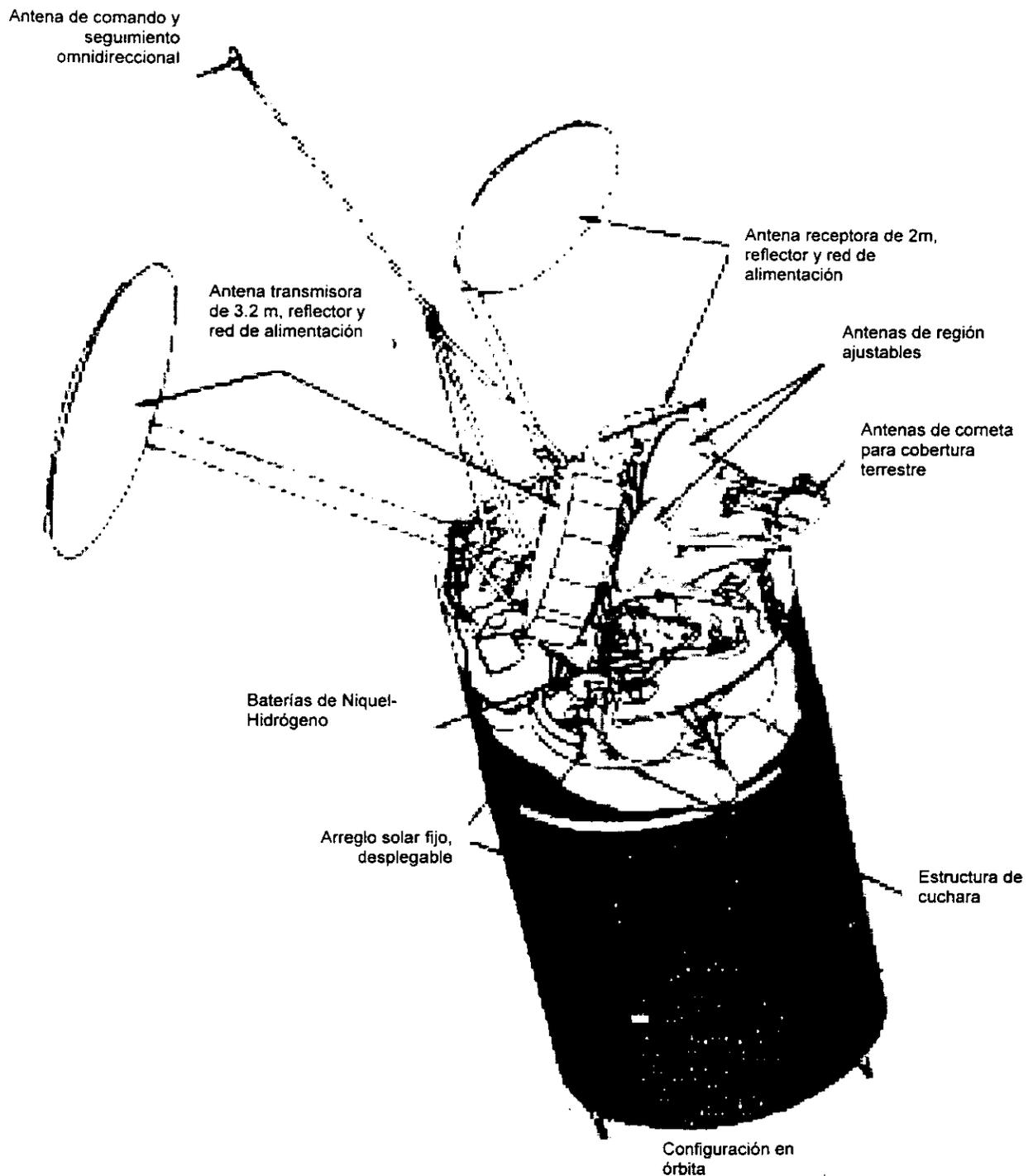


Figura 3.35. Configuraciones típicas de las antenas(1).

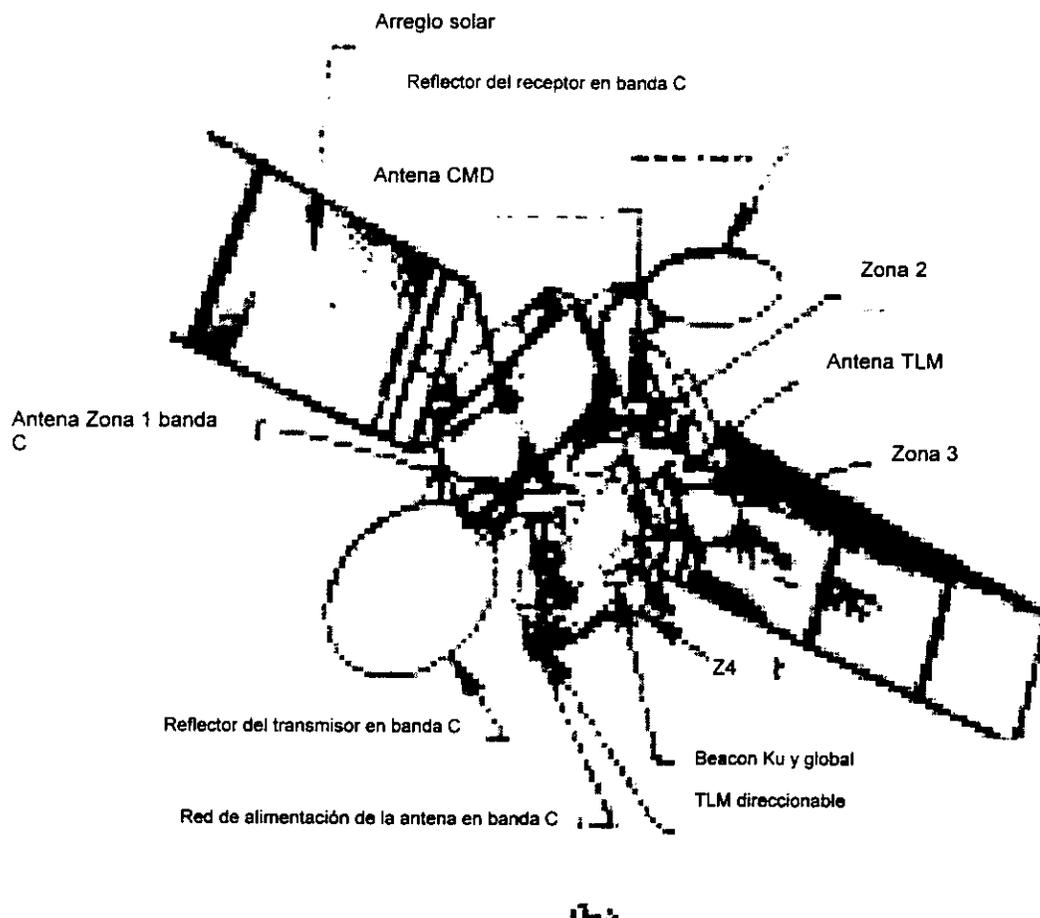


Figura 3.35. Configuración típica de antenas(2)

En base a su función, las antenas satelitales pueden clasificarse en las siguientes categorías: comunicación, rastreo, telemetría, mando y antenas especiales, tales como antenas meteorológicas y antenas de enlace intersatelitales.

Antenas de comunicación

Los tipos básicos de antena son: reflector, lente y arreglo en fase. Un reflector es la antena más adecuada para el satélite debido a que es ligera, simple en estructura y diseño consistente. En caso de que el reflector se utilice en un sistema de haz múltiple, este debe ser desviado de su eje para evitar el bloqueo por alimentación. El desalineamiento destruye la simetría rotacional de la superficie y limita el rango de cobertura. Una lente, puede hacerse rotacionalmente simétrica para conservar propiedades

ópticas adecuadas. Otras ventajas son que no presenta bloqueo por alimentación y es compacto. Dentro de las desventajas se encuentra su peso excesivo y la heterogeneidad de la superficie del lente. Un arreglo en fase tiene varias ventajas con respecto al reflector y al lente: distribución de la amplificación del potencia al nivel elemental de radiación, una eficiencia de apertura más alta, no registra pérdidas por derramamiento, no hay bloqueo por apertura y tiene un mayor grado de confiabilidad. Las desventajas son: su peso, complejidad y las pérdidas relativamente altas en el sistema de distribución de potencia. Con los amplificadores de estado sólido de alta eficiencia, los amplificadores de nivel bajo de ruido y el advenimiento de los MMICs, los arreglos en fase pueden mejorar la eficiencia de potencia total. Otros problemas por resolver son: la forma de configurar los elementos radiadores, los elementos activos, la red de alimentación, la integración de componentes y la disipación del calor generado.

Sistema de antena de lente/reflector

Las antenas de reflector o lente se utilizan ampliamente junto con múltiples elementos de alimentación para generar un haz de contorno específico. Una antena de haz múltiple consiste de un elemento enfocado, iluminado por un arreglo de elementos. Cada elemento ilumina la apertura óptica y genera el haz correspondiente. Cualquier contorno de haz que se desee formar puede construirse mediante la superposición de la radiación de los elementos que forman la red, como se muestra en la figura 3.36. Las características clave de este sistema de antena son:

- Genera un patrón multihaz desde una apertura óptica única
- Logra un mayor aislamiento espacial para el sistema de comunicaciones al producir un mayor factor de roll-off.

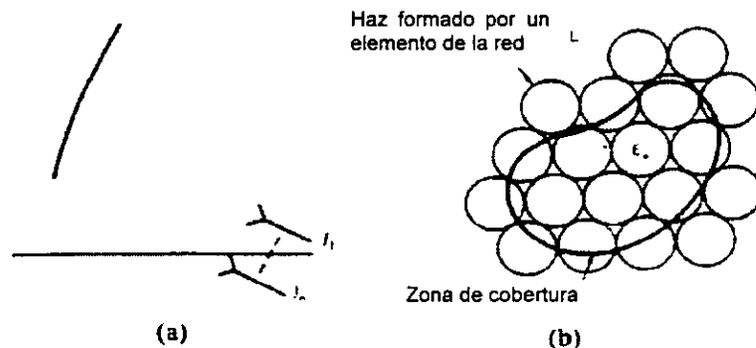


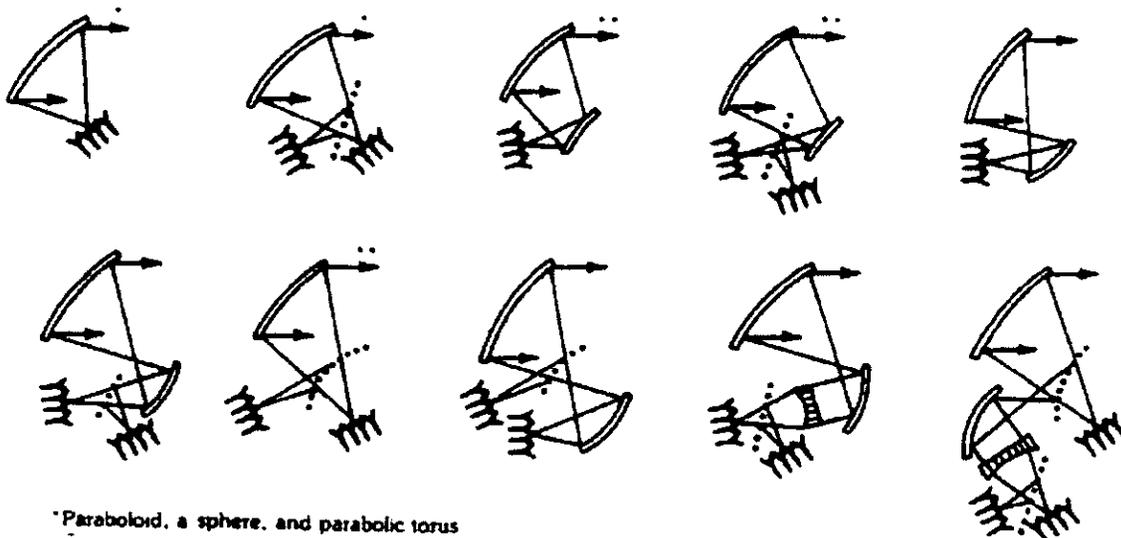
Figura 3.36. Sistema de antena multihaz.

Diferentes configuraciones ópticas para un sistema de antena de haz múltiple se muestran en la figura 4. Los lentes y reflectores son intercambiables en las configuraciones mostradas. Un reflector único es utilizado en la mayoría de los sistemas de antena de reflector. Los elementos de diseño clave son el tamaño de la apertura, la amplitud focal y la distancia de desviación del foco.

El arreglo de alimentación consiste de elementos radiantes y una red para formar el haz(BFN). La selección del tipo de elementos es determinada por la ganancia calculada, pérdida por escaneo, polarización cruzada, ancho de banda, tamaño y peso.

Red formadora de haz(BFN)

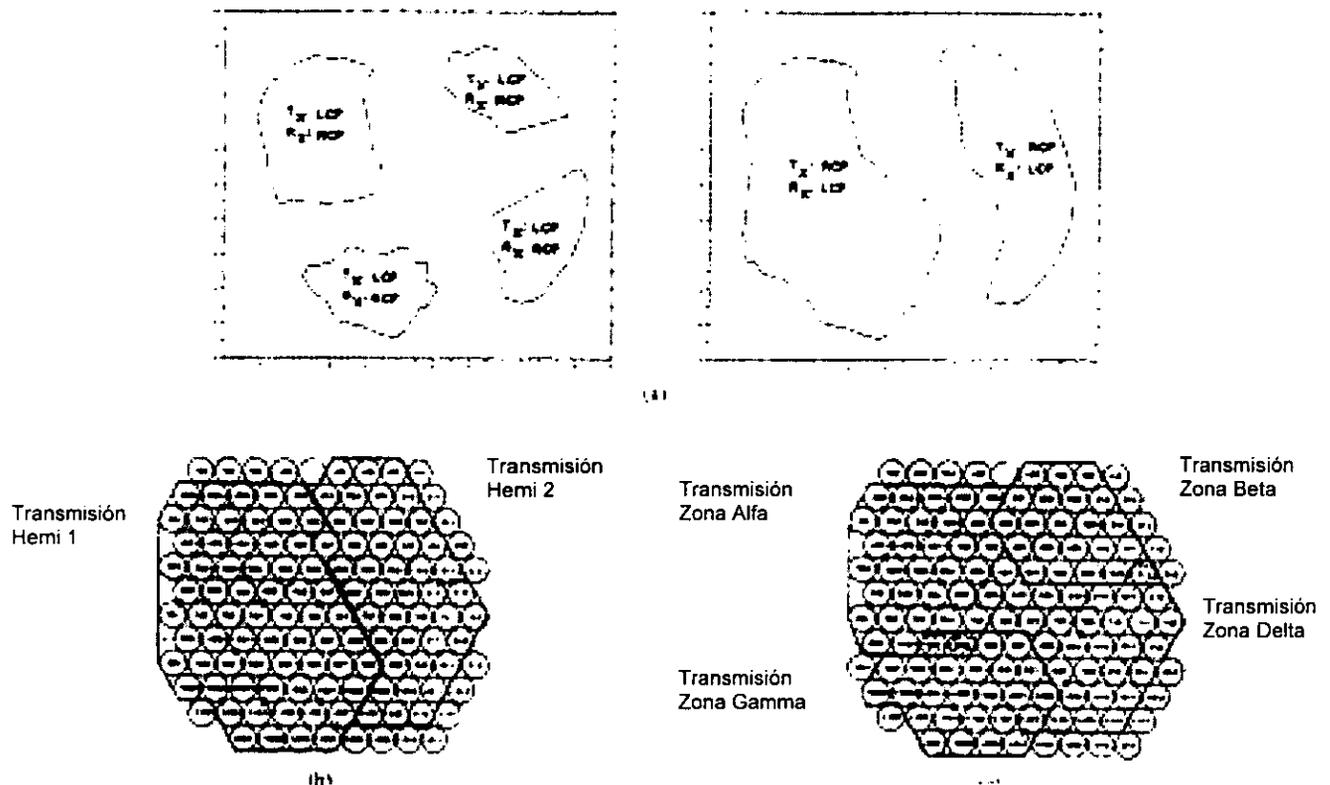
Existen dos tipos de red formadora de haz: de onda dirigida y de banda de aérea. Los componentes del sistema de banda aérea se utilizan en combinación con el medio de transmisión de banda aérea y los componentes de onda dirigida se utilizan en combinación con el medio de transmisión de onda dirigida. La BNF de tipo banda aérea es compacta pero presenta más pérdidas. Su aplicación está limitada a la banda C o bandas de frecuencia más bajas. La BFN de onda dirigida es menos compacta pero presenta menores pérdidas y se utiliza en su mayoría en la banda K o en bandas de mayor frecuencia.



*Paraboloid, a sphere, and parabolic torus

Figura 3.37. Configuración del sistema óptico de antena multihaz

Figura 3.38. Formación de áreas de cobertura con una BFN



Los sistemas de antena de haz múltiple ha sido empleados aplicaciones como: la antena multihaz del LES 7 y de la serie de satélites INTELSAT. Un reflector de 2.44 m con una F/D de 1.02 se diseñó para el INTELSAT VII en la frecuencia de 4 GHz sobre los océanos Atlántico, Pacífico e Indico. La antena provee cobertura hemisférica o por zona como se muestra en la figura 3.38. Se utilizan 110 elementos activos en las antenas de zona y hemisférica. El arreglo activo esta formado por elementos corneta de onda dirigida circular, montados en una matriz triangular. Cada elemento activo esta fabricado de grafito epóxico.

Sistema de antena de formación de haz con el reflector

Una antena de formación de haz con el reflector esta formado por una la superficie del reflector formadora del haz iluminado por uno o varios elementos. El último caso puede considerarse como una antena de haz múltiple con un número reducido de elementos. Cualquier haz deseado es formado modificando la superficie del reflector para lograr la distribución en fase y amplitud adecuada de la apertura óptica.

La superficie del reflector puede ser sólida, de cuadrícula o en forma de red. Los reflectores en forma de red se utilizan en lugar de los reflectores sólidos cuando su diámetro hace imposible transportarlos en los vehículos de lanzamiento. Los reflectores de red se han utilizado recientemente en antenas de reflector configurables. Un reflector sólido no ofrece la posibilidad de una reconfiguración de cobertura excepto si se usa la BNF. Un reflector de red reconfigurable puede utilizarse para proveer patrones de cobertura flexibles y reconfiguración.

Sistemas de antena de arreglo en fase

Las antenas de arreglo en fase no habían sido una de las opciones más utilizadas debido a que tienen una BNF compleja, altas pérdidas, peso y costo hasta que se desarrolló e implementó el concepto de arreglo activo en fase. Las pérdidas altas ocasionadas por la BNF puede compensarse al utilizarse dispositivos activos tales como los amplificadores de potencia y amplificadores de nivel bajo de ruido de estado sólido. Un arreglo finito activo también puede utilizarse en una antena de haz múltiple para formar una antena activa de haz múltiple. Con la tecnología MMIC una antena de arreglo en fase puede ser costo-efectiva y atractiva para ser usada en una antena satelital.

Existen dos diseños básicos para el arreglo activo en fase. El primero es el diseño monolítico en el que el arreglo esta formado por múltiples elementos radiantes, amplificadores, conmutadores de fase, guías de DC, líneas de RF y una computadora para la dirección del haz, todo fabricado en un chip GaAs. El segundo diseño es el monolítico híbrido en el cual el arreglo es fabricado y combinado en varias capas. El diseño monolítico híbrido es más práctico y ha sido adoptado en los desarrollos recientes por las siguientes razones: la tecnología GaAs es relativamente nueva, la producción de los dispositivos submicron se han incrementado y pueden lograr una radiación de apertura más eficiente. En lo que respecta a la integración. Los diseños para la integración pueden clasificarse en dos configuraciones "ladrillos" y "mosaicos". En el concepto de ladrillos, el módulo MMIC es ortogonal a la apertura de radiación. Este diseño aprovecha la ventaja de la profundidad del arreglo para colocar los circuitos MMIC y evitar que se afecte la eficiencia de radiación. En la solución de mosaico el substrato de los módulos MMIC es apilado atrás del plano de elementos radiantes.

Los diseños incluyen el desarrollo de amplificadores de potencia y de nivel bajo de ruido, conmutadores de fase, conmutadores y/o mezcladores. La corriente conmutación o de las líneas de control tiene que ser baja para reducir los requerimientos de potencia y la disipación de calor.

La fabricación debe de proveer una forma fácil para crear unidades de múltiples elementos y chips calificados para uso espacial. El costo debe ser bajo en comparación con los componentes de estado sólido, conmutadores de ferrita y a la tecnología de onda guía existente.

Antena de rastreo, telemetría y comando y antenas especiales

Antena de rastreo, telemetría y comando

Un satélite geoestacionario en posición orbital necesita ajustes ocasionales para mantenerlo en esa posición. Una antena no-direccional y polarizada circularmente se utiliza para asegurar la recepción continua de la señales de comando. Una solución alternativa es utilizar más de una antena de haz amplio con conmutadores para proveer cobertura continua. En este caso, la redundancia de cada antena se utiliza para asegurar la operación continua es caso de falla del conmutador.

Antenas para enlace intersatelital

El enlace entre dos satélites llamado enlace intersatelital ISL es necesario por las siguientes razones:

- Un satélite que forma parte de una constelación puede no ser capaz de proveer un enlace entre los puntos deseados a menos que se utilice un ISL.
- El incremento en el costo y el riesgo de las estaciones que operan el satélite en tierra.
- La conectividad ininterrumpida con satélites de una constelación que se encuentran fuera del rango de visión de las estaciones terrenas.

Las antenas de reflector y de arreglo en fase son dos tipos básicos utilizados para ISL. En la primera un haz de onda guía se utiliza como medio de transmisión ya que tiene bajas pérdidas de potencia. En la última se utilizarán componentes MMIC de 60 Ghz que se encuentran en desarrollo.

Antenas de autorastreo

El autorastreo en las antenas del satélite es necesario por dos razones:

- Para mejorar la exactitud de localización de un haz estrecho o de un haz altamente formado donde la degradación del desempeño en el sistema se debe a fallas en la exactitud de localización.
- Para comunicarse con un blanco o usuario en movimiento.

En un sistema de antena de haz múltiple, un grupo de elementos puede dedicarse para el rastreo.

Capítulo IV. Modulación, Multiplexación y Protocolos de Acceso Múltiple

Modulación y Multiplexación

En esta sección se describen las técnicas básicas de codificación de fuente, modulación, combinación de las señales de información para su transmisión en los satélites de comunicaciones.

La figura 4.1 muestra los diferentes caminos y etapas de procesamiento que pueden existir entre el sitio del usuario y la terminal satelital.

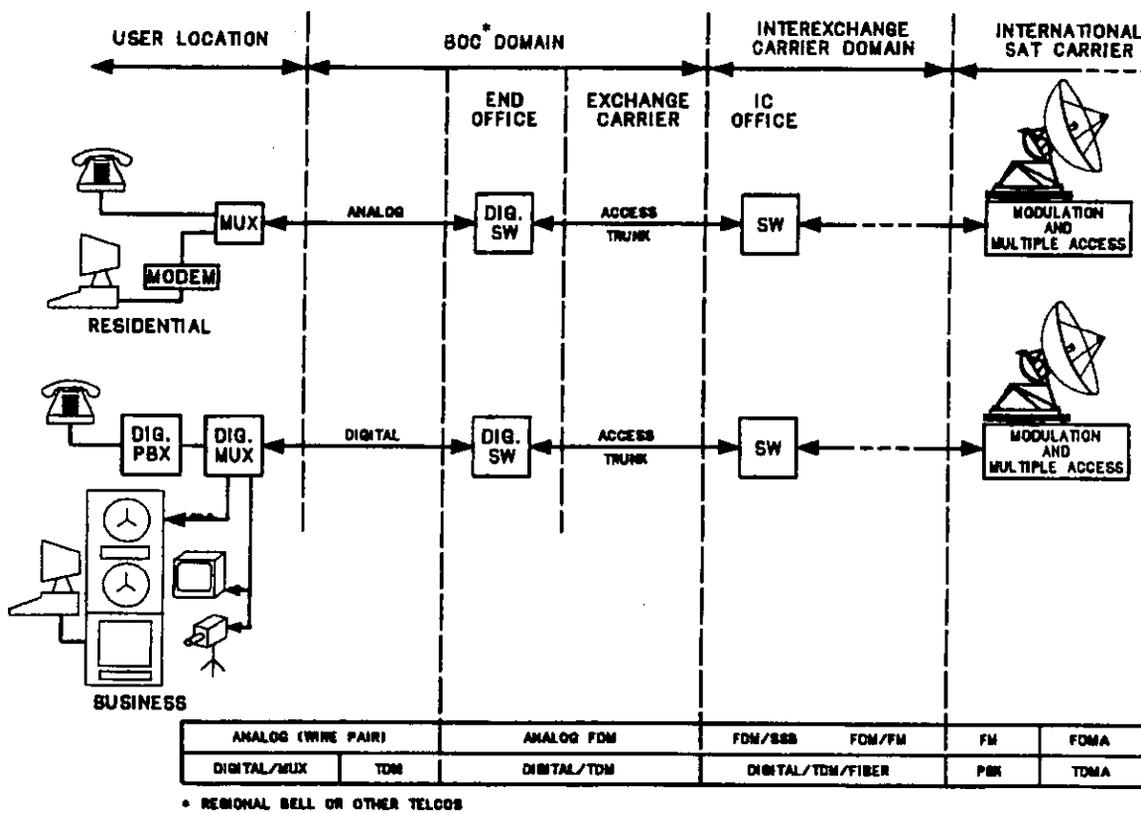


Figura 4.1. Procesamiento de la señal entre el sitio del usuario y la estación terrena

Sistemas de Transmisión Digital

Algunas de las razones por las cuales los sistemas de transmisión digital cada vez son más utilizados son:

- **Estabilidad.** Las señales digitales son menos susceptibles a las distorsiones de la forma de onda, tales como: no linealidades y ruido, comparadas con las señales analógicas.
- **Relación proporcional potencia/ ancho de banda.** En general cuando se incrementa la tasa de transmisión en un sistema digital, la calidad se incrementa y viceversa.
- **Integración de voz, video y datos.** El convertir las señales analógicas a digitales provee la oportunidad de combinar e integrar varios tipos de señales, voz video y datos, por lo que se genera un lenguaje común en el enlace de comunicaciones.
- **Compatibilidad con equipos de conmutación.** El crecimiento del uso de las tecnologías de transmisión digital ha influido en la utilización de tecnología de conmutación digital común.
- **Seguridad.** Las señales digitales son más fáciles de proteger. Comparado con las señales analógicas, el proceso de encriptar y descifrar señales digitales es mucho más eficiente y efectivo.
- **Economía.** Las dramáticas mejoras en la tecnología de circuitos integrados y en los microprocesadores permiten seguir manteniendo a precio razonable los sistemas digitales complejos.
- **Flexibilidad.** El procesamiento digital permite introducir, modificar, reconfigurar y manipular de diversas formas las señales de los mensajes mediante software, dando a los diseñadores y proveedores una gran flexibilidad.

Codificación de fuente

Modulación por codificación de pulsos (PCM)

PCM (Pulse-Code Modulation) es una técnica de codificación convencional que convierte la forma de onda de voz analógica en una secuencia de números binarios. La figura 4.2 muestra un diagrama de un codificador/decodificador PCM (CODEC), diseñado para convertir la señal eléctrica analógica de voz en secuencias de 8 bits y reconstruir la señal analógica en el lado del receptor a partir de la cadena de bits. A la entrada del codificador, una señal de voz que se asume nominalmente con un ancho de banda de 4

kHz, se pasa primero por un filtro paso banda con un ancho de banda de 300 a 3400 Hz. Esta salida limitada en banda se ajusta en ganancia de forma tal que el valor máximo de la onda caerá 3dB abajo del nivel máximo que puede ser manejado por el codificador. Esta señal filtrada y ajustada en ganancia se introduce a un tomador de muestras. El propósito del tomador de muestras es determinar la amplitud instantánea de la señal de voz a una tasa de Nyquist de 8000 muestras por segundo, dos veces la frecuencia nominal de la voz. Siempre que se tomen muestras a esa tasa, la señal original puede recobrase sin distorsión.

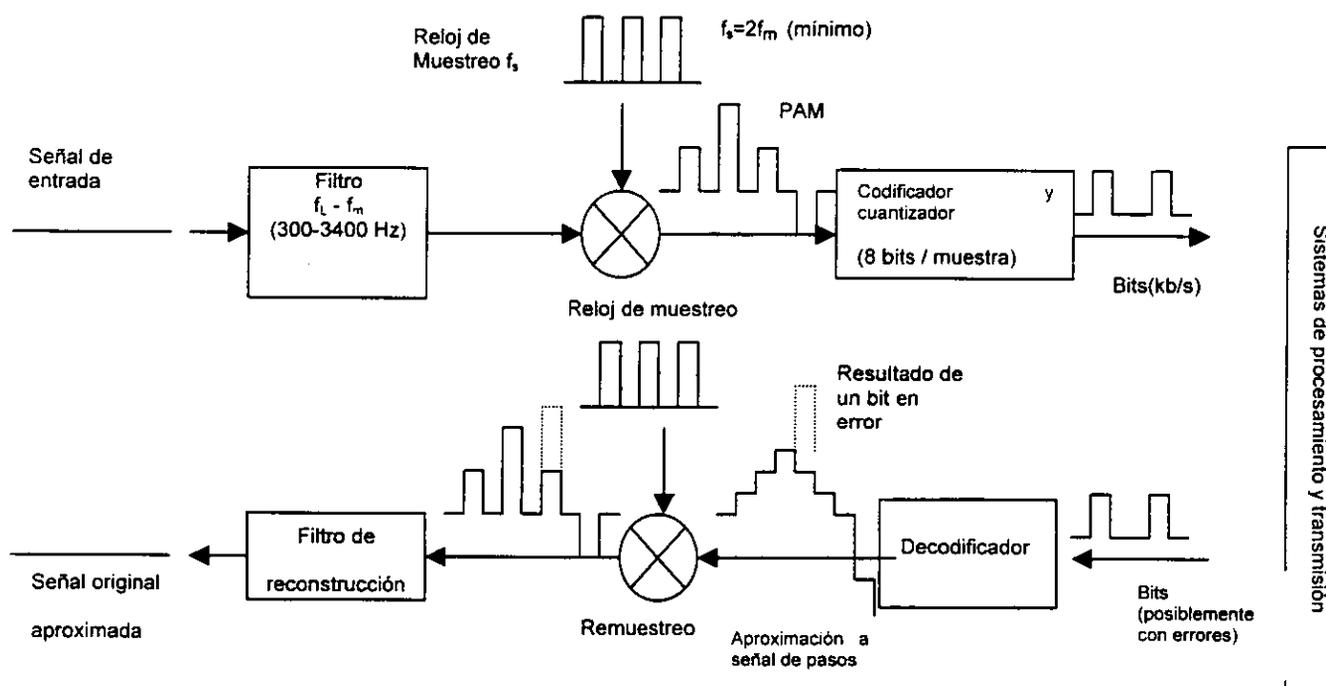
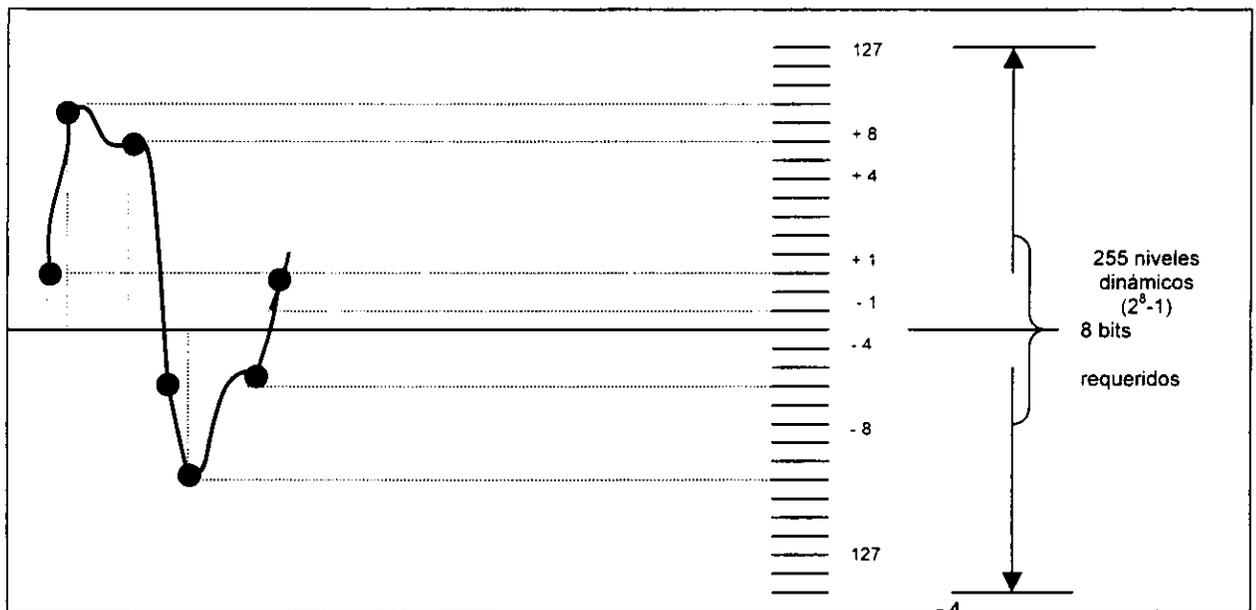


Figura 4.2. Decodificador / Codificador PCM

Refiriéndonos a la figura 4.2, la salida del tomador de muestras es modulada por amplitud de pulsos (PAM), cada pulso ocurre cada $125\mu s$. La amplitud del pulso iguala la amplitud instantánea de la forma de onda analógica en el instante que se toma la muestra. La señal PAM se convierte después en una señal PCM al procesarla en un cuantizador que se muestra en la figura 4.3. El rango de la amplitud ocupado por la señal, llamado rango dinámico, se divide en varios niveles de cuantización, en los sistemas telefónicos se utilizan 256 niveles. Cada muestra PAM se compara con estos niveles, y muestra por muestra, a cada amplitud de pulso se le asigna el nivel más cercano a la amplitud de la muestra. Cada uno de estos niveles se identifica por un número representado por un código binario de 8 bits. Las

palabras obtenidas de muestras sucesivas se transmiten en forma serial hasta el destino. En el receptor, cada palabra sucesiva de 8 bits se convierte en un pulso cuya amplitud es especificada por el valor de la palabra. A la salida del decodificador se tiene una secuencia de pulsos PAM (o bien una señal escalonada) que sigue la forma de onda de la señal analógica original. Esta señal se remuestra con un pulso lo suficientemente estrecho como para minimizar el efecto de retén de orden cero que tiende a causar un efecto de caída espectral. La salida de este nuevo muestreo se pasa a través de un filtro paso bajas, el cual produce una replica de la señal original.



Muestra	Nivel decimal	Binario	Palabra de código
1	+ 3	0	0000011
2	+10	0	0001010
3	+ 9	0	0001001
4	- 6	1	0000010
5	- 2	1	0000110
6	- 1	1	0000001
7	+ 3	1	0000011

Figura 4.3. Cuantización PCM

En el proceso de cuantización existen errores debido a que en el caso general la amplitud asignada al código binario no es exactamente la amplitud del pulso. Como el receptor reconstruye la señal basado en las muestras codificadas existe una discrepancia entre la señal original y la reconstruida llamado error de cuantización. Puede ser considerado como un tipo de ruido y llamado por lo tanto ruido de cuantización.

El ruido de cuantización depende de la señal pero en general es proporcional al cuadrado de la distancia entre los niveles de codificación adyacentes. Por lo que mientras más niveles se tengan el ruido de cuantización es menor. De forma inversa al reducir los niveles de cuantización y por lo tanto el tamaño de la palabra binaria, el ruido de cuantización se incrementa. Si el rango de las amplitudes de las señales que serán codificadas se divide en $L=2^B$ niveles, B bits serán necesarios para representar cada muestra. Si consideramos una onda sinusoidal cuya amplitud ocupa todo el rango de L niveles, la razón potencia señal a ruido S_{max} a N_Q es:

$$\frac{S_{max}}{N_Q} = \frac{3}{2} L^2 = \frac{3}{2} \cdot 2^{2B} \dots\dots\dots(4.1)$$

En las aplicaciones de telefonía, donde el tono de prueba cae 3dB debajo de la amplitud máxima de la señal, la razón señal a ruido de cuantización del tono de prueba es:

$$\frac{S_{max}}{N_Q} = \frac{3}{4} L^2 = \frac{3}{4} \cdot 2^{2B} \dots\dots\dots(4.2)$$

Como el ruido de cuantización depende del tamaño del paso entre los niveles, un cuantizador uniforme (PCM lineal) que utiliza pasos iguales causa que el ruido de cuantización tenga el mismo nivel para señales de baja y alta amplitud.

Multiplexación por división de tiempo (TDM)

La multiplexación por división de tiempo (TDM, Time-Division Multiplexing) se utiliza para combinar señales digitales codificadas en una señal compuesta con una tasa de transmisión mayor o igual a la suma de las tasas de transmisión de entrada. La multiplexación puede ser por separación de carácter o por separación de bit de acuerdo a la codificación de fuente utilizada. Las entradas digitales pueden ser una combinación de señales de voz, datos y video. Si cada señal de entrada al multiplexor se ha generado de la misma fuente o de fuentes con relojes de fase coherente la multiplexación es síncrona. Técnicas de inserción de pulso se utilizan para combinar señales digitales asíncronas. Además de combinar las entradas de codificadores digitales, los multiplexores deben agregar información sobre la

forma de organización de los marcos en la cadena de bits de salida. Esta información consiste en un patrón de bits conocido que el multiplexor es capaz de reconocer. Dicho patrón define el inicio y fin de cada marco en el tiempo. Un marco está formado por muestras secuenciales de cada n entradas, más la información de sincronización.

Las técnicas TDM utilizadas en aplicaciones comerciales están organizadas en una jerarquía bien definida. Existen dos jerarquías TDM básicas en el mundo. La jerarquía de portadora-T (DS1 (Digital Signal 1 Level (1.54 Mbps)), DS3 (Digital Signal 3 Level (45 Mbps)), etc.) se utiliza principalmente en Norteamérica y la jerarquía europea (CEPT) utilizada en Europa y Sudamérica. Sistemas similares se utilizan en otras partes del mundo. La Figura 4.5 resume las tasas de transmisión y la organización de los canales en cada uno de los niveles de las jerarquías más importantes.

Jerarquía Norteamericana				Jerarquía Europea			
Nivel	Número de circuitos de voz	Construcción equivalente	Tasa de bits (Mbs)	Nivel	Número de circuitos de voz	Construcción equivalente	Tasa de bits (Mbs)
DS1	24	24 x voz	1.544	E1	30	30 x voz	2.048
DS1C	48	2 x DS1	3.152	E2	120	4 x E1	8.448
DS2	96	4 x DS1	6.312	E3	480	4 x E2	34.368
DS3	672	7 x DS2	44.736	E4	1920	4 x E3	139.264
DS4	4032	6 x DS3	274.176	E5	7680	4 x E4	565.148

Figura 4.5. Jerarquías norteamericana y europea

El primer nivel en la jerarquía norteamericana se llama DS1, emplea una tasa de transmisión de 1.544 Mbps. Como se muestra en la figura 4.6, esta señal puede contener hasta 24 señales de voz o datos, cada una utilizando 64 kbs. El marco DS1 utiliza 24 ranuras de 8 bits, cada una reservada para una señal PCM de voz o datos. Por lo que el marco contiene 192 bits de información más el bit 193 para la delimitación del marco. En la operación normal de un DS1, el bit menos significativo (BMS) de cada ranura se utiliza cada sexto marco para señalización. El tiempo de marco es de 125 μ s, consistente con la tasa de muestreo estandarizada de 8000 Hz.

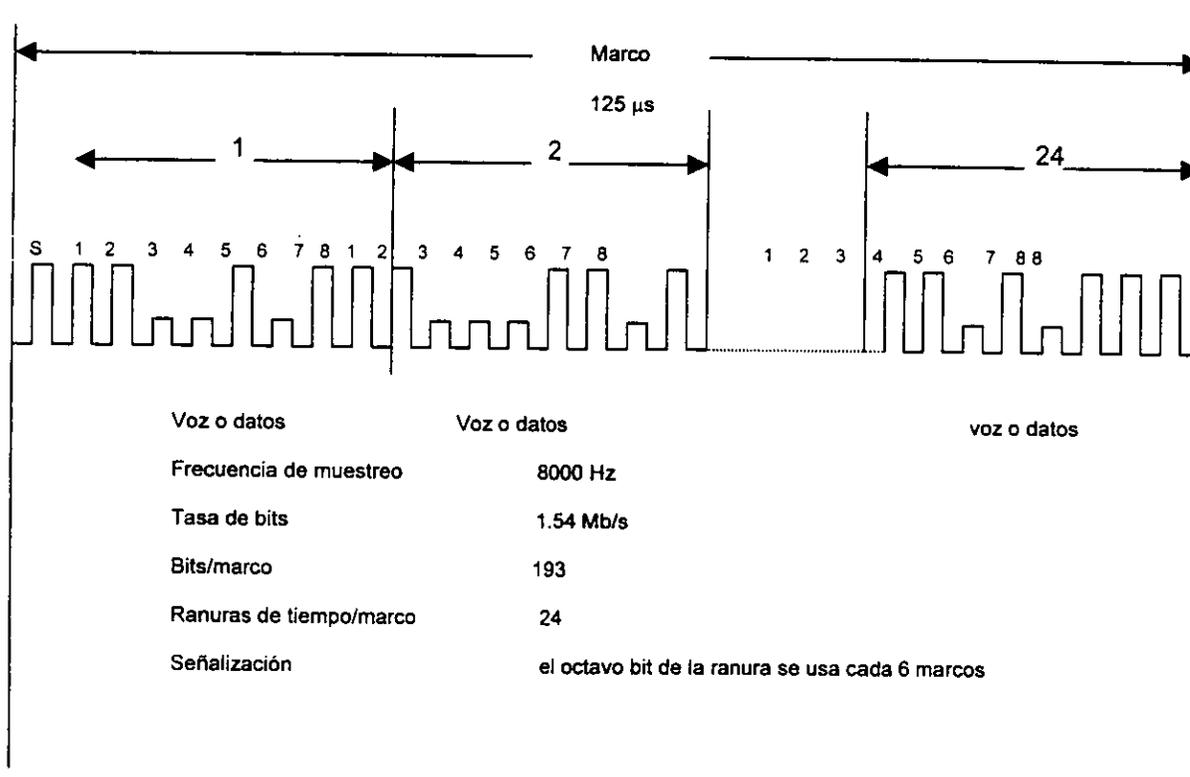


Figura 4.6. Primer nivel en la jerarquía norteamericana DS1.

La figura 4.7 muestra las interconexiones típicas entre los niveles de la jerarquía norteamericana.

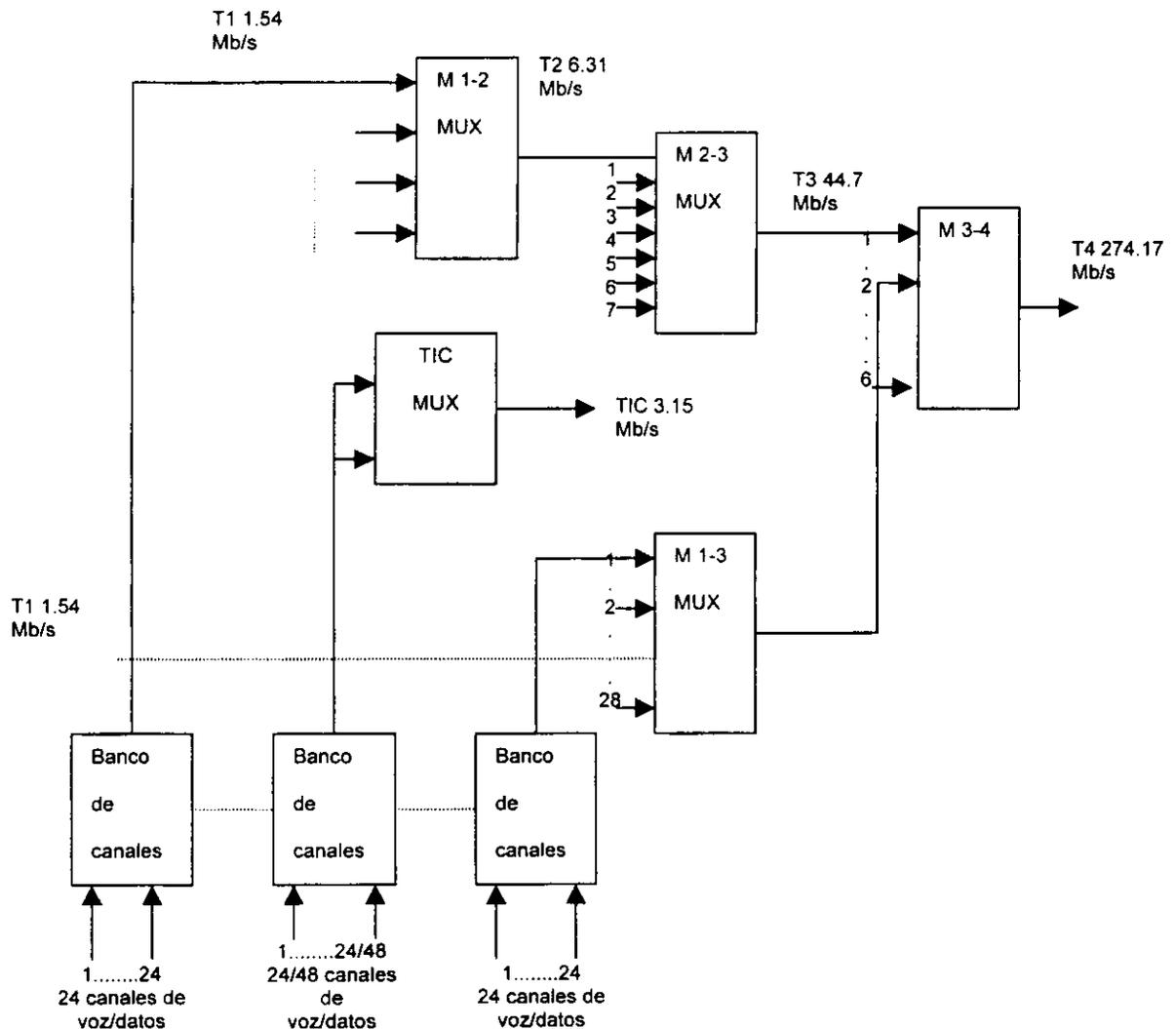


Figura 4.7. Jerarquía digital norteamericana

Los bloques etiquetados con M son multiplexores de alto nivel. Obsérvese que las tasas de transmisión para todos los niveles altos son ligeramente más grandes que la suma de las tasas de entrada. El incremento en la tasa representa los bits adicionales para manejar las funciones inserción de pulsos para la transmisión asíncrona.

El primer nivel en la jerarquía europea utiliza una tasa de transmisión de 2.048 Mb/s y es llamada E1 (ETSI Level 1 Digital Carrier Trunk (2.048 Mbps)). La figura 4.8 muestra el marco estándar PCM. Nótese que existen 32 ranuras de 8 bits cada una utilizando 125 μ s del marco. Sólo 30 de estas ranuras de 8 bits

se utilizan para la transmisión de señales de voz o datos esencialmente de la misma forma que en el DS1. El marco E1 utiliza una ranura para la comunicación de información de señalización para los 30 canales. Los bits extra se ocupan para las funciones de inserción de pulsos de sincronización.

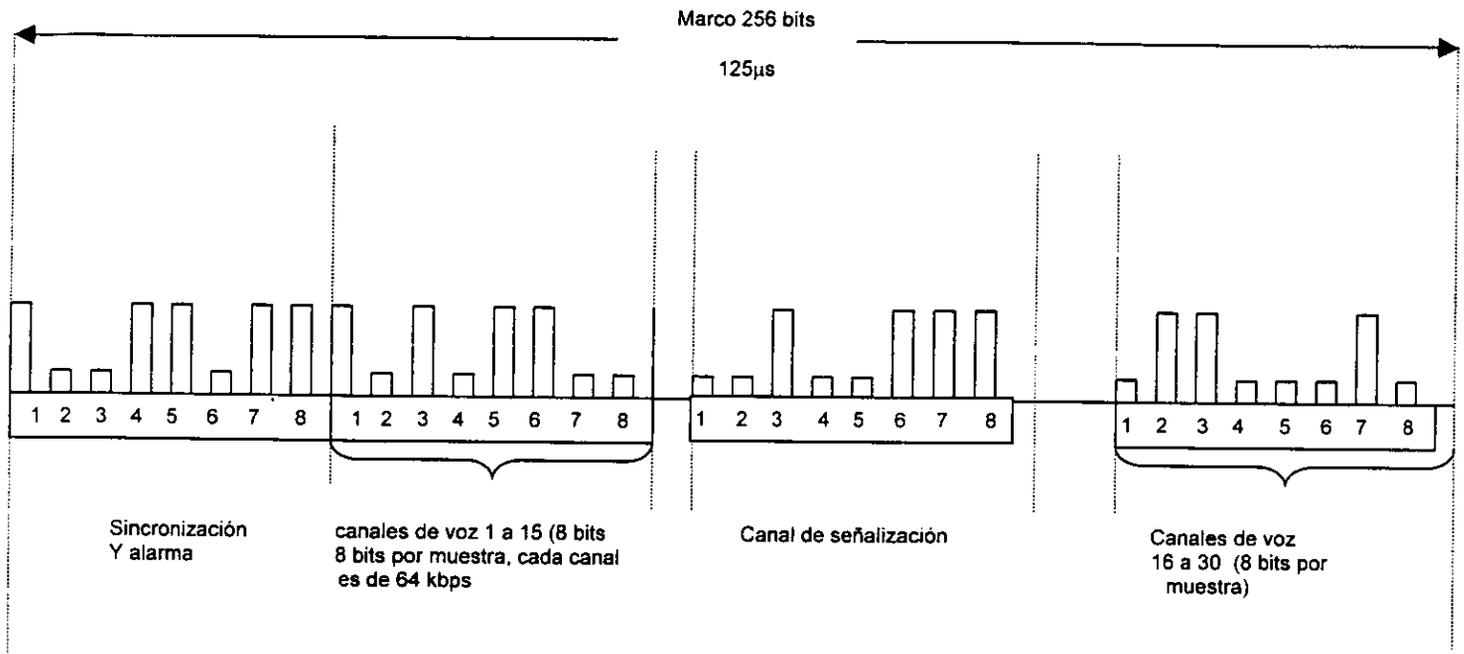


Figura 4.8. Organización del primer nivel de la jerarquía europea

Técnicas de Modulación Digital

La función de un modulador digital es aceptar una cadena digital y modular esta información en una portadora sinusoidal de forma adecuada para su transmisión en un canal de radiofrecuencia. Típicamente esto se logra modulando la amplitud, la fase o la frecuencia de la portadora para los valores binarios (o M-arios) de los datos. La portadora modulada se transmite después a través de un canal RF, donde será afectada por el ruido, lo que resulta en errores en los datos demodulados. La función del demodulador es aceptar la portadora modulada y por medio de decisiones binarias (o m-arias) reconstruir la cadena de bits original.

Existen dos formas básicas para el proceso de demodulación. La primera es la detección coherente, la cual requiere conocer la fase de la portadora dentro de la señal recibida. La segunda es la detección no

coherente, la cual hace las decisiones sin conocer la fase de la portadora de la señal recibida. Para visualizar la diferencia entre la detección coherente y no coherente, considérese el diagrama de vectores de la figura 4.9 para un sistema de modulación en amplitud. La portadora, representada por el vector C , es afectada por el vector de ruido N . Si el demodulador puede rastrear los cambios aparentes de la fase en la portadora recibida y desarrollar una portadora de referencia de fase coherente, la detección coherente puede efectuarse. Nótese que la componente total del ruido puede descomponerse en la componente en fase (N_i) y la componente en cuadratura (N_q). Si el receptor es colocado en la fase de la portadora recibida, sólo se conoce la amplitud relativa de la portadora, y por lo tanto sólo el ruido en fase (N_i) puede afectar a la señal y causar errores. La componente en cuadratura (N_q) modifica simplemente la fase aparente de la portadora, un cambio que el receptor ignora. En la detección no coherente, el receptor no tiene forma de conocer la fase de la señal y por lo tanto el vector total del ruido N afecta y modifica la amplitud aparente de la portadora cuando pasa por el canal. Por lo que lo que ambas componentes del ruido afectan la salida ocasionando un deterioro en el desempeño.

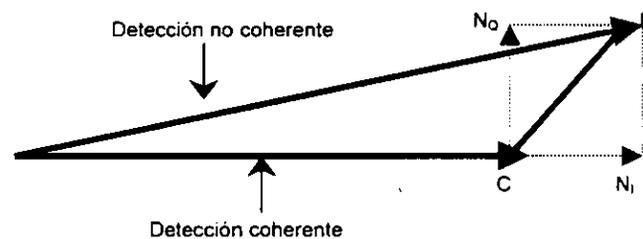


Figura 4.9. Componentes de la portadora y el ruido en un sistema de modulación

La modulación digital de una portadora sinusoidal puede lograrse en 3 formas distintas:

- Conmutación de amplitud (OOK)
- Conmutación de frecuencia (FSK)
- Conmutación de fase (PSK)

Nos concentraremos en la modulación PSK por ser la más utilizada en las transmisiones satelitales

Phase-shift keying (PSK)

La forma más simple de PSK es la PSK binaria (BPSK), en donde los datos digitales modulan una portadora sinusoidal, como se ilustra en la figura 4.10a. La salida modulada puede asumir uno de dos posibles estados en su fase (0 y π) durante cada intervalo de bit (T_b), representado un 0 o un 1 binario.

Esta forma de modulación es, de hecho, igual a la modulación en amplitud con portadora suprimida y a una señal moduladora con valores positivos y negativos (para el 1 y el 0 binarios).

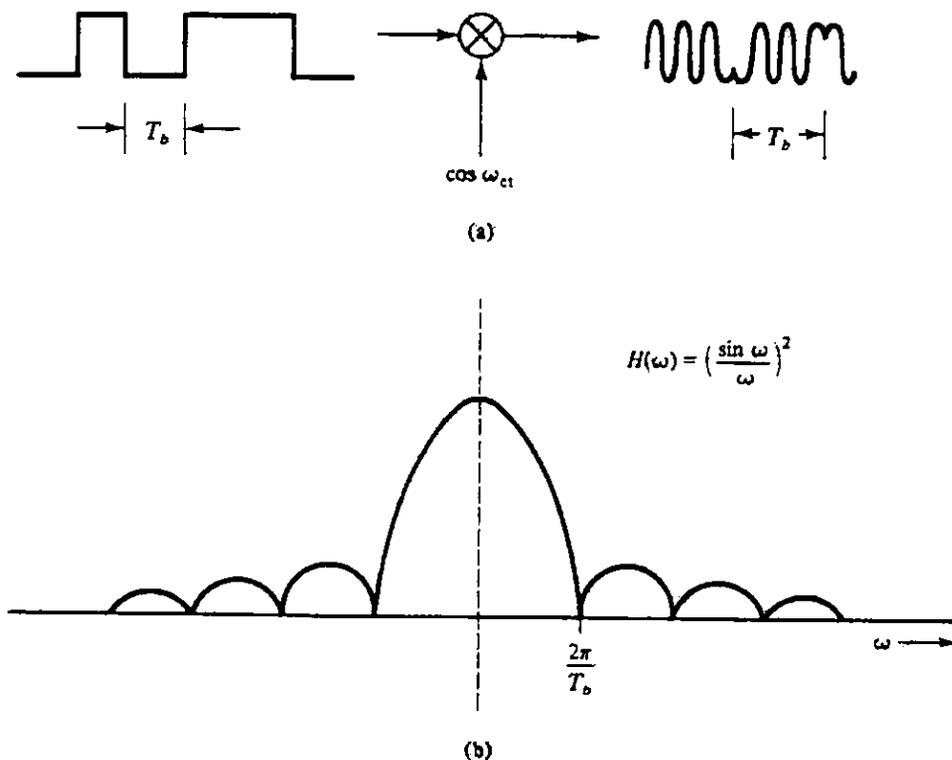


Figura 4.10. BPSK a) Dominio del tiempo b) Dominio de la frecuencia

En dicha modulación la amplitud de la portadora se vuelve negativa durante los segmentos negativos de la señal. Esto corresponde a la fase de π radianes de la portadora como se describe en la terminología BPSK. En el dominio del tiempo, la portadora modulada aparece como una envolvente sinusoidal constante, con cambios rápidos de fase que ocurren a una tasa llamada tasa de conmutación que depende de la tasa de transmisión de datos. En el dominio de la frecuencia, la densidad espectral de potencia de la portadora modulada varía de acuerdo con

$$H(w) = \left| \frac{\text{sen } w}{w} \right|^2 \dots\dots\dots(4.3)$$

Como se ilustra en la figura 4.10b, la mayoría de la energía de la señal modulada esta contenida en el lóbulo mayor, el ancho depende del tiempo de bit o la tasa de conmutación. El ancho de banda de la señal modulada esta representado por el lóbulo mayor. Los lóbulos menores del espectro se repiten indefinidamente, con amplitudes más pequeñas cada vez, decrementándose a una tasa de $1/f^2$. Por lo tanto, como en FM, el espectro de una señal PSK modulada es teóricamente infinito. En BPSK, limitando el ancho de banda a aproximadamente la tasa de transmisión de bits, la energía en los lóbulos laterales se pierde, causando una disminución despreciable en el desempeño. En la práctica, se utilizan otras técnicas de modulación más sofisticadas para incrementar la potencia contenida en el lóbulo mayor y reducir la contenida en los lóbulos laterales. Esto se logra procesando la señal digital de forma tal que sus cambios sean menos abruptos, lo que resulta en transiciones más suaves en la fase. Esto permite limitar el ancho de banda esencial de la señal y provee una operación más eficiente. La técnica más utilizada para lograr esto se llama modulación de conmutación mínima (MSK).

Considérese la señal BPSK en el dominio de la fase como se ilustra en la Figura 4.11.

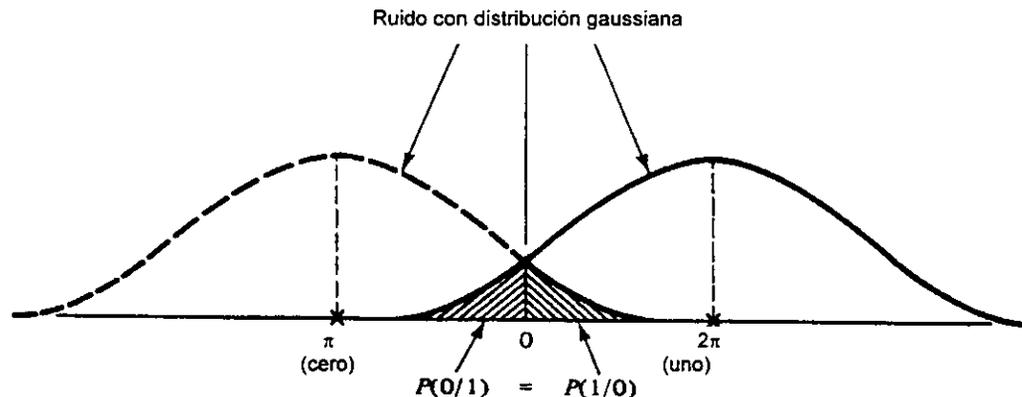


Figura 4.11. PSK binaria en el dominio de la fase

La fase puede asumir uno de dos estados posibles, representando un 1 o un 0 binario. La transmisión de la portadora PSK modulada a través del canal es perturbada por ruido y puede causar errores en la señal demodulada. La figura 4.11 muestra el efecto del ruido en la fase de la portadora. Si asumimos que el demodulador ha adquirido una referencia coherente, la componente en cuadratura del ruido no puede afectar la percepción de la fase de la señal del receptor, ya que sabemos que la verdadera fase se debe encontrar en el eje x . Por lo tanto, solo el ruido en fase puede causar que la fase cambie de π a 2π . Este ruido puede, en raras ocasiones, causar que la fase de la portadora se detecte de forma incorrecta, lo

que se exhibe como un bit en error. Asumiendo que el efecto del ruido en fase tiene el comportamiento de una distribución gaussiana, como se muestra en la figura 4.11, la probabilidad de que ocurra un error se encuentra en las regiones sombreadas bajo la curva. Para expresar esta probabilidad de modo significativo, debemos relacionarla con alguna figura de mérito, tal como, la razón señal a ruido del canal de RF. Como los demoduladores digitales realizan una decisión en cada intervalo de tiempo de bit, independientemente de los tiempos de bit adyacentes, se puede demostrar que la tasa de bit en error es una función de un tipo de razón señal a ruido conocido como razón de densidad señal a ruido, E_b / N_0 . Efectuaremos un análisis en los diferentes tipos de razones señal a ruido. Primero, el ruido termal es una función de la temperatura de ruido y el ancho de banda; esto es,

$$N = kTB = N_0 B \dots\dots\dots(4.4)$$

Donde k , es la constante de Boltzmann. T es la temperatura en kelvins, y B es el ancho de banda en hertz. Esto se representa como $N_0 B$, donde N_0 es la densidad de potencia del ruido, que es la potencia normalizada a 1 Hz de ancho de banda. En la práctica, medimos la razón señal a ruido en el ancho de banda completo B . También utilizamos el término razón de densidad portadora a ruido, C / N_0 , la cual está relacionada con la razón portadora a ruido, por la fórmula

$$\frac{C}{N} = \frac{C}{N_0 B} \dots\dots\dots(4.5)$$

Lo anterior se puede desarrollar en términos de energía de bit E_b y la tasa de bit R_b , como

$$C = \frac{E_b}{T_b} = E_b R_b \dots\dots\dots(4.6)$$

donde T_b es el intervalo de tiempo de bit, que es el recíproco de R_b , substituyendo 4.6 en 4.5, la expresión resultante es

$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{R_b}{B} \dots\dots\dots(4.7)$
--

Esto se simplifica a E_b / N_0 para el caso del ancho de banda esencial mencionado anteriormente, esto es cuando la tasa de bits iguala el ancho de banda.

En los sistemas reales, primero se mide C / N y se convierte a E_b / N_0 utilizando la ecuación 4.6.

Refiriéndonos a la figura 4.11 se puede demostrar que el eje horizontal (la fase) es una medida del voltaje de muestreo y el punto entre π y 2π esta representado por $(E_b / N_0)^2$ de donde se tiene que la probabilidad de encontrar un bit en error está dada por

$$P_b = \frac{1}{2} \left[2 \int_{\pi}^{\pi} e^{-v^2} dv \right] \dots \dots \dots (4.8)$$

Donde $u = (E_b / N_0)^{1/2}$. La integral entre corchetes se conoce como la función de error complementario y se encuentra tabulada en varios libros de estadística e ingeniería. La figura 4.12 muestra una gráfica de P_b vs. E_b / N_0 del desempeño teórico del PSK coherente binario. El ancho de banda típico ocupado por la señal BPSK modulada es de 1.1 a 1.2 veces la tasa de bit, aproximadamente.

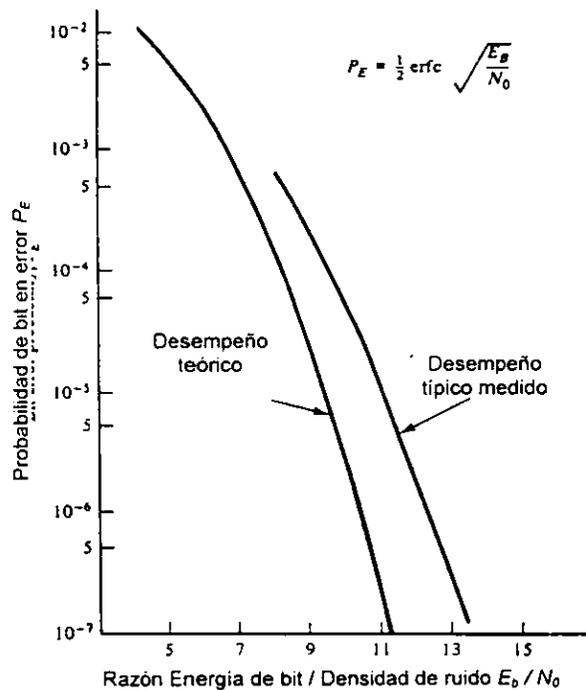


Figura 4.12. Desempeño práctico y teórico de la BPSK y la QPSK

Por debajo de tasas de error de 10^{-7} , se recomienda reducir P_b por un factor de 10 por cada incremento de 1 dB en E_b / N_0 .

Una utilización más eficiente del ancho de banda de radiofrecuencia se puede lograr sin degradar la tasa de error utilizando un PSK cuaternario o QPSK como se ilustra en la Figura 4.13.

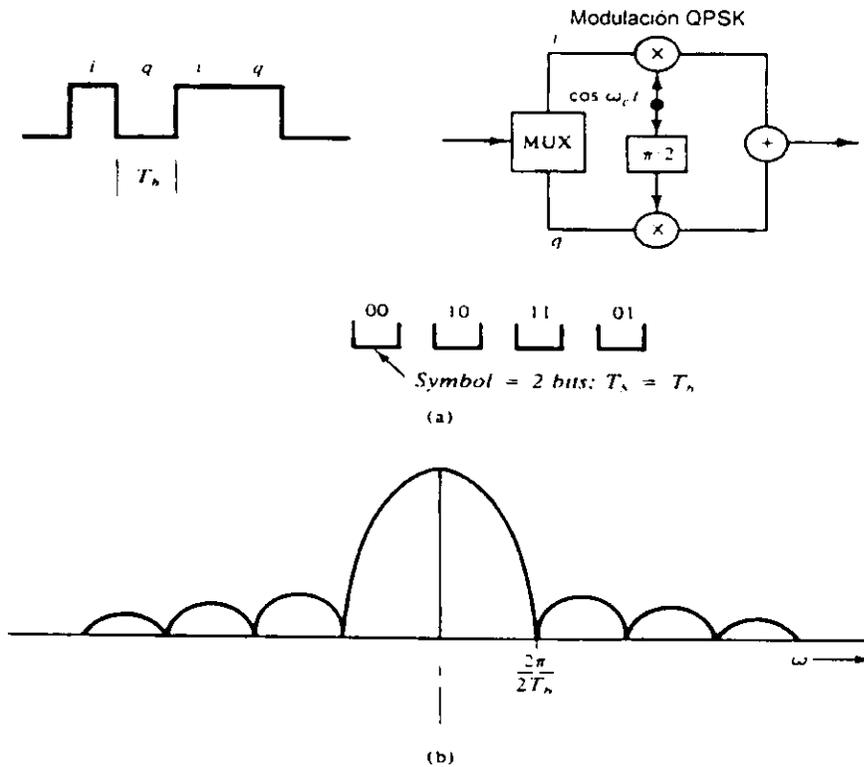


Figura 4.13. PSK cuaternario.

Una señal QPSK modulada se construye operando dos moduladores BPSK en cuadratura. Los bits pares de la señal de entrada son canalizados al canal i (canal en fase) y los bits impares se envían al canal q (cuadratura). La frecuencia de la portadora se alimenta directamente en el canal i del modulador pero con un cambio en fase de 90° antes de entrar al canal en cuadratura del modulador. Las salidas de los dos canales se suman después en forma de una señal QPSK. En el dominio de la frecuencia, el espectro de densidad de potencia toma la forma $[(\sin w) / w]^2$. Sin embargo el ancho de banda esencial de una señal QPSK es exactamente la mitad del de la señal BPSK a la misma tasa de bit. Esta reducción en el ancho de banda es resultado del hecho de que la tasa de conmutación a la salida del modulador (la tasa de símbolos) ha sido reducida por un factor de 2 en la QPSK.

La figura 4.14 muestra los cuatro estados de la fase que se pueden tener en una señal QPSK. Nótese que cada estado de la fase depende de un par de bits.

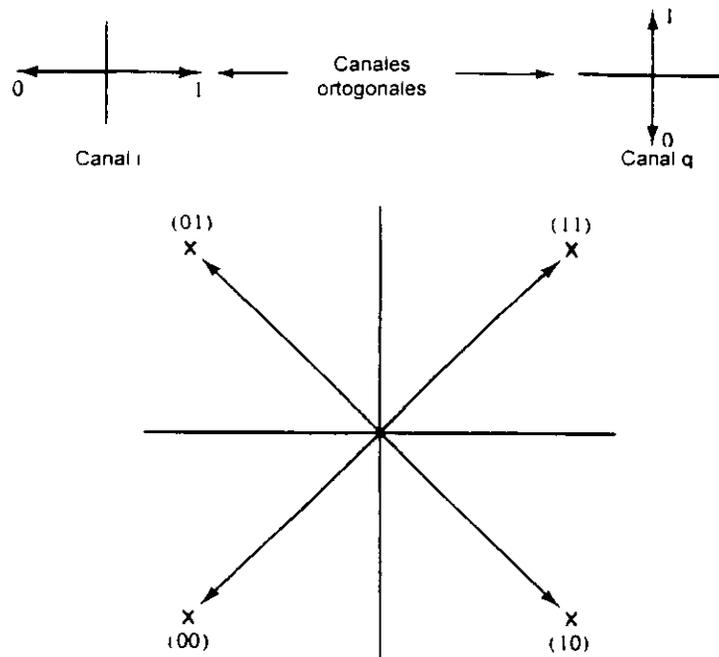


Figura 4.14. Fases de generación en la QPSK

Visto de forma vectorial, los bits del canal i operan en el eje horizontal y en las fases 0 y π radianes, mientras que los bits del canal q operan en el eje vertical y en las fases $\pi/2$ y $3\pi/2$. La suma vectorial de la fase del canal i y del canal q produce uno de los cuatro estados mostrados en el diagrama de fase. Como los canales i y q son ortogonales entre sí, la ventaja de la detección coherente se puede utilizar en cada canal de forma independiente. Esto significa que en el canal i solo una componente en fase del ruido puede causar un bit en error mientras que en el canal q sólo una componente en cuadratura puede afectarlo, por lo que la probabilidad de bit en error de cualquier canal es idéntica a la que se tiene en la operación del BPSK a la tasa de símbolos correspondiente y la probabilidad de bit en error es idéntica.

Extendiendo esta idea un sistema de 8 estados en fase se muestra en la figura 4.15. En este caso podemos obtener una reducción mayor en la tasa de conmutación y por lo tanto en el ancho de banda ocupado. Esto se puede lograr ya que cada estado ahora depende de un grupo de 3 bits. Por lo tanto el ancho de banda requerido ahora se reduce en un factor de 3 con respecto a la BPSK. Sin embargo ya no es posible mantener la característica de ortogonalidad del QPSK. Como resultado, se requiere de potencia adicional para mantener la misma tasa de bits en error. De hecho comparado con la QPSK la 8-

PSK ofrece una reducción del ancho de banda en un factor de 3/2 pero requiere más del doble de potencia en la portadora.

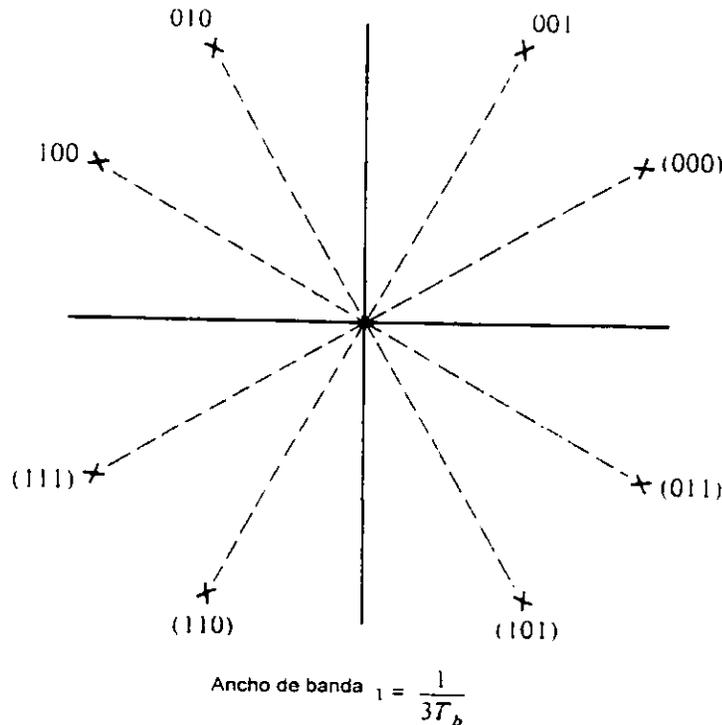


Figura 4.15. 8-PSK

La simple expresión relativa de la tasa de bit en error de la ecuación 4.9 no es aplicable para el caso del 8-PSK. Los patrones de bits en este caso se deben seleccionar de forma tal que los grupos adyacentes de 3 bits difieran sólo en 1 bit, esto se conoce como el código de Gray. Para el caso del 8-PSK la expresión es:

$$P_b = \frac{1}{3} FEC \left[\frac{3\bar{E}_b}{N_0} \text{sen} \frac{\pi}{8} \right] \dots \dots \dots (4.9)$$

donde FEC es la función de error complementario

El 8-PSK ha incrementado su importancia en la transmisión satelital, debido a la utilización de un bit adicional para la corrección de errores. Tal aplicación puede proveer alta calidad (probabilidad de error del orden de 10^{-10}) especialmente cuando el satélite compite con cables de fibra óptica. En el campo se ha comprobado la viabilidad de este tipo de sistemas, transmitiendo a 150 Mbs a través de enlaces satelitales actuales utilizando transpondedor de 72 MHz. Un ejemplo de tal desempeño se muestra en la

figura 4.16, medido entre dos estaciones terrenas de la red INTELSAT. También se muestra el desempeño teórico de un 8-PSK con un mapeo de código Gray, nótese que la diferencia que se observa es debida al código, y se le designa como *ganancia del código*, exhibiendo un valor de alrededor de 3dB. Se debe apreciar que dicha ganancia es obtenida a expensas del incremento del ancho de banda, debido a que la tasa de la señal con código de corrección de error codificado es de 140 Mbs mientras que una señal 8-PSK sin codificar permitiría hasta 180 Mbs.

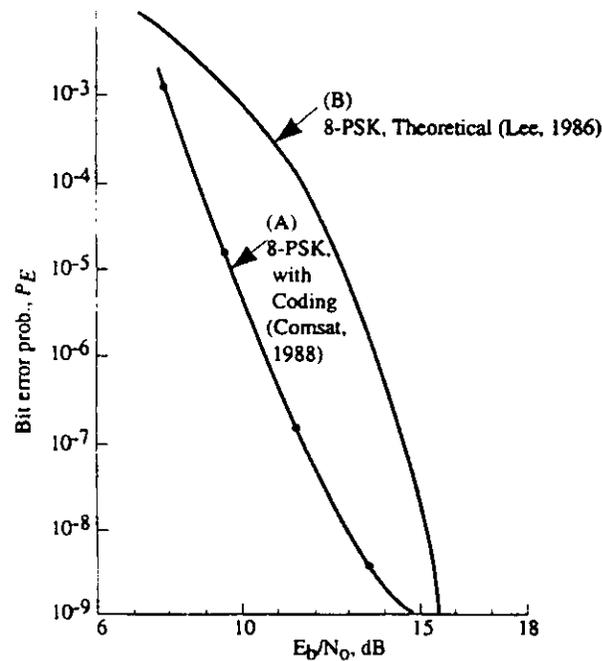


Figura 4 16. Desempeño práctico y teórico del 8-PSK

Una implementación general de un modulador y demodulador de PSK se muestra en la figura 4.17. Los datos de entrada se alimentan a un filtro especialmente diseñado que precede al modulador. Este filtro trata las ondas de pulso para minimizar el ancho de banda de la señal modulada. La señal PSK se crea multiplicando la salida del filtro por una portadora sinusoidal. En el receptor, la señal PSK se pasa a través de un filtro pasobanda con un ancho de banda de aproximadamente 1.1 a 1.2 veces la tasa de conmutación. Una portadora de referencia coherente se obtiene de la señal original a través de un ciclo de recuperación de portadora de fase fija. La referencia coherente de fase se multiplica por la señal modulada, produciendo una señal que contiene los símbolos transmitidos. De las transiciones entre estos

símbolos un reloj de datos, derivado de un segundo ciclo de fase fija, se utiliza para muestrear la señal para reconstruir la cadena de datos original.

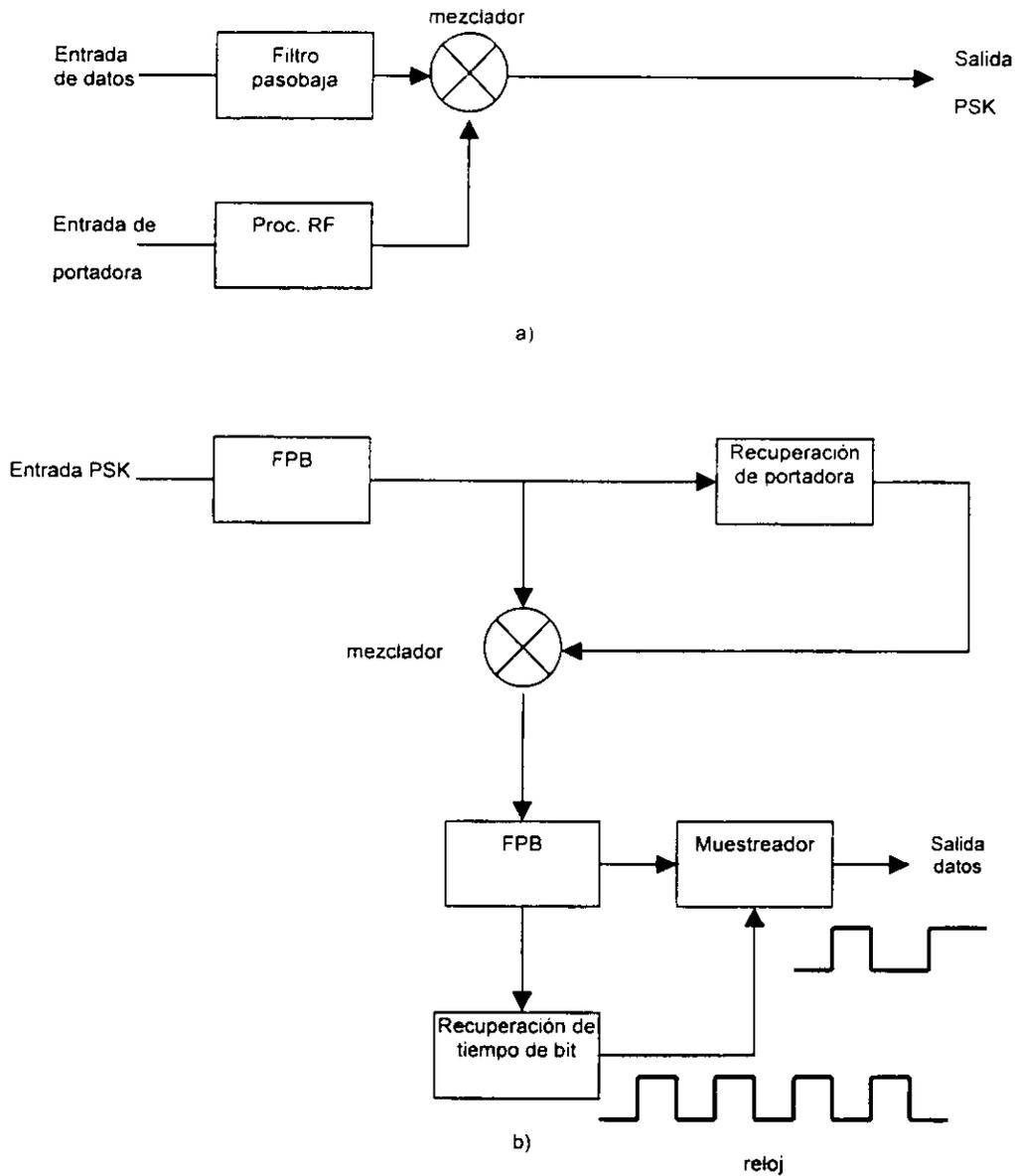


Figura 4.17. Implementación de un MODEM PSK.

Figuras de Mérito en la Transmisión Digital

En la práctica debemos tomar medidas de los datos reales en intervalos de tiempo limitados. En esta sección se revisan las figuras de mérito utilizadas para describir la calidad de las comunicaciones digitales, las cuales están respaldadas por el análisis de los errores digitales en la señal.

En los sistemas actuales, existen varias fuentes de errores, incluyendo:

- Ruido térmico (En el canal de radiofrecuencia)
- Errores de hardware (en el equipo)
- Errores de software (en programas que controlan el equipo)
- Interferencia (de origen artificial y natural)
- No linealidades y distorsiones

El tratamiento teórico a menudo se aplica al ruido térmico y su relación con los errores de bit. En los sistemas reales debemos analizar los errores ocasionados por otras fuentes tales como fallas intermitentes en el hardware y el software, las no linealidades y las distorsiones de frecuencia y los efectos de la interferencia artificial y natural. Estos errores no son fáciles de predecir por la teoría, la tasa de bits en error se calcula de acuerdo a

$$\text{TBE (Tasa de bits en error)} = \frac{\left(\sum_i e \right)}{RT_M} \dots\dots\dots(4.10)$$

Donde e , es un bit en error en una cuenta i , R es la tasa de bits por segundo y T_M la medida del intervalo en segundos. Esto es equivalente a la razón del número de errores observados divididos por el número de bits del cual se está tomando la medida. Debido a la naturaleza probabilística del proceso de generación de errores, el significado de las mediciones de la tasa de bits en error en la proyección del desempeño del sistema depende del intervalo de tiempo en el que se está midiendo y el número de errores observados en ese intervalo. Mientras más largo es el periodo y más errores son detectados, más cercana será la medida al comportamiento real de la tasa de bits en error del sistema. Una regla simple y útil es que cuando se observan un total de e bits en error en una muestra grande de n (cientos o miles) y la tasa de bits en error esperada es pequeña (menos que 1 en 100) entonces la desviación estándar de e es simplemente \sqrt{e} . Esto permite la determinación inmediata del intervalo de confianza alrededor de e calculando $1.96 \cdot \sqrt{e}$. De forma alternativa, las estimaciones de la tasa de error se obtienen dividiendo entre n .

Si todos los errores fueron ocasionados por el ruido térmico, la TBE por sí sola será una medida suficiente de la calidad de la transmisión digital. Sin embargo, debido a los errores de hardware, software y ocasionados por interferencia, los sistemas reales requieren una medición de error por bloque. Los errores ocasionados por el ruido térmico tienden a distribuirse de forma uniforme con el tiempo, mientras que los errores de hardware, software y de interferencia tienden a ocurrir en ráfagas. Por lo tanto, el concepto de una medida de la tasa de error por bloque, definirá de forma más precisa la naturaleza de los errores.

Los sistemas de información típicamente transmiten los datos en bloques de bits y cada bloque contiene bits para la detección de errores que se utilizan para aceptar o rechazar cada bloque. Los bloques rechazados son usualmente retransmitidos. Una medición de tasa de error por bloque se realiza calculando la razón de bloques en error con respecto al número de bloques observados en el intervalo de medición. Un bloque en error se define como el bloque de bits en donde al menos ha ocurrido un error.

Otro tipo tasa de bloques en error definida por las operadoras de comunicaciones para especificar la calidad de los circuitos de comunicaciones es conocida como *el porcentaje de segundos libres de error*.

Dicho porcentaje se calcula de acuerdo a

$$\%SLE = \frac{T_M - S_E}{T_M} \times 100(\%) \dots \dots \dots (4.11)$$

Donde S_E es el número de segundos durante los cuales al menos ocurrió un error y T_M es el intervalo medido.

La figura 4.18 muestra la sensibilidad de la TBE y de la tasa de bloques en error a la distribución de los errores.

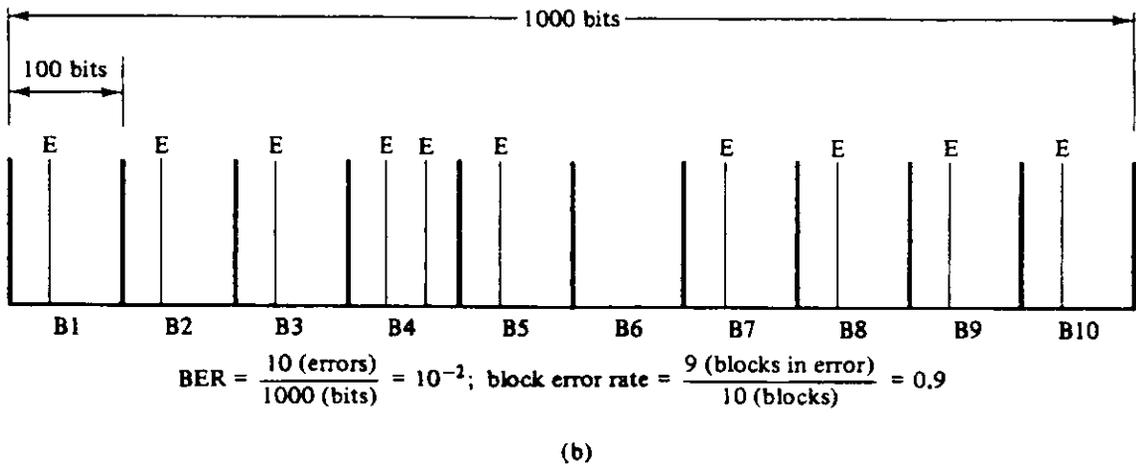
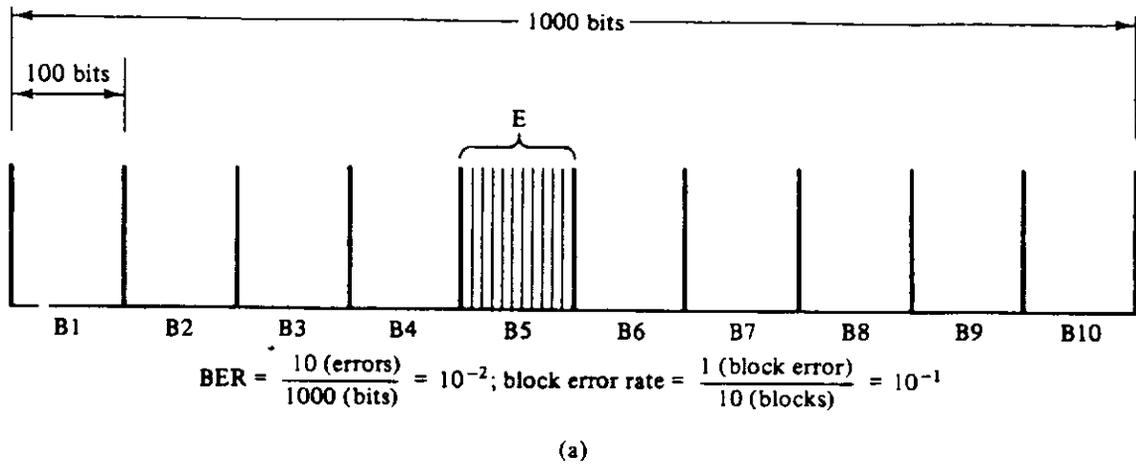


Figura 4.18. Sensibilidad de las definiciones de la tasa de error a la distribución de los errores a) Distribución de ráfaga b) Distribución uniforme

Protocolos de Control de Acceso al Medio

Introducción

Los protocolos de Control de Acceso al Medio (MAC) permiten que las estaciones terrenas localizadas en lugares distintos regulen el movimiento de sus paquetes y administren el ancho de banda de la red de forma tal que los recursos de la misma se utilicen de la forma más eficiente. En los años recientes se ha propuesto o desarrollado una amplia gama de protocolos MAC para diferentes ambientes operativos con distintos requerimientos de usuario. Lo anterior es debido en parte a que los protocolos que son adecuados para algunas aplicaciones no lo son para otras. Todos los protocolos de alto nivel tales como

FTP (File Transfer Protocol), HTTP (Hypertext Transfer Protocol), NV (Network Video) para teleconferencias, TFTP (Trivial File Transfer Protocol), TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), ATM (Asynchronous Transfer Mode) utilizan uno o más protocolos MAC.

Clasificación de los protocolos MAC

Los protocolos MAC para las comunicaciones vía satélite pueden clasificarse de acuerdo a su funcionalidad con respecto a la naturaleza dinámica o estática del canal, el control distribuido o centralizado para la asignación del canal y el comportamiento adaptable del algoritmo de control. A continuación se presenta la siguiente clasificación:

- Protocolos de asignación fija
- Protocolos de asignación bajo demanda
- Protocolos de Acceso Aleatorio
- Protocolos híbridos de acceso aleatorio con reservación
- Protocolos adaptables al medio

Los primeros dos grupos son protocolos libres de contienda ya sea por asignación fija o asignación bajo demanda del canal. Los tres grupos restantes son protocolos orientados a contienda. Una ventaja importante de los protocolos libres de contienda es la capacidad de controlar el retraso del paquete. Este detalle es muy importante para aplicaciones en tiempo real. Si se utiliza la asignación bajo demanda se debe dedicar un canal para señalización. El acceso al canal de señalización es otro problema de acceso. Los protocolos híbridos toman lo mejor de los protocolos de acceso aleatorio y de los basados en TDMA. Los protocolos de acceso aleatorio proveen baja latencia cuando el tráfico es ligero mientras que los protocolos basados en TDMA proveen una alta capacidad de salida cuando el tráfico es elevado.

Protocolos MAC de asignación fija

En los protocolos de asignación fija FAMA, la asignación del ancho de banda del canal a una estación es fija e independiente de la actividad de la estación. Esto se logra dividiendo el ancho de banda en ranuras, cada una asignada a una estación. La asignación de los canales está altamente controlada y no se adapta a los cambios en el tráfico. Los protocolos FAMA se pueden clasificar en protocolos ortogonales como el TDMA y el FDMA o cuasiortogonales como el CDMA. Los protocolos FAMA son las técnicas más

efectivas para redes satelitales compuestas por un pequeño número de estaciones (<10) con patrones de tráfico predecibles y estables.

- **Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA).** Estos sistemas canalizan al transpondedor utilizando varias portadoras. El ancho de banda asociado a cada portadora puede ser tan pequeño como el que requiere un canal de voz único. FDMA puede utilizar transmisión analógica o digital en modo continuo o de ráfaga. En FDMA no se necesita de sincronización o coordinación. Cada estación puede utilizar su propia banda sin interferencias. Sin embargo FDMA es costoso en ancho de banda, especialmente cuando la carga es desbalanceada. Cuando una estación esta inactiva, su parte de ancho de banda no puede ser utilizado por otras estaciones. FDMA también es poco flexible, el agregar nuevas estaciones requiere modificaciones en el equipo.
- **Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA).** TDMA se caracteriza por la utilización de una portadora modulada digitalmente por transpondedor, el ancho de banda asociado a la portadora es todo el ancho de banda del transpondedor. Esto maximiza la tasa de transmisión de bits que soporta dicho transpondedor. La tasa de transmisión de bits es compartida en tiempo entre un número de estaciones de forma tal que la suma del tráfico de información (más los bits de control) entre la estación terrena y el satélite nunca exceda la tasa de la portadora. Sin embargo cada estación terrena debe transmitir su información en ráfaga a la tasa de la portadora y en las ranuras de tiempo preasignadas. Los requerimientos de tiempo que dicho sistema debe cumplir son muy particulares. La ventaja de TDMA es que se utiliza una sola portadora por transpondedor. TDMA ofrece una mayor capacidad de salida pero requiere que las estaciones estén sincronizadas. La mayor desventaja de TDMA es que cada estación tiene un canal fijo tenga o no tenga información que transmitir. En la mayoría de las ocasiones el tráfico es por ráfagas y la asignación fija de canales ocasiona un gasto de ancho de banda. En el TDMA generalizado G-TDMA la asignación de el ancho de banda a la estación es proporcional a la cantidad de tráfico generado por esta.
- **Acceso Múltiple por División de Código (CDMA).** CDMA también utiliza una portadora modulada digitalmente. Sin embargo, cada estación terrena transmite simultáneamente a la tasa más alta posible y cada fuente del mensaje esta codificada de forma única para que el destino deseado pueda recuperar el mensaje utilizando el decodificador correcto. La tasa de la portadora es varias veces la

tasa de la fuente de datos individual y típicamente ocupa todo el ancho de banda del transpondedor.

La principal desventaja de CDMA es su baja capacidad de salida.

Como el interés de este trabajo está orientado hacia las redes de alta velocidad-banda ancha del futuro nos enfocamos a los protocolos basados en TDMA.

Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA).

Se utiliza una sola frecuencia de la portadora cuyo ancho de banda es comúnmente el ancho de banda completo del transpondedor. El ancho de banda es compartido por tiempo entre los usuarios individuales. En este caso la forma de compartir se realiza modulando de forma digital la portadora por medio de QPSK a una tasa R , y compartiendo esta tasa mediante ranuras de tiempo asignadas a las estaciones terrenas de acuerdo a sus necesidades de transmisión. El satélite y la estaciones terrenas funcionan como un "multiplexor digital en el cielo", en el cual las fuentes individuales que constituyen la cadena de bits se originan en cada estación participante. Las tasas de tráfico R_i de cada estación terrena deben ser tales que su suma iguale a la tasa de la portadora R , cuando el sistema se encuentre completamente ocupado. Utilizando una portadora única que ocupe el ancho de banda completo del transpondedor los efectos de interferencia debidos al comportamiento no lineal del transpondedor se eliminan.

El primer tipo de sistema es la implementación clásica TDMA que emplea una sola portadora modulada que ocupa el ancho de banda completo del transpondedor. Este tipo de sistema es el más común en las redes TDMA y es también el más eficiente desde el punto de vista de la capacidad. Existe otro tipo de sistema TDMA que utiliza una fracción del ancho de banda del transpondedor. Puede utilizarse para redes TDMA pequeñas que comparten el ancho de banda del transpondedor con otras portadoras con una configuración FDMA.

El concepto básico de TDMA se ilustra en la figura 4.20. Algunas estaciones en la red utilizan una frecuencia de portadora digital cuyo ancho de banda ocupa el transpondedor completo. El transpondedor se comparte en tiempo por cada estación que transmite su información en ráfagas en la frecuencia de la portadora digital común y a la tasa de transmisión común. Las estaciones reciben información de una fuente continua, comprimida en un intervalo de tiempo corto y transmite en ráfagas de alta velocidad en el intervalo correcto de tiempo de tal forma que las ráfagas de todas las estaciones llegan al satélite en forma secuencial. Todas las ráfagas recibidas de las estaciones son retransmitidas desde el satélite a

todas las estaciones. La sincronización se logra definiendo una estación de referencia cuya información de temporización y posición de ráfaga sirven como referencia a todas las otras estaciones para propósitos de temporización.

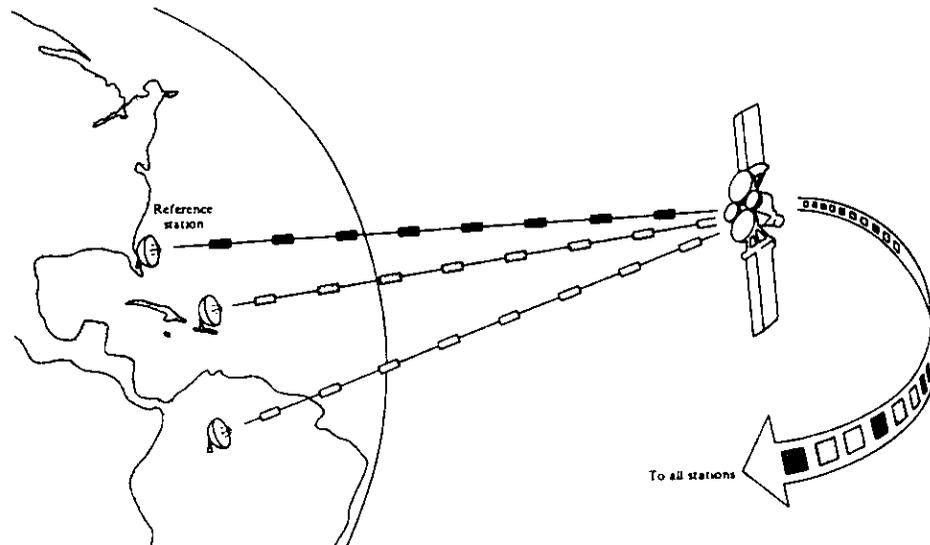


Figura 4.20. Concepto básico TDMA

Para controlar apropiadamente el espacio entre las ráfagas de las múltiples estaciones terrestres el sistema TDMA utiliza una organización por marcos. Un ejemplo de esta estructura se muestra en la figura 4.21. Un marco usualmente inicia con una ráfaga de referencia transmitida por la estación de referencia primaria y por una estación redundante de referencia utilizada como respaldo. Las dos ráfagas de referencia son seguidas por ráfagas de información transmitidas secuencialmente por cada estación en la red. El marco termina cuando la transmisión de la última estación se completa. Cada marco sucesivo repite esta estructura y el intervalo de marco, T_F , es típicamente de algunos milisegundos.

La estructura de una ráfaga TDMA provee una referencia de la forma en que el sistema opera. Por ejemplo, como se muestra en la figura 4.21, cada ráfaga contiene información de control e información útil. La parte de información de control de la ráfaga se conoce como preámbulo. Una ráfaga de referencia contiene sólo el preámbulo.

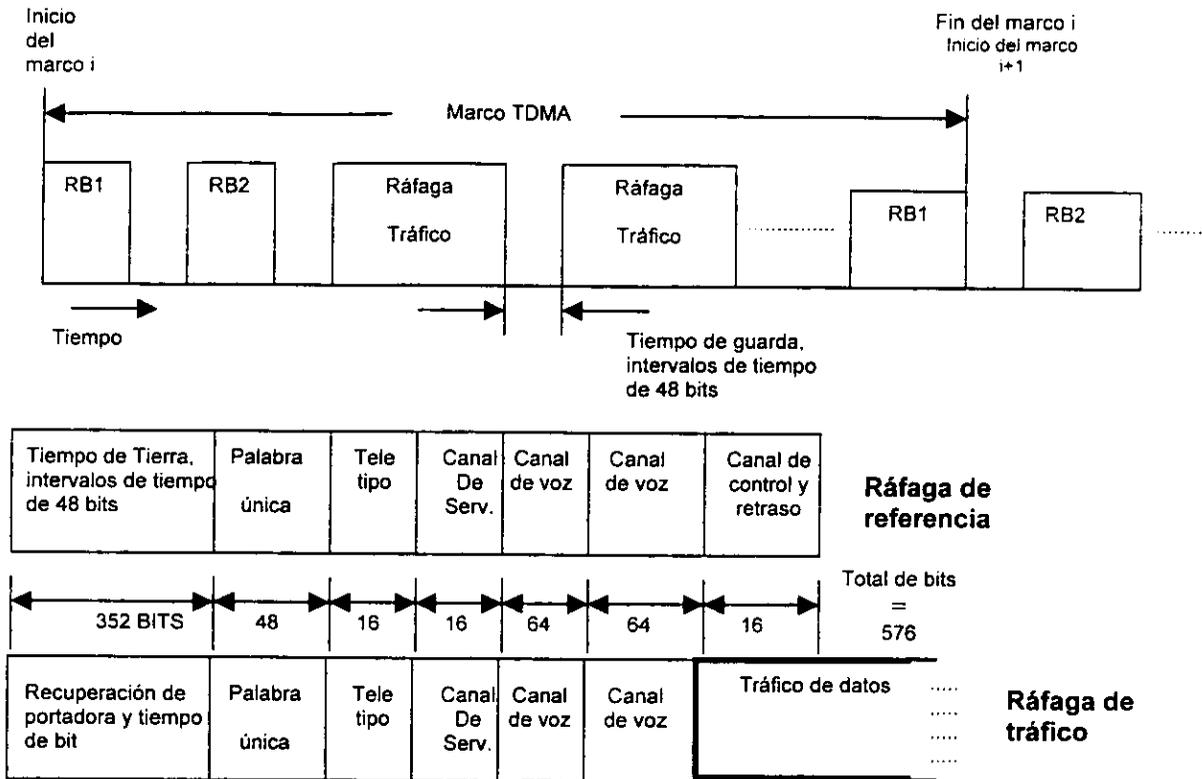


Figura 4.21. Estructura de marco y de ráfaga en TDMA

El preámbulo inicia con la transmisión de un patrón de bits predeterminado utilizando por el demodulador PSK de alta velocidad para recobrar la portadora y adquirir el tiempo de bit para cada ráfaga. Como se muestra en la figura 4.21, 176 símbolos (correspondientes a 352 bits en un sistema Q-PSK) son utilizados para acondicionar el modem para recobrar el tiempo de bit y la portadora.

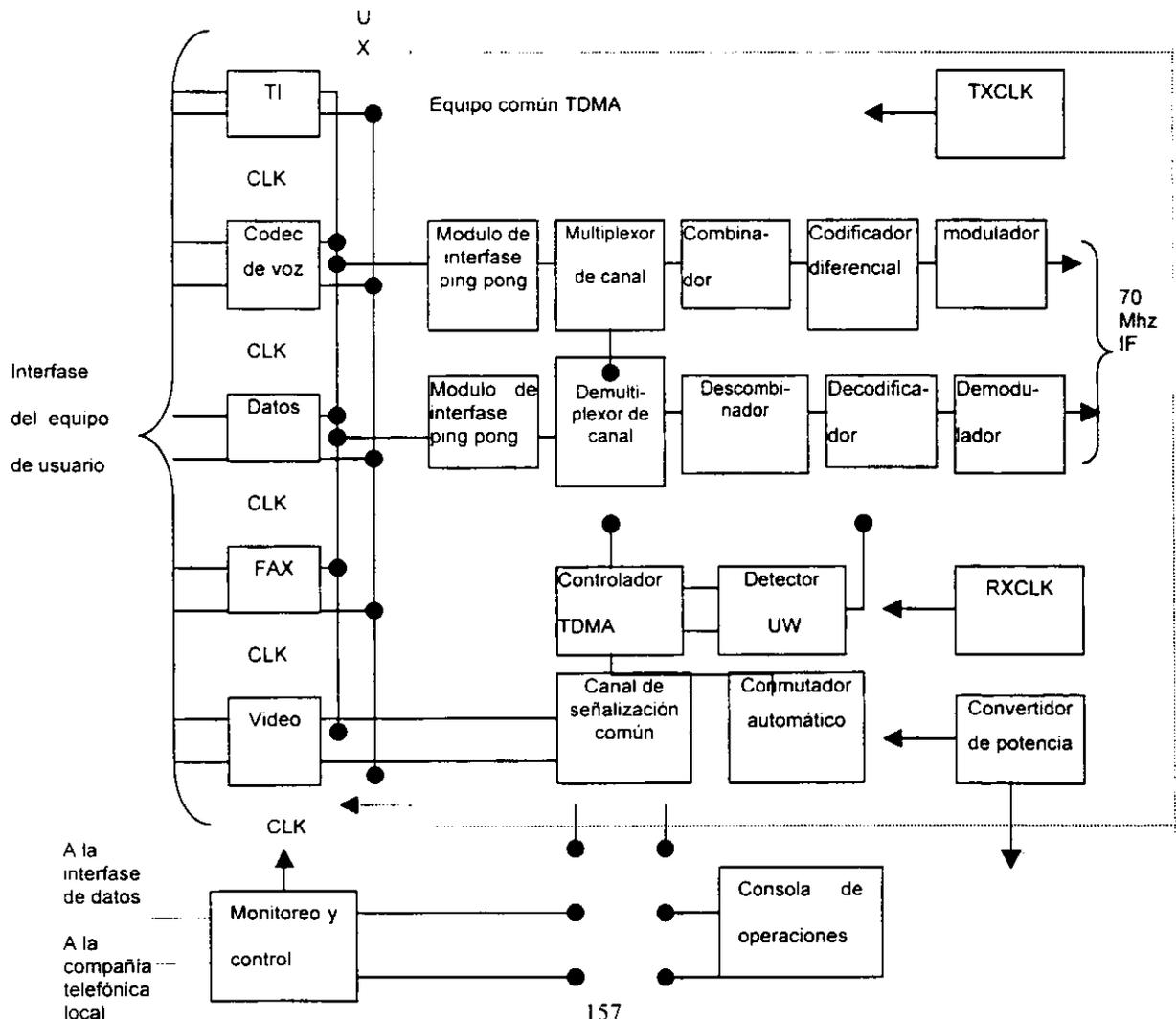
En general la recuperación de la portadora y el tiempo de bit se realiza antes de que termine la secuencia de bits. La siguiente porción del preámbulo es una secuencia de 48 bits, que constituyen una palabra única escogida por sus propiedades de correlación. Esta palabra única es esencialmente la palabra para sincronización de marco, la cual es buscada por el receptor de la terminal TDMA tan pronto como el modem se encuentra en estado estable. Esta palabra única tiene una alta probabilidad de ser detectada correctamente. Tan pronto como el sistema reconoce esta palabra, actualiza sus contadores de tiempo, relativos al inicio del marco y su posición en el marco.

El siguiente elemento del preámbulo contiene información orientada al servicio, incluyendo un canal de teletipo para el sistema de control de la red y un canal de servicio en el cual se insertan patrones de bits para ser usados en el desarrollo de pruebas de análisis de error mientras el sistema se encuentra en

servicio. Un canal digital de voz también se incluye en esta parte del preámbulo. Un canal de información de control, llamado canal de control y retraso, también se encuentra incluido en la ráfaga de referencia para ser usado por la estación de referencia para transferir información de adquisición, sincronización, supervisión y control del de las otras estaciones de la red. Una ráfaga con carga útil, utiliza el mismo preámbulo que la ráfaga de referencia, con la excepción del canal de control y retraso. Después del preámbulo se encuentra la sección de datos que consiste de información de voz, datos y video, multiplexada en el dominio del tiempo. Existe un intervalo de guarda entre las ráfagas para minimizar la probabilidad del traslape de ráfagas.

En la figura 4.22 se muestra un diagrama de bloques de un sistema TDMA típico. Las interfases para diferentes tipos de señales se localizan entre el equipo de la terminal TDMA y el sistema de comunicaciones terrestre. Una interfase específica se provee para cada tipo de señal (voz, datos, video).

Figura 4 22 Estructura de marco y de ráfaga en TDMA



Sincronización de ráfaga

Uno de los principales problemas en el diseño de un sistema TDMA es la sincronización de las ráfagas de los diferentes usuarios en una red TDMA en un marco organizado. Existen dos pasos en la fase de sincronización. El primero es la fase de adquisición, que se refiere al proceso mediante el cual una estación terrena TDMA entra a la red. El segundo es el proceso de sincronización, que ocurre después de que el usuario ha entrado en el marco TDMA y debe mantener una posición exacta de ráfaga durante la duración de la operación del marco. Mientras el sistema TDMA opera en un solo transpondedor y en un solo haz de antena, el problema de la sincronización de la red se simplifica gracias a la posibilidad de que cada usuario de la red reciba las ráfagas de los demás usuarios. Esto permite que un ciclo de retroalimentación se pueda establecer entre el satélite y cada usuario individual, empleando las ráfagas recibidas de cada estación de la red.

Durante la fase de adquisición, la ráfaga de referencia es la primera en ser transmitida. Como no existen otras ráfagas en el marco, la posición de la ráfaga de referencia es libre. Cada ráfaga adicional de otras estaciones entra en el sistema sincronizándose con la ráfaga de referencia para establecer una temporización local de referencia. El siguiente paso para una nueva entrada es transmitir una ráfaga abreviada, que consiste del preámbulo justo después de haber recibido la ráfaga de referencia, lo que resultará en la llegada de la nueva ráfaga en un tiempo que se aproxima a la localización deseada dentro del marco. Inicialmente, este tiempo de retraso es una estimación poco exacta, que puede ser mejorada de varias maneras. Una es transmitir una ráfaga de baja potencia que es utilizada para buscar la localización apropiada sin la interferencia de otras ráfagas. Otro método es determinar el valor inicial del retraso calculándolo en base a un conocimiento a previo de la localización de las estaciones terrenas y la distancia entre la estación e cuestión y el satélite. La nueva estación adquiriente observa la posición de su ráfaga y refina la estimación del retraso en cada marco sucesivo. Cuando el error entre la localización real y la deseada es aceptable, se finaliza la fase de adquisición y la fase de sincronización inicia con la transmisión de una ráfaga completa. A continuación se inicia un proceso de ciclo cerrado de sincronización, en donde el error en la posición de la ráfaga se mide continuamente y el tiempo de retraso se modifica para mantenerlo en los límites tolerables.

Eficiencia del marco

El cálculo de la capacidad del sistema para una red TDMA depende de la figura de mérito conocida como *eficiencia de marco*. La eficiencia de marco se define como la razón del número de bits disponibles para

transportar la información útil entre el número total de bits en el marco. De donde se desarrolla la siguiente relación:

$$\eta = \frac{R_T T_F - K b_p - n_r b_r - (n_r + K) b_g}{R_T T_F} \dots\dots\dots(4.12)$$

donde

η = eficiencia del marco

T_F = tiempo del marco, en segundos

R_T = tasa de transmisión total TDMA, b/s

b_g = número de posiciones de bit utilizadas en el tiempo de guarda

b_p = número de bits en la ráfaga de preámbulo

b_r = número de bits en la ráfaga de referencia

K = número de estaciones terrenas de tráfico en la red

n_r = número de estaciones terrenas de referencia

Obsérvese que la eficiencia del marco es extremadamente sensible al tiempo de marco y al número de usuarios TDMA en la red. Los sistemas TDMA iniciales utilizaban tiempos de marco cortos debido a la falta de memorias de alta capacidad. Los sistemas modernos utilizan intervalos de tiempo mucho más largos, en la vecindad de varios milisegundos, para lograr eficiencias del orden del 95% atendiendo a redes TDMA de 15 a 20 usuarios.

Cálculos de Capacidad

Para determinar la capacidad del canal TDMA, el primer paso es calcular la razón señal a ruido requerida para el límite requerido en la tasa de error. Utilizaremos la ecuación

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{N_0} \frac{R_b}{B} \dots\dots\dots(4.13)$$

Siempre que la razón total señal a ruido sea mayor que la requerida para lograr la calidad del servicio deseado, el sistema TDMA operará satisfactoriamente a la tasa de transmisión seleccionada. Si la razón señal a ruido no es lo suficientemente alta, la tasa de transmisión se debe reducir para lograr la razón señal a ruido necesaria. Asumiendo que la tasa de transmisión seleccionada da como resultado un requerimiento de razón señal a ruido que es más pequeño que el de que se dispone, podemos proceder a calcular la capacidad del canal TDMA utilizando el siguiente procedimiento. La capacidad del canal de voz de un sistema TDMA puede ser calculada como una función del número de accesos (o estaciones

terrenas en la red) calculando la razón de la tasa de bits con su equivalente en tasa de bits de canales de voz.

Sea la tasa total de bits TDMA R_T dada por

$$R_T = \frac{b_T}{T_f} \dots\dots\dots(4.14)$$

Donde b_r es la cantidad total de bits en el marco TDMA. Sea la tasa de bits del preámbulo R_p

$$R_p = \frac{b_p}{T_f} \dots\dots\dots(4.15)$$

La tasa de bits de la ráfaga de referencia R_r

$$R_r = \frac{b_r}{T_f} \dots\dots\dots(4.16)$$

Y el valor en tiempo de bit de la guarda R_g

$$R_g = \frac{b_g}{T_f} \dots\dots\dots(4.17)$$

La tasa de bits disponible para el tráfico de carga útil R_i , está dada por

$$R_i = R_T - n_r(R_r + R_g) - K(R_p + R_g) \dots\dots\dots(4.18)$$

La capacidad equivalente en el canal de voz es

$$x = \frac{R_i}{R_c} = \frac{R_T - n_r(R_r + R_g) - K(R_p + R_g)}{R_c} \dots\dots\dots(4.19)$$

Donde R_c es la tasa de bits efectiva por canal de voz. R_c se determina multiplicando la tasa de codificación de voz por el factor de actividad de voz definido.

Asignación de la demanda

La asignación de demanda en un sistema TDMA se traduce en una reasignación de la capacidad a través de la reorganización de subráfagas dentro del marco TDMA. Esto es, durante los periodos de mayor tráfico, la capacidad total del sistema TDMA puede dividirse de forma tal que las ráfagas de las estaciones altamente cargadas se expanden, mientras que a las rutas con tráfico más ligero se les asigna ráfagas más cortas. Dicha organización del tiempo de ráfaga se puede lograr de varias maneras. La más simple utiliza una forma manual en la que el operador del sistema reconfigura el plan de la red a través

de la consola. Este método se controla desde una estación central. El siguiente nivel utiliza un sistema semiautomático que realiza la asignación de la demanda mediante planes de tiempo de ráfaga almacenados, designados para optimizar la distribución de la capacidad para diferentes condiciones de la red. Estos planes se desarrollan en base al conocimiento previo de los requerimientos de la red y sus condiciones de tráfico durante periodos de operación normal. En este sistema, la asignación de tiempo se puede implementar vía el control del operador, o mediante un reloj que conmuta los diferentes planes de tráfico de acuerdo a las condiciones de la red en un periodo de 24 horas. Existe un tercer nivel de sofisticación que consiste en un sistema completamente automático, que utiliza algoritmos complejos de asignación de demanda que tienen la capacidad de reconfigurar los planes de ráfaga de forma instantánea basados en las distribuciones de tráfico. Usualmente la solución costo/rendimiento más efectiva es un sistema semiautomático.

Protocolos MAC de asignación bajo demanda

En situaciones donde el patrón de tráfico es aleatorio e impredecible, es deseable que la asignación de la capacidad sea dinámica obedeciendo a las peticiones de las estaciones. La asignación dinámica basada en reservación incrementa la capacidad de salida de la transmisión. El proceso de reservación puede ser implícito o explícito. En la reservación explícita, una ranura de reservación es asignada a cada estación en cada marco. Cada marco contiene un submarco de control que consiste en una secuencia de bits que sirven para reservar o anunciar transmisiones subsecuentes. En la reservación implícita, las estaciones utilizan el ALOHA ranurado para obtener una ranura de reservación. En las redes con un alto número de estaciones, se utiliza la contención para mantener un número bajo de ranuras de reservación.

Protocolos de prioridades alternantes mini-ranurado

El Protocolo de Prioridades Alternantes Mini-ranurado MSAP es adecuado para un número pequeño de estaciones. El tiempo es ranurado de forma tal que el tamaño de las miniranuras es mayor o igual al retraso por propagación. Todas las estaciones son sincronizadas y pueden iniciar a transmitir al principio de una miniranura. Un esquema de prioridades alternantes es utilizado para establecer un proceso equitativo entre las estaciones. En MSAP un sólo preámbulo de reservación se utiliza para establecer más de una reservación.

Todas las estaciones participantes son avisadas de las reservaciones realizadas en el preámbulo. MSAP representa una familia de protocolos libres de contienda que incluyen al protocolo BBM (Basic Bit Map),

al BRAP (Broadcast Recognition with Alternating Priorities), al BRAM (Broadcast Recognition Access Method), al MLMA (Multilevel Multi-Access) y el BCD(Binary Countdown). El protocolo BRAM que es uno de los más eficientes en esta clase, tiene una salida de canal de $d / (N + d)$ para una carga baja y de $d / (d + 1)$ para una carga alta, donde d es el tamaño del marco en bits y N es el número de estaciones. El tiempo promedio de retraso para un marco es el retraso de la cola más $N(d + 1) / 2$ en miniranuras de acceso de retraso.

Protocolos MAC de acceso aleatorio

Mientras en los protocolos libres de contienda cada transmisión programada está garantizada, los protocolos de acceso aleatorio no garantizan una transmisión exitosa. No existe la intención de coordinar las estaciones para evitar colisiones. En lugar de esto cada estación toma la decisión de cuando acceder al canal. El acceso aleatorio es simple de implementar y se adapta a la variación en la demanda, pero en algunas ocasiones puede ser un desperdicio de capacidad debido a las colisiones. Los esquemas de acceso aleatorio sufren de una capacidad relativamente limitada y en presencia de tráfico por ráfagas no pueden atender las aplicaciones de tiempo real ni garantizar los QoS. Más aún, el retraso de propagación de viaje completo agrava el problema ya que una colisión agrega al menos un retraso de viaje completo al tiempo de transmisión del paquete. Una red de Terminales de Apertura Muy Pequeña (VSAT) es un ejemplo de una red satelital compuesta por miles de pequeñas estaciones terrenas transmitiendo datos en ráfagas utilizando protocolos de acceso aleatorio.

ALOHA Puro

En 1971, la Universidad de Hawaii inició la operación de su sistema ALOHA. Un satélite de comunicaciones se utilizó para interconectar varias computadoras mediante la utilización de un protocolo de acceso aleatorio. El concepto del sistema fue extremadamente simple y consistió de los siguientes modos posibles:

1. **Modo de transmisión.** Los usuarios transmiten en el momento que desean, codificando su transmisión con un código de detección de errores.
2. **Modo de escucha.** Después de la transmisión del mensaje, el usuario escucha la señal de confirmación (ACK) del receptor. Las transmisiones de los diferentes usuarios a veces se traslaparán en el tiempo, causando errores de recepción en los datos de cada uno de los mensajes

contendientes. Decimos que el mensaje a sufrido una colisión. En tal caso, los errores se detectan, y los usuarios reciben una confirmación negativa (NAK)

3. **Modo de retransmisión.** Cuando se recibe un NAK, los mensajes se retransmiten. Por supuesto, si los usuarios que entraron en colisión transmitieran inmediatamente, entrarían en colisión de nuevo. Por lo tanto, los usuarios retransmiten después de un tiempo de espera aleatorio.
4. **Modo de terminación de tiempo.** Si después de una transmisión, el usuario no recibe una señal de ACK o de NAK dentro de un tiempo determinado, el usuario retransmite el mensaje.

Estadísticas de llegada de mensaje

Asúmase que la demanda total del sistema requiere una tasa de llegada de paquete o de mensaje promedio de λ mensajes aceptados por segundo. Debido a la presencia de colisiones, algunos de los mensajes serán rechazados. Por lo tanto, definimos la tasa total de llegada λ_t , como la tasa de aceptación λ más la tasa de rechazo λ_r , como sigue:

$$\lambda_t = \lambda + \lambda_r \dots \dots \dots (4.20)$$

Denótese que el tamaño de cada mensaje o paquete es de b bits. Entonces podemos definir el monto promedio de tráfico exitoso ρ' en el canal en unidades de bits por segundo como

$$\rho' = b\lambda \dots \dots \dots (4.21)$$

Podemos definir el tráfico total G' , en unidades de bits por segundo como:

$$G' = b\lambda_t \dots \dots \dots (4.22)$$

Con la capacidad del canal (tasa de bits máxima) designada como R bits por segundo, definiremos una tasa de salida (tasa de tráfico exitoso) y un tráfico total normalizados, como

$$\rho = \frac{b\lambda}{R} \dots \dots \dots (4.23)$$

$$G = \frac{b\lambda_t}{R} \dots \dots \dots (4.24)$$

La tasa de salida normalizada, ρ , expresa la salida como una fracción ($0 \leq \rho \leq 1$) de la capacidad del canal. El tráfico total normalizado, G , expresa el tráfico total como una fracción ($0 \leq G \leq \infty$) de la capacidad del canal. Nótese que G puede tomar valores mayores que la unidad.

Podemos definir también el tiempo de transmisión de cada paquete como sigue:

$$\tau = \frac{b}{R} \text{ segundos/paquete} \dots \dots \dots (4.25)$$

También podemos escribir:

$$\rho = \lambda \tau \dots \dots \dots (4.26)$$

$$G = \lambda_i \tau \dots \dots \dots (4.27)$$

Un usuario puede transmitir un mensaje de forma exitosa siempre y cuando ningún otro usuario inicie uno dentro de los τ segundos previos o comience dentro de los siguientes τ segundos. Si otro usuario inicia un mensaje dentro de los τ segundos previos su parte final sufrirá una colisión con el mensaje presente. Si otro usuario inicia un mensaje dentro de los siguientes τ segundos, sufrirá una colisión con la parte final del mensaje presente. Por lo tanto un espacio de 2τ segundos se necesita para cada mensaje.

La estadística de la llegada del mensaje para usuarios no relacionados de un sistema de comunicaciones se modela usualmente como un proceso de Poisson. La probabilidad de tener la llegada de K nuevos mensajes durante un intervalo de tiempo de τ segundos está dada por una distribución de Poisson dada por

$$P(K) = \frac{(\lambda \tau)^K e^{-\lambda \tau}}{K!} \quad K \geq 0 \dots \dots \dots (4.28)$$

donde λ es la tasa promedio de llegada de mensaje. Debido a que los usuarios transmiten sin preocuparse uno por el otro, en el sistema ALOHA, esta expresión es útil para calcular la probabilidad de que exactamente $K = 0$ mensajes sean transmitidos durante un intervalo de tiempo de 2τ . Esta es la probabilidad, P_s , que la transmisión de un mensaje de un usuario sea exitoso (sin colisiones). Para calcular P_s , asumiendo que todo el tráfico es Poisson, utilizamos λ_i y 2τ en la ecuación anterior entonces

$$P_s = P(K = 0) = \frac{(2\tau \lambda_i)^0 e^{-2\tau \lambda_i}}{0!} = e^{-2\tau \lambda_i} \dots \dots \dots (4.29)$$

En la ecuación 4.20, definimos la tasa total de llegada como λ_i , en términos de la porción exitosa, λ , y la repetición de la porción no exitosa, λ_r ; entonces, por definición, la probabilidad de un paquete exitoso puede expresarse como

$$P_s = \frac{\lambda}{\lambda_i} \dots \dots \dots (4.30)$$

Combinando las ecuaciones 4.29 y 4.30, tenemos

$$\lambda = \lambda_0 e^{-2\lambda_0} \dots\dots\dots(4.31)$$

Combinando las ecuaciones 4.26, 4.21 y 4.22 podemos escribir:

$$\rho = Ge^{-2G} \dots\dots\dots(4.32)$$

La ecuación 4.32 relaciona la tasa de salida normalizada ρ , con la tasa de tráfico total normalizada G , del canal para un sistema ALOHA. Una gráfica de esta relación llamada ALOHA puro, se muestra en la figura 4.23. Cuando G se incrementa, ρ se incrementa hasta un punto en donde un incremento en el tráfico genera una muy grande tasa de colisión que genera la reducción de la tasa de salida. La máxima ρ , igual a $1/2e = 0.18$, ocurre cuando $G = 0.5$. Por lo tanto, para un canal ALOHA puro, sólo el 18% de los recursos del canal pueden ser utilizados. La simplicidad del control se logra con el sacrificio en la capacidad del canal.

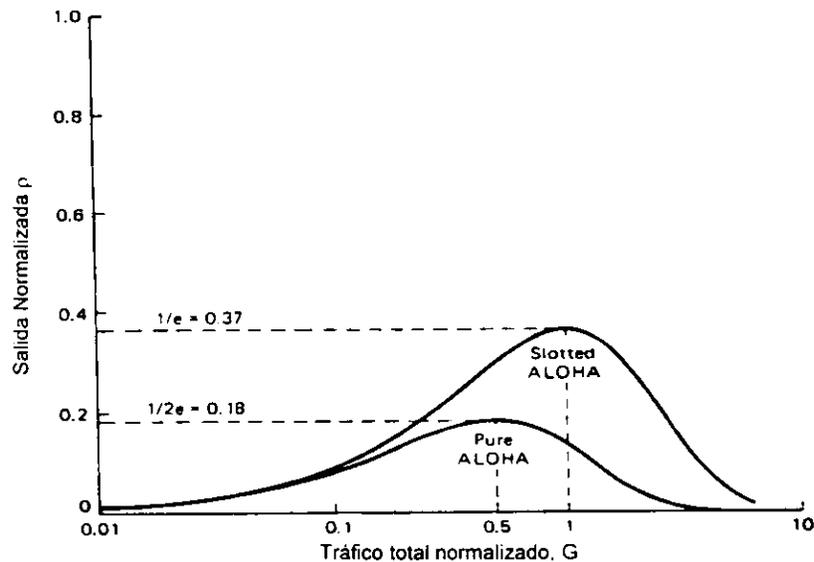


Figura 4.23. Gráfica de salida utilizando canales ALOHA

ALOHA Ranurado

El esquema de ALOHA puro puede ser mejorado mediante un sistema que contemple cierta coordinación entre las estaciones, el ALOHA ranurado (S-ALOHA) es dicho sistema.

Una secuencia de pulsos de sincronización es transmitida a todas las estaciones. Así como en el ALOHA puro la longitud de los paquetes es constante. Se pide que los mensajes sean enviados en una ranura de tiempo entre los pulsos de sincronización y sólo pueden ser iniciados al principio de una ranura de

tiempo. Este simple cambio reduce la tasa de colisiones a la mitad, debido a que los mensajes transmitidos en la misma ranura de tiempo pueden interferir con algún otro. Para el S-ALOHA, la reducción de la ventana de colisión de 2τ a τ da como resultado la siguiente relación entre la salida normalizada, ρ , y el tráfico total normalizado, G .

$$\rho = Ge^{-G} \dots\dots\dots(4.33)$$

La gráfica de la ecuación anterior se muestra en la figura 4.23 como "Slotted ALOHA". Aquí el valor máximo de ρ es $1/e = 0.37$, o bien, una mejora de dos veces el protocolo ALOHA puro.

El modo de retransmisión descrito para el sistema ALOHA puro se modifica en el S-ALOHA de tal forma que si ocurre una confirmación negativa (NAK), el usuario retransmite después de un retraso aleatorio de un número entero de ranuras de tiempo. La figura 4.24 ilustra la operación del S-ALOHA. Un paquete de bits de datos es transmitido por el usuario k seguido por una confirmación del satélite (ACK). También se muestran los usuarios m y n que han transmitido simultáneamente sus paquetes y ha ocurrido una colisión, obteniendo del satélite un (NAK). Cada estación emplea un generador de números aleatorios para seleccionar su tiempo de retransmisión. La figura muestra un ejemplo de la retransmisión de m y n en sus respectivos tiempos aleatorios seleccionados. Por su puesto que existe alguna probabilidad de que los usuarios m y n tengan una colisión de nuevo, sin embargo si ese es el caso, simplemente repetirán la transmisión, utilizando otro retraso aleatorio.

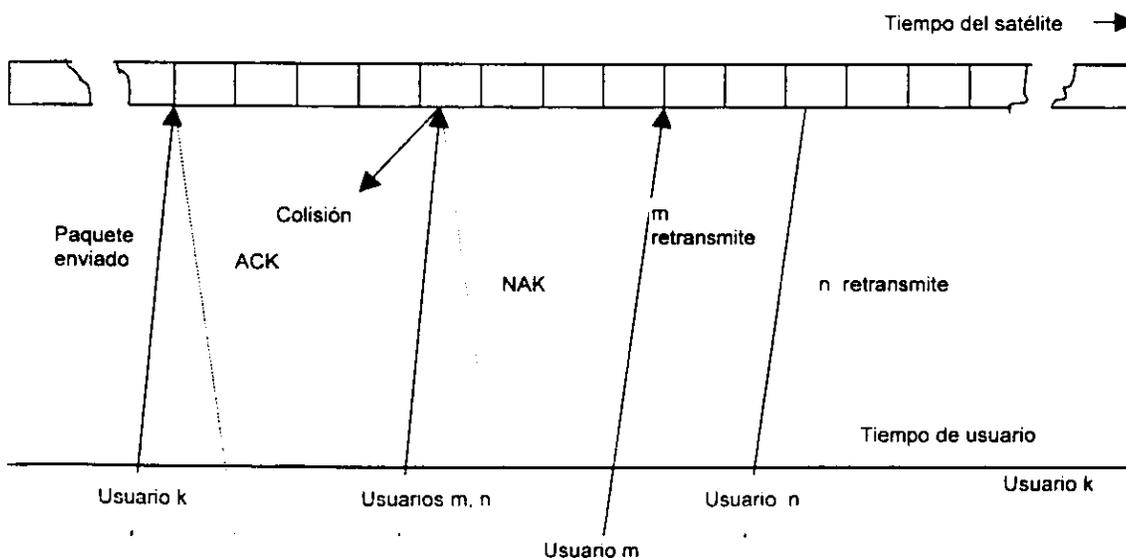


Figura 4.24. Esquema de acceso aleatorio: ALOHA ranurado

Protocolos MAC de reservación

El objetivo de los protocolos de reservación es evitar totalmente las colisiones. Como los usuarios están distribuidos, un subcanal de reservación es necesario para que los usuarios se comuniquen entre sí de forma tal que cada estación accese al canal una a la vez. La mayoría de los protocolos de reservación adoptan un protocolo TDMA o alguna variación del ALOHA ranurado. Un protocolo TDMA tiene un desempeño muy pobre cuando trabaja con un gran número de usuarios y tráfico por ráfagas. Por otro lado el ALOHA ranurado es independiente del número de usuarios pero necesita ser controlado para que opere de forma estable. Existe una relación entre la estabilidad del canal y el mecanismo de control del mismo. Parte del precio por la ganancia en la capacidad del canal al utilizar protocolos orientados a contienda es el incremento en el tiempo de retraso del mensaje. El retraso mínimo de un mensaje, es más del doble del tiempo de propagación del canal.

Reservación-ALOHA

R-ALOHA es un protocolo distribuido orientado a contienda con reservación implícita y es el protocolo más simple basado en reservación. Las reservaciones son implícitas en el sentido de que una transmisión exitosa en una ranura sirve como reservación para dicha ranura en el siguiente marco. El acceso inicial es aleatorio y se utiliza ALOHA ranurado durante el periodo de contienda. Una vez que la transmisión es iniciada, la misma ranura en los marcos subsecuentes es reservada para la misma estación mientras tenga datos que enviar. Las estaciones monitorean las ranuras de los marcos. R-ALOHA es básicamente un ALOHA ranurado en el cual las ranuras están organizadas en marcos de tamaños iguales. Existen menos ranuras por marcos que estaciones en la red. Para las comunicaciones satelitales, la duración de un marco debe ser mayor que el tiempo de propagación del satélite. R-ALOHA permite una mezcla dinámica de tráfico continuo y por ráfagas. Si la longitud promedio de los mensajes es grande, el protocolo se comporta como un esquema de asignación fija TDMA. Si el tráfico es de ráfagas el protocolo se desempeña como ALOHA ranurado.

Protocolos MAC híbridos de acceso aleatorio y reservación

Los esquemas de reservación están diseñados para tener las ventajas del acceso aleatorio y el TDMA. Una extensión inmediata es utilizar un esquema de reservación sin contienda. Las estaciones contienden durante el periodo de reservación y aquellas que tienen éxito en hacer su reservación transmiten sin

contienda. Los protocolos híbridos derivan su eficiencia del hecho de que los periodos de reservación son considerablemente más cortos que los periodos de transmisión.

ALOHA Reservación

Aloha reservación, ALOHA-R es un protocolo distribuido de reservación orientado a contienda que explícitamente realiza reservaciones exclusivas. Un marco es dividido en ranuras del mismo tamaño, dichas ranuras son divididas en miniranuras. Las miniranuras, que se accesan vía ALOHA ranurado, funcionan como una cola común a todos los usuarios. Las ranuras de datos se utilizan en base a la reservación y están libres de conflicto. El número de ranuras se adapta a la carga existente. Una estación que desea transmitir envía un paquete de petición en una miniranura especificando el número de ranuras deseadas (menos que un máximo establecido). Si la reservación es exitosa, la estación determina que ranura ha adquirido y transmite en ella. Para ejecutar el mecanismo de reservación de forma apropiada, cada estación mantiene un registro del número de reservaciones existentes y de las ranuras en las cuales su propia reservación comienza. De esta forma la estación sabe cuando transmitir.

El ALOHA-R tiene dos modos básicos: un modo no reservado y un modo reservado que consisten en:

Modo no reservado (Estado inteligente)

1. Un marco de tiempo es establecido y se divide en un número definido de subranuras de reservación.
2. Los usuarios utilizan estas pequeñas subranuras para reservar las ranuras del mensaje.
3. Después de pedir la reservación, el usuario espera una confirmación y una asignación de ranura.

Modo reservado

1. Los marcos de tiempo se dividen en $M+1$ ranuras siempre que se hace una reservación.
2. Las primeras M ranuras se utilizan para la transmisión de los mensajes.
3. La última ranura se subdivide en subranuras para ser utilizadas para peticiones de reservación.
4. Los usuarios envían paquetes de mensaje sólo en las porciones asignadas en las M ranuras.

Reservación Round-Robin

EL protocolo de reservación Round Robin (RRR) es un protocolo distribuido de reservación orientado a contienda. La base para este esquema es una asignación TDMA fija. Requiere un número fijo de estaciones menor o igual al número de ranuras en un marco. Cada estación tiene una ranura dedicada. Si existen ranuras extras pueden ser utilizadas por todas las estaciones utilizando ALOHA ranurado. Si una ranura no esta siendo utilizada por su dueño, esta disponible para ser utilizada por los otros usuarios.

En una variación de este esquema cada estación mantiene un seguimiento de la cola global al incluir el total de la cola en el encabezado del paquete. Un algoritmo round robin se utiliza para asignar las ranuras disponibles (las de exceso y las no utilizadas) a los paquetes en la cola. Cada estación tiene que transmitir su información sin importar el estado de la cola de paquetes. Una cuenta de cero indica que la ranura correspondiente está libre. Una estación reclama su ranura causando deliberadamente un conflicto en esa ranura el cual es detectado por los otros usuarios. Esto permite a las estaciones saber el estado actual de su propia ranura. Este protocolo es superior a R-ALOHA para el tráfico dominado por transmisiones en cadena ya que a cada estación se le garantiza una ranura de ancho de banda. Para un número alto de estaciones este algoritmo puede generar un retraso en la transmisión grande.

Protocolos MAC adaptables

Los dos métodos de acceso al canal, a saber, protocolos orientados a contienda y libres de contienda descritos anteriormente tienen sus ventajas y desventajas. Cada esquema puede ser medido de acuerdo a su desempeño con respecto a los parámetros de retraso con carga baja y la eficiencia del canal con carga alta. En el caso del tráfico asimétrico el desempeño general del protocolo puede ser mejorado permitiendo que las estaciones con tráfico más alto tengan la oportunidad de transmitir más veces. En los protocolos adaptables se controla el número de contendientes por medio de un proceso adaptable para reducir conflictos o el canal conmuta de forma dinámica de un proceso aleatorio a uno por reservación. En los protocolos de contienda limitada las estaciones se dividen en grupos. Sólo a los miembros del grupo se les permite contender por la ranura asignada. Si una estación tiene éxito, adquiere el canal e inicia a transmitir en el marco. Haciendo divisiones adecuadas la contienda puede ser reducida.

Reservación Dividida en presencia de Colisión

El protocolo de Reservación Dividida en presencia de Colisión (SRUC) las ranuras son subdivididas en una sección de control y de datos. La subranura de datos puede trabajar en modo de reservación o aleatorio. El modo básico es acceso aleatorio vía ALOHA ranurado. Cuando se detecta una colisión, la subranura de datos se cambia a modo reservación. Regresa al modo aleatorio cuando los paquetes en colisión han sido transmitidos exitosamente. La subranura de control provee información acerca de las estaciones en colisión. El acceso a las ranuras de control es sin colisión. Las estaciones contendientes previas no se mezclan con las nuevas. SRUC es un protocolo adaptable que combina el ALOHA ranurado y los protocolos de reservación, cambiando de uno a otro de acuerdo al estado del canal. SRUC

divide las estaciones en un cierto número de grupos. El mismo número de ranuras se combinan en el tiempo de un marco de forma que todas las estaciones tengan una entrada de información después de un número correspondiente de marcos. El tamaño de la subranura de control se hace pequeño debido a que cada una de ellas sirve a sólo algunas estaciones. El protocolo SRUC es siempre estable ya que todos los paquetes en colisión son retransmitidos en el estado de reservación.

Protocolo de Acceso Múltiple de Retraso Mínimo

El protocolo está basado en una distribución de Poisson para la llegada y la retransmisión de los paquetes. Este protocolo (MDMA) utiliza un canal de subida ranurado único y un canal de control para transmitir la información de reservación. En este modelo un paquete que toma un canal ALOHA hará una reservación con probabilidad de f_1 , en el canal de control, o con la probabilidad de $1 - f_1$ transmitirá el paquete en la ranura ALOHA y hará una reservación de respaldo con la probabilidad de a . En el caso de una colisión en la ranura ALOHA, la reservación de respaldo, si fue exitosa, permitirá que el paquete sea transmitido en una ranura reservada después de un retraso de propagación de viaje redondo. Si la transmisión en la ranura ALOHA es exitosa, la reservación de respaldo es ignorada por el satélite. Si el paquete se encuentra con una ranura reservada, hará una reservación con probabilidad f_2 o transmitirá el paquete aleatoriamente con probabilidad $1 - f_2$ y hará una reservación de respaldo en el canal de control con probabilidad a . Por cada reservación exitosa, una ranura reservada es asignada. El protocolo puede tomar los valores óptimos de f_1 , f_2 , y a en diferentes condiciones de tráfico. Estos valores pueden ser medidos o precomputados fuera del sistema y utilizados en el protocolo. La estabilidad del protocolo es inherente al seleccionar f_1 y f_2 como 1 para carga pesada. Esto significa que todos los paquetes harán reservación antes de la transmisión. Cuando el tráfico es ligero, seleccionado f_1 y f_2 como 0 el protocolo se convierte en ALOHA ranurado.

Directivas de selección de los protocolos de acceso al medio MAC

La relación entre el tipo de tráfico y la selección del protocolo MAC se muestra en la figura 4.25.

Modelo del tráfico	Tipo de protocolo MAC
Traffic sin ráfagas	Asignación fija
Traffic en ráfagas, mensajes cortos	Acceso aleatorio
Traffic en ráfagas, mensajes largos y un gran número de usuarios	Protocolos de reservación con contienda
Traffic en ráfagas, mensajes largos, y número de usuarios pequeño	Protocolos de reservación con un canal fijo TDMA de reservación

Figura 4.25. Relación entre el tráfico y la selección del protocolo MAC.

La relación de desempeño de los distintos protocolos revisados se muestra en la figura 4.26.

Protocolo	Salida promedio	Retraso medio	Estabilidad	Escalabilidad	Capacidad de reconfiguración	Aplicaciones de banda ancha	Costo/Complejidad
Asignación fija							
TDMA	Baja	Bajo-Medio	Media-Alta	No	No	Si	Media
G-TDMA	Alta	Bajo	Alta	No	No	Si	Media
Asignación en demanda							
MSAP	Media-Alta	Medio-Alto	Media-Alta	No	No	Si	Medio-Alto
Acceso aleatorio							
S-ALOHA	Baja	Muy bajo	Baja	Si	Si	No	Bajo
Reservación							
R-ALOHA	Alta	Muy bajo	Media	Si	Si	No	Bajo
Híbrido							
ALOHA-R	Alta	Bajo-Medio	Media	Si	Si	Si	Medio
RRR	Alta	Bajo-Medio	Media	Si	Si	Si	Medio
Adaptable							
SRUC	Alta	Muy bajo	Alta	Si	Si	Si	Alto
MDMA	Alta	Bajo-Medio	Baja	Si	Si	No	Alto

Figura 4.26 Relación de desempeño de los protocolos

Consideraciones de ingeniería del sistema

La selección apropiada de la técnica de acceso múltiple que cumpla con los requerimientos de los servicios de comunicación que serán proveídos, debe de considerar una serie de factores entre los que destacan:

- **Capacidad.** La capacidad del sistema de acceso múltiple se define en términos del número de canales de voz o datos de una calidad específica que pueden ser usados utilizando la potencia y el ancho de banda de un solo transpondedor. Al seleccionar un sistema se prefiere al de más alta capacidad.
- **Potencia de RF y ancho de banda.** La potencia y el ancho de banda son recursos fundamentales de enlace de RF del satélite. La potencia y el ancho de banda disponibles en un satélite se encuentran directamente relacionados con su costo. Para utilizar el ancho de banda y la potencia disponibles de forma eficiente, se debe diseñar un sistema de acceso múltiple que este limitado en potencia y en ancho de banda.
- **Interconectividad.** La topología de la red marca las necesidades de interconexión

- **Adaptabilidad para el crecimiento.** Como la inversión en equipo puede representar una porción significativa del costo del sistema terrestre, se debe considerar la capacidad de la técnica seleccionada para adaptarse al crecimiento del tráfico y los cambios en su comportamiento.
- **Capacidad de manejar múltiples servicios.** Los nuevos servicios de telecomunicaciones tienen su soporte en las técnicas digitales y en la transmisión multiservicios. Los sistemas de acceso múltiple deben ser capaces de soportar los servicios ISDN.
- **Interfase terrestre.** La interconexión con las instalaciones terrestres actuales representa un factor de extrema importancia en el costo y desempeño total del sistema de acceso múltiple.
- **Seguridad de la comunicación.** A pesar de que la seguridad en la transmisión ha sido exclusiva de el sector militar, los sistemas actuales de telecomunicaciones deben ser capaces de proteger información confidencial.
- **Costo.** El costo por canal de la implementación del sistema de acceso es un factor importante. Debido al desarrollo tan rápido de la tecnología digital su costo tiende a bajar. Sin embargo en algunos casos la tecnología analógica resulta más económica.

Capítulo V. Sistemas ATM Vía Satélite. Las Bases

Introducción

Una vez que hemos revisado los conceptos básicos de la arquitectura ATM, de los sistemas satelitales y de las comunicaciones digitales, estableceremos las bases para la utilización y adaptación de ATM al satélite. Es necesario mencionar al menos de forma general las características principales del equipamiento del satélite que serán necesarias para poder soportar este tipo de arquitectura. Se desarrollarán los 3 principios fundamentales para establecer la viabilidad y alcances de una arquitectura ATM vía satélite, estos son:

- **El conmutador ATM en el satélite**
- **La Arquitectura del la red satelital**
- **Los niveles de error en la transmisión y la calidad en el servicio ATM**

El equipamiento de comunicaciones del satélite

Directivas de diseño

La tecnología satelital del futuro que operará en la banda Ka, idealmente debe permitir accesos utilizando antenas de haz múltiple, procesamiento a bordo, alta capacidad de transmisión, conectividad de ancho de banda bajo demanda, múltiples tasas de transmisión y la capacidad de asignar la potencia transmitida a los haz de las antenas de acuerdo con el tráfico.

La ingeniería del sistema

La figura 5.1 muestra una configuración modelo en la que se identifican las limitantes y requerimientos principales para el diseño del satélite. Se identifican los aspectos de diseño que tienen un impacto más alto en el desempeño y costo. También se presentan las tecnologías existentes y se sugiere una selección genérica (mostrada en negritas) basada en la tecnología disponible actualmente.

Limitantes	Requerimientos principales	Aspectos de diseño determinantes	Opciones	Característica de selección
Costo y tiempo de desarrollo peso y potencia. flexibilidad y confiabilidad	Tx EIRP Aislamiento de haz	Configuración de transmisión	TWTA-MBA alimentación sencilla	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia en potencia Menor riesgo de desarrollo Costo bajo
			TWTA-MBA/BN	
			Arreglo en fase	
	Plan de frecuencia No. De canales Tasa de conmutación	Canalización	2	<ul style="list-style-type: none"> Ganancia máxima con el mínimo de potencia del amplificador Satisface los requerimientos de aislamiento
			3	
			4	
Capacidad de salida, tasa de conmutación, decodificación	Tamaño del paquete	Grado de decodificación	CH Analógica banda estrecha	<ul style="list-style-type: none"> Alta capacidad de producción Alta flexibilidad
			Canalización digital banda ancha	
Rx G/T aislamiento de haz	Configuración de LNA/DC	No. De aperturas Rx	N x celdas ATM	<ul style="list-style-type: none"> Desempeño balanceado entre peso y potencia Minimiza la potencia
			Sin decodificación	
			Decodificación interna	
			Decodificación interna y externa	
			LNA/DC en la tarjeta de equipo	<ul style="list-style-type: none"> La mejor G/T Elimina las ondas guía largas- menor peso, fácil integración
			LNA montado en la alimentación	
			LNA/DC montado en la aliment.	
			4	<ul style="list-style-type: none"> Lo mismo que para Tx

Figura 5 1 Configuración Modelo

El primer grupo de requerimientos son la potencia efectiva radiada (EIRP) y el aislamiento de haz, que son básicos para el diseño de la antena. El maximizar la EIRP no maximiza el aislamiento de haz por lo que el diseño seleccionado debe de proveer un balance entre los dos parámetros. Los aspectos de diseño determinantes incluyen la configuración de la antena y el número de aperturas. El rango de las configuraciones de la antena va desde una antena multihaz afocada hasta un arreglo en fase no afocado. La antena multihaz afocada provee excelente desempeño con un riesgo muy bajo, pero es menos flexible en la configuración de los patrones de cobertura. Los arreglos en fase proveen la máxima flexibilidad de cobertura, pero tienen un desempeño significativamente menor en potencia. Dentro de las opciones de antena multihaz podemos utilizar una sola antena con una BFN, pero si utilizamos múltiples aperturas, un alimentador por haz puede cumplir con los requerimientos. La simpleza de utilizar un alimentador por haz y múltiples aperturas resulta en un menor costo total. La anterior es la opción seleccionada.

El siguiente conjunto de requerimientos tiene que ver con el plan de frecuencia; el número de canales y las diferentes tasas de transmisión. El aspecto de diseño determinante es el plan de canalización para el equipo a bordo. Las opciones primarias son la canalización analógica con conversión analógica-digital de banda estrecha y la canalización digital de banda ancha. El esquema analógico se beneficia de las tecnologías de bajo riesgo. Sin embargo, es más costosa debido al incremento en el número de

elementos, a que es menos reproducible y menos flexible. Debido a que se requiere un convertidor para cada haz, la solución basada en el convertidor A/D de banda ancha requiere tecnología avanzada, especialmente para cumplir con los requerimientos de potencia. Se deben utilizar algoritmos de canalización digital para minimizar la demanda de potencia. La elección óptima es la tecnología TRW de baja potencia y alta velocidad de conversión A/D, que se puede mejorar con la canalización basada en algoritmos basados en la transformada rápida de Fourier.

El siguiente conjunto de requerimientos se refiere a la capacidad de comunicación, la tasa de conmutación y la decodificación. Los aspectos principales en este caso son el tamaño del paquete de datos y el grado de decodificación a bordo. Estos aspectos deben de balancear la flexibilidad y el desempeño con la cantidad de potencia requerida. El minimizar la potencia, permite que sea utilizada por el transmisor, logrando una mayor capacidad. El tamaño del paquete evalúa el número de celdas ATM que son conmutadas como una unidad. El considerar una celda ATM provee la máxima flexibilidad y desempeño, sin embargo incrementa la tasa de conmutación requerida. Si se conmutan múltiples celdas ATM, se sacrifica una pequeña parte de la flexibilidad, pero el conmutador se simplifica de forma importante. Por esta razón se seleccionó el conmutar múltiples celdas ATM. Para la decodificación, el desempeño óptimo se logra con la decodificación completa de todos los códigos, sin embargo esto requiere mayor cantidad de potencia. El consumo mínimo de potencia se logra al no implementar decodificación a bordo.

Tecnologías de equipamiento satelital para la banda Ka

La arquitectura resultante para el equipamiento del satélite que se muestra en la figura 5.2 combina un alto desempeño, una alta eficiencia y un diseño altamente producible que utiliza tecnología de bajo riesgo.

Las tecnologías seleccionadas para el equipamiento del satélite propuesto se resumen en la figura 5.3 comparándolo con la tecnología disponible en 1996 y la que estará disponible para el año 2000. Seleccionando las tecnologías que en 1998 están calificadas para su utilización en el espacio se obtiene un balance entre la capacidad máxima y el tiempo de desarrollo del proyecto.

Tecnología	1996	1998	2000
MMIC	GaAs 0.2 μ	GaAs 0.15 μ	InP
Amplificadores	TWTA	TWTA SSPA/GaAs	SSPA/InP
Convertidores A/D	2 μ HBT 8 bit/1 Gsps	1 μ HBT 8 bit/1.2 Gsps	1 μ HBT 9 bit/1.2 Gsps
ASIC	0.8 μ CMOS 100K gate	0.7 μ CMOS SOI 200K gates	0.5 μ CMOS SOI 500 K gate
ISL	60 GHz RF	60 GHz RF apertura pequeña	Láser

Figura 5.3 tecnologías seleccionadas para el equipamiento del satélite

La figura 5.4 muestra los beneficios de una arquitectura que utiliza esta tecnología. El diseño tiene una serie de características que proveen excelente desempeño y flexibilidad, con un tiempo de vida competitivo. Al utilizar tecnologías de alta producibilidad y de bajo riesgo se elimina la necesidad de realizar pruebas del sistema.

Característica	Desempeño	Flexibilidad	Tamaño/peso	Potencia	Costo	Desarrollo
Antenas MBA de alimentación desfasada	Alta eficiencia permite G/T y EIRP máximo			Alta ganancia Reduce tamaño transmisor	Baja complejidad	Utiliza la tecnología disponible
LNA HEMT MMIC	Paquete en la alimentación permite G/T máxima	El mismo diseño para múltiples sistemas	Módulos miniatura		Proceso de alta producibilidad	Altamente producible, sin pruebas y calibración
Canalización y modulación digital	Desempeño estable	Anchos de banda y tasas de transmisión programables		Algoritmos altamente eficientes	Menor número de componentes, Prueba y calibración menor	Altamente producible, sin pruebas y calibración
Empaquetado modular		Configuración de la carga útil plug and play			Diseño reutilizable en varios sistemas	
TWTA de alta eficiencia	Permite el aprovechamiento máximo de la potencia			> 50% DC incluyendo EPC		Amplia línea de productos en el mercado

Figura 5.4. Beneficios de una arquitectura que utiliza dicha tecnología

La flexibilidad es una de las metas más importantes en el diseño del equipo del satélite. Debido a que el satélite operará de 10 a 15 años, la flexibilidad es la base para adaptarse al mercado durante este tiempo. Para lograr esto, el equipamiento multimedia del satélite provee servicios generales en lugar de servicios para aplicaciones específicas. Además el diseño físico es modular y escalable. El subsistema de procesamiento es similar al de una computadora personal, donde una tarjeta madre contiene a una serie de tarjetas para funciones específicas. El software se programará en una plataforma orientada a objetos para poder desarrollar aplicaciones modulares de fácil actualización.

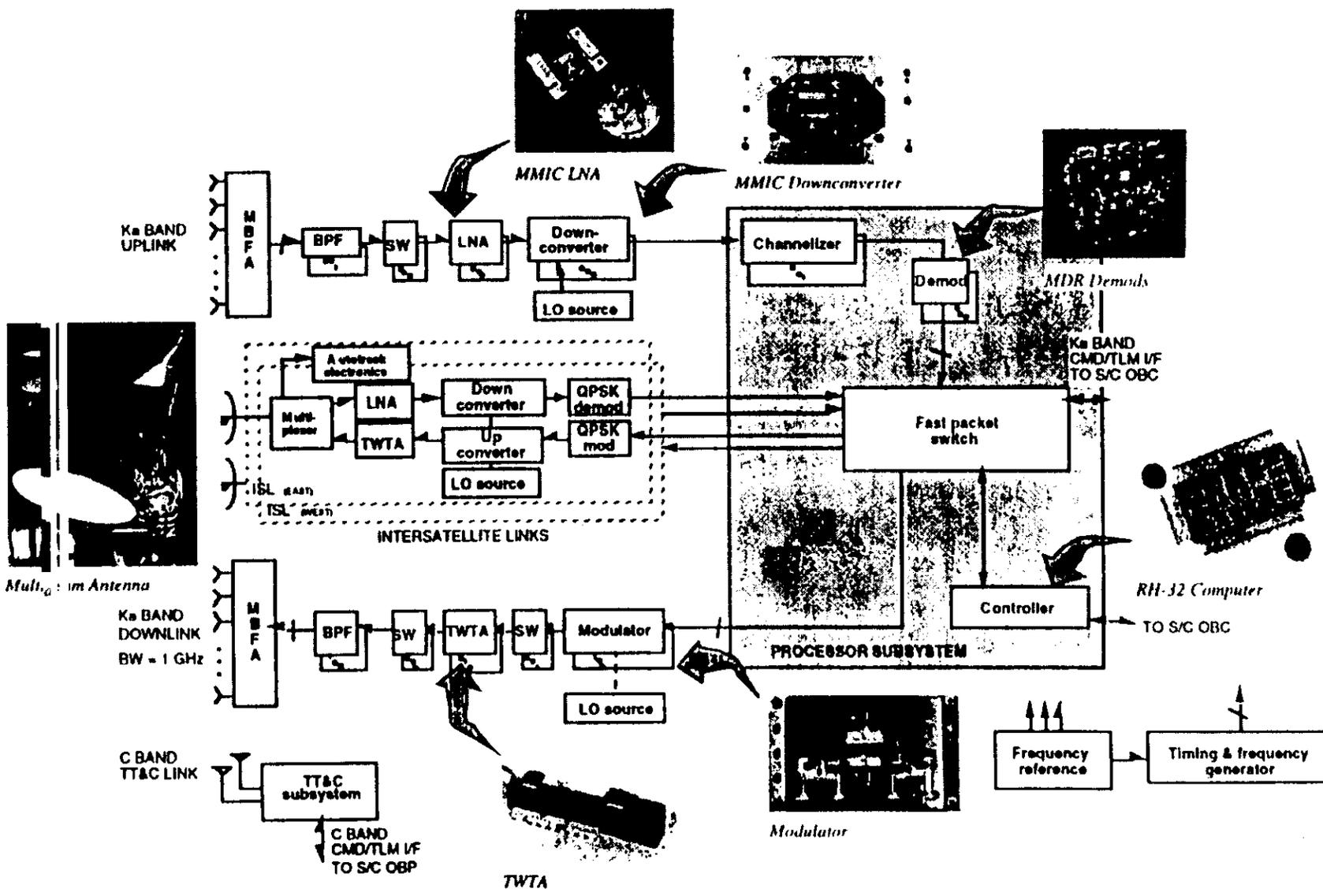


Figura 5.5. Subsistema de Procesamiento

El conmutador ATM en el satélite

La elección de la tecnología de conmutación para el conmutador ATM a bordo del satélite no sólo depende de los requerimientos que tienen las redes terrestres típicas sino de los requerimientos impuestos por la interfase espacial. Los parámetros típicos que se utilizan para determinar un conmutador adecuado son: la capacidad y la tasa de transmisión de los puertos. Además se deben considerar los criterios de pérdida, capacidad de salida y retraso de celdas. Para los sistemas satelitales se deben considerar otros factores. Estos son, entre otros, tolerancia a fallos, las limitaciones de la tecnología actual y las consideraciones sobre el equipamiento del satélite.

Capacidad y configuración del conmutador

Para la mayoría de los satélites ATM de la primera generación la capacidad será del orden de los 5 a los 10 Gbs. Debido a que existen sistemas de haz dirigido existirá un mapeo entre los puertos de entrada del conmutador y la distribución geográfica de la configuración multihaz. Dependiendo de la configuración, el esquema de acceso y el nivel de multiplexación, la tasa de cada puerto podrá variar.

Debido a que la información relacionada con el satélite es removida en una subcapa del satélite específica, el conmutador cumplirá con los estándares de las capas ATM y realizará la conmutación al nivel de VCs, soportando la interfase UNI o NNI incluyendo la señalización, la administración y el respaldo o negociación del contrato de tráfico. Por esta razón la tecnología utilizada en los conmutadores terrestres se puede aplicar en los conmutadores en el espacio. Sin embargo se desea que las funciones susceptibles a cambiar no queden aisladas en el espacio y que se logre una reducción de la complejidad en el equipamiento del satélite para lo cual se realizará una distribución de las funciones de la capa ATM entre las terminales terrestres, el conmutador a bordo y el centro de operación de la red.

La tolerancia a fallos

La vida útil de un satélite ATM será de alrededor de 14 años. El sistema debe proveer una tolerancia a fallos que sea suficiente para cumplir con la duración del satélite. Los errores del equipo a bordo deben ser evitados, por lo que se considera la incorporación de una unidad redundante dependiendo de la arquitectura del sistema. La tolerancia a fallos se incorpora añadiendo un sistema de detección de errores interno y externo en el conmutador. Estos sistemas pueden utilizarse para detectar fallas que pueden

corromper los circuitos a bordo así como para cambiar los componentes dañados por los componentes redundantes.

El retraso en la conmutación

Dependiendo de la órbita, el retraso en la conmutación tendrá un efecto en el retraso total. Para una órbita geoestacionaria, por ejemplo, el retraso de propagación es de 125 ms aproximadamente, lo que significa que un retraso debido al almacenamiento temporal de las celdas en el conmutador es despreciable. Sin embargo es precisamente debido a este retraso que el número de celdas perdidas es crítico ya que la retransmisión ocasionará un tiempo de retraso muy largo. Debido a este retraso y a la necesidad de evitar retransmisiones, será necesario utilizar buffers más grandes que los utilizados en los sistemas terrestres o esquemas que permitan limitar la congestión en el conmutador.

Las tecnologías

Para operar en el ambiente de las órbitas geoestacionarias, con presencia de radiación se debe utilizar tecnología que soporte dichas condiciones para maximizar la confiabilidad del equipamiento del satélite. Sin embargo esta tecnología incluyendo la RAM es lenta y cara, el nivel de integración que se encuentra en el equipo terrestre no está disponible para las aplicaciones espaciales lo que afecta la selección de la tecnología de conmutación ya que muchos conmutadores trabajan compartiendo memoria para mejorar la velocidad. Las velocidades de acceso a las memorias y las frecuencias de operación de los circuitos limitan la capacidad de conmutación. El costo de estas tecnologías también genera una limitante en la integración del equipo del satélite.

La estructura de soporte y la potencia del equipamiento satelital

El equipamiento del satélite está limitado en términos de tamaño, masa y potencia. La estructura de soporte del satélite incluye todo el equipo de radiofrecuencia RF, de frecuencia intermedia IF y de banda base. Las arquitecturas de conmutación con un gran número de tarjetas pueden ser poco adecuadas para su implementación satelital.

La potencia a bordo no tiene que ver sólo con el consumo, también con la disipación. Debido a que el bus del satélite tiene potencia limitada, es necesario considerar las limitaciones de potencia para el conmutador ya que su velocidad y su complejidad se ven afectadas. La capacidad de disipación de calor

puede incrementar el número de tarjetas y por lo tanto el tamaño del equipamiento, por lo que debe de considerarse.

Diseños propuestos

De acuerdo con las limitaciones de diseño, se han desarrollado varias directrices para el diseño del conmutador ATM satelital. Dos de las más importantes son que el conmutador debe operar dentro de los límites de la tecnología resistente a radiación disponible y proveer los niveles necesarios de tolerancia a fallos y redundancia para cumplir los requerimientos de la vida útil del satélite.

Para obtener un desempeño de salida/retraso adecuado se deben utilizar buffers (almacenamiento temporal de información) de salida. Aunque el tiempo de retraso en la transmisión reduce el impacto del retraso propio del conmutador, al ser un sistema de banda limitada, existe la necesidad de maximizar la capacidad de salida y no limitarla por la capacidad del conmutador. El mecanismo de la fila de salida puede ser real (buffers en la salida del conmutador) o virtual (buffers a la entrada con un sistema preprogramado que se aproxima al desempeño de los buffers en la salida). Dependiendo del desempeño del algoritmo de ordenamiento a la salida, el sistema de buffering virtual a la salida puede reducir el requerimiento total de almacenamiento temporal aproximándose al desempeño de un conmutador sin bloqueo. Esta reducción se debe a que el puerto de salida físico ya no necesita implementar la recepción de ráfagas simultáneas de varios puertos de entrada. En este caso cada puerto de entrada tendrá que ordenar y almacenar los datos para cada puerto de salida.

El sistema de almacenamiento físico a la salida requiere de buses y procesadores de recepción múltiples en el puerto de salida (esquema de almacenamiento temporal por división de espacio) o un solo bus compartido por todos los puertos (esquema de almacenamiento temporal por división de tiempo). La utilización de buses y procesadores múltiples introduce un esquema de redundancia en caso de error y limita el fenómeno de "speedup". Sin embargo puede incrementar el tamaño del conmutador debido al número de interconexiones y requiere de una administración compleja. Por otro lado, los conmutadores por división de tiempo tienen una escalabilidad limitada debido a que operan a la velocidad de la suma de los puertos de entrada. Ambos métodos requerirán que el esquema de almacenamiento temporal de salida acepte grupos de celdas por cada ciclo del conmutador. Un conmutador con un esquema de almacenamiento temporal a la salida requerirá velocidades altas de acceso a memoria con buses de alta capacidad y por ende un diseño de alta complejidad

Un resumen de las características de los diferentes mecanismos de almacenamiento temporal y tipos de conmutadores se muestra en la figura 5.6.

Un conmutador prospecto para este tipo de sistemas es un conmutador con un módulo de conmutación totalmente interconectado con concentradores por cada puerto de salida similar al conmutador tipo Knockout pero modificado para lograr los requerimientos previamente discutidos. Este tipo de conmutador es considerado debido al tamaño limitado de la memoria y el esquema de almacenamiento a la salida. La tolerancia a fallos puede lograrse remapeando los puertos a matrices de conmutación redundantes.

Otras opciones bajo consideración incluyen el uso de conmutadores basados en chips de memoria compartida o buses con algoritmos que limiten el flujo de las celdas a través de un puerto en particular.

Esquema de almacenamiento temporal	Tipo de conmutador	Ventajas	Desventajas
Buffer de salida con división de espacio	Banyan antibloqueo con N puertos de salida	No speedup Buena tolerancia a fallos	Número de caminos elevado para proveer antibloqueo y multitransmisión Memoria compleja y de alta velocidad
Buffer de salida con división de tiempo	Bus compartido	Arquitectura simple	Backplane de alta velocidad, alta velocidad de acceso a memoria
Buffer compartido TDM	Memoria compartida central	Número de buffers pequeño	Alta velocidad de acceso a memoria
Memoria compartida con acceso en paralelo	PRIZMA	Número de buffers pequeño sin límite de velocidad de acceso TDM	Direcciona el uso del gran número de buffers requerido en el satélite

Figura 5.6. Sumario de las características de los diferentes mecanismos de almacenamiento temporal y tipos de conmutadores

Arquitectura de un conmutador ATM en el satélite

A continuación se presenta un estudio preliminar que explora la posibilidad de que el conmutador Alcatel 1000 AX ATM cumpla con las especificaciones necesarias para ser usado en el espacio. Se establece cuales funciones pueden realizarse a bordo, cuales deben permanecer en tierra y cuales deben ser adecuadas al esquema de transmisión del satélite.

El conmutador Alcatel 1000 AX

El Alcatel 1000 AX fue el primer producto que desarrolló Alcatel para servicios de banda ancha y redes ATM. Ahora existe una familia amplia de productos ATM: el Alcatel 1370 NMC encargado de administrar una red de nodos Alcatel 1000 AX, el Alcatel 1100 HSS que ofrece la integración de servicios no-ATM para aplicaciones de negocios y el Alcatel 1000 MSAN que ofrece acceso multiservicio para usuarios residenciales.

Los servicios

El Alcatel 1000 AX es un nodo de servicio y tránsito que provee las funciones genéricas de un nodo ATM: Conmutación de VC y VP de modo semi-permanente o bajo demanda, en configuraciones punto a punto o multipunto, con controles de administración, tráfico y mantenimiento y desempeño de acuerdo a los estándares del ATM Forum.

Un conjunto de hardware, software e interfases forman el kernel del Alcatel 1000 AX. Este núcleo ATM es reutilizado en otros productos Alcatel y una parte de él se puede utilizar en el espacio.

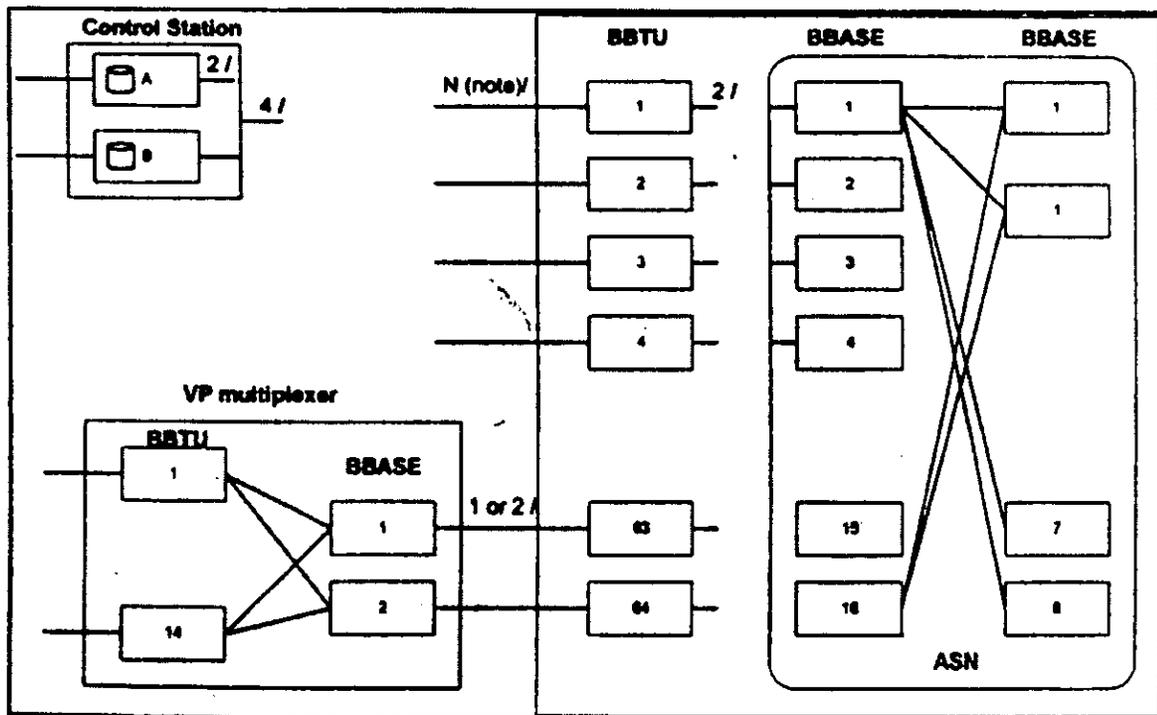


Figura 5.7. Arquitectura de Hardware Alcatel 100 AX.

Arquitectura

La arquitectura de hardware del Alcatel 1000 AX es la siguiente

Los dos bloques principales de la cadena de conexión ATM son la tarjeta de acceso (BBTU) que determina los enlaces de transmisión y provee las funciones terminales ATM (política de tráfico, mantenimiento de los VC y VP...) y la tarjeta de conmutación (BBASE) que está ensamblada en una red de conmutación de 3 etapas.

En la versión actual del hardware del núcleo ATM, las interfases físicas son 1 x 622 Mbps SDH STM-4-4c (o SONET STS 12c); 4 x 155 Mbps (o SONET STS 3c); 4 x 34 (o 45) Mbps PDH; 16 x 2 (o 1.5 Mbps) Mbps PDH.

Dimensiones

Las dimensiones de la versión presente del hardware del núcleo ATM se encuentran contenidas en la figura 5.8

Número de tarjetas de terminación (BBTU) conectadas a la red de conmutación ATM	128
Número de conexiones ATM por tabla de terminación	4096
Número de conexiones por terminación con capacidad para el mantenimiento del desempeño	32 VPC+ 32 VCC
Capacidad de conmutación BBASE (matriz de 16 x 16 con accesos de 622 Mbps)	10 Gbps
Capacidad total de conmutación	80 Gbps

Figura 5.8. Dimensiones de la versión presente del Hardware del Núcleo ATM.

Temas principales

Han sido realizados una serie de estudios para verificar que la transmisión de celdas ATM vía satélite es posible. Pero además de la transmisión y acceso múltiple, existen otra serie de factores como el número de usuarios, la posibilidad de encriptamiento. Por ejemplo, cuando un nodo ATM sea colocado en el cielo, debido a su gran cobertura, debe ser capaz de manejar un mayor número de usuarios que su contraparte terrestre.

De acuerdo a los estándares ATM actuales, un canal de señalización se encuentra asociado de forma permanente a cada usuario. Pero se observa que dichos canales no se encontrarán saturados, debido a esto se debe de encontrar una solución que asigne de forma adecuada recursos de radiofrecuencia para

los canales de señalización entre la estación terrena del usuario y el satélite y entre el satélite y el centro de operación de la red.

En el conmutador se utilizan los circuitos VLSI de forma intensiva para lograr el desempeño requerido de los conmutadores ATM. Las características típicas de los circuitos utilizados en el Alcatel 1000 AX se encuentran contenidos en la figura 5.9.

Frecuencia de I/O	155 Mhz
Número de compuertas	Compuertas k de 74
Tecnología de integración	CMOS de 0.6 μ m
Paquetes	PQFP 240
Potencia de D.C.	2.1 W

Figura 5.9. Características típicas de los circuitos utilizados en el Alcatel 100AX.

Adecuación del conmutador a la arquitectura ATM vía satélite

Un paso fundamental para lograr que el 1000 AX cumpla con los requisitos espaciales es el dividir la Unidad de Terminación (TU): una parte la uTU se encontrará integrada en la estación terrena del usuario y la otra parte la sTU forma parte de la Interfase de radio ATM del satélite (ARI). La interfase de control remoto de la Red de Conmutación ATM (ASN) (R2AC) de radio permite que la estación de control y el controlador de conmutación de VC intercambien información de señalización, datos y celdas A&M.

La interfase ARI integrará técnicas avanzadas de codificación de canal y acceso múltiple dinámico para lograr un nivel adecuado de eficiencia entre la disponibilidad del servicio, errores en bit o bloque y uso eficiente del espectro. Para resolver el problema del número de los canales de señalización ATM, las celdas de señalización ATM (VP0/VC5) se utilizarán por área de cobertura satelital, multiplexadas en unidades de marco dedicadas que serán declaradas al nivel de la ASN como el VP de señalización. Esto reduce drásticamente el número de canales virtuales de señalización y mejora la eficiencia en la utilización del espectro en el caso de la señalización. La desmultiplexación puede realizarse en tierra al nivel del controlador SVC utilizando el Identificador Interno de Celda (ICI) utilizado internamente para transportar celdas ATM.

Para la interfase R2AC, la disponibilidad es claramente el factor más importante por lo que se requiere un esquema de codificación robusto.

Cuando se consideran los aspectos tecnológicos y de transmisión se sugiere una capacidad de conmutación de la ASN de 64 x 77 Mbps. Así que 8 elementos de conmutación en la primera etapa y 4

en la segunda se requieren para conmutar 5 Gbps con una probabilidad muy baja de bloqueo bajo condiciones de carga normal.

La arquitectura se muestra en la figura 5.10.

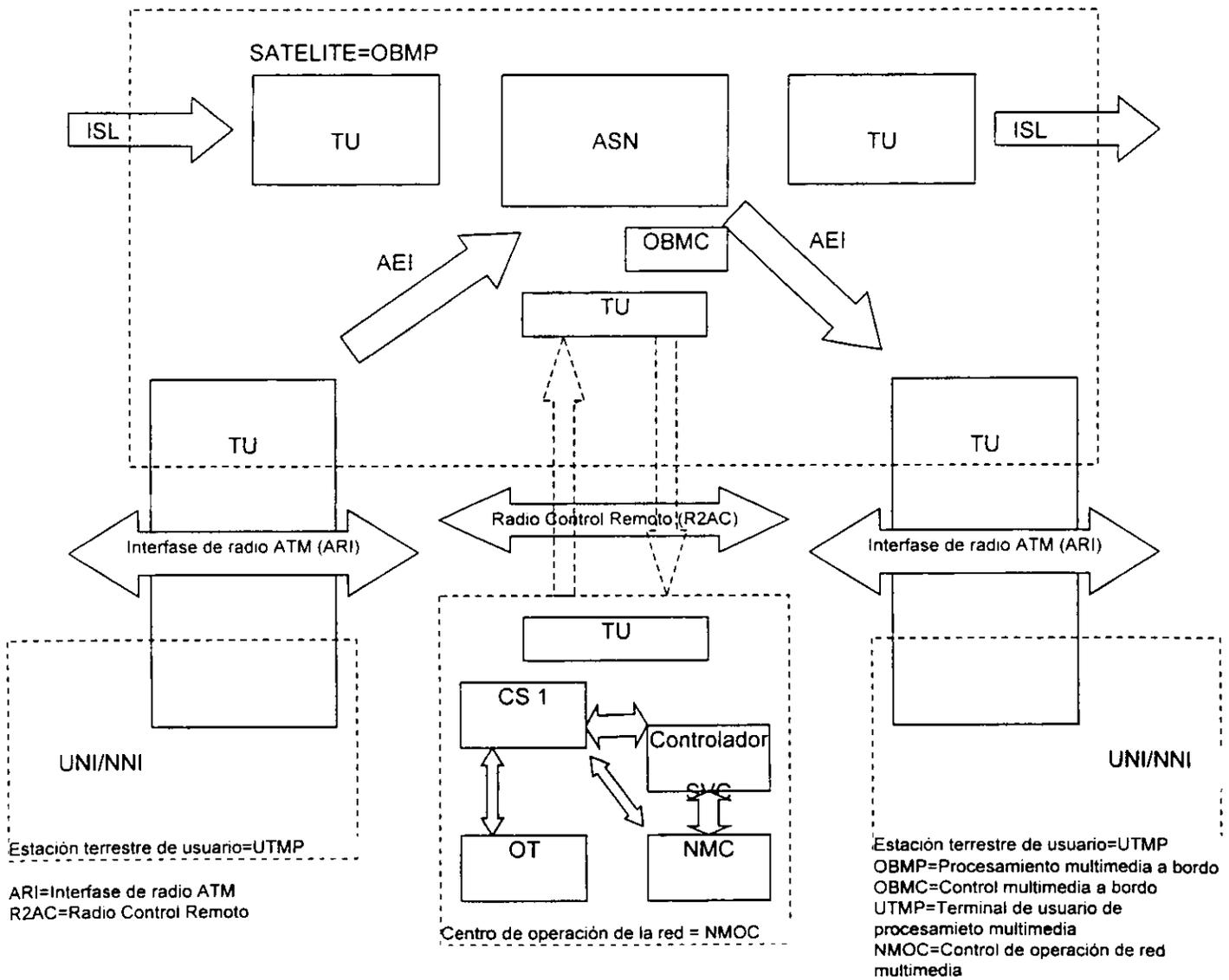


Figura 5.10. Arquitectura general de la ASN de 64x77 Mbps.

Canales de subida y bajada

El diagrama funcional de los canales de subida y bajada se muestra en la figura 5.11.

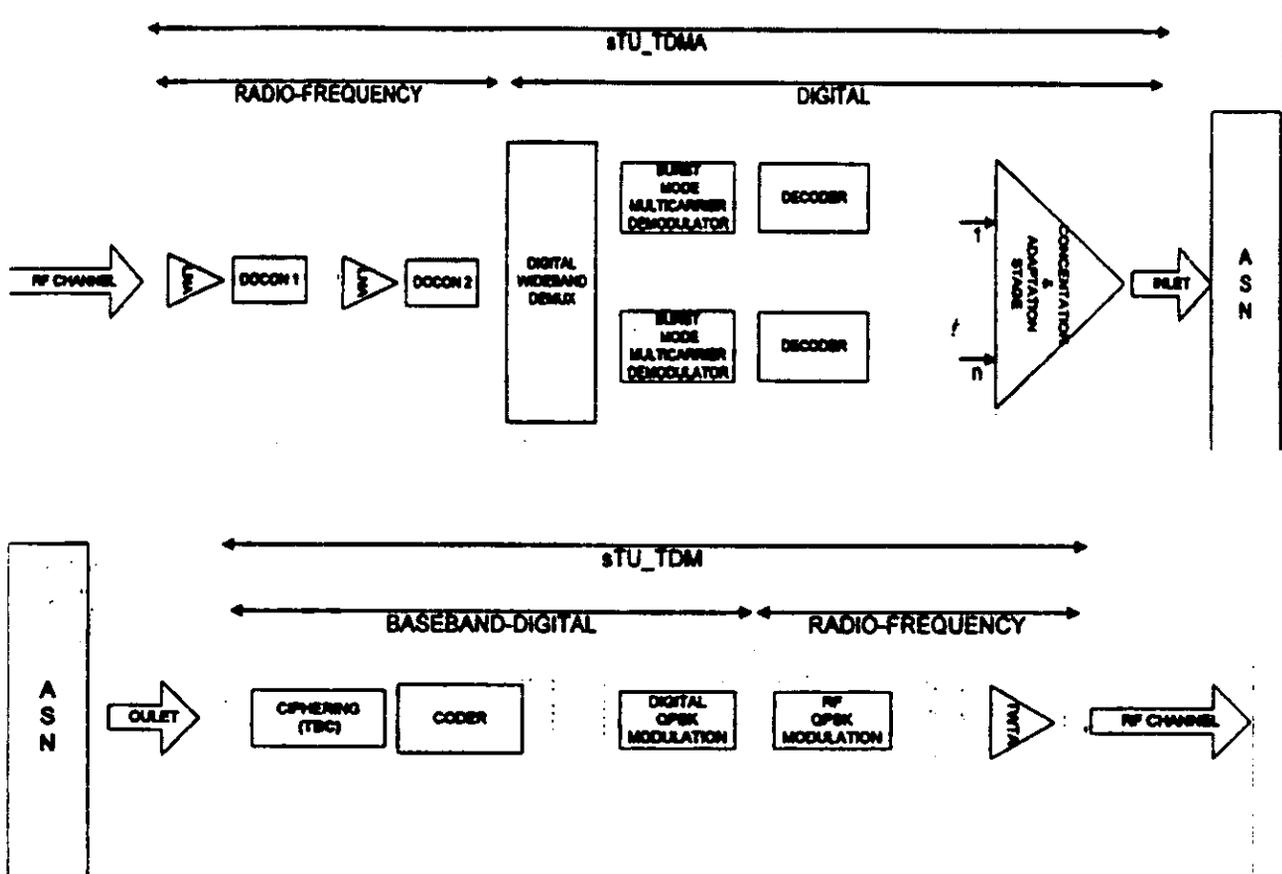


Figura 5.11. Diagrama funcional de los canales de subida y de bajada.

La terminal de usuario

Desde el punto de vista ATM, la conmutación es la única función implementada a bordo del satélite, las demás son responsabilidad de la Estación Terrena del Usuario como se muestra en la figura 5.12.

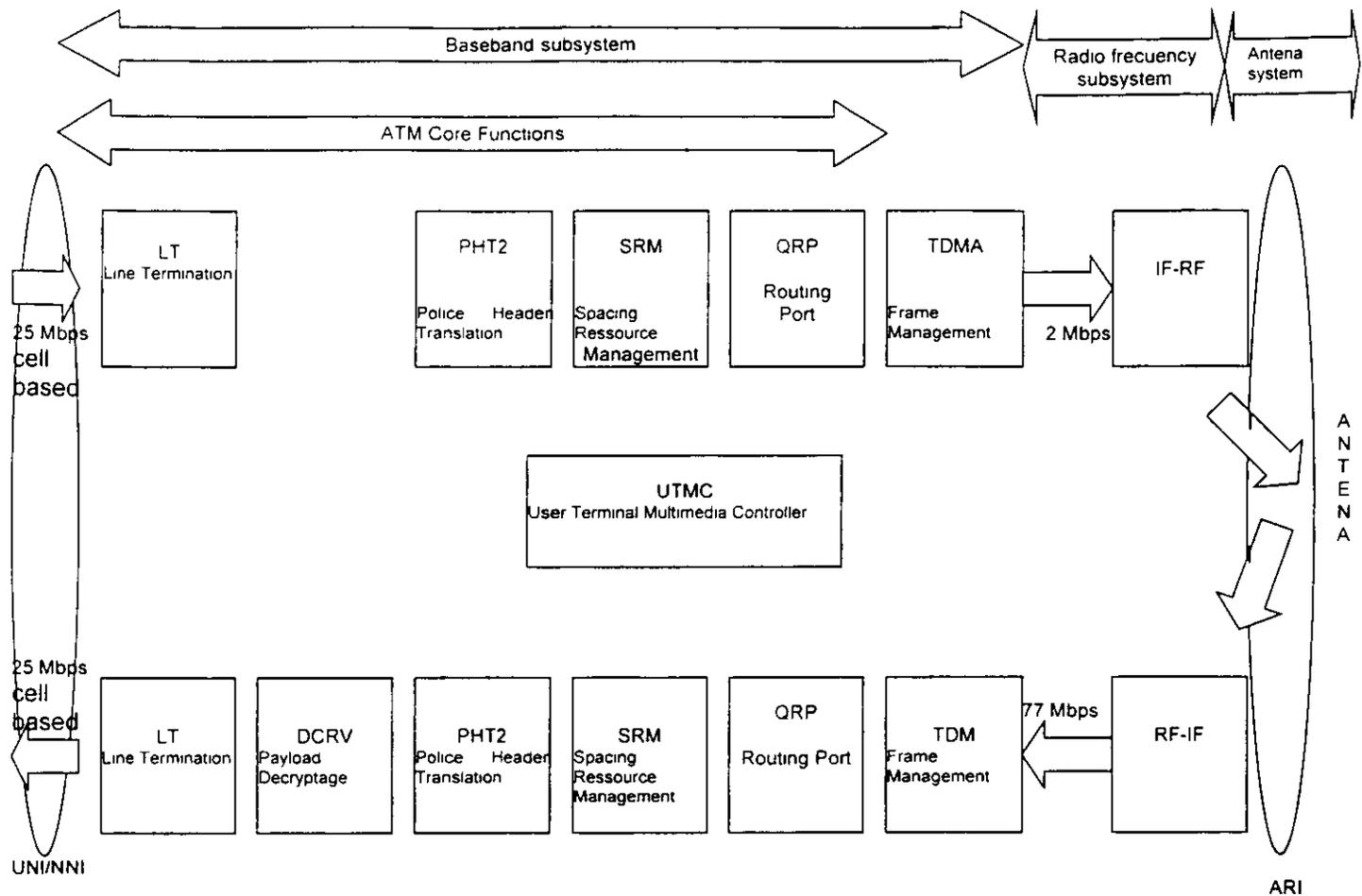


Figura 5.12. Terminal del usuario.

Se sugiere una terminal de transmisión de celdas a 25 Mbps ya que los conjuntos de chips dedicados y estándares están disponibles a 2 Mbps para el enlace de subida y a 77 Mbps para el enlace de bajada.

La arquitectura de la red ATM satelital

En esta sección se examinan los requerimientos de red para el componente satelital de las redes futuras de telecomunicaciones y se identifica una arquitectura que puede satisfacer las necesidades de la futura red integrada B-ISDN. El objetivo es hacer llegar a la terminal del usuario la funcionalidad de ATM, sin violar su naturaleza orientada a conexión y garantizando la calidad del servicio.

Arquitectura de la red satelital

Terminal del usuario (UT)

Las UTs deben ser capaces de manejar varios protocolos estándar tales como: ATM Interfase de usuario-red (ATM-UNI); Frame Relay UNI(FR-UNI); Red Digital de Servicios Integrados de Banda Estrecha (N-ISDN); Interfase de Tasa Básica (BRI); TCP/IP. Las UTs estarán conectadas a la unidad de adaptación del satélite (SAU) a través de las interfases estándar que se manejen.

Unidad de Adaptación del Satélite (SAU)

Esta es una unidad no-estándar especialmente diseñada. Es responsable de proveer el acceso a la red satelital. Dicha unidad efectúa todas las adaptaciones necesarias del protocolo de la terminal del usuario para el protocolo del satélite. La SAU también incluye funciones de la capa física tales como la codificación de canal, modulación/demodulación, las funciones de radio frecuencia y la sección de antena. Un grupo de diferentes tipos de terminales, con una variedad de capacidades de transmisión se encuentran disponibles para los sistemas satelitales. Iniciando con las tasas mínimas de transmisión de 8 o 16 kbps hasta los 144 o 384 kbps para terminales de usuario hasta los 2048 kbps o más para el caso de las terminales con antenas más grandes. Todas estas terminales comparten el mismo esquema de acceso y conjunto de protocolos.

El equipamiento del satélite (Payload P/L)

Se asume que en la mayoría de los satélites del futuro se realizará una regeneración completa de la señal. Las unidades de procesamiento a bordo del satélite realizan la multiplexación y desmultiplexación, la codificación y decodificación del canal y la conmutación de paquetes utilizando una configuración de multihaz multipunto. La mayor parte de las operaciones de alto consumo de potencia tales como: establecimiento y finalización de llamada; el control de la admisión de la conexión (CAC) se realizarán en tierra.

Estaciones gateway (GTW)

Estas son estaciones terrenas que proveen conectividad a las redes externas. En los sistemas de órbitas geoestacionarias la localización y el número de dichas estaciones depende en su mayor parte de la demanda de tráfico.

Estación de Control de la Red (NCS)

Esta es una entidad central que se utiliza en los sistemas satelitales geoestacionarios (GEO) (usualmente una por satélite) que provee el control de todos los recursos y las operaciones de la red satelital. Este nodo es responsable de asignar recursos de radio a las GTWs de acuerdo a un esquema prediseñado. El NCS se encarga de las funciones de ruteo y administración de llamada tales como: actualización de localización; autenticación, registro y eliminación de registro y facturación.

Interfases de comunicación

En la figura 5.13 se muestra un modelo de referencia de una red global satélite/B-ISDN, en donde el concepto de red inteligente (IN) se ha seleccionado para resolver los problemas relacionados con el ruteo de la llamada y las comunicaciones móviles. La Parte de Aplicación de Red Inteligente (INAP) es el protocolo que se utiliza en la IN para proveer la información de localización, autenticación, ruteo de llamada, facturación y mantenimiento.

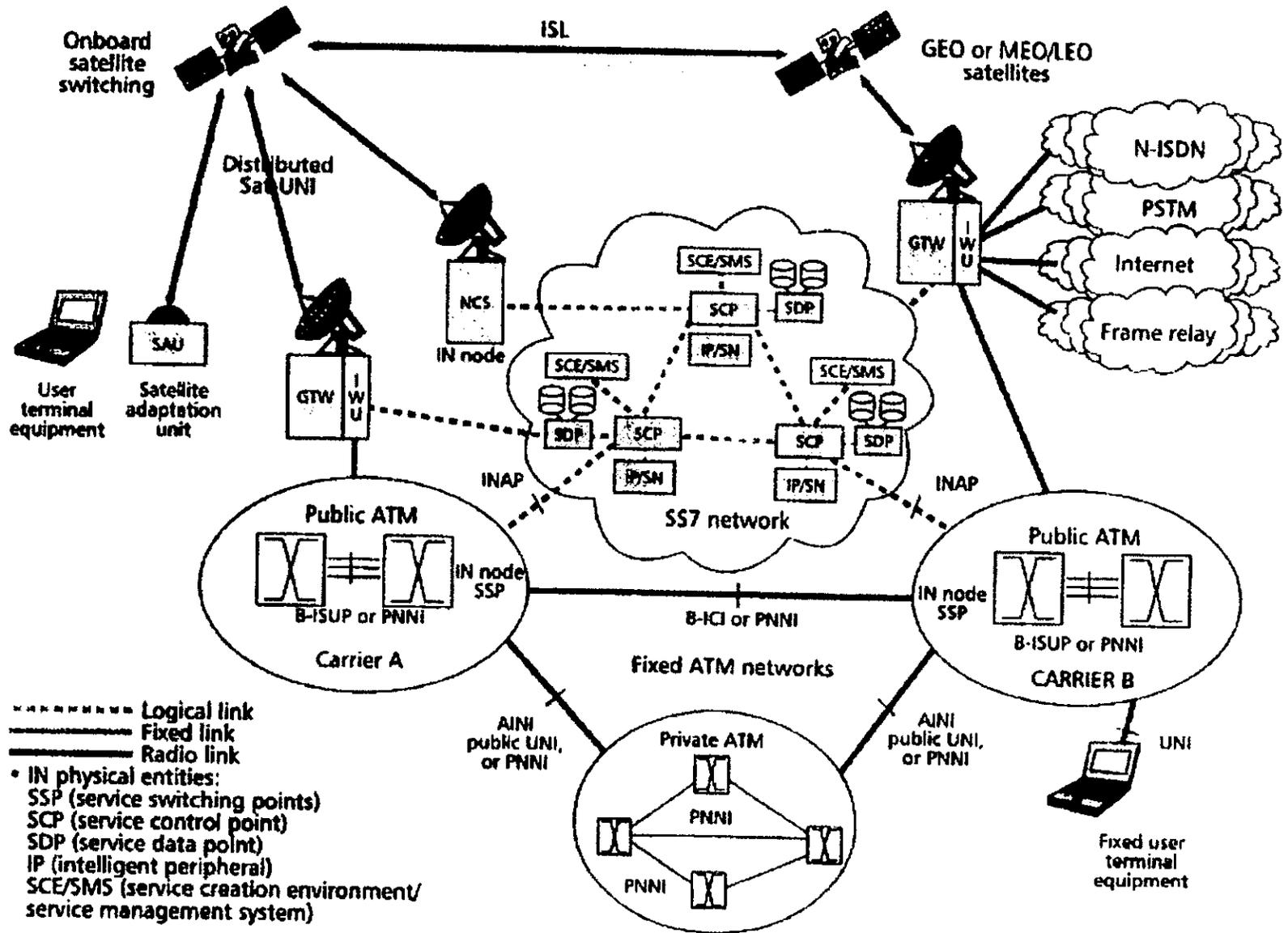


Figura 5.13. Modelo de referencia de una red global satélite/B-ISDN.

Las entidades de la red involucradas en la ruta de comunicación ATM punto a punto se muestran en la figura 5.14. La interfase de la UT a la SAU es el estándar ATM-UNI(se puede utilizar ATM-NNI). La interfase de la SAU a la red de acceso al satélite se nombró sat-UNI. Esta se encuentra distribuida entre las entidades de la red vía las interfases S_A , S_B y S_C . Las interfases de interconexión entre las redes ATM públicas y privadas pueden ser: la interfase entre redes ATM(ANNI); la interfase de red de usuario público(P-UNI) o la interfase de red a red privada(PNNI). Otra interfase que es utilizada entre diferentes redes ATM públicas de nombre la interfase entre portadoras B-ISDN(B-ICI) que es similar a la PNNI. Dos protocolos de señalización se pueden utilizar dentro de la red ATM la interfase de nodo de red B-ISDN (NNI) basada en B-ISUP o la especificación para la PNNI.

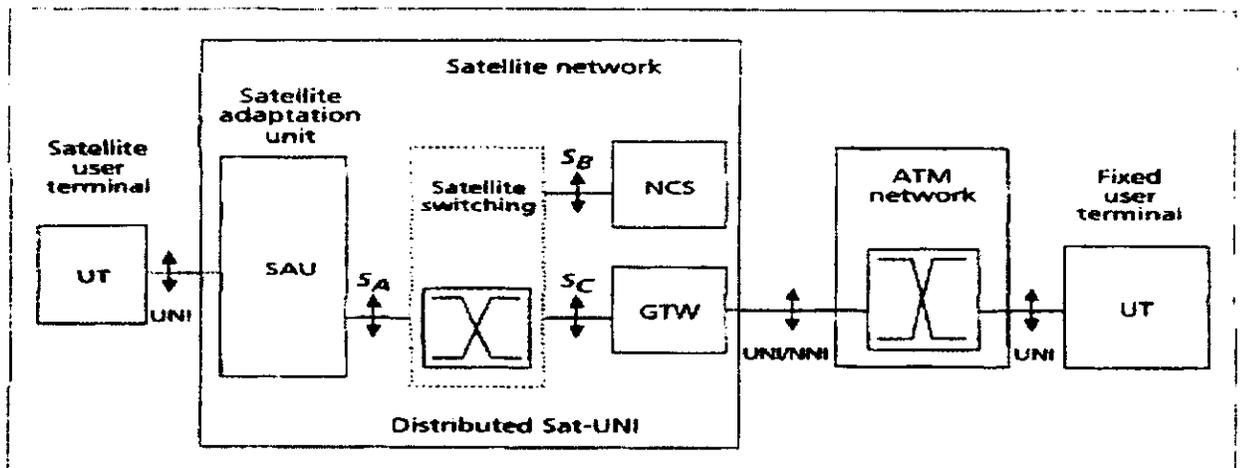


Figura 5.14. Entidades de la red involucradas en la ruta de comunicación ATM punto a punto

Implementación ATM via satélite 1. Encapsulamiento del protocolo ATM

La arquitectura para la encapsulamiento del protocolo ATM a través de un protocolo de satélite no-ATM se presenta en la figura 5.15.

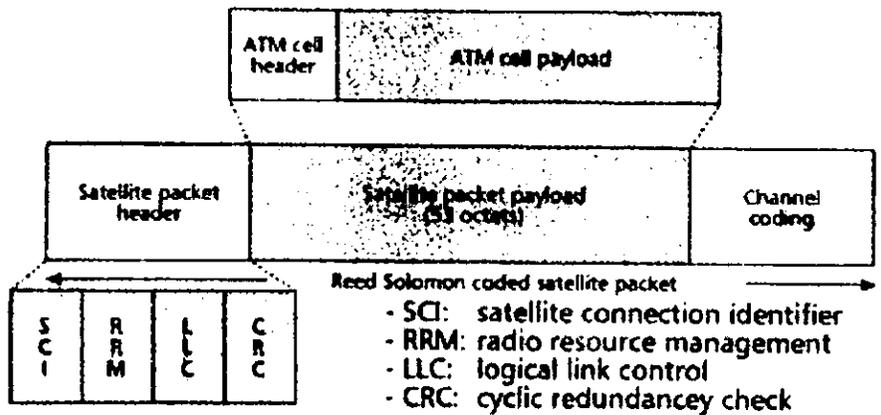
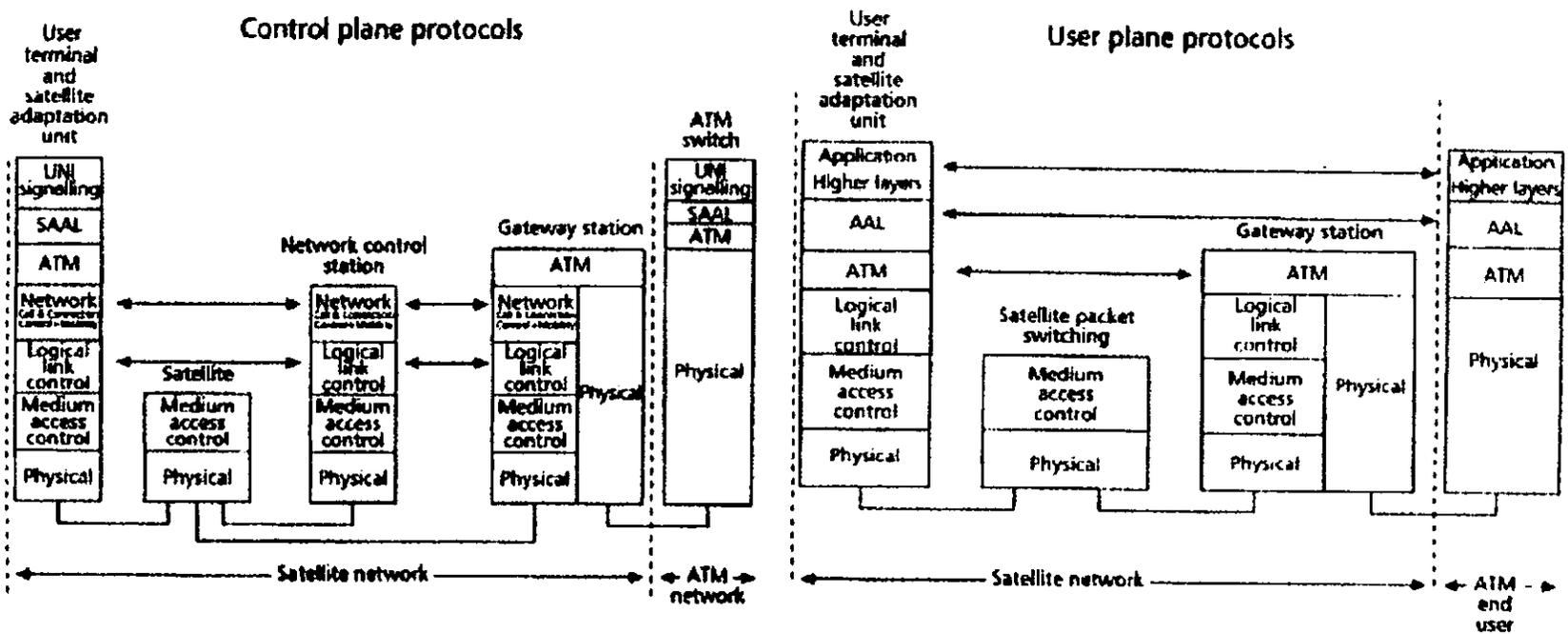


Figura 5.15. Arquitectura para la encapsulación del protocolo ATM a través de un protocolo de satélite no-ATM.

Señalización de la terminal del usuario y puntos de terminación del protocolo

El conjunto de protocolos en el plano de control se utiliza para la traducción de cualquier tipo de mensajes del protocolo de señalización de la UT en mensajes de señalización del protocolo de la red satelital. Se necesita un protocolo de señalización específico para el satélite para controlar las llamadas de las terminales de usuario así como las funciones de comunicación móvil en caso de que exista. Este protocolo esta constituido por todos los procedimientos necesarios para inicializar, mantener y liberar las conexiones a la red satelital y se encuentra localizado en las estaciones SAU, NCS y GTW. Este protocolo utiliza un enfoque orientado a conexión para ofrecer los QoS requeridos para todos los tipos de tráfico. Cada conexión al satélite se encuentra asociada a un identificador (SCI) el cual se utiliza para el ruteo dentro de la red satelital. Los mensajes de señalización de la ATM-UNI pasan de forma transparente a través de la estación GTW al primer conmutador ATM en tierra. Sin embargo, para las llamadas UT a UT deben ser atendidas por la estación GTW ya que estas conexiones están dentro de la red satelital. En ese caso, sólo un número limitado de GTWs que soporten la señalización UNI se utilizarán para la red satelital completa.

Control Lógico del Enlace y las capas MAC

Las capas de control lógico de enlace del satélite (LLC) y de control de acceso al medio (MAC) se agrupan dentro de la capa de control del enlace de datos(DLC). El DLC es necesario en este protocolo para intercambiar información entre las entidades de la capa del protocolo del satélite a través de la interfase espacial. Con el fin de soportar una interfase espacial flexible y de minimizar los retrasos por formación del paquete en la capa MAC, se necesita que la capa de red del protocolo provea unidades de datos (PDU) de 53 bytes a la DLC, por lo que mapear directamente una celda ATM por LLC PDU parece ser la solución (solamente para el enlace de bajada). En ese caso el campo de encabezado puede ser colocado después del encabezado de la capa MAC en cada marco que se trasmita. El paquete de la capa MAC del satélite consiste de un encabezado codificado, 53 bytes de datos más los bits de codificación extra. En el encabezado, se incluyen los siguientes 4 campos: el SCI, el campo de administración del recurso de radio (RRM), el campo LLC y el código de redundancia cíclica (CRC).

En un ambiente de un satélite de haz múltiple multicobertura, la magnitud del campo SCI que únicamente define una conexión activa necesita ser lo suficientemente largo para incluir el número máximo de

conexiones activas que puede soportar el sistema en cualquier momento. La presencia del campo RRM depende de la selección del protocolo de manejo de recursos de radiofrecuencia que utiliza la red satelital. Puede operar peticiones de ancho de banda y de asignación en el enlace de bajada y de subida. El campo LLC se puede utilizar para multiplexar varias conexiones de subida que se originan en la misma SAU utilizando el mismo valor de SCI. Finalmente el campo CRC se requiere para detectar errores en el encabezado del paquete de satélite. El dimensionamiento del enlace satelital de la mayoría de los sistemas propuestos logra una tasa de bit en error (BER) de menos de 10^{-6} utilizando códigos de protección.

En la figura 5.16 se muestra el cálculo de la longitud del campo SCI. Se asume que la capacidad total del satélite se encuentra uniformemente distribuida en su configuración multihaz y que el canal más pequeño disponible para el usuario es de 16 kbps. Los resultados son de un SCI de 2 octetos, incluyendo los bits 2-3 para el campo RRM. Con la finalidad de manejar terminales con mayor tasa de transmisión, 3 octetos son necesarios en el campo LLC, resultando un encabezado de 5 octetos más 1 octeto para corrección y/o detección de error. Un esquema alternativo es la utilización de la extracción del encabezado ATM en la SAU y su reconstrucción en la GTW, ya que no es utilizado por el conmutador de la red satelital. Aunque esta técnica requiere potencia extra para el procesamiento, reduce considerablemente el encabezado del paquete del satélite. Sin embargo, consumirá rápidamente las conexiones disponibles de los campos SCI y/o LLC o incrementara el tamaño del encabezado de la MAC, debido a que por cada conexión, la información referente a los campos de GFC, al tipo de carga y al CLP deben ser insertados en el encabezado de la MAC, sólo de esta forma la GTW receptora será capaz de detectar el tipo de celda ATM recibida.

Consideraciones sobre la capa LLC del protocolo

Debido a que el paquete ATM tiene un tamaño compatible con el de una celda ATM, la utilización de la capa LLC se vuelve más complicada. Las dificultades se presentan porque la funcionalidad de la capa (procesamiento de ventanas, temporizadores, confirmación de transmisión) incrementa el tamaño del sobreencabezado de la celda si se lleva a cabo en cada celda S-ATM o porque el reensamblado (y la segmentación posterior) de varias celdas S-ATM se requiere cuando se utiliza más de una celda S-ATM para crear un LLC-PDU más grande. La utilización de un protocolo similar al SSCOP (Service Specific Connection Oriented Protocol), en la AAL, también complica el conjunto de protocolos debido a que un

protocolo de punto a punto tiene que terminar el la GTW más aún se requiere espacio de buffer adicional cuando se espera la llegada de una celda fuera de orden después de una operación de rechazo selectivo, debido a que en ATM las celdas deben de recibirse en el mismo orden en el que fueron transmitidas. El tamaño de este buffer debe ser la tasa de celdas de una conexión específica multiplicada por el retraso de viaje redondo. La ventaja de la multiplexación de una o más conexiones no es tan atractiva en este caso, debido a que la capa ATM ya ofrece capacidad de multiplexación. Otro inconveniente es el incremento en la capacidad de procesamiento para la administración del tamaño de la ventana y la creación de temporizadores. Más aún el uso de esa función deja fuera la necesidad de utilizar ATM por su simplicidad dado que para cada conexión una instancia del protocolo LLC debe ser creada en la estación GTW. Como resultado, la utilización de una capa LLC no es tan conveniente para un sistema nuevo que soportará ATM vía satélite.

Mecanismo de retransmisión basado en eliminación parcial de paquetes

Una solución enfocada a ATM se puede dar al problema anteriormente planteado. Si asumimos que el usuario receptor es responsable de las confirmaciones y las retransmisiones de los PDUs de las capas superiores. Si se desarrolla un mecanismo que pueda detectar celdas con error en el conmutador del satélite, estas celdas y las consecutivas que pertenecen al PDU de la misma capa superior pueden ser eliminadas y por lo tanto reducir el tráfico en la red. La complejidad de esta solución comparada con el caso de la LLC es menor porque no se necesita capacidad adicional de procesamiento y se utiliza un sobrecabezado menor por celda ATM. Sólo es necesaria una indicación en el encabezado de la última celda ATM del PDU de la capa superior y un estado adicional por VC, sin embargo dicho mecanismo introduce un retraso extra en la recepción del mensaje de retransmisión y reduce la salida del enlace de radio debido a que más de una celda ATM es retransmitida cada vez que una retransmisión de un PDU de una capa superior es requerida. Considerando lo anterior la salida del enlace de radio es equivalente al "protocolo de retransmisión selectiva" cuando se utiliza un protocolo DLC y al protocolo "go back N" cuando se realizan las retransmisiones punto a punto (N es el número de celdas por PDU de capa superior). El mecanismo anteriormente expuesto se propone con el nombre de PPD (Partial Packet Discard)

Implementación del PPD para la AAL5

La implementación del PPD es directo en la AAL tipo 5 (diseñada para comunicación de datos) en una red ATM fija. Debido a que el PPD es utilizado por VC, el conmutador que lo utiliza, una vez que elimina una celda del VC (debido principalmente al llenado del buffer) continuará eliminando las celdas de ese VC hasta que reciba el parámetro de la AUU en el encabezado de la celda, indicando el fin del paquete AAL, este paquete no es eliminado. Debido a que la AAL5 no soporta la multiplexación simultánea de paquetes en un VC, la AUU puede ser utilizada para indicar la frontera de los paquetes. Esta es una desventaja del mecanismo PPD ya que la salida fija de la red se reduce por la transmisión de celdas con información no útil. Sin embargo el mismo mecanismo puede utilizarse en las redes ATM vía satélite, existe una pequeña diferencia; la razón principal para eliminar celdas es la alta BER del enlace físico y no la falta de espacio en el buffer. Para superar este problema, se requiere protección adicional en el encabezado para al menos detectar si una celda con error tiene un encabezado correcto. Un código de corrección de errores incrementará el desempeño del PPD, cuando la función PPD no se encuentra en el conmutador del satélite. En este caso la celda con error será enviada al lugar correcto y el encabezado proveerá la información referente al mecanismo PPD.

Implementación del PPD para la AAL3/4

En el caso de la AAL3/4 la otra AAL diseñada para comunicación de datos se utiliza otra solución. Esto debido a la multiplexación de diferentes conexiones en la misma VC (utilizando los mismos valores SVPI/SVC1) y el hecho de que la AAL3/4 no utiliza el bit AUU en el encabezado ATM. Existen dos alternativas de solución (en ambos casos la confirmación es enviada por las estaciones receptoras). La primera solución utiliza la capa AAL5 en la interfase espacial. Cuando la AAL3/4 es requerida por la conexión, puede ser producida en el conmutador GTW. La desventaja de esta solución es que el conmutador inicial debe realizar la traducción de un PDU AAL5 a un PDU AAL3/4.

La segunda solución requiere la modificación de la AAL3/4 en el lado de la estación transmisora al satélite. Inicialmente, la UT transmisora debe crear todas las celdas ATM de un paquete de datos superior, de esta forma todas las celdas ATM pertenecerán a la misma conexión. Entonces, a la AAL3/4 en la UT se le permite procesar otro PDU de la capa superior. Antes de que se transmita la última celda ATM de la conexión, el bit AUU debe de prenderse, de forma similar al caso de la AAL5. No se necesita modificar el protocolo AAL3/4 en la terminal receptora, sin embargo, cada vez que el bit AUU es prendido en la terminal transmisora para indicar a la última celda ATM del PDU de la capa superior debe ser

puesto a cero en la estación GTW. Si la terminal transmite información utilizando la AAL3/4, ninguna modificación es necesaria en las terminales fija y del satélite.

Capacidad de conmutación del satélite uniformemente distribuida (Gb/s)	Número de áreas de cobertura de haz (spot beams) del satélite	Número de conexiones máximo por área de cobertura de haz	Número requerido de bits en el campo SCI
2	32	4096	12
2	64	2048	11
2	128	1024	10
2	256	512	9
5	32	10.240	13
5	62	5120	12
5	128	2560	11
5	256	1280	10
10	32	20.480	14
10	64	10.240	13
10	128	5120	12
10	256	2560	11

Figura 5.16. Cálculo de la longitud de campo SCI.

Implementación ATM 2. Arquitectura ATM pura

En un escenario de red ATM terrestre y satelital, el conjunto de protocolos de la red satelital es muy similar al ATM normal. En este caso los componentes satelitales utilizan la capa S-ATM que reemplaza a la capa ATM estándar junto con las capas MAC y de recursos de RF.

La arquitectura de protocolos se muestra en la figura 5.17 La señalización para el control de llamadas se basará en el protocolo Q.2931. Debido a que la capa S-ATM ofrece el mismo servicio de acceso que la capa ATM, los servicios ATM nativo, TCP/IP o UDP/IP se pueden implementar de forma similar a como se hacen en esta última.

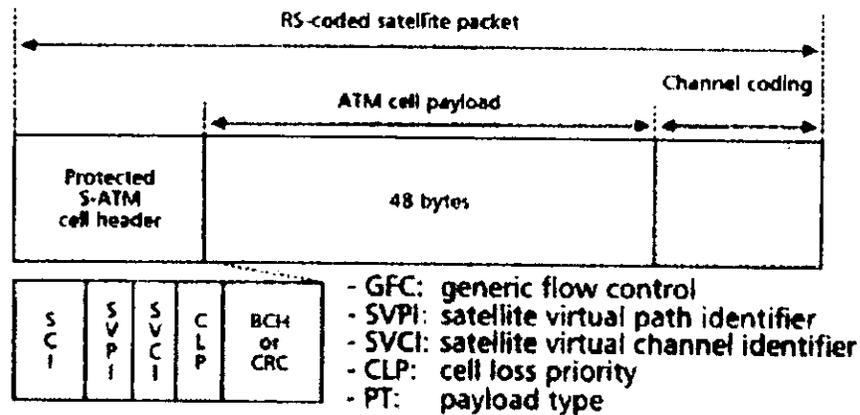
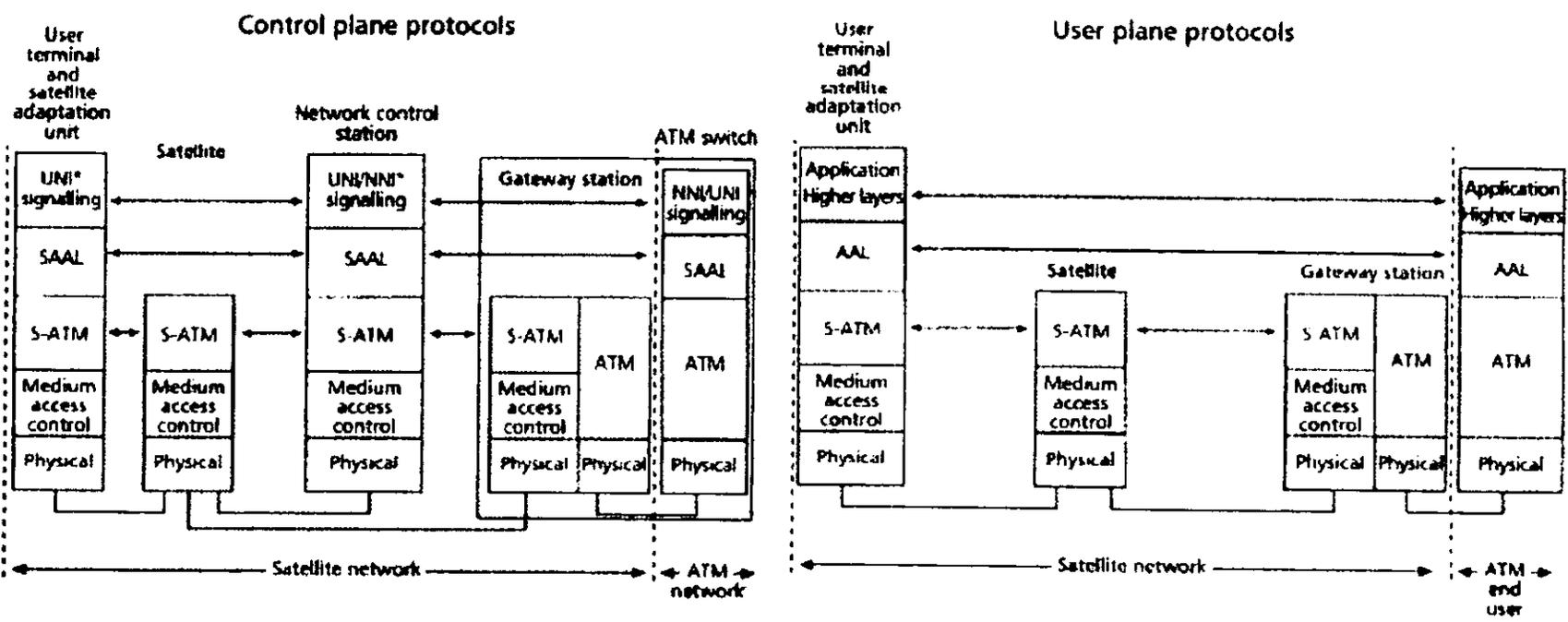


Figura 5.17. Arquitectura de protocolos. 198

La capa S-ATM

Se propone una versión modificada del encabezado de la celda ATM para ser utilizada en la interfase espacial. El paquete S-ATM, equivalente a una celda ATM se muestra en la figura 5.17 En este se combinan la función de los encabezados de la capa ATM y MAC. Los 4 bits de control de flujo genérico que existen en el encabezado estándar de las celdas ATM se pueden eliminar debido a que su uso no está claramente especificado. Los campos estándar ATM VPI/VCI se reemplazan por los campos del satélite VPI/VCI (SVPI/SVCI) lo cuales son utilizados por el conmutador a bordo. Los bits(3 bits) de identificación de la carga útil (PTI) y el bit de prioridad de la pérdida de la celda (CLP) necesitan estar presentes en el encabezado de la celda S-ATM, ya que contienen información de la celda a la que pertenecen en particular. Finalmente se necesita código extra para proteger los bits del encabezado del paquete S-ATM para asegurar su ruteo y mantener la CMR (Cell Misinsertion Rate) baja.

Dimensionamiento de los campos SVPI y SVCI

El dimensionamiento de los campos SVPI/SVCI depende de varios de los parámetros del sistema tales como la capacidad del satélite, el número de ases y la granularidad de la terminal de transmisión.

Los valores 5.16 son válidos, si sustituimos el SCI con los campos SVPI/SVCI. El campo SVPI puede asociarse con el ID del as y la combinación de ambos identifica una conexión de terminal específica. Si asumimos que la longitud del SVPI es \log_2 (capacidad máxima por as) = 14 bits y se asignan 4 bits para el campo SVCI, la longitud de los campos GFC, SVPI, SVCI, CLP, y PT será de 26 bits. En tal caso, un código corto BCH tal como el BCH(31,26) puede utilizarse para la corrección y/o detección de errores en el encabezado. Lo anterior es válido siempre y cuando el conmutador en el satélite pueda modificar los valores del SVPI/SVCI de las celdas entrantes antes de colocarlas en el puerto de salida. Si esta función no esta disponible habrá la necesidad de duplicar el espacio de direcciones agregando uno o más bits a los campos SVPI/SVCI.

El desarrollo de estándares

En respuesta a la demanda de la industria, la Sección de Interoperabilidad y Comunicaciones de la División de Comunicaciones Satelitales de la TIA ha iniciado la estandarización del protocolo TR34.1 en donde se definen una serie de arquitecturas de red para la futura definición de la capa física. Se han definido dos tipos de arquitecturas la primera para satélites sin procesamiento a bordo y la segunda para

satélites que si cuentan con este. En las redes ATM con sistemas de procesamiento a bordo, el equipo a bordo realiza todas las funciones de conmutación. Las funciones de control se encuentran distribuidas en el conmutador ATM y el centro de control terrestre. Las interfases ATM entre el conmutador a bordo y las terminales terrestres pueden ser del tipo UNI o NNI. El estándar TR34.1 divide las redes satelitales de este tipo en tres diferentes arquitecturas de acuerdo a la conectividad ofrecida por éstas:

- SATATM 2.1(Red de Acceso ATM) En esta arquitectura de red se utilizan enlaces satelitales de baja velocidad para conectar host ATM remotos a redes terrestres. La interfase ATM entre los hosts ATM y el conmutador a bordo es una UNI y la interfase ATM entre el conmutador a bordo y la red terrestre ATM es una NNI.
- SATATM 2.2(Red ATM de interconectividad) En esta arquitectura de red, el satélite es un nodo ATM que interconecta varias redes ATM terrestres con enlaces de alta velocidad. La interfaz es del tipo NNI.
- SATATM 2.3(ATM en red) En esta arquitectura de red, varios satélites forman una red ATM en el espacio por medio de enlaces intersatelitales. Esta red proveerá acceso e interconectividad a la red ATM. La interfaz entre los satélites es del tipo NNI.

Los niveles de error en la transmisión y la calidad en el servicio

El estudio de los niveles de error en las redes ATM via satélite es fundamental para establecer su capacidad real. Actualmente se han realizado pruebas y definido estándares para los servicios que operarán en la banda Ku con satélites transparentes, sin embargo dichos estándares son extrapolables a la banda Ka si nos referimos a niveles de error en los diferentes servicios disponibles. El desarrollo de las soluciones de codificación de canal es esencialmente el mismo.

Modelo de referencia

Para interpretar la atribución de los objetivos de calidad de funcionamiento a los tramos de satélite de una conexión ATM, se incluye en la figura 5.18 un modelo de referencia. Obsérvese que el trayecto de satélite puede comprender estaciones terrenas y un solo satélite transparente. Algunos sistemas de satélites pueden incluir procesamiento a bordo (OBP, *on board processor*), conmutación ATM y enlaces entre satélites (EES). El segmento terrenal del trayecto de satélite ATM comprende el equipo de la estación terrena (antenas, amplificadores, conversores ascendentes y descendentes, módems, etc.) y cualquier

equipo ATM específico de satélite que pueda utilizarse en un trayecto de satélite. El punto de demarcación entre la red ATM nacional y la red ATM internacional se conoce con el nombre de punto de medición internacional (MPI, *measurement point international*) que puede ser una interfaz usuario-red (UNI, *user network interfase*) o una interfaz entre portadoras de banda ancha (B-ICI, *broadband inter-carrier interfase*). El tramo entre dos MPI se conoce con el nombre de porción interoperator internacional (IIP, *international interoperator portion*).

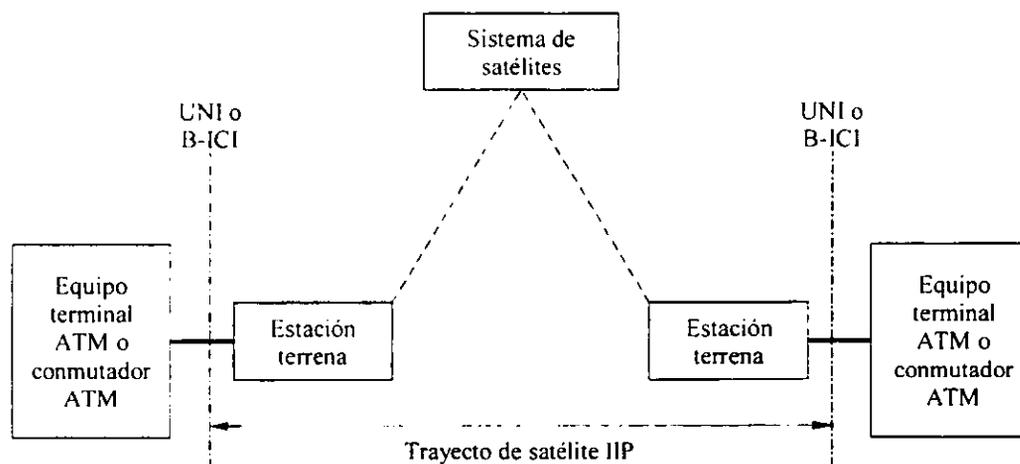


Figura 5.18. Modelo de referencia para un proyecto de satélite ATM.

Uno de los usos de los satélites consiste en proporcionar la conectividad entre redes ATM distintas situadas en diferentes países. En tal caso, la red ATM terrenal generalmente establecerá una interfaz con la subred de satélites mediante una UNI (o B-ICI). Como es posible que este punto de interfaz no siempre esté ubicado en el mismo sitio que la estación terrenal de satélite, puede haber una distancia terrenal entre el nodo de cabecera terrenal y la propia estación terrenal.

Objetivos de calidad de funcionamiento ATM de los enlaces por satélite

Este punto proporciona una interpretación de los objetivos de calidad de funcionamiento definidos en la Recomendación UIT-T I.356 y los correspondientes requisitos para el tramo o tramos por satélite de una conexión ATM.

Los parámetros y objetivos de calidad de funcionamiento de una red de capa ATM de extremo a extremo para la RDSI-BA se definen en la Recomendación UIT-T I.356. Para tener en cuenta las características y

los requisitos de varios tipos de tráfico, dicha Recomendación describe diferentes clases de servicio. La clase 1 (clase exigente) es una clase sensible al retardo y está destinada a soportar servicios de velocidad binaria constante (CBR, *constant bit rate*) y de velocidad binaria variable (VBR, *variable bit rate*) en tiempo real, tales como la telefonía y la videoconferencia. La clase 2 (clase tolerante) es una clase tolerante al retardo y soporta servicios de velocidad binaria disponible (ABR, *available bit rate*) y VBR no en tiempo real, tales como video y datos. La clase 3 (clase binivel) soporta servicios VBR y ABR tales como datos de alta velocidad. Por último la clase 4 (clase sin especificar) que soporta servicios de velocidad variable sin especificar (UBR, *unspecified bit rate*), tales como transferencias de ficheros y correo electrónico. en la figura 5.19. se muestran los objetivos de calidad de funcionamiento de la capa ATM para las diversas clases de servicios. Puede que en el futuro sea necesario revisar estos objetivos basándose en la experiencia real de funcionamiento.

	CTD	CDV bipunto	CLR ₀₊₁	CLR ₀	CER	CMR	SECBR
Objetivos por defecto	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	4×10^{-6}	1/día	10^{-4}
<i>Clases de QoS:</i>							
Clase 1 (clase exigente)	400 ms	3 ms	3×10^{-7}	Ninguno	Por defecto	Por defecto	Por defecto
Clase 2 (clase tolerante)	U	U	10^{-5}	Ninguno	Por defecto	Por defecto	Por defecto
Clase 3 (clase binivel)	U	U	U	10^{-5}	Por defecto	Por defecto	Por defecto
Clase U	U	U	U	U	U	U	U

Figura 5.19. Definiciones de clases de QoS y parámetros de calidad de funcionamiento de la red

La clase de QoS requerida por cada aplicación forma parte del procedimiento de negociación del contrato entre el usuario y la red. Si ésta puede proporcionar el nivel de servicio solicitado, se establecerá la conexión. Si hay algún objetivo de calidad de funcionamiento que no puede satisfacerse, la conexión será denegada. Una vez establecida la conexión, la red debe asegurar que durante la misma se satisfacen los objetivos de calidad de funcionamiento de la clase de QoS.

Principios de atribución de la calidad de funcionamiento ATM

La Recomendación UIT-T I.356 especifica los límites superiores de los objetivos de calidad de funcionamiento de la transmisión ATM. Atribuye parte de los objetivos de extremo a extremo a los tramos nacional e internacional de una HRXATM. Los satélites geostacionarios tienen una atribución especial partiendo de la hipótesis de que los satélites sustituirán una distancia terrenal considerable, múltiples nodos ATM y porciones de países de tránsito.

Estas atribuciones de la calidad de funcionamiento se definen entre los puntos de medición ATM, pues se refieren a calidad de funcionamiento de la transmisión ATM y no a elementos individuales de los equipos de transmisión tales como los sistemas de satélites. Por consiguiente, la atribución a la IIP incluye la estación terrena y puede incluir nodos de conmutación ATM así como el sistema de satélites.

Esta Recomendación supone que la estación terrena no introduce errores significativos y que puede darse toda la atribución al sistema de satélites. Por consiguiente, los objetivos indicados en términos de parámetros de capa ATM en los puntos de medición ATM deben simplemente convertirse a los objetivos de BER del enlace por satélite. Sin embargo, puede que esta hipótesis no sea válida para todas las configuraciones de circuitos. En la figura 5.20 aparece un resumen de la atribución de objetivos especificados en la Recomendación UIT-T I.356 a tramos de conexión con enlaces por satélite.

	SECBR y CER (clases 1, 2 y 3) (%)	CLR (clase 1) (%)	CLR (clases 2 y 3) (%)
Nacional	42	35	34.5
IIP(0)	35	25	1
Parte de tránsito internacional	36	30	9
IIP(1)	38	30	11
IIP(2)	42	33	21
IIP(3)	48	42	31

Figura 5.20. Atribución de los objetivos de la Recomendación UIT-T I.356 a tramos de conexión con enlaces por satélite.

De acuerdo con la Recomendación UIT-T I.356, la abreviatura IIP (x) ($x = 0, 1, 2 \dots$) se utiliza para indicar una IIP de canal virtual (VC, *virtual channel*) con « x » países de tránsito intermedio, cada uno de los cuales proporciona funciones de transconexión o de conmutación de trayecto virtual (VP, *virtual path*).

Objetivos de calidad de funcionamiento ATM de los sistemas de satélites

Los valores numéricos de los parámetros de calidad de funcionamiento ATM de los sistemas de satélites pueden obtenerse aplicando las atribuciones indicadas en la figura 4.20 a los objetivos de calidad de funcionamiento que figuran en la Recomendación UIT-T I.356. Como ejemplo, en la figura 4.21 se muestran los objetivos de calidad de funcionamiento ATM para un enlace por satélite utilizado en el tramo internacional que proporciona servicios de clase 1 y no contiene funciones de conmutación o transconexión (véase la Nota 1).

NOTA 1 – La atribución de los objetivos de calidad de funcionamiento para los sistemas de satélites geostacionarios que incluyen conmutación y procesamiento ATM debe ser objeto de estudios ulteriores.

Conversión entre parámetros de la capa ATM y de la capa física

En este punto se indica una correspondencia entre los parámetros de la capa ATM CLR, CER y SECBR y la BER del enlace por satélite. También se consideran los otros parámetros de la capa ATM, a saber CMR, CTD y CDV y la repercusión de las características del sistema de satélites en dichos parámetros.

Parámetros de calidad de funcionamiento	Objetivo UIT de extremo a extremo	Objetivo UIT para el satélite
CLR	$3 \times 10^{-7(1)}$	7.5×10^{-8}
CER	4×10^{-6}	1.4×10^{-6}
SECBR	10^{-4}	3.5×10^{-5}
CTD	400 ms	320 ms (máximo)
CDV	3 ms	Despreciable
CMR	1/día	1/72 h ⁽²⁾

(1) Es posible que en el futuro las redes puedan lograr un valor de CLR 1×10^{-8} para la clase 1. Este tema debe ser objeto de interior estudio.

(2) La atribución para el equipo de procesamiento ATM a bordo debe ser objeto de ulteriores estudios.

Figura 5.21. Objetivos de calidad de funcionamiento ATM para un enlace por satélite utilizado en el tramo internacional

Características de los errores de transmisión por satélite

Cuando se utilizan satélites geostacionarios y estaciones terrenas fijas, el canal de transmisión del satélite es gaussiano y los errores de transmisión se caracterizan por producirse a ráfagas debido a la aleatorización y a la codificación utilizadas en los módems de satélite. Normalmente, los errores que surgen de un decodificador tienden a agruparse en ráfagas según los algoritmos de decodificación empleados. Una ráfaga de error viene definida por dos parámetros: la longitud de ráfaga media (L) y el

número medio de errores de bit por ráfaga (N). En la figura 5.22 aparecen los valores de L y N para los códigos de corrección de errores por satélite típicos.

Código de corrección de errores	Longitud de ráfaga media (L)	Número medio de errores de bit por ráfaga (N)
Codificación convolucional de índice de velocidad 3/4 con decodificación de Viterbi	29	11,5

Figura 5.22. Valores de L y N para los códigos de corrección de errores por satélite comúnmente utilizados.

Los valores indicados se obtuvieron realizando mediciones empíricas de errores en ráfaga. Es posible realizar cálculos analíticos para esquemas de codificación complejos, pero es difícil obtener los resultados y, por consiguiente, se necesitan mediciones para confirmarlos.

CLR

El mecanismo de control de errores de encabezamiento (HEC, *header error control*) de las celdas ATM puede corregir errores aislados y detectar casi todos los errores múltiples en los cinco bytes que contiene el encabezamiento de una celda ATM.

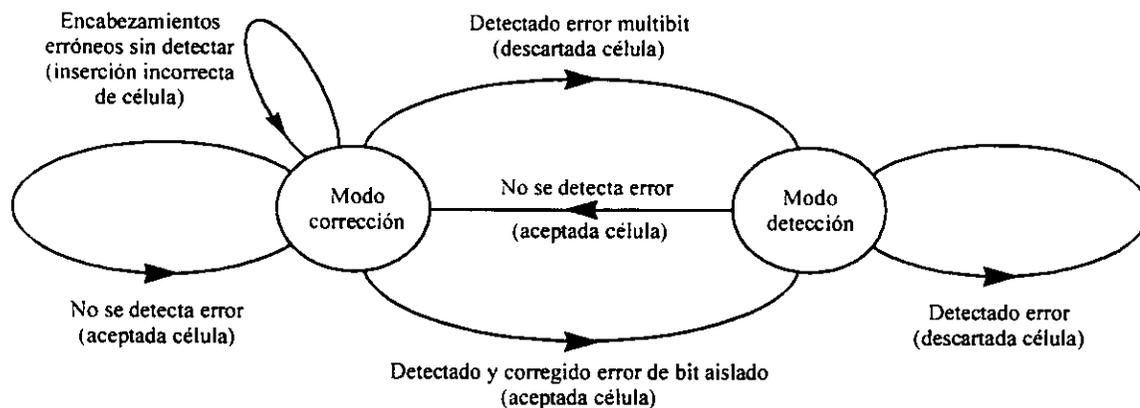
Cuando el HEC detecta errores que no puede corregir, se descarta la celda completa y se pierde su carga útil. Estas celdas descartadas son las componentes principales del parámetro CLR.

En presencia de errores con distribución aleatoria, el código de corrección de bits aislados de la HEC es capaz de corregir la mayoría de los errores encontrados. En presencia de errores en ráfaga y suponiendo que la ráfaga afecte a más de un bit del encabezamiento, no es posible ninguna corrección puesto que la HEC es capaz de corregir únicamente errores de bits aislados. Sin embargo, algunos patrones de múltiples errores en el encabezamiento pueden ser mal interpretados por la HEC como un error aislado y, por consiguiente, puede producirse una corrección inadecuada, o equivocada, del encabezamiento dando lugar a que la celda no se descarte. En este caso, la celda ATM es eliminada o transmitida a un destino incorrecto por el siguiente nodo ATM (mal encaminada). Aunque se pierde en una conexión de extremo a extremo, puede considerarse como una celda corregida por un probador ATM que está ajustado únicamente para medir celdas degradadas a la salida de un enlace por satélite. Las celdas mal dirigidas también contribuirán a la CLR si se detectan.

HEC ATM

El último octeto del encabezamiento de celda ATM de cinco octetos es un byte HEC que se emplea para detectar y corregir errores de encabezamiento. Como puede verse en la figura 5.23, la capa ATM utiliza un mecanismo HEC ATM que puede funcionar en el modo corrección o en el modo detección.

El receptor de la capa ATM opera normalmente en el modo corrección, en el que se detectan y corrigen todos los errores de bits aislados. Todos los errores de bits dobles y cuádruples únicamente se detectan y dan lugar a un descarte de celdas. Una pequeña fracción de los errores de bits triples es equivocadamente corregida como errores de bits simples. Cuando se está en el modo corrección, si se detecta (o corrige) un error de encabezamiento, el receptor conmuta al modo detección. En el modo detección, el receptor de la capa ATM es capaz de detectar todos los patrones de errores de encabezamiento simples, dobles y triples. Puede también detectar la mayoría de los patrones de errores de bits cuádruples. En el modo detección, no se efectúa ninguna corrección de errores; todos los errores de encabezamiento detectados producen descarte de celda. Si no se detectan errores de encabezamiento, cuando se está en el modo detección, el receptor conmuta al modo corrección.



1420-02

Figura 5.23. Modos de operación de encabezamiento de celdas ATM.

Cálculo de la relación entre CLR y BER

Para calcular la relación entre la CLR y la BER, se realizan las siguientes hipótesis sobre el resultado de pérdidas de celdas en los modos corrección y detección:

- En el modo corrección, todos los sucesos de errores de encabezamiento múltiples dan lugar a pérdida de celdas. Esta hipótesis ignora la probabilidad de que múltiples errores sin detectar o múltiples errores equivocadamente corregidos, como errores sencillos, pueden dar lugar a que aparezcan valores válidos en el encabezamiento (y, en consecuencia, se produzca una inserción incorrecta de celdas).
- En el modo detección, todos los sucesos de un solo error o múltiples errores de encabezamiento producen pérdida de celda.

Con las citadas hipótesis:

$$P[\text{pérdida de celda} \mid \text{modo corrección}] \cong 1 - P[\text{ningún error}] - P[1 \text{ error}]$$

$$P[\text{pérdida de celda} \mid \text{modo detección}] \cong 1 - P[\text{ningún error}]$$

y

$$P[\text{pérdida de celda}] = P[\text{modo corrección}] \times P[\text{pérdida de celda} \mid \text{modo corrección}] + P[\text{modo detección}] \times P[\text{pérdida de celda} \mid \text{modo detección}]$$

Como el receptor estará en el modo detección después de cada corrección o detección de error de encabezamiento:

$$P[\text{modo detección}] \cong 1 - P[\text{ningún error}]$$

$$P[\text{modo corrección}] \cong P[\text{ningún error}]$$

Sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene:

$$CLR = P[\text{pérdida de celda}] \cong 1 - P[\text{ningún error}] - P[\text{ningún error}] \times P[1 \text{ error}]$$

Canal de errores aleatorios

Para el canal de errores aleatorios:

$$P[\text{ningún error}] = (1 - BER)^{40}$$

$$P[1 \text{ error}] = 40 \times BER \times (1 - BER)^{39}$$

Canal de errores en ráfaga

Una caracterización de primer orden del canal de errores en ráfaga es la longitud de ráfaga media, L , y el número medio de bits erróneos por ráfaga, N . La probabilidad de aparición de una ráfaga en un pequeño intervalo correspondiente a K bits puede aproximarse mediante la expresión $K \cdot BER/N$. En ese caso, la probabilidad de que una ráfaga se superponga a un bit determinado ($K = 1$) puede aproximarse mediante la fórmula:

$$P[\text{ráfaga}] = BER/N$$

Suponiendo que solamente una ráfaga influirá en el encabezamiento y que las ráfagas de errores no se extienden a más de un solo encabezamiento ATM, la probabilidad de que no aparezcan errores en el encabezamiento viene dada por la expresión:

$$P[\text{ningún error}] \cong 1 - (BER/N) (L - 1 + 40)$$

La probabilidad de que aparezca un solo error de bit en el encabezamiento puede expresarse de la forma siguiente:

$$P[1 \text{ error}] = \sum Pe(i) P[\text{ráfaga}]$$

donde $Pe(i)$ representa la aparición de un solo error en un cierto bit i , suponiendo que llega una ráfaga a ese bit; el sumatorio debe considerar todos los casos en que la ráfaga se superpone con el encabezamiento.

La figura 5.24a) ilustra la situación en que un solo error en el encabezamiento en la posición $i \leq$ mínimo $(L - 1, 39)$, corresponde al último bit (con error) de la ráfaga. (Obsérvese que una ráfaga de errores comienza y finaliza con un bit erróneo.)

Suponiendo una distribución uniforme independiente de los errores dentro de la ráfaga (excluyendo el primer y el último bits), para el caso de la figura. 5.24b, $Pe(i) = [1 - P(EB)]^i$, siendo $P(EB)$ la probabilidad de que se produzca un bit erróneo entre el primer y el último bits de la ráfaga. Esto puede expresarse de la forma siguiente:

$$P(EB) = (N - 2)/(L - 2)$$

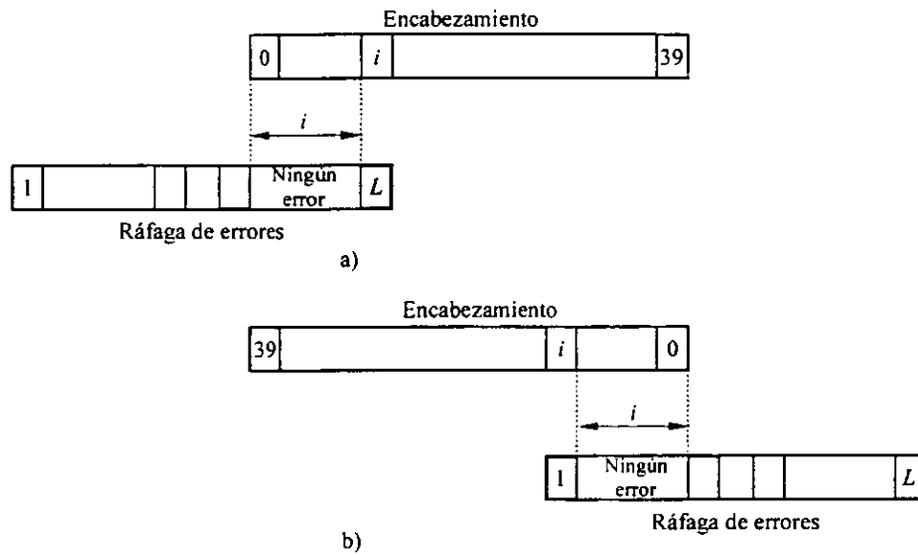
Puede obtenerse una topología simétrica considerando que el único error en la posición i se produce por el primer bit (con error) en la ráfaga de errores, como se indica también en la Fig. 3b). En ese caso, la probabilidad de que aparezca un solo error en el encabezamiento viene dada por la expresión:

$$P[1 \text{ error}] \cong (BER/N) \times 2 \times \sum [1 - P(EB)]^i$$

siendo en el anterior sumatorio $i = 0, 1, \dots$, mínimo $(L - 1, 39)$. Para valores típicos de N y L ($N, L \gg 1$):

$$P[1 \text{ error}] \cong (BER/N) \times 2/P(EB)$$

Obsérvese que si $L > 40$ y el encabezamiento está completamente incluido en la ráfaga, existe la posibilidad de que aparezca un solo error producido por un bit erróneo que no corresponde ni al primero ni al último bit de la ráfaga. La probabilidad de que ello suceda es mucho menor que la descrita anteriormente y por ello es despreciable. Obsérvese también que si $L \leq 40$ y $L - 1 < i \leq 39$, la ráfaga se encuentra completamente dentro del encabezamiento y, en ese caso, aparecerán al menos dos errores.



La parte sombreada representa bits erróneos en ráfaga.

1420-03

Figura 5.24. error en el encabezamiento producido por el primer Y último (bits) en la ráfaga.

Resultados numéricos

En la figura 5.25 aparece la CLR en función de BER. Representa una CLR para un entorno de errores aleatorios y para un entorno de errores en ráfaga donde $L = 29$ y $N = 11,5$ (típico de la codificación convolucional a velocidad 3/4 con decodificación de Viterbi).

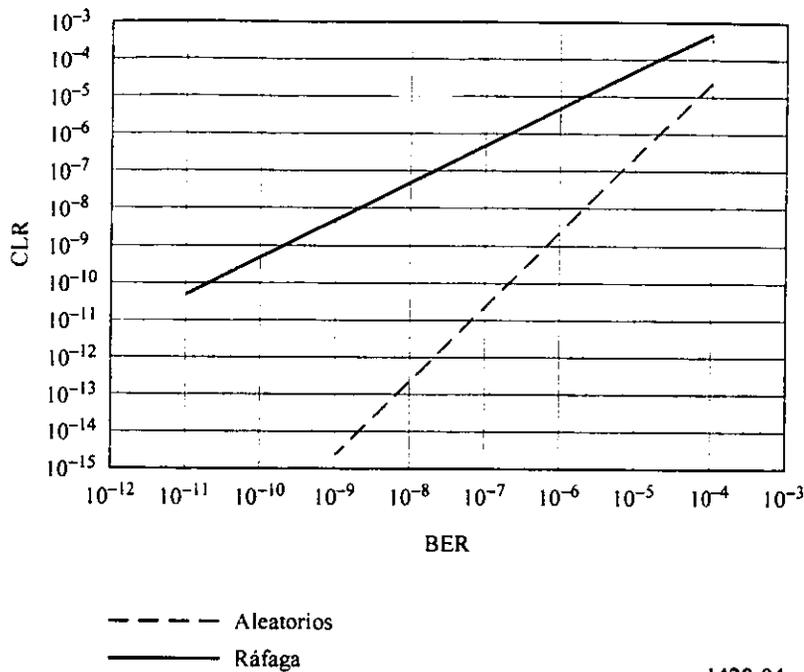


Figura 5.25. CLR en función de BER para un canal de errores en ráfaga de longitud media, $L=29$ y número medio de bits erróneos por ráfaga, $N=11,5$.

CER

La CER se define como la relación entre el número de celdas con errores y el número total de celdas con errores y sin errores transferidas. Una celda transferida con éxito se define como una celda que se recibe con un identificador de trayecto virtual/identificador de canal virtual (VPI/VCI, *virtual path identifier/virtual channel identifier*) correcto y un byte HEC válido. Sin contar las celdas incorrectamente insertadas, se produciría un evento de celda con errores si:

- el encabezamiento de la celda contiene errores detectados;
- la HEC de celdas corrigió un error de múltiples bits como un error de un solo bit que dio lugar a un VPI/VCI incorrecto; y
- el encabezamiento de la celda es correcto, en tanto que la carga útil de la celda contiene uno o más errores de bits.

La probabilidad de que los dos primeros sucesos pueden ignorarse en comparación con la probabilidad de un suceso de error de carga útil. Teniendo en cuenta el modo de corrección y el modo de detección de errores de encabezamiento del receptor, la CER puede expresarse como:

$$P[\text{error de celda}] = P[\text{error de celda} \mid \text{modo corrección}] \times P[\text{modo corrección}] + P[\text{error de celda} \mid \text{modo detección}] \times P[\text{modo detección}]$$

donde:

$$P[\text{modo detección}] \cong 1 - P[\text{ningún error de encabezamiento}]$$

$$P[\text{modo corrección}] \cong P[\text{ningún error de encabezamiento}]$$

Cálculo de la relación entre CER y BER

- Para calcular la relación entre CER y BER, se realizan las mismas hipótesis utilizadas para obtener la relación entre CLR y BER: en el modo corrección todos los sucesos de múltiples errores de encabezamiento producen pérdida de celda.
- En el modo detección, todos los sucesos de un solo error o múltiples errores de encabezamiento producen pérdida de celda.

Con estas hipótesis, la probabilidad de un error de celda en los modos corrección y detección es:

$$P[\text{error de celda} \mid \text{modo corrección}] = (1 - P[\text{pérdida de celda} \mid \text{modo corrección}]) \times$$

$$P[\text{error de carga útil} \mid \text{modo corrección}] \cong P[(\text{ningún error de encabezamiento}) +$$

$$P[1 \text{ error de encabezamiento}]) \times P[\text{error de carga útil} \mid \text{modo corrección}]$$

$$P[\text{error de celda} \mid \text{modo detección}] = (1 - P[\text{error de celda} \mid \text{modo detección}]) \times$$

$$P[\text{error de carga útil} \mid \text{modo detección}] \cong (P[\text{ningún error de encabezamiento}]) \times$$

$$P[\text{error de carga útil} \mid \text{modo detección}]$$

La CER es:

$$P[\text{error de celda}] = P[\text{error de carga útil} \mid \text{modo corrección}] \times (P[\text{ningún error de encabezamiento}]$$

+

$$P[1 \text{ error de encabezamiento}]) \times P[\text{ningún error de encabezamiento}] + P[\text{error de carga útil} \mid \text{modo}$$

$$\text{detección}] \times (P[\text{ningún error de encabezamiento}]) \times (1 - P[\text{ningún error de encabezamiento}])$$

Canal de errores aleatorios

Para el canal de errores aleatorios:

$$P[\text{ningún error de encabezamiento}] = (1 - BER)^{40}$$

$$P[1 \text{ error de encabezamiento}] = 40 \times BER \times (1 - BER)^{39}$$

$$P[\text{error de carga útil} \mid \text{modo corrección}] = P[\text{error de carga útil} \mid \text{modo detección}] = 1 - (1 - BER)^{384}$$

Canal de errores en ráfaga

Para el canal de errores en ráfaga con longitud de ráfaga media, L y número medio de bits erróneos por ráfaga, N :

$$P[\text{ningún error de encabezamiento}] \cong 1 - (BER/N) \times (L - 1 + 40)$$

$$P[1 \text{ error de encabezamiento}] \cong (BER/N) \times \left[\sum (1 - PEB)^i + \sum (1 - PEB)^{39-i} \right]$$

donde en el sumatorio anterior, $PEB = (N - 2)/(L - 2)$ e $i = 0, \dots$, mínimo $(L - 1, 40 - 1)$.

Cuando el receptor está en el modo corrección, se recibe una celda válida si hay 0 ó 1 bits erróneos de encabezamiento. La probabilidad de un error de carga útil depende de que se haya producido una HEC. Cuando hay 0 bits erróneos de encabezamiento, la probabilidad de un error de carga útil es la probabilidad de un error en ráfaga dentro de la carga útil, cuyo cálculo se aproxima mediante:

$$PB \cong 384 \times BER/N$$

En cambio, cuando hay 1 bit erróneo de encabezamiento que es corregido por la HEC, el bit erróneo único será el primer bit o el último bit de una ráfaga de errores. Cuando el bit erróneo de encabezamiento es el primer bit de una ráfaga de errores, la probabilidad de un error de carga útil es aproximadamente igual a 1. Cuando el bit erróneo de encabezamiento es el último bit de una ráfaga de errores, la probabilidad de una error de carga útil es PB. Por tanto, en el modo corrección:

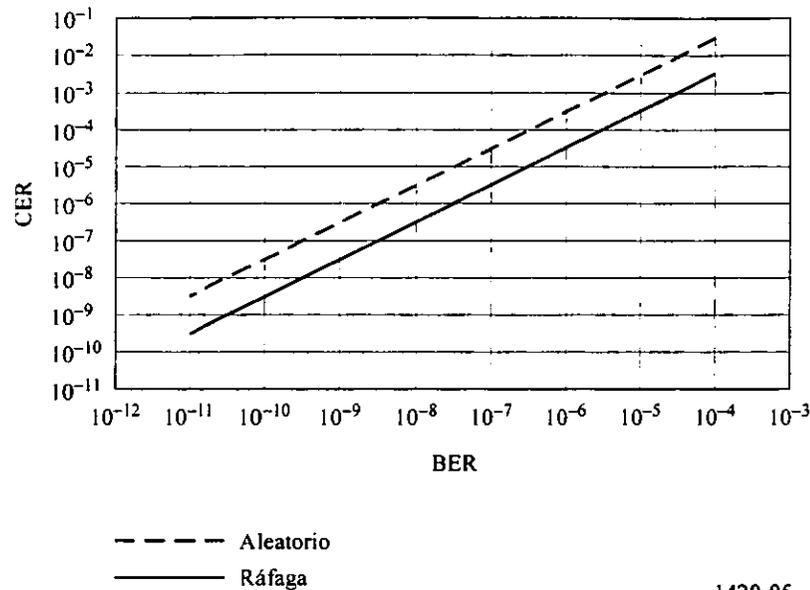
$$P[\text{error de carga útil} \mid \text{modo corrección}] \cong P[\text{ningún error de encabezamiento}] \times PB + P[1 \text{ error de encabezamiento}] \times [0,5 + 0,5PB]$$

En el modo detección, una celda válida es recibida sólo si no se producen errores de encabezamiento. La probabilidad de una error de carga útil viene dada por:

$$P[\text{error de carga útil} \mid \text{modo detección}] \cong P[\text{ningún error de encabezamiento}] \times PB$$

Resultados numéricos

En la figura 5.26 aparece CER en función de BER. Representa CER para un entorno de errores aleatorios y para un entorno de errores en ráfaga donde $L = 29$ y $N = 11,5$ (típico de la codificación convolucional a velocidad 3/4 con decodificación de Viterbi).



1420-05

Figura 5.26. CER en función de BER para un canal de errores en ráfaga de longitud media $L=29$ y número medio de bits erróneos por ráfaga, $N=11,5$.

SECBR

El parámetro SECBR se define en la Recomendación UIT-T I.356 como la relación entre el número total de bloques de celdas con muchos errores y el número total de bloques en una población de interés. Se produce un resultado bloque de celdas con muchos errores cuando se observan en un bloque de celdas recibido más de M celdas con errores, celdas perdidas o celdas incorrectamente insertadas. Un bloque de celdas es una secuencia de N transmitidas consecutivamente por una conexión dada. Los valores de M y N se indican en el Cuadro 1 de la Recomendación UIT-T I.356.

CMR

Ciertos patrones de múltiples errores en el nodo de encabezamiento pueden ser reconocidos por la HEC como errores aislados y por tanto la celda afectada puede ser incorrectamente corregida en lugar de ser descartada. En este caso el nodo ATM puede abandonar la celda o enviarla al destino incorrecto (mal encaminada). En la Recomendación UIT-T I.356, el parámetro que tiene en cuenta el número total de celdas incorrectamente insertadas observado durante un intervalo de tiempo especificado es la CMR.

CTD

El CTD global o latencia en la conexión de un satélite tiene varias causas. El origen principal del retardo es la propagación en espacio libre. La siguiente causa en importancia es el retardo debido a la codificación y decodificación realizada en los canales del satélite (módems). Generalmente, los retardos de codificación varían según el tipo de codificación y la velocidad binaria de transmisión. Por último, otra

fuente de retardo puede ser el equipo ATM específico del satélite situado en la estación terrena o a bordo del vehículo espacial que puede introducir retardos por colas, conmutación o encaminamientos.

CDV

La CDV o fluctuación de fase que puede aparecer en un enlace por satélite depende de varias circunstancias. En primer lugar, la CDV depende de la estructura de la carga del tráfico o del número y proporción de trayectos virtuales (VP) y canales virtuales (VC) que pueden utilizarse en el canal ATM. La CDV también depende de la capacidad y del mecanismo de almacenamiento de conmutación. Además, la CDV aumentará al hacerlo el número de nodos ATM en una conexión (esta circunstancia puede ser crítica en satélites que utilizan OBP y EES. Por último, la CDV dependerá de la cantidad de operaciones de conmutación interna (puesta en cola, conmutación, encaminamiento) resultantes del equipo ATM específico del satélite. La utilización de esquemas de acceso múltiple puede tener también influencia en la CDV.

Calidad de funcionamiento simulada del ATM por satélite

En esta sección se describen los resultados de las simulaciones de la transmisión ATM por sistemas de satélites.

Parámetros de calidad de funcionamiento ATM en los sistemas de satélites

La calidad de funcionamiento de la capa ATM en los enlaces por satélite depende de la BER y de las estadísticas de las ráfagas de bits erróneos. Los errores de bits debidos al ruido térmico en las comunicaciones por satélites se suponen aleatoriamente distribuidos. Sin embargo, si se utilizan técnicas FEC para mejorar la BER, los errores generalmente aparecen en ráfagas cuando el mecanismo de corrección de errores FEC falla. Una consecuencia indeseable de las ráfagas de errores en el transporte de tráfico ATM es que pueden dar lugar, con una elevada probabilidad, a dos o más bits erróneos en los encabezamientos de celdas ATM, lo cual da lugar a que las celdas ATM sean descartadas por el mecanismo de HEC. Los resultados analíticos y las pruebas de funcionamiento real han demostrado que la CLR originada por el enlace de transmisión suele ser linealmente proporcional a la BER. Por esta razón, la CLR es mucho más alta que la obtenida en presencia de errores aleatorios, mientras que la CLR suele ser proporcional al cuadrado de la BER.

Las ráfagas de errores introducidas por los módems de satélites, debido a fallos en la corrección de errores, tienen distintas longitudes y diversas frecuencias de aparición según los diferentes esquemas FEC, métodos de aleatorización y técnicas de interconexión utilizadas. Por lo tanto, no resulta práctico formular reglas generales para establecer las relaciones entre la calidad de funcionamiento de la capa física y la calidad de funcionamiento de la capa ATM. Sin embargo, las relaciones específicas a esquemas determinados pueden obtenerse mediante mediciones y/o simulación.

CER

Característica de la CER para códigos concatenados

Códigos FEC concatenados

Entre los diversos candidatos a códigos concatenados pueden incluirse los códigos Reed-Solomon (RS) para códigos exteriores y los códigos reticulares convencionales y códigos rotacionalmente invariante (RI, *rotationally invariant*) para códigos interiores. La MDP-4 con detección coherente y codificación reticular convencional se ha considerado para el sistema de transmisión básico al que se ha aplicado FEC.

Códigos RS

El código de bloque RS se encuentra entre la clase de códigos más eficaz que puede realizarse utilizando la tecnología más avanzada de soporte físico y de soporte lógico. Con esquemas de codificación exterior RS concatenados con códigos internos convolucionales se logran enlaces de transmisión por satélite de mayor calidad y más económicos. Los códigos de bloque, como su nombre indica, procesan los datos en bloque. Cada bloque se procesa como una sola unidad tanto en el codificador como en el decodificador. Un código RS particular se describe como un código (n, k) . La tasa de código (eficacia) de un código viene dada por $R = k/n$. Normalmente conviene utilizar códigos con tasas de código elevadas porque emplean de manera eficaz el canal disponible para transmisión de la información. Los códigos de RS generalmente tienen tasas superiores al 80%, longitud de bloque elevada y tasa de código alta.

Estos códigos funcionan adecuadamente cuando la longitud de bloque del mensaje y la longitud de bloque de código están adaptadas. Por ejemplo, en una configuración multipunto con esquema de acceso AMDT, la longitud de bloque de código puede adaptarse a un número entero de celdas ATM de forma que se obtenga flexibilidad en cuanto a atribución del tráfico a las distintas estaciones terrenas.

Códigos interiores

La figura 5.27 muestra las diversas opciones de códigos interiores.

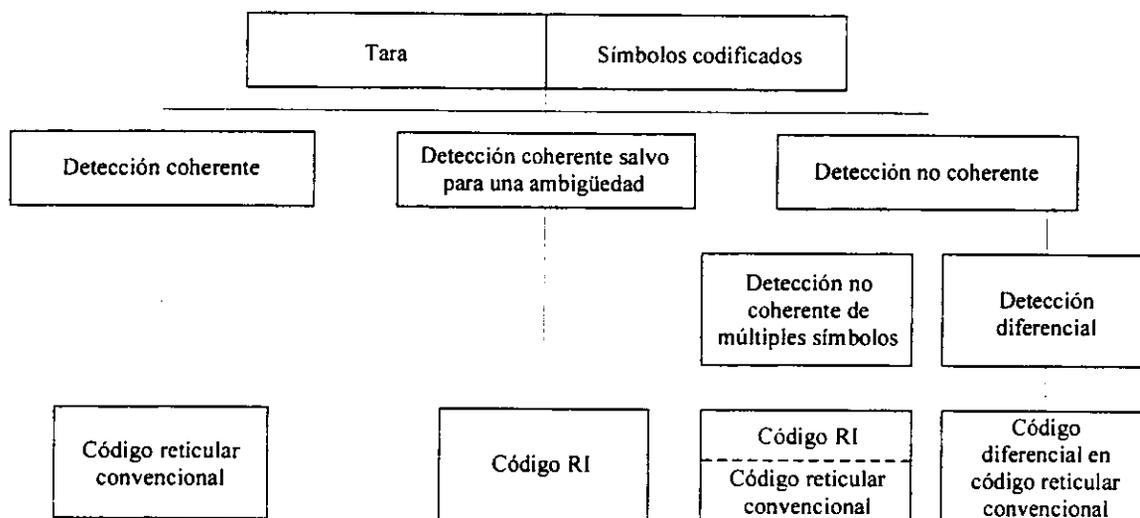


Figura 5.27. Sincronización y candidatos de codificación para códigos exteriores.

También se consideran las opciones de intercalado entre los códigos exteriores e interiores. Para los códigos RS exteriores, la longitud de bloques se considera en las fronteras de celdas ATM. Se utilizan concretamente 53 símbolos y 106 secuencias de datos de símbolos.

Los análisis indican que la intercalación casi perfecta exige un enorme tamaño de memoria intermedia, especialmente para los servicios por satélite AMDF/AMDT. Por lo tanto, también se ha estudiado la calidad de funcionamiento sin intercalado entre los códigos exteriores e interiores.

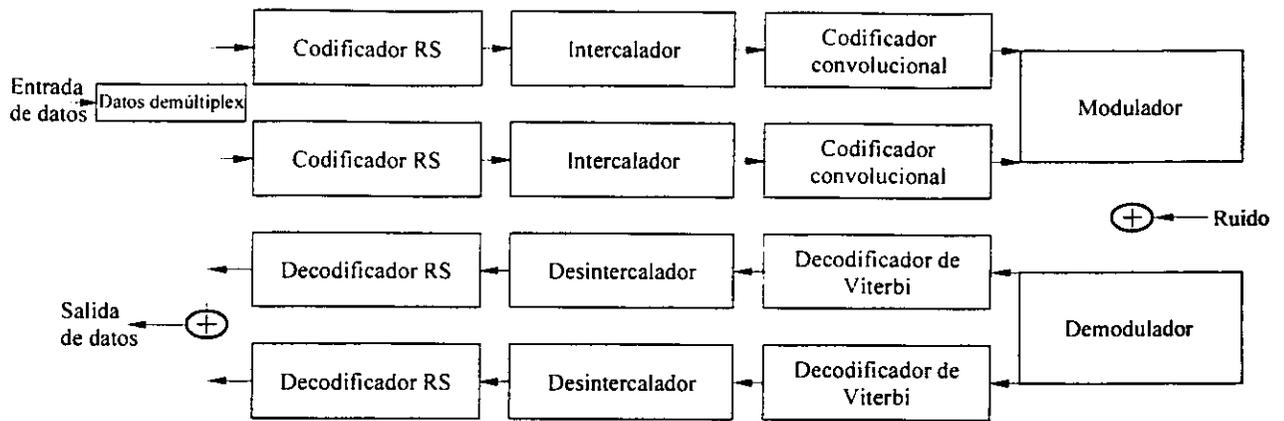
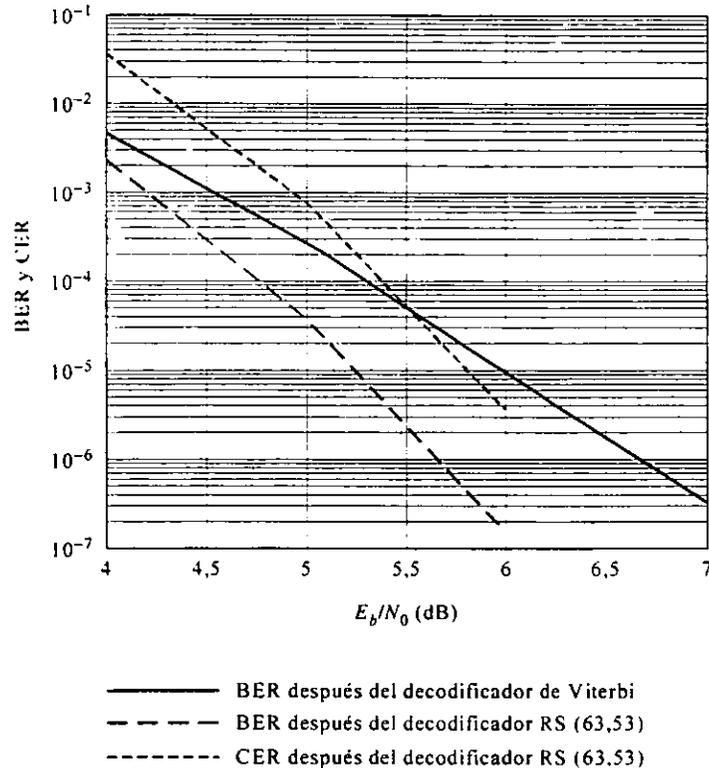


figura 5.28. Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones por satélite con comunicación TM a bordo.

Resultados de la simulación con respecto a la E_b/N_0 del satélite

En la figura 5.29 se representan los resultados de simulación de característica de BER y CER en función de la relación E_b/N_0 para un caso concreto de codificación interior convolucional perforado de índice 3/4 y código exterior RS (63,53). Dicha Figura muestra que para una relación E_b/N_0 de 6 dB, la CER es aproximadamente 3×10^{-6} y la BER aproximadamente 1×10^{-7} .

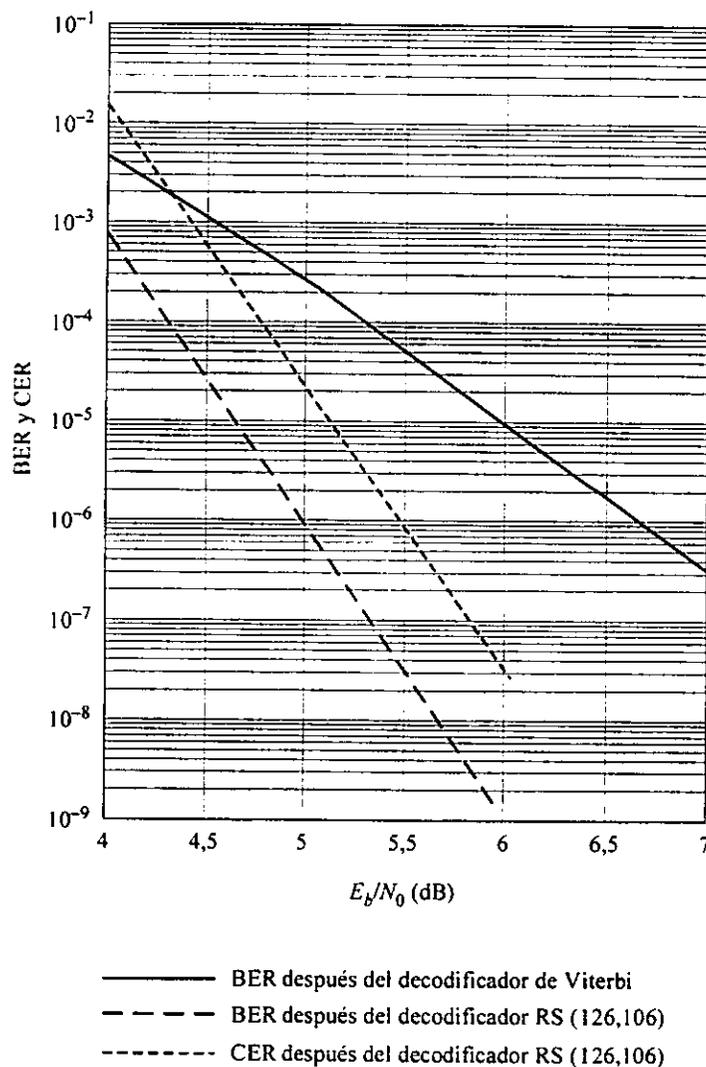


1420-08

Figura 5.29. Característica de VER y CER para FEC interior del índice 3/4 con código exterior RS (63,53) concatenado.

El tamaño de bloque de código exterior se varió de una celda ATM a dos celdas ATM. Los resultados de BER y CER para el código exterior RS (126,106) sin intercalación entre el código exterior y el interior (convolucional perforado de índice 3/4) se muestran en la figura 5.30.

Obsérvese que se produce una mejora considerable de la calidad de funcionamiento a medida que aumenta la longitud de bloque de una celda ATM a dos celdas ATM (con el mismo índice de código). Para una E_b/N_0 de 6 dB, la CER disminuye de 3×10^{-6} a aproximadamente 3×10^{-8} . Por lo tanto, utilizando múltiples celdas para efectuar la codificación exterior, cuando ello sea posible, se mejora la calidad de funcionamiento con un aumento mínimo de la complejidad de realización.



1420-09

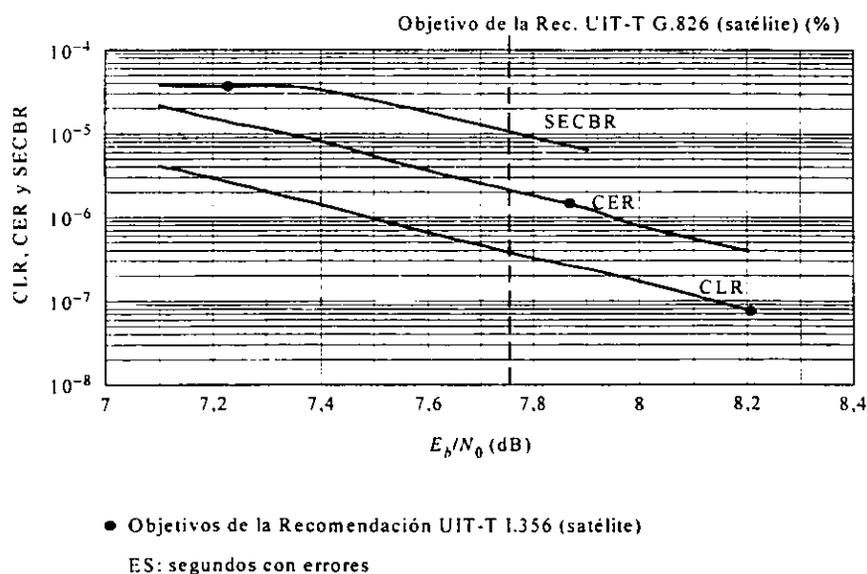
Figura 5.30. Característica de BER y CER para FEC interior del índice $1/4$ con código exterior RS (126,106) concatenado.

Resultados de la medición real de la capa física en función de la capa ATM

Este punto resume los resultados de las mediciones. Estos resultados proporcionan una verificación de la calidad de funcionamiento calculada de ATM en los enlaces por satélite y su relación con la calidad de funcionamiento de la capa física. La primera sección contiene los resultados medidos de los parámetros ATM en función de la relación E_b/N_0 de un módem. La segunda sección contiene los resultados de pruebas de funcionamiento real de la calidad de funcionamiento con velocidad de transmisión de datos intermedia (IDR, *intermediate data rate*) de 45 Mbit/s. La tercera sección contiene los resultados de pruebas de la calidad de funcionamiento AMDT a 120 Mbit/s (con y sin codificación BCH de índice 7/8) y de la calidad de funcionamiento IDR a 34,368 Mbit/s. La cuarta sección contiene resultados de pruebas de la calidad de funcionamiento IDR a 2,048 Mbit/s (con y sin codificación RS).

Resultados de las mediciones a 45 Mbit/s

Mediciones de laboratorio (realizadas por AT&T) de módems de satélite IDR a 45 Mbit/s han demostrado la relación existente entre la relación E_b/N_0 del módem y los parámetros de calidad de funcionamiento de la capa ATM: CLR, CER y SECBR. La configuración de prueba consistía en dos módems de satélite IDR, un inyector de ruido y un aparato de prueba ATM. El aparato de prueba midió las CLR, CER y SECBR según las definiciones de la Recomendación UIT-T I.356. Estos resultados se representan en la figura 531.



1420-10

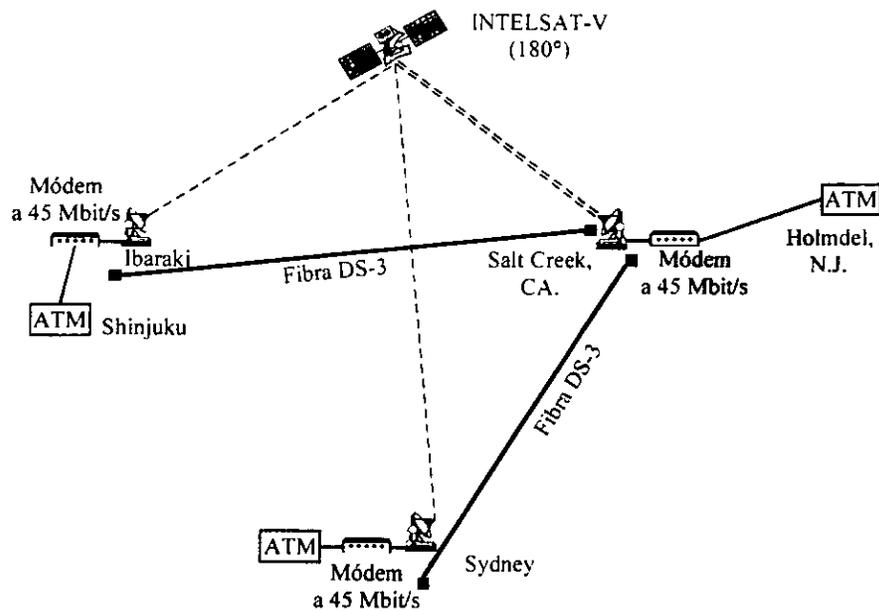
figura 5.31. Resultados de las mediciones de CLR, CER y SE CBR en función de E_b/N_0 para un modem IDR a 45 Mb it/s.

La figura 5.31 incluye los objetivos de la Recomendación UIT-T I.356 para CLR, CER y SECBR correspondientes a un satélite que transporta servicios ATM de clase 1. Estos resultados proporcionan las relaciones entre el punto de funcionamiento del módem y la calidad de funcionamiento de la capa ATM para un módem ampliamente utilizado que emplea codificación convolucional de índice 3/4 y decodificación de Viterbi. Estos resultados también revelan que un módem que simplemente cumple todos los parámetros de la Recomendación UIT-T G.826 no satisface los objetivos de calidad de funcionamiento ATM de clase 1 atribuidos en la Recomendación UIT-T I.356.

Pruebas entre AT&T y KDD

Este punto presenta los resultados de pruebas en funcionamiento real efectuadas por AT&T (Estados Unidos de América), KDD (Japón) y Telstra (Australia). En el experimento se utilizó una combinación de conexiones por fibra y por satélite. El objetivo de las pruebas fue caracterizar la calidad de funcionamiento a largo plazo de los equipos de DS-3 (45 Mbit/s) midiendo diversos parámetros de la capa física y de la capa ATM. Las pruebas de funcionamiento real se realizaron entre el 24 de abril y el 5 de diciembre de 1995.

La figura 5.32 representa la arquitectura del funcionamiento en condiciones reales. Se utilizó un transpondedor de banda C completo de 72 MHz y dos transpondedores, utilizando la mitad de su ancho de banda, en el satélite INTELSAT 511 situado a 180° de longitud Este y que funcionaba en una órbita inclinada de unos 3°.



1420-11

Figura 5.32. Arquitectura de prueba del experimento con ATM de AT&T, KDD y Telstra.

El tramo de satélite del experimento empleó un par de portadoras IDR DS-3 entre las estaciones terrenas de Salt Creek e Ibaraki, y otro par de enlaces DS-3 entre Salt Creek y la estación terrena de Sydney, situada en Australia. Cada estación terrena se conectó a dispositivos de fibra terrestre que transportaban los trenes de información DS-3 procedentes de los tres lugares de prueba situados en Holmdel (Estados Unidos de América), Tokio (Japón) y Sydney (Australia) y destinados a los mismos. Todos los enlaces de satélite estaban adecuadamente ecualizados y ajustados para conseguir un valor de BER con cielo despejado de 1×10^{-10} , de acuerdo con las especificaciones de calidad de funcionamiento para portadoras IDR (sin códec RS) que operan en los satélites INTELSAT-VII.

Los resultados presentados pertenecen al enlace AT&T-KDD solamente, ya que este enlace se probó durante un periodo de tiempo más largo y presentó degradaciones producidas por la lluvia mayores que las del enlace AT&T-Telstra. Este nivel superior de degradaciones producidas por la lluvia se consideró más representativo de otros enlaces de la región del Océano Pacífico. Las pruebas de capa física entre las estaciones terrenas de Salt Creek (AT&T) e Ibaraki (KDD) se realizaron durante un periodo superior a 30 días. Sólo se concluyeron las pruebas en las que la prestación de transferencia de celdas ATM fue medida por instrumentos de prueba ATM instalados en las estaciones terrenas. Tras excluir los sucesos anormales, se procesaron los datos de prueba para obtener resultados en los términos de las Recomendaciones UIT-R S.1062 y UIT-T G.826. Los datos de la capa ATM fueron recogidos por

aparatos de prueba ATM situados en las estaciones terrenas. Una vez más, tras excluir los sucesos anormales, se analizaron los datos de prueba para calcular los valores de diversos parámetros, incluidos los definidos en la Recomendación UIT-T I.356.

La figura 5.33 muestra los principales parámetros de calidad de funcionamiento, los objetivos de calidad de funcionamiento utilizados para evaluar la calidad de funcionamiento de las capas física y ATM y los resultados obtenidos con los enlaces IDR. Los objetivos de calidad de funcionamiento se ajustaron con arreglo a la atribución efectuada a los satélites geostacionarios que se utilizan en el tramo internacional de una conexión de extremo a extremo.

Parámetros	Capa física abril-junio de 1995					Capa ATM agosto-diciembre de 1995	
	ES (Rec. UIT-T G.826) (%)	SES (Rec. UIT-T G.826) (%)	BBER (Rec. UIT-T G.826)	BER media	BER umbral (0,2% del tiempo) (Rec. UIT-R S.1062)	CLR Rec. UIT-T 1.356 (Clase 1)	CER Rec. UIT-T 1.356 (Clase 1)
Objetivos UIT	2.62	0.07	7×10^{-5}	–	4.0×10^{-6}	7.5×10^{-8}	1.4×10^{-6}
KDD a AT&T	0.014	0.008	1.5×10^{-8}	4.8×10^{-6}	4.5×10^{-9}	$1.9 \times 10^{-6(1)}$	$5.4 \times 10^{-6(1)}$
AT&T a KDD	0.0056	0.0027	$7,6 \times 10^{-9}$	2.6×10^{-6}	3.0×10^{-9}	$3.9 \times 10^{-6(1)}$	$8.8 \times 10^{-6(1)}$

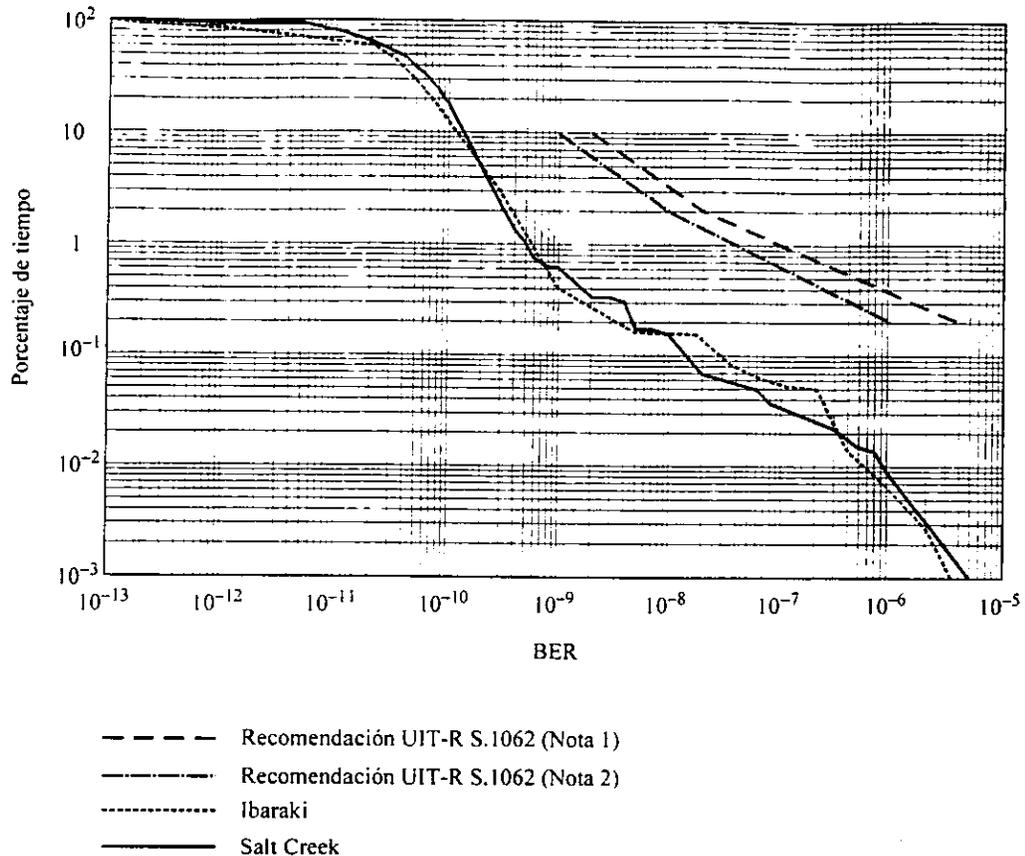
SES: segundos con muchos errores

(1) Éstos son los valores medios y no los límites superiores especificados por la Recomendación UIT-T I.356.

Figura 5.33. Resultados de pruebas de calidad de funcionamiento de capas físicas y ATM de los enlaces IDR a 45 Mbit/s entre AT&T y KDD.

Los resultados muestran que la calidad de funcionamiento en ambos sentidos cumple los objetivos de la Recomendación UIT-T G.826 con un margen de 1 a 2 órdenes de magnitud.

La figura 5.34 ilustra la distribución estadística acumulativa de los sucesos de bits erróneos registrados durante un periodo superior a 30 días. Además, muestra, como referencia, los contornos de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-R S.1062. El contorno de la Nota 1 simplemente cumple los objetivos de la Recomendación UIT-T G.826. Obsérvese que las curvas de BER medidas para ambos enlaces, AT&T a KDD y KDD a AT&T, son muy similares. Además, las curvas de BER medidas son de alrededor de 1 a 2 órdenes de magnitud mejores que los contornos de la Recomendación UIT-R S.1062.



1420-12

Figura 5.34. Porcentaje de tiempo en función de BER para un enlace IDR DS-3 entre AT&T y KDD.

Las pruebas de la capa ATM se realizaron una vez concluidas las pruebas de la capa física. Los objetivos de la capa ATM recogidos en el Cuadro 5 corresponden a una nueva atribución efectuada en la Recomendación UIT-T I.356 a los sistemas de satélites geoestacionarios utilizados en el tramo internacional. Obsérvese que las CLR y CER medidas son valores medios obtenidos durante el intervalo de medición total, a diferencia de los límites superiores (cifras del caso más desfavorable) especificados en la Recomendación UIT-T I.356. Las medias de los enlaces IDR eran mejores que los valores de límite superior de la Recomendación UIT-T I.356, pero sólo por un pequeño margen.

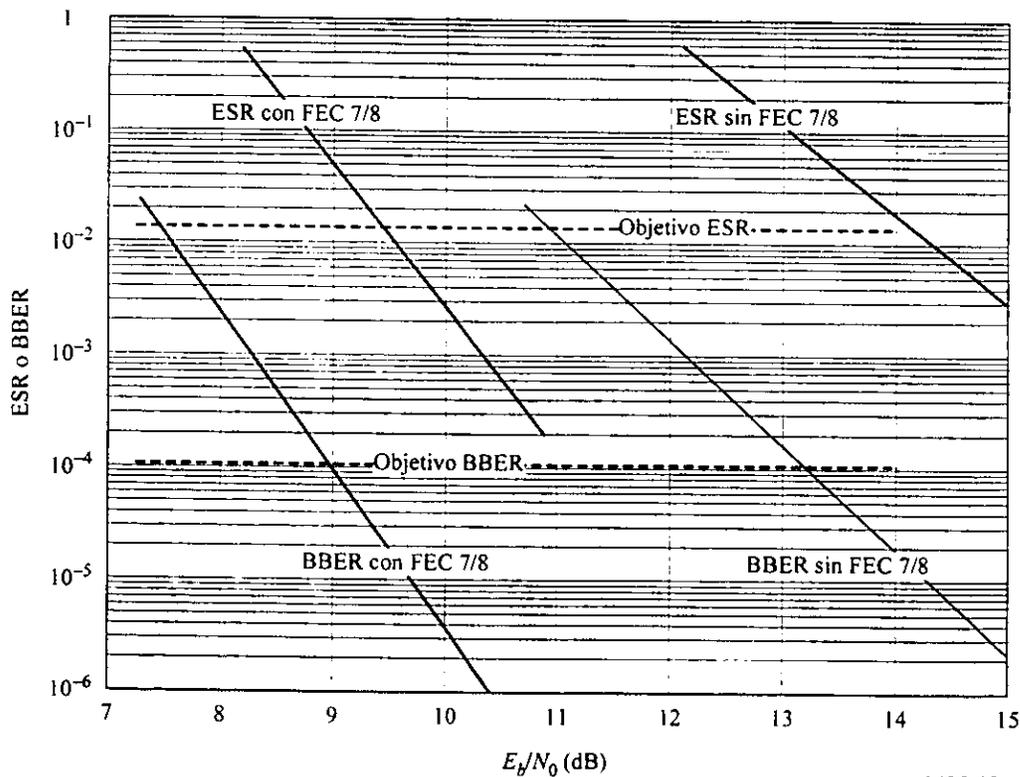
Los resultados aquí presentados son representativos de la calidad de funcionamiento que puede obtenerse en muchos enlaces IDR DS-3 de la banda 14/11 GHz en todo el mundo. Los resultados revelan que un enlace IDR cuidadosamente acondicionado y explotado puede cumplir confortablemente los objetivos de las Recomendaciones UIT-R S.1062 y UIT-T G.826. Sin embargo, los resultados también indican que este nivel de calidad de funcionamiento puede no ser suficiente para el tráfico ATM, ya que los objetivos de límite superior de los servicios de clase 1 definidos en la Recomendación UIT-T I.356 exigirán umbrales de BER próximos a 1×10^{-9} . Por consiguiente, los resultados AT&T-KDD pueden haber cumplido apenas los objetivos I.356. Las técnicas de potenciación de enlaces, como son la

codificación exterior RS y la intercalación, pueden producir una mejor calidad de funcionamiento que satisfaga los requisitos ATM.

Pruebas ATM efectuadas por EUTELSAT

EUTELSAT realizó mediciones en las capas ATM y física en enlaces AMDT e IDR en el sistema EUTELSAT para caracterizar la relación entre los parámetros de las Recomendaciones UIT-T G.826 y UIT-T I.356 en función de la calidad de funcionamiento del enlace. Los resultados muestran la BER del enlace en función de la característica E_b/N_0 del módem del satélite y se representan en las figuras 5.35 a la 5.38 para una interfaz a 2,048 Mbit/s con el sistema AMDT a 120 Mbit/s y en las figuras. 5.39 a la 5.42 para un enlace IDR a 34,468 Mbit/s.

La figura 5.35 muestra parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T G.826 en función de E_b/N_0 para el sistema AMDT. También se indican objetivos de la Recomendación UIT-T G.826. Se presentan dos conjuntos de resultados, uno es para enlaces con codificación BCH de índice 7/8 y el otro para enlaces sin codificación FEC.



1420-13
 Figura 5.35. Parámetros y objetivos de calidad de funcionamiento de la recomendación UIT-T G.826 (capa física) en función de E_b/N_0 a la entrada del demodulador para un Interfaz a 2.048 Mbit/s del sistema AMDT a 120 Mbit/s de EUTELSAT.

La figura 5.36 muestra parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T I.356 en función de E_b/N_0 para el sistema AMDT. También se presentan objetivos de la Recomendación UIT-T I.356. Como en la Fig. 13, aparecen dos conjuntos de resultados. Uno es para enlaces con codificación BCH de índice 7/8, y el otro para enlaces sin codificación FEC.

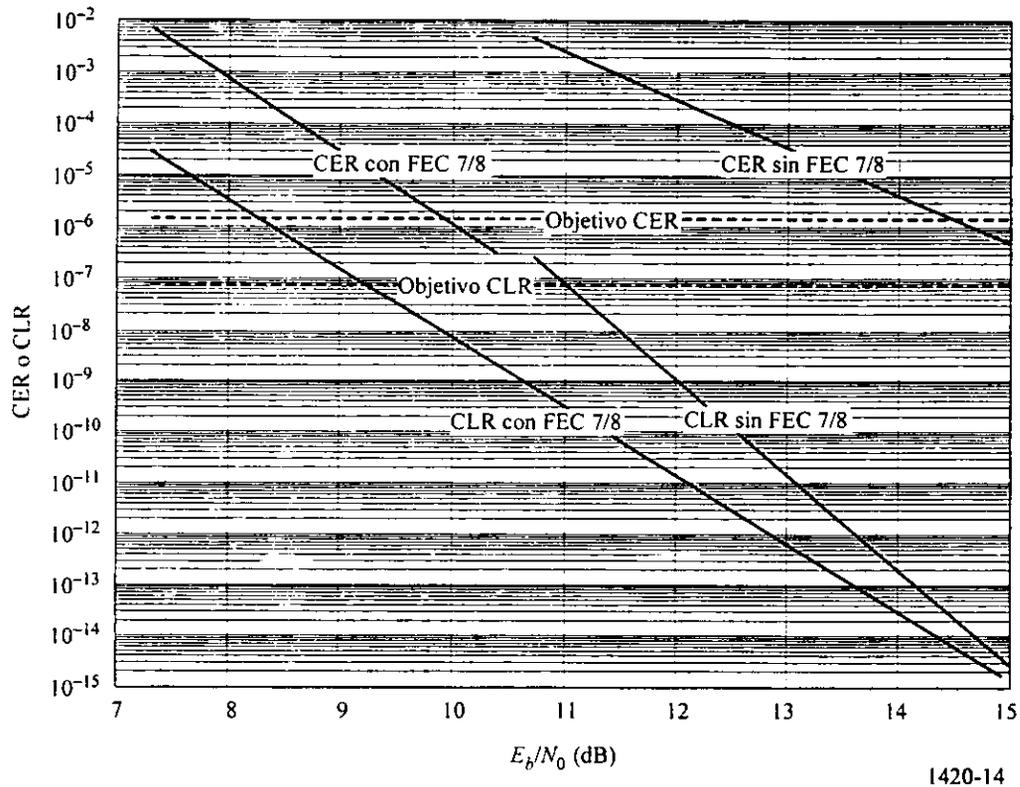
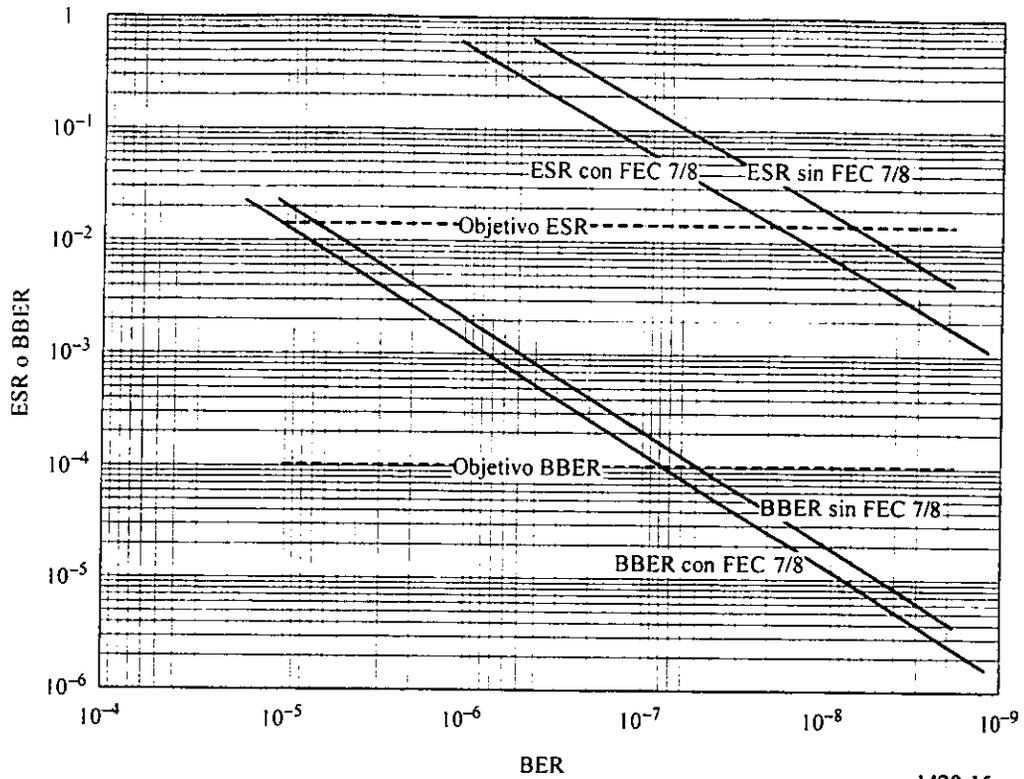


figura 5.36. Parámetros y objetivos de calidad de funcionamiento UIT-T I.356 (capa ATM) en función de E_b/N_0 a la entrada

La figura 5.37 muestra parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T G.826 en función de BER para el sistema AMDT. También se presentan objetivos de la Recomendación UIT-T G.826.



1420-15

Figura 5.37 .Parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T G.826 en función de BER para el sistema AMDT. También se presentan objetivos de la Recomendación UIT-T G.826.

La figura 5.38 muestra parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T I.356 en función de BER para el sistema AMDT. También se presentan objetivos de la Recomendación UIT-T I.356.

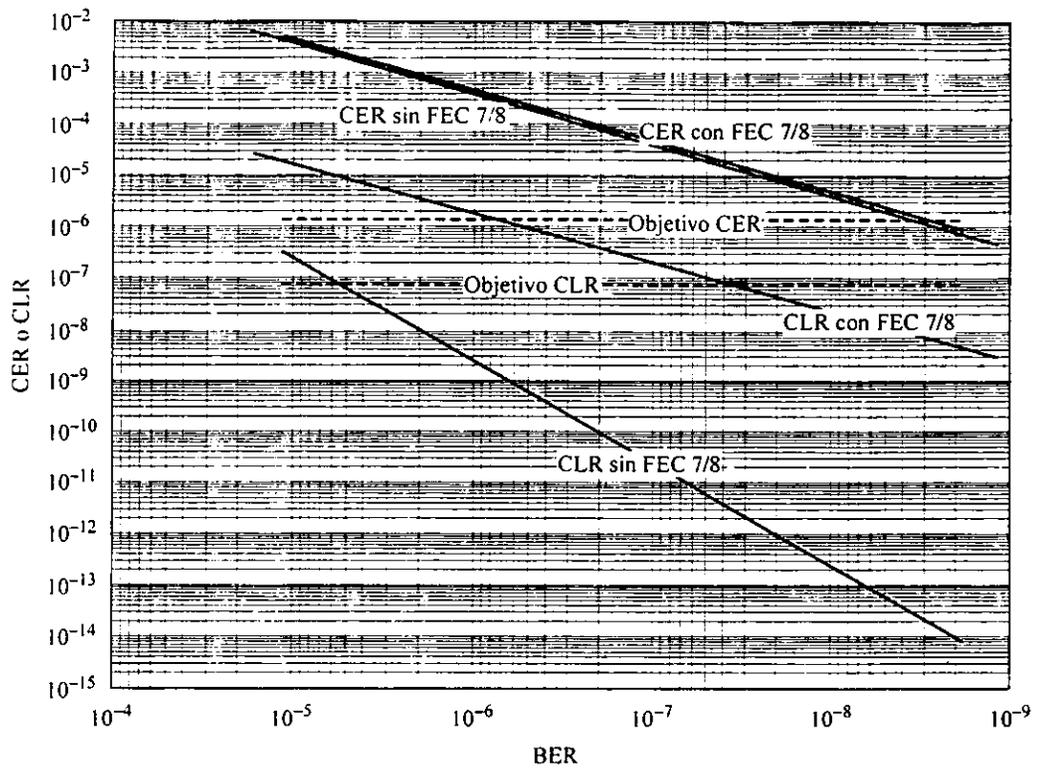


figura 5.38. Parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T I.356 en función de BER para el sistema AMDT. También se presentan objetivos de la Recomendación UIT-T I.356.

La figura 5.39 muestra parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T G.826 en función de E_b/N_0 para IDR (con codificación convolucional de índice 3/4 y decodificación de Viterbi). También se presentan objetivos de la Recomendación UIT-T G.826.

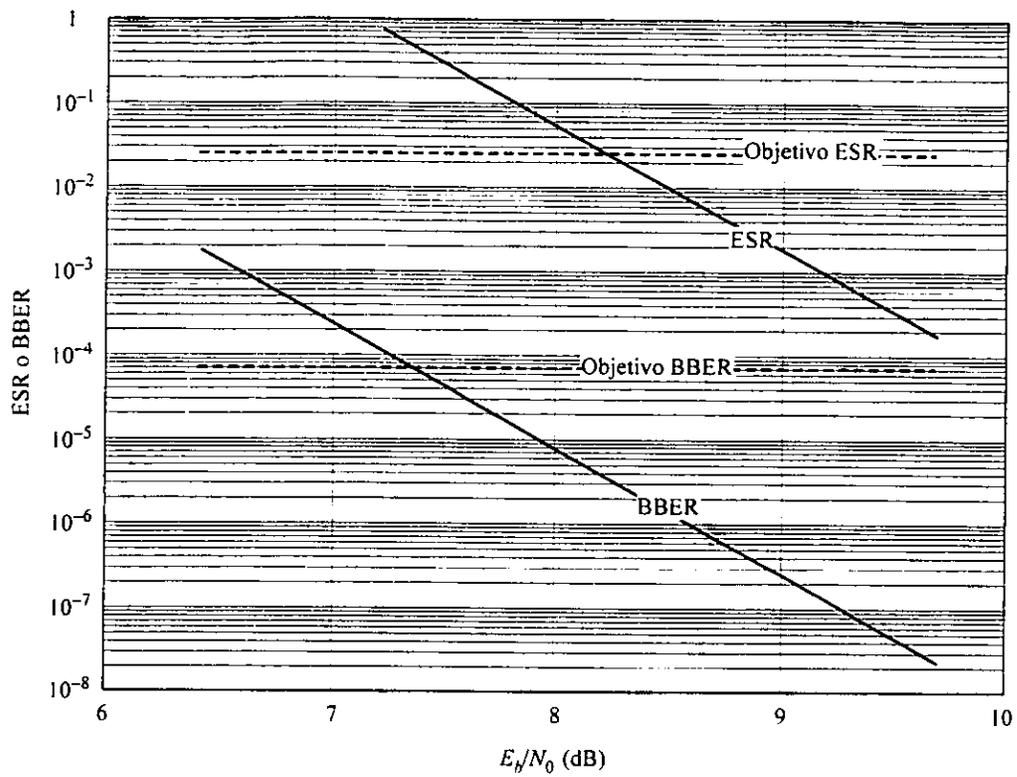


figura 5.39. Parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T G.826 en función de E_b/N_0 para IDR (con codificación convolucional de índice 3/4 y decodificación de Viterbi). También se presentan objetivos de la Recomendación UIT-T G.826.

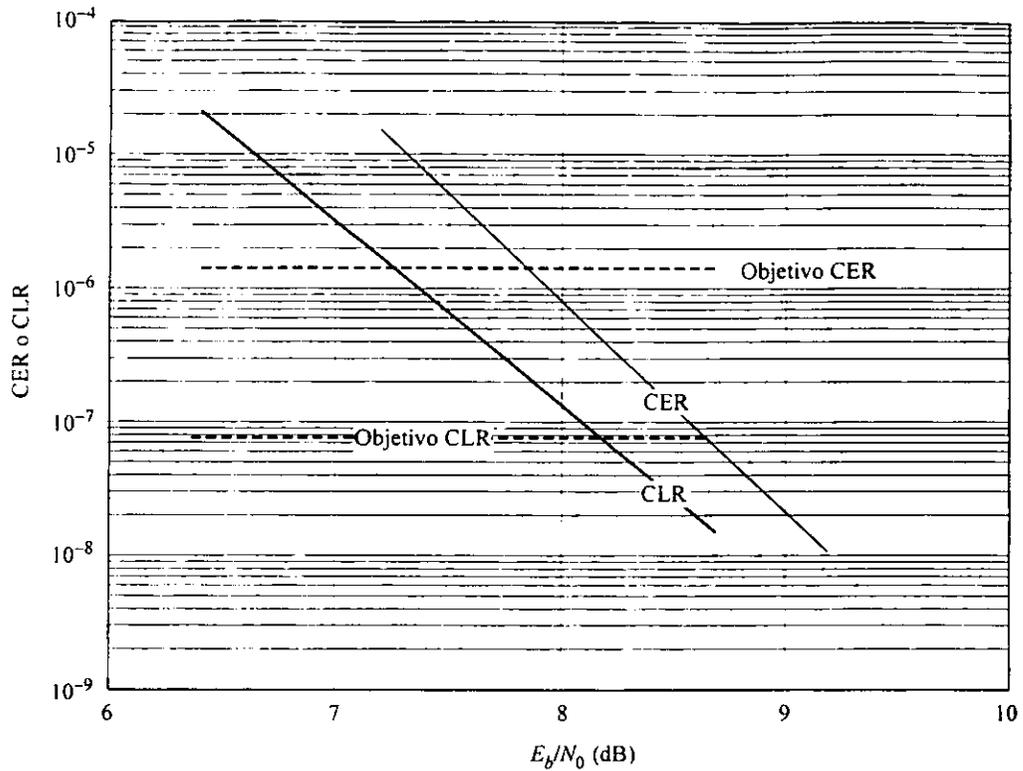
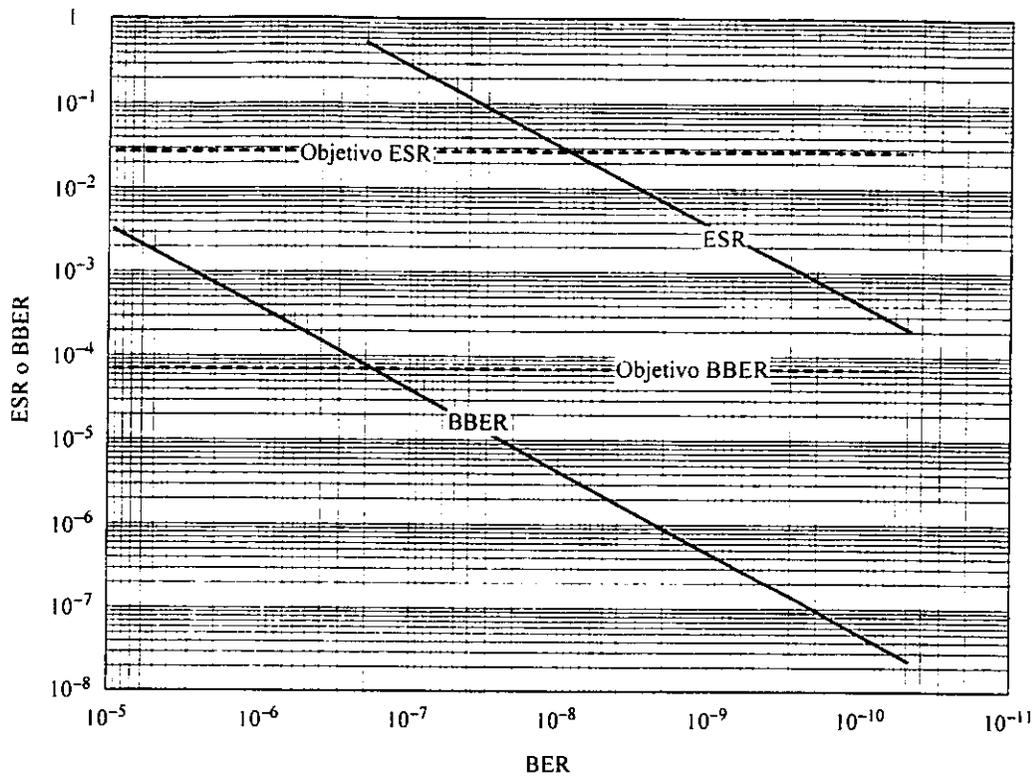


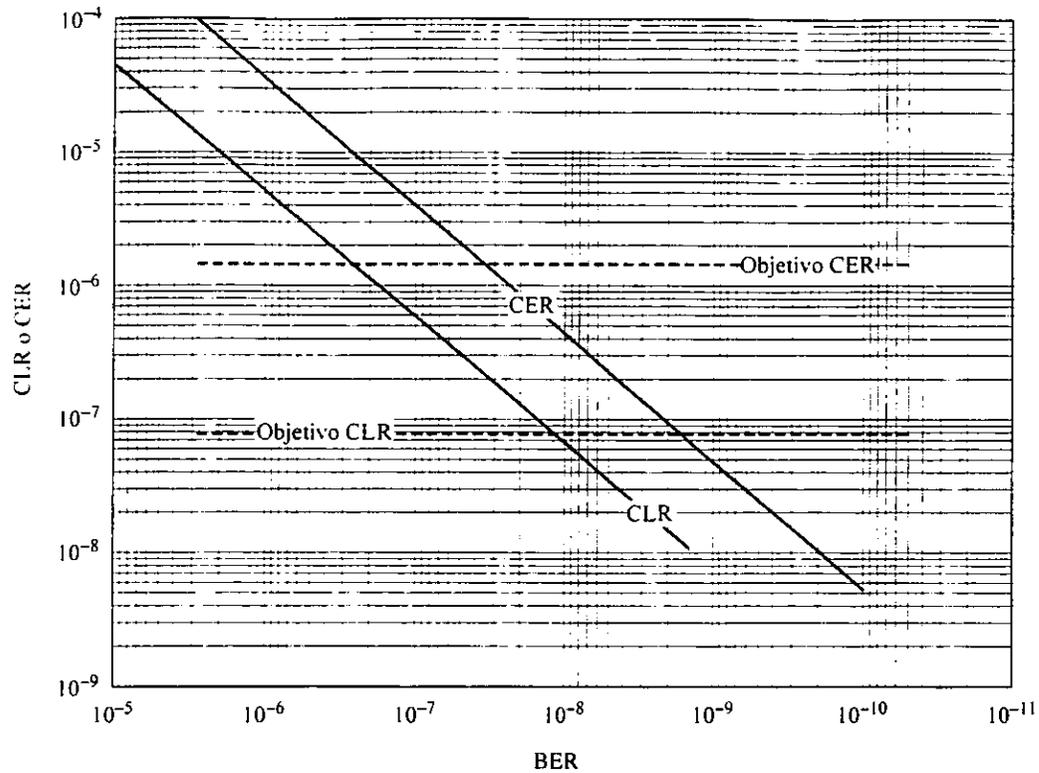
figura 5.40. Parámetros y objetivos de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T I.356 en función de E_b/N_0 en la entrada del demodulador para un modem IDR que funciona a una velocidad de interfaz de 34,368 Mbit/s.

La figura 5.41 muestra parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T G.826 en función de BER para IDR (con codificación convolucional de índice 3/4 y decodificación de Viterbi). También se presentan objetivos de la Recomendación UIT-T G.826.



1420-19
 figura 5.41. Parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T I.356 en función de BER para IDR (con codificación convolucional de índice 3/4 y decodificación de Viterbi). También se presentan objetivos de la Recomendación UIT-T I.356.

La figura 5.42 muestra parámetros de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T I.356 en función de BER para IDR (con codificación convolucional de índice 3/4 y decodificación de Viterbi). También se presentan objetivos de la Recomendación UIT-T I.356.

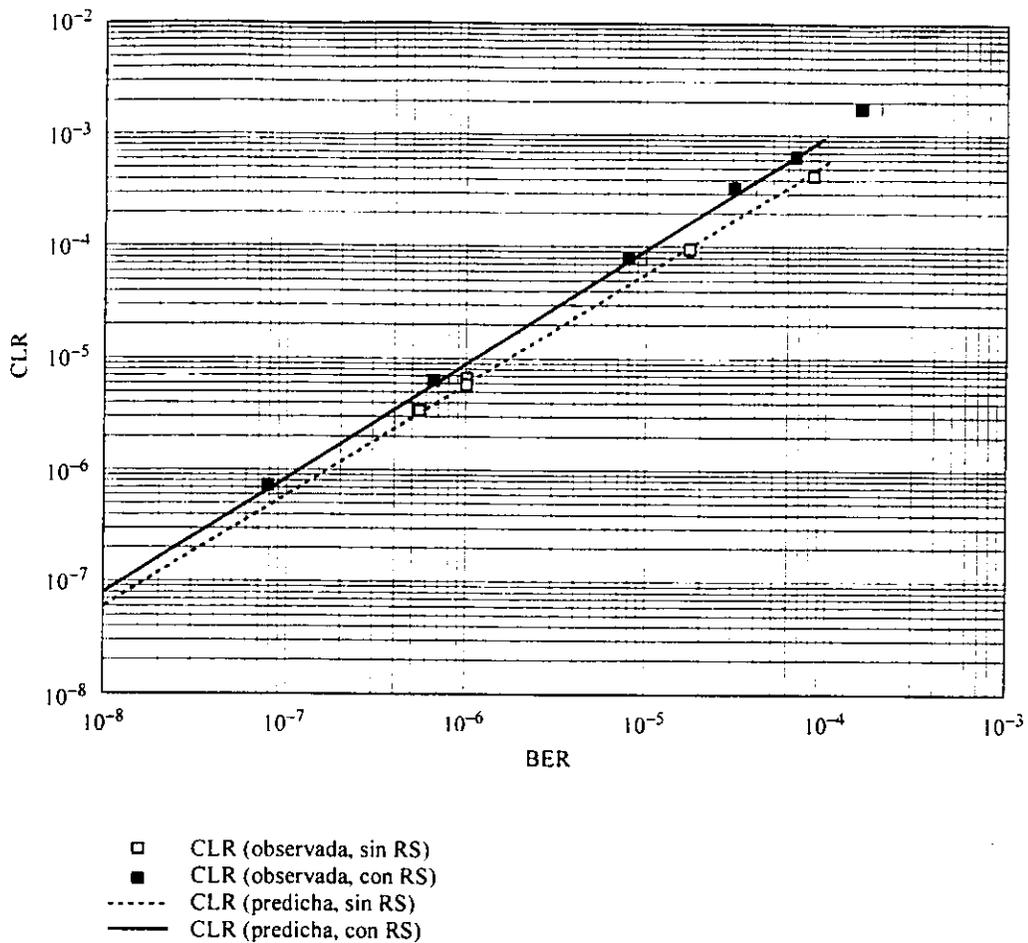


1420-20

Figura 5.42. Parámetros y objetivos de calidad de funcionamiento de la Recomendación UIT-T 1356 (capa ATM) en función de BER a la salida del demodulador para un modem IDR que funciona a una velocidad de interfaz de 34,368 Mbit/s.

Pruebas ATM efectuadas por INTELSAT

COMSAT ha realizado mediciones para investigar la relación entre CLR y CER en función de BER. La figura 5.43 (CLR en función de BER) y 22 (CER en función de BER) muestran estas relaciones a la velocidad E1, con y sin codificación RS. Estas Figuras pueden ser útiles en la conversión de los requisitos de CLR y CER de la Recomendación UIT-T 1.356 en los requisitos de BER utilizados en el diseño de enlaces por satélite.



1420-21

Figura 5.43. CLR ATM en función de VER para un canal IDR a la velocidad E_1

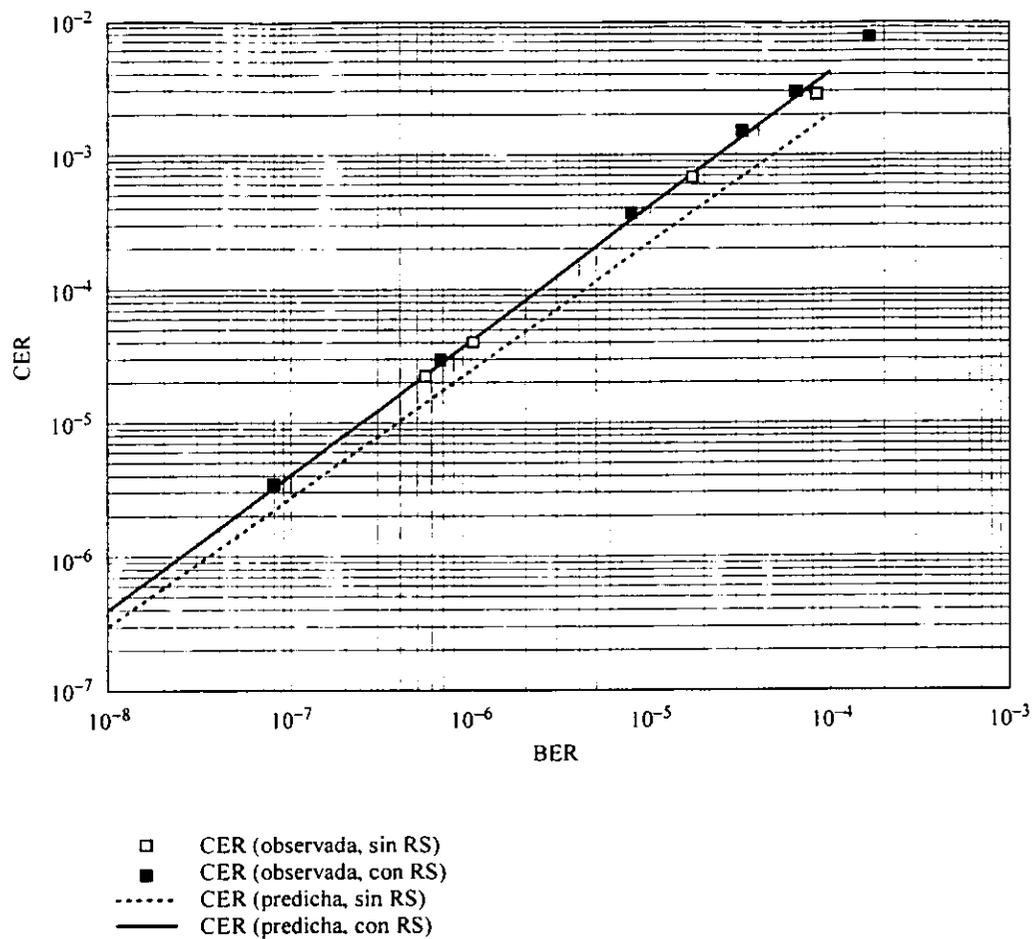


Figura 5.44. CER ATM en función de BER para un canal IDR a la velocidad E1. 1420-22

Esquemas tipo de corrección y detección de errores

El desempeño de ATM utilizando redes de fibra óptica logra altos niveles de servicio y bajos niveles de error para diferentes tipos de tráfico. Una probabilidad de pérdida de celda de 10^{-10} y una BER (tasa de bit en error) del orden de 10^{-8} se logran con fibra óptica para servicios de transmisión de datos.

Para lograr que el canal satelital tenga un desempeño similar es necesario utilizar códigos FCC(Corrección de Errores hacia adelante) en el encabezado y el área de datos de la celda ATM. A continuación se revisan dos esquemas de codificación generales diseñados para la transmisión de celdas ATM vía satélite que permiten alcanzar los niveles de error requeridos para una transmisión de celdas ATM aceptable, en primer lugar se analiza un esquema para la corrección de errores en el encabezado de las celdas, en segundo se analiza un esquema para obtener los niveles de error requeridos en la sección de datos de la celda y finalmente se analiza un esquema integrado para el encabezado y la sección de datos. Los esquemas son:

- Esquema de codificación FEC para el encabezado de la celda ATM
- Esquema de codificación FEC para los servicios de datos de la AAL5
- Esquema de codificación FEC integrado

Esquema de codificación FEC para el encabezado de la celda ATM

El encabezado de la celda de 5 bytes contiene la información necesaria para rutear la celda a su destino por lo que cualquier error en el encabezado ocasionará una celda descartada. El estándar ATM especifica una probabilidad de pérdida de celda del orden de 10^{-10} para las redes basadas en fibra óptica. El campo HEC de un byte en el encabezado de la celda esta reservado para el control del error. El código utilizado es el CRC(32,40,4) el cual tiene la capacidad de corregir los errores de bit simples y de detectar los errores de bit múltiples. Por lo que la transmisión de celdas ATM a través de el canal satelital requiere un diseño FEC más poderoso.

La figura 5.45 muestra el diseño de un código FEC concatenado que opera en el encabezado de la celda ATM. Este sistema utiliza el código CRC(32,40,4) estándar como código externo y el código convolucional de tasa $\frac{1}{2}$ y longitud $K=7$ con un decodificador Viterbi de 3 bits como código interno. Además el sistema utiliza un intercalador de bloque entre los códigos interno y externo. El objetivo de este intercalador es mantener los errores de ráfaga fuera del decodificador de Viterbi, lo que incrementa

la capacidad de corrección del código CRC externo. El modelo de canal que se utilizó para el análisis es un AWGN.

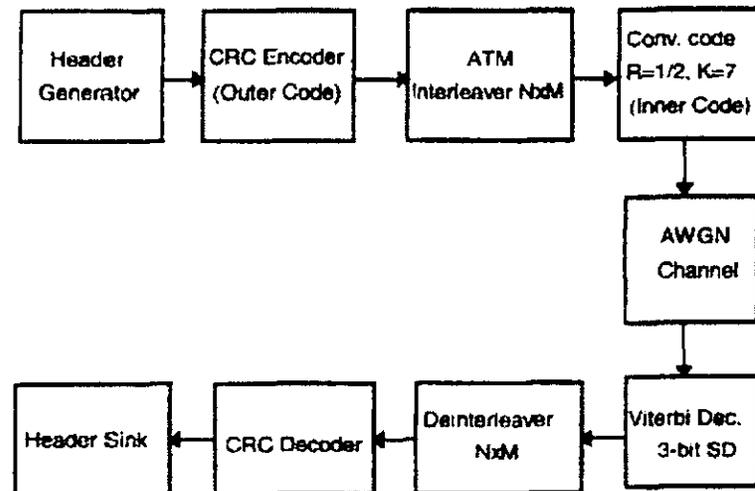


Figura 5.45. diseño de un código FEC concatenado que opera en el encabezado De la celda ATM.

En la figura 5.46 se comparan los resultados para el código concatenado con un intercalador de profundidad 20 con los resultados de el código CRC estándar. Con este grado de intercalado, el decodificador CRC corrige exitosamente el 99% de los encabezados erróneos. La extrapolación del código convolucional con $K=7$ y a una tasa de $\frac{1}{2}$ muestra que una VER con probabilidad de 10^{-7} a la salida del decodificador Viterbi es factible de obtenerse con una E_b/N_0 de aproximadamente 5 dB. Esto representa una ganancia de código de 6 dB comparado con el caso no codificado. Para un BSC con una probabilidad de transición P y asumiendo errores independientes a la salida del intercalador, se puede estimar la E_b/N_0 requerida. Considérese un encabezado de celda en error cuando N = palabra de código CRC de 40 bits es decodificada en error. Por lo tanto la probabilidad de celda en error P_1 es la probabilidad de una palabra de código en error. Como el código CRC corrige errores de bit simples para la transmisión sobre un BSC y asumiendo errores independientes, podemos calcular la probabilidad de bit en error P_1 como:

$$P_1 = \sum_{i=2}^N \binom{N}{i} P^i (1-P)^{N-i} \dots\dots\dots(5.1)$$

para una P muy pequeña, se puede aproximar P_1 usando 3.1 con

$$P_1 = \binom{N}{2} P^2 = \frac{N!}{2!(N-2)!} P^2 \dots\dots\dots(5.2)$$

substituyendo $N=40$ en 5.2 y asumiendo que P es pequeña podemos obtener la probabilidad P de transición de BSC para $P_1=10^{-10}$

$$P_1 = \frac{N(N-1)}{2} P^2 \cong \frac{1}{2} (NP)^2 \dots\dots\dots(5.3)$$

De 5.3 podemos estimar la probabilidad de transición $P=4 \times 10^{-7}$ que alcanzará la probabilidad de pérdida de celda requerida ($P_1=10^{-10}$). Por lo que una $E_b/N_0=5.5$ dB en cada enlace del satélite logrará la tasa de error requerida $P_1=10^{-10}$. Considerando un grado de intercalado de 20 como se muestra en la figura 5.46 se necesitará una $E_b/N_0=6.5$ dB para alcanzar la probabilidad de pérdida de celda $P_1=10^{-10}$

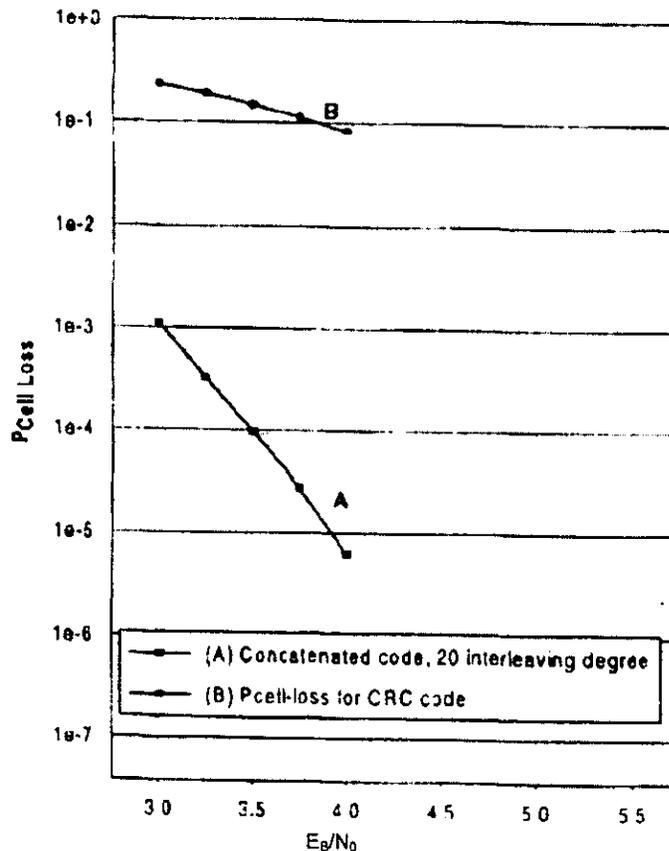


figura 5.46. Desempeño del código concatenado

Esquema de codificación FEC para los servicios de datos de la AAL5

Un código FEC diseñado para los servicios de datos de la AAL5 basado en un código RS(Reed-Solomon) (255,215) es capaz de alcanzar una VER de 10^{-8} con una E_b/N_0 aceptable. Con un código RS(255,K) la longitud de los símbolos del código es de 8 bits y la longitud de palabra es de $N=255$ símbolos. La figura 5.47 presenta una simulación de los resultados para el código RS(255,K) para diferentes valores de K. La extrapolación de el RS(255,215) en la figura 5.47 muestra que una VER de 10^{-8} se puede lograr con una E_b/N_0 de aproximadamente 6.8 dB. El modelo de canal considera un AWGN con una modulación BPSK. El código RS(255,215) tiene una tasa de código $R=0.843$ por lo que se puede obtener una salida máxima de R cuando no existen retransmisiones en el enlace satelital.

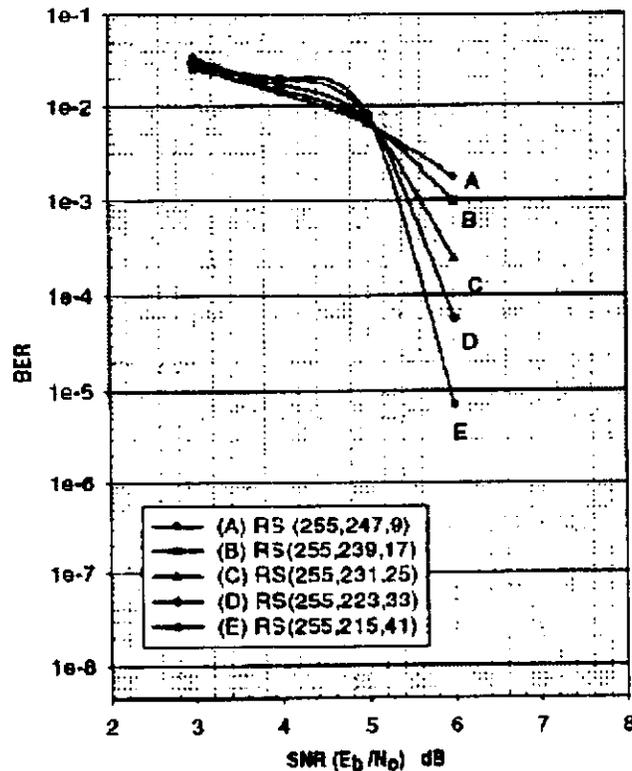


Figura 5.47. Simulación de resultados para el código R2.

Esquema de codificación FEC integrado

En la figura 5.48 se muestra la arquitectura de un código FEC que opera tanto en el encabezado como en el área de datos de la celda ATM. El código es una concatenación de dos códigos RS, el código exterior

es un RS(14,8) utilizado sólo en el encabezado de la celda y el código interno es un RS(255,215) utilizado para los datos.

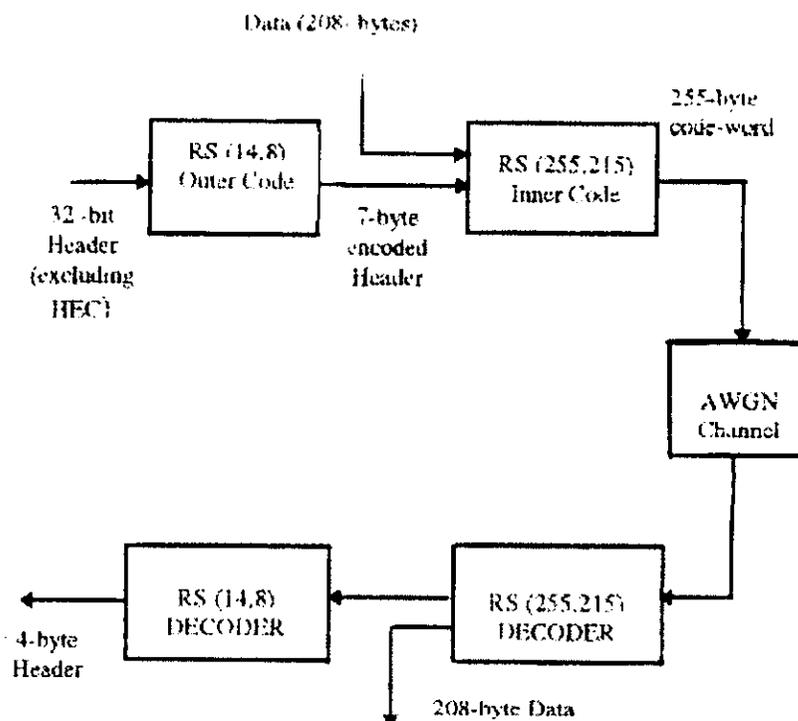


Figura 5.48. Arquitectura de un código FEC.

El funcionamiento del sistema se describe a continuación.

1. Los datos se almacenan en un buffer en la interfase satelital para transmisiones subsecuentes en el enlace satelital.
2. Cuando los datos recibidos son suficientes para completar un bloque de información (ejemplo, 208 símbolos para datos y 7 símbolos para el encabezado), el bloque es codificado por el código RS(255,215) interno.
3. La palabra codificada resultante (255 bytes) es transmitida por el canal satelital en un sólo bloque.
4. En la interfase receptora, una vez que la decodificación del bloque se realiza, la celda correspondiente se transmite usando el mismo procedimiento.

El código interno RS(255,215)

El desempeño del código RS(255,215) ya ha sido mencionado. En el esquema presentado en esta sección el código RS(255,215) opera tanto en el encabezado como en los datos de la celda. Sólo en el encabezado se utiliza el código concatenado y en los datos se utiliza el código externo.

El código externo RS(14,8)

El código RS(14,8) tiene una capacidad de corrección de hasta 3 errores por símbolo (símbolos de 4 bits). La entrada del decodificador son los primeros 4 bytes del encabezado excluyendo el campo HEC de un byte. Este código opera sólo en la parte del encabezado de la celda, lo que implica que la palabra de código con $N=14$ símbolos se concatena con la sección de datos como un bloque para formar una entrada de 215 bytes para la codificación RS interna.

El modelo de canal 16-ario

El modelo de canal utilizado en este análisis es el UDSC 16-ario mostrado en la figura 4.49 con una probabilidad de error de símbolo P_e . Como el código externo tiene una capacidad de corrección de $t=3$ símbolos, un error en el decodificador ocurre cuando los errores de símbolo exceden la capacidad de corrección del código $t=3$ lo que está dado por:

$$P_{\text{celda perdida}} = \sum_{i=4}^{14} \binom{N}{i} P_e^i (1 - P_e)^{N-i} \dots \dots \dots (5.3)$$

Como la probabilidad objetivo de celda perdida es $P_{\text{celda perdida}} = 10^{-10}$ es muy pequeña y $P_e = N \times P$ es también pequeña, aproximadamente 10^{-7} símbolo en error (obtenida de la simulación del código RS(255,215) con $E_b/N_0 = 6.8$ dB) tenemos una muy buena aproximación con:

$$P_{\text{celda perdida}} = \frac{N(N-1)(N-2)(N-3)}{4!} P_e^4 (1 - P_e)^0 \dots \dots \dots (5.4)$$

y por lo tanto

$$P_{\text{celda perdida}} = \frac{N(N-1)(N-2)(N-3)}{4!} P_e^4 \dots \dots \dots (5.5)$$

De 5.5 la probabilidad de pérdida de celda es aproximadamente 10^{-25} y con esta probabilidad tan baja, logramos un desempeño que puede ser incluso mejor que el desempeño de ATM en las redes terrestres.

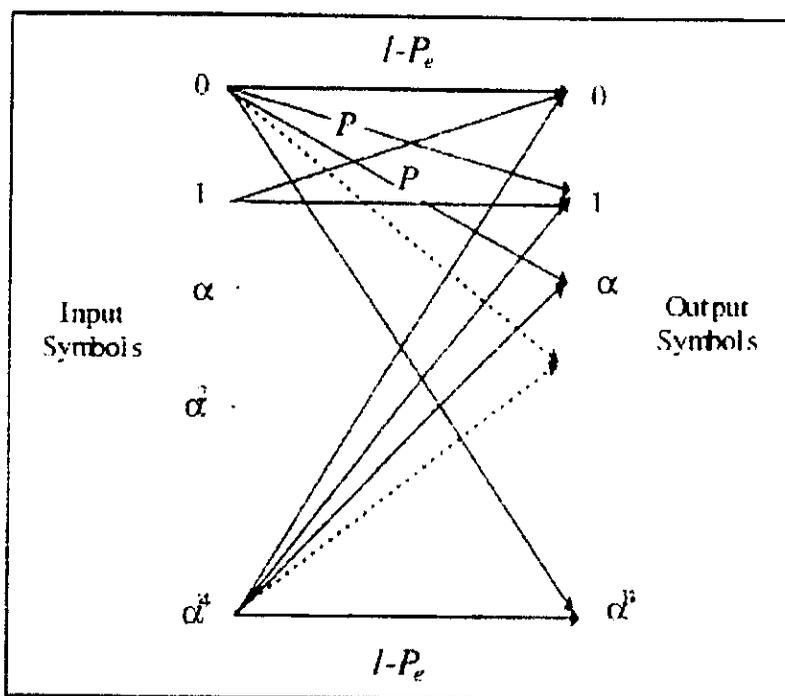


Figura 5.49. Modelo de canal utilizado UDSC 16-ario.

El desempeño del código integrado

La figura 5.50 muestra el desempeño teórico del código concatenado RS. De la gráfica podemos estimar por extrapolación que con una $E_b/N_0=6.8$ dB la probabilidad de pérdida de celda es de aproximadamente 10^{-25} . El código RS integrado revisado en esta sección tiene varias ventajas comparado con el código revisado FEC para el encabezado revisado anteriormente:

- Con el código integrado no es necesario el uso de un intercalador en la interfase de transmisión. Por lo que el retraso introducido por el intercalador.
- Se transmite sólo un encabezado en el bloque con probabilidad de error de 10^{-25} .
- Para decrementar el valor de la E_b/N_0 necesaria (terminales con potencia limitada y diámetro de antena pequeño) se puede utilizar una tasa de código más baja para el RS(255,K) interno.

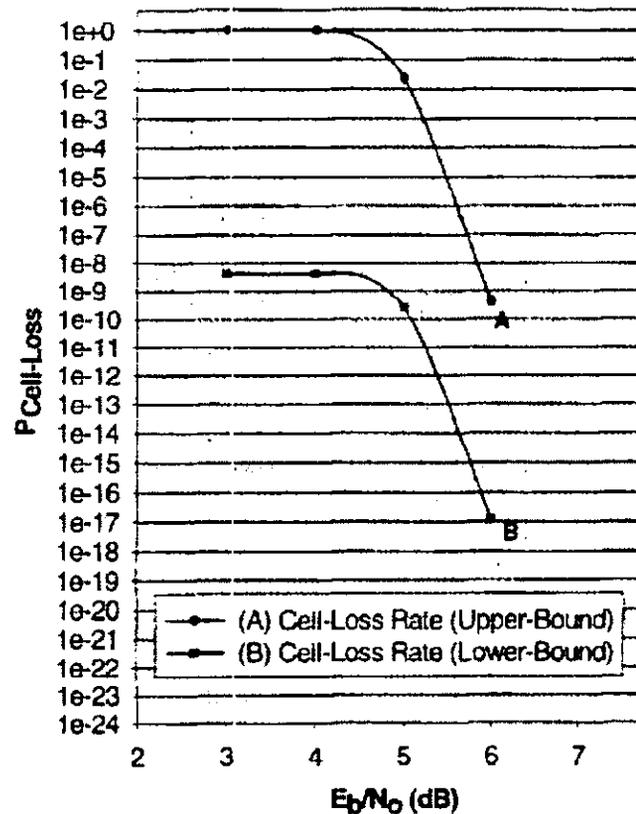


Figura 5.50. Desempeño teórico del código concatenado RS.

Análisis del enlace

En base a la E_b/N_0 calculada para lograr un desempeño similar al de un enlace de fibra óptica en el enlace satelital, $E_b/N_0=6.8$ dB podemos realizar el análisis del enlace satelital para un satélite regenerativo con $E_b/N_0=7.0$ dB y un enlace de 45 Mbps, dicho análisis se presenta en la figura 5.51.

Figura 5.51. Análisis de enlace satelital para un satélite regenerativo con $E_b/N_0=7.0$ dB y el enlace de 45 Mbps.

	Enlace de subida	Enlace de bajada
Frecuencia	14 GHz	12 GHz
Ganancia de la antena en la estación terrestre	40 dB	39 Db
Diámetro de la antena en la estación terrestre	0.96 m	1 m
Pérdida en el camino	206 dB	200 dB
Ganancia de la antena del satélite	40 dB	36 dB
Diámetro de la antena en el satélite	0.96 m	0.7 m
EIRP	50 dBw	44 dBw
Temperatura de ruido total	730° K	555° K
Relación señal a ruido para un enlace de 45 Mbps	83.53 dB/Hz	83.53 dB/Hz

Requisitos para las aplicaciones ATM y calidad de la capa física

Este punto presenta los resultados de calidad de funcionamiento de aplicaciones ATM por satélite a partir de un cierto número de experimentos y ensayos.

El mecanismo de transporte de celdas ATM es únicamente una capa del sistema de transmisión ATM de tres capas. Por encima de la capa de transporte de celdas se encuentra la capa de adaptación ATM (AAL, *ATM adaptation layer*). Existen cuatro tipos de AAL definidos hasta ahora, AAL-1, AAL-2, AAL-3/4 y AAL-5. Este último proporciona un trayecto transparente entre conmutadores ATM mientras que AAL-1 proporciona un almacenamiento intermedio para disminuir la CDV y AAL-3/4 incluye detección y corrección de errores. Por encima de AAL hay otras dos capas, la subcapa de convergencia específica de servicio de segmentación y reagrupación y la subcapa convergente que proporciona una correspondencia entre la AAL y la aplicación. Se ha utilizado una conexión AAL-5 para todos los resultados indicados en esta Recomendación.

Aplicaciones vocales y de datos en banda vocal

La característica de error requerida para soportar la señal vocal y los datos en banda vocal no es tan exigente como la necesaria para el vídeo comprimido pero un elevado valor de CLR y un importante retardo de extremo a extremo repercutirán en la calidad de estos servicios. Las nuevas técnicas de compresión para la señal vocal permiten actualmente incluir más muestras de dicha señal en cada una de las celdas ATM. Por consiguiente, la pérdida de incluso una sola celda tendrá influencia en muchos canales vocales o producirá una larga introducción en un solo canal.

Aplicaciones de vídeo

Compresión audio/vídeo MPEG-2 y transporte por ATM

La transmisión de la señal MPEG-2 por ATM designa el transporte de señales de audio y vídeo comprimidas combinadas, trenes de elementos de programa (PES, *program element streams*) y la correspondiente multiplexación y el tren de transporte. El vídeo puede comprimirse hasta aproximadamente 90:1 con MPEG-2. En la figura 5.52 aparece la cantidad aproximada de datos contenidos en el tamaño típico de la unidad de acceso de vídeo de imagen B.

Velocidad de codificación de vídeo (MHz)	Tamaño de la unidad de acceso de vídeo (Bytes)
3	10 000
10	40 000
15	50 000

Figura 5.52. Tamaño aproximado de la unidad de acceso a imagen B.

Tren de transporte MPEG-2

El tren de transporte MPEG-2 es un protocolo de multiplexación que permite transmitir en un único tren múltiples programas de vídeo, audio, vídeo y audio combinado, y datos específicos de usuario. El tren de transporte se compone de paquetes de 188 bytes que contienen información específica de programas tales como los paquetes de cuadro de asociación de programas (PAT, *Program Association Table*), el cuadro de correspondencia de programas (PMT, *Program Map Table*), el cuadro de acceso condicional (CAT, *Conditional Access Table*), el cuadro de información de red (NIT, *Network Information Table*) la referencia de reloj de programa (PCR, *program clock reference*) y los paquetes PES. Los paquetes PES contienen los datos del tren de elementos así como la indicación de hora de programa (PTS, *program time stamp*) que indica el tiempo que una unidad de presentación es presentada en el decodificador deseado del sistema, y la indicación de hora de visualización (DTS, *display time stamp*) que indica la hora en que la unidad de acceso se decodifica en el decodificador deseado del sistema.

Debido a la complejidad de la codificación de vídeo y audio MPEG-2 y de la multiplexación del tren de transporte, es sumamente difícil determinar la calidad de vídeo resultante de errores aleatorios insertados en el tren de transporte. En algunos casos, un error podría degradar una porción no utilizada de un tren de transporte, un bit no significativo de alguna información de temporización, o una parte de una unidad de acceso de audio y vídeo y no producir ningún efecto apreciable en la calidad del programa. En otros casos, un bit de temporización significativo o un puntero crítico podrían degradarse dando lugar a pérdida de sincronización del decodificador. Además, muchos de estos errores pueden enmascarse mediante una implementación innovadora del decodificador. Por tanto, es necesario un conocimiento minucioso de la implementación del decodificador y de la decodificación y multiplexación de vídeo y audio para determinar exactamente por qué el contenido del programa se degrada o el decodificador pierde sincronización.

MPEG-2 por ATM

El tren de transporte MPEG-2 puede segmentarse y colocarse en celdas ATM utilizando AAL-1 o AAL-5. La figura 5.53 ilustra la segmentación AAL-5.

Es opcional si un datagrama AAL-5 degradado se abandona o no completamente o se pasa a la aplicación. Por tanto, el abandono de una celda ATM puede dar lugar a la pérdida de dos paquetes del tren de transporte o de un total de 376 bytes. El abandono de la última celda de un datagrama, que contiene el fin de una bandera de datagrama, podría causar el abandono de cuatro paquetes.

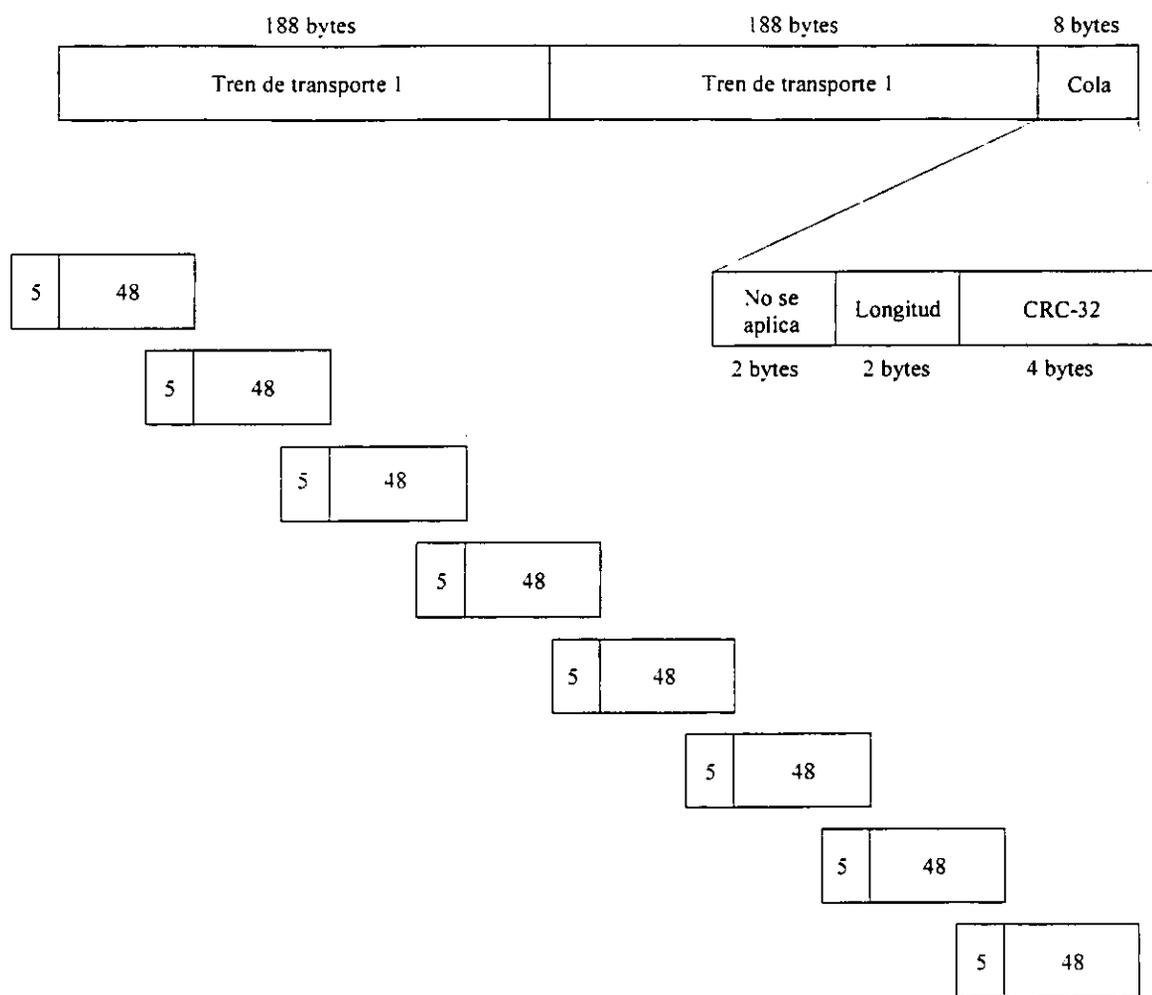
Aplicación datos

Tráfico Internet en ATM por satélite

El transporte del tráfico Internet por red ATM es un área de aplicación importante a considerar en el ATM por satélite. Los sistemas de satélites pueden utilizarse para proporcionar un transporte medular a alta velocidad, así como acceso directo y conectividad a usuarios distantes en todo el mundo.

FIGURA 23

Subcapa de convergencia de parte común AAL-5



CRC: código de redundancia cíclica

1420-23

figura 5.53. subcapa de convergencia de parte común AA-5.

Aunque la mayoría de las aplicaciones Internet utilizan con éxito los satélites, existe la preocupación de que las aplicaciones de alta velocidad pueden no funcionar eficazmente cuando se transmiten por un satélite debido a las posibles pérdidas de paquetes y a los efectos de latencia (retardo) sobre los protocolos de datos utilizados por Internet. El problema principal con la actual versión del Protocolo de control de transmisión (TCP, *transmission control protocol*) es su ineficacia para tratar trenes de datos a alta velocidad por enlaces de largo retardo así como la forma de responder a condiciones de pérdida y

congestión de la red. Este problema no es exclusivo de los satélites, sino que también es un problema para algunos servicios de datos transmitidos a velocidades de gigabits por redes de fibra.

Hay dos amplias categorías para potenciar el actual TCP: la limitación de la magnitud de la anchura de banda que puede transmitirse por un trayecto de satélite y la manera en la que se acusa recibo y se retransmiten los paquetes. El caudal de una sola aplicación que utilice una conexión TCP puede ser limitado por el tamaño de ventana del TCP, sometido a la restricción de que:

- los transmisores rápidos no desborden los receptores lentos, y
- los transmisores vayan más lentamente si existe congestión en la red.

Una forma de aumentar el caudal es incrementar el tamaño de ventana, independientemente del tipo de dispositivo de transmisión, ya que éste permitirá que se envíen más datos antes de esperar un mensaje de acuse de recibo. Si bien las ventanas ampliadas pueden permitir un mayor caudal, en condiciones de ausencia de pérdidas, es necesario considerar también otros aspectos, entre ellos los algoritmos de retransmisión y el mecanismo de control de gestión del TCP. Algunas posibles soluciones que han sido propuestas hasta ahora son:

- hacer funcionar múltiples conexiones paralelas,
- ampliar el tamaño de la ventana (RFC-1323),
- usar el mecanismo de acuse de recibo selectivo (RFC-2018) y
- emplear el algoritmo de arranque lento (RFC-2001).

Las implementaciones TCP/Protocolo Internet (IP) por ATM pueden resultar influenciadas de forma adicional por las pérdidas de celdas ATM o las inserciones incorrectas de celdas que pueden dar lugar a retransmisiones de datos y por la naturaleza del protocolo ATM. Se están estudiando técnicas para mejorar la utilización de TCP/IP por ATM.

Al diseñar estas redes, deben tenerse en cuenta varios parámetros de diseño del sistema para lograr una elevada eficacia de caudal. Entre estos parámetros cabe citar los tamaños de memoria intermedia, las políticas de exclusión por conmutación, las políticas de sistemas de extremo, los algoritmos de recuperación de errores y los mecanismos de control de la congestión.

En algunos resultados de simulación preliminares presentados al Grupo de Trabajo 4B de Radiocomunicaciones sobre un satélite que tiene previsto cursar tráfico ATM en modo de velocidad

binaria no especificada se considera este tema y se demuestra que un tamaño de la memoria intermedia óptimo de aproximadamente $0,5 \times RTT$ (tiempo de transmisión de ida y vuelta) es suficiente para proporcionar un caudal del 98% a un número infinito de fuentes de tráfico TCP.

Resultados de mediciones de QoS de las aplicaciones que utilizan ATM

Resultados de QoS de AT&T-Telstra de aplicaciones ATM por un enlace IDR

Durante las pruebas con ATM de AT&T (Estados Unidos de América), KDD (Japón) y Telstra (Australia), AT&T y Telstra efectuaron diversas pruebas que incluían mediciones QoS de algunos servicios y aplicaciones. Las aplicaciones ATM se transmitieron entre laboratorios de investigación, situados en Nueva Jersey y Sydney, por redes de fibras y enlaces por satélite IDR a 45 Mbits. Los resultados presentados a continuación corresponden a cuatro aplicaciones ATM:

- EMMI (vídeo del Grupo Mixto de Expertos en Fotografía (JPEG) en movimiento),
- Comunicqué (una posición de sobremesa para videoconferencia),
- voz MIC, y
- facsímil G3.

En la figura 5.54 se muestran algunas de las características principales de estos sistemas.

Aplicación	Descripción
EMMI	Un vídeo JPEG en movimiento que se ajustó para funcionar con un nivel de calidad de 50, lo cual produce una señal VBR de unos 10 a 20 Mbit/s
Comunicqué	Un sistema de videoconferencia de sobremesa que se ajustó para funcionar a 15 tramas/s, lo cual produce una señal VBR de 0,5 a 1,5 Mbit/s
Voz	Un canal vocal MIC de 64 kbit/s conectado a una centralita privada (PBX) y enlazado por un troncal CBR DS1
Facsímil	Un facsímil G3 (sin capacidad de corrección de errores mejorada) conectado a un canal vocal de la PBX y enlazado por un troncal CBR DS1

Figura 5.54. Aplicaciones probadas

Observadores experimentados con cada una de las aplicaciones respectivas evaluaron las aplicaciones de manera subjetiva para detectar degradaciones audibles y/o visuales. Los resultados aparecen en la figura 5.55. Para este ejemplo concreto, los resultados demuestran que los objetivos de extremo a extremo propuestos en la Recomendación UIT-T I.356 ($CLR = 3 \times 10^{-7}$, $CER = 4 \times 10^{-6}$ y $SECBR = 1 \times$

10^{-4}) se cumplieron con un pequeño margen. Toda degradación superior producía una calidad de funcionamiento inaceptable.

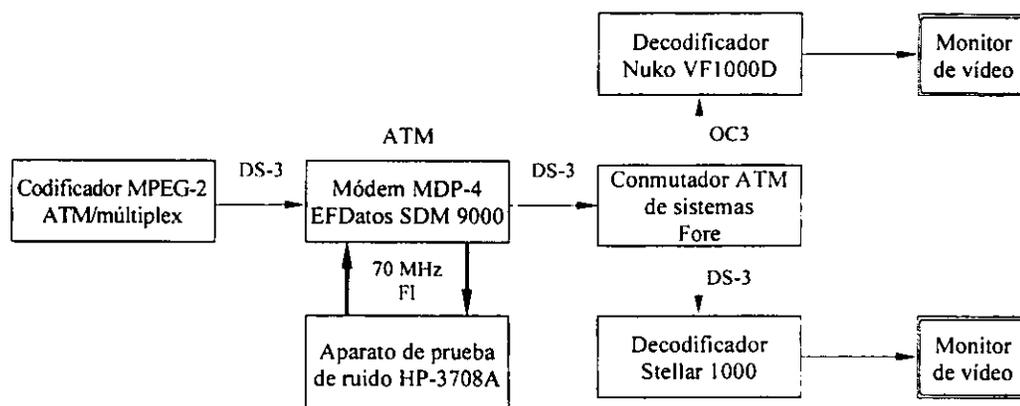
Intervalo de prueba (min)	E_b/N_0	BER ⁽¹⁾	CLR ⁽¹⁾	EMMI	Comunicqué	Voz	Facsimil
3	10.3	5×10^{-11}	0	Excelente	Vídeo y audio correctos	Excelente	Excelente
14	9.4	5.7×10^{-10}	0	Ningún cambio	Ningún cambio	Ningún cambio	Ningún cambio
8	8.7	6×10^{-9}	0	Tal vez parpadeo en colores uniformes. Pero calidad excelente	Ningún cambio	Ningún cambio	Ningún cambio
7	8.2	5×10^{-8}	0	Ligero brillo en los tonos de la piel, pero calidad excelente	Manchas	Ningún cambio	Tipo de caracteres pequeño difícil de leer
5	7	5×10^{-7}	2.8×10^{-7}	Ligero brillo. Calidad aceptable	Correcto	Ningún cambio	Tipo de caracteres pequeño difícil de leer
14	6.5	4.2×10^{-6}	7.7×10^{-6}	Movimiento espasmódico a veces. Cierta brillo	Pocas rayas negras, manchas rayas blancas	Se oye ráfaga de ruido y se pierde luego la llamada. Llamada restablecida, la calidad es buena cuando la llamada está en curso. Dos o tres segundos de conversación muy entrecortada y se abandona la llamada	La tercera página no apareció y tuvo que retransmitirse. Ligera pérdida de nitidez
5	5.4	7.5×10^{-5}	8.2×10^{-5}	El movimiento se interrumpe un instante. Congelación en vídeo. La pelota que bota parece congelarse a medio bote y hay una pausa cuando bota. Brillo en los tonos de piel. Borrosidad en las letras y en los signos de nombres	Rayas, cortes. El audio comienza a cortarse	Cortes. Ráfagas de ruido, se va luego la conexión. Ahora es inutilizable. Permanece menos de un minuto	Se detiene la recepción. No podía transmitir
3	4.5	2.99×10^{-3}	1.2×10^{-2}	Congelación del vídeo. Puede ser 5% de las tramas recibidas. Cortes de audio	Se congela la imagen	No puede establecerse una llamada (cinco intentos). Tono de marcación secundario, pero no se devuelve timbre de llamada ni llamada	No podía transmitir

(1) BER medida por el módem de satélite. CLR es la relación de celdas incorrectas o descartadas (DCR, *discarded cell ratio*); es decir, todas las celdas tienen dos o más errores en el encabezamiento. Advértase que a bajas BER no existe suficiente confianza estadística en la medición de CLR.

Figura 5.55. Resultados de las pruebas

MPEG-2 de la NASA por pruebas de laboratorio en ATM por satélite

El Lewis Research Center de la NASA efectuó experimentos de QoS ATM utilizando MPEG-2 (AAL-5) en ATM por un enlace de satélite emulado. El objeto de estos experimentos era determinar la calidad del enlace en espacio libre necesaria para transmitir información multimedia de alta calidad utilizando ATM. Los trenes de transporte MPEG-2 se dispusieron en línea de base en un entorno con errores (distribución binómica), seguidos por una serie de pruebas de MPEG-2 por ATM. Se crearon errores tanto digitalmente como en un enlace de FI utilizando un módem de satélite y un aparato de prueba de ruido gaussiano comercial, para dos implementaciones de decodificador MPEG-2 diferentes. La configuración de prueba se muestra en la figura 5.56.



1420-24

figura 5.56. Configuración de prueba de MPEG-2 para pruebas de doble de codificador de larga duración.

Los resultados de las pruebas se muestran en la figura 5.57 e indican que CLR y CER deben ser al menos 1×10^{-8} y 1×10^{-7} respectivamente, y pueden requerir aún mejor calidad de funcionamiento a fin de ofrecer aceptablemente dichos servicios como vídeo comprimido MPEG-2. Sin embargo, estos resultados parecen deberse a la necesidad de contar con mejores requisitos de BER generales para la decodificación MPEG-2 de calidad más que al mecanismo de transporte indicado por la prueba de línea de base de los trenes de transporte MPEG-2 con errores en función de las celdas ATM con errores que transportan trenes de transporte MPEG-2.

E_b/N_0 (dB)	BER	CLR	CER	Resincronización del decodificador	Errores de bloque	Total de errores visibles	Tiempo de pasada (s)	VEPS
7.5	4.23×10^{-7}	1.40×10^{-6}	9.95×10^{-6}	18	8	26	420	6.19×10^{-2}
8.0	7.05×10^{-8}	2.93×10^{-7}	1.76×10^{-6}	12	17	29	2 315	1.25×10^{-2}

Figura 5.57. Resultados de las pruebas

- Las mediciones de BER, CLR y CER pertenecen a patrones de prueba que fueron transmitidos por el enlace simultáneamente con el vídeo. Son indicativos del enlace pero NO son mediciones del tren de vídeo propiamente dicho.
- Condición del módem: codificación convolucional de índice 3/4 decodificación de Viterbi y MDP-4.
- Resincronización del decodificador: el decodificador congela la imagen y se resincroniza.
- Error de bloque: pequeños cuadrados apreciables en una porción de la pantalla – a veces con colores cambiantes.
- VEPS: errores visibles por segundo (*visible errors per second*).

Los resultados de este estudio se basaron en sistemas que tenían porciones de multiplexor ATM a MPEG-2 que pasaban datagramas AAL-5 degradados a las porciones de decodificador de vídeo. Además, los dos decodificadores utilizados en estas pruebas se implementaron con chips de decodificador C-Cube^R CL9100. Se necesita más trabajo para evaluar la repercusión en la QoS de otros decodificadores y sistemas MPEG-2 más robustos.

Capítulo VI. Arquitecturas ATM vía Satélite

Tipo de conmutadores ATM de acuerdo al tráfico

El núcleo de la red ATM vía satélite es el conmutador a bordo, de este depende la capacidad de la red satelital. Podemos identificar los tipos de conmutadores terrestres que existirán en un futuro, estos serán similares a los que se utilicen en las redes ATM satelitales. De hecho cada tipo de conmutador define un tipo de arquitectura satelital específica. Además de las características del conmutador, otro factor diferenciador de las arquitecturas ATM vía satélite es la tecnología disponible, la mayoría de las propuestas realizadas hasta el momento están basadas en las características de los conmutadores actuales, en parte por las limitantes tecnológicas y en parte por que la nueva generación de conmutadores no se había desarrollado.

Tipos

Los conmutadores ATM difieren en sus características, la variedad de interfases y servicios soportados, la redundancia, la complejidad del software de red soportada y la complejidad de los mecanismos de control de tráfico incluidos.

Tomando como base los sistemas de conmutación ATM para redes privadas, podemos distinguir tres tipos, basados en los escenarios a los que están dirigidos

Conmutadores nivel workgroup

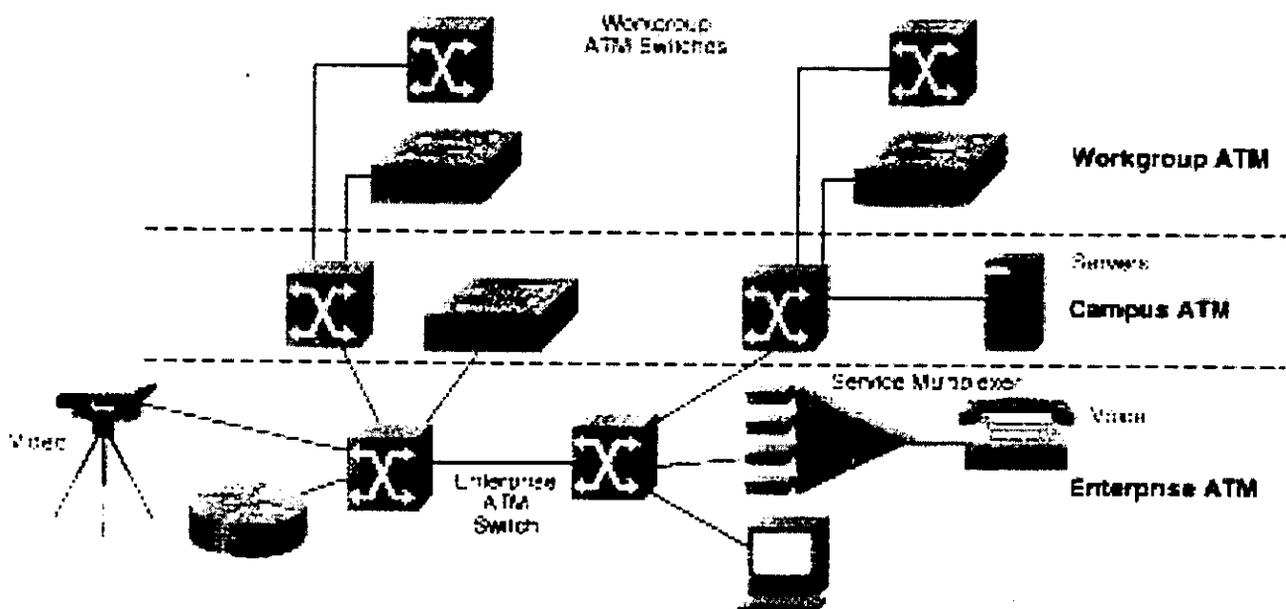
Los conmutadores a este nivel están optimizados para la entrega de ATM en los equipos de escritorio, utilizando interfases ATM puras, por ejemplo, cable de cobre y adaptadores ATM en tarjeta. Se comparan en capacidad al Ethernet conmutado. Este tipo de implementación ATM es todavía escasa.

Conmutador ATM nivel Campus

Los conmutadores ATM nivel campus se utilizan para las redes de soporte ATM(backbones), por ejemplo para unir ruteadores ATM o conmutadores LAN. Este tipo de conmutadores deberán soportar una amplia variedad de interfases locales y de redes WAN y trabajarán en su mayoría en base a la especificación LANE(LAN Emulation), Fast Ethernet y FDDI.

Conmutador ATM nivel Enterprise

Los conmutadores ATM nivel Enterprise son dispositivos sofisticados y de servicio múltiple, diseñados para formar los backbones centrales de redes de área amplia muy grandes. Los conmutadores de nivel enterprise de forma similar a los conmutadores de nivel campus también se utilizarán para conectar conmutadores de nivel workgroup y otros dispositivos ATM tales como conmutadores LAN, servidores y ruteadores ATM. Este tipo de conmutadores se utilizarán como el punto de integración único de cada uno de los diferentes servicios de red. Este tipo de conmutadores soportará protocolos como conmutación LAN, interfases WAN como Frame Relay y adaptación de mecanismos multiservicios, incluyendo emulación de circuitos para interconexión PBX. Debido a los servicios y a la demanda que tendrán dichos conmutadores utilizarán redundancia en procesadores. Se implementarán en las fronteras de las redes públicas para conectarse con la infraestructura común ATM de las redes públicas. Su función primaria es la integración de servicios.



6.1 Jerarquía de los conmutadores ATM

En la figura 6.1 se muestra la jerarquía de los tipos de conmutadores anteriormente descritos.

Características de los conmutadores ATM

En las siguientes tablas se muestran las características de los conmutadores ATM actualmente en uso y las características de los conmutadores ATM futuros, los sistemas ATM vía satélite futuros deberán ser capaces de incluir el segundo tipo de conmutadores a bordo del satélite.

Característica	Conmutadores actuales	Conmutadores futuros
Capacidad	2.5-5 Gbps, no soporta enlaces de 622 Mbps	10-20 Gbps soporte inherente de 622 Mbps
Paquetes de circuitos	No modulares	Modulares, interfases intercambiables
Tecnología de conmutación	Presentan bloqueo	Sin bloqueo, sistema de buffers avanzado
Señalización	Ninguna o propietaria	UNI 3.0/3.1
Ruteo ATM	Propietario o IISP	IISP, PNNI
Niveles de prioridad	0-2	4 o más
Mecanismo de administración de tráfico	Mínimo	Políticas de tráfico, CLP, Eliminación selectiva de celdas
Control de Congestión	Ninguno	Soporte para ABR
Buffering	Buffers pequeños	Buffers grandes, eliminación de paquete definido por finalización de paquete
Configuración	Manual	Plug and Play
Procesador del conmutador	Bajo desempeño	Alto desempeño
Administración	Mínima	MIBs estándar, Flujo de celdas OAM, soporte para aplicaciones de administración
Escalabilidad	Ninguna	Si, depende de la tecnología de conmutación

Figura 6.2. Características de los conmutadores actuales y futuros

Conmutadores ATM Caso satelital

En el caso satelital, el desempeño y características del conmutador a bordo debe ser similar a los de su contraparte terrestre, la funcionalidad esperada en dichos conmutadores se presenta a continuación:

Característica	Requerimientos de los conmutadores ATM satelitales
Desempeño	10-20Gbps, 32-128 puertos OC-3, soporte para OC-12, sin bloqueo, procesador de alto desempeño interconstruido
Paquete electrónico	Sistema modular con redundancia
Señalización UNI	UNI 3.0, UNI 3.1, ILMI
Ruteo ATM	IISP,PNNI, balance de cargas, ATM firewalls, PVP tunneling
Administración del tráfico	Control de admisión de la conexión, 4 o más prioridades, administración para todos los tipos de conexión, UPC leaky bucket de modo dual, control por perfil de tráfico
Buffers	1000 o más celdas por Puerto, eliminación temprana y parcial de celdas
Soporte para servicios ABR	Implementación en hardware, definición relativa de tasa, definición fija de tasa
Administración	Operación plug and play, flujo de celdas OAM, ATM RMON en el futuro

Figura 6.3. Características deseadas en el conmutador a bordo

Tipos de conexión ATM ofrecidas

El tipo de conexión CBR se utilizará de forma importante para la emulación de circuitos de voz. El número de conexiones VBR permanecerán limitadas por algún tiempo, debido principalmente a que muy pocas aplicaciones de red pueden utilizar los sistemas de QoS garantizados, esto es hacer la petición de una conexión con ciertos parámetros de QoS. La mayoría de las aplicaciones de nuestros días y

probablemente del futuro seguirán utilizando distintos protocolos de transporte y de red tales como TCP/IP o el IPX.

Este tipo de protocolos, se construyeron sin tomar en cuenta el concepto de QoS, por lo que no son capaces de interpretar dichos parámetros ni de traducirlos en peticiones para la red.

La construcción de aplicaciones sobre ATM terminará con esta limitación, pero su desarrollo no ocurrirá en el futuro cercano. En su lugar se están desarrollando esfuerzos importantes para incluir los parámetros de QoS en los protocolos y transportes actuales. Existe por ejemplo, una iniciativa para convertir el protocolo IP en un protocolo con capacidad multimedia y por lo tanto poder mapear los QoS definidos en el IP en ATM a través del MPOA(Multiprotocol for ATM)

Mientras esta infraestructura de protocolos se construye, las redes ATM no pueden ofrecer a los protocolos existentes un soporte real para los QoS, esto es la posibilidad de utilizar conexiones ABR. Por tal motivo la mayoría de las redes ATM serán utilizadas inicialmente para eliminar los cuellos de botella en las redes actuales y ofrecerán conexiones sin especificar los parámetros de QoS. La mayoría de las conexiones de la siguiente generación de redes ATM serán de dos tipos UBR(Tasa de bits sin especificar) que no ofrece garantías de QoS y ABR(Tasa de bits Disponible) que ofrece un mínimo de garantías de tasa de transmisión y pérdida de celdas.

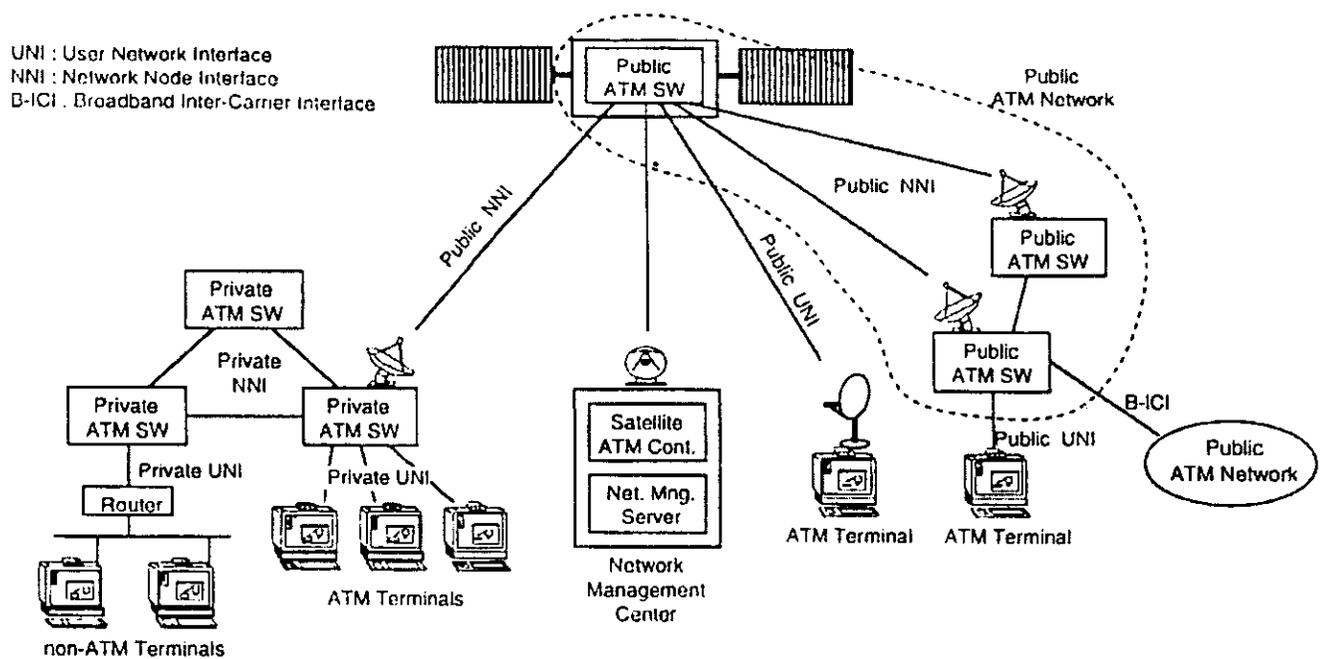


Figura 6.4. Arquitectura de Red ATM

Gateway Nivel Enterprise

La figura 6.4 muestra el concepto de la red ATM utilizando un conmutador a bordo. En este caso el conmutador está tipificado como un conmutador ATM público. Este tipo de conmutadores tanto satelitales como terrestres forman una red pública de banda ancha tal como B-ISDN. La interfase del sistema de conmutación a bordo y de los conmutadores terrestres es la Interfase de Nodo de Red Pública (NNI) o la Interfase de Sistema Publico Inter-conmutadores (B-ISSI). No será necesario implementar una interfase entre portadoras (B-ICI) en el conmutador a bordo ya que los conmutadores terrestres conectados al conmutador ATM a bordo pueden ser los que den salida a otras redes públicas en lugar del conmutador a bordo. Las terminales ATM que tienen una interfase usuario-red (UNI) pueden acceder al conmutador a bordo de forma directa. Una LAN ATM terrestre puede ser conectada utilizando la UNI pública que se encuentra instalada de forma frecuente en los conmutadores ATM privados. Se deben mantener algunas funciones e información sobre administración y mantenimiento en el servidor ATM. Por ejemplo la MIB, el servidor ARP y el servidor NMS. El conmutador a bordo y las instalaciones terrestres estarán interconectadas vía una unidad de interfase espacial que convierte los enlaces ordinarios de fibra óptica en enlaces satelitales.

Configuración del satélite para comunicaciones en banda ancha

Para las comunicaciones del orden de gigabits, el ancho del haz del satélite tiene que ser reducido para alcanzar niveles altos de EIRP y G/T. Por el otro lado, el satélite tiene que ser capaz de cubrir un área amplia. Una solución consiste en equipar al satélite con una antena de haz dirigido(SSBA) que puede controlar la dirección del haz electrónicamente. Para configurar una SSBA, se requiere la utilización de la tecnología de arreglos activos en fase. La figura 6.6 muestra la cobertura del satélite propuesta. Se propone tener 3 áreas de cobertura que cubren el este y sureste de Asia, y Oceanía y dos haz fijos que cubren Japón y otras áreas como Hawaii.

La SSBA tiene un ángulo de escaneo de $\pm 7.5^\circ$ con un ancho de haz de 0.3° a un ancho de banda de 1.1 Ghz. Para proveer una comunicación del orden de gigabits, la ganancia de la antena debe ser mayor a 55dBi y la salida de potencia del haz debe ser de 200 W considerando un margen de lluvia.

Existen tres tipos de configuraciones de antena para SSBA: antena de arreglo activo alimentado por reflector sencillo; (APFSR); antena de arreglo activo alimentado por antena de reflector imagen (APFIR) y la antena de arreglo activo de radiación directa (DRAPA). El DRAPA es capaz de obtener el mejor desempeño en ganancia en el caso de un haz amplio, pero es más difícil integrarla en un subsistema de antena debido a que se requieren mucho más elementos que en los otros tipos.

El sistema de conmutación a bordo

La configuración mostrada en la figura 6.5 consta de una matriz de conmutación de microondas (MSM) para los canales de comunicación en banda ancha reales y un conmutador en banda base ATM para acceso multimedia de 155 Mbps a 600 Mbps. El MSM se ha diseñado en la banda de IF con un gran ancho de banda para conmutar las señales a tasas de gigabits.

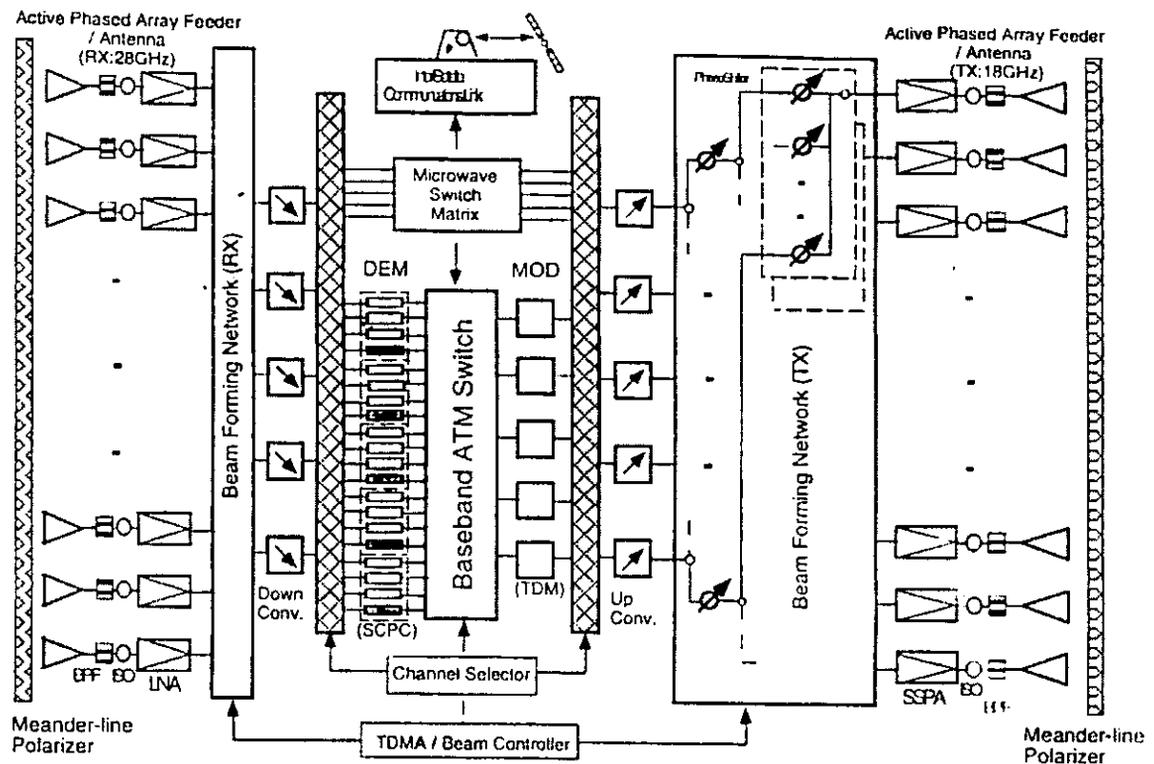


Figura 6.5 Sistema de conmutación a bordo

El enlace intersatelital

Para tener una cobertura global, hemos asumido que varios satélites se establecerán en una órbita geoestacionaria, los enlaces intersatelitales deben tener una salida de alrededor de 2 Gps. En vista de esto, se planea desarrollar una comunicación óptica que permita a los satélites intercambiar información. Se espera que el enlace de comunicación intersatélite (ISL) estará constituido por dos tipos de sistemas. Uno empleará un transmisor láser de estado sólido de $0.8 \mu\text{m}$ utilizando una multiplexación de longitud de onda para obtener 4 canales de 300 Mbps. El otro será un sistema de $1.5 \mu\text{m}$ para obtener una capacidad de 1.2 Gbps.

Método de acceso al satélite

La tecnología de comunicaciones en gigabits vía satélite emplea una SSBA con haz estrecho y ganancia

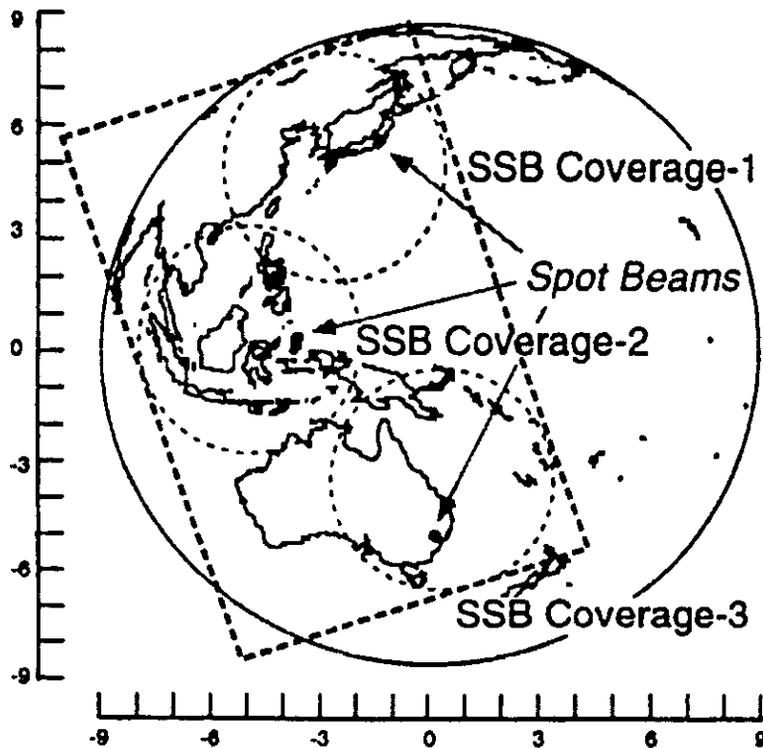


Figura 6.6. Areas de cobertura

alta. Por lo tanto las estaciones terrenas pueden ser cubiertas en base a división de tiempo. Además el ancho de banda del transpondedor del satélite será mayor a 1 Ghz y puede ser dividido en varios canales si cada acceso es menor a 200 Mbps. En base a esto, el acceso para el enlace de subida puede efectuarse utilizando el método canal único por portadora (SCPC) sobre acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) lo que se expresa como SCPC/TDMA, por otro lado, el enlace de bajada se puede multiplexar mediante el efecto de la multiplexación ATM y las estaciones terrenas pueden recibir relativamente a mayores tasas de transmisión que a las que transmiten. La multiplexación por división de tiempo puede ser utilizada en lugar de SCPC. El acceso del enlace de bajada está disponible vía TDM sobre TDMA que se expresa como TDM/TDMA.

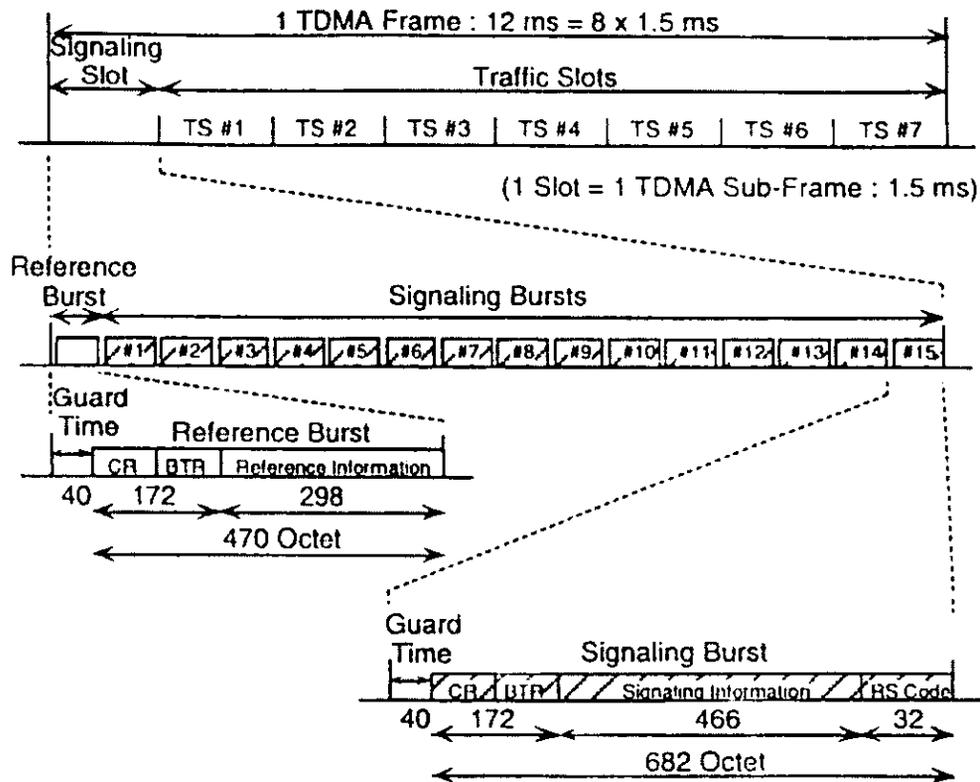


Figura 6.7. Configuración de Marco

El marco TDMA debe ser determinado en base a la eficiencia del canal. Un ejemplo de un marco TDMA se muestra en la figura 6.7. Este formato está dividido en una parte de señalización y un parte de tráfico. Las ranuras de señalización se utilizan para las peticiones de los usuarios y del centro de administración de la red de asignación de ranuras. En algunos casos las ranuras de señalización se pueden utilizar para pequeñas ráfagas de tráfico utilizando ALOHA. Las ráfagas de tráfico serán asignadas en base a las peticiones de los usuarios las cuales contienen los parámetros de tasa pico de celdas. Para poder acomodar a múltiples usuarios, se deben considerar tres métodos. El primero involucra la formación de un supermarco con varios marcos TDMA y donde las ranuras de señalización estarían preasignadas a los usuarios. El segundo método involucra la formación de un supermarco con varios marcos TDMA y ranuras de señalización que se utilizan en base al esquema ALOHA para reducir el tamaño del supermarco. El tercer método involucra el preparar un haz global independiente para canales de señalización de tasa de transmisión baja utilizando la flexibilidad de las antenas de arreglo activo.

Un marco de ráfaga de tráfico contiene información mapeada dentro de las celdas ATM. El ejemplo que se muestra en la figura 6.7 tiene una sección de carga útil que puede contener 4 marcos STM-1 y los datos están protegidos por un código de Reed-Solomon (255,223). Aquí, se asume que se utilizarán los marcos STM, pero todavía se encuentra en investigación si se utilizará una interfase basada en SDH o una basada en celdas, en términos de la sincronización de la celdas. Para lograr un efecto de corrección de error efectivo, la función de intercalado debe de ser utilizada. El intercalado de símbolos se utiliza con el código Reed-Solomon de forma estándar. Sin embargo el intercalado de símbolos no es suficiente para reducir la pérdida de celdas ocasionada por errores en ráfaga. Por lo que se debe utilizar el intercalado de bit en el exterior del conmutador ATM para reducir el efecto de los errores en ráfaga.

Subsistema de Conmutación ATM a bordo

El subsistema de conmutación ATM a bordo estará constituido de un demodulador, un modulador, la línea de unidades de interfase y el conmutador como se muestra en la figura 6.8

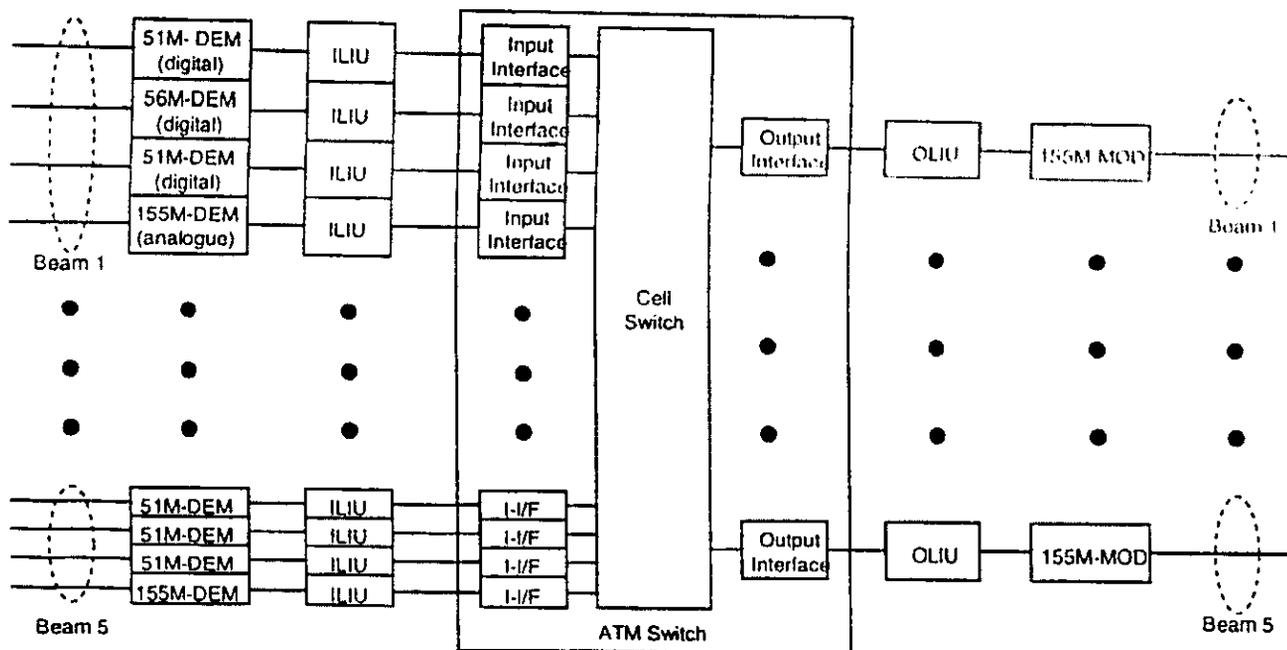


Figura 6.8. Sistema de Modulación y demodulación

Demodulador a bordo

El demodulador a bordo requiere de alta velocidad de procesamiento y estabilidad para lograr comunicaciones a tasas de transmisión de altas. La estabilidad se puede lograr utilizando tecnología de circuitos digitales en lugar de circuitos analógicos debido a que el última se ve más afectada por las condiciones ambientales, tales como la temperatura. La tasa de transmisión máxima con un modulador totalmente digital es de 60 Mbps aproximadamente con la operación en modo ráfaga. Una ventaja adicional al utilizar un modem de circuitos digitales es la tasa de transmisión variable. Esto significa que la red satelital puede ser accesada desde diversas estaciones terrenas con tasas de transmisión bajas y altas. Un circuito híbrido, analógico debe ser capaz de alcanzar una tasa de transmisión de hasta 200 Mbps. QPSK con detección coherente sería el esquema de modulación/demodulación apropiado debido a que requiere menos E_b/N_0 para lograr la misma tasa de error. El rango de captura de la señal debe ser de ± 500 kHz asumiendo que la estabilidad de la frecuencia local es de 10^{-5} . El rango dinámico del demodulador debe ser de más de 15 dB debido a que el margen de lluvia debe ser de alrededor de 15 dB. Para una comunicación ATM, la tasa de error debe ser de 10^{-10} al menos. Por lo que un código concatenado de corrección de error se requiere para disminuir los errores. Un código convolucional de tasa $3/4$ / decodificación Viterbi y el código Reed-Solomon(255,223). El modulador a bordo demodula la señal recibida, detecta una palabra única y sincroniza el tiempo de ráfaga, también decodifica los códigos interno y externo. Después de esto la secuencia de bits regenerada entra a la interfase de línea.

Modulador a bordo

El modulador a bordo debe ser capaz de alcanzar una tasa de información de 155.52 Mbps y la tasa de transmisión incluyendo los códigos de corrección de error es de alrededor de 200 Mbps. El modulador a bordo realiza la codificación externa e interna y agrega el preámbulo del formato de ráfaga, después se genera una señal modulada de ráfaga.

Conmutador ATM a bordo

Es factible aplicar la tecnología actual terrestre para el conmutador a bordo con el objetivo de mantener la compatibilidad con las redes terrestres y evitar la necesidad de desarrollar tecnología adicional para las aplicaciones espaciales. El conmutador ATM debe de efectuar las funciones mostradas en la tabla

Función de Conmutación	PVC/SVC
Señalización UNI	Q.2931, UNI 3.0, UNI 3.1, UNI 4.0, ILMI
Señalización NNI	PNNI 1.0
Direccionamiento	NSAP
Servidor	ATM-ARP, NHRP
Control de Congestión	Presión de respaldo, EFCI, EPD
Tipo de tráfico	CBR, rt-VBR, nrt-VBR, ABR, UBR
Control de tráfico	Por política, por forma
Administración	SNMP, MIB-II, ILMI-MIB, etc.

Figura 6.9 Funciones del conmutador

Se requieren Circuitos Virtuales Permanentes (PVC) y Circuitos Virtuales Conmutados (SVC) como base del control de las conexiones. Para establecer y terminar las conexiones se requieren los controles especificados en Q.2931, UNI 3.0, UNI 3.1 y UNI 4.0. La emulación de LAN no se requiere porque la red satelital será utilizada como red de área amplia. Para la señalización entre conmutadores se utiliza la NNI pública. Para controlar la congestión se utiliza el esquema de presión de respaldo, el esquema EFCI y el esquema EPD deben ser considerados, de forma independiente o combinada. El control de tráfico para servicios de tasa de bit constante (CBR), de tasa variable (VBR), tasa disponible (ABR) y tasa no especificada (UBR) debe de ser implementado. Para el control del tráfico se utilizarán el proceso de eliminación de celdas, el control por políticas y por forma del tráfico. El monitoreo de celda, el mantenimiento de la MIB, la administración y el diagnóstico de la red son otras funciones necesarias en el conmutador ATM a bordo.

Unidad de interfase en línea

El conmutador ATM a bordo tiene la interfase de I/O común y el formato de la línea de acceso del satélite no es compatible con ésta. Por lo que se utiliza una unidad de línea de interfase para convertir estas dos especificaciones de interfase. Una línea de interfase de entrada (ILIU) se inserta entre el demodulador a bordo y el conmutador ATM para sincronizar la temporización de bit, detectar las celdas válidas y formar el marco SDH/SONET. La interfase de la línea de salida se inserta entre el conmutador ATM y el modulador con el fin de sincronizar la temporización de bit, detectar las celdas válidas y formar el marco del enlace de bajada.

Matriz de características de los satélites S-ATM

En base a lo revisado anteriormente, se presenta una matriz que concentra las características principales de los sistemas ATM vía satélite enfocada a los desarrollos futuros probables y la jerarquía de conmutadores revisada anteriormente.

Matriz de Comparación de Satélites ATM

Características	Arquitectura ATM orientada al usuario final(UNI) Conmutador Nivel Campus Extendido	Arquitectura ATM orientada a la red de banda ancha entre redes WAN privadas	Arquitectura ATM de nodo dentro de una red ATM privada o pública	Arquitectura Integradora de Servicios, multi a multi, ancho de banda asimétrico(Todas las anteriores)
------------------------	---	--	---	--

Directivas de diseño	Proveer servicios de Portadora ATM de banda ancha directo al usuario final	Proveer interconexión de banda ancha entre redes WAN privadas	Proveer un nodo de tránsito en el cielo dentro de una red ATM privada o pública	Proveer servicios integrados a usuario final e interconexión de redes WAN
-----------------------------	--	---	---	---

Inicio de operación	2020	2005	2005	2020
Comentarios sobre el número de satélites(red global ATM)	Se pueden utilizar 1 o más satélites de acuerdo a la necesidad de cobertura	Tipicamente será un satélite propietario	Se utilizará un satélite por nodo extra	Se utilizarán uno o más satélites de acuerdo a las necesidades de la cobertura
Enlaces intersatelitales	NO	Depende de la arquitectura	SI	SI
Banda de operación	Ka			
Tasas de transmisión sugeridas	100Kbs-2Mbs	100-600 Mbps	100-600Mbps	100Kbps-2Mbps, 100-600Mbps
Usuarios o terminales atendidas	10000-30000	50-300	50-300	30000 usuarios residenciales, 250 redes de banda ancha
Retraso promedio	>250 ms + tiempo negociación de la conexión(100-200ms)	>250 ms + tiempo negociación de la conexión(100-200ms)	>250 ms + tiempo negociación de la conexión(100-200ms)	>250 ms + tiempo negociación de la conexión(100-200ms)

Protocolo S-ATM

Esquema de encapsulación ATM	Celda ATM pura con código de protección interno y externo	Celda ATM pura con código de protección interno y externo	Celda ATM pura con código de protección interno y externo	Celda ATM pura con código de protección interno y externo
Tipo de codificación de canal	Código convolucional perforado de índice 3/4 interior y código RS(63,53) exterior	Código convolucional perforado de índice 3/4 interior y código RS(63,53) exterior	Código FEC RS interno y externo	Código FEC integrado, RS(255,215) externo, RS(14,8) interno
Número de celdas transmitidas por paquete	1	2 a 4 celdas por paquete	2 a 4 celdas por paquete	3 a 4 celdas por paquete
Subcapa de medio físico PHY	SONET/SDH, T1, T2, T3	SONET/SDH	SONET/SDH	SONET/SDH T1, T2, T3

Subcapa de convergencia TC	Ancho de banda fijo, HEC en modo de corrección, método de delineado normal, alfa=7, delta=6, SONET PLCP	Ancho de banda bajo demanda para diferentes servicios OC-3c a OC-12c, HEC en modo de corrección, método de delineado normal, alfa=7, delta=6, SONET PLCP	Ancho de banda fijo OC- 3c a OC-12c, HEC en modo de corrección, método de delineado normal, alfa=7, delta=6, SONET PLCP	Ancho de banda bajo demanda para diferentes servicios, HEC en modo de corrección, método de delineado normal, alfa=7, delta=6, SONET PLCP
Capa ATM	Contrato de tráfico preespecificado, SNMP, MIB, conexión punto a punto o punto a multipunto, multi a multi, ancho de banda asimétrico, conexión especificada por clase	Contrato de tráfico flexible, SNMP, MIB, punto a punto o punto a multipunto, multi a multi, ancho de banda asimétrico, conexión especificada por parámetro	Contrato de tráfico flexible, SNMP, MIB punto a punto o punto a multipunto, multi a multi, ancho de banda asimétrico, conexión por parámetro	Contrato de tráfico mixto, SNMP, MIB, conexión punto a punto o punto a multipunto, multi a multi, ancho de banda asimétrico, conexión por parametro
CBR(teléfono, videoconferencia)	NO	Presente	Presente	Presente
VBR(teléfono, videoconferencia)	NO	No	No	Presente
ABR(video comprimido y datos)	Presente	Presente	Presente	Presente
UBR(archivos y e-mail)	Presente	Presente	Presente	Presente
Capa de adaptación	AAL-5	AAL-1,5	AAL-1,5	AAL-1,3/4,5
Protocolos alto nivel disponibles	Internet suite, LANE	LANE, Internet suite, MPEG-2, EMMI	No disponibles por ser nodo de tránsito	Internet suite, LANE, MPEG-2, EMMI
Control y señalización	B-ISUP(SS7) o Q.2931			

Niveles de error requeridos para UBR, AVR y VBR

BER	3 x 10 E-8	3 x 10 E-8	3 x 10 E-8	3 x 10 E-10
CLR	3 x 10 E-7	3 x 10 E-7	3 x 10 E-7	3 x 10 E-9
CER	4 x 10 E-6	4 x 10 E-6	4 x 10 E-6	4 x 10 E-7
CDT	400 ms	400 ms	400 ms	400 ms
Eb/No	9-11 dB			

Segmento satelital

Tipo de órbita	Geoestacionaria			
Tipo de modulación	QPSK/8-PSK	QPSK/8-PSK	QPSK/8-PSK	QPSK/8-PSK

Estaciones del usuario final	Antena:1.2m, Temperatura del sistema:100-300K, Potencia transmisor:100-300W,transmisor TWTA con redundancia, receptor monoportadora	Antena 5-20m, Temperatura del sistema:por calcular, Potencia del transmisor 1000-10000, transmisor TWTA con redundancia, receptor monoportadora	Antena:5-20m,temperatura del sistema:por calcular, Potencia del transmisor:1000-10000, transmisor TWTA con redundancia, receptor monoportadora	Antena:5-20m, Temperatura del sistema por calcular, Potencia del transmisor:1000-10000, transmisor TWTA con redundancia, receptor monoportadora
Tipo Antena, estación usuario final	Reflector con alimentación sencilla	Reflector con alimentación sencilla	Reflector con alimentación sencilla	Reflector con alimentación sencilla
Tipo Antena	SSBA DRAPA	Reflector sencillo con arreglo BFN, o alimentación sencilla con aperturas múltiples	Reflector sencillo con arreglo BFN, o alimentación sencilla con aperturas múltiples	SSBA,DRAPA y/o Reflector sencillo con arreglo BFN
Trasponder	Cuasilineal,Regenerativo ancho de banda de 1 o más Ghz			
Protocolo MAC	TDMA, ALOHA o combinación	G-TDMA	TDMA	G-TDMA, TDMA, ALOHA-R
Tecnología de integración del chipset y equipamiento	MMIC GaAs 0.15 micrones o InP, Amplificadores TWTA,SSPA/GAAs o SSPA/InP, Convertidores A/D 1 micron HBT 9bit/1.2Gbps, ASIC, 0.5 micrones CMOS 500 Kgate			

Conmutador a bordo

Localización y mantenimiento de la tabla de conmutación	Tabla de conmutación en el Satélite, mantenimiento terrestre			
Tipo de conmutador	Matriz distribuida antibloqueo de Memoria compartida con acceso en paralelo y buffer a la salida			
Capacidad del conmutador	10-20 o más Gbps			
Conexiones	32-128 OC-3			
Tipo de buffering y tamaño promedio				
Funciones de la capa ATM en el conmutador	Capa física:todas, Capa ATM: Multiplexación de celdas, traducción de los identificadores VPI/VCI, Capa de adaptación AAL-5	Capa física:todas, Capa ATM: Multiplexación de celdas, traducción de los identificadores VPI/VCI, Capa de adaptación AAL-1,AAL-5	Capa física:todas, Capa ATM: Multiplexación de celdas, traducción de los identificadores VPI/VCI, Capa de adaptación AAL-1, AAL-5	Capa física:todas, Capa ATM: Multiplexación de celdas, traducción de los identificadores VPI/VCI, Capa de adaptación AAL-1, AAL-5
Funciones de la capa ATM en la terminal del usuario o en el centro de control del satélite	Funciones con alto consumo de potencia. Establecimiento y finalización de llamada, Control de admisión de la conexión. Funciones de ruteo y administración de llamada tales como: actualización de localización; autenticación, registro y eliminación de registro y facturación.			

Puntos críticos para el desarrollo de la arquitecturas S-ATM

Protocolos MAC, latencia y encapsulamiento

Los distintos QoS que ATM promete entregar al usuario, se ven severamente dañados por el retraso que presentan las comunicaciones satelitales, a diferencia de los enlaces terrestres en donde los retrasos son del orden de los 10ms en el caso satelital pueden llegar hasta 300 ms si consideramos un viaje redondo y la negociación y establecimiento de la conexión. Es por esto que los conmutadores a bordo deben estar equipados con buffers de gran tamaño y mecanismos de control de tráfico especializados. Este factor es especialmente relevante en las conexiones en tiempo real CBR y en las VBR que son especialmente sensibles a los retrasos y la variación en el tiempo de llegada de celda.

Otro aspecto importante es el que se refiere a los protocolos MAC, la implementación del acceso por TDMA junto con la utilización del transpondedor completo, se vuelve compleja cuando el número de terminales a ser atendida se incrementa al orden de miles, en este caso se recomienda utilizar esquemas híbridos como el MF-TDMA o TDMA con subranuras ALOHA.

Además el tamaño del paquete de datos TDMA y el transporte que se seleccionará para las celdas, es decir, un encapsulamiento de celdas ATM utilizando un transporte SONET o el envío de las celdas puras son factores que determinan la complejidad del sistema y la flexibilidad del mismo. Mientras el encapsulamiento de celdas ofrece una opción relativamente sencilla de implementar desde el punto de vista de los enlaces satelitales actuales, limita y complica las funciones ATM, especialmente las que tienen que ver con el control del tiempo de celda y la retransmisión de celdas con error. En el otro caso, algunos de los componentes del transpondedor se deben rediseñar pero a cambio obtenemos mayor flexibilidad al trabajar con esquemas ATM puros

Códigos de protección contra errores

Los códigos de corrección y/o detección de errores son un factor crítico en los sistemas ATM vía satélite por cuatro razones:

1. Los niveles de error necesarios en el enlace satelital
2. La necesidad de corregir los errores en el conmutador a bordo para evitar retransmisiones y con esto retrasos en la llegada de las celdas

3. La protección del encabezado de las celdas que contiene la dirección de destino de la celda
4. Las limitantes en potencia del satélite

En general hemos comprobado la factibilidad de lograr los niveles de error requeridos para la transmisión de celdas ATM a través del satélite, sin embargo el mejor desempeño del código, de acuerdo a los experimentos realizados se obtiene al enviar paquetes de 2 o más celdas, por otro lado sabemos que el envío de una celda a la vez es el óptimo si pensamos en la flexibilidad. En este caso se tiene que encontrar un balance entre estos dos parámetros y considerar además los bits de sobrecarga que una codificación compleja genera y su consecuente impacto en la tasa neta entregada al usuario.

Técnicas para potenciar la calidad de funcionamiento ATM por satélite

Este punto describe técnicas utilizadas para mejorar la calidad de funcionamiento de los enlaces por satélite a fin de acomodar diversas clases de servicios ATM, tales como codificación mejorada, intercalación y control de potencia adaptativo.

Reducción de CER, SECBR y CLR

Intercalación selectiva

La intercalación potencia las capacidades de corrección de errores aleatorios de un código hasta el punto que puede resultar de utilidad en un entorno de errores en ráfagas. El intercalador reordena los bits codificados a lo largo de un tramo de varias longitudes de bloque. La magnitud de la protección contra errores, basada en la longitud de ráfaga encontrada en el canal, determina la longitud de tramo del intercalador. El efecto total de intercalación es la extensión de los efectos de las largas ráfagas de manera que aparecen en el decodificador como errores de bits aleatorios independientes. La probabilidad de descartar celdas ATM por enlaces caracterizados por ráfagas de errores es de algunos órdenes de magnitud mayor que a través de enlaces con errores aleatorios debido a la capacidad de corrección de errores de un solo bit del mecanismo HEC. Por esta razón, la intercalación de bits puede utilizarse para mejorar la calidad de funcionamiento por enlaces de satélite codificados.

FEC

El poder de la FEC es que el sistema puede, sin retransmisiones, encontrar y corregir errores limitados causados por el sistema de transmisión. Se añaden símbolos de código adicionales al mensaje

transmitido para proporcionar la información necesaria de detección y corrección. Las técnicas de codificación FEC utilizadas en los sistemas de satélite incluyen códigos secuenciales, de convolución, BCH, de retícula, turbo y RS.

Control de potencia adaptativo

El control de potencia adaptativo puede utilizarse en el enlace ascendente, en el enlace descendente o en ambos, a fin de compensar el desvanecimiento debido a la lluvia.

Control de velocidad adaptativo

El control de velocidad adaptativo puede lograrse mediante una codificación adaptativa que permite lograr un caudal eficaz en un sistema de satélites conservando al mismo tiempo su recurso más importante: la potencia del satélite. El principio se basa en la aplicación de modernas técnicas de codificación de gran potencia que permiten adaptar y maximizar el flujo de datos de usuario basándose en las condiciones del enlace. Pueden utilizarse algoritmos especiales para comprobar de manera dinámica la degradación o la mejora en el comportamiento del enlace. Esta capacidad permite el desarrollo de protocolos de sistema que atribuyen más o menos caudal de datos enlace a enlace. Una forma de adaptar el caudal es controlar la velocidad de codificación, que se define como el número de bits de datos de usuario transmitidos por símbolos de canal. El símbolo de canal puede ser un símbolo MDP-4 o el periodo y/o frecuencia generalizados de una onda.

Diversidad de emplazamiento

La diversidad de emplazamiento de las estaciones en tierra permite al subsistema de tierra de un sistema de satélites contar con múltiples enlaces de comunicación geográficamente dispersos y dirigidos al subsistema espacial. Dicho subsistema puede constar de uno o más satélites que proporcionan múltiples enlaces de comunicaciones con distintos ángulos de elevación con respecto a las estaciones en tierra. La calidad de funcionamiento de cada enlace de comunicación variará según las condiciones atmosféricas y la distancia que tienen que atravesar los enlaces de comunicación, pero combinando las señales procedentes de los trayectos más favorables puede obtenerse una señal de buena calidad. Por consiguiente, el sistema de satélites puede satisfacer la disponibilidad necesaria para soportar los servicios de transporte ATM.

Sistemas ATM propuestos y en desarrollo

En los últimos 3 años se han propuesto sistemas satelitales ATM comerciales en la banda Ka, los cuales en general están basados en los lineamientos desarrollados en este trabajo. Dichos sistemas estarán en producción en pocos años.

A continuación se presenta una relación con los sistemas propuestos más importantes y sus principales características.

Sistema	País	Constelación	Tipo de Transpondedor	Tipo de conmutador a bordo	Esquema de acceso
SPACEWAY	EUA	GEO	Regenerativo	ATM	MF-TDMA
ASTROLINK	EUA	GEO	Regenerativo	ATM	MF-TDMA
CYBERSTAR	EUA	GEO & LEO	Regenerativo	Paquetes conmutados	MF-TDMA
TELEDESIC, CELESTRI	EUA	LEO(288), LEO(63)	Regenerativo	Paquetes conmutados, ATM	MF-TDMA
N-STAR	Japón	GEO	Regenerativo	ATM	TDMA
WEST	Europa	GEO y MEO	Regenerativo	ATM	MF-TDMA
EUROSKYWAY	Europa	GEO	Regenerativo	Paquetes conmutados	MF-TDMA
SKYBRIDGE	Europa	LEO(64)	Transparente	No	CDMA

Figura 6.10 Desarrollos satelitales de banda ancha ATM y No-ATM

Capítulo VII. Conclusiones

1. Las características que hacen de ATM una arquitectura con grandes posibilidades para ser utilizada en la construcción de las redes de banda ancha del futuro son:
 - 1.1. La posibilidad de manejar diferentes tipos de conexión basados en parámetros de transmisión y características de los datos, asegurando para cada uno los niveles de servicio.
 - 1.2. La posibilidad de transmitir información multimedia utilizando un transporte homogéneo
 - 1.3. La posibilidad de manejar diferentes tasas de transmisión
 - 1.4. La posibilidad de manejar diferentes protocolos de transmisión de forma aceptable.
2. La implementación completa del protocolo ATM en satélites de comunicaciones es factible bajo las siguientes condiciones:
 - 2.1. Que el satélite cuente con un conmutador ATM a bordo
 - 2.2. Que exista un método para mapear las conexiones ATM a la configuración de antena multihaz del satélite
 - 2.3. Que el mecanismo de acceso al satélite permita manejar las conexiones ATM establecidas con las estaciones terrenas
 - 2.4. Que exista una configuración adecuada de buffers para que los tiempos de retraso no afecten las conexiones establecidas
 - 2.5. Que exista un esquema de codificación de errores de tipo FEC lo suficientemente robusto para brindar un desempeño que reduzca las retransmisiones permitiendo corregir errores en el satélite.
3. Se identifican como elementos críticos para la construcción de una red satelital ATM los siguientes:
 - 3.1. La potencia disponible en el satélite que limita las funciones disponibles en el conmutador ATM, la capacidad de transmisión y la relación señal a ruido de obtenible.
 - 3.2. La configuración de las antenas satelitales que determina la flexibilidad en las áreas de cobertura, la capacidad de la transmisión y la relación señal a ruido obtenible.
 - 3.3. La adecuación del conmutador para soportar las condiciones del espacio y los cambios a los protocolos.
 - 3.4. El protocolo de acceso al satélite elegido

4. En general los satélites ATM se incorporarán como un nodo más, ya sea de tránsito o de servicio, a las redes ATM para formar arquitecturas ATM híbridas.
5. El desarrollo que tendrán los sistemas ATM vía satélite lo podemos dividir en tres fases
 - 5.1. Fase 1. Los satélites ATM compensarán la insuficiencia de enlaces terrestres de alta velocidad conectando primordialmente grandes redes regionales o nacionales distribuidas y formando nodos en el espacio para integrar redes ATM híbridas. Este escenario se caracteriza por el relativamente bajo número de estaciones de gran tamaño y de alta tasa de transmisión. Conectarán básicamente LANs y WANs corporativas de gran capacidad.
 - 5.2. Fase 2. En la fase de maduración, los satélites ATM proveerán servicio de interconexión directa al usuario final, áreas rurales, servirán como red de respaldo a las conexiones terrestres y se conectarán a otras redes de banda ancha. Los servicios típicos serán: datos, video, audio y voz.
 - 5.3. Fase 3. En la fase de globalización las redes satelitales globales proveerán servicios multimedia a usuarios finales y redes corporativas ofreciendo una conexión total a la red global y las funcionalidades completas del protocolo ATM.
6. En general, es posible obtener un desempeño similar e inclusive superior al de los sistemas de fibra óptica en los siguientes aspectos:
 - 6.1. Ancho de banda
 - 6.2. Niveles de error
 - 6.3. Número de conexiones
 - 6.4. Velocidad de instalación
 - 6.5. Cobertura
 - 6.6. Asignación de la demanda
7. El desempeño de una red ATM satelital comparado a una red terrestre en lo que se refiere a tiempos de retraso, establecimiento y monitoreo de la conexión y garantía de los niveles de servicio debe ser objeto de más estudio, pero se infiere que será menor.
8. Los tópicos que deben ser objeto de un estudio posterior son:
 - 8.1. La configuración de los buffers en el conmutador
 - 8.2. La posibilidad de que transmitir a través de ATM paquetes TCP/IP y en general tráfico de Internet

-
- 8.3. Los esquemas de retransmisión y de eliminación de celdas en el satélite
 - 8.4. El enlace satelital y los efectos ocasionados por la lluvia
 - 8.5. La configuración de la antena del satélite
9. Los satélites ATM serán uno de los elementos más importantes en las redes de banda ancha del futuro y se integrarán de forma transparente con los sistemas ATM terrestres para proveer conectividad tipo Gateway y de usuario final, agrupados en constelaciones con conmutación intersatelital ya que sus características les otorgan ventajas sobre las redes terrestres que los hacen elementos esenciales.
 10. La arquitectura ATM satelital representa una posibilidad real para resolver la problemática de acceso a transmisiones de banda ancha del futuro por encima de otras arquitecturas debido principalmente a las características del protocolo ATM y a los avances de la tecnología satelital disponibles.

Bibliografía

Libros

Tanenbaum, Andrew S.

Computer Networks

Prentice Hall, EUA, 1996, 3 ed.

Pritchard, Wilbur L.

Satellite Communication Systems Engineering

Prentice Hall, EUA, 1993 2 ed.

Goralski, Walter J.

Introduction to ATM Networking

McGraw Hill, EUA, 1995

Sklar, Bernard

Digital Communications.Fundamentals and applications

Prentice Hall, EUA, 1988, 3 ed.

Gagliardi, Robert

Satellite Communications

Lifetime Learning Publications, EUA, 1983

Artículos

Mertzanis, Ioannis, Et al.

Protocol Architecture for Satellite ATM Broadband Networks

IEEE Communications Magazine, V.37, No.3,EUA, Marzo 1999

Hassan Peyravi

Medium Access Control Protocols Performance in Satellite Communications

IEEE Communications Magazine, V.37, No.3, EUA, Marzo 1999

Linsky, Stuart, Et al.

Processing Payload Considerations for Broadband Satellite Systems

Proceedings of the 3rd Ka band Utilization Conference, Italia,1997

Cuevas, Enrique G.

The Development of Performance and Availability Standards for Satellite ATM Networks

IEEE Communications Magazine, EUA, Julio 1999.

Gilderson, Jim

Onboard Switching for ATM via Satellite

IEEE Communications Magazine, EUA, Julio 1997

Hamouda, Walaa A. et al

Performance of ATM Cell Transmission Via Regenerative Satellite Links

Conference record of IEEE International Conference on Communications, 1998

Kadowaki, N.

Regenerative ATM Switching Subsystem on-board Experimental Gigabit Communications Satellite

Proceedings of the 3rd Ka band Utilization Conference, Italia,1997

Bouin, J; Buret, I.

ANIS: ATM Node in the Sky

Proceedings of the 3rd Ka band Utilization Conference, Italia,1997

Hwang, Yeongming.

Satellite Antennas

Proceedings of the IEEE ,V.80, No.1, USA, Enero 1992

ITU Recommendations

Performance for broadband integrated services digital network asynchronous transfer mode via satellite

S.1420, Suiza, Marzo 2000

Recursos WWW

IEE/IEEE Electronic Library Online

<http://iel.ihs.com/>

International Telecommunications Union

<http://www.itu.int/>

Alles, Anthony

The Next Generation ATM Switch

<http://www.cisco.com>, EUA, agosto 2000.

ATM Forum

<http://www.atmforum.com>

3 COM Networking

<http://3com.com>