



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

ATM SOBRE REDES SATELITALES COMO PARTE DE LA INFRAESTRUCTURA DE RED GLOBAL

Freddy Enrique Ochoa Acosta

Asesorado por el Ph.D. Ing. Edmundo Enrique Ruiz Carballo

Guatemala, marzo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ATM SOBRE REDES SATELITALES COMO PARTE
DE LA INFRAESTRUCTURA DE RED GLOBAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

FREDDY ENRIQUE OCHOA ACOSTA

ASESORADO POR EL Ph.D. ING. EDMUNDO ENRIQUE RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, MARZO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

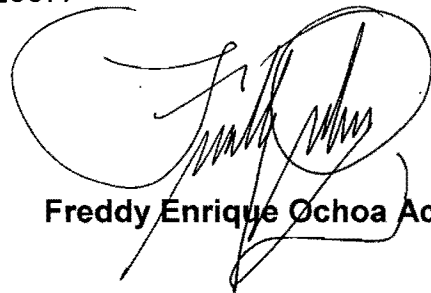
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. María Magdalena Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ATM SOBRE REDES SATELITALES COMO PARTE DE LA INFRAESTRUCTURA DE RED GLOBAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 23 agosto de 2007.



Freddy Enrique Ochoa Acosta

Guatemala, 26 de enero del 2012

Ingeniero
Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Ciudad

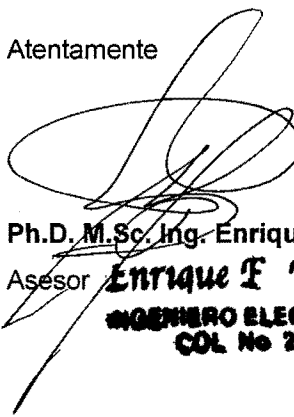
Estimado Ing. Guzmán,

Por este medio hago constar que en mi calidad de asesor, he revisado el trabajo de tesis titulado **“ATM sobre redes satelitales como parte de la infraestructura de red global”**, elaborado por el estudiante Freddy Enrique Ochoa Acosta, y después de revisarlo, considero que este trabajo cumple con los objetivos propuestos.

Por lo tanto, el autor de esta tesis y yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Sin otro en particular agradezco su atención a la presente, me suscribo.

Atentamente



Ph.D. M.Sc. Ing. Enrique Ruiz Carballo

Asesor **Enrique F Ruiz C.**

**INGENIERO ELECTRICIST-
COL No 7224**



Ref. EIME 28. 2012
Guatemala, 22 de JUNIO 2012.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

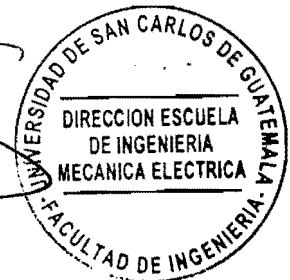
Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**“ATM SOBRE REDES SATELITALES COMO PARTE DE LA
INFRAESTRUCTURA DE RED GLOBAL”**, del estudiante Freddy
Enrique Ochoa Acosta, que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



CEGS/sto



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 41.2012.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Freddy Enrique Ochoa Acosta titulado: "ATM SOBRE REDES SATELITALES COMO PARTE DE LA INFRAESTRUCTURA DE RED GLOBAL", procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 25 DE JULIO 2012.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ATM SOBRE REDES SATELITALES COMO PARTE DE LA INFRAESTRUCTURA DE RED GLOBAL**, presentado por el estudiante universitario Freddy Enrique Ochoa Acosta, autoriza la impresión del mismo.

IMPRIMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, marzo de 2013



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Mis hijas	Luisa Fernanda y María José, luceros en mi vida y motivo suficiente para ser mejor cada día.
Mi esposa	Madeleine, por su paciencia, apoyo y consejo amoroso.
Mi hermano	Miguel Alejandro, por compartir este logro, mi amor fraternal y respeto.
Mis abuelos	Enrique y Amada (q.e.p.d), preciados tesoros de mi niñez y juventud.
La Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos científicos y técnicos, para poder enfrentar los retos profesionales en mi carrera.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por otorgarme el honor de formar parte del grupo de profesionales egresados de tan respetada casa de estudios.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por darme la oportunidad y la sabiduría para poder culminar mi carrera.
- Mi madre** Ileana Acosta, por sacrificarse para convertirme en un hombre de bien. Por impulsarme día a día a seguir caminando y perseverar en mi desarrollo personal y profesional.
- Mi padre** Rolando Morales, por su apoyo incondicional en todo emprendimiento, en mis estudios y en mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
GLOSARIO	XIX
RESUMEN.....	XLVII
OBJETIVOS.....	XLIX
INTRODUCCIÓN.....	LI
1. ÓRBITAS SATELITALES Y CONCEPTOS DE CONECTIVIDAD.....	1
1.1. Leyes de la Física.....	1
1.1.1. Leyes de Kepler.....	1
1.1.2. Las tres leyes de movimiento y la ley universal de la gravedad de Newton.....	2
1.2. Parámetros de la órbita satelital	3
1.2.1. Eje semimayor (a)	3
1.2.2. Excentricidad (e)	3
1.2.3. Inclinación de la órbita (i).....	4
1.2.4. Ascensión recta del nodo y el argumento del perigeo.....	5
1.3. Órbitas satelitales	6
1.3.1. Órbitas geosincrónicas	7
1.3.2. Órbitas geoestacionarias	7
1.3.3. Órbita elíptica alta.....	8
1.3.4. Órbita satelital baja.....	9
1.3.5. Perturbaciones en la órbita.....	10
1.3.6. Altitud satelital y cobertura.....	11

1.3.7.	Ganancia de una antena y ancho de haz.....	12
1.3.8.	Cálculos en la cobertura.....	13
1.3.9.	Distancia y retardo de propagación entre la estación terrestre y el satélite.....	15
1.4.	Características de los enlaces satelitales y modulaciones para la transmisión.....	17
1.4.1.	Características de los enlaces satelitales.....	17
1.4.2.	Técnicas de modulación.....	19
1.4.3.	Esquemas de modulación por desplazamiento de fase PSK para transmisiones satelitales	21
1.4.4.	Esquema de modulación por desplazamiento de fase binario BPSK	22
1.4.5.	Esquema de modulación por desplazamiento de fase en cuadratura QPSK	23
1.4.6.	Esquema de modulación por desplazamiento mínimo de fase con filtrado Gaussiano GMSK.....	24
1.4.7.	Rata de errores de <i>bit</i>	25
1.4.8.	Esquema de red satelital en la capa física	27
1.5.	Corrección de errores en adelante.....	29
1.5.1.	Código de bloques lineal	30
1.5.2.	Códigos cíclicos	31
1.5.3.	Codificación Trellis y códigos convolucionales.....	32
1.5.4.	Códigos concatenados.....	33
1.5.5.	Códigos turbo	34
1.5.6.	Desempeño de los códigos FEC	35
1.6.	Técnicas de acceso múltiple	35
1.6.1.	Acceso múltiple por división de frecuencia FDMA	36
1.6.2.	Acceso múltiple por división de tiempo TDMA	36

	1.6.3.	Acceso múltiple por división de códigos CDMA....	38
1.7.		Asignación de ancho de banda	39
	1.7.1.	Asignación fija de acceso	41
	1.7.2.	Asignación por demanda.....	41
	1.7.3.	Acceso aleatorio	42
1.8.		Cuestiones referentes a las redes satelitales	43
	1.8.1.	Conexiones satelitales de un solo salto.....	43
	1.8.2.	Conexiones satelitales de múltiples saltos	44
	1.8.3.	Enlaces intersatelitales.....	45
	1.8.4.	Handover	47
	1.8.5.	Trasposos satelitales intrahaz e interhaz.....	49
	1.8.6.	Comparación entre la cobertura fija terrestre y la cobertura fija satelital.....	51
	1.8.7.	Enrutamiento dentro de las constelaciones de redes satelitales.....	53
	1.8.8.	Interconexión	55
	1.8.9.	Disponibilidad y diversidad de los satélites.....	56
2.		MODO ASÍNCRONO DE TRANSFERENCIA (ATM)	59
2.1.		Conceptos fundamentales del protocolo ATM.....	59
	2.1.1.	Retardo de paquetización.....	60
	2.1.2.	Retardo de cola	61
2.2.		Capa ATM	62
	2.2.1.	El campo GFC	62
	2.2.2.	Los campos VPI y VCI.....	63
	2.2.3.	El campo CLP.....	67
	2.2.4.	El campo PT	67
	2.2.5.	El campo HEC	67
2.3.		Capa de adaptación ATM.....	68

2.3.1.	AAL1 para la clase A.....	70
2.3.2.	AAL2 para la clase B.....	73
2.3.3.	AAL3/4 para las clases C y D.....	73
2.3.4.	AAL5 para el protocolo de internet.....	74
2.4.	La capa física	75
2.4.1.	Las subcapas del medio físico	76
2.4.2.	La subcapa de convergencia de transmisión	76
2.4.3.	Transmisión de celdas ATM.....	78
2.4.4.	ATM sobre jerarquía digital síncrona SDH	78
2.4.5.	ATM sobre DS1	80
2.4.6.	ATM sobre un enlace E1	81
2.5.	Interfaces ATM y conectividad	82
2.5.1.	Acceso a la red	82
2.5.2.	Interconexiones de nodo de red.....	84
2.5.3.	ATM DXI.....	85
2.5.4.	B-ICI	86
2.5.5.	Señalización ATM	86
2.5.6.	Direccionamiento ATM	87
2.5.7.	Registro de direcciones.....	89
2.6.	Tráfico de la red, calidad de servicio QoS y consideraciones de desempeño	90
2.6.1.	Descriptores de tráfico	91
2.6.2.	Parámetros de la calidad de servicio (QoS)	92
2.6.3.	Consideraciones de desempeño.....	93
2.7.	Administración de recursos de la red	94
2.7.1.	Control de admisión de conexiones (CAC)	95
2.7.2.	UPC y NPC	95
2.7.3.	Control de prioridad y control de congestión	96
2.7.4.	Modelado del tráfico	97

2.7.5.	Algoritmo genérico de la tasa de celdas	98
2.7.6.	Algoritmo del bote con fuga LBA	99
2.7.7.	Algoritmo de calendarización virtual VSA.....	101
2.8.	Protocolos de internet.....	102
2.8.1.	Conceptos básicos	103
2.8.2.	Jerarquías de protocolos	104
2.8.3.	Capa de red sin conexión	105
2.8.4.	El formato del paquete IP	106
2.8.5.	Direcciones IP	108
2.8.6.	Mapeo entre las direcciones de internet y las direcciones físicas	110
2.8.7.	ARP y RARP	111
2.8.8.	Protocolos de enrutamiento de internet.....	111
2.8.9.	El protocolo de enrutamiento de <i>gateway</i> interior (IGPR)	112
2.8.10.	El protocolo exterior de enrutamiento de <i>gateway</i> (EGRP).....	113
2.9.	Protocolos de capa de transporte: TCP y UDP	114
2.9.1.	Protocolo de transmisión TCP	114
2.9.2.	El formato del encabezado de TCP.....	114
2.9.3.	Establecimiento de conexiones y transmisión de datos.....	117
2.9.4.	Congestión y control de flujo	119
2.9.5.	Protocolo de datagrama de usuario UDP	122
2.10.	Conectividad entre IP y ATM.....	123
2.10.1.	Emulación de LAN.....	124
2.10.2.	Componentes LANE	127
2.10.3.	Comunicaciones de entidades LANE	128
2.10.4.	IP clásico sobre ATM.....	129

2.10.5.	Encapsulación de paquetes	130
2.10.6.	Resolución de direcciones IP sobre ATM.....	132
3.	CONECTIVIDAD SATELITAL CON REDES TERRESTRES.....	135
3.1.	Conceptos de conectividad	135
3.2.	Conexiones y elementos de las redes	137
3.2.1.	Terminales de red	137
3.2.2.	Nodos de red.....	138
3.2.3.	Conexiones de red	138
3.2.4.	Conexiones punto a punto	139
3.2.5.	Configuraciones de referencia	140
3.3.	Señalización y tráfico de redes	142
3.3.1.	Tráfico de usuario y servicios de red.....	142
3.3.2.	Sistemas de señalización de tráfico	144
3.3.3.	Señalización en banda.....	144
3.3.4.	Señalización fuera de banda.....	146
3.3.5.	Señalización de canal asociada y no asociada ...	146
3.4.	Red de transmisión de acceso y tránsito	147
3.4.1.	Redes de telefonía análoga.	147
3.4.2.	Conceptos de ingeniería de tráfico en redes de telefonía	148
3.4.3.	Acceso a redes satelitales en el dominio de la frecuencia.....	151
3.4.4.	Circuito de conmutación a bordo.....	152
3.5.	Redes de telefonía digital.....	154
3.5.1.	Jerarquía digital multiplexada.....	154
3.5.2.	Transmisión digital satelital y conmutación a bordo	155
3.5.3.	Jerarquía digital plesiócrons	156

3.5.4.	Limitaciones de PDH	157
3.6.	Jerarquía digital síncrona (SDH)	159
3.6.1.	Desarrollo de SDH.....	160
3.6.2.	Los estándares SDH.....	161
3.6.3.	Los beneficios de SDH	161
3.6.4.	Operación síncrona	163
3.7.	Redes digitales de servicio integrados (ISDN)	167
3.7.1.	Interfaz de tasa básica (BRI)	168
3.7.2.	Interfaz de tasa primaria (PRI).....	170
3.7.3.	Capa física ISDN (Capa 1)	171
3.7.4.	Capa de enlace ISDN (Capa 2)	173
3.7.5.	Capa de red ISDN (Capa 3)	174
3.8.	ISDN sobre enlaces satélite	175
3.8.1.	Conexión ISDN de referencia hipotética.....	176
3.8.2.	La ruta de referencia digital para satélite.....	176
3.8.3.	Escenarios de interconexión de redes satelitales a redes ISDN	178
3.8.4.	Plan de ruteo	180
4.	ATM SOBRE REDES SATELITALES	185
4.1.	Antecedentes	185
4.1.1.	Conectividad.....	185
4.1.2.	Los servicios satelitales en las redes B-ISDN	187
4.2.	Diseño de sistemas satelitales ATM.....	189
4.2.1.	Retardo de propagación	189
4.2.2.	Restricciones y atenuación.....	192
4.3.	Arquitectura de una red ATM con sistema satelital GEO	194
4.3.1.	El segmento terrestre	194
4.3.2.	El segmento espacial.....	196

4.3.3.	Administración de los recursos de ancho de banda satelitales	197
4.3.4.	Control de admisión de conexión	199
4.3.5.	Funciones de políticas de red	200
4.3.6.	Control de congestión reactivo	201
4.4.	Redes satelitales ATM avanzadas	202
4.4.1.	Capa de acceso de radio	203
4.4.2.	Características del procesamiento a bordo (OBP)	204
4.4.3.	El conmutador ATM a bordo	205
4.4.4.	Satélites multihaz	209
4.4.5.	Constelaciones satelitales LEO/MEO.....	210
4.4.6.	Enlaces intersatelitales.....	211
4.4.7.	ATM Móvil	212
4.4.8.	Uso del espectro de alta frecuencia	213
4.5.	Desempeño del protocolo ATM.....	214
4.5.1.	Modelo de capas de desempeño para B-ISDN ...	214
4.5.2.	Parámetros de desempeño de ATM.....	215
4.5.3.	Impacto de los errores de ráfaga en los satélites en la capa ATM	217
4.5.4.	Impacto de errores de ráfaga en protocolos AAL	220
4.5.5.	Mecanismos de control de error	222
4.5.6.	Técnicas para el mejoramiento de las redes satelitales ATM.....	223
4.6.	Evolución de los sistemas satelitales ATM	227

5.	REDES DE PRÓXIMA GENERACIÓN	231
5.1.	Definición de multiprotocolo de conmutación de etiquetas (MPLS)	231
5.1.1.	Beneficios de MPLS	232
5.1.2.	La utilización de una estructura de red unificada.	233
5.1.3.	Mejor integración de IP sobre ATM	235
5.1.4.	Núcleo sin protocolo BGP.....	236
5.1.5.	Modelo VPN <i>Peer-to-peer</i> contra el Modelo VPN de capas.....	238
5.1.5.1.	Modelo de VPN en capas.....	239
5.1.5.2.	Modelo VPN <i>peer-to-peer</i>	240
5.1.6.	Flujo óptimo de tráfico.	243
5.1.7.	Ingeniería de tráfico	244
5.2.	Arquitectura MPLS	247
5.2.1.	Etiquetas MPLS	247
5.2.2.	Apilamiento de etiquetas	248
5.2.3.	Codificación de MPLS	249
5.2.4.	MPLS y el modelo de referencia OSI	251
5.2.5.	Enrutador de conmutación de etiquetas (LSR)...	252
5.2.6.	Ruta de etiquetas conmutadas	254
5.2.7.	Transmitiendo clases equivalentes (FEC)	255
5.2.8.	Distribución de etiquetas.	258
5.2.8.1.	Transportar las etiquetas en un protocolo de ruteo IP	259
5.2.8.2.	Protocolo de distribución de etiquetas por separado.....	260
5.2.9.	Distribución de etiquetas con LDP.....	261

5.2.10.	Instancia base de transmisión de etiquetas	
	LFIB.....	264
5.2.11.	Carga de información de MPLS	264
5.2.12.	Espacio de etiquetas MPLS	265
5.2.13.	Diferentes modos MPLS	267
5.2.13.1.	Modo de distribución de etiquetas	267
5.2.13.2.	Modo de retención de etiquetas	268
5.2.13.3.	Modo de control LSP	269
5.3.	Redes privadas virtuales (VPN) con MPLS.....	270
5.3.1.	Definición de VPN	271
5.3.2.	Modelos VPN	271
5.3.3.	Modelo MPLS VPN	272
5.4.	Arquitectura de las VPN	275
5.4.1.	Transmisión / enrutamiento virtual	276
5.4.2.	Reconocedor de rutas RD.....	277
5.4.3.	Rutas destino RT.....	278
5.4.4.	Propagación de rutas VPNv4	279
5.4.5.	Transmisión de paquetes en una VPN.....	282
5.5.	Protocolo de compuerta de frontera.....	284
5.6.	El futuro de MPLS	285
CONCLUSIONES.....		287
RECOMENDACIONES.....		291
BIBLIOGRAFÍA.....		293

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Órbita con eje mayor en (AB) y eje semimayor en (AO)	4
2.	Inclinación de la órbita con (i), $i = 0$ y $(0 < i < 90^0)$	5
3.	Ascensión recta del nodo (Ω) $(0 < \Omega < 360^0)$	5
4.	Argumento del perigeo (ω) $(0 < \omega < 360^0)$	6
5.	Órbita elíptica típica	8
6.	Relación entre cobertura y distancia	9
7.	Patrón de radiación de una antena	13
8.	Relación entre el ángulo de elevación y la altitud	13
9.	Distancia entre la estación terrena y el satélite	16
10.	Representación geométrica del esquema BPSK	22
11.	Representación geométrica del esquema QPSK.....	23
12.	Desempeño del ruido en los esquemas de modulación.....	27
13.	Diagrama de bloques de las funciones de la capa física de un enlace satelital	28
14.	Codificación de corrección errores en adelanto	29
15.	Diagrama de bloques del codificador turbo.....	34
16.	Diagrama de bloques del decodificador turbo.....	34
17.	Esquema satelital de TDMA.....	38
18.	Topología de un salto.....	44
19.	Topología de saltos múltiples con un repetidor al centro	45
20.	Redes satelitales con enlaces intersatelitales.....	46
21.	Conceptos de traspaso intersatelital y traspaso intrasatelital.....	48

22.	Constelaciones satelitales de cobertura terrestre fija y cobertura satelital fija	51
23.	Celda ATM.....	59
24.	Formato de encabezado de celda ATM en el UNI y NNI	63
25.	Enrutamiento en un conmutador ATM	64
26.	Concepto de rutas virtuales (VP - <i>Virtual Path</i>) y canales virtuales (VC - <i>Virtual Channel</i>) en la capa física	65
27.	Ejemplo de conmutación de rutas virtuales	66
28.	Ejemplo de conmutación de VC y VP	66
29.	Formato del paquete AAL1 para la clase A	70
30.	Método del reloj adaptivo.....	71
31.	Formato de paquete AAL2 para la clase B	73
32.	Formato del paquete AAL3/4 para las clases C & D.....	74
33.	Formato AAL5 para protocolo internet.....	75
34.	Paquete SDH STM-1	79
35.	Estructura de la trama DS1 de 1,544 Mbit/s	81
36.	Configuración de referencia B-ISDN.....	83
37.	Interconexión de las interfaces de los nodos de red ATM	85
38.	Formato de direcciones ATM.....	88
39.	Algoritmo de rango de celda genérica (GCRA).....	98
40.	Algoritmo del “bote con fuga” (LBA).....	99
41.	Bajo tráfico ingresando al LBA – GCRA (1.5, 0.5)	100
42.	Algoritmo de calendarización virtual (VSA).....	102
43.	Formato del encabezado del paquete IP	108
44.	Formato de direcciones IP	109
45.	Encabezado del paquete TCP.....	117
46.	Encabezado del paquete UDP	122
47.	<i>Stack</i> de protocolos para emulación LAN e IP clásico sobre ATM ..	124
48.	Configuración básica de redes de acceso y tránsito.....	141











49.	Relación entre las funciones de usuario, señalización y administración	143
50.	Conexiones e interfaces de red.....	143
51.	Señalización “en banda” y señalización “fuera de banda”	145
52.	Conmutación con circuitos a bordo (<i>On Board Switching</i>)	153
53.	Multiplexación de tráfico y requerimientos de capacidad de los enlaces satelitales.....	156
54.	Jerarquía digital plesiosíncrona (PDH) estándar europeo.....	157
55.	Multiplexación y demultiplexación para insertar un nodo en una red PDH	158
56.	Función “ <i>Add</i> ” y “ <i>Drop</i> ” para insertar un nodo en una red SDH	160
57.	Trama STM-1 de una red SDH	162
58.	Sección de sobre encabezado (<i>Section Overhead SOH</i>) de la trama STM-1	166
59.	Características básicas de una red ISDN	169
60.	ISDN de banda angosta (N-ISDN), puntos de referencia y grupos funcionales	170
61.	Formato de la trama en los puntos de referencia T y S	172
62.	Estructura de la trama de capa 2 LAP-D.....	174
63.	Ilustración de señalización ISDN de capa 3.....	175
64.	Ruta digital hipotética de referencia (HRDP).....	177
65.	HRDP en ITU-T IRX a 64 Kbit/s	177
66.	Nodo simple ISDN distribuido en una red cliente	179
67.	Múltiples nodos ISDN distribuidos en red cliente	180
68.	Concepto de enrutamiento y conmutación en redes de telecomunicaciones.....	181
69.	Acceso de usuarios vía satélite a redes ATM	188
70.	Modo tránsito vía satélite a redes ATM.....	188
71.	Segmentos de módulos terrestres	196

72.	Formato de trama TDMA (estación terrena a satélite)	198
73.	Administración de recursos satelitales.....	199
74.	Satélite con conmutación ATM a bordo	206
75.	Satélite multihaz	209
76.	Red MPLS sin protocolo BGP.....	237
77.	Red privada virtual MPLS con VRF	242
78.	Modelo de red virtual privada MPLS “Peer to Peer”	242
79.	Red ATM parcialmente en malla.....	244
80.	Ingeniería de tráfico por enlaces disponibles.....	245
81.	Ingeniería de tráfico cambiando métricas de enrutamiento	246
82.	Sintaxis de una etiqueta MPLS.....	247
83.	Pila de etiquetas	249
84.	Encapsulación	250
85.	Modelo OSI.....	252
86.	Rutas de etiquetas conmutadas	254
87.	LSP anidado	255
88.	Red MPLS con enrutadores exteriores LSR corriendo BGP interno.....	257
89.	IP V4 sobre MPLS corriendo LDP	263
90.	IP V4 en una red MPLS corriendo LDP. Conmutación de paquetes	263
91.	Espacio de etiqueta por interfaz	266
92.	Espacio de etiqueta por plataforma	267
93.	Esquema de una red VPN MPLS	272
94.	Modelo de VPN MPLS	275
95.	VRF sobre enrutadores de frontera del proveedor.	276
96.	Propagación de rutas en una red VPN MPLS.....	280
97.	Propagación de rutas CE a CE en una red VPN MPLS.....	281
98.	Transmisión de paquetes en una red VPN MPLS	284

TABLAS

I.	Resumen de fórmulas para el cálculo de la tasa de error de <i>bit</i> de diferentes esquemas de modulación digital	26
II.	Códigos de chequeo cíclico de redundancia (CRC).....	31
III.	Comparación entre FDMA, TDMA y CDMA	40
IV.	Jerarquía de las capas del protocolo ATM.....	60
V.	Tabla de conexión/enrutamiento de un conmutador ATM.....	64
VI.	Clases de servicios y sus atributos	69
VII.	Campos de opciones del encabezado del paquete IPv4	108
VIII.	Valores de Identificador para el protocolo MPLS para tipos de encapsulamiento de capa 2	251

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
	Antena
	Bloque de funcionamiento
	Concentrador de terminales
	Conmutador (<i>switch</i>)
	Enlace satelital
	Enrutador (<i>router</i>)
	Flujo de datos
	Representación general de una red. Aplica para una red LAN, MAN, WAN, PSTN e Internet
	Satélite
	Terminal de usuario

GLOSARIO

ABR	<i>Available Bit Rate</i> . Definido por el ATM Fórum provee transporte del tráfico a una tasa de <i>bit</i> disponible y de forma dinámica.
ADPCM	<i>Adaptive Differential Pulse Code Modulation</i> . Método de codificación de voz que utiliza menos <i>bits</i> que el tradicional PCM (<i>Pulse Code Modulation</i>).
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i> . ADSL está diseñada para permitir una mayor velocidad de descarga y una menor velocidad de carga. ADSL es utilizada para acceso a internet, correo electrónico y mensajería instantánea.
Algoritmo	Un conjunto finito de reglas o procesos definidos para la solución de un problema en un número finito de pasos.
AM	Amplitud modulada. Es un método para añadir información a una señal electrónica en la cual la señal es modificada en su amplitud para imponer señal en ella.
Antena	Es un dispositivo utilizado para transmitir, recibir. Es la parte más importante de un sistema de radio.

Antena Isotrópica	Antena hipotética que radia uniformemente en todas direcciones y que sirve como referencia para la medición de la ganancia de las antenas.
Apogeo	Es el punto en la órbita de un satélite en el que se encuentra a la mayor distancia del centro del campo gravitacional de la tierra.
AppleTalk	Protocolo propiedad de Apple Computer's para interconectar computadoras y periféricos Macintosh.
ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit.</i> Circuito integrado diseñado específicamente para aplicaciones a la medida.
ATM Fórum	Organización de la industria con alrededor de 800 miembros, la cual se enfoca en el desarrollo, estandarización e implementación de productos ATM (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>).
Backbone	Es la parte de una red de comunicaciones que porta la mayor cantidad de tráfico. También tiene como función unir redes entre sí.
Bandwidth	Ancho de banda. Es el ancho de banda del canal de comunicación, siendo este la diferencia entre la frecuencia superior e inferior medida en Hertz.

B-ICI	<i>B-ISDN Inter-Carrier Interface.</i> Especificación definida por el ATM Fórum para las interfaces de redes ATM públicas para soportar servicios a usuarios a través de múltiples proveedores.
BIP-8	<i>Bit Interleaved Parity 8.</i> Método de monitoreo de error utilizado en sistemas de transmisión de fibra óptica como SONET.
B-ISDN	Norma que fue concebida para su uso con aplicaciones avanzadas. SDH / SONET y ATM; nacieron fuera de la norma ISDN de banda ancha.
Bit	Es una contracción del término <i>Binary digit</i> (dígito binario). Es la unidad de información más pequeña que una computadora puede procesar.
Bridge	Un <i>bridge</i> es un dispositivo de comunicaciones que conecta dos o más segmentos de red y que pasa paquetes entre ellos. Tales <i>bridges</i> operan en la capa 1 (capa física) del modelo de referencia OSI. También pueden trabajar en la capa 2 (capa de enlace) del modelo OSI conectando redes dispares.
Broadcast	Enviar información a dos o más dispositivos receptores simultáneamente sobre una red de comunicaciones o sistema satelital.

Buffer	En transmisión de datos, un <i>buffer</i> es un almacenamiento temporal de información enviada o recibida. Se utiliza también con propósitos de control de flujo.
Byte	Un conjunto de <i>bits</i> (unos y ceros) de una longitud específica, representando un valor en el esquema de codificación de una computadora.
Canal	Ruta lógica de una conversación. Es la banda de frecuencia, ranura de tiempo o longitud de onda sobre la cual una conversación dada fluye.
Capa de red	La tercera capa del modelo OSI de comunicaciones de datos, a veces llamada la capa de paquetes. Consiste en dirigir los mensajes de datos a través de la red en rutas alternativas.
Carrier	Empresa de servicios que provee circuitos de comunicación.
Cell	Celda. Unidad de transmisión en ATM que consiste en un paquete de tamaño fijo de 53 octetos.
Cell Relay	Es un término genérico para un protocolo basado en pequeños paquetes de tamaño fijo capaz de soportar vídeo, voz y datos a velocidades muy altas.

Cobertura	Área en la cual el servicio se encuentra disponible a los usuarios de un servicio.
Codec	Codificador decodificador. Convierte la señal análoga de voz en señales digitales aceptables para sistemas de transmisión digital. Luego convierte esas señales digitales a señales análogas para ser escuchadas en el auricular.
Codificación	Proceso por el cual la información se codifica en símbolos digitales en el transmisor y se decodifican en el receptor para maximizar la precisión de la información presentada al usuario.
Constelación	El conjunto de satélites en una órbita LEO (de órbita terrestre baja) o MEO (órbita terrestre media).
Convergencia	El punto en el cual todos los dispositivos de red interconectados comparten información en común de las rutas óptimas del tráfico. Entre más rápida sea la convergencia, más rápido se recobra de una falla de red.
CPU	<i>Central Process Unit.</i> El componente de una computadora que ejecuta la lógica computacional y las funciones de decisión.
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check.</i> Proceso por el cual se verifica la integridad de un bloque de datos.

Cuantización	Conversión de una señal análoga en un formato digital a través de muestreo y codificación en valores discretos de la amplitud de la señal.
Datagrama	Mensaje de longitud máxima fija, enviado sin verificación alguna que asegure su exactitud, envío o secuencia correcta respecto de los mensajes relacionados, que lleva la dirección completa de destino utilizada para el enrutamiento.
DCME	<i>Digital circuit multiplication equipment.</i> Es un equipo de compresión capaz de manejar voz, datos y señales de fax. Este equipo se utiliza como un medio para aumentar la capacidad de los sistemas de transmisión digital.
Decibel	Unidad de medida de la potencia del sonido o de la fuerza de una señal, generalmente expresado como la relación entre la señal transmitida y una fuente de señal de referencia. El decibel fue inventado para medir el nivel de ganancia o pérdida en los sistemas de transmisión de telefonía.
DECnet	Grupo de productos de comunicaciones (incluyendo un conjunto de protocolos) desarrollado y soportado por Digital Equipment Corporation.
Demodulación	El proceso de recuperación de una señal eléctrica a partir de una señal portadora u onda.

DQDB	<i>Distributed Queue Dual Bus</i> . Técnica de acceso de la red de área metropolitana (MAN), definido por el estándar IEEE 802.6 para el servicio de datos conmutados <i>Multimegabit</i> (SMDS).
Drivers	Un <i>driver</i> (<i>software</i>) proporciona instrucciones para cambiar el formato o la interpretación de los comandos de <i>software</i> para la transferencia desde y hacia dispositivos periféricos y la unidad de procesamiento central (CPU).
DSI	Técnica de compresión para concentrar más conversaciones de voz en una línea. DSI digitaliza la voz de manera que no se transmiten <i>bits</i> cuando no se está hablando. Tan pronto como el habla comienza, los <i>bits</i> fluyen de nuevo.
E.164	Estándar de la ITU-T en la que se normaliza que el número máximo de dígitos para números internacionales, servicios globales, redes y grupos de aplicaciones; debe ser de 15 dígitos (excluyendo el prefijo internacional).
Emulador	Dispositivo o programa de ordenador que puede actuar como si se tratara de otro dispositivo o programa.
Encriptación	Es el uso de un algoritmo para ocultar el significado de una pieza de información.

<i>End-to-end</i>	Conexión entre el sistema origen y el sistema destino.
Erlang	Medida de tráfico telefónico. Un Erlang es el uso de un circuito de comunicación durante una hora.
<i>Ethernet</i>	Red de área local (LAN), norma oficialmente conocida como IEEE 802.3 y que opera a través del cable par trenzado y por cable coaxial a velocidades a partir de 10 Mbps.
<i>Extranet</i>	Red entre organizaciones asociadas.
FDDI	<i>Fiber Distributed Data Interface</i> . FDDI es un estándar ANSI (X3T12) para una red de fibra óptica de 100 Mbps utilizando una topología de anillo doble, con una técnica de paso de <i>token</i> para el control de acceso al medio.
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i> . Técnica en que el ancho de banda disponible de un circuito es dividido por frecuencias en bandas más estrechas, cada una utilizada para separar voz de los datos.
Fibra óptica	Tecnología en la que la luz se utiliza para transportar información de un punto a otro. La fibra óptica consiste en filamentos finos de vidrio a través del cual los rayos de luz se transmiten a través de largas distancias, llevando grandes cantidades de datos.

FM	Frecuencia modulada. Técnica de modulación en la cual la frecuencia de la señal portadora es desplazada por una cantidad proporcional a la de la señal moduladora que contiene la información a transmitir.
Fotón	Es una partícula de luz. Durante cientos de años se pensó en la luz como una onda. En 1905, Einstein descubrió que bajo ciertas circunstancias, la energía de una onda de luz solo se producía en cantidades específicas o cuantos llamados fotones.
Frame	Un <i>frame</i> es un paquete. Es un término genérico específico para una serie de protocolos de comunicaciones de datos. Un <i>frame</i> de datos es una unidad lógica de datos, que normalmente es un fragmento de un conjunto mucho mayor de datos.
Frame Relay	Estándar de acceso definido por el UIT-T en la Recomendación I.122. Servicios <i>Frame Relay</i> son aquellos proporcionados por las compañías de telecomunicaciones, empleando una forma de conmutación de paquetes similar a una versión simplificada de redes X.25. Los paquetes son en forma de " <i>frames</i> ", que son de longitud variable.
Full duplex	Proceso de funcionamiento de un circuito, de modo que los extremos pueden transmitir y recibir simultáneamente.

Gateway	Puerta de enlace. Un <i>gateway</i> es un dispositivo repetidor electrónico que intercepta y dirige las señales eléctricas de una red a otra. En redes de datos, usualmente ejecutan procesos de conversión de código y protocolos. De acuerdo con el modelo OSI, un <i>gateway</i> es un dispositivo que provee servicio a las 7 capas del modelo.
GPS	Constelación de 24 satélites en órbita que permite determinar la posición en cualquier lugar de la Tierra con una precisión de un metro.
Handshake	La serie de señales entre un ordenador y otros dispositivos periféricos que establecen los parámetros necesarios para transferir datos.
HDLC	<i>High level Data Link Control</i> . Protocolo de capa de enlace (capa 2 del modelo de referencia OSI) estándar de punto a punto y comunicaciones punto a multipunto.
Header	Es la porción de un mensaje que contiene la información que guía el mensaje al destino correcto. Esta información puede contener las direcciones del remitente y del receptor, el nivel de prioridad, las instrucciones de ruta y los pulsos de sincronización.
Hops	Viaje individual que los paquetes recorren de <i>router</i> a <i>router</i> , en su camino hacia sus destinos.

Host	Dispositivo inteligente conectado a una red.
HSSI	<i>High Speed Serial Interface</i> . Interfaz de comunicación serial de datos optimizados para altas velocidades de hasta 52 Mbps. Utilizada para conectar un <i>switch</i> ATM a un enlace T-3.
Hub	En redes de área local, un <i>hub</i> es el núcleo de una topología de red en estrella.
Hub and Spoke	Topología de red semejante a una estrella en la que existe un nodo central por el cual fluye todo el tráfico de los nodos conectados a él.
IEEE 802.3	Protocolo de red de área local comúnmente conocido como <i>Ethernet</i> . <i>Ethernet</i> tiene una velocidad de 10 o 100 Mbps.
IEEE 802.5	Un estándar de especificación de capa física de una LAN con un método de acceso de paso de <i>token</i> en una topología de anillo.
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i> . Formado en 1986 cuando la Internet estaba evolucionando de un experimento del Departamento de Defensa en una red académica. El IETF es uno de los dos órganos técnicos de trabajo de la Junta de Actividades de Internet.

IGRP	<i>Interior Gateway Routing Protocol</i> . Un protocolo de enrutamiento de vector de distancia desarrollado por Cisco Systems para su uso en grandes redes heterogéneas. IGRP determina las mejores rutas a través de una LAN o Internet.
Interface	Interfaz. Punto de demarcación física entre dos dispositivos en los que las señales eléctricas, conectores y el <i>handshake</i> se definen. Los procedimientos, códigos y protocolos que permiten a dos entidades que interactúan en un intercambio significativo de información.
Interleave	Intercalado. Técnica de comunicación de datos que se utiliza en conjunción con códigos correctores de errores para reducir el número de errores en ráfagas, sin ser detectadas.
Intranet	Una red basada en protocolos TCP / IP (un internet) que pertenece a una organización y es accesible solo por miembros de la organización, los empleados u otras personas con autorización.
IP Tunnel	Túnel IP. Técnica para portar cualquier protocolo por medio de un paquete TCP/IP.
IP v4	<i>Internet Protocol Version 4</i> . La versión actual del protocolo de internet.

IP V6	<i>Internet Protocol Version 6.</i> El nuevo protocolo de internet diseñado para sustituir y mejorar el presente protocolo que se llama IPv4.
IPX	<i>Internet Packet Exchange.</i> Protocolo de comunicaciones Novell NetWare que se utiliza para mover datos entre el servidor y / o programas que se ejecutan en diferentes nodos de la red.
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network.</i> Conjunto de normas internacionales establecidas por la ITU-T para un circuito de conmutación de red digital que permite el acceso a cualquier tipo de servicio.
IS-IS	<i>Intermediate System to Intermediate System.</i> El protocolo IS-IS utiliza un algoritmo de estado de enlace para proporcionar servicios de enrutamiento de TCP/IP y OSI. Determina el mejor camino para paquetes TCP / IP y OSI a través de la red.
ITU	<i>International Telecommunication Union.</i> Es el organismo más importante en telecomunicaciones que fija las normas en el mundo. Está formado actualmente por tres grandes sectores establecidos en 1992: sector de Radiocomunicaciones (ITU-R), de Desarrollo de las Telecomunicaciones (ITU-D), y de Normalización de las Telecomunicaciones (ITU-T).

ITU-T Y.101	Norma de la ITU-T donde se formalizan los términos y definiciones de Infraestructura de Información Global.
LAN	<i>Local Area Network.</i> Red de comunicaciones que conecta las computadoras personales, estaciones de trabajo, impresoras, servidores de archivos y otros dispositivos dentro de un edificio o un campus.
LAP-B	<i>Link Access Procedure Balanced.</i> Enlaces de datos del protocolo de control utilizado para la interfaz X.25.
LAP-D	<i>Link Access Procedure-D.</i> Protocolo de acceso de enlace para el canal D. Protocolo a nivel de enlace diseñado para ISDN. Diferente del LAPB (<i>LAP-Balanced</i>) en la secuencia de tramas.
Layer	En el modelo de referencia OSI, una colección de funciones de procesamiento relacionadas con la red, que forman parte de un nivel de una jerarquía de funciones.
Límite de Shannon	El límite teórico de la información a través de un canal.
Link	El Foro ATM define un enlace (<i>link</i>) como una entidad que define una relación topológica entre dos nodos de diferentes subredes.

Meta señalización	El canal de meta señal es un canal de gestión que se utiliza para establecer señalización de circuitos virtuales entre la red y cada uno de los dispositivos individuales en una interfaz multipunto.
Modelo OSI	<i>Open Systems Interconnection.</i> El modelo de referencia OSI es el único marco internacionalmente aceptado de estándares para la comunicación, entre los diferentes sistemas de varios vendedores.
Modulación	Es el proceso de variar las características de la onda portadora eléctrica a medida que la información a transmitir en la onda portadora varía. Existen tres tipos de modulación comúnmente utilizados en las comunicaciones, siendo estos: modulación de amplitud (AM), modulación de frecuencia (FM) y modulación de fase (PM). Existen variaciones sobre los esquemas anteriores que son: modulación por desplazamiento de fase (PSK) y de amplitud en cuadratura (QAM).
MTU	<i>Maximum Transmission Unit.</i> La unidad más grande posible de datos que se pueden enviar en un medio físico determinado. Ejemplo: El MTU de <i>Ethernet</i> es 1500 bytes.
Multicast	Envío de mensajes a un grupo seleccionado de estaciones de trabajo en una LAN, WAN o internet.

Multimedia	Es la combinación de múltiples formas de medios de comunicación en la transmisión de información. Permite a las personas comunicarse con medios de comunicación integrados: audio, video, texto, gráficos, fax y telefonía.
Multiplexación	Intercalar o transmitir simultáneamente dos o más mensajes en un solo canal.
NIC	<i>Network Interface Card.</i> Una tarjeta de red funciona con el <i>software</i> de red y sistema operativo del ordenador para transmitir y recibir mensajes en la red.
NNI	<i>Network Node Interface.</i> Interfaz entre dos segmentos de la red pública de los equipos (a diferencia de la UNI, que representa la interfaz de usuario de red).
NSAP	<i>Network Service Access Point.</i> El punto en el que el servicio de red del modelo OSI está a disposición de la entidad de transporte.
OSPF	<i>Open Shortest Path First.</i> Utiliza el estado de enlace y protocolos de puerta interior para crear un mapa de la red en cada <i>router</i> para luego utilizar el algoritmo Dijkstra del camino más corto y determinar la ruta óptima entre dispositivos de red.

Overhead	En las comunicaciones, es toda la información como el control, ruteo y comprobación de errores que se suman a la transmisión de datos de usuario. Incluye información que lleva el estado de la red o las instrucciones de funcionamiento, la información de enrutamiento de red, así como retransmisiones de mensajes de datos por el usuario, que se han recibido con error.
PABX	<i>Private Automatic Branch Exchange.</i> Una central telefónica ubicada en las instalaciones de un cliente que establece circuitos principalmente de grado de voz entre los usuarios individuales (extensiones) y la red telefónica conmutada sin necesidad de operadora.
Paquetes	Término genérico para un conjunto de datos, por lo general en forma binaria, organizados de una manera específica para su transmisión.
Paridad	Un proceso para detectar si los <i>bits</i> han sido alterados durante su transmisión.
Payload	Carga de información. La parte que representa la información útil para el usuario.
PCM	<i>Pulse Code Modulation.</i> Método de codificación de una señal analógica en una señal digital.

Peer to peer	Comunicación entre dos entidades que operan dentro de la misma capa de protocolo de un sistema.
Perigeo	Es el punto en la órbita de un satélite en el que se encuentra a la menor distancia del centro del campo gravitacional de la tierra.
Pila de protocolo	Es básicamente una colección de módulos que juntos se combinan para producir el <i>software</i> que permite que el protocolo funcione, es decir, para permitir las comunicaciones entre dispositivos informáticos diferentes.
Plesiócrono	Redes plesiócronas que involucran múltiples circuitos digitales síncronos, funcionando a velocidades de reloj diferentes.
PM	<i>Phase Modulation</i> . Modulación de fase. Técnica de modulación que cambia la fase de la señal portadora de acuerdo con la señal de información.
Polarización de antena	La polarización de una antena indica la dirección del campo eléctrico en una onda radiada. Es un factor que determina la cantidad de energía que recibe una antena en la recepción de la señal.
Protocolo	Es un conjunto de normas que regulan el formato de los mensajes que se intercambian entre los ordenadores y las personas.

Protocolo de internet	Parte de la familia de protocolos TCP que describen el <i>software</i> que controla la dirección de internet de los nodos, las rutas de los mensajes salientes y reconoce los mensajes entrantes. Se utiliza en puertas de enlace para conectar las redes a nivel de capa de red y superiores.
QoS	<i>Quality of Service</i> . Calidad de servicio es una medida del servicio que las telecomunicaciones (voz, datos y/o vídeo) prestan a un abonado.
Ráfaga	En la comunicación de datos, una secuencia de señales, ruido, o interfaz tomada como una unidad de acuerdo con algún criterio o medida específica.
Receptor	Cualquier componente de un dispositivo de telecomunicaciones que decodifica una señal codificada en su forma deseada.
Retardo de propagación	El tiempo que tarda una señal en viajar desde el emisor hasta el receptor a través de un circuito. El retardo de propagación es un factor de la velocidad finita en la que las señales electromagnéticas pueden viajar a través de un medio de transmisión.
RFC	<i>Request For Comment</i> . Son documentos de estándares y especificaciones que progresan a través de varias etapas de desarrollo, bajo el control de la IETF, hasta que son finalizados o descartados.

RFC 1483	<i>RFC Multiprotocol Encapsulation over ATM Adaptation Layer 5.</i> En este RFC se describen dos métodos de encapsulación para transportar tráfico de interconexión sobre ATM AAL5.
RFC 2581	<i>RFC TCP Congestion Control.</i> En este RFC se definen los algoritmos de control de congestión de TCP.
RIP	<i>Routing Information Protocol.</i> Se basa en algoritmos de vector de distancia que miden el camino más corto entre dos puntos de una red, con base en las direcciones de los dispositivos de origen y destino.
Rotación de Faraday	Efecto que causa rotación en la polarización de una señal respecto del plano de polarización.
Router	Un dispositivo que conecta dos segmentos de LAN, que utilizan arquitecturas similares o diferentes en la capa de red OSI, la capa 3. El <i>router</i> determina la ruta más eficaz para transmitir datos por medio del Internet. Los paquetes que contienen una dirección de red diferente a la dirección del PC de origen, se remiten a una red contigua.
Routing	Enrutamiento. El proceso de selección de la trayectoria del circuito para un mensaje.

SAPI	<i>Service Access Point Identifier</i> . SAPI identifica un punto lógico en el que los servicios de capa de enlace son provistos por una entidad de capa de enlace de datos a una entidad de capa de red.
Satélite	Plataforma receptora de microondas, que funciona como repetidor y/o regenerador de señales que circunda en órbita sobre la Tierra.
Señal portadora	Es una forma de onda continua, cuyas propiedades son susceptibles de ser moduladas, con una segunda señal portadora de información.
Símbolo	Estado eléctrico reconocible el cual está asociado con un elemento de señal que es una señal eléctrica dentro de un período de tiempo definido.
Síncrono	Sistema que utiliza una tasa de reloj para la transmisión de datos.
SMDS	<i>Switched Multimegabit Data Service</i> . Una conexión de alta velocidad de datos de servicios de transmisión destinada a la aplicación en una red de área metropolitana (MAN).
Socket	Una abstracción del sistema operativo que proporciona la capacidad a las aplicación para acceder de forma automática los protocolos de comunicación.

SONET	<i>Synchronous Optical NETWORK</i> . Una familia de tasas de transmisión por fibra óptica de 51,84 Mbit por segundo a 39,812 <i>Gigabit</i> por segundo, creada para proporcionar la flexibilidad necesaria para el transporte de muchas señales digitales con capacidades diferentes.
<i>Spread Spectrum</i>	También llamado salto de frecuencia; es una técnica de modulación utilizada en los sistemas inalámbricos. Los datos a ser transmitidos son convertidos en unidades de información llamados paquetes y esparcidos sobre una amplia gama de ancho de banda que la demanda por el contenido del flujo de la información original.
<i>Stack</i>	Lista de instrucciones internas que se ejecutan en un sistema.
STM-1	<i>Synchronous Transport Module 1</i> . Estándar SDH para la transmisión sobre fibra óptica OC-3 a 155,52 Mbps.
STS	<i>Synchronous Transport Signal</i> . El equivalente eléctrico de SONET nivel OC. La señal eléctrica se convierte en óptica antes de la presentación al medio de fibra óptica.
STS-3C	<i>Synchronous Transport Signal level 2</i> . Implementación de la capa física ATM 155 Mbps.

Subred	Es una parte de la red, que puede ser una red físicamente independiente, que comparte una dirección de red con otras partes de la red y se distingue por un número de subred.
Switch	Conmutador. Un dispositivo mecánico, eléctrico o electrónico que abre o cierra los circuitos, completa o interrumpe una trayectoria eléctrica, o selecciona vías o circuitos. Los <i>switches</i> trabajan en las capas 1 (Física) y 2 (enlace de datos) del modelo de referencia OSI, haciendo énfasis en la capa 2. Un <i>switch</i> verifica los datos entrantes (datos o voz) para determinar la dirección de destino. Con base en esa dirección, una conexión se establece a través de la matriz de conmutación entre los puertos físicos de entrada y salida del dispositivo.
Switching	Conmutación. El establecimiento de una ruta de transmisión de una entrada en particular a una salida en particular de un grupo de entradas y salidas.
Tandem	En el contexto de las telecomunicaciones, el término se refiere a los <i>switches</i> , circuitos, u otros elementos de red, que permiten que otros elementos de red trabajen en conjunto.
Tasa de errores de bit	Es el porcentaje de <i>bits</i> recibidos con error en comparación con el número total de <i>bits</i> recibidos.

TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> . TCP es un protocolo de capa de transporte, orientado a la conexión. Proporciona una entrega confiable, ordenada, y no duplicada de <i>bytes</i> enviados a un usuario remoto o local.
TDM	<i>Time Division Multiplex</i> . Una técnica de multiplexación para la transmisión de una serie de señales separadas de datos, voz y/o video simultáneamente a través de un medio de comunicación intercalando una pieza de cada señal.
Telnet	Un programa que le permite conectarse a otros ordenadores en internet.
Terminal	Un dispositivo de entrada/salida para comunicarse con computadoras.
Throughput	La cantidad real de información útil y no redundante que es transmitida o procesada.
Time to live	Mecanismo utilizado por el protocolo IP para controlar la vigencia de un paquete y evitar que este se mantenga en la red por siempre.
Timeout	Es la cantidad de tiempo que el <i>hardware</i> o el <i>software</i> espera por un evento antes de tomar acciones correctivas para terminar la conexión o sesión.

<i>Token</i>	En las redes, es una combinación única de <i>bits</i> utilizados para otorgar el acceso a una computadora a transmitir a una en una red de área local. También proporciona información importante para el enrutamiento de mensajes a través de la red, tales como direcciones de origen y destino, información de control de acceso, información de control de ruta.
Topología	Se refiere a cómo los dispositivos se cablean. La topología lógica se refiere a cómo los nodos en realidad interactúan.
<i>Trail</i>	Como término ATM, es una entidad que transfiere la información proporcionada por la capa de cliente entre los puntos de acceso en una red de capa de servidor.
<i>Transponder</i>	Es un equipo de radio a bordo de un satélite de comunicaciones el cual recibe una señal, la amplifica, cambia su frecuencia y la reenvía de regreso a la Tierra.
UBR	<i>Unspecified bit rate.</i> Una clase de servicio ATM. UBR no ofrece ninguna garantía de servicio, por lo que se tendría que utilizar para datos de texto, transferencia de imágenes, mensajería y distribución de información no crítica, en el que no tiene que tener un tiempo de respuesta o garantía de servicio.

UDP	<i>User Datagram Protocol.</i> Provee el intercambio de datagramas sin acuses de recibo ni entrega garantizada.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System.</i> Miembro europeo de la IMT-2000, familia 3G (tercera generación) de estándares inalámbricos. UMTS está diseñado para soportar velocidades de transferencia de datos de 144 Kbps para el tráfico vehicular, 384 Kbps para el tráfico peatonal, y hasta 2 Mbps en apoyo de los servicios dentro de un edificio.
UNI	<i>User Network Interface.</i> Especificaciones para los procedimientos y protocolos entre el equipo del usuario o bien una red ATM. La UNI es el punto físico, eléctrico y funcional de demarcación entre el usuario y el proveedor de servicios de la red pública.
<i>Uplink</i>	En los satélites, es el enlace de la estación de tierra hasta el satélite.
V.35	Estándar para la interfaz troncal entre un dispositivo de acceso a la red y una red de paquetes que define la señalización de las velocidades de datos superiores a 19,2 Kbps.
VoIP	<i>Voice over IP.</i> Una tecnología para el transporte de voz digital integrada, video, y datos sobre redes IP.

VPN	<i>Virtual Private Network.</i> Red de paquetes de datos que ofrece servicios de red privada.
VSAT	<i>Very Small Aperture Terminal.</i> Pequeña antena satelital, por lo general 1,5 a 3,0 metros de diámetro, que se utiliza para aplicaciones de comunicaciones de datos punto a multipunto.
WAN	<i>Wide Area Network.</i> Es una red pública que cubre un área metropolitana, que puede extenderse más allá de los límites de la ciudad.
WWW	<i>World Wide Web.</i> La <i>World Wide Web</i> es el universo de información accesible disponible en muchos equipos extendidos por el mundo y unidos a la red de computadoras gigantescas que se llama internet. Tiene un cuerpo de <i>software</i> , un conjunto de protocolos y un conjunto de convenciones definidas para llegar a la información en la Web.
X.25	Es un estándar que define la interfaz entre el DTE y DCE para equipos que operan en el modo de paquetes en redes públicas de datos. También se define un protocolo de control de enlace.

RESUMEN

A finales del siglo XX se hizo patente la necesidad por una tecnología, capaz de suplir la demanda de protocolos de comunicación a altas velocidades para integrar redes de telefonía y redes de datos. De las propuestas surgidas, el protocolo de Modo de Transferencia Asíncrona (ATM) fue el elegido por la ITU-T. ATM es un protocolo orientado a la conmutación veloz de paquetes y técnicas de multiplexación con muy bajo tiempo de latencia, haciéndolo ideal para aplicaciones donde la velocidad de transmisión de datos sea crítica. La integración de redes ATM con redes IP da como resultado la implementación de *backbones* de proveedores de servicios de internet altamente confiables.

El protocolo ATM puede ser portado a través de redes satelitales, las cuales son capaces de proveer y garantizar enlaces para servicios y aplicaciones en lugares sin cobertura. Los satélites con órbitas geoestacionarias, son los más utilizados para el envío confiable de las celdas ATM, debido a la utilización de conmutadores ATM a bordo de los satélites. La confiabilidad en los enlaces satelitales se alcanza por medio de la utilización de métodos de corrección de errores en adelante.

La evolución de ATM apunta a redes de nueva generación, tales como el Multiprotocolo de Conmutación de Etiquetas (MPLS), el cual añade etiquetas a paquetes IP. Esto posibilita a los enrutadores transmitir el tráfico al inspeccionar la etiqueta y no la dirección IP destino. Esto impacta en un incremento de velocidad de transmisión y una mejor integración con redes IP.

OBJETIVOS

General

Identificar el funcionamiento del protocolo de Modo de Transferencia Asíncrono (ATM) sobre redes satelitales como portador de tráfico de voz, datos y servicios multimedia.

Específicos

1. Entender los conceptos de las órbitas satelitales, características de los enlaces satelitales, técnicas de transmisión y asignación de ancho de banda.
2. Conocer los principios del protocolo ATM, su tecnología y el tipo de servicios que estas brindan.
3. Conocer cómo pueden ser transportadas las celdas ATM utilizando diferentes tipos físicos de transmisión, así como sus interfaces.
4. Describir la relación entre la administración del tráfico y la calidad de servicio (QoS).
5. Entender la interconexión de redes satelitales con redes terrestres, los esquemas de tráfico de red y las diferencias entre multiplexación y acceso múltiple.

6. Entender la evolución de redes digitales tales como PDH, SDH y ATM.
7. Identificar los diferentes esquemas de señalización existentes en las redes satelitales.
8. Describir el importante rol de los satélites en las redes ATM.
9. Entender los conceptos de conmutación a bordo, calidad de servicio (QoS), rendimiento de los sistemas satelitales, así como las consideraciones en el diseño de sistemas ATM sobre enlaces satelitales.
10. Identificar la interacción de los servicios y aplicaciones actuales con redes de próxima generación (MPLS).

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación aborda la integración de redes ATM y redes satelitales definiendo sus características de operación, especificaciones y alcances, los cuales han hecho posible el desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios, aun en regiones donde las redes terrestres no son una solución económicamente viable.

La primera parte de este trabajo de graduación aborda los principios de las órbitas satelitales y las características de los enlaces satelitales. Las técnicas de transmisión, de corrección de errores, de acceso y asignación de ancho de banda.

En la segunda parte se abordan los conceptos del protocolo de Modo Asíncrono de Transferencia (ATM), su segmentación en capas, sus interfaces así como consideraciones de tráfico, calidad de servicio (QoS) y conectividad entre el protocolo de internet (IP) y ATM.

La tercera parte incluye los conceptos de interconexión satelital con redes terrestres, redes de acceso y redes de tránsito. Señalización y tráfico de telefonía digital.

En seguida se abordan los conceptos de interconexión de banda ancha satelital basada en tecnología ATM, diseño de sistemas satelitales, arquitectura de redes ATM con sistemas satelitales, redes satelitales avanzadas y desempeño del protocolo ATM sobre redes satelitales.

Finalmente, se incluyen las redes de próxima generación, definiendo los conceptos básicos del Multiprotocolo de Conmutación de Etiquetas (MPLS) y sus aplicaciones.

1. ÓRBITAS SATELITALES Y CONCEPTOS DE CONECTIVIDAD

1.1. Leyes de la Física

Las leyes de la física determinan cómo y dónde se podrá ubicar una estación de comunicación en el firmamento para que forme parte integral de nuestra red de comunicaciones.

1.1.1. Leyes de Kepler

El astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630) formuló tres leyes del movimiento planetario que también aplican al movimiento de los satélites alrededor de la Tierra.

Las tres leyes de Kepler son:

- La órbita de cualquier cuerpo pequeño sobre un cuerpo mayor es siempre una elipse, con el centro de masa del cuerpo mayor como uno de los dos focos de la elipse.
- La órbita del cuerpo pequeño recorre áreas iguales en tiempos iguales.
- El cuadrado del período de un cuerpo pequeño en torno a un cuerpo mayor, es proporcional al cubo de la distancia media entre dichos cuerpos.

1.1.2. Las tres leyes de movimiento y la ley universal de la gravedad de Newton

En 1667, el astrónomo británico, matemático, físico y científico Isaac Newton estableció las tres leyes del movimiento como se detallan a continuación:

- Primera Ley: todo cuerpo conserva su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme, a menos que sea obligado a cambiar ese estado por fuerzas externas.
- Segunda Ley: cualquier cambio en el movimiento de un cuerpo siempre es proporcional a la fuerza que actúa sobre él. Dicho cambio es realizado en la misma dirección de la fuerza aplicada. Puede ser descrito matemáticamente como la suma de todos los vectores de fuerza F , actuando en un cuerpo con una masa m igual al producto de la masa y el vector de aceleración r de un cuerpo:

$$F = m \frac{d^2r}{dt^2}$$

- Tercera Ley: cada acción tiene una reacción igual pero opuesta.

Además de estas tres leyes, Newton también descubrió la fuerza de la gravedad. Más importante aún, él proveyó la prueba matemática de la fuerza de gravedad formando la ley universal de la misma como “el problema de los dos cuerpos”.

$$F = Gm_1m_2 \frac{1}{r^2}$$

Donde F es el vector de fuerza de masa m_1 sobre la masa m_2 en la dirección de m_1 a m_2 ; $G = 6,672 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{Kg}/\text{s}^2$ es la constante universal de la gravedad; r es la distancia entre los cuerpos, y $\frac{r}{r}$ es el vector unitario indicando la dirección de m_1 a m_2 . Claramente esto puede ser usado para describir la fuerza entre el sol y la Tierra siendo m_1 la masa del sol y m_2 la masa de la Tierra.

1.2. Parámetros de la órbita satelital

Para definir la trayectoria de un satélite en el espacio se requieren de parámetros orbitales. La trayectoria de una órbita es descrita por dos parámetros: el eje semimayor (a) y la excentricidad (e). La posición del plano orbital en el espacio es especificada por otros parámetros: la inclinación (i), la ascensión del nodo (Ω) y el argumento del perigeo (ω). El eje semimayor (a) también determina el período (T) de un satélite orbitando la Tierra.

1.2.1. Eje semimayor (a)

Este elemento especifica el tamaño de la órbita (en Km.). Se define como la mitad del eje mayor (AB) que es la longitud de la cuerda que pasa a través de los dos focos de la órbita de la elipse. Para órbitas circulares, el eje semimayor (a) no es más que el radio del círculo. La figura 1 ilustra el eje semimayor y otros parámetros de la órbita.

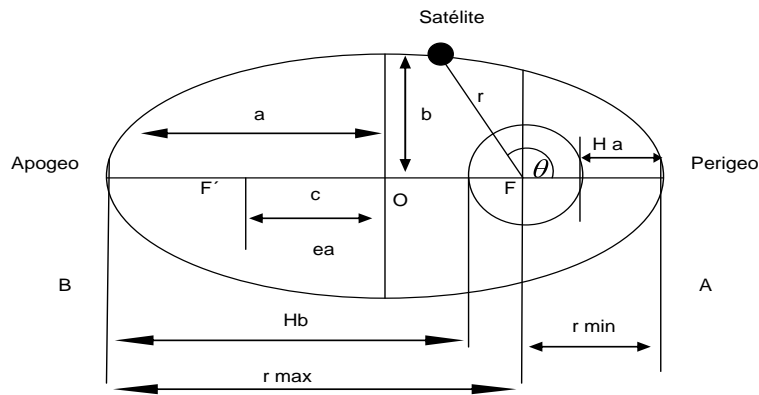
1.2.2. Excentricidad (e)

La excentricidad (e) determina la forma de la órbita. Es una constante geométrica adimensional con un valor entre cero y uno. Una órbita circular pura tiene valor de excentricidad igual a cero.

Los siguientes valores de (e) definen el tipo de órbita en los satélites:

- Si $e = 0$, la trayectoria es circular
- Si $e < 1$, la trayectoria es una elipse
- Cuando $e = 1$, la trayectoria es una parábola
- Cuando $e > 1$, la trayectoria es una hipérbola

Figura 1. **Órbita con eje mayor en (AB) y eje semimayor en (AO)**

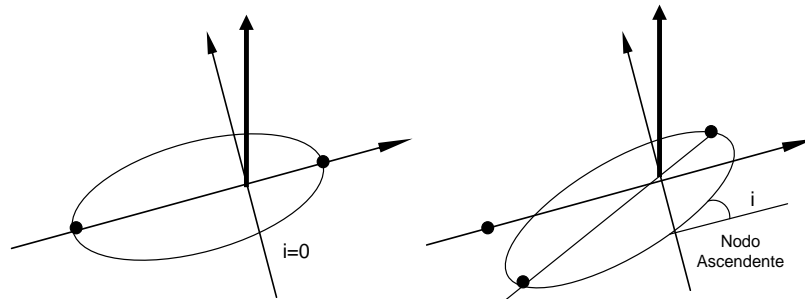


Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 350.

1.2.3. **Inclinación de la órbita (i)**

La inclinación i determina la inclinación del plano de la órbita respecto del plano ecuatorial de la Tierra y es un ángulo medido en grados. Es definido como el ángulo entre los dos planos mostrado en la figura 2. Una órbita con una inclinación de cero grados es llamada órbita ecuatorial, y una con inclinación de 90 grados es llamada órbita polar. Inclinaciones de menos de 90 grados corresponden a órbitas directas, e inclinaciones entre 90 y 180 grados corresponden a órbitas retrógradas. Las inclinaciones están limitadas a un máximo de 180 grados.

Figura 2. **Inclinación de la órbita (i), ($i = 0$) y ($0 < i < 90^\circ$)**

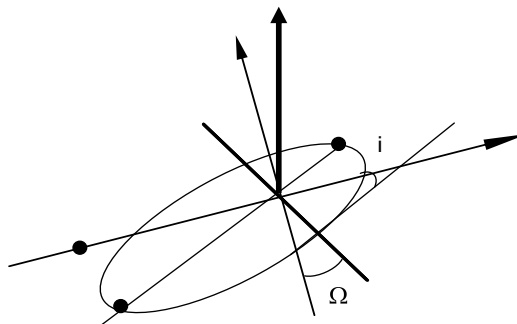


Fuente: elaboración propia.

1.2.4. **Ascensión recta del nodo y el argumento del perigeo**

La ascensión recta del nodo (Ω) determina la rotación del plano de la órbita, y es un ángulo medido en grados. Se define como el ángulo en el plano ecuatorial entre las líneas formadas por la intersección de los planos orbitales y el plano ecuatorial, como se muestra en la figura 3.

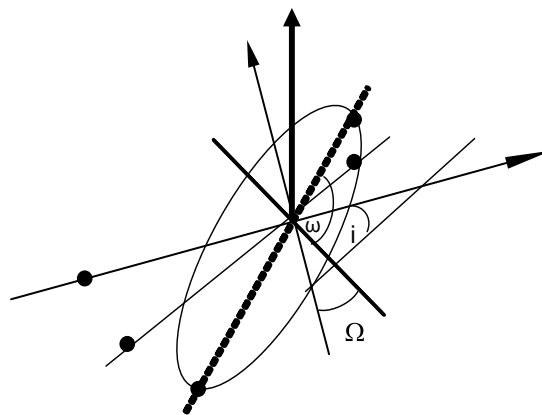
Figura 3. **Ascensión recta del nodo Ω ($0 < \Omega < 360^\circ$)**



Fuente: elaboración propia.

Esta “longitud” no es una longitud normal vinculada a la superficie de la Tierra, pero es un ángulo medido en el plano ecuatorial. El argumento de perigeo (ω) determina la rotación del perigeo en el plano orbital como se muestra en la figura 4. Este es un ángulo medido en grados.

Figura 4. **Argumento del perigeo ω ($0 < \omega < 360^\circ$)**



Fuente: elaboración propia.

1.3. Órbitas satelitales

De acuerdo con la tercera ley de Kepler, el periodo orbital de un satélite es proporcional a su distancia de la Tierra. Los satélites en órbitas bajas, altitudes de unos pocos cientos a miles de kilómetros, tienen periodos orbitales de menos de dos horas.

En cambio, la luna, a una altitud de unos 380 000 Km, posee un periodo orbital de unos 27 días y la Tierra tiene una órbita con un periodo de 365 días como base de un año.

1.3.1. Órbitas geosincrónicas

Entre los extremos de la órbita se encuentra una altitud que corresponde al periodo orbital de un día. Un satélite en una órbita circular a esta altura, gira alrededor de la Tierra a la misma velocidad que la rotación de esta. Esta altura es de 35 786,6 Km y la órbita se denomina sincrónica o geosincrónica. Una constelación de satélites geosincrónicos se necesita para proporcionar cobertura continua de una zona.

1.3.2. Órbitas geoestacionarias

Si la inclinación de una órbita geosincrónica es cero (o casi cero), el satélite permanece fijo (o aproximadamente fijo) sobre un punto en el ecuador. Esa es una órbita conocida como geoestacionaria. Una de las ventajas de la órbita geoestacionaria es que las antenas sobre Tierra, una vez orientadas hacia el satélite, no necesitan reajustar su orientación periódicamente.

Otra ventaja es que un satélite en este tipo de órbita cubre continuamente alrededor de un tercio de la Tierra. A una altitud de 35 786,6 Km por encima del ecuador; la velocidad angular de un satélite en esta órbita coincide con la rotación diaria de la superficie de la Tierra. Debido a esto, este tipo de órbita se ha utilizado ampliamente. El retardo de propagación entre la estación terrena y el satélite es de alrededor de 0,125 milisegundos. Este conduce a la conocida referencia de medio segundo de latencia ida y vuelta en las comunicaciones vía satélites geoestacionarios.

Una de las desventajas de la órbita geoestacionaria es que la gravedad del sol y la luna perturban la órbita, causando el aumento de la inclinación. La propulsión del satélite puede contrarrestar estas perturbaciones, pero como la

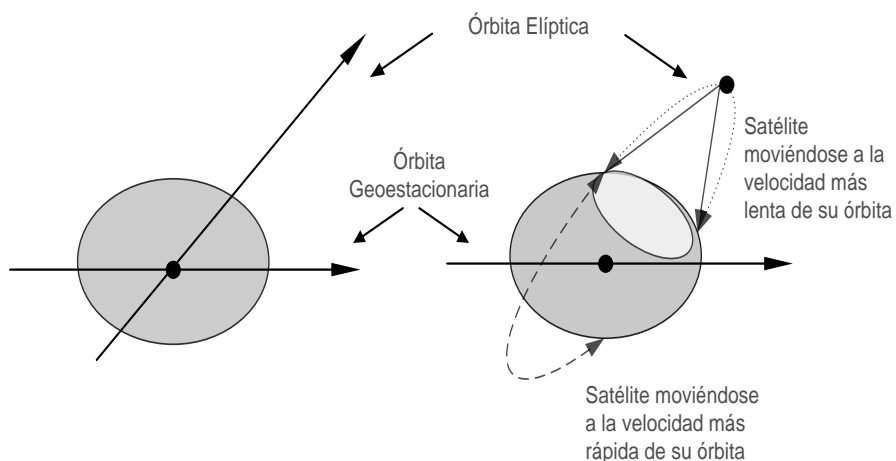
cantidad de combustible que un satélite puede transportar es limitada, el aumento de la inclinación puede seguir siendo un problema en algunos escenarios.

La capacidad finita de las órbitas geoestacionarias es otra desventaja. Satélites utilizando las mismas frecuencias de transmisión deben ser separados para evitar interferencia mutua, lo que conlleva a una saturación del espacio en dichas órbitas.

1.3.3. Órbita elíptica alta

Las órbitas elípticas altas difieren de las órbitas circulares. Únicamente ofrecen cobertura cuando el satélite se está moviendo muy lentamente en relación con la Tierra, esto es en el apogeo de su órbita, en la ubicación más alejada de la superficie de la Tierra. La figura 5 ilustra una órbita elíptica típica.

Figura 5. Órbita elíptica típica



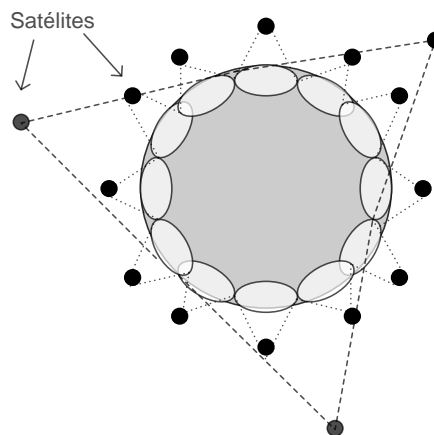
Fuente: elaboración propia.

Estas órbitas son ajustadas a una inclinación de 63,4 grados a fin de que la órbita sea cuasiestacionaria respecto de la superficie de la Tierra. Esta alta inclinación permite la cobertura de altas latitudes terrestres. Las órbitas elípticas Molnya y Tundra son utilizadas por los rusos para televisión por satélite. Las órbitas elípticas son la excepción y no la regla general y generalmente proporcionan cobertura sectorizada, en lugar de cobertura global.

1.3.4. Órbita satelital baja

Satélites de órbita terrestre baja se desplazan más rápido que la rotación de la Tierra, por tanto, circulan constantemente alrededor de la misma. La figura 6 ilustra la órbita y la huella de un satélite de órbita terrestre baja. Con el plano de la órbita del satélite y el punto en la órbita de este, puede ubicarse la posición del satélite. Para una constelación de satélites hay simples anotaciones o reglas para describir una cobertura mundial.

Figura 6. **Relación entre cobertura y distancia**



Fuente: elaboración propia.

Existen dos formas de notaciones utilizadas para describir las constelaciones satelitales, la notación Walter y la notación Ballard:

- La notación Walter: $(N/P/p)$ esta notación se refiere a: número de satélites por plano N / número de planos P / número de fases distintas de planos; para controlar el espaciamiento de las desviaciones en los planos p .
- Notación Ballard (NP, P, m) : esta notación se refiere a: (número total de satélites NP , número de planos P , factor armónico m que describe la fase entre planos).

La notación Walker es más común que la notación Ballard, aunque esta puede describir con más exactitud posibles desviaciones entre planos.

1.3.5. Perturbaciones en la órbita

Existen muchos efectos sutiles que perturban las órbitas de los satélites alrededor de la Tierra. Algunos de los factores que perturban la órbita son:

- Achatamiento de la Tierra: esta se ensancha en el ecuador, lo que lleva a un campo de gravedad mucho más complejo que el campo de gravedad de una simetría esférica.
- Efectos solares y lunares: estos efectos del sol y la luna son los de mayor influencia en las fuerzas gravitacionales sobre los satélites que circulan la Tierra, además del propio campo gravitacional terrestre.

- La resistencia atmosférica: es la fricción que un satélite encuentra a medida que pasa a través de las capas superiores difusas de la atmósfera terrestre. Estas capas pueden frenarlo paulatinamente, provocando que salga de órbita y pueda caer a la Tierra desintegrándose a su ingreso a la atmósfera, en el mejor de los casos.
- La presión de la radiación solar: la presión de la radiación solar se produce por la colisión entre el satélite y los fotones radiados por el sol que son absorbidos o reflejados.

1.3.6. Altitud satelital y cobertura

Cuanto mayor sea la altitud, mayor será la cobertura; cuanto más extensa sea la distancia, mayor será la potencia de transmisión necesaria para las comunicaciones. La figura 6 ilustra estas simples relaciones.

Se puede observar que los satélites geoestacionarios tienen la mayor altitud que abarca la mayor superficie. Los satélites de órbita baja elíptica tienen la más baja altura cubriendo un área más pequeña y los satélites de órbita media elíptica se encuentran en el medio de estas relaciones. Los satélites geoestacionarios también proporcionan una cobertura continua de la zona, pero los satélites de órbita elíptica baja y órbita elíptica media, poco a poco se alejan gradualmente de las áreas de cobertura.

La investigación y desarrollo de constelaciones satelitales en los últimos años ha logrado la excelencia en los aspectos técnicos, pero económicamente, tomará tiempo aprovechar todo el beneficio de las mismas. Esto podría lograrse mediante la reducción de los costos de los sistemas y la creación de ingresos procedentes de nuevos servicios y aplicaciones.

1.3.7. Ganancia de una antena y ancho de haz

En un sistema de radio comunicación la antena es una parte muy importante del enlace de transmisión. Ayuda a concentrar la energía de radiación hacia la antena receptora, pero el receptor recibe solo una pequeña cantidad de energía, la mayor parte de la energía se propaga en todas direcciones.

La ganancia máxima de una antena se expresa como:

$$G_{max} = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) \eta A$$

Donde $(\lambda = \frac{c}{f})$, la velocidad de la luz $(c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s})$ y f la frecuencia de la onda electromagnética.

La superficie geométrica de la antena $A = \pi D^2$ con un diámetro D . En la dirección de θ_q , el valor de la ganancia (en relación con una antena isotrópica) es:

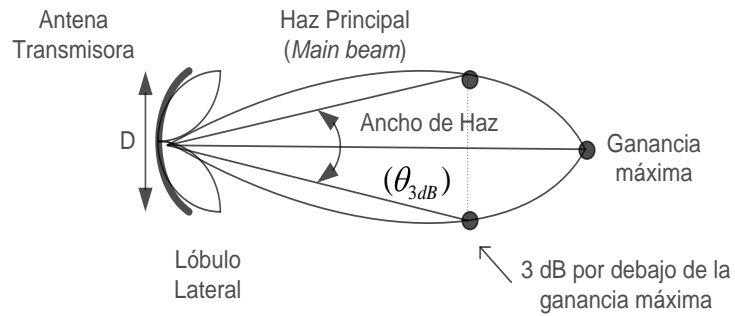
$$G_{\theta} \text{ dB}_i = G_{max, \text{dB}_i} - 12(\theta - \theta_{3\text{dB}})$$

El ancho de haz angular del patrón de radiación es:

$$\theta_{3\text{dB}} = 70 \frac{\lambda}{D} = 70 \frac{c}{fD}$$

La figura 7 muestra un patrón típico determinado por el tamaño de la antena de transmisión y la frecuencia utilizada.

Figura 7. **Patrón de radiación de una antena**

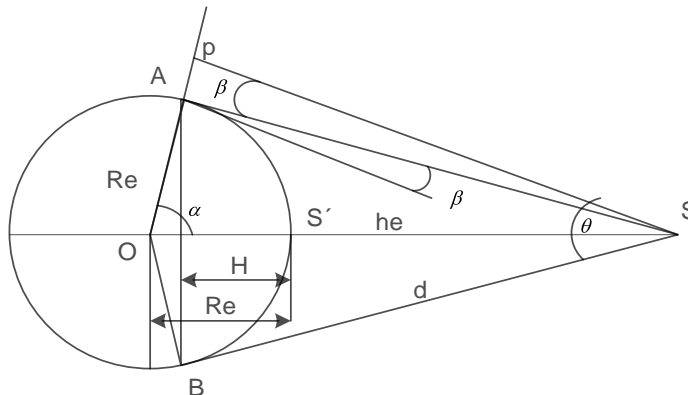


Fuente: HAYKIN, Simon. Communication systems. p. 521.

1.3.8. Cálculos en la cobertura

La altura de los satélites determina la cobertura del haz de la antena y la distancia de las estaciones terrenas del borde de la cobertura al satélite. La figura 8 muestra la relación entre el ángulo de elevación β y la altura h_e .

Figura 8. **Relación entre el ángulo de elevación y la altitud**



Fuente: KOLAWOLE, Michael. Satellite communication engineer. p. 46.

En la figura 8, OPS es un triángulo rectángulo. Se puede calcular como sigue:

$$S_p = h_E + R_e \sin a$$

$$O_p = h_E + R_e \cos a$$

$$A_p = S_p \tan \beta$$

Como también se tiene que $A_p = AS \sin \beta$, se puede obtener $AS = \frac{S_p \tan \beta}{\sin \beta} = \frac{h_E + R_e \sin a}{\cos a}$. Para un caso especial cuando $\beta = 0$

$AS = \frac{h_E + R_e \sin a}{\cos a}$. También se puede calcular $\cos a = \frac{R_E}{h_E + R_E}$, entonces

$\sin^2 a = 1 - \cos^2 a = \left(1 - \frac{R_E}{h_E + R_E}\right)^2$. Por tanto:

$$(AS)^2 = (h_E + R_E)^2 - (R_E)^2$$

También se puede calcular directamente, como OAS se convierte en un triángulo rectángulo cuando:

$$(AS)^2 + (R_E)^2 = (h_E + R_E)^2$$

El área máxima de cobertura puede calcularse como:

$$\text{Cobertura} = 2\pi R_e H = 2\pi R_E^2 \left(1 - \frac{R_E}{h_E + R_E}\right)$$

1.3.9. Distancia y retardo de propagación entre la estación terrestre y el satélite

Dos ángulos se utilizan para localizar el satélite desde cualquier punto de la superficie de la Tierra:

- Ángulo de elevación (β): es el ángulo entre el horizonte y el satélite medido en el plano que contiene el punto considerado, el satélite y el centro de la Tierra.
- Ángulo de azimut (α): es el ángulo medido en el plano horizontal de la ubicación entre la dirección del norte geográfico y la intersección del plano que contiene el punto considerado, el satélite y el centro de la Tierra.

La distancia del centro de la Tierra al satélite es $r = h + R_E$. La distancia entre estaciones terrenas y el satélite puede ser calculada como:

$$R^2 = R_E^2 + r^2 - 2R_E r \cos \phi$$

$$\tan \beta = \frac{\cos \phi - \left(\frac{R_E}{r}\right)}{\sin \phi}$$

$$\sin \alpha = \frac{(\sin L \cos \phi)}{\sin \phi}$$

Donde $\cos \phi = \cos L \cos \phi \cos l + \sin \phi \sin l$, para un geoestacionario, se tiene $\phi = 0$, entonces $\cos \phi = 1$ y $\sin \phi = 0$.

El retardo de propagación de una estación terrestre a un satélite puede ser calculada como:

$$T_p = \frac{R}{c}$$

Donde la velocidad de la luz es ($c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$).

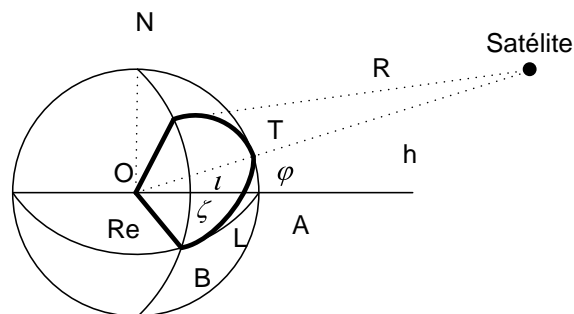
Por lo tanto, el retardo de propagación en un sentido de una estación a la otra es:

$$T_p = \frac{(R_1 + R_2)}{c}$$

Donde R_1 y R_2 son las distancias de las estaciones terrenas al satélite.

La figura 9 muestra los parámetros para el cálculo de la distancia entre la estación terrena y el satélite.

Figura 9. **Distancia entre la estación terrena y el satélite**



Fuente: KOLAWOLE, Michael. Satellite communication engineer. p. 92.

1.4. Características de los enlaces satelitales y modulaciones para la transmisión

Las componentes básicas de la señal de transmisión incluyen la onda portadora y la señal moduladora. La señal portadora es una onda sinusoidal continua que no contiene información. La señal de modulación es la señal de mensaje a ser transmitida, superpuesta a la señal portadora.

La señal puede modular la amplitud, la frecuencia o la fase de la onda portadora, dando lugar a diferentes esquemas de modulación tales como: la amplitud modulada, la frecuencia modulada y la modulación de la fase. En el extremo receptor, el demodulador puede separar el mensaje de señal de la onda portadora por medio de un proceso de demodulación, dependiendo del esquema de modulación utilizado en la transmisión.

Los esquemas de modulación permiten la transmisión de señales de mensaje a la frecuencia de la señal portadora. Tales esquemas pueden utilizarse para proporcionar acceso múltiple a las bandas de frecuencias de radio en el dominio de la frecuencia. Además de la señal modulada, las condiciones de propagación del canal (espacio), pueden causar cambios en la amplitud, la frecuencia o la fase de la onda portadora; por lo tanto, pueden causar errores de transmisión. También es importante contar con un sistema de detección y corrección de errores para recuperar el mensaje de los posibles errores ocurridos durante la transmisión.

1.4.1. Características de los enlaces satelitales

A diferencia de la señal por cable, la calidad de la conexión por satélite no se puede controlar.

El enlace satelital puede causar propagación en función de los siguientes factores:

- Frecuencia de operación: la atenuación de la señal por la absorción de gas y las condiciones adversas de la tropósfera aumentan la atenuación en relación con el aumento de la frecuencia.
- Ángulo de elevación y polarización de la antena: la longitud del canal de propagación a través de la tropósfera varía inversamente con el ángulo de elevación. En consecuencia, las pérdidas por propagación, ruido y la despolarización también aumentan con la disminución del ángulo de elevación. La atenuación por lluvia afecta ligeramente a la polarización. La polarización también es sensible a la despolarización, siendo la polarización circular la más susceptible.
- La altitud de la estación terrena: a medida que se ubique la estación a la mayor altura posible, abajo de la tropósfera, se incluirá en la ruta de la señal al satélite. Las perturbaciones se minimizan a una mayor altura.
- Temperatura del ruido de la estación terrestre: es el nivel de temperatura del ruido del espacio a la temperatura del ruido del sistema, por lo tanto, es el efecto del ruido en el espacio en la relación señal a ruido S_N en el enlace de bajada.
- Meteorología local: la cantidad y la naturaleza de las precipitaciones en las cercanías de la estación terrestre son los principales factores en la determinación de la frecuencia y las deficiencias en la propagación de la señal.

- Figura de mérito (G_T): expresa la eficiencia de un receptor. G es la ganancia general en decibelios y T es la temperatura del ruido expresado en decibelios relativo a 10° Kelvin. Por lo tanto, G_T se expresa en decibelios con dimensionales dB_K para indicar la escala Kelvin de la temperatura.

Las pérdidas en el espacio libre son la principal pérdida de potencia debido a la propagación en el enlace satelital. Aunque es más grande que todas las otras pérdidas, también puede desempeñar una parte importante en la adición de varios dB. A frecuencias de 10 GHz. o más, las pérdidas debidas a la absorción atmosférica y lluvia pueden ser importantes. En estas frecuencias, las ondas electromagnéticas interactúan y resuenan con moléculas de gases en la atmósfera causando atenuación de la señal. La más importante atenuación por resonancia ocurre a los 22,235 GHz. debido al vapor de agua y entre 53 a 65 GHz., debido al oxígeno.

Pérdidas a otras frecuencias son por lo general pequeñas (menos de 1 dB). Estas pérdidas atmosféricas pueden calcularse e incluirse en la ecuación del enlace para determinar su impacto en la calidad general del enlace. A frecuencias bajas, de menos de 1GHz., las pérdidas debidas a desvanecimiento multitrayecto y dentelleo son predominantes. El efecto de rotación Faraday debido a la cantidad total de electrones en la atmósfera se vuelve significativo, pero con la polarización adecuada, estas pérdidas pueden ser controladas en enlaces de alta ganancia.

1.4.2. Técnicas de modulación

Las técnicas de modulación transportan información al modificar una onda portadora utilizando una señal de mensaje.

Se puede describir la onda portadora matemáticamente como:

$$C_t(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

Donde A_c es la amplitud de la señal portadora y f_c es la frecuencia de la portadora.

Por lo tanto puede describirse la señal modulada en amplitud como:

$$S(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

$$S(t) = A_c + k_a m(t) \cos(2\pi f_c t)$$

Donde $m(t)$ es la señal y k_a es la sensibilidad de la amplitud del modulador.

Se puede describir también la modulación en frecuencia como:

$$S(t) = A_c \cos(2\pi f_c + k_f m(t) t)$$

Donde k_f es la sensibilidad a la frecuencia del modulador.

Y por último la modulación de fase es como sigue:

$$S(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + k_f m(t) t)$$

Donde k_f es la sensibilidad a la fase del modulador. La modulación por fase y por frecuencia también son llamadas “modulación en ángulo”.

1.4.3. Esquemas de modulación por desplazamiento de fase PSK para transmisiones satelitales

Como las condiciones del enlace satelital pueden cambiar durante la transmisión digital, la altura de la transmisión también puede cambiar con la condición del enlace. Se dificulta para un enlace satelital utilizar amplitud modulada (AM). La frecuencia modulada (FM) es difícil de aplicar e ineficiente en la utilización del ancho de banda. En comparación con los esquemas AM y FM, la modulación por fase PM tiene las ventajas de FM y es fácil de implementar.

Por lo tanto, para la transmisión por satélite, la modulación por fase PM es la utilizada. Muchos esquemas se han desarrollado para realizar intercambios entre potencia, frecuencia y la eficiencia de la implementación.

El sistema más simple de modulación es la modulación binaria por desplazamiento de fase (BPSK), que es capaz de transmitir un bit en un período de la frecuencia de la portadora. Cuanto más alto sea el orden de modulación, mayor será la eficiencia del ancho de banda. En el desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), por ejemplo, es capaz de transmitir dos *bits* en el período de la frecuencia de la portadora para la misma relación energía de *bit* contra ruido E_b/N_o que PSK, pero a costa de menor rendimiento debido a errores.

Se llama demodulación coherente o detección coherente si el oscilador local es exactamente coherente o síncrono tanto en frecuencia y fase, con la onda portadora utilizada para la modulación. De lo contrario se llama demodulación no coherente o detección no coherente.

1.4.4. Esquema de modulación por desplazamiento de fase binario BPSK

En un sistema binario coherente PSK, el par de señales utilizadas para representar los símbolos binarios 1 y 0, respectivamente, se definen como:

$$S_1 = \frac{\sqrt{2E_b}}{T_b} \cos(2\pi f_c)$$

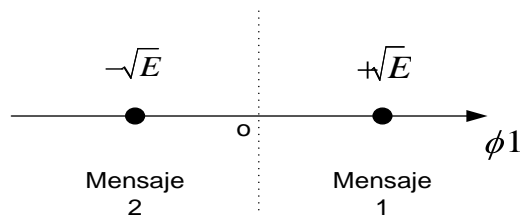
$$S_2 = \frac{\sqrt{2E_b}}{T_b} \cos 2\pi f_c + \pi = -\frac{\sqrt{2E_b}}{T_b} \cos 2\pi f_c$$

Estos pueden ser representados en un diagrama o constelación con base en la función de energía:

$$\phi_1 = \frac{\sqrt{2E_b}}{T_b} \cos(2\pi f_c)$$

La figura 10 muestra el diagrama señal-espacio para BPSK.

Figura 10. Representación geométrica del esquema BPSK



Fuente: HAYKIN, Simon. Communication Systems. p. 350.

1.4.5. Esquema de modulación por desplazamiento de fase en cuadratura QPSK

Del mismo modo, en un sistema coherente en cuadratura PSK, hay cuatro vectores de señal definidos como:

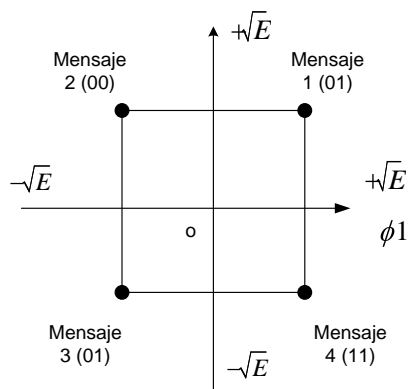
$$S_i = \sqrt{E} \cos\left((2i - 1) \frac{\pi}{4}\right) \quad S_i = -\sqrt{E} \cos\left((2i - 1) \frac{\pi}{4}\right)$$

Estos pueden ser representados geoméricamente con dos funciones básicas ortogonales como se muestra en la figura 11.

$$\phi_1 = \frac{\sqrt{2}}{T_b} \cos(2\pi f_c t)$$

$$\phi_2 = \frac{\sqrt{2}}{T_b} \sin(2\pi f_c t)$$

Figura 11. Representación ortogonal del esquema QPSK



Fuente: HAYKIN, Simon. Communication systems. p. 355.

1.4.6. Esquema de modulación por desplazamiento mínimo de fase con filtrado Gaussiano GMSK

Para mejorar la eficiencia del ancho de banda y la tasa de errores, se pueden aplicar 2 técnicas: desplazamiento mínimo de fase y “moldeado” del pulso rectangular a través de un filtro gaussiano. W indica el ancho de banda de 3 dB de banda base del filtro gaussiano.

La función de transferencia $H(f)$ y la respuesta de impulso $h(t)$ del filtro se definen como las siguientes, respectivamente:

$$H(f) = \exp\left(-\frac{\log 2}{2} \frac{f^2}{W}\right)$$

$$h(t) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\log 2} \exp\left(-\frac{2\pi^2}{\log 2} w^2 t^2\right)$$

Las respuestas de un filtro gaussiano a un pulso rectangular de la amplitud unitaria y duración T_b (centrado en el origen) están dadas por:

$$g(t) = \int_{-T_b/2}^{T_b/2} h(t-\tau) d\tau = \frac{\sqrt{2\pi}}{\log 2} w \int_{-T_b/2}^{T_b/2} \exp\left(-\frac{2\pi^2}{\log 2} w^2 (t-\tau)^2\right) d\tau$$

La respuesta al pulso $g(t)$ constituye la frecuencia del pulso del modulador GMSK con el producto tiempo-ancho de banda wT_b , jugando el rol de parámetro de diseño. A medida que wT_b se reduce, el tiempo de propagación del pulso se incrementa.

La limitación de la condición $wT_b = \infty$ corresponde al caso del MSK ordinario. Cuando wT_b es inferior a la unidad cada vez más de la potencia transmitida, es concentrada dentro de la banda de paso de la señal GMSK.

1.4.7. Rata de errores de *bit*

Inevitablemente, errores de *bit* ocurren durante la transmisión. La tasa de errores de *bit* depende de la relación señal a ruido S_N en el receptor. Debido a esto, para un nivel aceptable de tasa de error, un mínimo de nivel señal a ruido debe ser garantizado en el receptor, y por tanto, conservado en el transmisor.

La relación entre C_N (relación portador a ruido) y la tasa de error de *bit* del canal es una medida del desempeño de un enlace digital. Esta se calcula a partir de la relación C_N para un determinado esquema de modulación por:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{C}{N_o} - 10 \log_{10} \text{ (tasa de información)}$$

$$\frac{C}{N} - 10 \log_{10} \text{ (tasa de información / ancho de banda)}$$

La tasa de transmisión de datos en relación al ancho de banda R_B se denomina la eficiencia del espectro o eficiencia del ancho de banda de la modulación.

Para un determinado ancho de banda el valor E_b/N_o tiene que ser lo suficientemente grande para alcanzar la tasa de transmisión de *bits* con un buen desempeño en términos de tasa de errores o probabilidad de errores de *bit*. Existen funciones para calcular las tasas de error de símbolo.

El número de *bits* por símbolo es $\log_2(M)$, donde (M) corresponde a los niveles codificados del esquema de modulación. La tasa de error de *bits* P_b está relacionada con la tasa de error del símbolo P_s por:

$$P_b = \frac{P_s}{\log_2(M)}$$

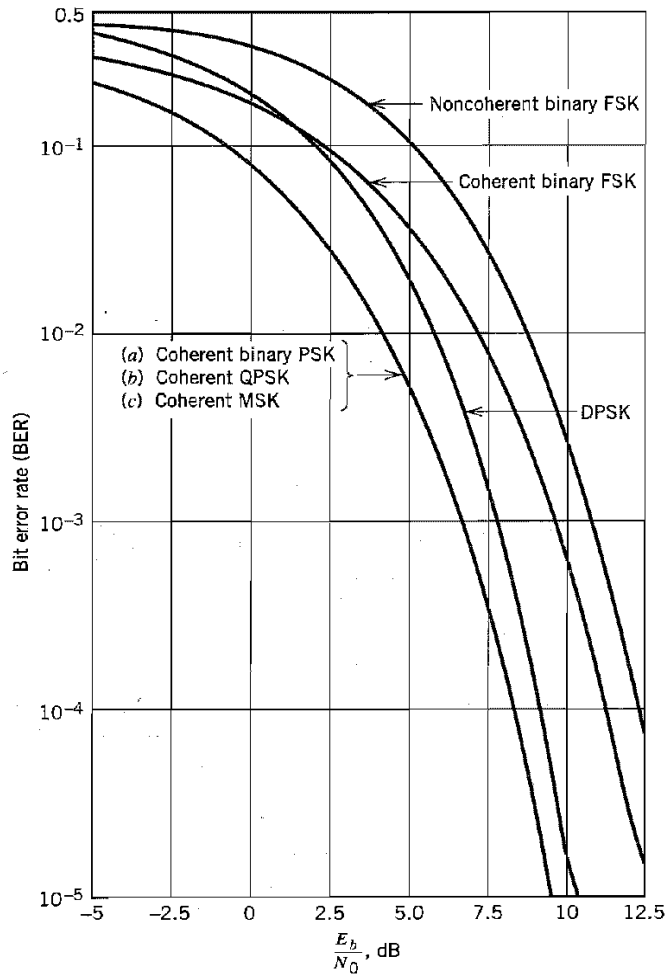
La figura 12 muestra algunos de los resultados obtenidos, calculando las fórmulas de la tabla I.

Tabla I. **Resumen de fórmulas para el cálculo de la tasa de error de *bit* de diferentes esquemas de modulación digital**

ESQUEMA DE SEÑALIZACIÓN	TASA DE ERROR DE BIT
PSK Coherente QPSK Coherente MSK Coherente	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{E_b/N_0}\right)$
FSK Coherente	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{E_b/2N_0}\right)$
DPSK	$\frac{1}{2} \exp\left(-E_b/N_0\right)$
FSK No Coherente	$\frac{1}{2} \exp\left(-E_b/2N_0\right)$

Fuente: HAYKIN, Simon. Communication systems. p. 417.

Figura 12. Desempeño del ruido en los esquemas de modulación



Fuente: HAYKIN, Simon. Communication systems. p.418.

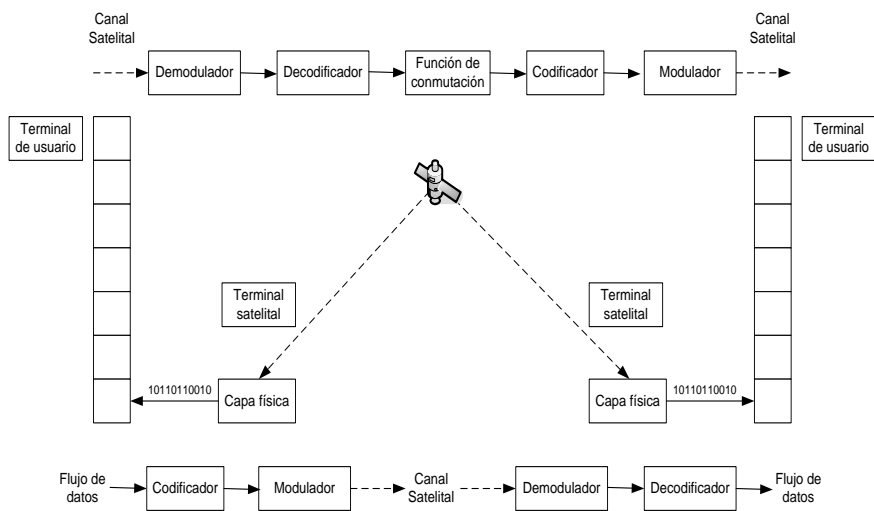
1.4.8. Esquema de red satelital en la capa física

En el contexto del protocolo modelo de referencia OSI, las redes satelitales inician desde la capa física. La capa física acepta tramas de la capa de enlace y luego transmite la trama en forma de un flujo de *bits* a sus pares a través del satélite.

Dependiendo en la implementación del *payload* (carga de información) del satélite, puede existir un satélite transparente simplemente reenviando la señal de radio de un enlace ascendente a uno descendente. O puede haber un procesador a bordo procesando la señal digital y a continuación enviando información al enlace de bajada. También es posible incluso esquemas más complicados de procesamiento, incluyendo funciones de *switching* (conmutación) o *routing* (enrutamiento).

La figura 13 muestra las funciones de la capa física en la creación de redes de satélite en el contexto del protocolo de referencia OSI. Se puede observar que una terminal de usuario genera un flujo de *bits*. Los codificadores procesan la secuencia con codificación de corrección de errores y codificación de canal. El modulador utiliza la señal codificada para modular la señal portadora a fin de transmitir la señal por el enlace satelital.

Figura 13. **Diagrama de bloques de las funciones de la capa física de un enlace satelital**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 305.

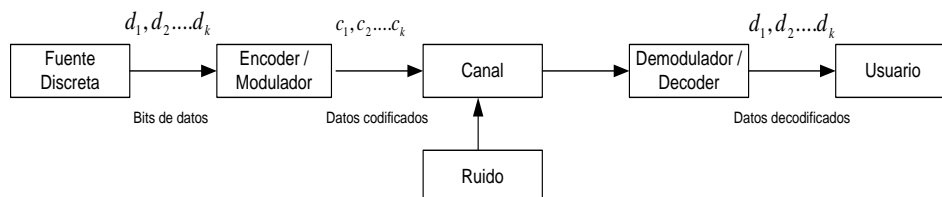
En el otro lado de la red satelital, el proceso se realiza a la inversa, para obtener la información en forma de flujo de *bits* en el terminal destino. Dentro de la red de satélites, el procesamiento es transparente para los usuarios que pueden incluir diferentes funciones de procesamiento a bordo o incluso enlaces intersatelitales.

La modulación es necesaria para que la señal pueda ser transmitida por un canal de radio o portador. Además, la codificación de corrección de errores se utiliza antes de la codificación del canal para corregir posibles errores de transmisión. De esta manera, se mejora la calidad de la transmisión reduciendo la probabilidad de error.

1.5. Corrección de errores en adelanto

Las técnicas de corrección de errores en adelanto (FEC) tratan de introducir cierta redundancia en la transmisión de datos, de manera que cuando un receptor los recibe, utiliza esta redundancia para detectar y corregir los errores (si existen) causados por la transmisión o por el medio, como se ilustra en la figura 14. Los códigos FEC existen en una amplia gama de clases.

Figura 14. **Codificación de corrección errores en adelanto**



Fuente: HAYKIN, Simon. Communication systems. p. 627.

1.5.1. Código de bloques lineal

Los códigos de bloque son códigos "sin memoria" que direccionan k códigos binarios de entrada a n señales binarias de salida, donde $n > k$ para redundancia. Si se hace que $m = m_0, m_1, \dots, m_{k-1}$ sea el mensaje de *bits* $m = b_0, b_1, \dots, b_{n-k-1}$ y P sea el coeficiente de la matriz conocida por el transmisor y el receptor $k \times (n - k)$, se pueden generar los *bits* de paridad como sigue:

$$b = mP$$

Si la palabra código $c = b : m$ es transmitida, se es capaz de detectar algunos errores y corregirlos utilizando la ecuación anterior. Un ejemplo de códigos lineales es la codificación Hamming (n, k) , donde la longitud de los bloques es $n = 2^r - 1$, el número de *bits* del mensaje es $k = 2^r - r - 1$ (o $k + r - a = 2^r$), y el número de *bits* de paridad es $n - k = r$

El código Bose Chaudhuri Hocquenghem (BDH) es un código lineal con los siguientes parámetros: el largo del bloque es $n = 2^m - 1$, el número de *bits* en del mensaje es $k \geq (n - mt)$, y la distancia mínima es $d_{min} \geq 2t + 1$, donde m es cualquier número entero y $t = \binom{2^m - 1}{2}$ es el número máximo de errores detectables. El código Reed Solomon (RS) es una subclase de códigos BCH no binarios. Un código RS de (n, k) es utilizado para codificar m *bits* en bloques consistentes de $n = (2^m - 1)$ símbolos = $m = (2^m - 1)$ *bits*. Un error t tiene los siguientes parámetros: la longitud del bloque $n = (2^m - 1)$ símbolos, el tamaño del mensaje es k símbolos, el tamaño de la comprobación de paridad es $n - k = 2t$ símbolos, y la distancia mínima es $d_{min} \geq 2t + 1$ símbolos.

1.5.2. Códigos cíclicos

Sea $g(X)$ el polinomio de menor grado de $(n - k)$, llamado también el generador polinomial del código cíclico, que se define como sigue:

$$g(X) = 1 + \sum_{i=1}^{n-k-1} g_i X^i + X^{n-k}$$

La codificación cíclica se utiliza a menudo para fines de comprobación de errores debido a su capacidad para detectar el error de ráfaga; también es llamado código de redundancia cíclica (CRC). La tabla II muestra algunos códigos útiles.

Tabla II. Códigos de chequeo cíclico de redundancia (CRC)

Código	Generador polinomial $g(X)$	$n - k$
Código CRC-12	$1 + X + X^2 + X^3 + X^{11} + X^{12}$	12
Código CRC-12 (USA)	$1 + X^2 + X^{15} + X^{16}$	16
Código CRC-ITU	$1 + X^5 + X^{12} + X^{16}$	16

Fuente: HAYKIN, Simon. Communication systems. p. 653.

Los códigos binarios CRC son capaces de detectar los siguientes patrones de error:

- Todos los errores de ráfaga de longitud $(n - k)$ o menos.
- Una fracción de ráfagas de error de longitud igual a $(n - k - 1)$ que la fracción mayor o igual que $1 - 2^{-(n-k-1)}$.

- Todas las combinaciones de $(d_{min} - 1)$ o menor número de errores, donde d_{min} es la distancia mínima de un código bloque lineal. La distancia se define como el número de posiciones de un par de vectores de código, con su respectiva diferencia; es conocida también como distancia Hamming.
- Todos los patrones de error con un número impar de errores si el polinomio generador $g(X)$ para el código tiene un número par de coeficientes no cero.

1.5.3. Codificación Trellis y códigos convolucionales

Los códigos Trellis utilizan “memoria” para recordar $(k - 1)$ señales de entrada inmediatamente anterior al bloque objetivo de L señales de entrada. Estas $K - 1 + L = (K + L - 1)$ señales binarias de entrada se utilizan en la generación de n $K - 1 + L$ salidas binarias correspondientes a L entrada de señales. Por lo tanto, la tasa del código es:

$$\frac{L}{n(K + L - 1)}$$

La codificación convolucional es un subconjunto de los códigos Trellis. El codificador convolucional puede ser asociado a una máquina de estados finitos almacenando $(k - 1)$ bits de mensaje. Al tiempo j , la porción de la secuencia de mensaje contiene los bits k más recientes $(m_{j-k+1}, m_{j-k+2}, \dots, m_{j-1}, m_j)$, donde m_j es el bit actual. Un decodificador convolucional toma en cuenta tal memoria cuando trata de estimar los datos de información que produce la secuencia recibida de bits. Esto es llamado el método de la máxima similitud para decodificar códigos convolucionales.

En 1967, Andrew Viterbi desarrolló una técnica de decodificación de códigos convolucionales utilizando este método, que se ha convertido desde entonces en el estándar para decodificar códigos convolucionales.

1.5.4. Códigos concatenados

Los codificadores de bloque lineal son más eficaces para corregir los errores de ráfaga y los codificadores convolucionales son más eficaces en errores aleatorios. Sin embargo, pueden producir errores de ráfaga si hay demasiados errores aleatorios. En 1974, Joseph Odenwalder combinó estas técnicas de codificación para formar un código concatenado.

El arreglo consiste de un bloque de código que se utiliza como código interno. Luego un código convolucional va de segundo como código para codificación. En la descodificación, el código convolucional externo sigue en primer lugar; luego el bloque de código interno continúa después.

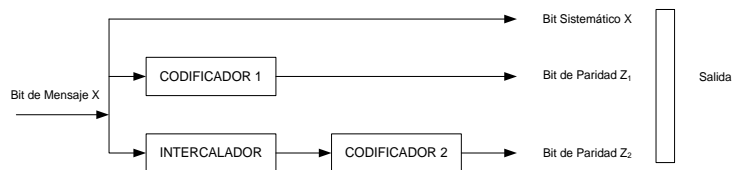
El desempeño puede ser incrementado si técnicas de *interleaving* entre las dos etapas de códigos reducen cualquier error de ráfaga que podría ser demasiado largo para que el bloque de código pueda hacer frente a tal situación con eficacia.

Las técnicas de intercalación son funciones de mapeo de entrada y salida que permutan el orden de un flujo de *bits* o símbolos, de modo que la posición de los *bits* intercalados es diferente a la del flujo de *bits* inicial. Una ráfaga de errores puede ser dispersada en errores aleatorios sencillos dentro del flujo de *bits* de datos, cuando se realiza el proceso inverso de la intercalación. Al dispositivo o función de un bloque que realiza el proceso de intercalación se le llama *interleaver*.

1.5.5. Códigos turbo

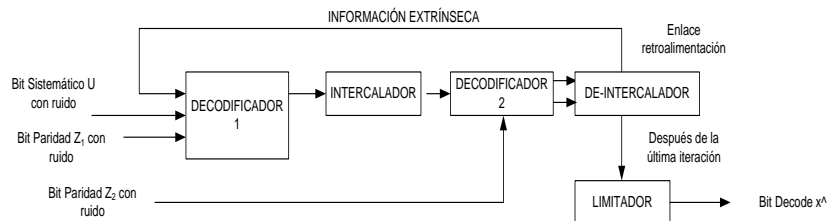
Los códigos turbo son los más poderosos FEC. Desarrollados en 1993 por Claude Berrou permiten las transmisiones de comunicación más cerca del límite de Shannon. Un código turbo consta de dos codificadores y un *interleaver* a fin de que la información extrínseca sea utilizada recursivamente para maximizar la probabilidad de que los datos sean descifrados correctamente. Cada uno de los dos códigos puede ser cualquiera de los codificadores existentes. El codificador es simple y directo como se muestra en la figura 15. El decodificador es más complicado donde la información extrínseca se utiliza recursivamente. Un diagrama de bloques del decodificador se muestra en la figura 16.

Figura 15. Diagrama de bloques del codificador turbo



Fuente: HAYKIN, Simon. Communication systems. p. 674.

Figura 16. Diagrama de bloques del decodificador turbo



Fuente: HAYKIN, Simon. Communication systems. p. 678.

1.5.6. Desempeño de los códigos FEC

El receptor puede decodificar los datos en la mayoría de los casos, incluso si se han corrompido durante la transmisión haciendo uso de técnicas FEC. El receptor puede no ser capaz de recuperar los datos en caso de que hayan demasiados *bits* corrompidos, ya que solo puede tolerar un cierto nivel de errores.

Se ha descrito que la relación E_b/N_o es el parámetro que afecta la cantidad de errores de transmisión por satélite para ciertos códigos y ancho de banda. Los códigos FEC permiten a los enlaces satelitales tolerar mayores errores de transmisión de datos que los datos, sin codificación en términos de la cantidad de errores.

Esto es muy útil ya que en la transmisión por satélite puede ser difícil de alcanzar un cierto nivel de rendimiento debido a la limitación de la potencia de la transmisión en determinadas condiciones del enlace. Estos códigos, a expensas de un mayor requerimiento de ancho de banda o un mayor *overhead* que se traduce en una reducción de rendimiento, proveen una ganancia de codificación para mantener la calidad del enlace deseada en el mismo nivel de E_b/N_o .

1.6. Técnicas de acceso múltiple

El esquema de acceso se refiere a la distribución de un canal común entre múltiples usuarios de posibles multiservicios.

Existen tres formas principales de esquemas de acceso múltiple:

- Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA)
- Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA)
- Acceso múltiple por división de código (CDMA)

1.6.1. Acceso múltiple por división de frecuencia FDMA

FDMA es una técnica tradicional donde varias estaciones terrenas transmiten simultáneamente pero en diferentes frecuencias a través de un *transponder*. FDMA es atractivo debido a su simplicidad de acceso por las estaciones terrenas.

El FDMA comúnmente usado es el canal único por portadora. Es de uso común para la telefonía, sistemas VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) y servicios de terminal móvil para las redes de acceso. Para multiplexar una serie de canales, para compartir un portador de redes de tránsito, se utiliza las técnicas FDMA. No ofrece flexibilidad para aplicaciones con distintos requerimientos de ancho de banda. Al utilizar múltiples canales por portadora para redes de tránsito, FDMA introduce importantes problemas con productos de intermodulación, y por tanto, unos pocos dB de disminución en la saturación de la potencia de transmisión, es requerida para sobrepasar los problemas de no linealidad a alta potencia.

1.6.2. Acceso múltiple por división de tiempo TDMA

En TDMA, a cada estación terrena se le asigna un espacio de tiempo de ancho de banda para transmitir información. Cada espacio de tiempo puede ser usado para transmitir sincronización, control e información del usuario.

La sincronización es alcanzada utilizando un tiempo de ráfaga de referencia. TDMA es más conveniente para procesos digitales y transmisión. Solamente un portador de TDMA puede acceder al *transponder* del satélite a la vez.

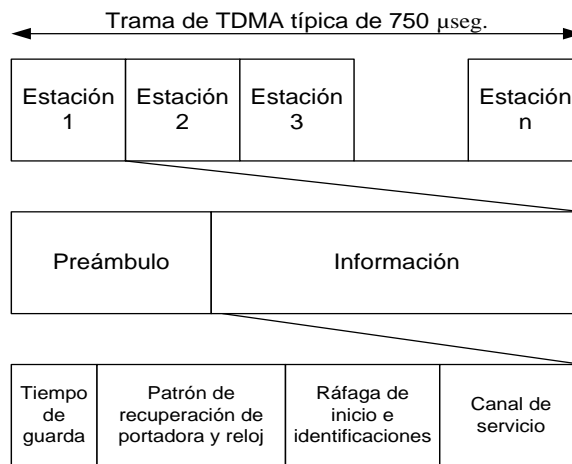
TDMA puede alcanzar eficiencias en la utilización de la potencia y el ancho de banda si la pérdida en el tiempo de guarda se mantiene al mínimo cuando se utilizan técnicas de temporización más precisas. Este esquema es usado ampliamente para redes de tránsito debido al alto grado de utilización del ancho de banda a altas velocidades de transmisión. Claramente las tramas de TDMA transmitidas por estaciones terrenas no deben interferir unas con otras. Debido a esto, cada estación debe ser capaz de controlar la fase de ráfaga durante la transmisión. Cada ráfaga debe arribar al transponder del satélite en un tiempo justo, en referencia a la ráfaga de referencia.

Esto asegura que no se superpongan dos ráfagas transmitidas y que el tiempo de guarda entre cualquiera de las ráfagas es lo suficientemente pequeño para alcanzar una alta eficiencia en la transmisión; pero también debe ser lo suficientemente grande para evitar colisiones entre espacios de tiempo, ya que no hay un reloj capaz de mantener la sincronía perfectamente. Sincronización es el proceso por el cual se provee información de coordinación a todas las estaciones y se controlan las ráfagas de TDMA para que se sitúen dentro de los espacios de tiempo necesarios.

Todo esto debe funcionar sin importar que cada estación terrestre esté fija en relación con los satélites geosincrónicos, ya que dichos satélites se encuentran en una longitud nominal y típicamente especificada para moverse dentro de una “ventana” con lados de 0,002 grados, vistos desde el centro de la Tierra.

Por otra parte, la altitud de los satélites varía como consecuencia de una órbita residual excéntrica. El satélite puede encontrarse en cualquier lugar dentro de una caja de $75 \times 75 \times 85 \text{ Km}^3$, en el espacio. El movimiento de vaivén del satélite provoca una variación de altitud de unos 85 Km., resultando en un retraso de alrededor de $500 \mu\text{seg}$ y en un cambio en las señales conocido como el efecto Doppler. La figura 17 muestra un ejemplo de TDMA.

Figura 17. **Esquema satelital de TDMA**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 297.

1.6.3. Acceso múltiple por división de códigos CDMA

CDMA es una técnica de acceso que emplea la técnica de espectro expandido (*spread spectrum*) en la que cada estación terrena utiliza un único código compartido para acceder al ancho de banda. Todos estos códigos son ortogonales entre sí. Para dar cabida a un gran número de usuarios, el código consta de un gran número de *bits* resultando en señales de banda ancha. También es conocido como espectro expandido de acceso múltiple (SSMA).

Uno de los rasgos del espectro expandido es que la operación es posible en presencia de altos niveles de interferencia no correlacionada y esa es una importante característica antibloqueos en las comunicaciones militares. La función de expansión de banda ancha se deriva de un código de secuencia pseudoaleatoria y la señal transmitida resultante ocupa un ancho de banda similar.

En el receptor, la señal de entrada es correlacionada con la misma función expandida (sincronizada con la señal), para reproducir la información original. A la salida del receptor se encuentran pequeños productos residuales de la correlación de las señales que dan como resultado un ruido aditivo conocido como autointerferencia. A medida que el número de usuarios en el sistema aumente, el nivel de ruido total se incrementará y degradará el desempeño de la tasa de error de *bit*. Esto dará un límite para el número máximo de canales simultáneos que pueden ser alojados en las frecuencias.

CDMA permite la degradación gradual del desempeño con el aumento del número de conexiones. En la creación de redes satelitales, se debe prestar atención a las propiedades de utilización eficiente del ancho de banda y potencia. En última instancia, de la capacidad que las técnicas de acceso múltiple pueden ofrecer. La tabla III muestra una breve comparación entre FDMA, TDMA y CDMA.

1.7. Asignación de ancho de banda

Los esquemas de acceso múltiple proporcionan mecanismos para dividir el ancho de banda en segmentos adecuados para las aplicaciones y servicios. Los esquemas de asignación de ancho de banda proveen un mecanismo para asignar el ancho de banda en términos de transmisión y tiempo.

Tabla III. **Comparación entre FDMA, TDMA y CDMA**

Características	FDMA	TDMA	CDMA
Utilización de ancho de banda	Canal único por portadora (SCPC)	Canales múltiples por portador – ubicación	SCPC, ubicación parcial o total
Rechazo a la interferencia	Limitada	Limitada con saltos de frecuencia	Puede suprimir interferencia, hasta el límite de ruido
Efectos de intermodulación	Muy sensible	Menos sensible	Menos sensible
Desplazamiento de la frecuencia (Doppler)	Limitado en ancho de banda	Tiempo de ráfaga limitado	Removido por receptor
Flexibilidad del espectro	Utiliza menos ancho de banda por portadora	Uso moderado por portadora	Larga demanda en segmentos continuos
Capacidad	Capacidad básica disponible	Mejoramiento en capacidad por saltos de frecuencia	Capacidad indeterminada

Fuente: elaboración propia.

Los esquemas de asignación del ancho de banda puede ser típicamente clasificados en tres clases: asignación fija del acceso, acceso múltiple asignado por demanda, y acceso aleatorio. Estas técnicas pueden ser utilizadas para satisfacer las necesidades de los diferentes tipos de tráfico de los usuarios en términos de tiempo y duración de velocidades de transmisión. Estos sistemas se pueden utilizar individualmente o en combinación dependiendo de las aplicaciones.

1.7.1. Asignación fija de acceso

Con la asignación fija del acceso a la conexión de una terminal se le asigna una cantidad constante de ancho de banda por una período largo de tiempo (años, meses, semanas, días). Esto significa que cuando la conexión se encuentra sin utilización, el ancho de banda del enlace es subutilizado.

1.7.2. Asignación por demanda

La asignación por demanda asigna los recursos de ancho de banda solo cuando se necesitan. Dispone de dos variables: tiempo de duración y la velocidad de transmisión de datos.

El tiempo puede ser fijo o variable. Para un determinado tiempo de duración, la velocidad de transmisión de datos puede ser fija o variable. Con la asignación fija, la cantidad de ancho de banda es fija, lo que significa que no es muy eficiente si la cantidad de datos varía en un amplio rango. Con la asignación variable, el ancho de banda asignado cambia con el cambio de la tasa de transmisión de datos. Si los patrones de cambio son desconocidos para el sistema, también es difícil conocer la demanda de tráfico.

Incluso si se utiliza la información de señalización, el retardo de propagación en las redes satelitales dificulta la respuesta a las demandas a corto plazo.

Normalmente este sistema es utilizado para las demandas de un período corto de tiempo y variación limitada en términos de horas y minutos. También permite la asignación de ancho de banda en función de las condiciones del tráfico instantáneo. Para dar cabida a una combinación de tipos de tráfico el ancho de banda puede dividirse en varias secciones, cada una de operando bajo su propio esquema de asignación de ancho de banda. El sistema observa las condiciones del tráfico y hace los ajustes dinámicamente de acuerdo con las condiciones del mismo. Esto es llamado esquema de asignación dinámico.

1.7.3. Acceso aleatorio

Cuando las demandas de ancho de banda son muy cortas, como una trama de *bits* de datos, se torna impráctico y existe demasiado *overhead* para cualquier esquema de asignación que necesite hacer uso eficiente del ancho de banda de los recursos. Por lo tanto, el acceso aleatorio es la opción obvia. Este permite que diferentes terminales transmitan simultáneamente debido a que la transmisión es muy corta por lo que esa tendrá una alta tasa de éxito para condiciones de poco tráfico.

Existe la posibilidad de que las transmisiones colisionen entre sí. Dicha probabilidad de colisión se incrementa a medida que se incrementa la carga de tráfico. Cuando la información se corrompe durante la transmisión debido a una colisión, la información debe ser retransmitida nuevamente. El sistema también necesita corrección de paquetes o de pérdidas, observando la información transmitida por el receptor.

Tal esquema se basa en el esquema de discrepancias. Las discrepancias tienen que ser resueltas para incrementar la tasa de éxito. Normalmente si hay una colisión, la terminal que transmite la información espera un tiempo aleatorio para reiniciar la transmisión, si hubiera de nuevo otra colisión, esta aumentaría el tiempo de nuevo antes de intentar de nuevo transmitir, hasta evitar una nueva colisión.

El retardo aleatorio de transmisión reduce efectivamente la carga de tráfico gradualmente a un nivel razonablemente operativo. El acceso aleatorio puede alcanzar una tasa de transferencia razonable pero no puede garantizar el desempeño a terminales individuales debido a la naturaleza del acceso aleatorio.

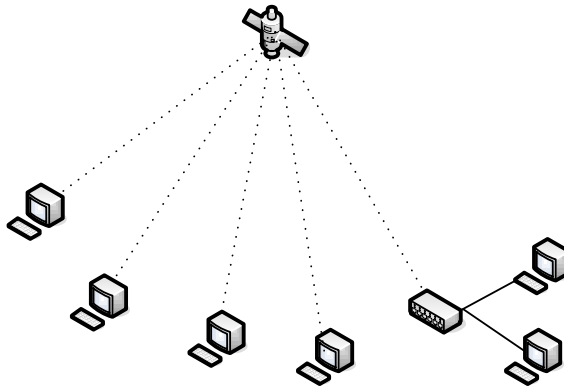
1.8. Cuestiones referentes a las redes satelitales

En las redes satelitales un satélite “transparente” es básicamente un repetidor. Puede considerarse también como un espejo que 'dobla' el enlace del cielo para conectar las estaciones terrenas. Los satélites con procesamiento a bordo o conmutación a bordo, pueden ser considerados como nodos de red en el cielo.

1.8.1. Conexiones satelitales de un solo salto

En este tipo de configuración cualquier conexión punto a punto se enruta a través de un satélite solamente una vez. Cada satélite está configurado como una "isla" para permitir que los nodos de la red en Tierra se interconecten con cualquier otra estación en Tierra a través de esta “isla”. La topología de satélite forma una estrella cuando este se encuentra en el centro, como se muestra en la figura 18.

Figura 18. **Topología de un salto**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 326.

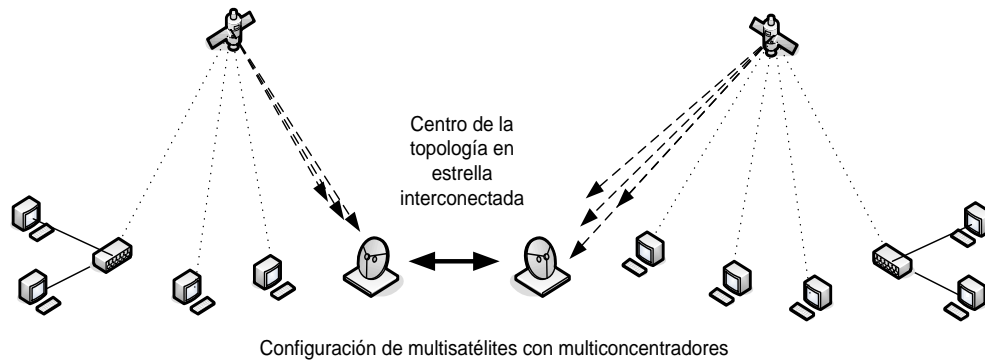
1.8.2. Conexiones satelitales de múltiples saltos

En este tipo de configuración, una conexión punto a punto es enrutada por la red satelital más de una vez a través del mismo satélite o por diferentes satélites.

El primer caso, es ampliamente utilizado en terminales de apertura muy pequeña (VSAT) donde la señal entre dos terminales es demasiado débil para hacer una comunicación directa y un gran concentrador se utiliza para amplificar la señal de la comunicación entre terminales. En este último caso, un solo salto puede no ser suficientemente para llegar a terminales remotas, por lo tanto, más saltos se utilizan para las conexiones.

La topología de la red de satélites forma una estrella con un concentrador en el centro de la estrella o estrellas múltiples donde los repetidores están interconectados para unir a los satélites, como se muestra en la figura 19.

Figura 19. **Topología de saltos múltiples con un repetidor al centro**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 326.

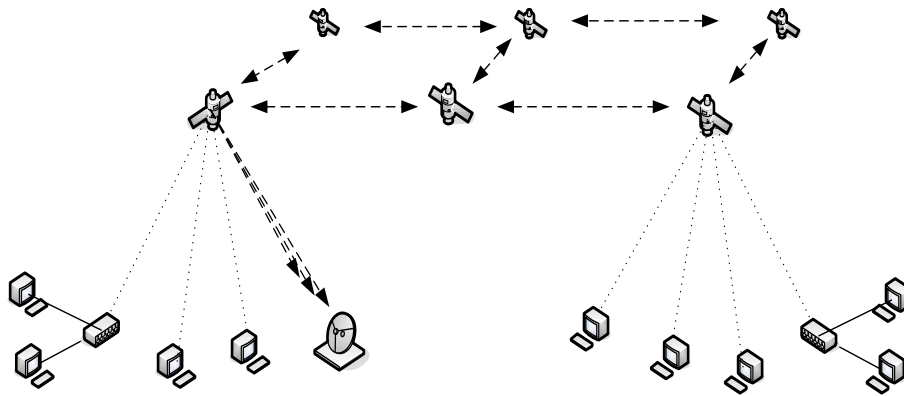
1.8.3. Enlaces intersatelitales

Para reducir el segmento terrestre de las conexiones de red, se introduce el concepto de enlaces intersatelitales (ISL). Sin ISL, el número de estaciones terrenas aumentaría para enlazar más satélites; en particular, para las constelaciones de órbitas bajas o geoestacionarias donde los satélites continuamente se mueven a través del cielo.

La topología de la red también cambia con el movimiento de la constelación. Como las posiciones entre los satélites son relativamente estables, se puede vincular las constelaciones de satélites para formar una red en el cielo.

Esto permite acceder a la red de satélites en el cielo desde la Tierra con un menor número de estaciones necesarias para enlazar todos los satélites en una red, como se muestra en la figura 20.

Figura 20. **Redes satelitales con enlaces intersatelitales.**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 414.

Otra de las ventajas de la utilización de ISL es que los satélites pueden comunicarse directamente entre sí por la línea de visión (línea-vista), disminuyendo el tráfico Tierra-espacio a través del espacio aéreo limitado de frecuencias y eliminando la necesidad de múltiples saltos Tierra-espacio. Sin embargo, esto requiere más sofisticados y complejos satélites de procesamiento a bordo, con funciones de conmutación y enrutamiento para apoyar el ISL.

Esto permite llevar a cabo las comunicaciones en regiones en que el satélite no pueda ubicar una estación terrestre de enlace, a diferencia de un satélite que actúa como un transponder.

Para satélites en diferentes planos de órbita, los enlaces intersatelitales cambian sus posiciones relativas debido a las rutas de línea-vista.

Entre los satélites cambiará el ángulo y longitud a medida que las órbitas se separen y converjan entre los cruces de órbitas, dando lugar a:

- Alta velocidad relativa entre los satélites
- Problemas en el control de seguimiento de las antenas
- El efecto Doppler de desplazamiento

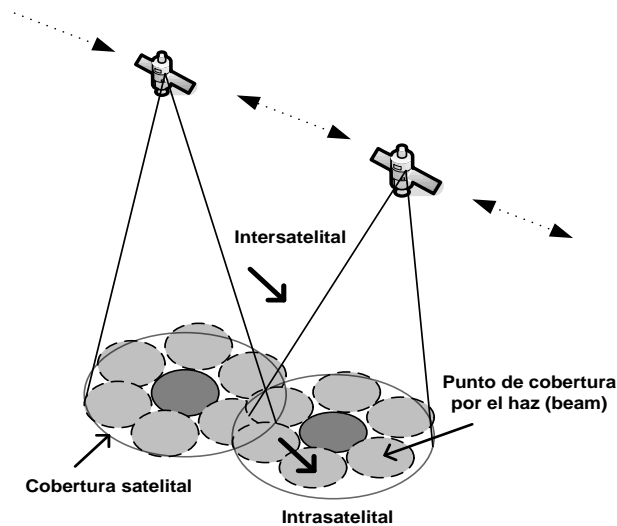
Se puede ver que se trata de un intercambio de complejidad en el cielo o en la Tierra, es decir, es posible el diseño de una constelación de red de satélites, sin o con ISL, con un muy pequeño número de estaciones terrestres o un moderado número de estaciones terrestres para aumentar la conectividad entre la red de satelital y red terrestre.

1.8.4. Handover

El *handover* es un proceso de transferencia de un enlace de comunicación entre dos puntos de una red móvil. El traspaso es necesario para mantener los vínculos de las conexiones desde su origen al destino. La cobertura por parte de los satélites se traslada junto con el satélite y los enlaces deben ser transferidos de un satélite al siguiente (traspaso intersatelital), como se muestra en la figura 21. Cuando el siguiente satélite no tiene un circuito disponible para realizar el traspaso, los enlaces se pierden, lo que obliga a que las terminales con orientación a la conexión finalicen. Este evento es referido como una falla en el traspaso.

Los traspasos prematuros generalmente resultan en un traspaso innecesario y traspasos con retardo resultan en una alta posibilidad de finalización forzada del enlace. El traspaso puede ser iniciado basado en el nivel de potencia de la señal y/o medidas de distancia de la posición.

Figura 21. **Conceptos de traspaso intersatelital y traspaso intrasatelital**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 467.

Dos escenarios de traspaso son posibles: traspaso de satélites intraplanos y de satélites interplanos.

El traspaso satelital intraplano asume que el suscriptor se mueve de un haz de cobertura a otro dentro del área de cobertura del satélite. El *gateway* sabe que el suscriptor se aproxima a la frontera entre ambos satélites, ya que conoce la ubicación del suscriptor y la de los satélites.

El *gateway* enviará un mensaje al satélite que da cobertura inicialmente para prepararse a ceder al suscriptor en un traspaso y envía un mensaje a otro satélite en el mismo plano, para indicarle que se prepare para aceptar al suscriptor. El *gateway* enviará entonces un mensaje a la estación móvil vía satélite para que se sincronice con el nuevo satélite.

El traspaso es completado cuando el satélite envía un mensaje a la estación informando la nueva frecuencia a utilizar. El *gateway* es la entidad inteligente en este caso de *handover*.

El traspaso satelital interplano es igual al traspaso satelital intraplano, excepto que en lugar de manejar la conexión al satélite del mismo plano orbital, es manejado a un satélite en un diferente plano. La razón de realizar un traspaso a un satélite en otro plano se debe a que es posible que los satélites en el mismo plano no puedan cubrir al suscriptor por falta de canales disponibles para realizar el traspaso. Otra razón puede ser que el satélite en un diferente plano provea mejor servicio. A menor altitud los satélites tienen más problemas que a mayor altitud. El tiempo necesario para iniciar y ejecutar el traspaso debe ser muy corto; además los traspasos no deberían degradar la calidad del servicio para una conexión.

Con la velocidad orbital de los satélites y la dimensión de la cobertura, el tiempo para atravesar el área de traslape cubierta por los satélites es relativamente corto. Debido a las características de las constelaciones de satélites, una terminal puede ser cubierta por al menos dos satélites. Esto ofrece la posibilidad de optimizar el traspaso respecto de la calidad de servicio de cada conexión y servir a un gran número de conexiones. Con el desarrollo de las tecnologías de las terminales y la integración con funciones del sistema de posicionamiento global (GPS), es posible que las terminales del satélite sean capaces de proveer más apoyo al proceso de traspaso.

1.8.5. Traspasos satelitales intrahaz e interhaz

Los traspasos de haz tienen dos escenarios: traspasos intrahaz e interhaz.

Se supone la interacción entre dos satélites “S” y “T” como ejemplo para describir los dos escenarios posibles. Los traspasos intrahaz asumen que el suscriptor se encuentra en el haz A utilizando la frecuencia “1” y está asociado con el satélite “S”. A medida que el haz se aproxima a otra región geográfica, la frecuencia “1” puede no estar disponible.

Existen dos posibles razones para esto: la primera son las regulaciones por parte del gobierno (pueden no estar disponibles al acercarse a dicha región), y la otra razón es interferencia, la cual puede ser causada cuando el satélite “S” se mueve muy cerca de otro satélite, utilizando la misma frecuencia.

En este caso, aunque el suscriptor siga en el haz A (satélite “S”), el satélite enviará un mensaje a la unidad móvil para cambiar a una frecuencia “2” de manera que se pueda mantener el enlace. El satélite es la entidad inteligente en este caso de traspaso. Los escenarios interhaz permiten al *gateway* terrestre o terminales de estación terrestre, monitorear continuamente la potencia de la frecuencia “1” de radio utilizada en el haz A. También monitorean la potencia de radiofrecuencia de dos posibles haces para el traspaso, el haz B y el haz C por medio del canal general de transmisión. La estación determina cuándo iniciar el traspaso basado en la potencia de la señal de radiofrecuencia.

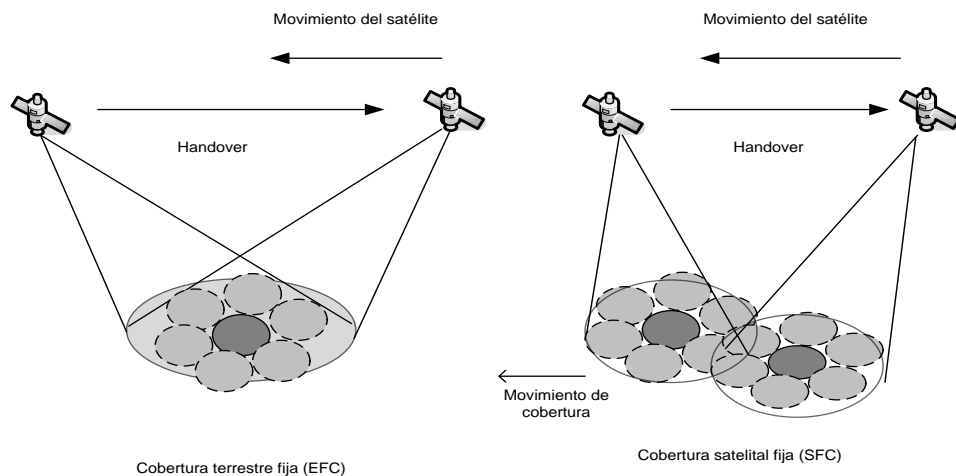
Si la señal del haz B se vuelve más fuerte que la señal usada en el haz A, la estación iniciará un requerimiento de traspaso al satélite, para conmutar al usuario al haz B. El satélite asigna una nueva frecuencia “3” a la estación, porque dos haces adyacentes no pueden usar la misma frecuencia.

El traspaso interhaz puede ser extremadamente frecuente si los haces tienen cobertura reducida y/o los satélites se mueven muy rápido.

1.8.6. Comparación entre la cobertura fija terrestre y la cobertura fija satelital

El problema del traspaso es considerado de acuerdo la constelación. Una constelación de satélites puede ser designada como de cobertura terrestre fija o de cobertura fija satelital, como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Constelaciones satelitales de cobertura terrestre fija y cobertura satelital fija



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 467.

En la cobertura terrestre fija, cada área de cobertura del haz satelital es fija en relación con la Tierra, debido a esto permite un período relativamente más largo del traspaso. En cambio, cada área de la cobertura fija satelital se mueve con el satélite, por esto, es fija en relación a los satélites pero es móvil respecto de la Tierra. Existe un período relativamente corto de traspaso porque el traslape entre la cobertura entre dos satélites puede ser muy pequeño con un desplazamiento muy rápido.

Los problemas que ocurren en constelaciones de cobertura terrestre fija se deben a la gran diferencia en los retardos de propagación en la señal de radio de cada satélite. La diferencia debido a las ubicaciones de los satélites, resulta en la pérdida de secuencia y pérdida o duplicación de cobertura de acuerdo con la posición relativa a la Tierra de los satélites.

El beneficio de los satélites multihaz es que cada uno de ellos puede brindar servicio al área de cobertura dentro de un número de barridos de haz de alta ganancia. Cada uno cubriendo un área pequeña a la vez. El barrido por haz angosto permite una eficiente reutilización del espectro, resultando en un sistema de alta capacidad con una alta densidad de canal y baja potencia de transmisión. Si este pequeño patrón barre la superficie de la Tierra a la velocidad del satélite, una terminal tendría un pequeño periodo de tiempo de comunicación antes del siguiente requerimiento de traspaso.

Como es el caso de los sistemas celulares terrestres, traspasos muy frecuentes resultan en una utilización ineficiente del canal, altos costos de procesamiento y baja capacidad del sistema. En la cobertura terrestre fija, cada satélite dirige los recursos del canal (frecuencias y tiempos asociados con cada cobertura) en el área de servicio. Siempre y cuando la terminal permanezca dentro de la misma cobertura fija terrestre, mantiene la misma asignación de canal para la duración de la transmisión, sin importar cuántos satélites estén involucrados.

Una base de datos contenida en cada satélite define el tipo de servicio permitido dentro de cada área de cobertura. Hazes pequeños permiten a las constelaciones satelitales evitar interferencia para o de áreas geográficas específicas.

Esto sería difícil de lograr con haces grandes o haces que se mueven con el satélite. Antenas activas son normalmente utilizadas para fijar los haces en la Tierra mientras los satélites vuelan a alta velocidad.

1.8.7. Enrutamiento dentro de las constelaciones de redes satelitales

Además de los enlaces intersatelitales ISL, enlaces entre satélites y estaciones terrestres, el ruteo o direccionamiento encuentra caminos para proveer una conexión punto a punto haciendo uso de los enlaces. Es evidente que el enrutamiento afecta directamente la utilización de los recursos de la red y la calidad del servicio prestado por las conexiones.

Los métodos de enrutamiento dentro de las constelaciones dependerán del diseño de la constelación. La topología de una constelación de red de satélites de órbita terrestre baja es dinámica. La conectividad de la red entre dos puntos cualesquiera es también dinámica, ya que los satélites se mueven en un determinado tiempo sobre la Tierra y cada satélite mantiene la misma posición relativa a otros satélites en su plano orbital.

Su posición y el retardo de propagación relativos a las terminales en Tierra y a satélites en otros planos cambian continuamente, pero son predecibles. Además de los cambios en la topología de la red, a medida que el tráfico fluye a través de la red, las rutas también cambian con el tiempo.

Todos estos factores afectan el recorrido desde el origen al destino de las conexiones o paquetes. La demora máxima entre dos puntos finales incluyendo los saltos a través del satélite, está limitada por los retardos de propagación en tiempo real.

Estas restricciones limitan el conteo de saltos en los sistemas que utilizan ISL. Fallas en los satélites pueden crear islas dentro de la red de órbita terrestre baja. Los algoritmos de enrutamiento deben acomodar estas fallas. Como todos los nodos satelitales y los enlaces intersatelitales tienen las mismas características, es conveniente separar la sección satelital y la sección terrestre del enrutamiento. Esto permite que diferentes algoritmos de enrutamiento sean utilizados y adaptados a las características de las redes.

Los algoritmos de enrutamiento pueden ser distribuidos o centralizados. En algoritmos de enrutamiento, todos los satélites reportan información sobre el control de la constelación el cual calcula gráficas de enrutamiento y retorna la información a los satélites para la conexión o enrutamiento de paquetes.

En los algoritmos de enrutamiento distribuido, todos los satélites intercambian métricas de la red (retardo de propagación, carga de tráfico, disponibilidad de ancho de banda, falla de nodos, etc.) y cada satélite trata de calcular por su cuenta las gráficas de enrutamiento.

Parámetros de calidad de señal (QoS) deben ser tomados en cuenta tales como retardo y requerimientos de ancho de banda. Los algoritmos de enrutamiento deben también ser capaces de intercambiar entre QoS y la utilización eficaz de los recursos de la red.

Debido al movimiento de los satélites y las terminales de usuario, tanto los puntos de inicio y final de la ruta puede cambiar con el tiempo y también la ruta de ISL. Por lo tanto, el enrutamiento de red satelital es relativamente más complicado que el enrutamiento de las redes terrestres.

1.8.8. Interconexión

Es la etapa final para la creación de redes satelitales y proporciona conectividad directa a los terminales de usuario o redes terrestres. Además de las conexiones de capa física en términos de ancho de banda y velocidad de transmisión, protocolos de capa superior también deben tenerse en cuenta.

De acuerdo con las posibles diferencias entre los protocolos utilizados en las redes de satélite, las redes terrestres y los terminales de satélite, las siguientes técnicas pueden utilizarse para la interconexión:

- Mapeo de protocolo: es una técnica que se utiliza para traducir las funciones y la cabecera de paquetes entre diferentes protocolos.
- El tunelizado: es una técnica que se utiliza para el tratamiento de un protocolo como datos que deben transportarse en el protocolo de túnel. El protocolo de tunelizado se procesa solo al final del túnel.
- Multiplexado y demultiplexado: son técnicas usadas para multiplexar varios flujos de datos en un solo flujo y para demultiplexar un flujo de datos en múltiples flujos.
- Modelado de tráfico: es una técnica que se utiliza para configurar las características de los flujos de tráfico tales como velocidades y los tiempos a ser acomodados por la red de transporte.

1.8.9. Disponibilidad y diversidad de los satélites

La disponibilidad total de la red de satélites A_{total} depende de la disponibilidad del satélite $A_{satélite}$, la disponibilidad de la conexión del satélite $A_{propagación}$ y de la disponibilidad de recursos $A_{congestión}$.

$$A_{total} = A_{satélite} \times A_{propagación} \times A_{congestión}$$

Desde el punto de vista de la fiabilidad, una porción de conexión de red debe tener las siguientes propiedades:

- La fracción de tiempo durante el cual la conexión está en un estado de baja (es decir, no puede apoyar una conexión) debe ser mínima dentro de lo posible.
- Una vez que la conexión se ha establecido, debe tener una baja probabilidad de ser interrumpida debido a la insuficiencia de transferencia de datos o liberada prematuramente debido a la falla de un componente de red.

La disponibilidad de una porción de conexión de red se define como la fracción de tiempo durante la cual la porción de conexión es capaz de apoyar una conexión. A la inversa, falta de disponibilidad de una parte es la fracción de tiempo durante el cual la porción de conexión no está en condiciones de apoyar una conexión. La diversidad es la técnica utilizada para mejorar la disponibilidad de las conexiones por satélite.

Existen diferentes tipos de diversidad:

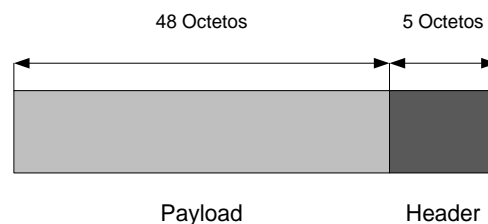
- Diversidad tierra espacio: utiliza más de un satélite a la vez por comunicación. Este permite una mejora de la disponibilidad física disminuyendo los efectos de sombreado de los edificios debido a la obstrucción del enlace entre la terminal terrestre y el satélite y por proporcionar redundancia en la capa física y de enlace de datos.
- En redes en órbita: la diversidad proporciona redundancia por fallos en los enlaces y satélites. Es posible debido al gran número de satélites en la constelación con un espaciamiento reducido.

2. MODO ASÍNCRONO DE TRANSFERENCIA (ATM)

2.1. Conceptos fundamentales del protocolo ATM

El protocolo de modo de transferencia asíncrona o *Asynchronous Transfer Mode* (ATM) es una tecnología diseñada para transferencia a altas velocidades, orientada a paquetes, basada en la multiplexación asíncrona por división de tiempo que utiliza celdas de tamaño fijo de 53 *bytes*. Cada celda consiste en un campo de información de 48 *bytes* conocido como *payload* y de un encabezado de 5 *bytes* llamado *header*, como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Celda ATM



Fuente: PERROS, Harry. Connection-oriented networks. p. 48.

El encabezado es utilizado para identificar las celdas que pertenecen a un mismo canal virtual para ser enrutadas apropiadamente. La integridad de la secuencia de las celdas es garantizada por dicho canal virtual. El modelo referencia, es el protocolo B-ISDN el cual consiste de tres planos: plano de usuario donde se transporta la información del usuario; el plano de control, responsable de las llamadas de control, funciones de control de conexión e información de señalización; y por último, el plano de administración.

No existe una correspondencia directa entre las capas del modelo OSI y las capas del modelo B-ISDN ATM, no obstante, similitudes pueden encontrarse tales como: la capa física de ATM es muy parecida a la capa 1 del modelo OSI y se desempeña a nivel de *bits*. La capa ATM es equivalente al segmento superior de la capa 2 y al segmento inferior de la capa 3 del modelo OSI. La tabla IV muestra la jerarquía de las capas que conforman el protocolo ATM.

Tabla IV. **Jerarquía de las capas del protocolo ATM**

Funciones de las capas superiores		
Subcapas de convergencia	CS	AAL
Segmentación y reensamblado	SAR	
Control genérico de flujo Generación/extracción del header de la celda Traslación de la celda VPI/VCI Multiplexación y demultiplexación de Celda	ATM	
Tasa de disociación de celdas Delinación de celda Generación/verificación del header de la celda Adaptación de la trama de transmisión Generación/recuperación de la transmisión de la trama	TC	CAPA FÍSICA
Temporización de los bits Medio físico	PM	

Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p. 554.

2.1.1. Retardo de paquetización

La técnica estándar de digitalización (PCM) de la voz humana usa un flujo constante de *bits* de 64 *Kbit/s*; la voz es muestreada 8 000 veces por segundo, cada muestra es codificada utilizando 8 *bits*, por lo tanto 8 000 muestras por segundo de 8 *bits* resulta en una tasa de 64*kbit/s*. Para llenar una celda de 40 *bytes* de *payload*, la primera muestra de voz se ubica en la celda parcialmente llena alrededor de 40 muestras para luego ser enviada a la red.

Esa primera muestra de voz ha acumulado un retardo de 5 milisegundos antes de que la celda sea enviada; esto es llamado retardo de paquetización y es muy importante en la transmisión de aplicaciones en tiempo real tales como la transmisión de voz.

En las comunicaciones por satélite, el retardo se encuentra en el orden de los 250 milisegundos en cada dirección. Un retardo tan grande puede causar problemas en las comunicaciones telefónicas, ya que el retardo puede interferir con una interacción normal en la conversación. Aun si los retardos fueran menores, en el orden de 10 a 100 milisegundos, estos pueden causar problemas debido al eco, por lo que, para mantener el retardo al mínimo, se necesitan pequeñas celdas para transmitir la información.

De cualquier forma, debe de existir algún sobre procesamiento (*overhead*) en la celda, de manera que esta pueda ser enviada al lugar correcto para ser procesada con éxito. Utilizando un encabezado de 5 *bytes*, el porcentaje de ancho de banda que es utilizado por *overhead* puede ser muy alto. Si la celda es muy pequeña se pierde eficiencia. La clave es tratar de balancear las características del retardo con la eficiencia. Un encabezado de 5 *bytes* con un segmento de 48 *bytes* para la información resulta en menos del 10% de *overhead*.

2.1.2. Retardo de cola

El retardo es importante y la variación de este también lo es. La variación del retardo es la diferencia de retardo que experimentan las celdas a medida que atraviesan la red. Como ejemplo, se puede considerar un enlace de alta velocidad y un mensaje de 100 *bytes* para ser transmitido. Se asume que el enlace es compartido con otros 100 flujos de datos.

El mejor de los casos para el retardo de cola es que no haya más información que transmitir cuando el mensaje llegue a la misma, solamente enviarlo; por lo que el retardo de cola es casi cero. El peor de los casos podría ser, esperar por cada uno de los otros 100 flujos de datos hasta que finalicen el envío para poder enviar el mensaje de 100 *bytes*.

Considerando el peor de los casos, si la carga de información (*payload*) es muy pequeña, se tendría que enviar demasiadas celdas lo cual impactaría en una baja eficiencia, por el contrario, si las celdas son muy grandes, la cantidad de tiempo que se tendría que esperar para poder transmitir después que todas las otras celdas han sido transmitidas se incrementaría. Cuando las celdas se vuelven más grandes, el tiempo que se debe esperar para poder transmitir se incrementa, este comportamiento es esencialmente lineal.

2.2. Capa ATM

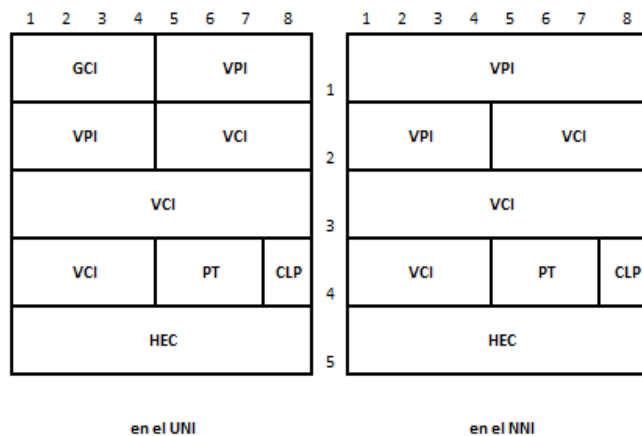
La capa ATM es el núcleo del protocolo ATM, existen dos diferentes tipos de encabezado para una celda ATM: el primero, para la interfaz de red de usuario UNI (*user network interface*) entre el usuario de la terminal y las interconexiones del nodo de red, y el segundo para el interfaz de nodo de red NNI (*network node interface*) como se ilustra en la figura 24. A continuación se detallan los diferentes campos que conforman el encabezado para la celda.

2.2.1. El campo GFC

El campo de control genérico de flujo (*Generic Flow Control - GFC*) ocupa los primeros 4 *bits* en el encabezado. Está definido en la interfaz de red de usuario (UNI), no es utilizado en la interfaz de nodo de red, la cual es la interfaz entre *switches*.

El campo GFC puede ser utilizado para el control de flujo o para construir accesos múltiples, de manera que la red pueda controlar el flujo de celdas ATM de los usuarios en la red.

Figura 24. **Formato de encabezado de celda ATM en el UNI y NNI**



Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p. 539.

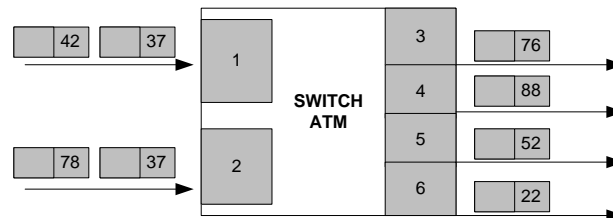
2.2.2. Los campos VPI y VCI

Los campos importantes para el enrutamiento en el encabezado son el identificador del camino virtual VPI (*Virtual path identifier*) y el identificador del canal virtual VCI (*Virtual channel identifier*). Un número de conexiones virtuales a través de un *switch* ATM se muestra en la figura 25.

Dentro del *switch*, debe de existir una tabla de conexiones o tabla de enrutamiento como se muestra en la tabla V. Esta tabla de conexiones asocia un VPI/VCI y un número de puerto con otro puerto y otro VPI/VCI. Cuando una celda llega a un *switch*, este busca el valor del VPI/VCI del encabezado.

Asumiendo que el VPI/VCI entrante tiene el valor 0/37, y ya que la celda arribó al puerto uno, el *switch* busca en el puerto uno todas las entradas en la tabla de ruteo y descubre que esta celda tiene que ir al puerto tres. Cuando se envía en el puerto tres, el valor VPI/VCI es conmutado a 0/76, pero la información contenida permanece sin alteración alguna.

Figura 25. **Enrutamiento en un conmutador ATM**



Fuente: elaboración propia.

Tabla V **Tabla de conexión/enrutamiento de un conmutador ATM**

Tabla de Conexión / Enrutamiento			
In port	VPI/VCI	Out Port	VPI/VCI
1	0/37	3	0/76
1	0/42	4	0/88
2	0/37	5	0/52
2	0/78	6	0/22

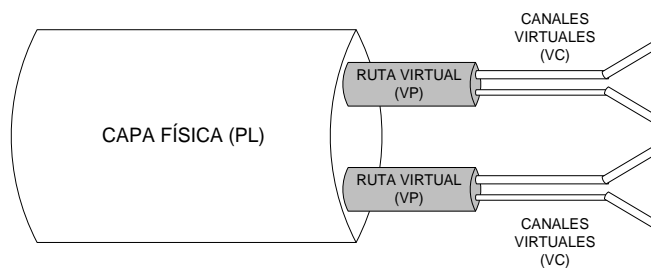
Fuente: elaboración propia.

Los valores VPI/VCI cambian por dos razones: la primera es que si los valores son únicos, habría alrededor de 17 millones de valores diferentes para su uso, y a medida que las redes se vuelven muy grandes, 17 millones de conexiones no serán suficientes para una red; segundo, es imposible garantizar que cada nueva conexión establecida tiene un identificador único en el mundo.

Los valores VPI/VCI solamente son significativos en el contexto de las interfaces dadas; de hecho, en el ejemplo anterior, 37 es utilizado por ambas interfaces, sin embargo, no existe ambigüedad porque son consideradas en el contexto de interfaces físicas diferentes. Existe una entrada separada para 37 en el puerto dos, el cual, por supuesto, se dirige a un destino diferente. Así que la combinación de los valores VPI/VCI permite a la red asociar una celda dada con una conexión dada, y por esto puede ser enrutada al destino correcto.

La idea de tener dos valores para identificar un canal dentro de la capa física se ilustra en la figura 26. Un camino virtual es un conjunto de canales virtuales. El valor VPI es de ocho *bits*, proveyendo hasta 256 diferentes grupos. Los canales virtuales individuales tiene un único valor VCI, pero los valores VCI puede ser reutilizados en diferentes caminos virtuales.

Figura 26. **Concepto de rutas virtuales (VP - Virtual Path) y canales virtuales (VC - Virtual Channel) en la capa física**

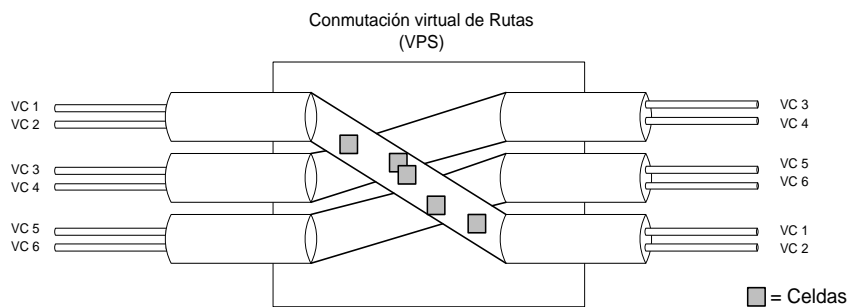


Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p. 551.

ATM permite dos diferentes formas de obtener conexiones hacia una red ATM, esto se muestra en las figuras 27 y 28.

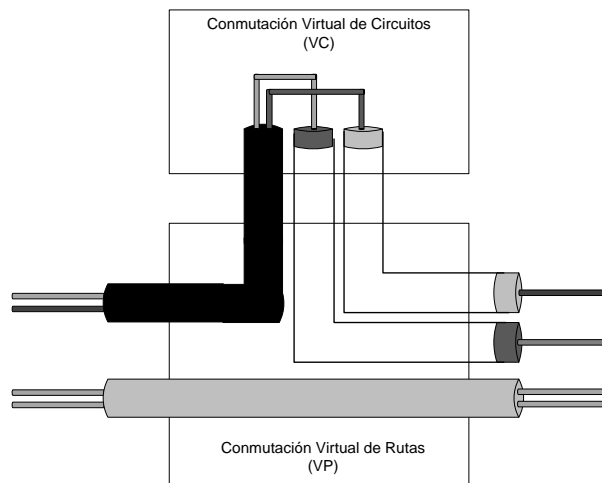
Estas ilustraciones muestran cómo la red puede contener un grupo de conexiones y cómo conmutar dicho grupo de conexiones y las conexiones individuales dentro de dicho grupo.

Figura 27. **Ejemplo de conmutación de rutas virtuales**



Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p. 553.

Figura 28. **Ejemplo de conmutación de VC y VP**



Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p. 553.

2.2.3. El campo CLP

Por defecto, el campo de prioridad de pérdida de celda CLP (*cell loss priority*) de un *bit* de tamaño es puesto a 0, indicando alta prioridad. Las celdas con este *bit* puesto a 1 pueden ser descartadas antes que las celdas que tienen el *bit* puesto a 0. La red ATM tiene la capacidad de manejo de este *bit* para propósitos de administración de tráfico.

2.2.4. El campo PT

El identificador de tipo de carga PT (*Payload type*) consiste de tres *bits*. El primer *bit* es utilizado para distinguir las celdas de información de las celdas de operación, administración y mantenimiento (OAM). El segundo *bit* es llamado el *bit* de congestión. El tercer *bit* es transmitido de forma transparente por la red y utilizado únicamente por la capa de adaptación de ATM tipo 5 (*ATM Adaptation Layer - AAL5*) para transporte de paquetes IP.

2.2.5. El campo HEC

Los últimos 8 *bits* del campo de verificación de error de encabezado HEC (*Header error check*) son necesarios, ya que si una celda es transmitida a través de la red y los valores VPI/VCI tienen errores, dicha celda será enviada al lugar incorrecto. Como una implementación de seguridad se estimó necesario un control de seguridad en el *header*. El campo HEC también es utilizado, dependiendo del medio físico, por ejemplo en SONET, para delinear los límites de las celdas. El control de error de encabezado (HEC) posee dos modos de operación: uno es el modo detección, donde si existe un error detectado por revisión cíclica de redundancia CRC (*cyclic redundancy check*), la celda es descartada. El otro modo permite la corrección de errores de un *bit*.

La utilización de un modo u otro depende del medio físico en uso. Si se utiliza fibra óptica, la corrección de un *bit* puede tener sentido porque típicamente los errores son aislados. Por otro lado, la utilización de este esquema puede ser inadecuada si los errores tienden a presentarse en ráfagas en medios tales como enlaces con cobre y enlaces inalámbricos.

Cuando la corrección de un *bit* es utilizada, se incrementa el riesgo de interpretar múltiples errores de *bit* como un error de un solo *bit*, erróneamente corregido y enviado a alguna parte; así que la capacidad de detección de errores decae cuando el modo de corrección es utilizado.

Puede notarse que en la verificación HEC, se vuelve a calcular enlace por enlace debido a que cubre los valores VPI y VCI, los cuales cambian a medida que las celdas ATM son transportadas a través de la red.

2.3. Capa de adaptación ATM

La capa de adaptación ATM (AAL) está dividida en dos subcapas como se muestra en la tabla IV: subcapa de segmentación y reensamblado SAR (*segmentation and reassembly*) y subcapas de convergencia CS (*convergence sublayers*).

- Subcapa SAR: esta subcapa ejecuta segmentación de la información de la capa alta en tamaños razonables para ser portados por las celdas ATM en una conexión virtual, y en el lado receptor, la subcapa SAR reensambla el contenido de las celdas de una conexión virtual en unidades de información para ser entregadas a las capas altas de ATM.

- Subcapa CS: esta capa ejecuta funciones como identificación de mensajes y recuperación de reloj. Se divide en una subcapa de convergencia de parte común CPCS (*common part convergent sublayer*) y en una subcapa de convergencia de servicio específico SSCS (*service-specific convergent sublayer*) para respaldar el transporte de datos sobre ATM. Las unidades de datos de AAL son transportadas de un punto de acceso de servicio AAL (*Service access point - SAP*) a uno o más puntos a través de la red ATM. El rol del AAL es el de definir cómo colocar información de diferentes tipos de servicios en una celda ATM. La tabla VI ilustra los resultados de la ITU-T para definir las clases de servicios.

Tabla VI **Clases de servicios y sus atributos**

	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
RELACIÓN DE TIEMPO	REQUERIDO		NO REQUERIDO	
TASA DE BIT	CONSTANTE	VARIABLE		
MODO DE CONEXIÓN	ORIENTADO A CONEXIÓN			NO ORIENTADO A CONEXIÓN

Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 215.

- La clase A tiene los siguientes atributos: temporizado punto a punto (*end-to-end*), tasa de *bits* constante y orientación a la conexión. Por esto, la clase A emula un circuito de conexión sobre ATM. Esto es muy importante para aplicaciones iniciales de multimedia porque virtualmente todos los métodos y tecnologías actuales que portan vídeo y voz asumen una conexión en circuito a través de la red. Tomando esta tecnología y moviéndola hacia ATM, esta requiere un servicio de emulación de circuito.

- La clase B es similar a la clase A excepto que esta tiene una tasa de *bit* variable. Esto puede ejecutar codificación de vídeo pero no a una tasa de *bit* constante. La tasa variable de *bit* toma ventaja de la naturaleza de ráfaga el tráfico original.
- La clase C y D no tiene temporizado *end-to-end* y tienen tasas de *bit* variables. Están orientadas hacia comunicaciones de datos, y la única diferencia entre las dos es que una está orientada a la conexión y la otra no.

2.3.1. AAL1 para la clase A

La figura 29 muestra la capa de adaptación ATM tipo 1 (AAL1) para la clase A, ilustrando el uso de 48 *bytes* de “*payload*” o carga de información. La subcapa de indicación de convergencia CSI consiste de un *bit*, esta indica la existencia de un puntero de 8 *bits* si CSI es igual a 1 y la no existencia si CSI es igual a cero.

Figura 29. Formato del paquete AAL1 para la clase A



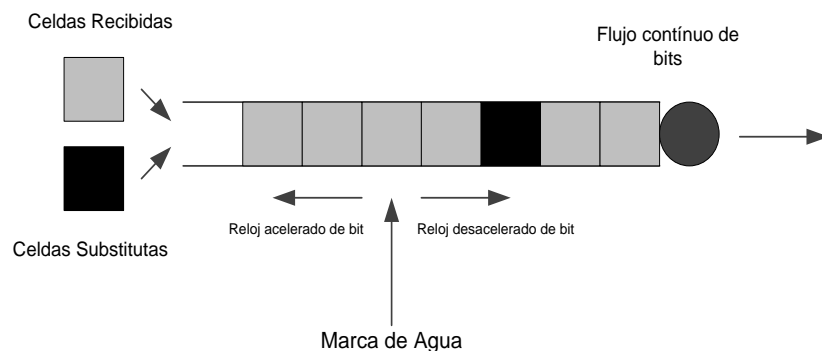
Fuente: ITU-T. B-ISDN ATM adaptation layer specification type 1 AAL. p. 5.

El número de secuencia SN (*sequence number*) puede ser utilizado para la detección de pérdida de celdas y proveer registros de tiempo para sincronización entre los dos sistemas finales por medio del método del reloj adaptivo.

También es posible que este encabezado pueda ser utilizado para identificar las delimitaciones de *byte* por medio de una emulación de una conexión e identificación de subcanales dentro de la conexión.

El objetivo principal para el método de reloj adaptivo es el de obtener coherencia en la temporización, asegurándose por tanto, la capacidad de reproducir la información del flujo de datos original. Por ejemplo, en un servicio de voz de 64Kbit/s , el transmisor muestrea la información (voz), llena las celdas y envía aquellas celdas en la red cada 5.875 milisegundos (transmite 47 octetos a razón de un octeto cada 125 microsegundos). El receptor se muestra en la figura 30; este receptor reproduce el flujo original de *bits* a 64Kbit/s . Aquí es donde se denota el impacto de la variación del retardo.

Figura 30. **Método del reloj adaptivo**



Fuente: elaboración propia.

Utilizando el método del reloj adaptivo, el receptor establece un buffer basado en las características de la conexión a 64Kbits . Este establece una marca, luego el receptor desempaqueta los *bits* de información de las celdas y reproduce la información a la tasa original de 64Kbit/s .

Si la reproducción es muy rápida, el buffer se vacía debido a que las celdas llegarán más despacio que la tasa de reproducción. Si la tasa de reproducción es muy lenta, el buffer se llenará, y eventualmente se tendrá un desbordamiento de datos y las celdas se perderán.

La solución es que el receptor monitorea la velocidad a la que se llena el buffer comparado con una marca de reloj. Si empieza a llenarse, decrece la velocidad del reloj ya que va muy rápido; de esta manera, el reloj del receptor se mantiene a la misma tasa del reloj del transmisor.

El tamaño del buffer debe ser una función de la variabilidad de la tasa de arribo de las celdas. Si las celdas arriban en ráfagas, se requiere de un buffer grande. Entre más larga sea la ráfaga más grande se requiere que sea el buffer. Hay mucha variación en el retardo cuando las celdas atraviesan la red. Un buffer grande también causa un gran retardo, la variación del retardo de celda (CDV) es un factor muy importante en la calidad de servicio (QoS), por lo que es un parámetro importante en la administración del tráfico.

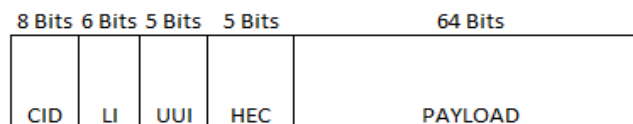
Otro factor importante es el efecto de pérdida de celdas, parte del protocolo es un número de secuencia; este número no tiene como propósito mantener la secuencia de las celdas, sino el de detectar las pérdidas de las mismas, de lo contrario la tasa del reloj se torna inestable.

Es importante hacer notar que con esta clase de esquema, se puede mantener una conexión en "circuito" de virtualmente cualquier velocidad sobre ATM. Debido a que es tan importante en telefonía, a la capa de adaptación ATM (AAL1) se le llama el "emulador de circuitos telefónicos".

2.3.2. AAL2 para la clase B

La capa de adaptación ATM tipo 2 (AAL2) ha sido definida para la clase B. Esta capa AAL es importante, ya que permitirá que ATM soporte la naturaleza de ráfaga del tráfico a ser utilizada en paquetes de voz, de vídeo, etc. La figura 31 ilustra las funciones y el formato de la trama de la capa AAL2.

Figura 31. Formato de paquete AAL2 para la clase B



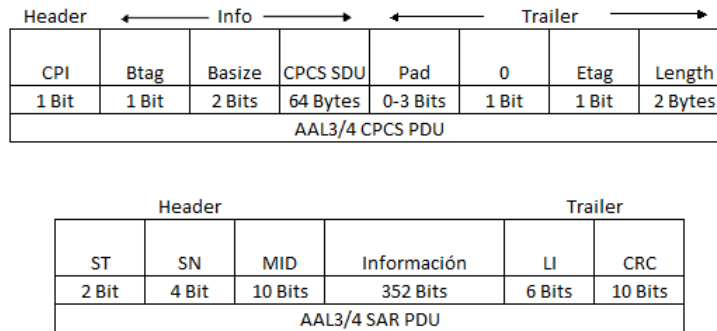
Fuente: ITU-T. B-ISDN ATM adaptation layer specification type 2 AAL. p. 9.

2.3.3. AAL3/4 para las clases C y D

En la capa de adaptación ATM tipo 3/4 (AAL3/4), el protocolo coloca un campo llamado *header* antes de la información y un campo llamado *trail* después de la información, entonces esta es dividida en segmentos de 44 *bytes*. La capacidad de la celda incluye dos *bytes* de *header* y dos *bytes* de *trailer*, de esta manera se constituye en 48 *bytes* exactos. La figura 32 ilustra las funciones y el formato de la trama del AAL3/4. Las funciones del *header* o encabezado incluyen la parte común del identificador CPI (*common part identifier*) de un *byte*, el cual identifica el tipo de tráfico y ciertos valores que han de ser implementados en otros campos de los *headers* y *trailers*.

El campo de la etiqueta de comienzo Btag (*beginning tag*) de un *byte* es utilizado para identificar toda la información asociada con esta sesión.

Figura 32. **Formato del paquete AAL3/4 para las clases C & D**



Fuente: ITU-T. B-ISDN ATM adaptation layer specification type 3/4 AAL. p. 14.

El tamaño de ubicación del buffer *BAsize* de dos *bytes* define el tamaño del buffer en el receptor de la información. El campo de alineación *AL* (*alignment field*) es llenado con 32 *bits* para alinear el *trailer*. La etiqueta de fin *Etag* (*end tag*) es utilizada con la *Btag* en el *header* para correlacionar todo el tráfico asociado con la capacidad de información o *payload*. La longitud del campo especifica el largo del *payload* en *bytes*. Note que existe un chequeo de redundancia cíclica (CRC) en cada celda para verificar si existen errores de *bit*.

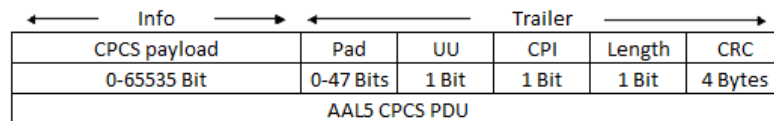
También existe un identificador de mensaje *MID* (*message ID*). Este es útil cuando el costo de una conexión tiene un valor elevado ya que ayuda a garantizar una alta utilización de la conexión.

2.3.4. AAL5 para el protocolo de internet

Otra adaptación a la conexión orientada a los datos es la capa de adaptación ATM tipo 5 (AAL5). Fue diseñada particularmente para llevar paquetes de protocolo de internet IP (*Internet protocol*) utilizando todos los 48 *bytes* del *payload* de ATM.

Aquí, la corrección de errores CRC es añadida al final y el llenado de la celda se efectúa en segmentos proporcionales que dan un total de 48 *bytes* exactos. De esta manera la trama es dividida en 48 segmentos y colocados en celdas. La figura 33 muestra las funciones y el formato de la trama de la capa AAL5. Para determinar cuándo comenzar a reensamblar y cuándo finalizar, se debe recordar el tercer *bit* del identificador de capacidad de información PT (*payload type*) en el encabezado o *header* de ATM. Este *bit* es cero excepto para la última celda en el paquete, cuando es uno.

Figura 33. **Formato AAL5 para protocolo internet**



Fuente: ITU-T. B-ISDN ATM adaptation layer specification type 5 AAL. p. 11.

Un receptor reensambla las celdas observando los valores VPI/VCI y, para una VPI/VCI dada, reensambla los paquetes en un paquete largo. Esto significa que un VPI/VCI puede soportar solamente un paquete grande a la vez. Conversaciones múltiples pueden no ser entrelazadas en una conexión dada. Esto es ventajoso cuando las conexiones son baratas.

2.4. La capa física

El primer requerimiento para la correcta comunicación del equipo terminal con la red ATM, es el de transmitir información exitosamente sobre un medio físico entre los que se puede enumerar la fibra óptica, par trenzado, cable coaxial, enlace inalámbrico terrestre y enlaces satelitales.

Como se muestra en la tabla IV, la capa física (PL - *physical layer*) se divide en dos subcapas: el medio físico PM (*physical médium*) y las capas de convergencia de transmisión TC (*transmission convergence*).

2.4.1. Las subcapas del medio físico

Las subcapas PM contienen funciones dependientes del medio físico tales como codificación de *bit*, características de los conectores, propiedades del medio de transmisión, entre otras. Esta subcapa provee capacidad de transmisión incluyendo alineamiento de *bit*, codificación de línea y conversión de señales eléctricas, ópticas y de radio si es necesario.

La fibra óptica ha sido escogida como el medio físico para ATM debido a su capacidad de transmisión, pero también puede utilizarse cable coaxial, cable par trenzado y enlaces inalámbricos terrestres incluyendo los enlaces satelitales. Esto incluye funciones de temporización de *bit* tales como generación y recepción de formas de onda aceptables para el medio, así como también la inserción y extracción de información de temporizado de *bit*.

2.4.2. La subcapa de convergencia de transmisión

En una red ATM, una terminal necesita tener una celda para enviar información en la red, para mantener a la red recibiendo celdas ATM correctamente. La terminal tiene que enviar una celda vacía en la red si no hay nada que enviar; esto es debido a que ATM también hace uso de las características del campo de chequeo de error de encabezado HEC (*header error check*) y del tamaño fijo de la celda para el entramado.

Una de las funciones de la subcapa de convergencia de transmisión TC es la de insertar celdas vacías para la transmisión y remover celdas vacías cuando llegan a su destino para mantener el flujo de celdas constante. Debido a las diferentes clases de detalles en el acoplamiento entre la fibra y otro medio físico, la subcapa TC difiere, dependiendo en la capa física de transmisión de las celdas ATM. La subcapa TC, principalmente, tiene algunas funciones como se muestra en la tabla IV:

- La función a más bajo nivel es la de generación y recuperación de la trama de transmisión.
- La siguiente función, es la transmisión de trama adaptada. Esta se dedica a todas las acciones para la adaptación del flujo de celdas de acuerdo con la estructura de *payload* usada por el sistema de transmisión en el envío. La trama puede ser de jerarquía digital síncrona (SDH) o puede ser de acuerdo con la ITU-T con recomendación G.703.
- La función de delimitación de celda posibilita al receptor reconocer y recuperar una celda del flujo de celdas en la red. El reordenamiento de la celda es ejecutado en el campo de información de celda antes de la transmisión y después de la recepción, respectivamente, para proteger el mecanismo de delimitación de la celda.
- El campo de chequeo de error de encabezado (HEC) genera una secuencia; esta es transmitida y su valor es recalculado y comparado con el valor recibido. Este valor es usado en la corrección de errores de encabezado. Si los errores de encabezado no pueden ser corregidos, la celda es descartada.

2.4.3. Transmisión de celdas ATM

Como ATM define un protocolo de modo asíncrono, las celdas ATM, tienen que ser transmitidas sobre tecnologías de redes. En la serie I de los estándares ITU-T, se define una solución para la evolución de las redes públicas ATM a la velocidad de transmisión de 155,520 *Mbit/s* o más.

Para tasas de *bit* más bajas, el foro ATM definió métodos de transmisión sobre tecnologías estándar existentes. La ITU-T es la responsable de las especificaciones de redes públicas ATM. El foro ATM no es una organización internacional de estándares; es una organización sin fines de lucro, formada en 1991, con el objetivo de acelerar el uso de productos y servicios ATM a través de una rápida convergencia de especificaciones de operatividad. La ITU-T es la responsable de las especificaciones de redes privadas, adoptando los estándares ITU-T si están disponibles, y proponiendo estándares si no existen.

2.4.4. ATM sobre jerarquía digital síncrona SDH

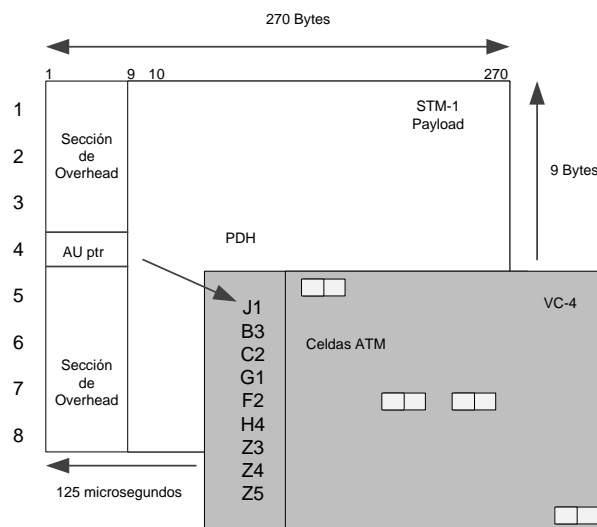
La ITU-T definió el acercamiento evolutivo para transmitir celdas ATM sobre SDH. La característica esencial de SDH es la de mantener un registro de los límites de los flujos de datos que no dependen realmente de un medio en particular. Aunque fue originalmente diseñada para la transmisión sobre fibra óptica, puede ser operada en otro medio.

La trama SDH tipo 1 (STM-1) es compatible con la trama de portadora óptica de señal de transporte síncrono 3 (STS-3C) de las redes ópticas síncronas (SONET) a una velocidad de 155 *Mbit/s*. Los *bytes* son transmitidos a través del medio una fila a la vez. Toma nominalmente 125 microsegundos transmitir las nueve filas que conforman la trama SDH-STM.

Los primeros nueve *bytes* de cada fila tienen varias funciones de procesamiento (*overhead*). El STM-1 es el paquete más pequeño disponible en las redes internacionales en términos de SDH. Las tasas de *bit* para SDH STM-4 son 4 veces la tasa de *bit* de STM-1.

SDH también tiene algunas buenas características para obtener altas velocidades (alrededor de los 622 *Mbit/s*); esto se obtiene tomando cuatro STM-1 para luego entrelazar los *bytes* y obtener 622 *Mbit/s* (STM-4), se puede llegar a 1,2 *Gigabits*, 2,4 *Gigabits*. La figura 34 muestra un paquete SDH STM-1.

Figura 34. **Paquete SDH STM-1**



Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p. 559.

Utilizando el chequeo de error de encabezado HEC de las celdas ATM se delimitan las celdas dentro de la carga de información (*payload*) de SDH (contenedor VC-4). El receptor, cuando intenta encontrar la delimitación de la celda, toma 5 *bytes* y verifica si son del encabezado o no.

Realiza la comprobación HEC en los primeros 4 *bytes* y compara el cálculo con los 5 *bytes*. Si concuerda, el receptor cuenta 48 *bytes* y realiza el cálculo nuevamente. Si encuentra correcto el cálculo varias veces en una fila, puede asumir de forma segura que ha encontrado la delimitación de las celdas. Si falla, solamente se desplaza en la ventana un *bit* y realiza el mismo proceso de cálculo.

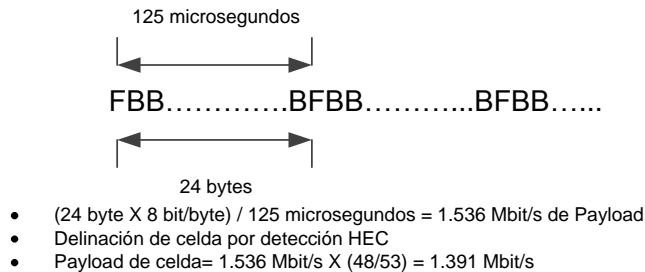
Este tipo de procesos debe ser utilizado porque no se sabe realmente qué hay en los 48 *bytes* de *payload*, pero las posibilidades que la información del usuario contenga estos patrones separados por 48 *bytes* es esencialmente cero. Para celdas vacías, el HEC es calculado primero encontrando el valor CRC, luego aplicando una operación “o exclusiva” del valor CRC con un patrón de *bit* llamado “*coset*”, que resulta en un HEC diferente de cero.

Por esto, el HEC difiere de una celda vacía que contiene ceros. Del lado receptor, otra operación de “o exclusiva” se aplica, resultando en el CRC original para comparación. La carga de información o *payload* en una trama STM-1 es de 135 563 *Mbit/s*, asumiendo que el *payload* completo lleva información del usuario.

2.4.5. ATM sobre DS1

Señal digital de nivel 1 (DS1), es la primera categoría ofrecida por los proveedores públicos en Norte América. También está especificado por el foro ATM para portar tráfico ATM. El formato estándar DS1 consiste de 24 *bytes* consecutivos con un procesamiento u *overhead* único de un *bit* insertado en la trama. Existe un patrón fijo para estos *bits* de *overhead*, con el fin de identificar los *bits* de entramado y la estructura de la trama, como se muestra en la figura 35.

Figura 35. **Estructura de la trama DS1 de 1,544 Mbit/s**



Fuente: elaboración propia.

Una vez que el patrón ha sido identificado, se sabe dónde se encuentran los *bytes* dentro de la capa física del DS1, ahora, lo siguiente es cómo encontrar las delimitaciones de las celdas. Las celdas serán colocadas en estos *bytes* de capa física; notar que hay solamente 24 *bytes* en cada uno de estos bloques, así que la celda se extenderá a través de múltiples bloques.

Puede haber 24 *bytes* de una celda en el primer bloque, 24 *bytes* de la misma celda en el segundo bloque y luego los 5 *bytes* restantes de la celda en el tercer bloque. De cualquier manera, la celda puede caer en cualquier lugar en los límites de *bit*. Utiliza el mismo mecanismo que SDH, busca en una ventana de 5 *bytes* y realiza el cálculo de CRC utilizando la aproximación del HEC. La carga de información o *payload* que puede ser transportada dentro del DS1 es de 1,391 Mbit/s.

2.4.6. ATM sobre un enlace E1

La interfaz de 2 048 Mbit/s es particularmente importante para Europa, donde esta velocidad (E1) es el equivalente funcional de la interfaz DS1. Notar que en contraste al formato DS1, no existen *bits* extras en la trama.

De hecho, la tasa de 2 048 *Mbit/s* es un múltiplo exacto de 64 *Kbit/s*. La trama básica del E1 consiste de una colección de 32 *bytes*, recurrentes cada 125 microsegundos. Este formato utiliza el primer byte (*byte 0*) y el diecisieteavo byte (*byte 16*) para entramado y otra información de control. El receptor utiliza la información dentro de los *bytes* de entramado para detectar la delimitación de los bloques de la capa física o tramas. Los 30 *bytes* restantes son utilizados para portar celdas ATM. Consecuentemente, la capacidad de *payload* de la capa física para la interfaz E1 es de 1,920 *Mbit/s*.

2.5. Interfaces ATM y conectividad

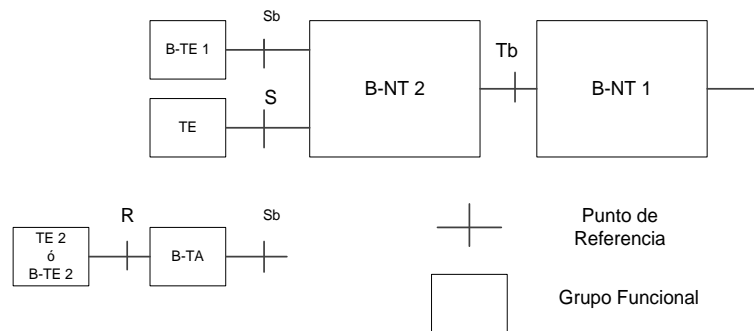
ATM provee una interfaz bien definida para propósitos de conectividad entre los usuarios y la red, entre nodos de red y entre redes.

2.5.1. Acceso a la red

Dos elementos pueden ser utilizados para describir una configuración de referencia del acceso a la red de B-ISDN: grupos funcionales y puntos de referencia. La figura 36 da una referencia de la configuración. El B-NT1 y el B-NT2 son terminadores de red de banda ancha (*Broadband Network Terminators*). El B-NT2 realiza funciones de: multiplexación y demultiplexación, almacenamiento de celdas ATM y protocolo de señalización. Las funciones del B-NT1 son similares a las de la capa uno del modelo de referencia OSI; entre dichas funciones están:

- Terminación de líneas de transmisión
- Manejo de la interfaz de transmisión
- Funciones OMA (operación, mantenimiento y mantenimiento)

Figura 36. **Configuración de referencia B-ISDN**



Fuente: KASERA, Sumit. ATM networks concepts and protocols. p. 59.

Las funciones de B-NT2 son similares a la capa 1 y capas superiores del modelo OSI. Algunas funciones del B-NT2 son:

- De adaptación para diferentes tipo de interfaces y topologías
- Multiplexación, demultiplexación y concentración de tráfico
- Almacenamiento temporal de las celdas ATM
- Ubicación de recursos y utilización de parámetros de control
- Manejo de la señalización del protocolo
- Manejo de la interfaz
- Conmutación de conexiones internas

Los B-TE1 y B-TE2 son equipos terminales de banda ancha. El B-TE1 puede ser conectado directamente a la red de la referencia Sb y Tb. B-TE2 puede solamente ser conectado a la red por medio de un adaptador de banda ancha. B-TA es un adaptador de terminal de banda ancha. Este permite al B-TE2 (que no puede ser conectado directamente), ser conectado a la red de banda ancha. Sb y Tb indican puntos de referencia entre la terminal y el B-NT2 y entre B-NT2 y B-NT1, respectivamente.

Los puntos de referencia son:

- Tb y Sb: 155.520 y 522.080 Mbit/s
- R: permite la conexión de un TE2 o de un terminal B-TE2

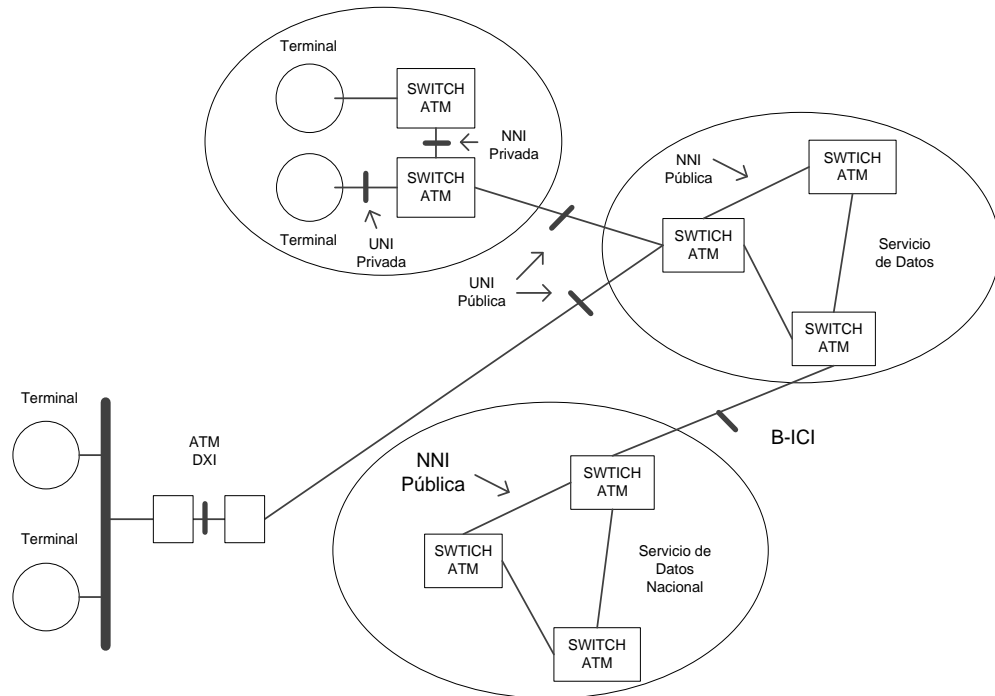
2.5.2. Interconexiones de nodo de red

En la figura 37, primero se considera una red privada ATM en la esquina superior izquierda. La interfaz entre las terminales y el *switch* es referida como una interfaz privada de usuario a red UNI (*user-to-network interface*). La interfaz para la red pública es una UNI pública. Ahora, estas dos interfaces son similares. Por ejemplo, el tamaño de la celda es la misma, el formato de celda es el mismo, pero aún existen algunas diferencias a nivel de capa de red entre ellas.

Dentro de una red privada ATM, existe el inconveniente de conectar múltiples *switches* de forma conjunta. A esto se le llama interfaz de nodo de red NNI (*network node interface*). En algunos casos, el término NNI se emplea incorrectamente porque es realmente más que una interfaz.

Este es un protocolo que le permite a múltiples dispositivos ser interconectados en una topología arbitraria y todavía trabajar como una red homogénea. El foro ATM especifica el protocolo privado NNI conocido como PNNI (*Private network node interface*). La ITU especifica la NNI pública. Una de las mayores diferencias es que en el caso de la NNI pública, hay una fuerte dependencia en la red de señalización. El B-ICI especifica cómo dos operadores (*carriers*) pueden utilizar tecnología ATM para multiplexar varios servicios en un enlace intercambiando información y cooperando para proveer servicios.

Figura 37. Interconexión de las interfaces de los nodos de red ATM



Fuente: KASERA, Sumit. ATM networks concepts and protocols. p. 324.

2.5.3. ATM DXI

La interfaz ATM de intercambio de información (*DXI – Data Exchange Interface*) permite que un equipo existente, en este caso un *router*, acceda a la red ATM sin tener que hacer un cambio de *hardware* en el equipo. El impacto en el *hardware* se presenta en la unidad de servicio de canal/unidad de servicio de información CSU/DSU (*channel service unit/data service unit*).

Las capas físicas típicas para el DXI son por ejemplo el V.35 o la interfaz serial de alta velocidad HSSI. Ya que es una interfaz orientada a la información, las tramas son portadas en las tramas HDLC.

Todo lo que se requiere es un cambio de *software* en el *router* y en el CSU/DSU para ejecutar la segmentación y reensamblado (SAR). El CSU-DSU toma las tramas, las divide en celdas, y finaliza con una interfaz UNI.

2.5.4. B-ICI

La interfaz *intercarriers* de banda ancha (B-ICI), en su versión inicial, es una técnica de multiplexado. Esta especifica cómo dos *carriers* o proveedores pueden usar tecnología ATM para multiplexar múltiples servicios en un enlace, intercambiando información y cooperando para ofrecer servicios. Los servicios especificados en el B-ICI son: servicio de relevación de celdas (*cell relay*), servicio de emulación de circuitos, *Frame Relay* y SMDS.

2.5.5. Señalización ATM

La señalización en las redes ATM tienen que satisfacer las siguientes funciones:

- Ajustar, mantener y liberar conexiones virtuales ATM para la transferencia de información.
- Negociar las características de tráfico de una conexión.

Las funciones de señalización pueden soportar llamadas multiconexión y llamadas multipartes. Una llamada multiconexión requiere el establecimiento de varias conexiones para ajustar una llamada compuesta comprendida de varios tipos de tráfico tales como voz, vídeo, imagen e información. También tienen la capacidad de no solamente remover una o más conexiones de una llamada, sino también agregar nuevas conexiones a las existentes.

Por tanto, la red tiene que correlacionar las conexiones de una llamada. Una llamada multipartes contiene varias conexiones entre uno o más usuarios finales, tales como conferencias telefónicas. Los mensajes de señalización son trasladados fuera de banda en canales virtuales dedicados redes de banda ancha.

Existen diferentes tipos de señalización en canales virtuales que pueden definirse en la interfaz B-ISDN; estos son:

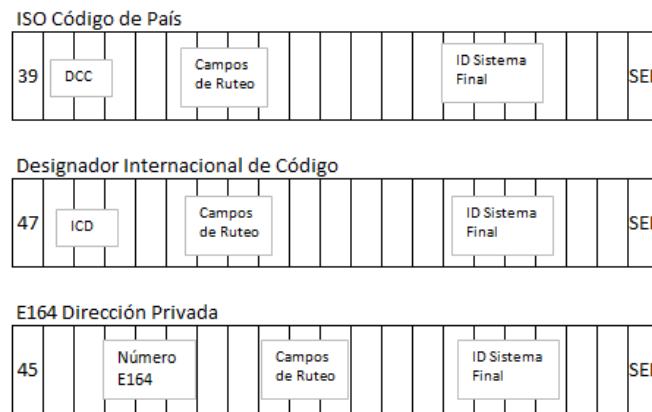
- Un canal virtual multiseñal: utilizado para establecer, verificar y liberar señalización punto a punto así como broadcast selectivo de canales virtuales. Es bidireccional y permanente.
- Un canal de señalización punto a punto: asignado a un punto final solamente mientras está activo. Estos canales son bidireccionales y son usados para establecer, controlar y liberar Virtual Channel Connection VCC para transportar información de usuario. En la señalización punto a multipunto, la multiseñalización es necesaria para la administración de la señalización de los canales virtuales.

2.5.6. Direccionamiento ATM

Un protocolo de señalización necesita algún tipo de esquema de direccionamiento. Las redes privadas probablemente utilizan un direccionamiento OSI NSAP, debido principalmente a que un proceso administrativo existe. Los *carriers* públicos probablemente utilizan números E.164. Para que un esquema de direccionamiento sea útil, debe existir un formato estandarizado de dirección que sea entendido por todos los *switches* o conmutadores del sistema.

La figura 38 muestra los tres formatos de direcciones que han sido definidos por el foro ATM, estos son:

Figura 38. **Formato de direcciones ATM**



Fuente: KASERA, Sumit. ATM networks concepts and protocols. p. 215.

- Código de país DCC (Data country code). Los números DCC son administrados por varias autoridades en cada país. Por ejemplo, ANSI tiene esta responsabilidad en los Estados Unidos. El DCC identifica la autoridad que es responsable por los campos de enrutamiento.
- Designador de código internacional ICD (Internacional code designator). Los ICD son administrados de una forma internacional por el Instituto Británico de Estándares (BSI).
- Direcciones privadas E.164. Las direcciones E.164 son esencialmente números telefónicos que son administrados por carriers telefónicos, con la administración de códigos de identidad como parte de los números E.164.

Sin importar el tipo de numeración utilizado, es muy importante que un implementador de redes ATM obtenga números únicos globales para prevenir confusiones posteriores cuando las islas ATM se conecten entre sí. Siguiendo el DCC o los campos ICD se encuentra el campo de enrutamiento. Para el DCC y el IDC, esta es la información que contiene la dirección que está siendo llamada. Este campo de enrutamiento puede verse como un espacio para direcciones. El término “campo de enrutamiento” implica que hay más en el campo que una simple dirección. En particular, el mecanismo de direccionamiento probablemente será jerarquizado para asistir el enrutamiento.

En la opción E.164, el uso del campo de enrutamiento no está definido hasta el momento. Cada dirección en el campo de enrutamiento puede referirse a un *switch* en particular, o a un UNI en un *switch*. Si se refiere a un *switch*, entonces más información será necesaria para encontrar el UNI exacto que es especificado. Por otro lado, si se especifica un UNI, entonces esto es suficiente para servir como una dirección única global.

2.5.7. Registro de direcciones

En la figura 38, se considera el caso en el cual los primeros 13 *bytes* solamente especifican un *switch* en particular. En este caso, el sistema de conmutación debe poder encontrar el UNI apropiado para la llamada. Esto puede ser realizado utilizando los siguientes 6 *bytes*, llamados “ID del sistema final”. Los sistemas finales o terminales, pueden contener información adicional de direccionamiento. Por ejemplo, la terminal puede suplir los últimos seis *bytes* al *switch* para identificar una UNI en particular. De esta manera un *switch* completo puede ser asignado a una dirección de 13 *bytes*, y el *switch* será responsable del mantenimiento y utilización del ID del sistema final.

El mecanismo puede ser particularmente atractivo para un usuario que desee una gran red privada virtual, de manera que el usuario puede obtener direcciones de *switch* de una organización y luego administrar localmente ID de los sistemas finales.

Esto podría ser una ventaja permitiendo a los usuarios de una organización administrar direcciones individuales sin involucrar una organización exterior. De cualquier manera, cualquiera fuera de la organización tratando de llamar un UNI dado, debería de conocer los valores tanto para el campo de enrutamiento como el ID del sistema final.

Los seis *bytes* el ID del sistema final no están especificados, así que su uso puede ser dejado a los fabricantes. Un uso anticipado del ID del sistema final es el de usar seis *bytes* (48 *bits*) para la dirección MAC que es asignada a cada interfaz de red (NIC). Por supuesto, el *switch* ATM y la terminal ATM deben conocer estas direcciones para poder enlutar las llamadas, enviar mensajes de señalización, etc. Esta información puede ser obtenida automáticamente utilizando el ILMI (*integrated link management interface*) o administración del interfaz con enlace integrado.

2.6. Tráfico de la red, calidad de servicio QoS y consideraciones de desempeño

La administración de los recursos de la red debe tener en cuenta tres aspectos: el tráfico ofrecido (descrito por la utilización de parámetros de tráfico y descriptores); la calidad de servicio QoS (que la red proveerá y el usuario obtendrá); y los requerimientos para evaluar si los usuarios de las terminales tienen el QoS requerido y la red el QoS esperado.

Para proveer el QoS, la red ATM debe asignar recursos de la red incluyendo ancho de banda, procesamiento y espacio de almacenamiento temporal (buffers) para asegurar buen desempeño, utilizando controles de congestión y flujo, dándole capacidad de transmisión a los canales virtuales.

El manejo de tráfico incluye los siguientes mecanismos:

- Contrato de tráfico para especificar cada canal o ruta virtual.
- Control de admisión de conexiones (CAC) para enrutar cada canal virtual a lo largo de una ruta con recursos adecuados.
- Políticas de tráfico para marcar (por medio del CLP - *bit* de pérdida de celda) o descartar celdas ATM que violen dicho contrato.

2.6.1. Descriptores de tráfico

Las características de tráfico pueden ser descritas utilizando los siguientes parámetros conocidos como descriptores de tráfico:

- Tasa pico de celda PCR (*peak cell rate*), es la tasa máxima para el envío de celdas ATM.
- Tasa de envío sostenido de celdas SCR (*sustained cell rate*), es la tasa esperada o requerida de celdas sobre un gran intervalo de tiempo.
- Tasa mínima de celdas MCR (*minimum cell rate*), es el número mínimo de celdas por segundo que se considera aceptable.

- Tolerancia en la variación del retardo de las celdas CDVT (*cell delay variation tolerance*), dice cuánta variación de tiempo se presentará en la transmisión de celdas.

2.6.2. Parámetros de la calidad de servicio (QoS)

Los parámetros QoS incluyen:

- Retardo de transferencia de celda CTD (*cell transfer delay*): es el retardo extra adicionado a una red ATM en un *switch* ATM, sumado al retardo normal a través de los elementos de red y las líneas. La causa del retardo en este punto se debe al multiplexado asíncrono estadístico. Las celdas deben encolarse en el buffer si más de una celda compite por la misma salida y esto depende de la cantidad de tráfico dentro del *switch* y por lo tanto de la probabilidad de contención.
- Variación del retardo de la celda CDV (*cell delay variation*): el retardo depende en el diseño de la red y del *switch* (como por ejemplo el tamaño del buffer), y las características del tráfico en cierto momento. Existen dos parámetros de desempeño asociados al CDV; CDV de un punto y CDV de dos puntos. El CDV de un punto describe la variabilidad en el patrón de llegada de las celdas observadas con referencia a una frecuencia negociada. El CDV de dos puntos describe la variabilidad en el patrón de arribo de las celdas, observadas a la salida de la conexión con referencia al patrón correspondiente en la entrada de la conexión.
- Radio de pérdidas de celda CLR: es la razón del total de celdas perdidas dividido por el total de celdas exitosamente transferidas, más el error total de celdas.

2.6.3. Consideraciones de desempeño

Existen cinco parámetros que caracterizan el desempeño de un sistema de conmutación ATM:

- Rendimiento (*Throughput*): puede ser definido como la tasa a la cual las celdas parten del *switch* o conmutador medido en el número de celdas que salen por unidad de tiempo. Principalmente depende en la tecnología y dimensionamiento del *switch* ATM. Escogiendo una topología correcta del *switch*, el *throughput* puede ser incrementado.
- Probabilidad de bloqueo de conexión: ya que ATM está orientado a la conexión, habrá una conexión lógica entre la entrada y la salida durante la fase de ajuste de conexión.
- Probabilidad de pérdida de celdas: en conmutadores ATM, cuando más celdas entran a una cola de espera de las que puede manejar, las celdas se pierden. Esta probabilidad de pérdida de celdas debe ser mantenida dentro de ciertos límites para asegurar una alta confiabilidad en el *switch*. Existe la posibilidad de que las celdas puedan ser mal enrutadas o estas puedan alcanzar un canal lógico erróneo, esto se llama probabilidad de inserción de celda.
- Retardo de conmutación: este es el tiempo requerido para conmutar una celda ATM a través del *switch*. Los valores típicos del retardo de conmutación se encuentran entre los 10 y los 1000 microsegundos; este retardo consiste de dos partes: retardo fijo de conmutación, debido a la transferencia interna a través del *hardware* y el retardo de cola, debido al llenado del buffer del *switch*.

- Variación del retardo: esto se denota como la probabilidad de que el retardo del *switch* exceda cierto valor.

2.7. Administración de recursos de la red

Las redes ATM deben designar los recursos de la red; en particular, la red debe soportar varios tipos de tráfico y proveer diferentes tipos de servicios. Por ejemplo, la voz requiere un retardo muy bajo y una variación de retardo igualmente baja. La red debe ubicar los recursos para garantizar el desempeño de esta aplicación.

El concepto utilizado para resolver este problema se llama administración del tráfico (*Traffic management*). Cuando una conexión se realiza, la terminal que inicia el servicio especifica un contrato de tráfico. Este permite a la red ATM examinar la utilización actual de la red y determinar si de hecho una conexión puede ser establecida y si será capaz de acomodar este uso. Si los recursos de la red no están disponibles, la conexión será rechazada.

El problema que puede encontrarse es que las características del tráfico para una aplicación dada rara vez se conocen exactamente. Por tanto la red “observa” las celdas que llegan a una conexión para determinar si estas corresponden y se enmarcan dentro del contrato. Aquellas que violan el contrato tienen el *bit* CLP activado. La red tiene la opción de descartar estas celdas ahora o cuando la red empiece a congestionarse.

En teoría, si los recursos de la red son ubicados correctamente, descartar todas las celdas; con el *bit* de pérdida de celda activado puede resultar en un buen nivel de utilización de la red.

2.7.1. Control de admisión de conexiones (CAC)

El control de admisión de conexiones puede ser definido como el conjunto de acciones encaminadas a establecer una conexión VC/VP.

Una petición de conexión para una llamada dada puede ser aceptada solamente si existen suficientes recursos en la red para establecer la conexión punto a punto, manteniendo el QoS requerido sin degradar el QoS existente en la red por esta nueva conexión.

Existen dos clases de parámetros considerados para el control de admisión de conexión, y estos pueden ser descritos como sigue:

- El conjunto de parámetros que caracterizan la fuente del tráfico, por ejemplo tasa pico de celda, tasa promedio de celda, comportamiento de ráfaga, duración de picos, etc.
- Otro conjunto de parámetros denotan la clase requerida de QoS expresada en términos de retardo de transferencia de celda, variación del retardo (*delay jitter*), radio de pérdida de celdas, etc.

Cada *switch* ATM a lo largo de la ruta de conexión en la red será capaz de verificar si existen suficientes recursos para satisfacer el QoS requerido.

2.7.2. UPC y NPC

El parámetro de control de uso (UPC) y el de control de red (NPC) ejecutan funciones similares en la interfaz usuario-red y en la interfaz red-nodo, respectivamente.

Estos indican el conjunto de acciones ejecutadas por la red para monitorear y controlar el tráfico en una conexión ATM en términos del volumen de tráfico de celdas y en la validez del enrutamiento de las mismas. Esta función es también conocida como “función policía”. El propósito principal de esta función es la de proteger los recursos de la red de conexiones maliciosas y fallas en los equipos, además de reforzar la compatibilidad de cada conexión ATM con el contrato de tráfico negociado.

Un algoritmo ideal para el UPC/NPC cumple con las siguientes características:

- Capacidad para identificar situaciones de tráfico ilegal
- Rápida respuesta a violaciones de parámetros
- Menor complejidad y más simplicidad en la implementación

2.7.3. Control de prioridad y control de congestión

El *bit* de prioridad de celda perdida (CLP – *cell loss priority*) en el encabezado de una celda ATM permite a los usuarios generar diferentes prioridades en los flujos de tráfico y las celdas de menor prioridad son descartadas para proteger el desempeño de la red, dando lugar a celdas de alta prioridad.

Las dos clases de prioridad son tratadas separadamente por las funciones UPC/NPC. El control de congestionamiento juega un rol importante en la administración efectiva del tráfico en las redes ATM. El congestionamiento es un estado de los elementos de la red en la cual la red no puede asegurar el QoS de las conexiones existentes y de las nuevas peticiones de conexión.

El congestionamiento puede suceder debido a fluctuaciones estadísticas impredecibles del flujo de tráfico o de la falla en la red. El control de congestionamiento tiene como finalidad la reducción de los efectos de congestión, además de la prevención de que tal congestionamiento se propague en la red. La red puede asignar procedimiento CAC o UPC/NPC para evitar situaciones de sobrecarga.

Para mencionar un ejemplo, el control de congestionamiento puede minimizar la tasa pico de *bit* disponible para un usuario y monitorearla. El control de congestión también puede aplicarse usando la notificación explícita de congestión en adelante EFCN (*explicit forward congestión notification*) como se utiliza en el protocolo de *Frame Relay*.

Un nodo en la red en un estado de congestión puede ajustar el *bit* de EFCN en el encabezado de una celda. Del lado del receptor, los elementos de la red pueden utilizar esta indicación de *bit* para implementar protocolos para reducir la tasa de celda de una conexión ATM durante el congestionamiento.

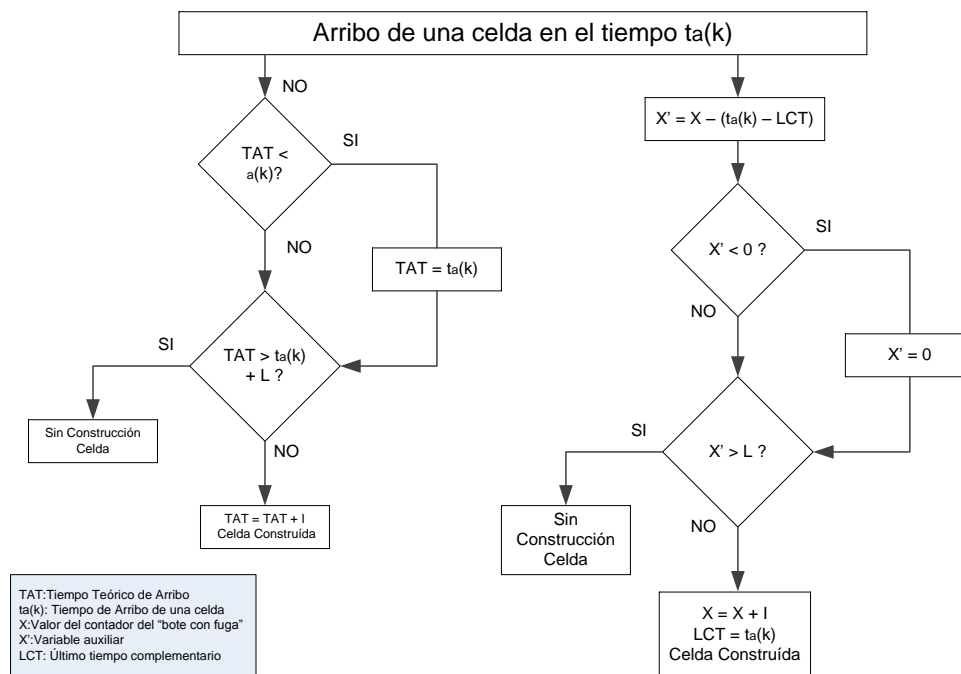
2.7.4. Modelado del tráfico

El modelado del tráfico cambia las características del tráfico de un flujo de celdas en una conexión VP o VC. Este distribuye las celdas de las conexiones ATM individuales para decrementar la tasa pico de celda, también reduce la variación de retardo de celda. El modelado de tráfico debe preservar la integridad de la secuencia de las celdas de una conexión ATM. El modelado de tráfico es una función opcional tanto para los operadores de la red como para los usuarios finales. Esto ayuda al operador de la red a dimensionar el costo efectivo de la red.

2.7.5. Algoritmo genérico de la tasa de celdas

El contrato de tráfico está basado en el algoritmo genérico de tasa de celda (GCRA), el algoritmo especifica de forma precisa cuando un flujo de celdas viola o no, el contrato de tráfico. Al considerar una secuencia de celdas que arriban, esta secuencia se procesa con el algoritmo para determinar cuáles celdas violan el contrato. El algoritmo es definido por dos parámetros: el parámetro incremental "I" y el parámetro límite "L". El GCRA puede ser implementado por cualquiera de los siguientes algoritmos: algoritmo del bote con fuga (*leaky bucket algorithm*) o el algoritmo de calendarización virtual (*virtual scheduling algorithm*). La figura 39 muestra un diagrama de flujo del algoritmo GCRA.

Figura 39. Algoritmo de rango de celda genérica (GCRA)



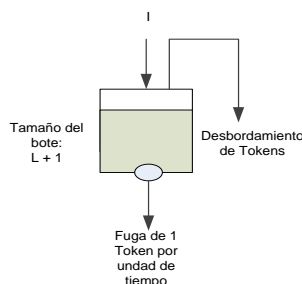
Fuente: PERROS, Harry. Connection-oriented networks. p. 104.

Los dos algoritmos mencionados sirven para el mismo propósito: hacer que ciertas celdas sean conformes (arriba dentro del límite de tiempo de arribo esperado) o no conformes (arriba más rápido que el tiempo de arribo esperado).

2.7.6. Algoritmo del bote con fuga LBA

Algunas veces es conocido como el bote con fuga de estado continuo. Debe pensar en esto como un bote con un hoyo en él. Para hacer esto más concreto, asumir que el agua ha sido vertida en el bote y que se fuga a una unidad de agua por unidad de tiempo de celda. Cada vez que una celda arriba a la red que contiene información para esta conexión, “1” unidades de agua son vertidas en el bote, por consiguiente el agua empieza a drenarse. La figura 40 se muestra el algoritmo LBA.

Figura 40. Algoritmo del “bote con fuga” (LBA)

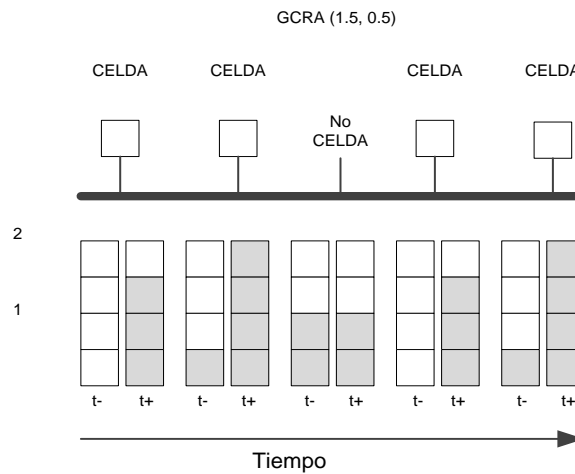


Fuente: elaboración propia.

Entonces será mejor bajar el ritmo de llenado, de hecho, la tasa promedio que puede ser manejada es la diferencia entre el tamaño de “1” y la tasa de fuga. “1” afecta la tasa de celdas a largo plazo, “L” afecta la tasa de celdas de corto plazo porque esta afecta el tamaño del bote. Este controla cómo las celdas pueden viajar en ráfaga a través de la red.

Si se considera el algoritmo del bote con fuga con un ejemplo, en la figura 41, los tiempos de las celdas están separados de izquierda a derecha en tiempos iguales. El estado del bote justo antes del tiempo de celda es representado por t^- , y el estado del bote justo después es representado como t^+ . Asumir que el bote está vacío y las celdas vienen a esta conexión. Agregamos una y media unidades de agua en el bote. Cada celda contiene una y media unidades de información, este es el parámetro incremental “I”.

Figura 41. **Bajo tráfico ingresando al LBA – GCRA (1.5, 0.5)**



Fuente: elaboración propia.

Solo se puede drenar una unidad por tiempo de celda. Al momento en el que se tiene el siguiente tiempo de celda, una unidad ha sido drenada, y, por supuesto, otra celda entra así que se agregan las unidades “I”. Ahora el bote se encuentra a la mitad más una y media, está totalmente lleno. Al siguiente momento, si una está celda arriba, esa violaría el contrato porque no hay suficiente espacio para poner una y media unidades en el bote.

Asúmase que se están obedeciendo las reglas. No se envía una celda y este nivel permanece igual para luego, drenarse finalmente, por lo que se vuelve a donde se comenzó. La razón por la que este es un caso de bajo tráfico es porque este tiende a ser periódico.

En este caso, cada dos tiempos de celda de tres, una celda es transmitida, y se asume que este patrón permanece indefinido. Claro está, dos enviados de tres es exactamente el inverso del parámetro de incremento, 1.5. Esto puede ser ajustado con "I" y la tasa de fuga, de manera que el parámetro pueda ser incrementado a voluntad, (17 de 23, 15 de 16, etc.). Ahora considerar un ejemplo de alto tráfico en ráfaga. Para hacer esta ráfaga, incrementar el parámetro a 7; el parámetro de incremento es 4.5, de manera que el bote posee una profundidad de 11.5.

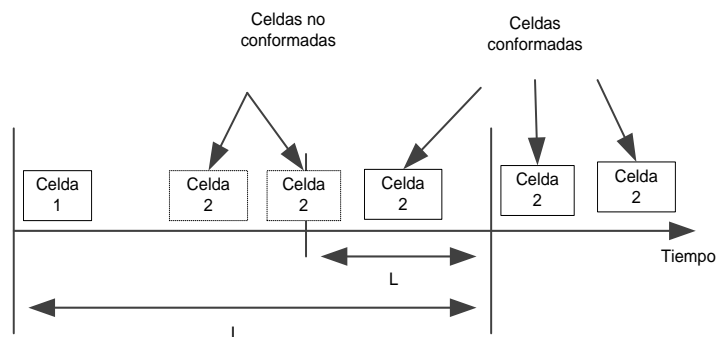
Como en este ejemplo se envían tres celdas, la información se acumula en el bote y se encuentra exactamente lleno después de tres celdas. Ahora la tasa está drenando una unidad de agua por tiempo, pero el incremento es 4.5. Obviamente, se tendrá que esperar considerablemente antes de que se pueda enviar otra celda. Si se espera lo suficiente para que el bote esté completamente vacío, otra ráfaga de tres celdas será aceptada. Esto ilustra el efecto de incrementar el parámetro límite para permitir tráfico tipo ráfaga. Esto es especialmente crítico para una típica aplicación de datos.

2.7.7. Algoritmo de calendarización virtual VSA

En el algoritmo de calendarización virtual VSA, "I" es el parámetro utilizado para separar el tiempo entre dos arribos consecutivos de celdas. Este permite al espacio entre dos celdas a ser más pequeño que I, pero debe ser mayor que (I-L).

El desplazamiento total del tiempo para un conjunto de celdas consecutivas está controlado a ser menor que L . La figura 42 ilustra el concepto del VSA. Esto demuestra que el tiempo entre arribos de la celda 1 y la celda 2 debe ser igual o más grande que " I ". Si la celda 2 arriba más temprano que el tiempo interarribos " I " pero más tarde que $(I-L)$, la celda 2 todavía es considerada como una celda conformada, de lo contrario la celda 2 es considerada no conformada.

Figura 42. **Algoritmo de calendarización Virtual (VSA)**



Fuente: elaboración propia.

2.8. Protocolos de internet

El desarrollo de los protocolos de internet ha seguido diferentes caminos de los protocolos ATM, convirtiéndose en los estándares de las redes actuales. En los primeros años, el internet fue desarrollado y utilizado principalmente por universidades, institutos de investigación, industrias y gobierno. Las principales tecnologías de red fueron aplicadas para redes de instalaciones universitarias, terminales con acceso telefónico, y servidores interconectados por redes *backbone*. Las principales aplicaciones fueron el correo electrónico, transferencia de archivos y telnet.

La explosión de la internet comenzó a mediados de los 90's, donde la red mundial global W.W.W. (*World Wide Web*) proveyó una interfaz simple para usuarios comunes quienes no sabían nada sobre la tecnología del internet. El impacto fue más allá de lo que la gente pudo haber imaginado y entró en la vida diaria para el acceso de información, comunicaciones, entretenimiento, comercio electrónico (*e-commerce*), entre otras.

Nuevas aplicaciones y servicios han sido desarrollados utilizando la W.W.W. basada en el internet. Mientras tanto, las tecnologías e industrias han comenzado a converger de manera que las computadoras, comunicaciones, transmisiones, redes fijas e inalámbricas no puedan ser separadas unas de otras. El diseño original del internet puede no responder a las crecientes demandas y requerimientos de servicios, por lo tanto la IETF comenzó a trabajar en la siguiente generación de redes. LA IP versión 6 es el resultado del desarrollo de la siguiente generación de redes. La tercera generación de redes móviles, *Universal Mobile Telecommunications Systems* UMTS, ha planeado incluir redes IP a las comunicaciones móviles.

2.8.1. Conceptos básicos

Las redes internet son una muestra de la evolución de las computadoras y de las redes de datos. Existen muchas tecnologías disponibles para soportar diferentes servicios de datos y aplicaciones, utilizando métodos diferentes para diferentes tipos de redes. Las tecnologías de red incluyen las redes de área local LAN, las redes de área metropolitana MAN y las redes área ancha WAN, utilizando topologías tales como estrella, anillo, árbol y malla y diferentes medios de acceso. Como ATM, el internet no es una tecnología de transmisión sino un protocolo de transmisión.

A diferencia de ATM, el internet fue desarrollado para permitir que diferentes tecnologías sean capaces de interconectarse utilizando el mismo tipo de paquetes de capa de red a ser transportada, a través de diferentes tecnologías de red.

Las redes de área local (LANs) son ampliamente utilizadas para interconectar computadoras en un salón, edificio o campus. Las redes de área metropolitana (MANs) son redes de alta velocidad para interconectar (LANs) entre sí en áreas metropolitanas. Las redes de área ancha (WANs) son utilizadas a través de un país, continente o globo.

Antes de internet, dispositivos llamados *bridges* fueron usados para interconectar muchos tipos diferentes de redes a nivel de enlace, transmitiendo funciones y formatos de tramas, además de adaptar las velocidades de transmisión entre muchas diferentes tecnologías de red. La interconexión de diferentes tipos de redes utilizando diferentes protocolos para formar una gran red se convirtió en un gran desafío.

El protocolo de internet ha tenido un desarrollo diferente de los protocolos de redes y tecnologías, introduciendo un protocolo común sin conexión en el cual la información es transportada por paquetes a través de diferentes tecnologías de red.

2.8.2. Jerarquías de protocolos

La jerarquía de los protocolos y los principios de las capas de los mismos son conceptos importantes en la complejidad del diseño de redes. Los protocolos de internet definen las funciones de las capas de redes y demás.

Detalles como transportar las redes a través de diferentes tipos de tecnologías de redes son considerados como funciones de capas bajas del modelo OSI, definido dentro de tecnologías individuales, a medida que las tecnologías de red son capaces de proveer tramas con una carga útil de información y funciones de capa de enlace, capaces de llevar los paquetes de internet a través de la red. De acuerdo con el modelo OSI, en la cima de las capas de red se encuentra la capa de transporte, luego la capa de aplicación.

2.8.3. Capa de red sin conexión

La función de capa de red de internet es sin conexión (*connectionless*) proveyendo los mejores servicios posibles. La red completa consiste en muchas subredes, cada una de las cuales puede ser de cualquier tipo de tecnologías de red incluyendo LAN, MAN y WAN. Los usuarios pueden comunicarse directamente entre sí en la misma subred utilizando tramas *broadcast* en el medio compartido tales como LAN, tramas de enlace punto a punto tales como enlaces de marcación (*dial up*) y tramas multiservicio tales como las WAN.

Los enrutadores (*routers*), se encuentran al borde de las subredes y las conectan entre sí. Estos pueden comunicarse entre sí directamente y también con los usuarios finales en las mismas subredes. Los *routers* de internet pueden interconectarse por medio de diferentes tecnologías.

Cada paquete generado por la terminal fuente porta las direcciones de las terminales fuente y destino, y puede ser enviada al terminal destino en la misma subred o a un *router* en la misma subred. El *router* es capaz de recibir el paquete y reenviarlo hacia el siguiente *router*, haciendo uso de los protocolos de ruteo, hasta que el paquete alcanza su destino.

2.8.4. El formato del paquete IP

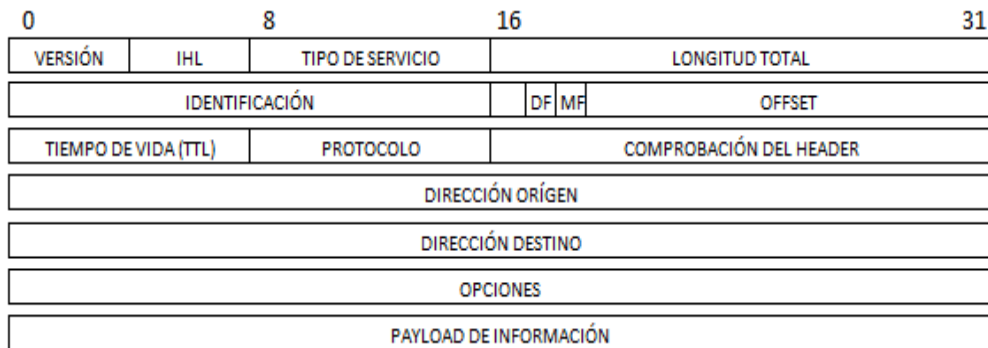
En el modelo de referencia OSI, solamente hay un protocolo de capa de red, este es el de internet (IP). Es un protocolo único que hace uso de los servicios de transmisión provistos por las diferentes tipos de redes, ofreciendo servicios de capa de red punto a punto al protocolo de capa de transporte. Los paquetes IP pueden transportarse a través de diferentes tipos de redes, pero su formato permanece igual.

Cualquier protocolo por encima de la capa IP puede acceder solamente a las funciones provistas por el paquete IP. La figura 43 muestra el formato del paquete IP. Cada campo del paquete IP tiene las funciones siguientes:

- El campo de versión, mantiene un seguimiento de la versión del protocolo al cual pertenece el datagrama. La versión actual es 4, también llamado IPv4. IPv5 es una versión experimental. La siguiente versión a ser introducida en el internet es la IPv6; en esta, el encabezado ha cambiado dramáticamente.
- El campo IHL es el largo del encabezado en palabras de 32 *bits*. El valor mínimo es 5 y el máximo 15, el cual limita el encabezado a 60 *bytes*.
- El campo tipo de servicio, permite al host indicarle a la red qué clase de servicio requiere. Varias combinaciones de retardo, *throughput* y confiabilidad son posibles.
- El campo de largo total incluye el encabezado y la información. El valor máximo es de 65,535.

- El campo de identificación se necesita para permitir al host destino determinar cuál datagrama pertenece a cada fragmento. Cada paquete IP en la red está identificado de forma única.
- DF: no fragmentar. Esto le dice a la red que no fragmente el paquete, ya que el destinatario no puede reensamblarlo.
- MF: Más fragmentos. Este indica que más fragmentos van a llegar como parte de un paquete IP.
- El campo de desviación de fragmento indica dónde, en el datagrama actual, pertenece dicho fragmento.
- El campo tiempo de vida, es un contador utilizado para limitar el tiempo de vida del paquete, para prevenir que dicho paquete permanezca en la red por siempre.
- El campo protocolo, indica la información del protocolo en la carga útil de información (*payload*). Este puede ser TCP o UDP. También es posible portar información de otros protocolos de capa de transporte.
- El campo de *checksum* verifica el encabezado del IP.
- Los campos de dirección fuente y destino indican la red y el *host*.
- El campo presenta opciones de tamaño variable. Cinco funciones son definidas: seguridad, enrutamiento estricto, enrutamiento flexible, registro de enrutamiento y registro de tiempo; todos estos campos están mostrados en la tabla VII.

Figura 43. **Formato del encabezado del paquete IP**



Fuente: ANTTALAINEN, Tarmo. Introduction to telecommunications network engineering. p. 310.

Tabla VII. **Campos de opciones del encabezado del paquete IPv4**

Opciones	Descripción
Seguridad	Especifica cuán secreto es el datagrama
Enrutamiento estricto fuente	Da un camino completo a seguir
Enrutamiento flexible fuente	Da una lista de <i>routers</i> que no deben perderse
Registro de enrutamiento	Hace que cada <i>router</i> agregue su dirección IP
Registro de tiempo	Hace que cada <i>router</i> agregue su dirección y un registro de tiempo

Fuente: elaboración propia.

2.8.5. Direcciones IP

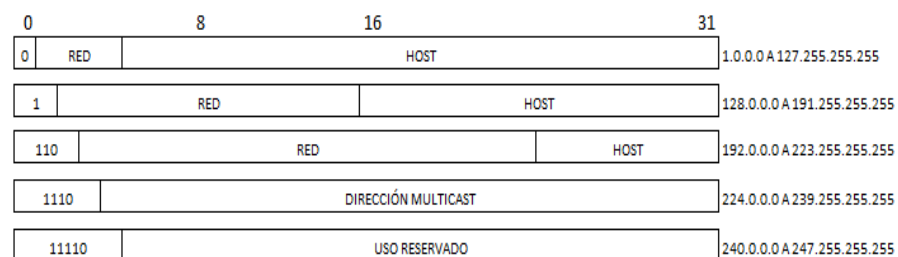
La dirección IP utilizada en los campos de dirección fuente y destino de un paquete IP es de 32 *bits* de largo. Puede estar compuesto de hasta tres partes. La primera parte identifica la clase de la dirección de red de la A, a la E.

La segunda parte es el identificador de la red y la tercera, el identificador del *host*. La figura 44 muestra el formato de las direcciones IPv4.

En las direcciones A y B, existe un gran número de identificación de clientes (*hosts*). El *host* puede ser agrupado en subredes, cada una de las cuales es identificada utilizando los *bits* de orden superior del *host*. La máscara de subred es introducida para indicar la división entre el identificador de red + identificador de subred (*net id + subnet id*) y la identificación del *host* (*host id*). Similarmente, hay un gran número de identificadores de red (*net id*) en las direcciones de clase C. Algunos de los *bits* de orden menor del identificador de red pueden ser agrupados para formar una superred.

Esto es llamado enrutamiento interdominio sin clase CIDR (*classless inter domain routing*). Los *routers* no necesitan conocer nada dentro de la superred o el dominio. Las direcciones clase A, B y C identifican el punto de unión del *host*. Las direcciones clase D identifican las direcciones *multicast* (como un canal de radio) pero no un punto de unión en la red. La clase E está reservada para su uso en el futuro.

Figura 44. **Formato de direcciones IP**



Fuente: ANTTALAINEN, Tarmo. Introduction to telecommunications network engineering.
p. 307.

2.8.6. Mapeo entre las direcciones de internet y las direcciones físicas

Una dirección de internet es utilizada para identificar una subred en el contexto del internet. Cada dirección consiste de dos partes: una identifica de forma única a una subred y la otra a la computadora o *host*. La dirección física es utilizada para identificar una terminal de red relacionada a las tecnologías de transmisión. Por ejemplo, se puede utilizar un número telefónico para identificar teléfonos individuales en las redes telefónicas, y una dirección *Ethernet*, para identificar cada interfaz de red NIC de forma única para las redes *Ethernet*.

Cada *host* (computador), en el que se instala una tarjeta de red *Ethernet*, tendrá una dirección *Ethernet* única en todo el mundo. Las subredes pueden ser conectadas a internet utilizando *routers*.

Todos los *routers* intercambian información utilizando protocolos de enrutamiento para averiguar la topología del internet y calcular la mejor ruta para ser utilizada para reenviar paquetes a sus destinatarios. De cualquier manera, las transmisiones de los paquetes de internet entre los *routers* necesitan usar direcciones nativas y tramas de información de las topologías de la red.

A medida que las direcciones nativas identifican puntos de acceso a la tecnología de red y la dirección de internet identifica el *host*, un mapeo es requerido para especificar el *host* identificado, unido al punto de acceso de la red, formando una parte de la subred. Un administrador de red puede asignar el mapeo manualmente para redes pequeñas, pero es preferible tener protocolos de red para mapear automáticamente a escala global.

2.8.7. ARP y RARP

El protocolo de resolución de direcciones (ARP) es utilizado para encontrar el mapeo entre la dirección IP y la dirección de red como una dirección *Ethernet*. Dentro de una red, un *host* puede preguntar por la dirección de red dando una dirección IP para obtener el mapeo. Si la dirección IP se encuentra fuera de la red, el *host* reenviará la dirección IP hacia el *router*. El protocolo de resolución de dirección reversa RARP, es el utilizado para resolver el problema a la inversa, esto es, encontrar la dirección IP dando una dirección de red tal como una de *Ethernet*. Esto es resuelto normalmente introduciendo un servidor dedicado RARP.

El servidor mantiene una tabla del mapeo de las direcciones. Un ejemplo de la utilización RARP se da cuando una máquina que inicia su proceso de arranque (*booting*) no tiene una dirección IP y necesita contactar a un servidor para obtener una dirección IP para ser unida al internet.

2.8.8. Protocolos de enrutamiento de internet

Cada *router* en el internet tiene una tabla de enrutamiento apuntando al siguiente *router* o *router default* para reenviar paquetes a todas los destinatarios. A medida que el internet crece y crece, es impráctico o imposible configurar las tablas manualmente, aunque en un inicio se realizó de esta manera para redes pequeñas. Debido a esto se desarrollaron protocolos para configurar el internet automáticamente.

Una parte del internet administrada por una organización puede formar un dominio o sistema autónomo (AS). El protocolo de enrutamiento de *gateway* interior (IGRP) es utilizado para el enrutamiento IP dentro de un dominio.

2.8.9. El protocolo de enrutamiento de *gateway* interior (IGPR)

El protocolo de enrutamiento original fue llamado Protocolo de información de enrutamiento (RIP), el cual utilizó el algoritmo del vector distancia.

Dentro del dominio, cada *router* tiene una tabla de enrutamiento hacia el *router* siguiente, guiándolo hacia la red destino. El *router* periódicamente intercambia su tabla de enrutamiento con los *routers* vecinos y la actualiza basado en la nueva información recibida.

Debido al problema de convergencia lenta, un nuevo protocolo de enrutamiento fue introducido en 1979, utilizando el algoritmo de estado de enlace (*link state algorithm*). El protocolo fue llamado también Protocolo de enrutamiento de estado de enlace.

En lugar de obtener información de enrutamiento de sus vecinos, cada *router* que utiliza el protocolo de estado de enlace colecta información de los enlaces y envía información del estado de los enlaces de su propia tabla y de la de sus vecinos, inundando la red con dicha información.

Cada *router* en la red tendrá la misma información de estado de enlace y puede calcular independientemente la tabla de enrutamiento. Esto solucionó los problemas del RIP para redes a gran escala. En 1988, la IETF comenzó a trabajar en un nuevo protocolo de enrutamiento de *gateway* interior, llamado *camino más corto primero* OSPF (*open shortest path first*), basado en el protocolo de estado de enlace, el cual comenzó a ser un estándar en 1990.

También está basado en algoritmos y protocolos publicados en literaturas abiertas (por ello la palabra “*open*”), y está diseñado para soportar una variedad de métricas de distancia, adaptación a cambios, automática y rápidamente, de la topología, enrutamiento basado en el tipo de servicio y en tráfico en tiempo real, balance de carga, sistemas jerarquizados y algunos niveles de seguridad. También maneja rutas conectadas a internet vía túnel. El OSPF soporta tres clases de conexiones y redes incluyendo líneas punto a punto entre dos *routers*, redes *multicast* (tales como LAN’s), y redes multiacceso sin *broadcasting* (tales como las WAN’s). Cuando un *router* se inicializa, el *router* envía un mensaje “HELLO” y los *routers* adyacentes intercambian información.

Cada *router* periódicamente envía mensajes de información de estado de enlace para cada *router* adyacente. Los mensajes de descripción de base de datos incluyen la secuencia de números de todos los registros del estado de enlace y enviados de paquetes de internet. Utilizando el envío masivo de información del estado de enlace (*flooding*), cada *router* informa a todos los demás *routers* vecinos; esto permite a cada *router* construir la gráfica para su dominio y calcular la vía más corta para formar una tabla de enrutamiento.

2.8.10. El protocolo exterior de enrutamiento de *gateway* EGRP

Todo lo que tiene que hacer el protocolo EGRP es mover paquetes tan eficientemente como sea posible. EGPR es fundamentalmente un protocolo de vector distancia, pero con mecanismos adicionales para evitar los problemas asociados con el algoritmo de vector distancia. Cada *router* EGRP mantiene un seguimiento de la ruta exacta utilizada para resolver los problemas del vector de distancia. EGRP también es llamada *Border Gateway Protocol* (BGP).

2.9. Protocolos de capa de transporte: TCP y UDP

Los protocolos de capa de transporte aparecen en los *hosts*. Cuando un paquete llega a un *host*, este decide cuál aplicación procesa la información, por ejemplo email, telnet, ftp o www. Existen funciones adicionales incluyendo confiabilidad, temporizado, control de flujo y saturación. Existen dos protocolos en la capa de transporte dentro del modelo de referencia.

2.9.1. Protocolo de transmisión TCP

TCP es un protocolo orientado a la conexión, confiable en conexiones punto a punto. Este provee una comunicación interprocesos confiable entre un par de procesos “corriendo” en las computadoras *hosts*.

TCP debe ser capaz de operar por encima de un amplio espectro de sistemas de comunicación desde LAN alámbricas y redes de paquetes conmutados (*packet-switched networks*) y redes de circuitos conmutados (*circuit-switched networks*) a redes inalámbricas, redes móviles inalámbricas y redes satelitales.

2.9.2. El formato del encabezado de TCP

Las funciones de los campos son las siguientes:

- Campo de puerto fuente y puerto destino: cada puerto consta de 16 *bits*, los cuales especifican los números de puerto fuente y destino a ser utilizados por los procesos como direcciones, de tal manera que los procesos en las computadoras fuente y destino puedan comunicarse entre sí, enviando y recibiendo información de las direcciones.

- Campo de número de secuencia: está conformado por 32 *bits*, el cual identifica el primer octeto en este segmento (excepto cuando el *bit* de control SYN está activo). Si el *bit* SYN está presente, el número de secuencia es el número inicial de secuencia (ISN) y el primer octeto es ISN +1.
- Campo de número de reconocimiento: este consiste de 32 *bits*. Si el *bit* de control de reconocimiento (ACK) se encuentra activo, el campo contiene el valor del siguiente número de secuencia que el remitente espera recibir. Una vez que la conexión es establecida, esta se envía siempre.
- Campo de datos de compensación (*offset*): este campo consiste de 4 *bits*, el número de 32 *bits* en el encabezado TCP. Este indica dónde comienza la información; el encabezado TCP es un número entero de 32 *bits* de longitud.
- Campo reservado: consistente de 6 *bits* para uso futuro el cual debe ser cero por defecto.
- Campo de *bits* de control: consiste de 6 *bits* (de izquierda a derecha) para las siguientes funciones:
 - URG: indicador de campo de puntero urgente
 - ACK: campo de reconocimiento de envío
 - PSH: función "*push*"
 - RST: restablecer la conexión
 - SYN: números de secuencia de sincronización
 - FIN: no más data del remitente

- Campo de ventana: consiste de 16 *bits*, el número de octetos comenzando con el uno indicado en el campo de reconocimiento (ACK), el cual el remitente de este segmento está dispuesto a aceptar.
- Campo verificación de suma: consiste de 16 *bits*; es el complemento del dieciseisavo complemento de la suma de todas las palabras de 16 *bits* en el encabezado y en el texto. Si un segmento contiene un número impar de encabezado y octetos de texto para ser verificados, el último octeto es llenado con ceros a la derecha para formar palabras de 16 *bits* para propósitos de verificación de suma (*checksum*). El relleno no es transmitido como parte del segmento. Mientras se procesa el *checksum*, el campo de *checksum* es reemplazado por ceros.
- Campo de puntero urgente: consiste de 16 *bits*, este campo comunica el valor actual del puntero urgente como una compensación positiva del número de secuencia en este segmento.
- Campos de opción (*option*) y llenado (*padding*): estos campos son de longitud variable, el campo de opción permite funciones adicionales para ser agregadas al protocolo.

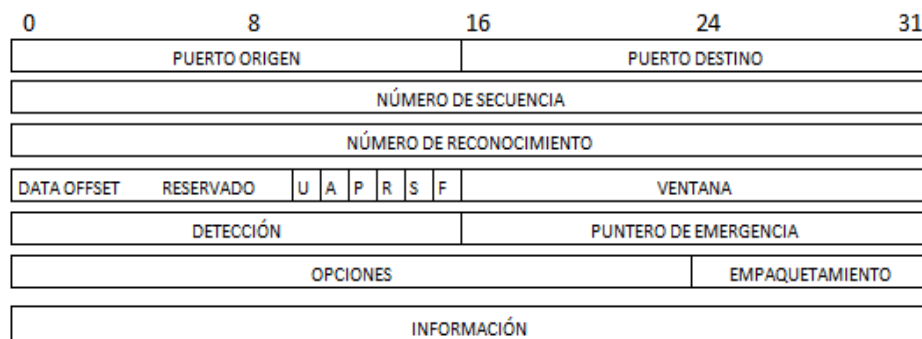
Para identificar el flujo de datos que puede manejar TCP, este provee un identificador de puertos. Desde que los identificadores de puertos son seleccionados independientemente por cada TCP estos no deben ser únicos.

Para proveer identificadores únicos de puertos dentro de cada TCP, las direcciones IP y los identificadores de puertos son utilizados en conjunto para crear un *socket* único, a través de todas las subredes en el internet.

Una conexión es especificada totalmente por un par de *sockets*. Un socket local puede participar en muchas conexiones a varios sockets externos. Una conexión puede ser usada para portar datos en ambas direcciones, por ejemplo la comunicación “*full duplex*”.

TCP es libre de asociar los puertos con los procesos que escoja. Los sockets más conocidos son mecanismos convenientes para una asociación “*a priori*” de los sockets con servicios estándar. Por ejemplo, el proceso “telnet” es permanentemente asignado al socket 23; FTP-*data* al socket 20; el FTP-*control* al 21; TFTP al 69; SMTP al 25; POP3 al 110 y WWW http al 80. La figura 45 ilustra el encabezado del segmento TCP.

Figura 45. Encabezado del paquete TCP



Fuente: ANTTALAINEN, Tarmo. Introduction to telecommunications network engineering. p. 321.

2.9.3. Establecimiento de conexiones y transmisión de datos

Una conexión está especificada en el sistema llamado OPEN por los sockets locales y externos.

En respuesta, TCP provee un nombre de conexión local por el cual los usuarios hacen referencia para la conexión de llamadas subsecuentes. Existen muchas cosas que deben ser tomadas en cuenta alrededor de una conexión. Para almacenar esa información puede imaginarse que existe una estructura de datos llamada “bloque de control de transmisión” TCB.

Una estrategia de implementación podría tener un nombre de conexión local, el cual sea un puntero hacia el TCB para esta conexión. La llamada OPEN también especifica si el establecimiento de la conexión será monitoreado activa o reactivamente.

El procedimiento utilizado para establecer conexiones utiliza la bandera de control de sincronización (SYN) e involucra un intercambio de tres mensajes. Este intercambio ha sido definido como un “*handshake*” de tres vías. Las condiciones son establecidas cuando los números de secuencia han sido sincronizados en ambas direcciones. El fin de la conexión también involucra el intercambio de segmentos, en este caso la bandera de control de finalización (FIN).

La información que fluye en una conexión puede ser ejemplificada como un flujo de octetos. El proceso remitente de dichos octetos indica en cada llamada de sistema *SEND* que la información en esa llamada (y cualquier llamada siguiente) debería ser introducida inmediatamente a través del proceso de recepción ajustando la bandera de *PUSH*.

El TCP enviado es aceptado para recabar información del proceso remitente y para enviar esos segmentos de información a su conveniencia, hasta que la función de empuje “*push*” es señalada, entonces debe enviar toda la información pendiente.

Cuando un receptor TCP detecta una bandera de *PUSH*, no debe esperar por más información del TCP remitente antes de pasar la información al proceso receptor. No es necesaria una relación entre las funciones de “*push*” y los límites de los segmentos. La información en cada segmento en particular puede resultar de una sola llamada *SEND*, completa o en parte, o de múltiples llamadas *SEND*.

2.9.4. Congestión y control de flujo

Una de las funciones en TCP es la del control de congestión para el internet. Este es una parte crítica de la estabilidad global del internet. En los algoritmos de control de congestión, TCP indica que, al nivel más abstracto, la red consiste de enlaces para transmisión de paquetes y colas para almacenar (*buffering*) los paquetes. Las colas proveen salida a los paquetes almacenados en enlaces que pueden ser altamente requeridos de forma momentánea. Estos minimizan las ráfagas de tráfico instantáneo para que se ajusten al ancho de banda del enlace. Cuando la demanda excede la capacidad del enlace lo suficiente para causar que la cola del buffer llegue a caer en una situación de desbordamiento de datos (*overflow*), los paquetes deben ser descartados.

La acción tradicional de descartar los paquetes más recientes (*tail dropping*) no es recomendada, aunque sea ampliamente utilizada. TCP utiliza secuencias de numeración y reconocimiento (ACKS) de una forma punto a punto, para proveer confiabilidad, secuencia y envío seguro. Desde que la causa más común de pérdida de paquetes es la congestión en las tecnologías tradicionales alámbricas, TCP trata la pérdida de paquetes como un indicador de congestión de la red (tal suposición no aplica en redes inalámbricas o en redes satelitales donde la pérdida de paquetes se debe más a errores de transmisión).

Esto sucede de forma automática, y las subredes necesitan saber sobre IP o TCP. Este simplemente descarta paquetes cuando debe y algunas estrategias para descartar paquetes son más utilizadas que otras. TCP se recupera de la pérdida de paquetes de dos formas diferentes.

La más importante es por fin de tiempo de espera para retransmisión (*retransmission timeout*). Si un ACK falla en llegar después de cierto período de tiempo, TCP retransmite el último paquete enviado. Tomando esto como una pista de que la red se encuentra congestionada, TCP espera que la retransmisión sea reconocida (ACKed) antes de continuar; luego de cierto tiempo empieza a incrementar gradualmente el número de paquetes hasta que el “*timeout*” vuelva a ocurrir.

Un fin de tiempo de retransmisión puede impactar sobre el desempeño de la red, porque el remitente estará esperando durante el intervalo de vencimiento de tiempo (*timeout*) y comenzará en una ventana con congestión de uno de los siguientes *timeout* (*slow start*). Para permitir una recuperación más rápida de la pérdida ocasional de paquetes en una transferencia en volumen, un esquema alternativo conocido como “*fast recovery*” puede ser introducido.

La recuperación rápida (*fast recovery*) se basa en el hecho que cuando un solo paquete se pierde en una transferencia de datos de gran volumen, el receptor continúa enviando ACKs a los paquetes de datos subsecuentes, pero estos no harán ningún reconocimiento de data (ACK). Esto es conocido como “duplicidad de reconocimiento” (*duplicate acknowledgements* o *dupacks*).

El TCP remitente puede utilizar *dupacks* como una señal de que un paquete ha sido perdido, y que puede retransmitirlo sin necesidad de un *timeout*.

Dupacks efectivamente constituyen un reconocimiento negativo NAK (*negative acknowledgement*) para el paquete cuyo número de secuencia es igual al campo de reconocimiento en el paquete TCP que ingresa. TCP espera hasta un cierto número de *dupacks* (hasta tres), que son revisados antes de asumir que ha ocurrido una pérdida, esto ayuda a evitar una retransmisión innecesaria. En adición al control de congestión, TCP también maneja el control de flujo para prevenir que el remitente sobrecargue al receptor. El algoritmo de elusión de congestión (RFC2581) es el control de congestión de un sistema punto a punto y algoritmo de control de flujo utilizado por TCP.

Este algoritmo mantiene una ventana de congestión (*cwnd*) entre el remitente y el receptor, controlando la cantidad de información transmitida en un punto dado. Reduciendo la ventana de congestión, se reduce el ancho de banda global obtenido por la conexión; similarmente, incrementando la ventana de congestión incrementa el desempeño, hasta un límite disponible por el ancho de banda. TCP sondea la disponibilidad del ancho de banda de la red ajustando una ventana de congestión a un paquete de tamaño para luego incrementar de uno en uno para cada ACK recibido del receptor.

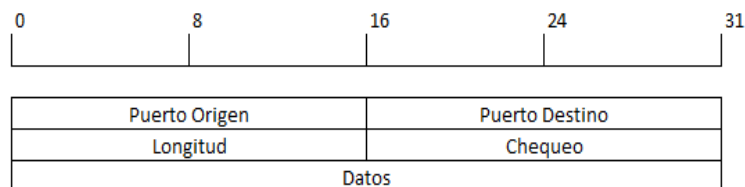
Este es el mecanismo de arranque lento de TCP. Cuando la pérdida de un paquete es detectada (o es determinada la congestión por otros mecanismo), la ventana de congestión se ajusta de nuevo a uno y el proceso de arranque lento se vuelve a iniciar de nuevo, hasta que la ventana de congestión alcanza la mitad del ajuste anterior antes de la detección de la pérdida. La ventana de congestión continúa incrementándose pasado este punto, pero a una tasa mucho más lenta que la establecida antes de la pérdida. Si no vuelven a ocurrir pérdidas, la ventana de congestión alcanzará el tamaño de ventana anunciada por el receptor.

2.9.5. Protocolo de datagrama de usuario UDP

UDP está definido para poner a disposición el modo datagrama de la capa de transporte. Este protocolo asume que el protocolo de internet (IP) es utilizado como protocolo subyacente. Este provee un procedimiento para que los programas envíen mensajes a otros programas con un mínimo de protocolo involucrado. El protocolo provee un servicio de conexión no dedicado y no provee una garantía en la recepción de la información, protección contra duplicado y orden de envío, ni siquiera realiza una recuperación de datos.

Por esto, el protocolo es muy simple y particularmente útil para transporte de información en tiempo real. La figura 46 muestra el formato del encabezado del datagrama UDP.

Figura 46. Encabezado del paquete UDP



Fuente: ANTTALAINEN, Tarmo. Introduction to telecommunications network engineering.
p. 326.

Las funciones de los campos del encabezado UDP son:

- Campo de puerto fuente: es un campo opcional. Cuando es utilizado, indica el puerto del proceso remitente, y puede ser tomado como un puerto al cual se puede retornar información en caso de ausencia de cualquier otra. Si no es utilizado, debe tener un valor de cero.

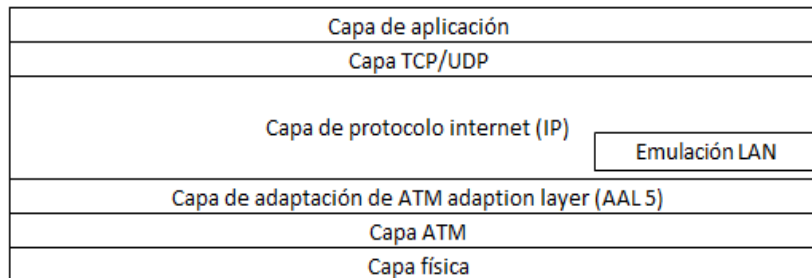
- Campo de puerto destino: este tiene un significado dentro del contexto de una dirección particular en Internet.
- Campo de longitud: indica la longitud en octetos del datagrama de usuario incluyendo su encabezado y la información (esto significa que el mínimo valor de longitud es ocho).
- Suma de verificación (*checksum*): es el dieciseisavo *bit* del complemento de la suma del complemento de un pseudoencabezado de información del encabezado IP, el encabezado UDP.
- La información: complementada con octetos de ceros al final (si es necesario) para hacerlo múltiple de dos octetos.

La mayor utilización de este protocolo son los nombres de servidores de internet, la transferencia trivial de archivos, y recientemente para aplicaciones en tiempo real tales como VoIP, vídeo, etc. Los puertos conocidos son definidos de la misma manera que en TCP.

2.10. Conectividad entre IP y ATM

Existe un vasto número de computadoras y terminales de red interconectadas utilizando LAN's, MAN's, WAN's y protocolos de red operando en estas redes. Es por tanto necesaria la habilidad de integración e interoperabilidad de estas topologías de red y ATM. La clave para el éxito de internet en el futuro será la habilidad para soportar QoS y proveer una red uniforme a protocolos de capa alta y aplicaciones. Existen dos diferencias fundamentales al portar protocolos de internet a través (modo de capas) de una red ATM, como se muestra en la figura 47.

Figura 47. **Stack de protocolos para emulación LAN e IP clásico sobre ATM**



Fuente: elaboración propia.

En un método, conocido como modo de operación IP nativo sobre ATM (o IP clásico sobre ATM), mecanismos de resolución de direcciones son utilizados para mapear direcciones de internet directamente en direcciones ATM. El método alternativo de llevar paquetes de la capa de red a través de una red ATM es conocido como LAN *emulation* (LANE). Como el nombre lo sugiere, la función del protocolo LANE es la de emular una red de área local por encima de la red ATM. Específicamente, el protocolo LANE define los mecanismos para emular ya sea el IEEE 802.3 *Ethernet* o una *lan token ring* IEEE 802.5.

2.10.1. Emulación de LAN

Emulación de LAN significa que el protocolo LANE define una interfaz de servicio para protocolos de capas altas (esta es, la capa de red), que es idéntica a aquella existente en las LAN's, y la información enviada a través de la red ATM es encapsulada en el formato apropiado LAN MAC. Esto no significa que cualquier intento es realizado para emular el protocolo de control de acceso al medio de la LAN como tal (esto es, CSMA/CD para *Ethernet* o traspaso de *token* para 802.5).

En otras palabras, el protocolo LANE hace que una red ATM parezca y se comporte como una LAN “*token ring*” o *Ethernet*, aunque opere mucho más rápido que tales redes.

La razón para hacer esto es que no requiere modificaciones de los protocolos de capa alta para habilitar su operación sobre redes ATM. Desde que el servicio LANE presenta el mismo servicio de interfaz de protocolos MAC existentes para los controladores de capa de red, no se requieren cambios en estos controladores (*drivers*). La intención es la de acelerar la implementación o puesta en marcha de ATM, ya que queda trabajo por hacer en definir plenamente el modo de operación nativo, para la abundante cantidad de protocolos de capa de red.

Se puede prever que el protocolo LANE será implementado en dos tipos de equipos conectados a la red ATM:

- Tarjetas de interfaz de red ATM (NIC): las NIC ATM implementarán el protocolo LANE y se asociarán a la red ATM. Estas presentarán la interfaz del servicio de LAN a los controladores (*drivers*) de los protocolos de capa alta en el sistema conectado a la red. Los protocolos de capa de red en la terminal del sistema continuarán comunicándose como si estuvieran en una LAN conocida, utilizando procedimientos conocidos. Estos, no obstante, serán capaces de usar el gran ancho de banda de las redes ATM.
- Equipo de conectividad y conmutación de LAN: la segunda clase de equipos de red que pueden implementar LANE son los enrutadores (*routers*) y conmutadores (*switches*) conectados a ATM. Estos dispositivos, en conjunto con *hosts* ATM directamente conectados con

NICs ATM, serán utilizados para proveer un servicio de LAN virtual, donde los puertos en los conmutadores serán asignados a LANs virtuales, independientemente de la ubicación física. La emulación LAN se ajusta particularmente bien a la primera generación de conmutadores LAN que efectivamente actúan como bridges rápidos multipuertos, ya que LANE es esencialmente un protocolo “puente” a través de ATM.

Los protocolos LANE operan transparentemente a través de los conmutadores ATM, utilizando únicamente procedimientos de señalización ATM estándar. Los conmutadores ATM también pueden ser utilizados como plataformas sobre las cuales se pueden implementar algunos de los servidores LANE, pero esto es independiente de la operación de la celda en los conmutadores ATM.

Este desacoplamiento lógico es una de las grandes ventajas del modelo de capas, ya que permite que los diseños de conmutadores ATM procedan independientemente de la operación de protocolos de conectividad en capas, y viceversa. La función básica del protocolo LANE es la de resolver las direcciones MAC dentro de las direcciones ATM. Al realizar esto, se implementa un protocolo con funciones de *bridge* utilizando ATM, por tanto la similitud con los conmutadores de LAN actuales. El objetivo de LANE es el de ejecutar esos mapeos de direcciones de manera que los sistemas finales “LANE” puedan establecer conexiones directas entre ellos para enviar información.

El elemento que agrega una complejidad significativa a LANE, sin embargo, es el soporte a conmutadores LAN, estos son, bridges LAN. La función de un *bridge* LAN es la de aislar segmentos de LAN unos de otros.

2.10.2. Componentes LANE

El protocolo LANE define la operación de una LAN emulada (ELAN) ya sea *Ethernet* o *token ring*, y consta de las siguientes entidades:

- Cliente de emulación LAN (LEC): un LEC es la entidad en un sistema final que ejecuta el envío de información, resolución de direcciones y otras funciones de control para un sistema final dentro de una ELAN sencilla. Un LEC también provee servicio de interfaz de LAN estándar para cualquier entidad de la capa superior que interactúe con el LEC. En el caso de una NIC ATM, por ejemplo, el LEC puede ser asociado con una sola dirección MAC.
- Servidor de emulación LAN (LES): el LES implementa la función de control para una ELAN en particular. Solo existe un LES lógico por ELAN y para pertenecer a un ELAN en particular, se debe tener el control de relación con la LES en particular para esa ELAN. Cada LES es identificado por una dirección ATM.
- Broadcast y servidor desconocido (BUS): el BUS es un servidor multicast utilizado para inundar de tráfico de direcciones destino desconocidas, envío multicast y tráfico *broadcast* a clientes dentro de una ELAN en particular. El BUS al cual se conecta un LEC está identificado por una dirección ATM única. La LES, está asociada con los broadcast de dirección MAC, y este mapeo es normalmente configurado en la LES.
- Servidor de configuración de emulación LAN (LECS): el LECS es una entidad que asigna clientes LANE a una ELAN en particular direccionándolas a la LES que corresponde a la ELAN. Hay una LECS

lógica por dominio administrativo, y esto sirve a todas las ELAN dentro del dominio.

2.10.3. Comunicaciones de entidades LANE

Las entidades LEC se comunican entre sí utilizando conexiones ATM. El LEC mantiene conexiones separadas para la transmisión de información y control de tráfico. El control de conexión es como sigue:

- Configuración directa VCC: esta es una VCC bidireccional punto a punto creada por la LEC a la LECS.
- Control directo VCC: esta es una VCC bidireccional creada por la LEC para la LES.
- Control distribuido VCC: este es una VCC unidireccional creada por la LES. Es típicamente una conexión punto a multipunto.

La conexión de la información es como sigue:

- Información directa VCC: esta es una VCC bidireccional punto a punto creada entre dos LEC que quieren intercambiar información entre ellas. Dos LEC típicamente usarán la misma VCC directa para llevar todos los paquetes entre ellos, más que abrir un nuevo VCC para cada dirección MAC entre ellas; de manera que se conservan los recursos de conexión y la latencia de conexión. Ya que LANE emula una LAN (incluyendo su falta de soporte al QoS), las conexiones directas de datos típicamente serán conexiones UBR o ABR y no ofrecerán ningún soporte de QoS.

- Envío multicast VCC: esta es una VCC bidireccional punto a punto, establecida por la LEC hacia el BUS.
- Reenvío multicast VCC: esta es una VCC unidireccional establecida hacia el LEC desde el BUS; es una típica conexión punto a multipunto, con cada LEC como hoja.

El procesamiento de protocolos de la capa alta dentro del enrutador no se ve afectado por el hecho de que dicho enrutador trata con LAN física o emulada. Este es otro ejemplo del valor de LANE ocultando las complejidades de la red ATM.

Una limitación obvia de esta propuesta, es que el enrutador ATM puede eventualmente convertirse en un cuello de botella, ya que todo el tráfico entre ELAN debe atravesar el enrutador. LANE tiene otra limitación, por definición, la función del LANE es la de esconder las propiedades de ATM de los protocolos de la capa alta. Esto es bueno, particularmente de corto a mediano plazo, ya que este impide la necesidad para cualquier cambio en estos protocolos.

Por otro lado, LANE también impide a estos protocolos de utilizar los beneficios únicos de ATM, específicamente, las garantías de QoS. LANE está definido para utilizar conexiones UBR y ABR solamente, ya que estos son los que más se asemejan al comportamiento orientado a la no conexión de los protocolos MAC en una LAN.

2.10.4. IP clásico sobre ATM

El grupo IETF ha desarrollado protocolos para el transporte de IP sobre ATM.

El transporte de cualquier protocolo de capa de red sobre las capas de red ATM involucra dos aspectos: encapsulación de paquetes y resolución de direcciones. Ambos aspectos se describen a continuación.

2.10.5. Encapsulación de paquetes

LA IETF ha definido un método para transportar múltiples tipos de redes o paquetes de capa de enlace a través de una conexión ATM (AAL5) y también para multiplexar múltiples tipos de paquetes en la misma conexión. Como en LANE, existe un valor para reutilizar la misma conexión para todas las transferencias de información entre dos nodos, ya que esto conserva el espacio de recursos de la conexión, y evita la latencia de la misma después de la primera conexión. Esto es posible, a medida que las conexiones UBR y ABR sean utilizadas únicamente (si las capas de red requieren garantías QoS entonces cada flujo típicamente requerirá su propia conexión).

Con el fin de permitir la reutilización de la conexión, debe existir un medio para que un nodo reciba un paquete de capa de red a través de una conexión ATM y conocer qué clase de paquetes han sido recibidos, y a qué aplicación o entidad de alto nivel debe pasar dicho paquete.

Por tanto, el paquete debe contener un prefijo con un campo de multiplexación. Dos métodos para hacer esto están definidos en la RFC 1483:

- Encapsulación del control de enlace lógico/punto de acceso a subredes (LLC/SNAP): en este método, múltiples tipos de protocolos pueden ser transportados a través de una conexión con un tipo de encapsulación de paquetes, identificada por un encabezado LLC/SNAP. Una implicación futura de la encapsulación LLC/SNAP, es que todas las conexiones,

utilizando tales encapsulaciones, terminan en la capa LLC dentro de los sistemas finales, ya que es aquí donde la multiplexación de paquetes ocurre.

- Multiplexación VC: en el método de multiplexación VC, solamente un protocolo es transportado a través de una conexión ATM, con el tipo de protocolo implícitamente identificado en la creación de la conexión. Como resultado, no existe multiplexación, ni el campo de tipo de paquete es requerido o transportado dentro del paquete; aunque el paquete encapsulado puede ser prefijado con un valor de relleno. El tipo de encapsulación utilizado por LANE para paquetes de datos, es en realidad una forma de multiplexado VC.

La encapsulación del multiplexado de VC puede ser utilizado donde se desea la conectividad ATM de aplicación a aplicación, desviando los protocolos de bajo nivel. Tal conexión directa incluye la posibilidad de conectividad con nodos fuera de la red ATM. La encapsulación LLC/SNAP es la más común de las métodos de encapsulación utilizados en los protocolos IP sobre ATM. La ITU-T también ha adoptado esto como el encapsulamiento por defecto para el transporte de multiprotocolos sobre ATM.

En trabajos relacionados, el grupo IP sobre ATM también ha definido un estándar para el tamaño máximo de una unidad de transferencia (MTU) sobre ATM. Esto define el MTU por defecto como 9180 *bytes* para ser alineados con el tamaño MTU para IP sobre *Switched Multi-megabit Data Service (SMDS)*.

Esto permite la negociación del MTU más allá de este tamaño, al máximo de 64 *bytes* del AAL 5, ya que mejoras importantes en el desempeño pueden ser obtenidas utilizando paquetes más grandes.

Esta norma o estándar establece el uso de la ruta IP y el descubrimiento del MTU por todos los nodos, implementando IP sobre ATM para impedir la ineficiencia de la fragmentación IP.

2.10.6. Resolución de direcciones IP sobre ATM

Para operar IP sobre ATM, un mecanismo debe ser utilizado para resolver las direcciones IP a su dirección ATM correspondiente. Por ejemplo, se considera el caso de dos enrutadores conectados a través de una red ATM.

Si un enrutador recibe un paquete a través de la interfaz LAN, primero revisará la tabla de salto o enrutamiento para determinar a través de qué puerto, y a qué siguiente enrutador debería enviar el paquete. Si esta búsqueda indica que el paquete debe ser enviado a través de una interfaz ATM, el enrutador entonces necesitará consultar una tabla de resolución de enrutamiento para determinar la dirección ATM del enrutador destino (esta tabla puede ser configurada con el valor VPI/VCI de una PVC, conectando ambos *routers*).

Esta tabla de resolución de dirección puede ser configurada manualmente, pero esto no es una solución ideal ya que no es escalable. El grupo IP sobre ATM ha definido un protocolo para soportar la resolución automática de direcciones de IP en la norma RFC 1577.

Este protocolo es conocido como IP clásico sobre ATM, e introduce la noción de una subred IP lógica (LIS). Como una subred normal IP, una LIS consiste de un grupo de nodos IP (tales como *routers* y *switches*) que se conectan a una red ATM y pertenecen a la misma subred IP.

Para resolver las direcciones de los nodos dentro de LIS, cada LIS soporta un servidor de protocolo de resolución de direcciones ATM (ATMARP), mientras que todos los nodos (clientes LIS) dentro del LIS son configurados con una dirección ATM única del servidor ATMARP. Cuando un nodo se presenta dentro del LIS, primero establece una conexión al servidor ATMARP, utilizando la dirección configurada.

Una vez que el servidor ATMARP detecta la conexión de un cliente LIS nuevo, este transmite de vuelta una petición ARP 53 al cliente recién conectado y solicita la IP del nodo y la dirección ATM, la cual está almacenada en su tabla ATMARP.

Subsecuentemente, cualquier nodo dentro del LIS deseando resolver una dirección IP destino enviará una solicitud ATMARP al servidor, el cual respondería con un ATMARP si una dirección es encontrada. De lo contrario, este responderá de vuelta un ATM_NAK para indicar la falta de un registro en el mapeo de direcciones para la resolución de la IP solicitada.

El servidor ATMARP conserva su tabla de direcciones por robustez, a menos que los clientes actualicen periódicamente su registro con respuestas a los servidores con requisiciones ARP 53. Una vez que un cliente LIS ha obtenido la dirección ATM que corresponde a una dirección IP en particular, este puede crear una conexión hacia esa dirección.

La operación del modelo clásico es muy simple. Pero esta sufre de un número de limitaciones; una de estas está indicada por la frase “clásico”, lo que significa que este protocolo no intenta cambiar los requerimientos IP del *host*, esto es, que cualquier paquete para un destino fuera de la subred IP del nodo fuente, debe ser enviada al *router* por defecto.

Este requerimiento no es un buen ajuste para la operación de IP sobre ATM, y para toda una clase completa de otras redes de acceso múltiple sin *broadcast* (NBMA), tales como *Frame Relay* y X.25.

En todas estas redes, es posible definir múltiples LIS, y la red en sí misma puede soportar comunicación directa entre dos *hosts* en dos diferentes LIS.

Ya que RFC 1577 preserva los requerimientos del *host*, en el contexto de IP sobre ATM, las comunicaciones entre dos nodos en dos diferentes LIS en la misma red ATM deben atravesar cada *router* ATM intermedio, para cada ruta entre el nodo fuente y el nodo destino. Esto es claramente ineficiente, ya que los *routers* ATM se convierten en cuellos de botella, lo que también impide el establecimiento de una conexión con una QoS requerida entre dos nodos.

3. CONECTIVIDAD SATELITAL CON REDES TERRESTRES

3.1. Conceptos de conectividad

Las redes de telecomunicaciones fueron originalmente diseñadas, desarrolladas y optimizadas para la transmisión de voz en tiempo real en servicios de telefonía con una banda de 3,1 KHz. En las primeras generaciones de redes de datos, la gente trató de utilizar por completo los 3,1 KHz de ancho de banda para las comunicaciones de datos sin los costos adicionales de una infraestructura de red.

En ese momento, la velocidad de transmisión de las terminales de datos era relativamente lenta; en adición a servicios de telefonía las redes también pueden soportar la transmisión de señales diferentes a la de voz tal como la de fax, transmisión de módem y todas las transmisiones digitales. Debido al desarrollo de las computadoras como terminales de red, las redes de datos de alta velocidad se han tenido que desarrollar para cumplir la demanda de comunicaciones de datos. Esto originó el desarrollo de diferentes tipos de redes para diferentes servicios. El tráfico en la red de datos crece y crece, y lo mismo aplica a la capacidad de las redes.

El incremento en el tráfico generó la oportunidad de transportar servicios de telefonía de voz sobre redes de datos. Usuarios con terminales de alta capacidad y diferentes tecnologías de red habilitaron la convergencia de servicios de telefonía y servicios de datos. En un nuevo tipo de red, las redes de banda ancha han sido implementadas para soportar la convergencia de servicios y redes.

Todos estos desarrollos son de gran utilidad para nuevos servicios y aplicaciones, pero también brindan grandes desafíos a la conectividad entre estos diferentes tipos de redes. Debido a razones económicas, nuevas redes son forzadas a tener compatibilidad con redes anteriores.

Es aún, un desafío más grande para las redes satelitales trabajar con todos estos diferentes tipos de redes. Uno de los grandes problemas en las redes de telefonía es que las terminales y las redes han sido tan bien diseñadas, que cualquier cambio en una de estas afectaría la otra.

Las redes modernas tratan de separar las funciones de las terminales de usuario de las redes, de manera que los usuarios de terminales provean servicios sin preocuparse demasiado sobre cómo el tráfico es transportado sobre las redes. Y las redes proveen diferentes tipos de esquemas de transporte sin importar cómo las terminales van a procesar dicho tráfico.

Las redes privadas de mediano y gran tamaño consisten de varios sistemas de telefonía multilínea interconectadas (MLTS). El término “redes corporativas” es utilizado para escribir una red privada de tamaño considerable; en algunos países este término es utilizado en un sentido legal para definir a un grupo de redes privadas interconectadas. Desde el punto de vista de conectividad, no hay diferencia entre redes privadas grandes y varias redes pequeñas interconectadas.

Una red privada puede ser una red en la cual el equipo terminal está conectado por sí solo, también puede proveer conexiones de tránsito entre otras redes.

3.2. Conexiones y elementos de las redes

Los componentes de red en una conexión punto a punto pueden ser categorizados en tres grupos principales: terminales de red, conexiones de red y nodos de red.

3.2.1. Terminales de red

Respecto de las transmisiones de voz, las terminales son todo tipo de aparatos telefónicos, digitales o analógicos, alámbricos o inalámbricos, incluyendo las interfaces acústicas a la boca y oído del usuario.

Estos componentes son caracterizados por su tasa de envío de ruido (SLR) y la tasa de recepción de ruido (RLR), la cual contribuye a la tasa general de ruido (OLR) de una conexión. Otros parámetros, tales como la tasa de enmascaramiento de tono lateral (STMR), la tasa de tono del escucha lateral (LSTR), el diseño del auricular y la respuesta en frecuencia en las direcciones de envío y recepción y el ruido del piso, contribuyen también a la tasa de conexión punto a punto, de la calidad de transmisión de voz.

En el caso de conexiones inalámbricas o sistemas basados en IP, distorsiones adicionales y retardos pueden ser agregados, dependiendo de los algoritmos de codificación y modulación utilizados en tales interfaces.

De cualquier manera, con redes orientadas a paquetes, existen grandes ventajas en las terminales con memoria y poder de procesamiento, salvando los problemas de las redes de telefonía.

3.2.2. Nodos de red

Son todos los tipos de equipamiento de conmutación, tales como PBX locales y conmutadores en redes telefónicas y enrutadores en internet. Estos nodos pueden utilizar conmutación digital, análoga o tecnología basada en paquetes.

La principal contribución de los sistemas análogos en detrimento de las redes de comunicaciones son las pérdidas y ruido. Donde existen conversiones de cables de cuatro hilos a cables de dos en interfaces de equipamiento de conmutación; las señales reflejadas contribuyen a efectos indeseables como fuentes de eco. Los sistemas de conmutación digital contribuyen a un retardo en las conexiones punto a punto, debido al procesamiento de la señal, y también a la cantidad de distorsión de cuantización asociada con la conversión de códigos. Los enrutadores basados en la transmisión de paquetes contribuyen, a una variación de retardo contra tiempo y pérdida de paquetes.

3.2.3. Conexiones de red

Las conexiones de red utilizan toda clase de medios tales como la infraestructura entre los nodos de red, así como entre los nodos y terminales de red. El medio físico de estas conexiones puede ser metálico (cobre), o de fibra óptica o radio. La forma de la señal puede ser ya sea digital o análoga. Entre las restricciones asociadas con la transmisión de señal análoga están aquellas que incluyen el tiempo de propagación (generalmente proporcional a la distancia), pérdidas, respuesta en frecuencia y ruido (principalmente debido a interfaces longitudinales). Las restricciones debidas a las distribuciones en frecuencia y ruido pueden ser usualmente pasadas por alto para líneas de longitud corta y media.

Para transmisiones digitales, el mayor impedimento es causado por el tiempo de propagación de medios metálicos, ópticos y de radio. Para secciones inalámbricas, un retardo adicional es introducido, dependiendo del algoritmo de codificación y modulación utilizada. Donde la conexión incluye conversión análoga a digital, las pérdidas y la distorsión son factores que van en detrimento del desempeño de dichas conexiones. La multiplexación es generalmente utilizada para transportar varios canales vía un único medio físico. Existe una variedad de sistemas de multiplexación que son utilizadas en las redes existentes:

- Multiplexación por división de tiempo (TDM)
- Equipamiento de multiplicación de circuito digital (DCME)
- Redes basadas en paquetes, conexiones orientadas a paquetes (ATM) y conexiones no orientadas a paquetes (Ethernet, LAN, IP, etc.)

En redes de telefonía, las conexiones soportan ya sea modulación por código de pulso (PCM) de 64 *Kbit/s*, o las más recientes técnicas de compresión introducidas, basadas en *codecs* de baja tasa de *bits*. En redes de banda ancha, las conexiones serán capaces de soportar tráfico a velocidades altas, lo suficiente para transmitir vídeo y datos en adición a servicios de telefonía de voz.

3.2.4. Conexiones punto a punto

Una conexión punto a punto (*end-to-end*) entre dos usuarios de terminal puede ser tan cercana como una habitación de al lado, o tan lejana como al otro lado del mundo.

La conexión puede involucrar una red privada o una de intercambio local; así como también una conexión de larga distancia en redes públicas y conexiones internacionales.

En las redes de telefonía, la mayoría de llamadas entrantes y salientes son originadas o terminadas dentro de un área local, por lo que se puede dividir el tráfico en llamadas locales, nacionales de larga distancia e internacionales. Por tanto, el vasto número de usuarios de terminales pueden ser soportados por un número pequeño de conexiones de larga distancia, similarmente, se pueden usar pocas conexiones internacionales para soportar más llamadas nacionales.

Las conexiones *end-to-end* pueden involucrar también diferentes tipos de tecnología de red incluyendo redes con cable, ópticas, terrestres inalámbricas o redes satelitales. Todas las tecnologías contribuyen de diferentes formas al desempeño de las redes y en la calidad de servicio (QoS) de la conexión. Compensaciones o intercambios deben ser realizados entre diferentes tipos de tecnologías, de manera que la calidad de la conexión *end-to-end* sea aceptable para los usuarios. El nivel de calidad aceptable varía dependiendo de las consideraciones de factores económicos y técnicos. En términos de factores económicos, debe ser de consideración el costo de utilización e implementación; en términos técnicos, la limitación de las tecnologías.

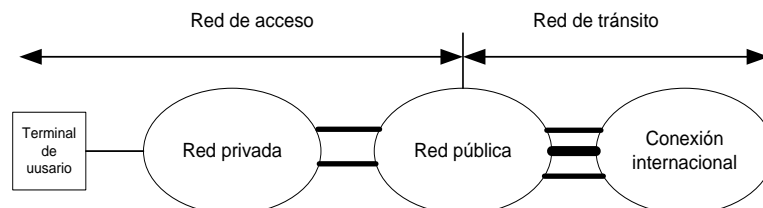
3.2.5. Configuraciones de referencia

Las configuraciones de referencia proveen un resumen de las conexiones *end-to-end* consideradas y la identificación de todas las terminales, nodos y conexiones, las cuales contribuyen con efectos negativos a la calidad de servicio (QoS) y desempeño.

Debido a la variedad en jerarquía, estructura, enrutamiento, número y tipo de tecnología de redes en una red, diferentes tecnologías (*wireless*, cable y satélite) deben jugar diferentes papeles en la configuración de referencia. La figura 48 muestra una configuración de referencia básica de una red de telefonía. La red privada normalmente se conecta a una red de intercambio local, usualmente el de más baja jerarquía y el punto de conexión común en una red pública. También es posible conectar una red privada directamente a un nivel de jerarquía más alto, por ejemplo a una conexión internacional, evitando un punto de intercambio local.

En algunos casos, especialmente para redes privadas grandes, el “*bypass*” puede permitir más ubicación de parámetros específicos de transmisión por ejemplo el retardo de la red privada. Una red privada virtual (VPN), provista por el operador de redes públicas, debe ser considerada como parte de una red privada. Lo mismo es válido para líneas rentadas interconectando redes privadas usualmente provistas por los “*carriers*” u “operadores” de redes públicas. Las redes privadas con líneas rentadas y conexiones VPN tienen algunas implicaciones en la calidad del servicio y desempeño en las conexiones *end-to-end*.

Figura 48. **Configuración básica de redes de acceso y tránsito**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Señalización y tráfico de redes

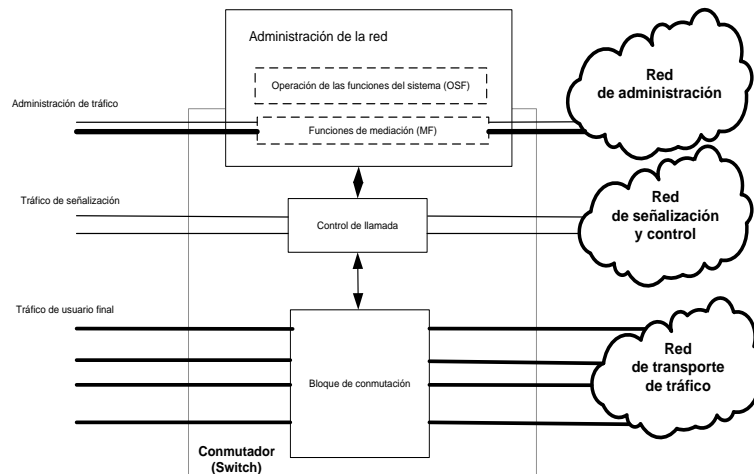
La conectividad entre redes involucra los siguientes tipos de tráfico: de usuario, de señalización y de administración. El tráfico de usuario es generado y consumido directamente en los terminales de usuario. El tráfico de señalización transporta las señales que permite a los usuarios interconectarse con otros a través de las redes, y la administración del tráfico provee información en las redes para un control efectivo del tráfico de usuario y recursos de la red, y así cumplir con los requerimientos de QoS del tráfico de usuario.

El tráfico de usuario pertenece a la capa de aplicación según el modelo OSI, el cual consume la mayor cantidad de recursos de red (ancho de banda). El tráfico de administración también consume una cantidad importante de recursos. La figura 49 ilustra las relaciones entre las funciones de usuario, señalización y administración.

3.3.1. Tráfico de usuario y servicios de red

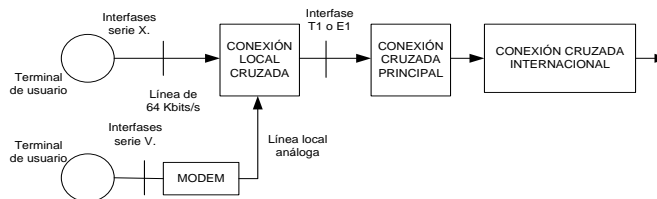
El tráfico de usuario es generado por un rango de servicios de usuario. Las redes satelitales pueden soportar un amplio rango de servicios de telecomunicaciones incluyendo telefonía, fax, datos, ISDN, B-ISDN, etc. La figura 50 ilustra algunas redes típicas e interfaces. Telefonía, fax y servicios de transmisión de datos fueron originalmente basados en transmisiones análogas; en nuestros días, estas son implementadas y desarrolladas sistemáticamente, basadas en tecnologías digitales. En transmisiones análogas, el ancho de banda de la red es ubicado en el dominio de la frecuencia durante la conexión de la red; en el dominio digital, el ancho de banda de la red es ubicado en el dominio del tiempo.

Figura 49. **Relación entre las funciones de usuario, señalización y administración.**



Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Conexiones e interfaces de red**



Fuente: elaboración propia.

El uso de la multiplexación por división de tiempo, especialmente cuando se combina con tecnologías tales como modulación de código de pulso diferencial adaptivo (ADPCM), interpolación digital de voz (DSI) con equipamiento de circuito digitales (DCME), pueden proveer una mayor capacidad de tráfico en términos de un gran número de canales en tales *carriers*.

3.3.2. Sistemas de señalización de tráfico

Tradicionalmente, las redes de telefonía clasifican la señalización generalmente en señalización de suscriptor e interconmutador y funcionalmente en señalización audiovisual, de supervisión y de direccionamiento. La señalización de suscriptor le indica al conmutador local que un suscriptor “A” desea contactar a un suscriptor “B” marcando el número que identifica al suscriptor “B”.

La señalización interconmutador provee información permitiendo a los conmutadores enrutar la llamada correctamente. También provee supervisión de la llamada a través de su ruta. La señalización provee información al operador de la red, para realizar los cargos del uso de los servicios de red.

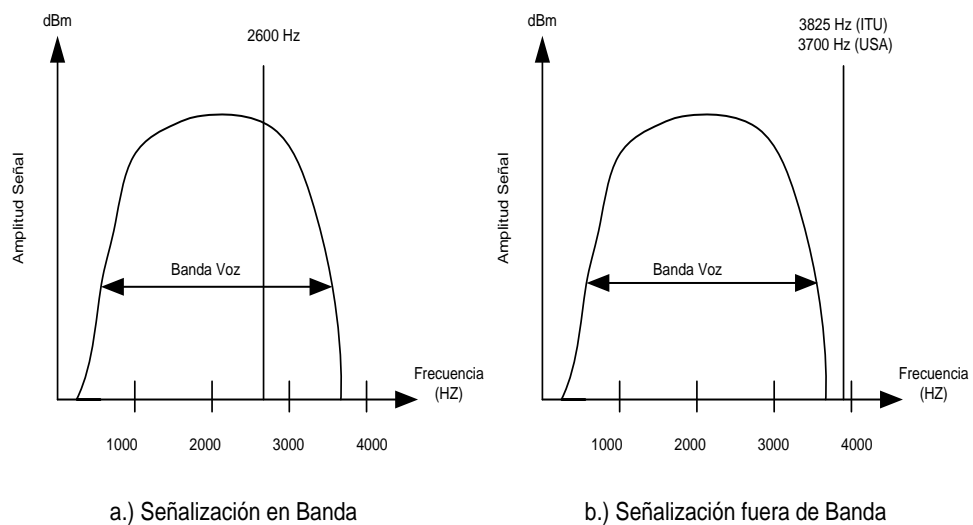
La señalización audiovisual provee de alertas (tales como el sonido “ring” y la advertencia de auricular descolgado) y del progreso de la llamada (tales como el tono de marcado, tono de ocupado). La señalización de supervisión provee control de la terminal de usuario al conmutador local para retener o liberar una conexión. La señalización de direccionamiento es generada en la terminal de usuario por el marcado digital y utilizada por la red para enrutar la llamada.

3.3.3. Señalización en banda

En la red de telefonía, la señalización “en banda” se refiere a los sistemas de señalización que utilizan un tono de audio, o tonos dentro del canal convencional de voz, para transportar información de señalización. Está dividido en tres categorías: frecuencia sencilla (SF), dos frecuencias (TF), y multifrecuencia (MF).

Ya que un canal de voz convencional utiliza la banda de frecuencias de los 300 Hz a los 3400 Hz, los sistemas de señalización SF y TF utilizan la banda de los 2000 a 3000, donde la menor cantidad de energía es concentrada en su espectro. La señalización SF es utilizada casi exclusivamente para supervisión, la frecuencia comúnmente más utilizada es 2600 Hz, particularmente en Norteamérica. En troncales de dos alambres se utiliza la frecuencia 2600 Hz en una dirección y 2400 Hz en la otra. La figura 51A ilustra el concepto de señalización en banda de 2600 Hz y la figura 51B muestra dos señalizaciones fuera de banda a una frecuencia de 3700 Hz para Norteamérica y 3825 Hz para la ITU.

Figura 51. Señalización “en banda” y señalización “fuera de banda”



Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p. 159.

Una señal de dos frecuencias es utilizada para supervisión y direccionamiento; los sistemas de señalización SF y TF son a menudo asociados con la operación de *carrier* (FDM).

En la línea de supervisión, “*idle*” se refiere a la condición de “teléfono colgado” mientras que “*busy*” se refiere a la condición de “teléfono descolgado”. Para tales tipos de señalización de línea existen dos tonos de audio, de los cuales SF y TF son típicos. La señalización multifrecuencia (MF) es ampliamente utilizada para direccionamiento entre conmutadores. Es un método en banda que utiliza cinco o seis tonos de frecuencia, dos a la vez, en el cual cada uno posee 4 diferentes frecuencias, formando la señalización típica de 16 botones en un aparato telefónico.

3.3.4. Señalización fuera de banda

Con la señalización fuera de banda, la información de supervisión es transmitida por encima de los 3 400 Hz de la banda convencional de voz; en todos los casos, es un sistema de frecuencia sencilla. La frecuencia fuera de banda preferida es la de 3 825 Hz; en Norteamérica, la frecuencia utilizada es de 3 700 Hz.

3.3.5. Señalización de canal asociada y no asociada

Tradicionalmente, la señalización va en conjunto con el tráfico en el mismo canal, al cual está asociada en el mismo medio. Esta señalización puede o no, ir en el mismo medio. Muy a menudo, este tipo de señalización es transportada en un canal separado con el fin de controlar un grupo de canales. Un ejemplo típico es el PCM E1 Europeo donde un canal digital separado soporta toda la señalización de supervisión para treinta canales de tráfico. A esta señalización de canal se le llama señalización de canal asociada, si esta viaja en el mismo medio y ruta que los canales de tráfico. Si el canal de señalización sigue una ruta diferente utilizando tal vez un diferente medio, se le llama señalización no asociada.

3.4. Red de transmisión de acceso y tránsito

De acuerdo con la recomendación de la ITU-T Y.101, las redes de acceso están definidas como una implementación, comprendiendo aquellas entidades (tales como el cable de la planta, instalaciones de transmisión, etc.) en las cuales se proveen las capacidades de transporte requeridas para la provisión de servicios de telecomunicaciones entre la red y el equipo del usuario.

Las redes de tránsito pueden ser consideradas como un conjunto de nodos y enlaces que proveen conexiones entre dos o más puntos definidos para facilitar la telecomunicación entre ellos. La interfaz tiene que estar bien definida en términos de capacidad y funcionalidad para permitir la evolución independiente del equipo de los usuarios y las redes. Nuevas interfaces tienen que ser desarrolladas para acomodar nuevos equipos de usuario con altas capacidades y nuevas funcionalidades.

La evolución de la red de acceso y de tránsito puede ser vista en la transmisión análoga de las redes telefónicas a la transmisión digital de la redes de telefonía, así como también en el modo de transferencia síncrona en redes de tránsito, en la integración de redes telefónicas y datos, redes de internet etc.

3.4.1. Redes de telefonía análoga

Aunque la mayoría de las redes en nuestros días son digitales, las conexiones de muchas residencias al conmutador local son todavía transmisiones análogas. Dichas conexiones han ido desapareciendo gradualmente con instalación de redes de banda ancha, tales como las líneas de suscriptor digital asimétrica (ADSL).

ADSL es una tecnología moderna que convierte las líneas de teléfono de par trenzado en rutas de acceso para multimedia de alta velocidad. La tasa de transmisión entre ambas direcciones es diferente con un ratio típico de 1 a 8 entre la terminal de usuario y el conmutador local.

Las redes de telefonía fueron muy bien diseñadas y optimizadas para servicios de telefonía. En el contexto de tecnologías disponibles y conocimiento, el servicio de usuario fue la telefonía, el recurso de red, el canal y el ancho de banda de 4 KHz fue ubicado a cada canal para soportar una calidad de servicio aceptable.

3.4.2. Conceptos de ingeniería de tráfico en redes de telefonía

Las redes fueron dimensionadas para proveer el servicio a un gran número de personas con canales de 4 KHz, tomando en cuenta factores económicos tales como la demanda de usuarios y costos de la red.

También se desarrollaron teorías para modelación de tráfico, recursos de red, desempeño de red y grado de servicio.

- El tráfico es descrito por patrones de arribo y tiempos de espera. El tráfico es medido en Erlang, nombrado así en honor al matemático danés A. K. Erlang, que contribuyó al desarrollo de las redes telefónicas. El Erlang es una unidad adimensional. El Erlang es definido como el producto del número de llamadas (A) y el tiempo promedio de las llamadas en espera (H), esto es $A \times H$ Erlang.

- Un Erlang representa una llamada durante una hora o un circuito ocupado por una hora. Los patrones de llamadas entrantes y tiempos de espera son procesos de naturaleza estocástica, descritos por métodos estadísticos en términos de distribuciones de probabilidad, media, varianza, etc. El tráfico varía en el tiempo en diferentes escalas: instantáneamente, diariamente, de temporada, y tendencia con incremento gradual.
- La red puede proveer total disponibilidad de recursos para cumplir con los requerimientos de tráfico, pero esto es costoso económicamente hablando. La red también puede permitir tráfico en cola para la espera por recursos de red disponibles, asignar prioridad, o ejecutar algún tratamiento a porciones de tráfico.
- El criterio de desempeño, permite una medición cuantitativa del desempeño de la red con parámetros tales como: probabilidad de retardo, retardo promedio, probabilidad de retardo excediendo un rango de valores de tiempo, número de llamadas con retardo y número de llamadas bloqueadas.
- El grado de servicio es uno de los parámetros utilizados para medir la probabilidad de pérdida de llamadas de la red y aceptadas por los usuarios como una calidad de servicio aceptable.

Existen teorías matemáticas muy bien establecidas para enfrentarse con estos factores en escenarios clásicos en términos de llamadas entrantes y distribución de llamadas en espera, número de fuentes de tráfico, disponibilidad de circuitos y manejo de llamadas perdidas.

Algunas de estas fórmulas matemáticas son simples y útiles y pueden resumirse como sigue:

- La fórmula B de Erlang para calcular el grado de servicio (EB) es:

$$E_B = \frac{\frac{A^n}{n}}{\sum_{x=0}^n \frac{A^x}{x!}}$$

Donde “n” es el número de circuito disponibles y “A” es la media del tráfico ofrecido en Erlang.

La fórmula asume un número infinito de fuentes, densidad de tráfico equitativa por fuente y tráfico de llamadas perdidas retenidas.

- La fórmula de Poisson calcula la probabilidad de llamadas perdidas o llamadas con retardo (P) debido al número insuficiente de canales (n) con el tráfico ofrecido (A) es:

$$P = e^{-A} \sum_{x=n}^{\infty} \frac{A^x}{x!}$$

La fórmula asume un número infinito de fuentes, igual densidad de tráfico por fuente y llamadas perdidas retenidas.

- Fórmula C Erlang es:

$$P = \frac{\frac{A^n}{n!} \frac{n}{n-A}}{\sum_{x=0}^{n-1} \frac{A^x}{x!} + \frac{A^n}{n!} \frac{n}{n-A}}$$

La fórmula asume un número infinito de fuentes, llamadas perdidas con retardo, tiempos de retención exponencial y llamadas servidas en orden de arribo.

- Fórmula binomial:

$$P = \frac{s - A}{s} \sum_{x=0}^{s-1} \frac{(s-1)!}{x!} \left(\frac{A}{s-A}\right)^x$$

La fórmula asume un número infinito de fuentes (s), igual densidad de tráfico por fuente y llamadas perdidas retenidas.

3.4.3. Acceso a redes satelitales en el dominio de la frecuencia

En el dominio de la frecuencia, se puede observar que a cada señal de canal telefónico es asignado un ancho de banda de 4 KHz para acceder al conmutador local, o muchos de los canales sencillos son multiplexados de forma conjunta para formar una jerarquía de transmisión. Para transmitir un canal de telefonía sobre un satélite, se necesita de una señal portadora, la cual, es apropiada para transmisiones de radio satelital en una banda de frecuencia asignada. Sumado a lo anterior se necesita una señal del canal que module la señal portadora para poder ser transmitida hacia el satélite.

En el lado receptor, el proceso de demodulación es capaz de separar la señal del canal de la señal portadora; consecuentemente, el receptor puede obtener la señal de telefonía original para ser enviada a la terminal de usuario o a una red, la cual puede enrutar la señal a la terminal de usuario.

Si un canal sencillo modula la portadora, se puede llamar portadora única por canal (SCPC); esto es utilizado normalmente para terminales de usuario que son conectadas a la red o a otras terminales como un acceso de red. También es posible utilizarlo como una ruta para conectar un conmutador local a la red donde la densidad de tráfico sea baja.

Si un grupo de canales modula la portadora, se le puede nombrar como multicanal por portadora (MCPC). Esto es normalmente utilizado para interconectar redes como redes de tránsito o conmutadores locales a las redes de acceso.

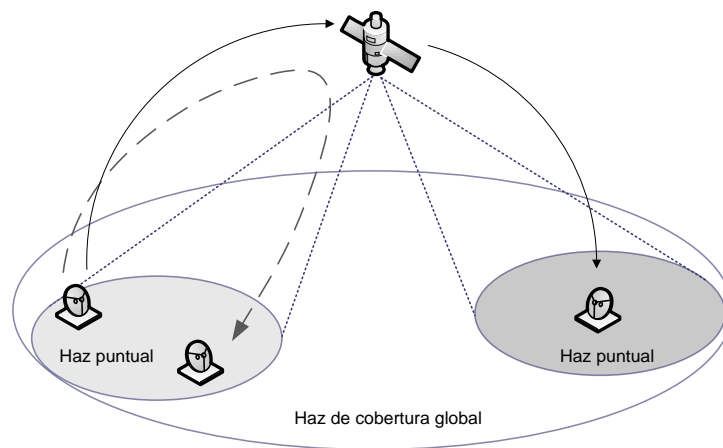
3.4.4. Circuito de conmutación a bordo

Si todas las conexiones entre las estaciones terrestres utilizaran una cobertura global de haz sencillo, no habría necesidad de tener ninguna función de conmutación a bordo del satélite. Si se utilizan múltiples puntos de cobertura, se contará con grandes ventajas en la utilización de conmutación a bordo, ya que esta permite a las estaciones terrenas transmitir múltiples canales a varios puntos de cobertura al mismo tiempo, sin separar estos canales en las estaciones terrenas transmitidas. Por esto, la conmutación a bordo le dará a las redes satelitales una gran flexibilidad y ayudará a la eficiente utilización de los recursos.

La figura 52 ilustra un transponder satelital de conmutación a bordo. Si no existen funciones de conmutación a bordo, las dos transmisiones tienen que ser separadas en la estación terrena utilizando dos diferentes canalizaciones, una de las cuales es para la conexión dentro del área de cobertura y la otra es para la conexión de las áreas de coberturas.

Si la misma señal ha de ser transmitida para ambos puntos de cobertura, requerirá de dos transmisiones separadas de la misma señal, consecuentemente necesitará el doble de ancho de banda en la transmisión de subida (*uplink*).

Figura 52. **Conmutación con circuitos a bordo (*On Board Switching*)**



Fuente: elaboración propia.

Es posible reutilizar el mismo ancho de banda en diferentes áreas de cobertura. Utilizando conmutación a bordo, todos los canales pueden ser transmitidos de forma conjunta y serán conmutados a bordo del satélite a sus estaciones terrenas de destino, en diferentes áreas de cobertura.

Potencialmente, si la misma señal ha de ser enviada a diferentes puntos de cobertura, la conmutación a bordo deberá ser capaz de duplicar la misma señal a ser enviada a las áreas de cobertura, sin realizar múltiples transmisiones en la estación terrena transmisora. La misma banda de frecuencia puede ser utilizada en las dos áreas de cobertura teniendo cuidado de evitar posibles interferencias.

3.5. Redes de telefonía digital

A principios de los años 70s, los sistemas de transmisión digital comenzaron a aparecer utilizando la modulación por código de pulso (PCM), método propuesto en 1937. PCM permitió que las formas de onda análogas, tales como la voz humana, fueran representadas en forma binaria (digital). Fue posible representar una señal de telefonía análoga estándar de 4 KHz como un flujo de datos digitales de 64 *Kbit/s*.

El potencial del procesamiento digital permitió sistemas de transmisión de bajo costo combinando varios canales PCM y transmitiéndolos por el mismo cable de cobre par trenzado, que se utilizó anteriormente para una señal análoga sencilla.

3.5.1. Jerarquía digital multiplexada

En Europa, y subsecuentemente en otras partes del mundo, el esquema estándar TDM fue adoptado donde treinta canales de 64 *Kbit/s* fueron combinados en conjunto con dos canales adicionales, portando información de control que incluye señalización y sincronización para producir un canal con una tasa de *bit* de 2,048 *Mbit/s*.

A medida que la demanda de telefonía de voz se incrementó y los niveles de tráfico en la red crecieron, fue claro que el estándar de 2.048 *Mbit/s*. no era suficiente para soportar con las cargas de tráfico que transitan por las redes troncales. Para evitar tener que usar un excesivo número de enlaces de 2.048 *Mbit/s*, se decidió crear un nivel superior de multiplexado. El estándar adoptado en Europa involucró la combinación de cuatro canales de 2,048 *Mbit/s* para producir un solo canal de 8,448 *Mbit/s*.

Este nivel de multiplexación difiere ligeramente del anterior en que las señales entrantes fueron combinadas un *bit* a la vez, en lugar de un *byte* a la vez.

A medida que surgió la necesidad, mayores niveles de multiplexación fueron agregados al estándar a 34,368 *Mbit/s*, 139,246 *Mbit/s* y de más velocidad para producir una jerarquía de multiplexación, como se muestra en la figura 53.

En Norteamérica y Japón, una jerarquía de multiplexación diferente es utilizada, pero con los mismos principios.

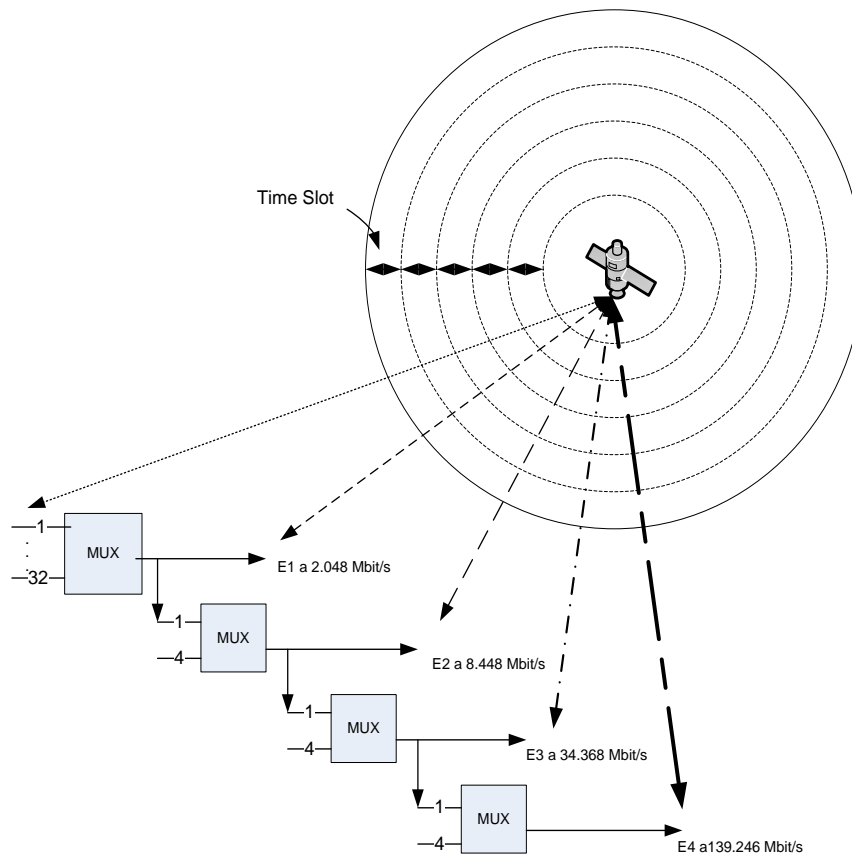
3.5.2. Transmisión digital satelital y conmutación a bordo

Las señales digitales pueden ser procesadas en el dominio del tiempo, por tanto, en adición a compartir los recursos del ancho de banda en el dominio de la frecuencia, las estaciones terrestres también pueden compartir ancho de banda en el dominio del tiempo.

La multiplexación por división de tiempo puede ser utilizada para la transmisión satelital a cualquier nivel de la jerarquía de transmisión, como se muestra en la figura 54.

Referente a la conmutación a bordo, una técnica de conmutación de tiempo es a menudo utilizada para trabajar en conjunto con la conmutación de circuitos.

Figura 53. **Multiplexación de tráfico y requerimientos de capacidad de los enlaces satelitales**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 293.

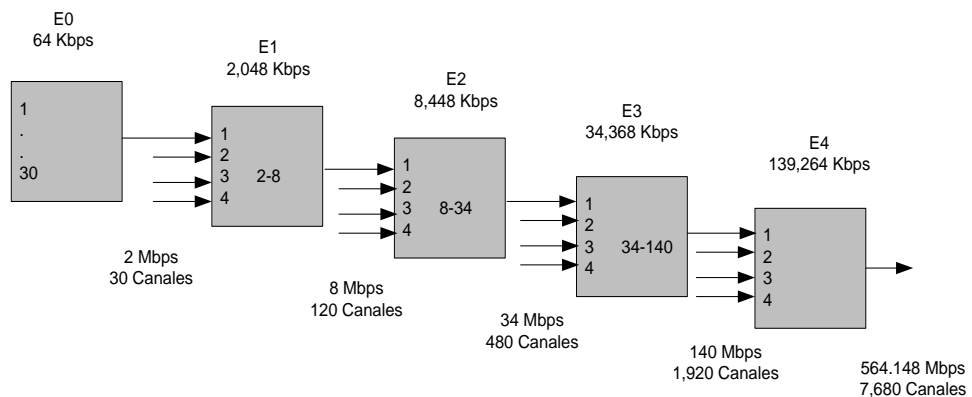
3.5.3. Jerarquía digital plesiócrona

La jerarquía de multiplexación aparenta en principio simpleza, pero existen complicaciones. Cuando se multiplexa un número de canales de 2 Mbit/s estos seguramente han sido creados por diferentes equipos, cada uno generando una tasa de *bit* ligeramente diferente; por tanto, antes de que estos canales de 2 Mbit/s puedan ser intercalados, deben ser ajustados a la misma tasa de *bit*, agregando *bits* de información llamados *bits* de relleno o *bits* de justificación.

Los *bits* de justificación son reconocidos a medida que ocurre la demultiplexación y son descartados, dejando la señal original. Este proceso es llamado operación plesiócrona (plesiócrono en griego significa “casi síncrono”). Las etapas de multiplexación plesiócrona se ilustran en la figura 54.

Los mismos problemas de sincronización, como se describió anteriormente, ocurren en cada nivel de la jerarquía de multiplexación, así que los *bits* de justificación son agregados en cada etapa. La utilización de la operación plesiócrona a través de las jerarquías, ha permitido la adopción del término jerarquía digital plesiócrona (PDH).

Figura 54. **Jerarquía digital plesiosíncrona (PDH) estándar europeo**



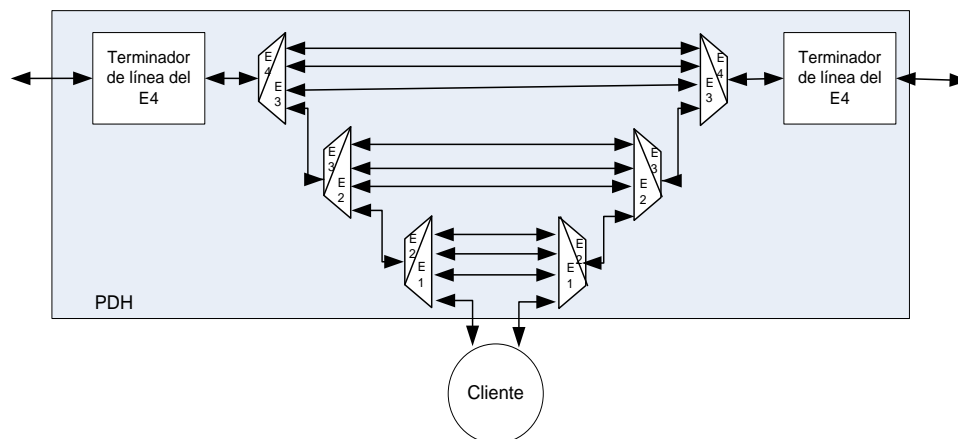
Fuente: ANTTALAINEN, Tarmo. Introduction to telecommunications network engineering. p. 165.

3.5.4. Limitaciones de PDH

Parece simple y directo multiplexar y demultiplexar flujos de datos de baja velocidad a flujos de datos de alta velocidad, pero dicha práctica no es tan flexible ni simple.

El uso de *bits* de justificación en cada nivel en PDH significa que identificar la ubicación exacta de los datos de baja velocidad en un flujo de datos de alta velocidad sea imposible. Por ejemplo, para acceder a un único E1 (2.048 Mbit/s) en un E4 (139.246 Mbit/s), el E4 debe ser demultiplexado completamente vía E3 (34.368 Mbit/s) y E2 (8.448 Mbit/s) como se muestra en la figura 55.

Figura 55. **Multiplexación y demultiplexación para insertar un nodo en una red PDH**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 156.

Una vez la línea del E1 ha sido identificada y extraída, los canales deben ser multiplexados de vuelta hacia una línea E4. Obviamente este problema como “botar e insertar” canales hace que el aprovisionamiento de nuevos servicios no sea tan flexible; además la cantidad de equipos multiplexores requeridos hacen de PDH una solución muy costosa. Otro problema asociado con la gran cantidad de equipo de multiplexación en la red es el problema de control.

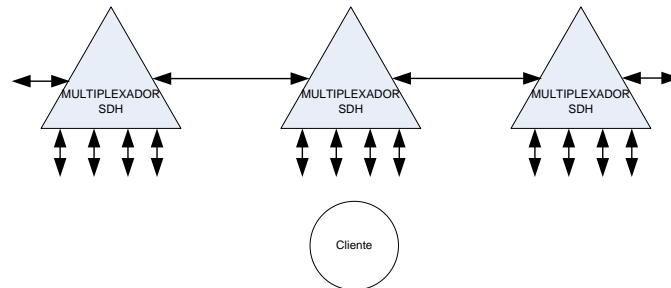
En su camino a través de la red, una línea E1 posiblemente ha atravesado un número indefinido de conmutadores, por lo que la única manera de asegurarse que ha seguido la trayectoria correcta es la de mantener un registro detallado de la interconexión de los equipos. A medida que la cantidad de reconexiones se incrementa, esta se torna más difícil de registrar y la posibilidad de errores se incrementa. Tales errores afectan no solamente la conexión establecida sino también la interrupción de conexiones existentes que transportan tráfico de datos. Otra limitación del PDH es su carencia de monitoreo de desempeño.

3.6. Jerarquía digital síncrona (SDH)

PDH alcanzó un punto donde ya no pudo ser lo suficientemente flexible o eficiente para llenar las demandas de los usuarios y operadores. Como resultado, las transmisiones síncronas fueron desarrolladas para solventar los problemas asociados con la transmisión Plesiosíncrona, en particular la inhabilidad de PDH para extraer los circuitos individuales de sistemas de alta capacidad sin tener que demultiplexar el sistema completo, como se muestra en la figura 56.

Las transmisiones síncronas pueden ser vistas como la siguiente etapa lógica en la evolución de la jerarquía de transmisión. Esfuerzos conjuntos de estandarización han sido aportados en este desarrollo, la oportunidad de definir un nuevo estándar fue utilizada para resolver varios problemas, entre ellos la administración dentro de la jerarquía fue solventado y la necesidad de definir interfaces estándar entre el equipo y los estándares internacionales de jerarquías de transmisión.

Figura 56. **Función “Add” y “Drop” para insertar un nodo en una red SDH**



Fuente: ANTTALAINEN, Tarmo. Introduction to telecommunications network engineering. p. 167.

3.6.1. Desarrollo de SDH

El desarrollo del estándar SDH representa un avance significativo en tecnología. Los servicios tales como videoconferencias, acceso a bases de datos remotas y la transferencia de archivos multimedia requieren de una red flexible con la disponibilidad (en demanda) de virtualmente un ancho de banda ilimitado.

SDH supera la complejidad de las redes basadas en sistemas de transmisión plesiosíncrona (PDH). Utilizando esencialmente la misma fibra, una red síncrona es capaz de incrementar significativamente el ancho de banda disponible mientras reduce la cantidad de equipamiento en la red. En adición, la provisión dentro de SDH para una administración sofisticada de la red introduce significativamente más flexibilidad en la red. La implementación de sistemas de transmisión síncrona es sencilla debido a su habilidad para interconectarse con sistemas plesiosíncronos existentes.

El SDH define una estructura la cual habilita las señales plesiosíncronas para ser combinadas y encapsuladas dentro del estándar de la señal SDH. A esta habilidad del sistema se le conoce como “retrocompatibilidad”. Esto es, una nueva tecnología capaz de interconectarse con una tecnología anterior. La sofisticada capacidad de administración de una red síncrona mejora el control de las redes de transmisión, la restauración de la red y sus capacidades de reconfiguración y disponibilidad.

3.6.2. Los estándares SDH

Los estándares fueron culminados en las recomendaciones de la ITU-T G.707, G.708 y G.709, cubriendo la jerarquía digital síncrona. Estos fueron publicados en el libro azul del ITU-T en 1989. En adición a las tres principales recomendaciones de la ITU-T, varios grupos de trabajo fueron conformados para esbozar recomendaciones a futuro, cubriendo otros aspectos de SDH tales como los requerimientos de los estándares de interfaces ópticas y funciones estándar de operación y mantenimiento (OAM).

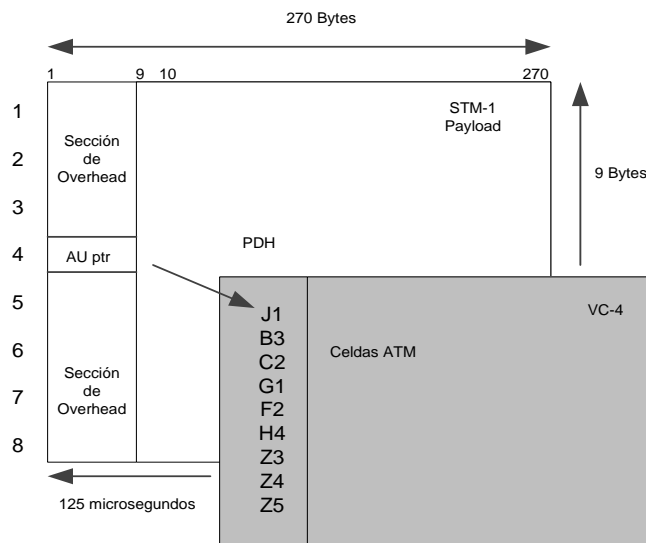
Las recomendaciones de la ITU-T definen un número de tasas de transmisión básicas dentro de SDH; la primera de estas es de 155.520 *Mbit/s*, normalmente referida como módulo de transporte síncrono nivel 1 (STM-1). La figura 57 muestra la trama del STM-1. Otras tasas de transmisión tales como STM-4 y STM-16 (622 *Mbit/s* y 2.4 *Gbit/s*, respectivamente) también son definidas.

3.6.3. Los beneficios de SDH

Uno de los principales beneficios en la red SDH es la simplificación de la misma a través del uso del equipamiento síncrono.

Un multiplexador síncrono puede ejecutar la función de una “montaña de multiplexadores plesiosíncronos”, resultando en reducciones significativas en la cantidad de equipo utilizado.

Figura 57. Trama STM-1 de una red SDH



Fuente: TERPLAN, Morreale. The telecommunications handbook. p. 302.

Los canales más eficientes “bota e inserta” ofrecidos por una red SDH, en conjunto con sus poderosas capacidades de administración, pueden facilitar el aprovisionamiento de líneas de gran ancho de banda para nuevos servicios multimedia, así como también proveer acceso a esos servicios.

Las capacidades de administración de las redes síncronas habilitan una inmediata identificación del enlace y el nodo con falla. Utilizando arquitecturas en anillo autorreparable, la red será automáticamente reconfigurada con el tráfico instantáneamente reenrutado, hasta que el equipo en falla haya sido restaurado.

Los estándares SDH permiten equipos de transmisión de diferentes fabricantes para interconectarse en el mismo enlace, la habilidad de alcanzar esto se debe al resultado del trabajo realizado en los estándares, los cuales definen las interfaces fibra a fibra a un nivel físico (fotón). Estos determinan la tasa de línea óptica, la longitud de onda, los niveles de potencia, forma de pulsos y codificación. La estructura de la trama, procesamiento (*overhead*) y mapeado de *payload* también son definidos. Los estándares SDH también facilitan la interconexión entre las jerarquías de transmisión de Norteamérica y Europa.

3.6.4. Operación síncrona

El elemento básico de la señal STM consiste de un grupo de *bytes* diseñados para transportar las tasas de transmisión definidas en el G.702 (por ejemplo jerarquías de transmisión de 1.5 *Mbit/s* y 2 *Mbit/s*). Los siguientes describen cada nivel de la jerarquía de transmisión en SDH:

- El contenedor virtual de nivel n (VC- n), donde $n = 1-4$, está construido del contenedor más capacidad adicional para transportar el *overhead* de la ruta POH. Para un VC-3 o VC-4 el *payload* puede ser un número de unidades tributarias (TU) o grupos de unidades tributarias (TUG) en oposición al básico VC-1 y VC-2.
- La unidad tributaria nivel n (TU- n), donde $n = 1 - 3$, consiste de un contenedor virtual más un puntero de unidad tributaria. La posición del VC dentro del TU no es fija, de cualquier forma, la posición del puntero TU es fija en relación con el siguiente paso de la estructura de multiplexación e indica el comienzo del VC.

- El grupo de unidad tributaria (TUG) está formado por un grupo de TU idénticos.
- El nivel de unidad de administración n (AU- n), donde $n = 3 - 4$, consiste de un VC más un puntero AU. La fase de alineación de un puntero AU es fija con relación a la trama STM-1 como un todo, e indica las posiciones del VC.
- El módulo de transferencia síncrona nivel 1 (STM-1) es el elemento básico de SDH; este se encuentra formado de un *payload* (formado del AU) y *bytes* adicionales para formar una sección de *overhead* (SOH). El formato de la trama se muestra en la figura 57 y el *header* se muestra en la figura 58. La sección de *overhead* permite al control de la información ser transferida entre elementos de red síncronos adyacentes.

Dentro de una trama STM-1, el tipo de información se repite cada 270 *bytes*. Debido a esto, la trama STM-1 es a menudo considerada como una estructura (270 byte x 9 líneas). Las primeras 9 columnas de esta estructura constituyen el área SOH, mientras que las restantes 261 constituyen el área de *payload*. Los *bytes* SOH son utilizados en comunicaciones entre equipos síncronos adyacentes, así como también para sincronizaciones de trama. Estos ejecutan también una variedad de tareas de control y administración.

El propósito de *bytes* individuales se detalla a continuación:

- A1, A2 son *bytes* para entramado
- B1, B2 son *bytes* de chequeo de paridad para la detección de errores

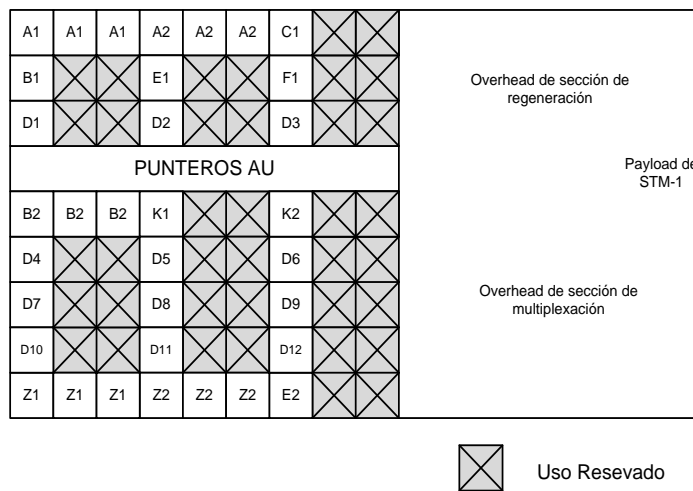
- C1 identifica un STM-1 en una trama STM-N
- D1-D12 son para canales de comunicación de datos y administración de red
- E1, E2 son utilizados para canales
- F1 es utilizado para canales de usuario
- K1, K2 son utilizados para la protección automática de los canales de conmutación (APS)
- Z1, Z2 son *bytes* reservados

La ruta de *overhead* (POH) del VC-4 (como se muestra en la figura 57) consiste de los siguientes *bytes*:

- B3 BIP-8 (*bit* de paridad entrelazada): provee monitoreo de error de *bit* sobre una ruta utilizando un código de *bit* de paridad par, BIP-8
- C2 etiqueta de señal: indica la composición del *payload* VC-n
- F2 canal de ruta de usuario: provee un canal de comunicación de usuario
- G1 estatus de ruta: permite que el estado de la señal recibida sea retornada a la parte transmisora
- H4 indicador multitrama: utilizado para indicación multitrama

- J1 trazo de ruta: utilizado para verificar la ruta de conexión VC-n
- Z3-Z5: es de uso reservado

Figura 58. **Sección de sobre encabezado (*Section Overhead - SOH*) de la trama STM-1**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 159.

El módulo de transferencia síncrona nivel N (STM-N) está construido al combinar señales STM de bajo nivel, utilizando intercalado de byte. La tasa de transmisión básica definida en el estándar SDH es de 155.520 Mbit/s (STM-1). Dado que una trama STM-1 consiste de 2430 bytes, este corresponde a una duración de trama de 125 microsegundos.

Dos tasas altas de bit también son definidas: 622.080 Mbit/s (STM-4) y 2488.320 Mbit/s (STM-16). Una vez que el área de *payload* STM-1 es llenada por la unidad más grande disponible, un puntero es generado, el cual indica la posición de la unidad en relación con la trama STM-1.

Esto es conocido como el puntero AU. Esta forma parte del área de *overhead* de la trama. La utilización de puntero en la estructura de la trama STM-1 significa que las señales plesiócronicas pueden ser acomodadas dentro de una red síncrona sin el uso de *buffers*.

Esto se debe a que la señal puede ser empaquetada en un VC e insertada en una trama en cualquier momento. El puntero entonces, indica su posición. La utilización del método del puntero fue posible al definir contenedores virtuales síncronos ligeramente más grandes que el *payload* que transportan. Esto permite al *payload* deslizarse en el tiempo en relación con la trama STM-1 en la cual está contenida. Ajustes de los punteros son posibles donde ligeros cambios de frecuencia y fase ocurren como resultado de variaciones en los retardos de propagación.

El resultado de esto es que en cualquier flujo de datos, es posible identificar individualmente canales tributarios, y botar o insertar información, por lo tanto, se supera una de las principales inconvenientes de PDH.

3.7. Redes digitales de servicio integrados (ISDN)

La red digital de servicios integrados (ISDN) consiste en una serie de recomendaciones de la ITU-T para los servicios de suscriptor, los servicios de usuario / red y conectividad para asegurar una compatibilidad internacional.

La ISDN representa los esfuerzos por la ITU-T con los estándares para integrar telefonía y redes de datos, para una amplia variedad de servicios con una conectividad global. Los estándares ISDN explican un amplio rango de conceptos y principios de la ISDN.

Estos también describen en detalle los aspectos relacionados con el servicio y la conectividad de ISDN, incluyendo servicios, aspectos y funciones de red en general, interfaz de red de usuario (UNI) e interfaces interredes con un amplio rango de protocolos.

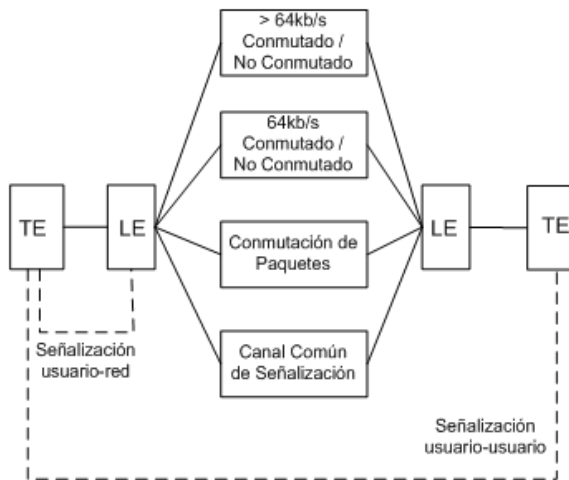
3.7.1. Interfaz de tasa básica (BRI)

La interfaz de tasa básica (BRI) se encuentra especificada en la recomendación I.7430 de la ITU-T. La recomendación define la comunicación ISDN entre las terminales. El BRI comprende dos canales B de 64 Kbit/s cada uno, y un D de 16kbits/s (2B+D).

El canal B es el canal básico del usuario y puede soportar todo tipo de tráfico incluyendo voz digital, datos y vídeo a una tasa baja de transferencia o modo conmutado de paquetes. El canal D es primariamente utilizado para señalización requerida para controlar los canales B, pero también puede ser utilizado para información de mensajes orientada a paquetes, como se muestra en la figura 59.

El canal D debería ser enrutado a puntos de servicio elegidos con señalización (información-s), telemetría (información-t), datos de paquetes conmutados de baja velocidad (información-p). Los componentes ISDN incluyen equipos terminales (TE), adaptadores de terminal (TA), dispositivos de terminación (NT), equipos de terminación de línea (LE) y de intercambio. Accesos de tasa básica pueden utilizar una configuración punto a punto o punto a multipunto, entre equipos LE y TE. Varios puntos de referencia son especificados en ISDN, estos puntos de referencia definen las interfaces lógicas entre los grupos funcionales tales como los TA y los NT1.

Figura 59 **Características básicas de una red ISDN**



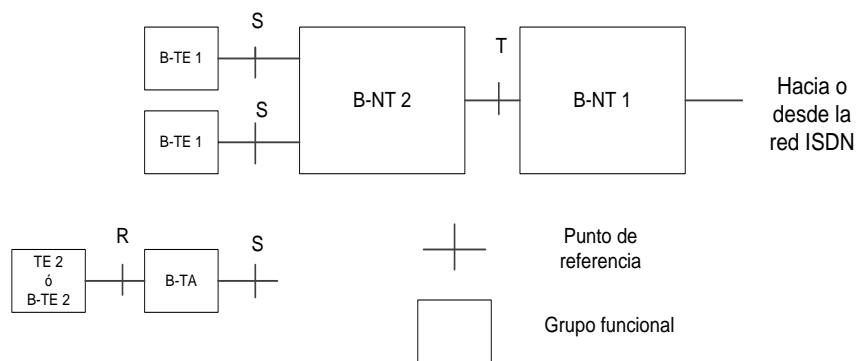
Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p.358.

Los puntos de regencia de ISDN incluyen el punto R (el punto de referencia entre equipos no ISDN y un TA), el punto S (punto de referencia entre terminales de usuario y el NT2), el punto T (el punto de referencia entre dispositivos NT1 Y NT2) y puntos U (el punto de referencia entre dispositivos NT1 y equipos de terminación de línea en la red del operador). El punto de referencia U es relevante únicamente en Norte América, donde las redes de los operadores no proveen una función NT1. La figura 60 muestra los puntos de referencia ISDN.

Existen tres dispositivos conectados al conmutador ISDN en la central; dos de estos dispositivos son compatibles con ISDN, así que estos se conectan a través de un punto de referencia S a dispositivos NT2. El tercer dispositivo (un teléfono estándar no ISDN) es conectado a través de un punto de referencia R al TA. Cualquiera de estos dispositivos puede ser conectado a un dispositivo NT1/2, el cual puede reemplazar ya sea al NT1 o al NT2.

En Norteamérica, el NT1 es el equipo en las instalaciones del cliente (CPE). El NT2 es un dispositivo más complicado típicamente encontrado en ramales digitales privados (PBX's), los cuales ejecutan funciones de capa 2 y 3 y servicio de concentración. Un NT1/2 también existe; es un dispositivo que combina las funciones de un NT1 y NT2.

Figura 60. **ISDN de banda angosta (N-ISDN), puntos de referencia y grupos funcionales**



Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p.355.

3.7.2. Interfaz de tasa primaria (PRI)

La interfaz primaria (PRI) está definida por el protocolo de capa física y también por protocolos de capa alta, incluyendo LAPD. Tiene una interfaz serial punto a punto full dúplex y configuración síncrona.

Las recomendaciones G.703 y G.704 de la ITU-T definen las interfaces eléctricas y los formatos de la trama.

Existen dos interfaces diferentes:

- T1 Norte América (1.544 Mbit/s): multiplexa 24 canales B, una trama PRI tiene 193 *bits*, consistentes de un *bit* de trama más 192 (24x8) *bits* para los canales de usuario.
- E1 Europa (2.048 Mbit/s): multiplexa 32 canales B, una trama PRI tiene 256 *bits* (32x8), consistentes de 240 *bits* (30x8) para el tráfico de usuario, ocho *bits* para la trama y sincronización y otros ocho *bits* para señalización y control.

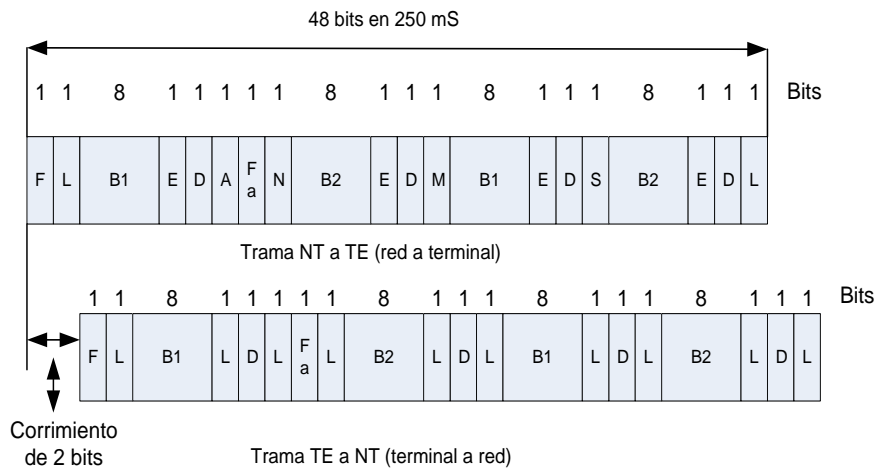
3.7.3. Capa física ISDN (Capa 1)

La capa física ISDN provee capacidad de transmisión para canales B y D en la forma de flujos de *bit*, codificados con funciones de temporización y sincronización. También provee señalización para permitir que las terminales y los equipos de red accedan a los recursos del canal D y hagan uso de los canales D para controlar los canales B.

El formato de la trama de la capa física ISDN difiere dependiendo si la trama es fuera de banda (de una terminal a la red) o en banda (de la red a la terminal) como se muestra en la figura 61. Las tramas tienen una longitud de 48 *bits*, de los cuales 36 *bits* representan la información.

Los *bits* F proveen sincronización, los *bits* L ajustan el valor promedio del *bit* y los *bits* E son utilizados para resolución de discrepancias cuando varias terminales en un bus pasivo compiten por el canal. El *bit* A activa los dispositivos, el *bit* S no tiene función asignada, los *bits* B1, B2 y D son para usuarios del canal B y D.

Figura 61. Formato de la trama en los puntos de referencia T y S



Fuente: PERROS, Harry. Connection-oriented networks. p. 325.

Múltiples dispositivos de usuarios ISDN pueden ser conectados físicamente a un circuito. En esta configuración, pueden ocurrir colisiones si dos terminales transmiten simultáneamente, es por esto que ISDN provee características que determinan la competencia por el enlace.

Cuando un NT recibe un *bit* D del TE, este lo repite en la siguiente posición de *bit* E, el TE espera a que el siguiente *bit* E sea el mismo que el transmitido en el *bit* D.

Las terminales no pueden transmitir en el canal D a menos que detecten primero un número específico de *bits* "1" (que indica "sin señal") correspondiente a una prioridad preestablecida. Si la TE detecta un *bit* en el canal E, que es diferente de su *bit* D, debería detener la transmisión inmediatamente. Esta simple técnica asegura que solamente una terminal transmitirá su *bit* D en un tiempo dado.

Después de una transmisión exitosa del *bit* D, la prioridad de la terminal es reducida obligándola a detectar más *bits* “1” en una fila antes de transmitir. Las terminales pueden no aumentar su prioridad hasta que otros dispositivos en la línea hayan tenido la oportunidad de enviar un mensaje D. Las conexiones telefónicas tienen una prioridad más alta que todo el resto de servicios, y la señalización de información tiene una prioridad más alta que otra información no señalizada.

3.7.4. Capa de enlace ISDN (Capa 2)

La capa 2 del protocolo de señalización ISDN es un procedimiento de acceso al enlace del canal D (LAP-D). Está basado en el sistema LAP-B utilizado en el protocolo X.25. El LAP-D es similar al control de enlace de datos (HDLC) y al enlace de acceso balanceado (LAP-B).

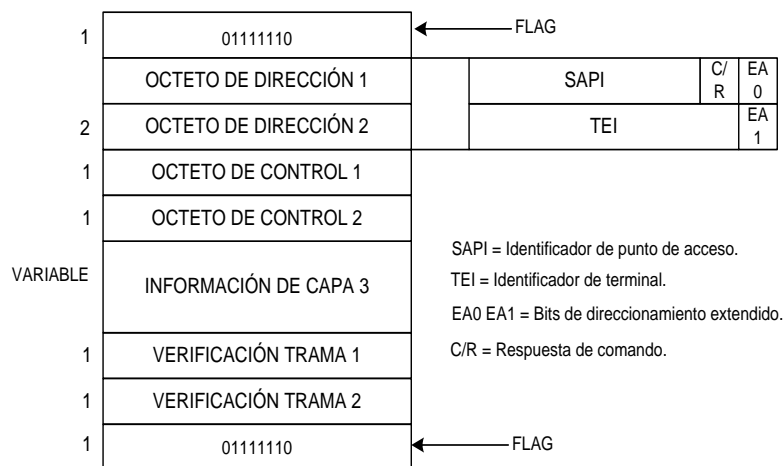
El LAP-D es utilizado a través del canal D para asegurar que la información de control y señalización fluyan y hayan sido recibidas de forma correcta. El formato de la trama LAP-D se muestra en la figura 62, y al igual que HDLC utiliza tramas de supervisión e información.

El protocolo LAP-D está formalmente especificado en la sección Q.920 y Q.921 de la ITU-T para señalización. La bandera LAP-D y los campos de control están identificados al igual que los de HDLC. Los campos de las direcciones LAP-D pueden ser ya sea de uno o dos *bits* de longitud.

Si el *bit* de direcciones extendidas del primer byte está presente, las direcciones tienen un *bit* de longitud, de lo contrario, el campo de direcciones posee dos *bytes*.

El primer campo de direcciones contiene el identificador de puntos de acceso (SAPI), el cual identifica el puerto al cual los servicios LAP-D son provistos a la capa 3.

Figura 62. Estructura de la trama de capa 2 LAP-D



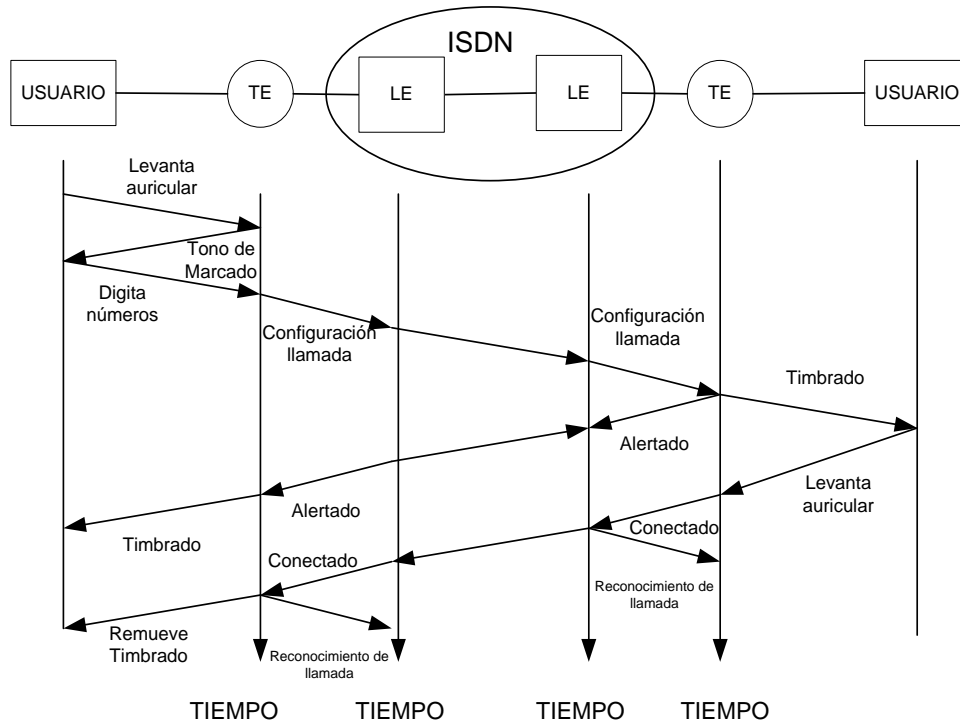
Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p. 365.

3.7.5. Capa de red ISDN (Capa 3)

Dos especificaciones de capa 3 son utilizadas por la señalización ISDN; la ITU-T Q.930 y la Q.931. Ambas especificaciones soportan conexiones usuario a usuario, de circuitos conmutados y de paquetes conmutados.

Una variedad de llamadas establecidas, terminación de llamadas, mensajes de información y mensajes misceláneos son especificados, entre ellos: “*setup*”, “*connect*”, “*release*”, “*user information*”, “*cancel*”, “*status*” y “*disconnect*”. Estos mensajes son funcionalmente similares a aquellos incluidos por el protocolo X.25. La figura 63 muestra las etapas típicas de una llamada ISDN de circuito conmutado.

Figura 63. Ilustración de señalización ISDN de capa 3



Fuente: PERROS, Harry. Connection-oriented networks. p. 301.

3.8. ISDN sobre enlaces satélite

Debido a la disponibilidad de redes satelitales, es normal hacer uso de las redes satelitales para extender las redes ISDN a una cobertura global.

Aunque ISDN no restringe la utilización de cualquier sistema de transmisión, es importante desde el punto de vista de la ingeniería de un satélite investigar cómo los sistemas de transmisión satelital difieren del sistema tradicional requerido para soportar ISDN, cómo la transmisión satelital afecta la tasa de error de ISDN, y cómo el retardo de propagación de un enlace satelital afecta la operación de ISDN.

3.8.1. Conexión ISDN de referencia hipotética

La conexión de referencia hipotética ISDN está definida en la ITU-T G.821. Es utilizada para especificar los requerimientos de desempeño de la mayoría de segmentos de la conexión punto a punto en general. La distancia de referencia para las conexiones punto a punto es de 27,500 Km, la cual es la conexión más grande posible a lo largo de la superficie terrestre entre suscriptores (en el punto T de referencia).

Tres diferentes segmentos son identificados con distancias que son definidas como distancias típicas en las conexiones punto a punto en general en el contexto de IRX, los cuales son ubicadas dentro de una degradación de desempeño del 30%, 30% y 40% para segmentos bajos, medio y altos. El 30% para los segmentos de bajo grado es compartido por dos lados de la conexión del terminal de usuario al conmutador local. Similarmente, existen dos segmentos de grado medio del conmutador local al conmutador interno, compartiendo el 30%.

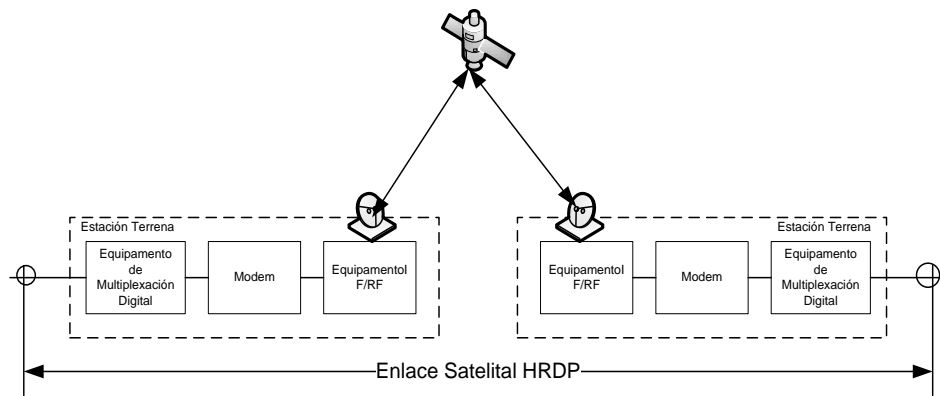
Enlaces satelitales de servicios satelitales fijos deben ser equivalentes a la mitad del segmento de grado alto a 20%, si se utilizan en una conexión ISDN. En términos de distancia, el segmento de grado alto cuenta para 25,000 Km y el segmento bajo y el medio en un extremo de la conexión, cuenta para 1,250 Km y en el otro extremo 1250 Km. Los enlaces satelitales cuentan para 12,500 Km, si se utilizan en una conexión ISDN fin a fin.

3.8.2. La ruta de referencia digital para satélite.

La ITU-R definió la ruta digital de referencia hipotética (HRDP) en la ITU-R S.521 para estudiar el uso de un enlace satelital fijo en ISDN HRX.

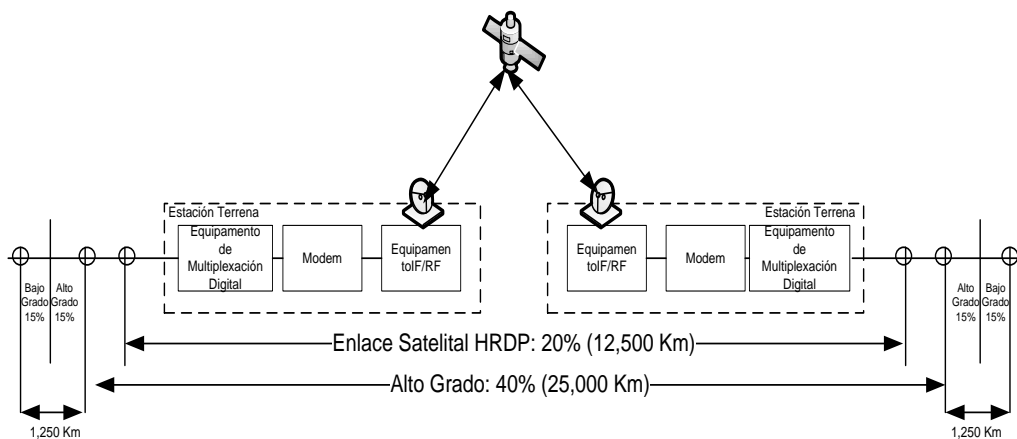
Como se muestra en las figuras 64 y 65, el HRDP debe consistir de un enlace Tierra-satélite-Tierra, con posibilidad de uno o más enlaces intersatelitales en el segmento de espacio e interfaz con una red terrestre apropiada al HRDP.

Figura 64. Ruta digital hipotética de referencia (HRDP)



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 762.

Figura 65. HRDP en ITU-T IRX a 64 Kbit/s



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 762.

El HRDP debe acomodar diferentes tipos de acceso como un canal sencillo o TDMA, y permitir el uso de técnicas tales como la interpolación digital de velocidad (DSI) o codificación de tasa baja (LRE) en el equipo de multiplexado digital. Adicionalmente, las estaciones terrestres deben incluir instalaciones para compensar los efectos del enlace de transmisión en cuanto a la variación de tiempo introducida por el movimiento del satélite, las cuales son de significancia particular en la transmisión digital en el dominio del tiempo tales como PDH.

La ITU-R HRDP utiliza 12,500 Km del IRX para desarrollar objetivos de desempeño y disponibilidad. La distancia ha sido definida tomando en cuenta varias configuraciones de redes satelitales con un salto como máximo, cubriendo una distancia terrestre equivalente de aproximadamente 16,000 Km.

Consecuentemente, en la mayoría de los casos, el satélite es utilizado en segmentos internacionales de la conexión con dos puntos de aterrizaje usualmente a una distancia menor a 1,000 Km de los usuarios. En la práctica, los puntos en los que los enlaces de las redes satelitales bajan a Tierra deben ser diseñados lo más cerca posible de las terminales de usuario.

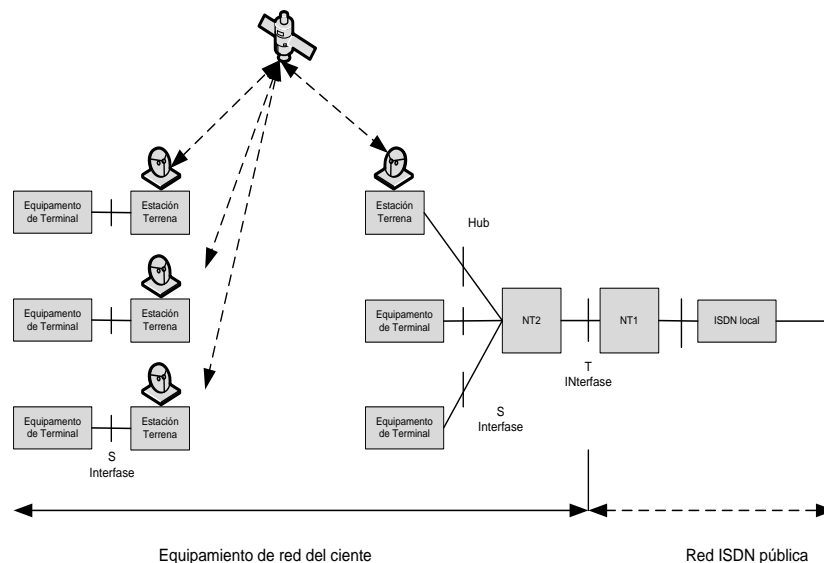
3.8.3. Escenarios de interconexión de redes satelitales a redes ISDN

Una red satelital interconectada a ISDN debe ser capaz de soportar todos los servicios ISDN. Como mínimo la red satelital necesita soportar el modo ISDN de circuito, el cual requiere una adecuada capacidad para un rango de canales de 64 KBits/s a 1920 KBits/s además 16 o 64 KBits del canal D. En adición, si las redes satelitales son utilizadas para las comunicaciones de datos, es lógico dar soporte también al paquete de servicios ISDN.

La red satelital debe ser capaz de soportar algunos de los servicios ISDN suplementarios tales como subdireccionamiento, marcado directo, suscriptores con múltiples identidades y grupos cerrados. La red satelital es a menudo vista como una parte de la conexión de red del usuario al ISDN a través de un terminado de red NT2. La figura 66 ilustra una red ISDN distribuida de nodo simple.

El ISDN puede ofrecer en el punto de referencia T (ver figura 66) una interfaz de tasa primaria a través de una terminal de red NT1. NT2 forma parte de la red del cliente, típicamente utilizando sistemas VSAT. El NT2 puede ser visualizado como el nodo de un PABX distribuido, mientras, que la interfaz S representa el estándar para la interfaz entre el equipo terminal PABX. La figura 67 ilustra un nodo distribuido ISDN múltiple.

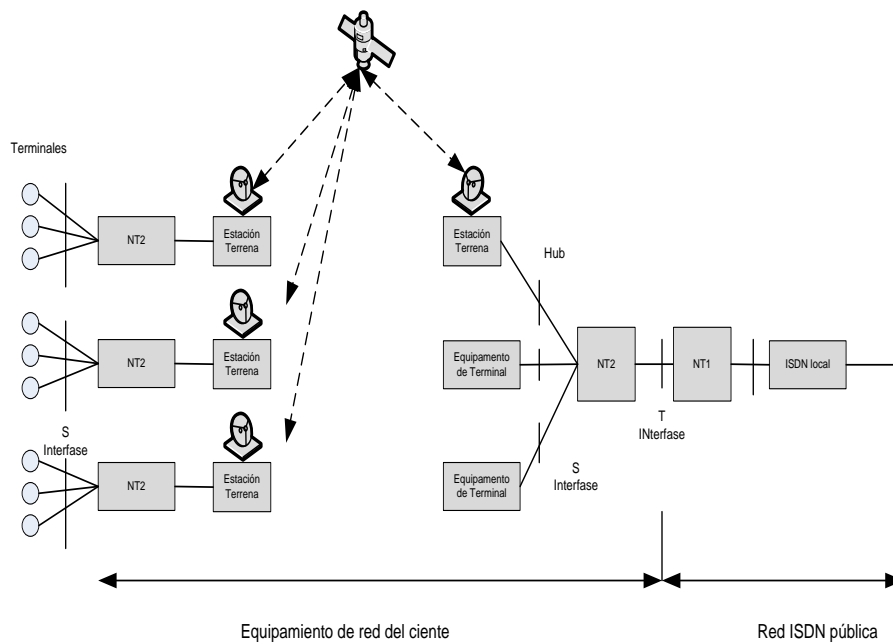
Figura 66. **Nodo simple ISDN distribuido en una red cliente**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 767.

El satélite es utilizado para interconectar varias redes ISDN privadas (nodos); cada una de estas consiste de una estación terrestre, un terminador de red NT1 y unas cuantas terminales de usuario. En ambos escenarios, las redes ISDN privadas (nodos) son conectados a una red ISDN pública por medio de un concentrado o *hub*. En el caso de VSAT, las terminales pueden comunicarse entre sí por medio de un *hub* si es una configuración en estrella y unas con otras directamente, si es una configuración en malla.

Figura 67. **Múltiples nodos ISDN distribuidos en red cliente**



Fuente: ITU. Handbook on satellite communications. p. 768.

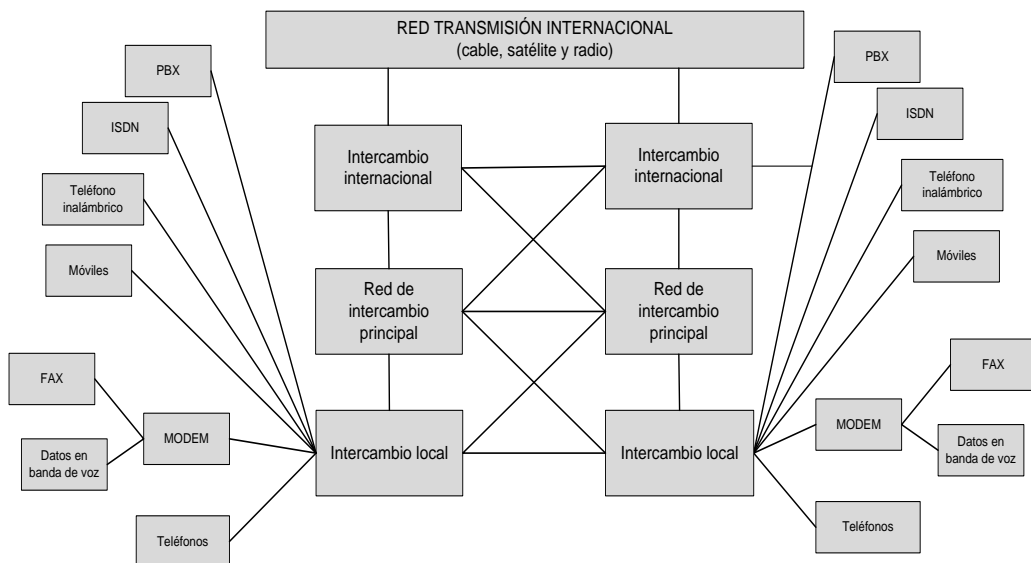
3.8.4. Plan de ruteo

Antes de 1980 el plan de enrutamiento de la ITU-T fue basado en una red con estructura jerarquizada, con niveles de tránsito central descendiente (CT).

Desde 1980, la ITU-T ha hecho un cambio radical en su plan internacional de enrutamiento. El nuevo plan es una estructura libre en la que no se requiere enrutamiento jerarquizado. Dicho cambio fue introducido debido al gran alcance de las redes satelitales con las cuales las troncales internacionales de alto uso pueden terminar prácticamente en cualquier parte en el territorio de una red de telecomunicaciones nacional.

La figura 68 ilustra el concepto de enrutamiento en una red de telecomunicaciones jerarquizada con un enlace satelital para las conexiones internacionales. En la práctica, la gran mayoría de tráfico telefónico internacional está enrutado en circuitos directos entre centros de conmutación internacional (ISC).

Figura 68. **Concepto de enrutamiento y conmutación en redes de telecomunicaciones**



Fuente: elaboración propia.

La ITU-T E.171 provee las reglas de enrutamiento de las conexiones, consistentes en un número de circuitos en tándem. Estas conexiones tienen una importancia en la red porque:

- Son utilizadas como rutas alternas para transportar tráfico de desbordamiento en períodos ocupados para incrementar la eficiencia de la red.
- Estos pueden proveer un grado de protección de servicio en el caso de que ocurran fallas en otros enrutadores.
- Estos pueden facilitar la administración de la red cuando se asocian con la ISC teniendo como alternativa temporales de enrutamiento.

Las reglas han sido diseñadas para preservar la libertad de los operadores de la red para enrutar el tráfico directamente o por medio de cualquier administración de tránsito que elijan y para ofrecer capacidad de tránsito a una amplia variedad de destinos posibles. Las características de administración de este plan de enrutamiento son:

- No tiene que ser jerárquico.
- Los operadores pueden tener la libertad de ofrecer cualquier capacidad de tránsito que deseen.
- El tráfico directo debe ser enrutado sobre circuitos finales o grupos de circuitos de uso elevado.

- El enrutamiento del tráfico conmutado debe ser planificado para evitar posibles rutas circulares.

Cuando un grupo de circuitos posee circuitos terrestres y satelitales, la elección de enrutamiento debe ser gobernada por:

- La guía dada en la ITU-T G.114, (por ejemplo no más de 400 milisegundos de tiempo de propagación en un sentido).
- El número de circuitos satelitales a ser utilizados en una conexión.
- El circuito que provee la mejor calidad de transmisión y calidad de servicio en general.
- La inclusión de dos o más circuitos satelitales (dos o más saltos sobre satélite) en la misma conexión debe ser evitada, pero a excepción de algunos casos, cuando el satélite es el único enlace disponible para la conexión.

4. ATM SOBRE REDES SATELITALES

4.1. Antecedentes

A principios de los 90's, las investigaciones y desarrollos en comunicaciones basadas en ATM y la transmisión por cable de fibra óptica generaron una demanda significativa de conexiones a bajo costo de redes ATM de área local privadas y públicas (también llamadas islas), sin embargo, existió una escasez de redes terrestres que brindaran conexiones de banda ancha en grandes extensiones, particularmente en lugares remotos y áreas rurales donde las líneas terrestres son costosas y económicamente inviables de instalar y operar.

La conectividad satelital fue considerada como una solución alterna para complementar a las redes terrestres de banda ancha debido a su flexibilidad y cobertura global inmediata.

En el plano comercial, la necesidad de proveer redes utilizando la infraestructura satelital se debe al incremento de servicios de banda ancha. Como ejemplos de aplicaciones se encuentran enlaces de oficinas remotas al *backbone* corporativo.

4.1.1. Conectividad

Una de los temas claves de la conectividad era la de proveer interconexión y acceso a islas de banda ancha dispersas geográficamente en el contexto de redes ATM, con el ancho de banda y QoS necesarios.

Debido a su cobertura global y su naturaleza de *broadcasting*, las redes satelitales pueden ser utilizadas para terminales móviles de banda ancha y servicios de *broadcasting*, donde el mayor desafío tecnológico es cómo diseñar pequeñas terminales satelitales a un bajo costo pero con alta velocidad de transmisión para servicios de banda ancha.

En el diseño de las redes ATM se contaba con que fueran directamente compatibles con las redes terrestres. Es ampliamente reconocido que el desarrollo del B-ISDN basado en ATM no fue “revolucionario” sino “evolucionario”, ya que este también requería de redes satelitales ATM para ser interconectadas con redes ATM, así como a redes LAN o MAN.

Como otras redes orientadas a paquetes, ATM es un conjunto de protocolos que utiliza el modo de transferencia asíncrona para soportar servicios de banda ancha. No es una tecnología de transmisión, pero puede ser transportado sobre otros tipos diferentes de tecnologías de transmisión incluyendo la inalámbrica, cable o redes satelitales.

ATM ha sido estandarizada por la ITU-T y la ITU-R para explotar el potencial de las redes satelitales ATM. A finales de los 90's, los servicios y aplicaciones emergentes tales como la WWW, basados en la internet, cambiaron el panorama de las telecomunicaciones y las redes de datos.

Debido a tales aplicaciones, se convirtió en un asunto mandatorio soportar el protocolo de internet IP sobre soluciones ATM. Esto condujo a la convergencia de terminales de usuario, redes, servicios y aplicaciones en la industria de las telecomunicaciones e internet hacia la siguiente generación de internet, tomando ventaja de IP y de las redes ATM.

4.1.2. Los servicios satelitales en las redes B-ISDN

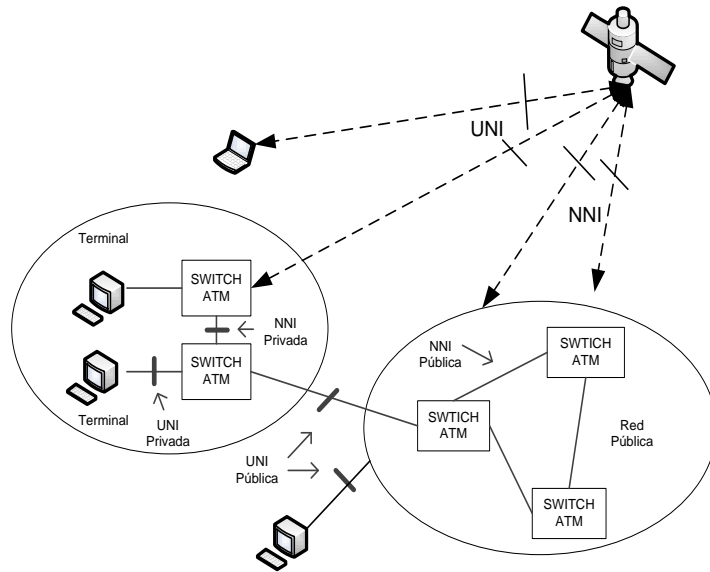
Las principales ventajas de los sistemas satelitales son su amplia cobertura y capacidades de *broadcasting*. Existen suficientes satélites para proveer conexiones de banda ancha a cualquier lugar en el mundo. El costo y complejidad son independientes de la distancia. Existen claras ventajas que permiten extender los enlaces de banda ancha a áreas rurales y áreas remotas.

Los enlaces satelitales son rápidos y fáciles de instalar con pocas restricciones geográficas, estos enlaces realizan conexiones de larga distancia a un menor costo dentro de las áreas de cobertura, particularmente para conexiones punto a multipunto y servicios de *broadcasting*. Los satélites pueden diseñarse como enlaces complementarios a redes terrestres y móviles existentes.

En los servicios de banda ancha, la conectividad satelital puede ser utilizada en modo de acceso de usuario y también en modo de red de tránsito. Esto provee enlaces de acceso a un gran número de usuarios directamente o por medio de redes locales. Las interfaces para este modo de sistema satelital son del tipo de interfaz de red de usuario (UNI). En el modo de red de tránsito, el sistema satelital provee enlaces de alta velocidad para interconectar los nodos de las redes B-ISDN o islas.

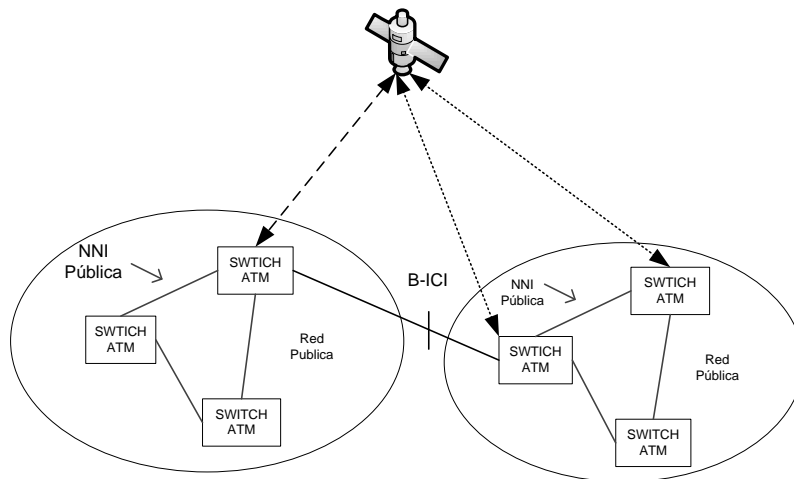
Las interfaces en ambos lados son del tipo de interfaz de nodo de red NNI. La figura 69 ilustra un ejemplo de una configuración del sistema satelital para acceso a redes de banda ancha y a usuarios móviles. La figura 70 muestra la interconexión de islas o redes de banda ancha.

Figura 69. Acceso de usuarios vía satélite a redes ATM



Fuente: elaboración propia.

Figura 70. Modo de tránsito vía satélite a redes ATM



Fuente: elaboración propia.

4.2. Diseño de sistemas satelitales ATM

Las redes satelitales son fundamentalmente diferentes de las redes terrestres en términos de retardo, en características de error y anchos de banda y pueden tener un impacto adverso en el desempeño del tráfico ATM y en los procedimientos de control de congestión y operaciones del protocolo de transporte.

4.2.1. Retardo de propagación

El retardo de propagación para los paquetes de una conexión incluye los tres parámetros siguientes: el retardo de propagación desde la terminal fuente en Tierra al enlace de subida hacia el satélite t_{up} , el retardo de propagación entre los enlaces intersatelitales t_i , y el retardo de propagación desde el satélite a la terminal destino en Tierra t_{down} .

Los retardos de propagación de subida y bajada de los enlaces representan el tiempo tomado por la señal en viajar desde la terminal fuente en Tierra al primer satélite en la red, y el tiempo tomado por la señal en alcanzar la terminal destino en Tierra desde el último satélite de la red.

Estos pueden ser calculados como sigue:

$$t_{up} = \frac{\text{Distancia de la terminal fuente del satélite}}{\text{Velocidad de la luz}}$$

$$t_{down} = \frac{\text{Distancia del satélite a la terminal destino}}{\text{Velocidad de la luz}}$$

El retardo punto a punto también depende de los diseños de las constelaciones LEO/MEO; en contraste, en los satélites GEO, el retardo del enlace GEO de subida y bajada es más corto pero variable a través del tiempo. También se puede denotar el retardo de transmisión t_t , el del enlace intersatelital como t_i , el de conmutación y procesamiento a bordo como t_s , el de almacenamiento temporal como t_q y el retardo debido a las redes terrestres como t_n .

Los retardos intersatelitales, de conmutación a bordo, de procesamiento y almacenamiento se acumulan a través de toda la ruta recorrida por la conexión. La variación del retardo es causada por la dinámica de las órbitas, almacenamiento temporal, enrutamiento adaptivo (LEO), y el procesamiento a bordo. Entonces, el retardo punto a punto (D) puede ser calculado como:

$$D = t_t + t_{up} + t_i + t_{down} + t_s + t_q + t_n$$

El retardo de transmisión t_t es el tiempo tomado en transmitir un paquete de datos a la tasa de envío de la red:

$$t_t = \frac{\textit{Tamaño del paquete}}{\textit{Tasa de envío}}$$

Para redes de banda ancha con altas tasas de velocidad, los retardos de transmisión se vuelven despreciables en comparación con los retardos de propagación del satélite. Por ejemplo, solamente toma alrededor de 212 microsegundos transmitir una celda de ATM en un enlace de 2 Mbit/s. Este retardo es mucho menor que los retardos de propagación en el satélite. Comparado con los retardos de propagación, todos los t_i , t_s , t_q y t_n son muy pequeños, por lo tanto pueden ser despreciados en los cálculos.

El retardo intersatelital t_i es la suma de los retardos de propagación de los enlaces intersatelitales (ISL) recorridos por la conexión. Estos pueden ser enlaces “en el plano” o “en plano cruzado”. Los enlaces en plano conectan a los satélites dentro del mismo plano de órbita, mientras que los enlaces de plano cruzado conectan a los satélites en diferentes planos cruzados.

En sistemas GEO, los retardos en los enlaces intersatelitales (ISL) se pueden asumir constantes durante el tiempo de vida de una conexión porque los satélites GEO son casi estacionarios sobre un punto dado en la Tierra, y respecto de uno y del otro. En constelaciones LEO, los retardos de los ISL dependen del rayo de la órbita, en el número de satélites por órbita, y la distancia interorbital (o el número de órbitas).

Todos los enlaces en plano en órbitas circulares son considerados constantes, mientras que los retardos ISL de los enlaces de plano cruzado cambian en el tiempo, se rompen a altas latitudes y deben ser reformados; como resultado, los sistemas LEO pueden exhibir una alta variación de retardo en el ISL.

Los satélites LEO tienen pequeños retardos de propagación debido a sus bajas altitudes, pero muchos satélites son necesarios para proveer un servicio global. Mientras que los sistemas LEO tienen pequeños retardos de propagación, exhiben una alta variación en el retardo debido a los trasposos de conexión (*handovers*) y otros factores relacionados con las dinámicas de las órbitas.

Los grandes retardos en los sistemas GEO, y la variación en los retardos de los sistemas LEO, afectan aplicaciones en tiempo real y en tiempo no real.

Muchas aplicaciones de tiempo real son sensibles a los grandes retardos experimentados en los sistemas GEO, así como también a las variaciones experimentadas en los sistemas LEO. En los mecanismos de control de congestión, el desempeño es inherentemente relacionado con el producto retardo-ancho de banda de la conexión.

Aún más, las medidas de tiempo de ida y vuelta (RTT) son sensibles a las variaciones de retardo que pueden causar falsos *timeouts* y retransmisiones para el reconocimiento de los servicios de información; como resultado, los problemas de control de congestión para redes satelitales de banda ancha son de alguna manera diferentes a aquellos de baja latencia de las redes terrestres. Los problemas de interoperabilidad así como también los de desempeño entre el satélite y las redes terrestres deben ser solventados antes que los servicios de datos, voz y vídeo sean provistos sobre las redes satelitales.

4.2.2. Restricciones y atenuación

La atenuación del espacio vacío (llamado pérdida del espacio vacío L_{fs}), representa el ratio de la potencia recibida vs. la transmitida en un enlace entre dos antenas isotrópicas:

$$L_{fs} = \frac{4 \pi R}{\lambda}$$

Donde R es la distancia propagación y λ es la longitud de onda.

Una estación terrena situada exactamente debajo del satélite, está a 35,786 Km. de este (igual a la altitud del satélite), por lo tanto, el L_{fs} es del orden de los 200 de dB en la banda C y 207 dB en la banda Ku.

La atenuación también es afectada por otros factores tales como la lluvia, las nubes, la nieve, el hielo y el gas en la atmósfera.

El ancho de banda en las comunicaciones satelitales, siendo un recurso limitado, continuará siendo un activo de gran valor. Alcanzar tasas de disponibilidad del 99.95% a una tasa de error de *bit* baja (BER) es costoso. Al disminuir las tasas de disponibilidad requeridas por un 0.05 %, dramáticamente, se reducen los costos de un enlace satelital. Un nivel de disponibilidad óptimo debe ser un intercambio entre el desempeño y los costos.

Existen restricciones en general al escoger los parámetros de un enlace satelital debido a las regulaciones, restricciones de operación y condiciones de propagación. Las regulaciones son administradas por la ITU-R, ITU-T y la ITU-D. Estas definen los servicios de las radiocomunicaciones en el espacio en términos de la transmisión y/o recepción de ondas de radio, para aplicaciones específicas de telecomunicación.

El concepto de un servicio de radiocomunicación es aplicado a la designación de banda de frecuencia y al análisis de las condiciones para compartir una determinada banda entre servicios compatibles. Las restricciones operacionales se relacionan con el radio $\frac{c}{N_o}$, la provisión de un haz de antena satelital adecuado para la cobertura de un área de servicio con un valor especificado de ganancia, en el nivel de interferencia entre sistemas satelitales, en la separación orbital entre satélites operando en bandas de frecuencia idénticas y en minimizar un costo total.

Por lo tanto, el diseño de transmisiones de alta velocidad enfrenta grandes desafíos para alcanzar el desempeño óptimo con una tasa de error baja.

4.3. Arquitectura de una red ATM con sistema satelital GEO

La arquitectura de una red ATM con sistema satelital GEO se basa en el diseño propuesto en el proyecto CATALYST.

El proyecto CATALYST fue fundado por la *European Framework Program Research in Advanced Communication in Europe phase II (RACE II)* para desarrollar una red satelital ATM experimental de banda ancha, para interconectarse a redes de banda ancha geográficamente dispersas llamadas “Islas de banda ancha”.

La demostración del proyecto CATALYST tomó lugar en 1992 – 1993 e involucró la primera transmisión de celdas ATM sobre satélites en Europa. Un enfoque modular fue utilizado en el diseño para interconectar diferentes redes y el satélite, convirtiendo los paquetes de red en celdas ATM y viceversa.

Las funciones de los principales bloques se describen a continuación:

4.3.1. El segmento terrestre

Para utilizar los sistemas satelitales existentes, el principal esfuerzo ha sido implementado en el segmento terrestre. Muchos módulos han sido desarrollados donde cada uno posee *buffers* de conversión de paquete/celda y/o multiplexado de tráfico. Los *buffers* también son utilizados para absorber ráfagas de tráfico de alta velocidad. Por tanto, los sistemas ATM satelitales pueden ser diseñados para ser capaces de interconectar diferentes tipos de redes con capacidades en el rango de 10 a 150 *Mbit/s* (10 *Mbit/s* para Ethernet, 34 *Mbit/s* para DQDB, 100 *Mbit/s* para FDDI y 150 *Mbit/s* para redes ATM).

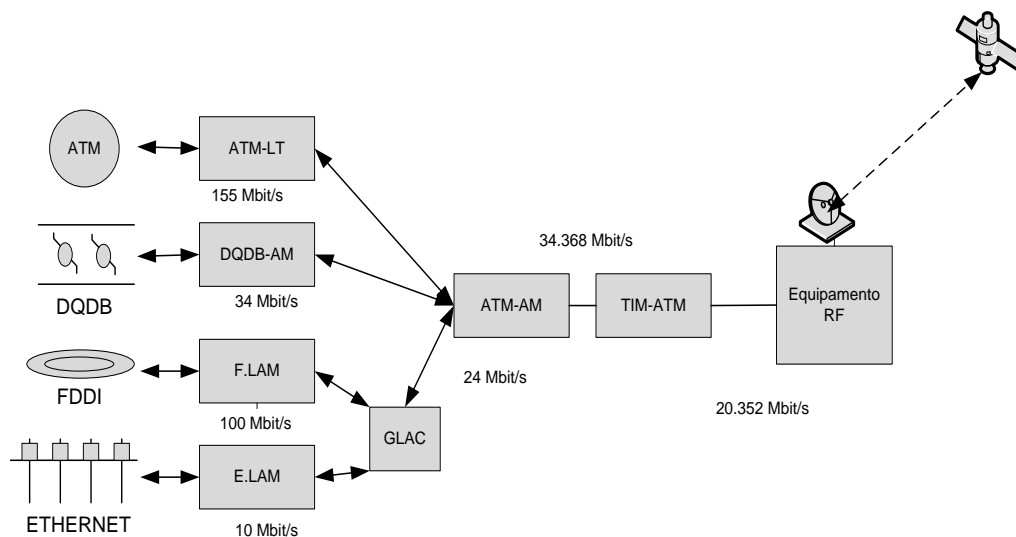
Una corta descripción de estos módulos se presenta a continuación:

- El ATM-LT provee un interfaz con una velocidad de 155 *Mbit/s* entre la red ATM y el equipo ATM en la estación terreno; este también es un punto de terminación de la red ATM y pasa las celdas ATM al módulo de adaptación ATM (ATM-AM).
- El módulo de adaptación de LAN Ethernet provee una interfaz para la red Ethernet de área local.
- El módulo de adaptación FDDI LAN (F-LAM) provee una interfaz para la red FDDI.
- El módulo de conversión genérico LAN ATM (GLAC) convierte los paquetes FDDI y Ethernet en celdas ATM, luego envía las celdas al módulo ATM-AM.
- El módulo de adaptación DQDB (DQDB-AM) provee una interfaz para la red DQDB con un buffer pequeño, este convierte los paquetes DQDB en celdas ATM para luego enviarlas al ATM-AM.
- El ATM-AM es un adaptador ATM que multiplexa el flujo de celdas ATM de los dos puertos en un solo flujo de celdas ATM. Este módulo envía las celdas al módulo de interfaz terrestre para ATM (TIM-ATM) y provee una interfaz entre las redes terrestres y la estación satelital terrestre.
- El TIM-ATM tiene dos buffers con una configuración “ping-pong”. Cada buffer puede almacenar hasta 960 celdas; estas son transmitidas desde

un buffer mientras que el ATM-AM alimenta las celdas en el otro buffer; las transmisiones de los buffer son conmutadas cada 20 milisegundos.

La figura 71 ilustra el modelo del equipo en tierra.

Figura 71. **Segmentos de módulos terrestres**



Fuente: SUN, Z. Interconnection of broadband islands via satellite. p. 2.

4.3.2. El segmento espacial

En este sistema, el satélite EUTELSAT II fue utilizado en condiciones de buen clima haciendo uso de un transponder de 36 MHz de ancho de banda. Este alcanzó una capacidad de transmisión de aproximadamente 20 Mbit/s. La capacidad tiene que ser compartida por un número de estaciones terrestres cuando múltiples islas de banda ancha son interconectadas.

Esto fue un intercambio para proveer un buen QoS y una eficiente utilización de los recursos del satélite (ancho de banda y potencia de transmisión).

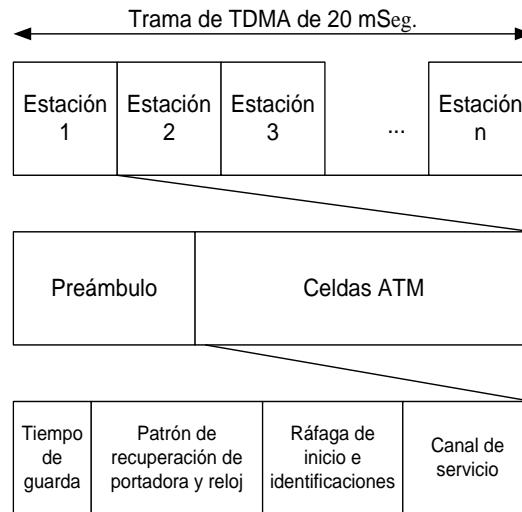
Comparado con el retardo de propagación, el retardo entre el segmento terrestre fue insignificante. Utilizar almacenamiento temporal (*buffering*) en los módulos del segmento terrestre puede causar variaciones en el retardo, el cual es afectado por la carga de tráfico en el *buffer*. La mayoría de las variaciones fueron causadas en el *buffer* TIN-ATM. Esto causó un retardo promedio estimado de 10 milisegundos y en el peor de los casos un retardo de 20 milisegundos.

Las pérdidas de las celdas ocurrieron cuando se presentó desbordamiento en el *buffer*. Los efectos del retardo, variación del retardo y pérdidas de celdas en el sistema, pueden ser minimizados controlando el número de aplicaciones, la cantidad de carga de tráfico y la asignación del ancho de banda adecuado para cada aplicación.

4.3.3. Administración de los recursos de ancho de banda satelitales

El sistema TDMA fue utilizado con una trama de longitud de 20 milisegundos, la cual fue compartida por las estaciones terrestres. Cada estación terrestre fue limitada a un espacio de tiempo correspondiente a la capacidad designada de transmisión hasta un máximo de 960 celdas (equivalente a 20.352 Mbit/s), el formato TDMA se muestra en la figura 72.

Figura 72. **Formato de trama TDMA (estación terrena a satélite)**



Fuente: FREEMANN, Roger. Fundamentals of telecommunications. p. 230.

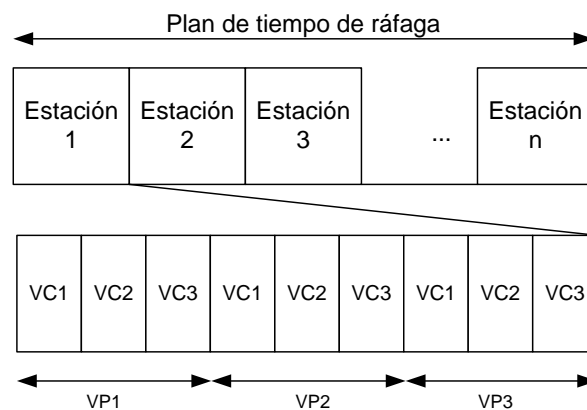
Existen tres niveles de manejo de los recursos (RM): el primer nivel es controlado por un centro de control de red (NCC) y designa la capacidad de ancho de banda para cada estación terrena.

La designación es en la forma de planos de tiempo de ráfaga (BTP), dentro de cada BTP, los tiempos de ráfaga son especificados para las estaciones terrestres, lo cual limita el número de celdas en ráfaga que la estación terrena puede transmitir. En el proyecto CATALYST, el límite es que cada BTP es menor o igual a 960 celdas ATM y la suma del total de los tiempos en ráfaga es menor o igual a 1104 celdas.

El segundo nivel es el manejo de las rutas virtuales (VP) dentro de cada BTP. La capacidad de ancho de banda que puede ser designada al VP es restringida por el BTP.

El tercer nivel es el manejo de los canales virtuales (VC); este se encuentra sujeto al ancho de banda disponible del VP. La figura 73 ilustra los mecanismos del manejo de recursos de la capacidad de ancho de banda.

Figura 73. **Administración de recursos satelitales**



Fuente: elaboración propia.

Cada estación es ubicada en un espacio de tiempo dentro del plan de tiempo de ráfaga; cada espacio de tiempo es dividido para ser designado de acuerdo con los requerimientos del VPI y VCI. La designación del ancho de banda del satélite es realizada cuando las conexiones son establecidas.

4.3.4. **Control de admisión de conexión**

El control de admisión de conexión (CAC) está definido como un conjunto de acciones tomadas por la red en la fase de inicio de la llamada, para establecer si hay suficientes recursos disponibles para establecer la llamada a través de toda la red al QoS requerido y mantener el QoS de las llamadas existentes.

Esto también aplica a la renegociación de los parámetros de conexión de una llamada.

En un ambiente B-ISDN, una llamada puede requerir más de una conexión para multimedia o servicios tales como videotelefonía o videoconferencia. Una conexión puede ser requerida por un servicio sobre demanda, o por servicios permanentes o reservados.

La información sobre el descriptor de tráfico y QoS es requerido por el mecanismo del CAC para determinar si la conexión puede ser aceptada o no, el CAC en el satélite tiene que ser la parte integrada de todos los mecanismos CAC de la red.

4.3.5. Funciones de políticas de red

Las funciones de política de conectividad hacen uso de los mecanismos de parámetro de control de utilización (UPC) y del control del parámetro de red (NPC). El UPC y el NPC monitorean y controlan el tráfico para proteger la red (particularmente el enlace satelital) y refuerzan el contrato de tráfico negociado durante la llamada; la tasa de celda pico tiene que ser controlada por todos los tipos de conexiones.

Otros parámetros de tráfico pueden ser sujetos de control tales como tasa de celda promedio, cantidad de ráfagas y duración pico. A nivel de celda, las celdas son admitidas para pasar a través de la conexión si estas cumplen con el control de tráfico negociado; si existen violaciones, acciones tales como etiquetado de celdas o celdas descartadas pueden ser ejecutadas para proteger la red.

4.3.6. Control de congestión reactivo

Aunque el control preventivo trata de prevenir una congestión en la red antes de que ocurra, el sistema experimental puede experimentar congestión debido al *buffer* de multiplexado de la estación terrena o al desbordamiento del *buffer* de salida del conmutador; en este caso, cuando la red depende únicamente del UPC y no existe información de retroalimentación entre la red y la fuente, ninguna acción puede ser tomada una vez que la congestión ocurre.

La congestión es definida como el estado donde la red es incapaz de proveer el QoS negociado para las conexiones ya establecidas. El control de congestión (CC) es un conjunto de acciones tomadas por la red para minimizar la intensidad, diseminación y duración de la congestión. El control de congestión reactivo se activa cuando existe indicación de congestión de la red.

Muchas aplicaciones, principalmente aquellas manejando transferencia de datos, tienen la habilidad para reducir su tasa de envío si la red requiere que así sea; igualmente, estas tienden a incrementar su tasa de envío si existe un ancho de banda extra disponible dentro de la red. Este tipo de aplicaciones son soportadas por los servicios clase ABR.

El ancho de banda asignado para otras aplicaciones depende del estado de congestión de la red. Un control basado en la tasa de envío es recomendado para servicios ABR, donde la información sobre el estado de la red es transportada hacia la fuente a través de celdas de control especial llamadas celdas de manejo de recursos (RM).

La tasa de información puede ser retornada a la fuente de dos formas:

- Notificación de congestión binaria (BCN) utilizando un solo *bit* para marcar los estados de congestión o no congestión. BCN es particularmente atractivo para los satélites debido a su capacidad de transmisión (broadcast).
- Tasa explícita (ER) es utilizada por la red para notificar a la fuente el ancho de banda exacto que debería utilizar para evitar congestión.

Las estaciones terrestres pueden determinar el estado de congestión ya sea midiendo la tasa de arribo de tráfico o al monitorear el estado del *buffer*.

4.4. Redes satelitales ATM avanzadas

Hasta el lanzamiento del primer satélite regenerativo INTELSAT en enero de 1991, todos los satélites fueron transparentes.

Si bien los satélites regenerativos, multihaz y con conmutación ATM a bordo tienen ventajas potenciales, estos incrementaron la complejidad, el efecto en la flexibilidad de uso, y la habilidad de arreglárselas con cambios inesperados en la demanda de tráfico y en nuevos procedimientos de operación.

Satélites avanzados de redes ATM tratan de explorar los beneficios del procesamiento y conmutación a bordo, aunque la complejidad es todavía la principal preocupación para las cargas de información manejadas por los satélites.

4.4.1. Capa de acceso de radio

La capa de acceso de radio (RAL) para el acceso de satélites debe tener en cuenta los requerimientos de desempeño para los satélites GEO. Una especificación independiente de la frecuencia es preferida. Los parámetros, al ser especificados, incluyen el rango, la tasa de *bit*, la potencia de transmisión, modulación/codificación, formatos de entramado y encriptación. Deben ser consideradas las técnicas de ajuste dinámico para condiciones variantes de enlace y técnicas de codificación para alcanzar la máxima eficiencia del ancho de banda.

El protocolo de control de acceso al medio (MAC) es requerido para soportar el uso compartido de los canales satelitales por nodos de conmutación múltiple, un requerimiento primario para el protocolo MAC es el de asegurar el aprovisionamiento del ancho de banda para todas las clases del tráfico, como se identifica en el UNI. El protocolo debería satisfacer el criterio de eficiencia. La capa de control de enlace de datos (DLC) es la responsable del envío confiable de las celdas ATM a través del enlace satelital GEO. Desde que el desempeño de las capas altas es extremadamente sensible a celdas perdidas, los procedimientos de control de error necesitan ser implementados.

Casos especiales para la operación sobre enlaces simples (o ancho de banda altamente asimétrico) necesitan ser desarrollados, los algoritmos DLC desarrollados para clases especiales de QoS, también necesitan ser considerados. El control inalámbrico se necesita para soportar las funciones de plano de control relacionadas con el control de recursos y manejo de las capas físicas MAC y DLC, para establecer un enlace inalámbrico sobre satélites GEO. Esto también incluye metaseñalización para soportar enlaces móviles.

4.4.2. Características del procesamiento a bordo (OBP)

El procesamiento a bordo (OBP) es en sí mismo un vasto dominio, el cual es sujeto de mucha actividad en los Estados Unidos, Japón y Europa. Todos los satélites civiles comerciales a la fecha han utilizado transponders transparentes, que consisten nada más que en amplificadores, cambiadores de frecuencia y filtros. Estos satélites se adaptan a los cambios en la demanda, pero a un alto costo en tarifas, por el segmento en el espacio y terminales terrestres con un alto valor. OBP se enfoca en colocar la complejidad en el satélite y en reducir el costo de la utilización del segmento del espacio y el de las terminales terrestres.

Existen varios grados de procesamiento a bordo en los satélites:

- Transponder regenerativo (modulación y codificación)
- Conmutación a bordo
- Conversión del formato de acceso (FDMA-TDM)
- Enrutamiento flexible

Las ventajas presentadas por la utilización del OBP se resumen a continuación:

- *Transponders* regenerativos: la ventaja del esquema regenerativo es que los enlaces de subida y bajada son separados y pueden ser designados independientemente uno del otro. Con satélites convencionales el $(C/N)_u$ y (C/N) son aditivos; con transponders regenerativos, estos son separados. Esto puede ser traducido en un mejoramiento del desempeño del BER ya que se redujo la degradación. Los *transponders*

regenerativos pueden resistir niveles más altos de interferencia por el mismo (C/N)_t.

- Comunicaciones multirango: con OBP, es posible seleccionar en el satélite entre velocidades baja y alta para comunicarse con las terminales. Esto permite que las terminales terrestres operen a varias tasas de transmisión para comunicarse entre sí por medio de un solo salto. Los transponders transparentes requieren que la conversión de la tasa de transmisión se realice en tierra y por tanto se necesitan dos saltos (*hops*). Las comunicaciones multirango incluyen al demodulador multiportador y a los conmutadores de banda base. Esto reduce la complejidad y hace más baratas las terminales terrestres.

4.4.3. El conmutador ATM a bordo

Existen ventajas potenciales en desempeño y flexibilidad para el soporte de servicios al colocar funciones de conmutación a bordo en satélites; esto es particularmente importante para las constelaciones satelitales con puntos de cobertura y/o comunicaciones intersatelitales. Esto permite construir redes sobre constelaciones satelitales y por tanto depender cada vez menos de la infraestructura en tierra. La figura 74 ilustra la pila del protocolo a bordo del satélite y en tierra.

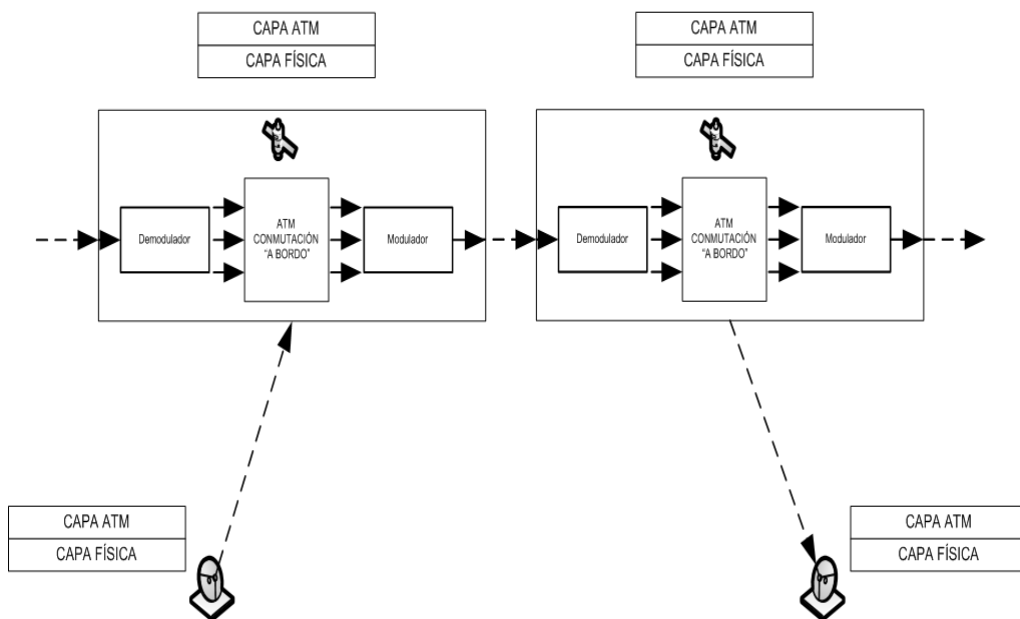
En el caso de los conmutadores satelitales ATM, el satélite actúa como un punto de conmutación dentro de la red (como se ilustra en la figura 74) y es interconectado con más de dos puntos finales en la red terrestre; el conmutador a bordo enruta las celdas ATM de acuerdo con el VPI/VCI del encabezado y de la tabla de enrutamiento cuando las conexiones son establecidas.

También se necesita del soporte de los protocolos de señalización utilizados para el UNI como enlaces de acceso y para el NNI como enlaces de tránsito.

Los satélites con conmutación a bordo (OBS) con múltiples puntos de cobertura y alta ganancia han sido considerados como elementos clave de los sistemas satelitales avanzados.

Estos satélites soportan terminales pequeñas de bajo costo, y proveen la flexibilidad requerida e incrementan la utilización de recurso en un ambiente multimedia.

Figura 74. **Satélite con conmutación ATM a bordo**



Fuente: elaboración propia.

Aunque emplear funciones de conmutación a bordo resulta en más complejidad a bordo del satélite, se enlistan a continuación las ventajas de esta técnica:

- Reduce los costos de las estaciones en Tierra.
- Proveen un ancho de banda sobre demanda con la mitad del retardo.
- Mejoran la interconectividad.
- Ofrecen flexibilidad y mejoramiento en el desempeño de los enlaces terrestres; por ejemplo, permite que cada estación terrena en cualquier haz de enlace de subida se comuniquen con estaciones terrestres en cualquier haz de enlace de bajada mientras se transmite y se recibe únicamente un solo portador.

Uno de las cuestiones más críticas en el diseño del procesamiento a bordo de los satélites es el de la selección de la arquitectura de conmutación de banda base a bordo.

Cuatro tipos típicos de conmutadores a bordo se enlistan a continuación:

- Circuito de conmutación
- Conmutador de paquetes (puede ser de paquete de longitud variable)
- Conmutador híbrido
- Conmutador de celdas ATM (paquetes de longitud fija)

Estas poseen ventajas y desventajas, dependiendo en los servicios a ser transportados. Desde el punto de vista de la eficiencia del ancho de banda, la conmutación de circuitos es ventajosa bajo la condición de que la mayor porción de tráfico de la red sea de circuitos conmutados.

Además, para tráfico en ráfaga, la conmutación de circuitos resulta en mucha capacidad de ancho de banda desperdiciada. La conmutación rápida de paquetes puede ser una opción atractiva para una red satelital que transporta tráfico de paquetes conmutados y tráfico de circuitos conmutados; la eficiencia de ancho de banda para el tráfico de circuitos conmutados será ligeramente menor debido al procesamiento de los paquetes (*overhead*).

En algunos casos una configuración mixta, llamada conmutación híbrida, consiste en la conmutación de circuitos y en la conmutación de paquetes, conformando una arquitectura óptima de procesamiento a bordo. Además, la distribución del tráfico de los circuitos y de los paquetes conmutados es desconocida, lo que hace de esta solución una implementación riesgosa.

Para la conectividad satelital, la conmutación rápida de paquetes de tamaño fijo, tales como la conmutación de celdas ATM, es una solución atractiva para ambos métodos de conmutación de tráfico, utilizando multiplexación estadística de las celdas, se puede alcanzar la mayor eficiencia de ancho de banda a pesar de tener un encabezado relativamente grande por celda.

En adición, debido al peso a bordo del satélite y las limitaciones en el consumo de potencias, la conmutación de paquetes es especialmente bien conformada para la conmutación satelital por el uso de las comunicaciones digitales.

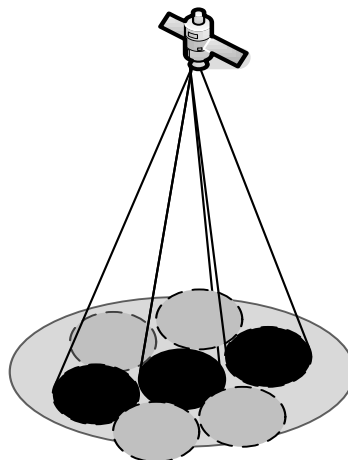
Es importante que las redes satelitales sigan las tendencias de las tecnologías terrestres para una integración completa.

4.4.4. Satélites multihaz

Un satélite multihaz tiene como características varios haces de antena, los cuales proveen cobertura de diferentes zonas como se ilustra en la figura 75. A medida que se reciben las señales a bordo del satélite, estas aparecen a la salida de una o más antenas receptoras; las señales a la salida del repetidor deben alimentar a varias antenas transmisoras.

Los satélites de cobertura de punto proveen ventajas a segmento de las estaciones terrestres, al mejorar la figura de mérito G/T en el satélite; esto hace posible reutilizar la misma banda de frecuencia varias veces en diferentes puntos de cobertura para incrementar la capacidad total de la red sin incrementar el ancho de banda designado. Una de las tecnologías actuales para las interconexiones entre las áreas de cobertura es la conmutación TDMA de conmutación satelital (SS/TDMA). También es posible tener conmutación de paquetes a bordo en satélites multihaz.

Figura 75. **Satélite multihaz**



Fuente: elaboración propia.

4.4.5. Constelaciones satelitales LEO/MEO

Una de las mayores desventajas de los satélites GEO es causada por la distancia entre los satélites y las estaciones terrenas. Estas han sido tradicionalmente utilizadas para ofrecer servicios de telecomunicación fija y *broadcast*.

En años recientes, las constelaciones satelitales de órbita terrestre baja/media (LEO/MEO) para comunicaciones globales han sido desarrolladas con terminales pequeñas para soportar movilidad.

Una constelación satelital MEO típica tal como ICO tiene 10 satélites más 2 de repuesto, y una LEO tal como la SKYBRIDGE tiene 64 satélites más otros de repuesto.

Comparada con las redes GEO, la redes LEO/MEO son mucho más complicadas, pero proveen un retardo de conexión mucho más bajo, menos pérdidas de espacio libre y una mayor capacidad en general. Debido al movimiento relativamente rápido de los satélites en las órbitas LEO/MEO en relación con los usuarios de terminal, el traspaso satelital es un tema importante.

Las constelaciones satelitales LEO/MEO pueden ser también una solución eficiente para ofrecer servicios altamente interactivos con un tiempo de propagación de ida y vuelta relativamente corto sobre el segmento del espacio (típicamente 20/100 ms para las LEO/MEO comparados a los 500 ms para los sistemas geoestacionarios). Los sistemas pueden ofrecer desempeños similares a las redes terrestres, permitiendo la utilización de protocolos de comunicación comunes y aplicaciones estándar.

4.4.6. Enlaces intersatelitales

La utilización de los enlaces intersatelitales para el enrutamiento del tráfico tiene que ser considerado, ya que esta tecnología brindará un beneficio, el cual hará que valga la pena su inclusión. Los aspectos que necesitan ser discutidos cuando se decide la utilización del ISL incluyen:

- Consideraciones de conectividad (cobertura, retardo y traspaso)
- La viabilidad del enlace físico (dinámica intersatelital)
- La masa, potencia y restricciones de costos (presupuesto del enlace)

La masa y el consumo de potencia de los enlaces intersatelitales son factores que pueden ser incluidos o no en un sistema, en adición a los posibles beneficios y desventajas. También la elección entre *payloads* en radiofrecuencia y *payloads* ópticos es posible, porque las cargas ópticas se han convertido en tecnologías confiables y ofrecen un enlace de alta capacidad. La capacidad de rastreo de los *payloads* debe considerarse, especialmente si las dinámicas intersatelitales son altas; esto puede ser una ventaja para los *payloads* de RF.

Las ventajas de los ISL se resumen como sigue:

- Las llamadas pueden llegar a tierra a la estación terrestre óptima, a través de otro satélite para la terminación de la llamada, reduciendo la longitud de la “cola” terrestre requerida.
- Una reducción en el control puede ser alcanzada con una conmutación a bordo de banda base, reduciendo el retardo (operación autónoma).

- Incrementar la cobertura global (océanos y áreas sin estaciones terrenas).
- Un centro de control de red y estaciones terrestres.

Las desventajas de los ISL se resumen a continuación:

- La complejidad y costo de los satélites será incrementada.
- La disponibilidad de potencia para los enlaces satelitales puede ser reducida.
- Los trasposos entre satélites debido a las dinámicas intersatelitales tendrán que ser incorporadas.
- Coordinación de frecuencias.
- Dimensionamiento de enlaces cruzados.

4.4.7. ATM Móvil

El control sin intervención es una capacidad básica de las redes móviles que permiten la migración de terminales a través del *backbone* de la red sin que se caiga la señal de la llamada.

Debido a las distancias geográficas involucradas, el control para el acceso sobre satélites GEO no debe ser un problema en la mayoría de las aplicaciones.

En algunas instancias, por ejemplo en vuelos intercontinentales, un traspaso de control lento entre satélites GEO con áreas de cobertura con traslape será requerido.

El manejo de la ubicación se refiere a la capacidad del mapeo uno a uno entre el nodo móvil “*name*” y el actual “*routing id*”; el manejo de la ubicación primariamente aplica al escenario que involucra conmutación a bordo satelital.

4.4.8. Uso del espectro de alta frecuencia

Las constelaciones satelitales pueden utilizar la banda Ku (11/14 GHz) para conexiones entre las terminales de usuario y los “*gateways*”. Enlaces de tránsito de alta velocidad entre los “*gateways*” serán establecidos utilizando ya sea la banda Ku o la banda Ka (/20/30 GHz).

De acuerdo con las regulaciones de radio de la ITU, las redes satelitales GEO tienen que estar protegidas de cualquier interferencia dañina de los sistemas no geoestacionarios; esta protección se alcanza a través de la separación angular, utilizando procedimientos predeterminados de traspasos basados en el hecho de que las posiciones de los satélites geoestacionarios y las constelaciones son permanentemente conocidas y predecibles.

Cuando el ángulo entre el “*gateway*”, (el satélite LEO/MEO en uso por el *gateway*) y el satélite geoestacionario es más pequeño que un grado, las transmisiones LEO/MEO son detenidas y trasladadas hacia otro satélite LEO/MEO, el cual no se encuentra en condiciones de interferencia. Las constelaciones proveen una solución de costo efectiva, ofreciendo acceso global a los servicios de banda ancha.

Las arquitecturas son capaces de soportar una gran variedad de servicios, reduciendo costos y riesgos técnicos relacionados con la implementación del sistema, asegurando una compatibilidad y complementariedad con las redes terrestres, proveyendo flexibilidad para acomodar la evolución de los servicios en el tiempo, así como en las diferencias de los requerimientos de los servicios a través de las regiones, y optimizando el uso del espectro de frecuencia.

4.5. Desempeño del protocolo ATM

La ITU (ITU-T-I356) define los parámetros para cuantificar el desempeño de la transferencia de las celdas ATM de una conexión ISDN de banda ancha. Estas recomendaciones de ITU incluyen objetivos de desempeño provisional para la transferencia de celdas, algunas de los cuales dependen de la selección de la clase de QoS del usuario.

4.5.1. Modelo de capas de desempeño para B-ISDN

La ITU-T definió un modelo en capas de desempeño para el B-ISDN. En este modelo puede ser denotado que el desempeño de la red provisto a los usuarios de la B-ISDN influye principalmente en el desempeño de tres capas: la capa física, ATM y ATM (AAL).

A continuación se resumen dichas capas:

- La capa física, la cual puede ser basada en jerarquía digital plesiócrona (PDH), jerarquía digital síncrona (SDH), o sistemas de transmisión basados en celdas. Esta capa es terminada en puntos donde la conexión es conmutada por el equipo, utilizando la técnica ATM, y por tanto la capa física no tiene significancia cuando tal conmutación ocurre.

- La capa ATM, la cual está basada en celdas. La capa ATM es independiente del medio físico y de la aplicación y es dividida en dos tipos de subcapas: la capa ATM-VP y la capa ATM-VC. La capa ATM-VC siempre tiene significancia en las conexiones punto a punto, la capa ATM-VP no tiene significancia en las conexiones *user-to-user* cuando la conmutación VC ocurre. La ITUT-I356 especifica el desempeño de la red en la capa ATM, incluyendo la capa ATM-VC y la capa ATM-VP.
- La capa de adaptación ATM (AAL), la cual puede mejorar el desempeño provisto por la capa ATM para cumplir con los requerimientos de las capas altas. El AAL soporta múltiples prototipos de protocolo, cada uno proveyendo diferentes funciones y diferente desempeño.

4.5.2. Parámetros de desempeño de ATM

La ITU (ITU-1356) también define un conjunto de parámetros de desempeño de transferencia de las celdas ATM, utilizando los resultados de las transferencias de celda. Todos los parámetros pueden ser estimados en la base de las observaciones en los puntos de medición (MP).

A continuación se muestra un resumen de los parámetros de desempeño de ATM:

- Radio de error de celda (CER): es el radio del total de celdas en error al total de celdas transferidas exitosamente, más celdas marcadas, más celdas con errores en una población de interés. Las celdas exitosamente transferidas, celdas marcadas y celdas con errores contenidas en varios bloques de celdas con error son excluidas de los cálculos de el CER.

- Radio de pérdida de celda (CLR), es el radio del total de celdas perdidas al total de celdas transmitidas en una población de interés. Las celdas perdidas y las transmitidas en varios bloques de celdas con error son excluidas de los cálculos del CLR. Tres casos especiales son de interés, CLR0, CLR0+1 y CLR1, considerando la etiqueta CLR en el encabezado de la celda ATM.
- Tasa de falla de inserción de celda (CMR), es el número total de celdas no insertadas observadas durante un intervalo de tiempo específico divididas por la duración del intervalo del tiempo (equivalentemente, el número de celdas no insertadas por segundo de conexión). Las celdas no insertadas y los intervalos de tiempo asociados con bloques de celdas con muchos errores son excluidos de los cálculos del CMR.
- Tasa de bloques de celda con grandes errores (SECBR), es el radio del total del bloque de celda con muchos errores al total de bloques de celda, en una población de interés.
- La definición para el retardo de transferencia de celda puede ser únicamente aplicado a las salidas de celdas transferidas, con errores y marcadas. El retardo de transferencia de celda (CTD) es el tiempo entre las ocurrencias de dos eventos correspondientes de transferencia de celdas.
- El retardo de transferencia de celda promedio es el promedio aritmético de un número especificado de retardos de transferencia de celdas.
- Dos parámetros de desempeño de transferencia de celdas asociados con la variación del retardo de celda (CDV) son definidos a continuación. La variación del retardo de celda de un punto que está definida basado en la

observación de una secuencia de arribos de celda consecutivos en un solo punto de medición (MP) y la variación del retardo de celda en dos puntos, que está definida basada en las observaciones de los arribos de celdas correspondientes, en dos puntos de medición que delimitan una porción de conexión virtual, los dos puntos CDV dan la medida del desempeño de la conexión punto a punto.

- Los dos puntos CDV (V_k) para la celda k entre el punto de medición MP1 y MP2 es la diferencia entre el retardo de transferencia de celda absoluto de la celda k entre los dos MP y un retardo de transferencia de celda de referencia definida ($d_{1,2}$) entre aquellos MP: $V_k = X_k - d_{1,2}$. El retardo de transferencia de celda absoluto (X_k) de la celda k entre los puntos de referencia MP1 y MP2, es la diferencia entre el tiempo de arribo actual de la celda en el punto MP2 y el tiempo de arribo actual de la celda en el punto MP1: $X_k = a_{2k} - a_{1k}$.
- El retardo de transferencia de celda de referencia entre los puntos MP1 y MP2 es el retardo de transferencia de celda absoluto experimentado por la celda 0 entre los dos MP.

4.5.3. Impacto de los errores de ráfaga en los satélites en la capa ATM

ATM fue diseñado para transmitirse en un medio físico con excelentes características de error, tales como la fibra óptica, la cual ha mejorado dramáticamente en desempeño desde los años 70. Debido a esto, muchas de las características incluidas en protocolos que se las arreglan con canales poco confiables fueron removidos de ATM.

La considerable simplificación del protocolo en las redes ópticas fijas para las cuales ATM fue diseñado, también causa serios problemas cuando ATM es transmitido sobre un canal propenso a errores, tales como satélites y redes móviles.

El impacto más importante de errores en ráfaga en funcionamiento de la capa ATM, es el incremento dramático en el radio de pérdidas de celda (CLR). El campo de ocho *bits* del encabezado de control de error de ATM en el encabezado de la celda ATM (HEC), puede corregir solamente errores de un *bit* en el encabezado.

En un ambiente de errores de ráfaga, si una ráfaga de errores impacta en el encabezado de la celda, es muy probable que corrompa más de un *bit*, por esto el campo HEC se vuelve ineficiente para errores en ráfaga y el CLR se incrementa dramáticamente.

Ha sido demostrado por un análisis simplificado y confirmado por experimentos recientes que para errores aleatorios, el CLR es proporcional al cuadrado de la tasa de error de *bit* (BER), y para errores en ráfaga, el CLR está linealmente relacionado al BER. Por tanto, para el mismo BER, en el caso de errores de ráfaga, el valor del CLR (proporcional al BER) es de magnitud mucho más alta que el valor CLR para errores aleatorios (proporcional al cuadrado del BER).

También, para los errores en ráfaga, CLR está linealmente relacionada al BER; la reducción en CLR con la reducción en el BER no es tan dramática como el en caso de los canales con errores aleatorios (donde CLR es proporcional al cuadrado de BER).

Finalmente, para errores en ráfaga, el CLR se incrementa con el decremento promedio de la longitud de la ráfaga, esto se debe a que, para el mismo número de *bits* en error total, errores de ráfaga; más cortos significan que un número grande de celdas son afectadas.

Otro pequeño pero interesante problema es el de las celdas no insertadas, ya que ocho *bits* HEC en el encabezado de la celda ATM son determinados por otros 32 *bits* en el encabezado; solo hay 232 patrones de encabezado de ATM válidos de 2^{40} posibilidades (encabezados ATM de 40 *bits*). Por tanto para un encabezado de celda, impactado por una ráfaga de errores, existe un chance $2^{32}/2^{40}$ de que el encabezado corrupto sea válido.

Además, si el encabezado corrupto difiere de un encabezado válido en un solo *bit*, HEC corregirá dicho *bit* y aceptará el encabezado como válido. Por tanto para cada encabezado válido (2^{32} posibilidades), existen otros 40 patrones (obtenidos al invertir un *bit* de 40) que pueden ser corregidos. La posibilidad que la ráfaga de error golpee al encabezado en uno de estos patrones es de $40 \times 2^{32}/2^{40}$.

En general hay un chance de $41 \times 2^{32}/2^{40}$ ($= \frac{41}{256} \approx \frac{1}{6}$) que un patrón de *bit* aleatorio, que emerge después de que el encabezado de celda ATM ha sido impactado por una ráfaga de errores, sea tomado como un encabezado válido.

En ese caso, una celda que debería ser descartada, es aceptada como una celda válida (errores en el *payload* deben ser detectados por el protocolo de transporte en los puntos finales). Tal celda es llamada celda erróneamente insertada. La probabilidad P_{mi} de que una celda será erróneamente insertada en un canal con errores de ráfaga, es de alrededor de 1/6 del radio de pérdida de la celda en el canal.

$$P_{mi} \approx \frac{1}{6} CLR$$

Ya que CLR puede ser escrito como varias veces el VER, la probabilidad de las celdas erróneamente insertadas es también un número de veces constante de BER.

$$P_{mi} = K \times BER$$

La tasa de inserción de celdas c_{ir} es la tasa a la cual las celdas son insertadas en una conexión; es obtenida al multiplicar esta probabilidad por el número de celdas ATM transmitidas por segundo, dividido por el número posible total de conexiones ATM.

$$C_{ir} = \frac{K \times BER \times r}{2^{24}}$$

Debido al gran número de posibles conexiones ATM totales, la tasa de inserción de celda es despreciable (alrededor de una celda insertada por mes) incluso para una BER alta ($\approx 10^{-4}$) y tasas de información elevadas (34Mbits/s). Por esto, la transición de errores a errores de ráfaga causa que el CLR de ATM se incremente significativamente.

4.5.4. Impacto de errores de ráfaga en protocolos AAL

Los códigos cíclicos de detección de error empleados por los protocolos tipo 1 AAL, 3/4 y 5 son susceptibles a errores en ráfaga de la misma manera que el código HEC de ATM. Una ráfaga de errores que pase sin ser detectada a través de estos códigos puede causar una falla en el mecanismo del protocolo o corrupción en los datos.

El encabezado AAL tipo 1 de segmentación y ensamblado (SAR) consiste de cuatro *bits* de un número de secuencia (SN) protegido por un código CRC de tres *bits* y un *bit* para chequeo de paridad. Existe un chance de $15/255=1/17$ de que un error en ráfaga en el encabezado, no será detectado por el código CRC y el chequeo de paridad. Tal error no detectado en la capa SAR puede desembocar en una falla de sincronización en la subcapa de convergencia en el receptor; el AAL 3/4 utiliza un CRC de 10 *bit* en el nivel SAR.

Aquí, los errores en ráfaga y la codificación en el canal del satélite incrementan la probabilidad de errores sin detección. Un intercalado completo del *payload* de la celda ATM puede reducir la tasa de errores sin detección en varias magnitudes al distribuir los errores en ráfaga entre dos *payload* AAL 3/4.

El precio a pagar por distribuir los errores de ráfaga en dos *payload* AAL es el de duplicar la tasa de detección de error y la de rechazo de *payload* de AAL 3/4. El AAL tipo 5 utiliza un código CRC de 32 *bit* que detecta todos los errores en ráfaga de una longitud de 32 o menos.

Para ráfagas más grandes, la capacidad de detección de este código es más robusta que aquella del AAL 3/4 CRC. Además, utiliza un campo de chequeo de longitud, el cual encuentra la pérdida o adición de celdas en un *payload* de AAL 5, aun cuando el código CRC falle en detectarlo. Por lo tanto es poco probable que un error en ráfaga en el *payload* de AAL 5 no sea detectado.

Puede notarse que el ATM AAL1 y 3/4 son susceptibles a errores en ráfaga, ya que hay menos *bits* de redundancia utilizados para protecciones. El AAL 5 es más robusto contra errores en ráfaga al utilizar más *bits* de redundancia.

4.5.5. Mecanismos de control de error

Existen tres tipos de mecanismos de control de errores: mecanismos de retransmisión, control de error en adelante (FEC) y técnicas de intercalado para mejorar la calidad del tráfico ATM sobre los satélites. Las redes satelitales ATM tratan de mantener el BER por debajo de 10^{-8} en operaciones a cielo despejado el 99% del tiempo. Las características de errores en ráfaga de los canales satelitales codificados en FEC afectan de forma adversa el desempeño de los protocolos físicos, ATM y AAL. El mecanismo de intercalado reduce el efecto de error en ráfaga en los enlaces satelitales.

Un ejemplo típico del FEC es de usar un codificador/decodificador Reed-Solomon externo, concatenado con el codificador convolucional/decodificador Viterbi interno. El codificador/decodificador RS externo ejecutará la función de corregir errores en ráfaga, resultado de la codificación/descodificación interna. El código RS consume un poco de ancho de banda extra (9% a 2 Mbit/s).

Los códigos HEC utilizados en ATM y en los encabezados de la capa AAL son capaces de corregir errores de un *bit* en el encabezado, por tanto si los *bit* de N encabezados son intercalados antes de codificarlos y desintercalados después de la descodificación, la ráfaga de errores se dispersará sobre N encabezados, tal que dos encabezados consecutivos emergiendo después del desintercalado, probablemente nunca tendrán más de un *bit* en error.

Ahora el código HEC será capaz de corregir un error de *bit* y por un modo dual de operación, ninguna celda/AAL PDU será descartada. El intercalado involucra el reordenamiento de los *bits* en el canal y no hay *overhead* involucrado.

El proceso de intercalado y desintercalado requiere memoria adicional e introduce un retardo en el emisor y receptor. Los errores en ráfaga pueden ser mitigados al utilizar técnicas FEC y de intercalado; el desempeño de estos esquemas está directamente relacionado a la tasa de código (eficiencia del ancho de banda) y/o las ganancias de la codificación (eficiencia de potencia). El retardo involucrado en el procesamiento de estas técnicas es aceptable a cualquier aplicación basada en ATM.

4.5.6. Técnicas para el mejoramiento de las redes satelitales ATM

En las redes satelitales ATM, se tiene que aprovechar la codificación FEC y el intercalado, y sopesar entre la calidad de transmisión en términos de desempeño de error de *bit* y los recursos del satélite, tales como ancho de banda y potencia. Para el mejoramiento de las redes satelitales ATM se deberá tomar en cuenta lo siguiente:

- ATM fue diseñada para la transmisión en un medio físico con excelentes características de corrección de errores, tal como la fibra óptica. Esta posee menos *overhead* al reducir los controles de error, pero también causa severos problemas cuando ATM es transmitido sobre un canal propenso a errores, tal como los enlaces satelitales.
- Los sistemas satelitales están limitados en potencia y ancho de banda. Para alcanzar una transmisión confiable de los códigos FEC, a menudo se utilizan módems satelitales modernos. Con tales códigos (típicamente códigos convolucionales), el flujo de datos no se reconstruye en una base símbolo a símbolo, más bien, alguna redundancia en el flujo de datos es utilizada.

- En promedio, la codificación reduce el BER o alternativamente disminuye la potencia de transmisión necesitada para alcanzar una cierta QoS para un radio S/N dado, a expensas del *overhead* de la codificación. De cualquier manera, cuando la decodificación comete errores, en general una gran cantidad de *bits* son afectados, resultando en errores en ráfaga. Ya que ATM fue diseñado para ser robusto respecto de errores aleatorios sencillos, los errores en ráfaga pueden degradar el desempeño de ATM considerablemente.

Por tanto, algunas técnicas mejoradas pueden ser desarrolladas para hacer que la transmisión de celdas ATM sobre un enlace satelital sea más robusta. El desempeño de estas técnicas está directamente relacionado con la tasa de codificación (eficiencia de ancho de banda) y/o la ganancia de codificación (eficiencia de potencia), las cuales agregan un retardo de procesamiento (*overhead*) tolerable para cualquier aplicación basada en ATM.

Para grandes estaciones terrestres operando a tasas de información muy altas, las técnicas de mejoramiento tratan de manejar los errores en ráfaga. Al someter los encabezados de celdas ATM de varias celdas al intercalado (no al *payload*), puede alcanzarse una mejora en el desempeño de ATM en un canal de errores de *bit* aleatorios (por ejemplo el canal AWGN). Nótese que el intercalado únicamente redistribuye los *bits* en el canal (para diseminar los errores de *bit* entre los encabezados de las celdas ATM) y no produce un *overhead* el cual puede decrementar la tasa de *bit* global.

El intercalado requiere de memoria en el transmisor y en el receptor, e introduce un retardo adicional. Si se asume un número promedio de 30 errores de *bit* en una ráfaga de errores, el intercalado sobre 100 encabezados de celdas parece ser suficiente.

Esto requiere una memoria de solamente 10 *Kbits* e introduce un retardo de 840 μ s a 50 *Mbit/s* y un retardo de 21 ms a 2 *Mbit/s*. Ya que los esquemas de intercalado requieren un flujo continuo de datos, existen problemas al utilizarlos en terminales portátiles, en donde pocas celdas pueden ser transmitidas. Otra forma de corregir los errores en ráfaga debido a las técnicas FEC aplicadas a los enlaces satelitales son los códigos Reed-Solomon.

Este tipo de códigos de bloques, los cuales están basados en símbolos, han sido identificados con un buen desempeño en la concatenación con códigos FEC convolucionales, debido a su habilidad para corregir errores en ráfaga.

Errores en ráfaga más grandes de lo que el código RS puede corregir deben ser diseminados sobre varios bloques para tomar ventaja de la capacidad de corrección de errores de dichos bloques. Esto puede ser realizado al ejecutar intercalado entre dos códigos.

Para terminales de ancho de banda pequeñas y portátiles, una rápida implementación y reubicación son requerimientos importantes. Las tasas de transmisión pueden ser de hasta 2,048 *Mbit/s*.

Desde que el intercalado entre celdas no es factible debido a que solamente unas pocas pueden ser transmitidas desde una terminal, los mecanismos que protejan a las celdas deben ser desarrollados.

El intercalado dentro de una celda ATM completa (no solamente el encabezado), llamado intercalado intracelda, conduce a una ganancia en el desempeño, la cual es tan pequeña que no se considera efectiva.

Esto puede ser mejorado al utilizar codificación adicional para proteger las celdas ATM. Nótese que esto introduce *overhead* adicional y por tanto reduce la tasa de *bit* de datos útil. Existen varias razones del por qué FEC, o FEC concatenado, pueden no ser adecuados para mejorar el desempeño de ATM sobre enlaces satelitales de banda amplia.

Primero, si solamente se usa la codificación FEC, el intercalado de símbolos es usualmente utilizado para diseminar los errores en ráfaga sobre varios encabezados de celda ATM. El retardo introducido por el intercalado (el cual es inversamente proporcional a la tasa de datos) puede ser muy grande a una baja velocidad de transferencia de datos para ciertas aplicaciones.

Segundo, si los códigos RS son utilizados para corregir la ráfaga de errores en concatenación con los códigos FEC, el ancho de banda debe ser incrementado o la tasa de datos debe ser reducida. También es posible mejorar la tasa de desempeño al optimizar el equipo que maneja los protocolos ATM sobre el enlace satelital.

Esto permite que la capa de enlace sea optimizada utilizando una combinación de conversiones de protocolo y técnicas de control de error. En el transmisor, las celdas ATM estándar son modificadas para acomodarse al enlace satelital. En el receptor, las técnicas de recuperación de errores son ejecutadas y las celdas ATM modificadas (celdas S-ATM) son convertidas en celdas ATM estándar.

El propósito principal de modificar las celdas ATM estándar es la de minimizar el gran *overhead* del encabezado el cual es de 5 por 48 *bytes* de *payload*. De la información del encabezado ATM, el campo de dirección (el cual está dividido en la VPI y la VCI) ocupa 24 *bits*.

Esto permite hasta 16 millones de VC para ser establecidas, considerando que en celdas de conexión CBR, todas llevan la misma información de dirección en el encabezado, existen métodos para no duplicar la misma información. La utilización de 24 *bits* como espacio para las direcciones, puede ser considerada un desperdicio de ancho de banda para este escenario.

Un método para proteger el encabezado de las celdas ATM es que, cuando no sea posible el intercalado, se comprima el espacio de la dirección de celda de 24 *bits* a 8 *bits*, de manera que en los *bits* libres se pueda almacenar el duplicado de la información del encabezado (exceptuando el campo HEC) de la celda anterior.

El HEC todavía es computado sobre los primeros cuatro *bytes* del encabezado e insertado en el quinto del mismo encabezado. Por tanto, si el encabezado de una celda contiene errores, el receptor puede almacenar el *payload* en un *buffer* y recuperar la información del encabezado de la siguiente celda en la que el mismo no contenga errores.

Este método no está pensado para proteger el *payload* de la celda; ya que presenta considerables mejoras en el CLR, comparado con la transmisión ATM estándar y el intercalado. Otra alternativa es la de utilizar un HEC de tres *bytes* en lugar del HEC de un *byte*, el cual es inadecuado para un ambiente satelital.

4.6. Evolución de los sistemas satelitales ATM

Mientras que la fibra óptica se ha convertido rápidamente, en el portador preferido para servicios de comunicación de gran ancho de banda, los sistemas satelitales pueden jugar un importante papel en la B-ISDN.

La configuración y capacidad de las redes satelitales pueden ser incrementadas gradualmente para satisfacer el tráfico B-ISDN durante la evolución hacia las comunicaciones de banda ancha.

El papel de los satélites en la conectividad a alta velocidad evolucionará de acuerdo con la evolución de las redes terrestres ATM; de cualquier forma, dos roles principales pueden ser identificados en dos escenarios del desarrollo de las redes de banda ancha:

- La fase inicial: cuando los satélites compensen la falta de enlaces terrestres de alta velocidad principalmente al interconectar unas cuantas redes distribuidas de forma regional o nacional de banda ancha, usualmente llamadas “islas de banda ancha”.
- La fase de maduración: cuando la infraestructura terrestre de banda ancha haya alcanzado algún grado de madurez. En esta fase, se espera que los satélites provean servicios de broadcast y también enlaces a un costo efectivo en áreas rurales que complementen las redes terrestres.

En esta fase las redes satelitales proveerán enlaces de banda ancha a un gran número de usuarios finales a través de una UNI para acceder redes de banda ancha. Esto permite una gran flexibilidad respecto de la tecnología, reconfiguración y expansión de la red. Los satélites también son ideales para interconectar sitios móviles y proveer solución de respaldo en caso de falla de los sistemas terrestres. En el primer escenario, los enlaces satelitales proveen enlaces de alta tasa de *bits* entre nodos de banda ancha o islas de banda ancha. El proyecto CATALYST proveyó un ejemplo para este escenario y consideraciones para la compatibilidad entre las redes satelitales y las terrestres.

Las interfaces con enlaces satelitales en este modo son del tipo NNI. Este escenario está caracterizado por un número relativamente pequeño de estaciones terrestres de gran tamaño, las cuales tienen una tasa de *bit* promedio relativamente grande.

En el segundo escenario, el satélite también puede ser ubicado en la frontera de las redes de banda ancha para proveer enlaces de acceso a un gran número de usuarios. Este escenario está caracterizado por un gran número de estaciones terrestres cuyas tasas de *bit* promedio y pico son limitadas. Se espera que el tráfico en la estación terrena muestre grandes fluctuaciones. Los mecanismos de asignación dinámica del ancho de banda son utilizados para que el acceso múltiple sea flexible.

El problema para una utilización eficiente de los recursos satelitales se debe a la naturaleza impredecible del tráfico en ráfaga y al gran retardo del enlace satelital para reasignar y manejar los recursos del satélite. Se debe investigar más en esquemas eficientes de acceso múltiple para sistemas satelitales. La utilización de satélites OBP con capacidad de conmutación de celda y puntos de cobertura podría reducir a la mitad este retardo y proveería grandes ventajas para interconectar un gran número de usuarios. Al utilizar la conmutación de celdas a bordo, la utilización del ancho de banda satelital puede ser maximizada por multiplexado estadístico del tráfico en el cielo.

La utilización de satélites GEO para transportar servicios ATM ha probado ser factible. El transporte de servicios ATM de alta tasa de *bit* para terminales portables o terminales móviles por medio de satélites, requiere de bajos retardos, terminales de bajos requerimientos de potencia y ángulos de elevación mínimos.

Es una evolución natural aprovechar los satélites de alturas más bajas tales como las órbitas MEO y LEO. Los satélites a estas bajas alturas tienen retardos más pequeños y terminales con requerimientos de potencia menores que las de los satélites en órbita GEO.

Aún se estudia cuál es la órbita más adecuada en conjunto con los esquemas de acceso múltiple para entregar servicios de banda ancha para terminales portátiles pequeñas y terminales móviles. El factor que afecta la dirección de las redes satelitales proviene de las redes terrestres donde estas evolucionan hacia las soluciones IP.

5. REDES DE PRÓXIMA GENERACIÓN

5.1. Definición de multiprotocolo de conmutación de etiquetas (MPLS)

El multiprotocolo de conmutación de etiquetas MPLS es una tecnología muy popular que utiliza etiquetas añadidas a los paquetes para transmitirlos a través de la red. En MPLS, las etiquetas son anunciadas entre los enrutadores de manera que estos puedan construir un mapa de etiqueta a etiqueta. Estas etiquetas son añadidas a los paquetes IP, posibilitando a los enrutadores transmitir el tráfico al inspeccionar la etiqueta y no la dirección IP destino. Estos paquetes son transmitidos por conmutación de etiquetas en lugar de conmutación IP.

La técnica de conmutación de paquetes no es nueva, *Frame Relay* y ATM la utilizan para mover “*frames*” o “*cells*” a través de la red. En el protocolo *Frame Relay*, el “*frame*” puede ser de cualquier longitud, pero en ATM, las celdas son de un tamaño predeterminado. El *header* o encabezado de las celdas de ATM y el “*frame*” de *Frame Relay* indican el circuito virtual al cual la celda o el “*frame*” pertenecen. La similitud entre *Frame Relay* y ATM reside en que en cada salto (*hop*) a través de la red, el valor de la “etiqueta” en el *header* o encabezado cambia.

Esto difiere del reenvío de paquetes IP. Cuando un enrutador transmite un paquete IP, este no cambia la dirección destino del paquete. El hecho de que las etiquetas MPLS son utilizadas para reenviar los paquetes y no la dirección IP destino, le ha dado popularidad a MPLS.

Estos beneficios, tales como una mejor integración de IP sobre ATM y la popular aplicación de MPLS de redes privadas virtuales (VPN) han hecho de este protocolo una opción para redes WAN en el mundo de las comunicaciones después de ATM y *Frame Relay*.

5.1.1. Beneficios de MPLS

Una de las principales razones para implementar un protocolo de conmutación de etiquetas fue la necesidad de incrementar la velocidad. Conmutar paquetes IP en un CPU fue considerado más lento que conmutar paquetes con etiqueta, simplemente observando la etiqueta en el paquete.

Un enrutador transmite un paquete IP, al analizar la dirección IP destino en el encabezado del paquete para luego encontrar la mejor ruta en la tabla de ruteo. Ya que las direcciones IP pueden ser *unicast* o *multicast* y tener cuatro octetos, el procesamiento puede ser complejo. Un procesamiento complejo significa que una decisión de transmisión para un paquete IP puede demorar cierto tiempo.

Por tanto, se determinó que revisar solamente el valor de una simple etiqueta en una tabla en lugar de buscar la dirección IP, sería una forma más rápida de conmutar paquetes. El progreso realizado en la conmutación de paquetes IP por medio de *hardware* mejoró el procesamiento; pero en estos días, los enlaces en los enrutadores pueden tener un ancho de banda de 40 Gbps, por lo que un enrutador que alberga varios enlaces de alta velocidad puede no ser capaz de conmutar todos los paquetes IP utilizando solamente el CPU para realizar una decisión de transmisión. Por lo que el CPU fue asignado principalmente para manejar el plano de control.

El plano de control es un conjunto de protocolos que ayudan al montaje de la información o plano de transmisión. Los componentes principales del plano de control son los protocolos de ruteo, la tabla de ruteo, y otros controles o protocolos de señalización utilizados para aprovisionar el plano de información. El plano de información se refiere a la ruta de transmisión de paquetes a través de un enrutador o conmutador. La conmutación de paquetes o el plano de transmisión en estos días se realizan con *hardware* especializado o circuitos integrados de aplicación específica (ASIC).

La utilización de ASIC's en el plano de transmisión de un enrutador ha permitido que los paquetes IP sean conmutados a la misma velocidad que los paquetes etiquetados. Por tanto, si la única razón para implementar MPLS en una red es la de perseguir una conmutación más veloz de paquetes a través de la red, esta carece de peso para realizar una migración a este protocolo WAN.

En cambio los principales beneficios de utilizar las redes MPLS son:

- El uso de una infraestructura de red unificada
- Mejor integración sobre IP que la alcanzada con ATM
- Protocolo de Puerta de Frontera (*Border Gateway Protocol*)
- Modelo *peer-to-peer* para redes privadas
- Flujo de tráfico óptimo
- Administración de tráfico

5.1.2. La utilización de una estructura de red unificada

Con MPLS, la idea es la de etiquetar los paquetes que ingresan, basándose en su dirección destino o algún otro criterio preconfigurado y conmutar todo el tráfico sobre una sola infraestructura.

Esta es una gran ventaja de MPLS, ya que una de las razones por la cuales IP, se convirtió en el único protocolo en dominar la conectividad a nivel global es porque muchas tecnologías pueden ser transportadas por este. No solamente se transportan datos sobre IP sino también telefonía. Al utilizar MPLS con IP, se extienden las posibilidades de lo que se puede transportar.

Agregar etiquetas a los paquetes permite transportar más protocolos que solo IP sobre un “*backbone*” o “segmento principal” IP con MPLS capa 3, similar a lo que fue posible realizar con redes *Frame Relay* o ATM capa 2. MPLS puede transportar protocolos IPv4, IPv6, *Ethernet*, Control de enlace de datos de alto nivel (HDLC), PPP, y otras tecnologías de capa 2.

La característica por la cual cualquier trama de capa 2 es transportada a través del *backbone* MPLS se llama “Cualquier transporte sobre MPLS” (*Any Transport over MPLS* AToM). Los enrutadores que conmutan el tráfico AToM no necesitan verificar el “*payload*” de MPLS.

Estos solamente necesitan ser capaces de conmutar el tráfico etiquetado al verificar la etiqueta sobrepuesta en el paquete. En esencia, la conmutación de paquetes MPLS es un método simple de conmutar múltiples protocolos en una red.

Se necesita tener una tabla de transmisión consistente de etiquetas de entrada para ser intercambiadas por etiquetas de salida y un siguiente salto. *AToM* habilita al proveedor de servicios o *carrier* para proveer el mismo servicio de capa 2 para clientes con redes específicas que no son MPLS. El proveedor de servicios necesita solamente una infraestructura de red unificada para transportar cualquier clase de tráfico del cliente.

5.1.3. Mejor integración de IP sobre ATM

En la década anterior, IP ganó la batalla sobre todos los protocolos de capa 3, tales como AppleTalk, *Internetwork Packet Exchange* (IPX), y DECnet. Otro protocolo muy publicitado de capa 2 en su momento fue ATM. Aunque ATM como un protocolo punto a punto (*end-to-end*) nunca se concretó, tuvo mucho éxito; pero dicho éxito fue limitado para su utilización como un protocolo WAN en el núcleo de las redes de los proveedores de servicio.

Muchos de estos proveedores de servicios también utilizaron *backbones* IP. La integración de IP sobre ATM no fue sencilla, para integrar IP sobre ATM, se plantearon varias soluciones. Una fue la de implementar IP sobre ATM de acuerdo con el conocido RFC1483 "*Multiprotocol Encapsulation over ATM Adaptation Layer 5*", el cual especifica cómo encapsular múltiples protocolos de ruteo y protocolos puente sobre la capa de adaptación 5 de ATM.

En esta solución, todos los circuitos ATM tienen que ser manualmente establecidos y todos los mapeos entre los siguientes saltos IP y los puntos finales ATM tenían que ser manualmente configurados en cada enrutador ATM presente en la red. Otra solución fue el de implementar emulación LAN (LANE).

Ethernet se convirtió en una tecnología popular de capa 2 al borde de la red, pero nunca alcanzó la escalabilidad y confiabilidad requeridas para grandes redes de proveedores de servicios. Esto significa que varios segmentos Ethernet fueron unidos como si la red WAN ATM en el medio fuera un conmutador Ethernet. Finalmente, multiprotocolos sobre ATM (MPOA), el cual es una especificación del ATM Fórum provee la integración más cercana de IP sobre ATM pero también la más compleja. Todos estos métodos fueron engorrosos al implementarlos y darles soporte.

La búsqueda de una mejor solución para integrar IP sobre ATM fue la razón que condujo a la invención de MPLS. Los prerrequisitos para MPLS en conmutadores ATM consistían en que los conmutadores ATM debían ser más inteligentes. Los conmutadores ATM tenían que correr un protocolo de ruteo IP e implementar uno de distribución de etiquetas.

5.1.4. Núcleo sin protocolo BGP

Cuando la red IP de un proveedor de servicios debe portar tráfico, cada enrutador debe verificar la dirección IP destino del paquete. Si los paquetes son enviados a destinos que son externos a la red del proveedor de servicios, esos prefijos IP externos deben estar presentes en la tabla de ruteo de cada enrutador. El protocolo BGP porta prefijos externos tales como prefijos de usuarios o de internet. Esto significa que todos los enrutadores en la red del proveedor de servicios deben correr BGP.

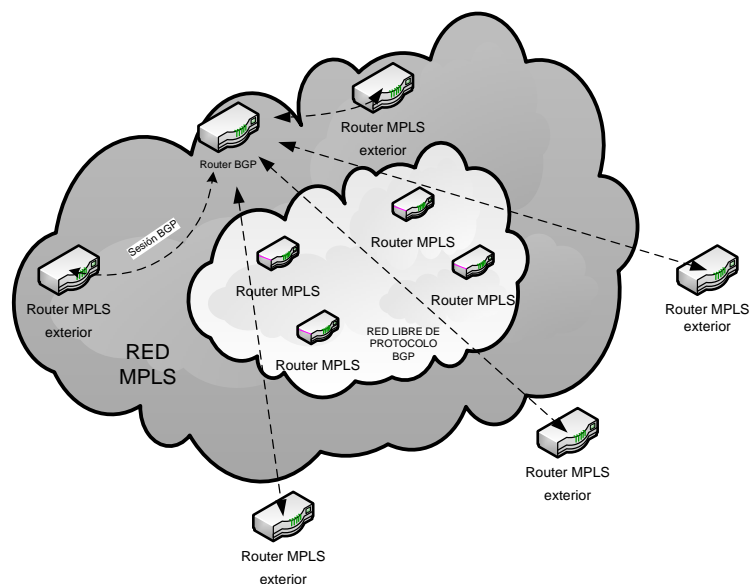
MPLS, sin embargo, habilita la transmisión de paquetes basado en una etiqueta, más que en determinar las direcciones IP. MPLS habilita una etiqueta asociada con un egreso del enrutador más que una dirección IP destino del paquete. La etiqueta es la información adosada al paquete que dice a cada enrutador intermedio a cuál enrutador de egreso al borde de la red debe ser enviada dicha trama. Los enrutadores centrales no necesitan poseer la información para transmitir los paquetes basados en la dirección IP destino.

Por esto, los enrutadores centrales en la red del proveedor de servicios no necesitan correr BGP. El enrutador al borde de la red MPLS todavía necesita revisar la dirección IP destino del paquete y por lo tanto aún necesita correr BGP.

Cada prefijo BGP al ingreso de los enrutadores MPLS tiene un salto IP asociado al BGP. El siguiente salto IP es una dirección IP de egreso de un enrutador MPLS.

La etiqueta que es asociada con un paquete IP, es la que está asociada con este siguiente salto BGP de direcciones IP, porque cada enrutador central transmite un paquete basado en la etiqueta MPLS que es asociada con el siguiente salto BGP de dirección IP. Cada salto BGP de dirección IP de un egreso del enrutador MPLS debe ser conocido por todos los enrutadores centrales. Cualquier protocolo de ruteo, tal como OSPF o ISIS, puede cumplir esta tarea. La figura 76 muestra una red MPLS con protocolo BGP en los enrutadores exteriores únicamente.

Figura 76. **Red MPLS sin protocolo BGP.**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 9.

Un proveedor de servicios de internet (ISP) que tiene 200 enrutadores en su red central necesita correr BGP en todos los enrutadores. Si MPLS es implementado en una red, solamente los enrutadores al borde de dicha red, los cuales pueden ser 50 o más enrutadores, necesitan correr BGP.

Todos los enrutadores en el núcleo de la red se encuentran transmitiendo paquetes etiquetados sin realizar una revisión IP; así que estos se encuentran ahora aliviados de la carga de correr BGP.

Debido a que la tabla de ruteo de internet puede tener más de 150,000 rutas, no tener BGP en todos los enrutadores es una situación crítica. Los enrutadores sin la tabla de ruteo de internet necesitan mucha memoria.

5.1.5. Modelo VPN *Peer-to-peer* contra el modelo VPN de capas

Una red VPN (*Virtual private network*) es una red que emula una privada sobre una infraestructura común. La red privada requiere que todos los sitios de los clientes sean capaces de interconectarse y estar completamente separados de otras VPN.

La VPN usualmente pertenece a una empresa y tiene varios sitios interconectados a través de un servidor del proveedor de servicios. Los proveedores de servicios pueden implementar dos modelos de VPN para proveer servicios VPN a sus clientes:

- Modelo de VPN en capas
- Modelo de VPN *peer-to-peer*

5.1.5.1. Modelo de VPN en capas

En el modelo en capas, el proveedor de servicios suministra un servicio de enlaces punto a punto o circuitos virtuales a través de su red entre los enrutadores de los clientes. Los enrutadores de los clientes forman un grupo de ruteo, entre ellos, directamente a través de los enlaces o en los circuitos virtuales del proveedor de servicios.

Los enrutadores o conmutadores del proveedor de servicios transportan los datos de los clientes a través del proveedor de servicio de la red, pero no existe ruteo entre un cliente y el enrutador del proveedor de servicios. El resultado de esto es que los enrutadores del proveedor de servicio nunca ven los enrutadores de los clientes.

Estos servicios punto a punto pueden ser de capa 1, 2 o 3. Ejemplos de capa 1 son el TDM o multiplexación por división de tiempo, E1, E2, SONET y SDH. Ejemplos de capa 2 son los circuitos virtuales creados por X.25, ATM o *Frame Relay*.

El servicio de capas puede ser provisto también sobre protocolo IP de capa 3. Los túneles más comúnmente utilizados para construir una red en capas sobre IP son los de encapsulación de enrutamiento genérico (GRE). Estos túneles encapsulan el tráfico con un encabezado IP y uno GRE. El encabezado GRE, entre otras cosas, indica qué protocolo es transportado.

El encabezado IP es utilizado para enrutar el paquete a través de la red del proveedor. Una ventaja de los túneles GRE es que estos pueden enrutar otra clase de tráfico además del tráfico IP.

5.1.5.2. Modelo VPN *peer-to-peer*

En un modelo VPN *peer-to-peer*, los enrutadores del proveedor de servicio transportan los datos del cliente a través de la red, pero estos también participan en el enrutamiento del cliente. En otras palabras, los enrutadores del proveedor de servicios se agrupan directamente con los enrutadores del cliente en la capa 3. El resultado es que un protocolo de enrutamiento vecino o adyacente existe entre el cliente y el enrutador del proveedor de servicio.

Antes de que MPLS existiera, el modelo VPN *peer-to-peer* podía ser alcanzado al crear el agrupamiento de enrutamiento IP entre el enrutador del cliente y el del proveedor. El modelo VPN también requiere aislamiento entre diferentes clientes. Se puede alcanzar esto al configurar los filtros de paquetes (listas de acceso) para controlar los datos para y desde los enrutadores de los clientes. Otra forma de alcanzar una forma de aislamiento es la de configurar los filtros de ruta para anunciar o detener las rutas de ser anunciadas a las de los clientes. O, se puede desplegar ambos métodos al mismo tiempo.

Antes de que MPLS se formara, el modelo VPN en capas fue utilizado con más frecuencia que el modelo VPN *peer-to-peer*. El modelo VPN *peer-to-peer* demandaba mucha previsión debido a que al agregar el sitio de un cliente se realizaban muchos cambios en la configuración en varios sitios. La VPN MPLS es una aplicación de MPLS que hace posible que el modelo VPN *peer-to-peer* se haga mucho más fácil de implementar. Añadir o remover el sitio de un cliente es ahora una labor más fácil de configurar y por tanto demanda mucho menos tiempo y esfuerzo. Con VPN MPLS, el enrutador de un cliente, llamado "*customer edge router (CE)*", se agrupa en la capa IP con, por lo menos, un enrutador del proveedor de servicio llamado "*provider edge router (PE)*".

La privacidad en la redes VPN MPLS se alcanza al utilizar el concepto de enrutamiento virtual / transmisión (VRF), y por el hecho de que los datos son transmitidos en el *backbone* como paquetes etiquetados. El VRF asegura que la información de enrutamiento de clientes diferentes se mantenga separada. MPLS en el *backbone* asegura que los paquetes sean transmitidos basados en la información de la etiqueta y no en la información del encabezado IP. La figura 77 muestra el concepto de VRF y transmisión de paquetes etiquetados en el *backbone* de una red que corre MPLS VPN.

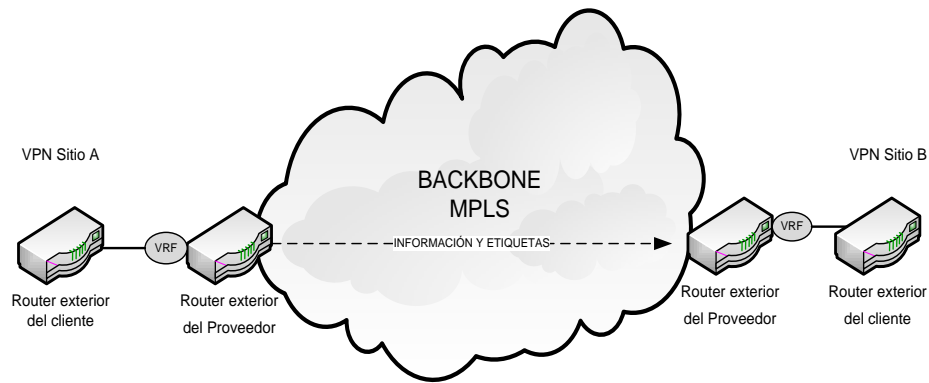
Implementar un sitio a la red de un cliente, significa que en un enrutador PE, solamente se debe agregar el agrupamiento con el enrutador CE. Ya no deben crearse muchos circuitos virtuales como en el modelo en capas o configurar filtros para los paquetes o filtros de rutas con el modelo VPN *peer-to-peer* sobre una red IP. Este es el beneficio de VPN MPLS para el proveedor.

La figura 78 muestra el concepto del modelo VPN *peer-to-peer* aplicado al VPN MPLS. La mayoría de los clientes de los proveedores de servicio tienen una red “*hub and spoke*”, mientras otros tienen una red completa tipo malla alrededor del *backbone* del proveedor. El beneficio de VPN MPLS para el cliente es máximo cuando este tiene una red completamente implementada tipo malla.

Otro beneficio para el proveedor es que solamente necesita proveer el enlace entre los enrutadores PE y CE. Con el modelo en capas, el proveedor necesita proveer el enlace o circuitos virtuales entre sitios.

Es mucho más fácil predecir el tráfico y por tanto los requerimientos de ancho de banda de un sitio que predecir el modelo completo del tráfico entre todos los sitios del cliente.

Figura 77. Red privada virtual MPLS con VRF



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 14.

Figura 78. Modelo de red virtual privada MPLS "Peer to Peer"



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 15.

Se debe listar las desventajas del modelo VPN *peer-to-peer* comparado al modelo VPN en capas:

- El cliente debe compartir la responsabilidad del enrutamiento con el proveedor de servicios.

- Los dispositivos al borde de la red del proveedor de servicio tienen una carga extra.

La primera desventaja es que el cliente debe tener un enrutamiento en conjunto con el proveedor de servicios. El cliente no controla los extremos de su red en la capa 3 en cuanto al enrutamiento IP, como en el modelo de capas.

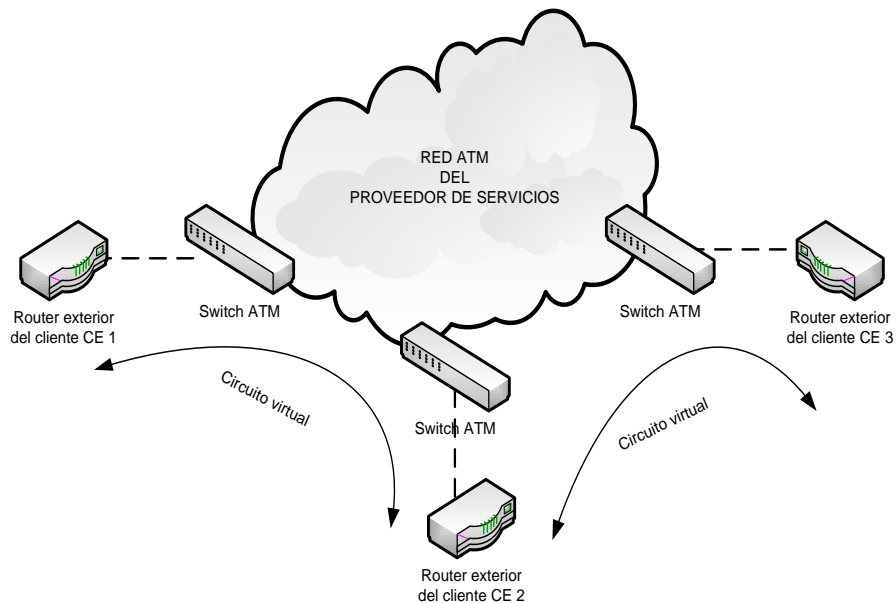
La segunda desventaja es para el proveedor. La carga para este es la responsabilidad de la operación del dispositivo al borde de la red, el enrutador PE. El proveedor es responsable por la escalabilidad y convergencia del enrutamiento de las redes de los clientes, debido a que los enrutadores PE deben ser capaces de transportar todas las rutas de muchos clientes mientras proveen convergencia en el enrutamiento.

5.1.6. Flujo óptimo de tráfico

Debido a que los conmutadores ATM y *Frame Relay* son dispositivos capa 2, los enrutadores se interconectan a través de ellos por medio de canales virtuales creados entre ellos. Para cualquier enrutador que envíe tráfico directamente hacia otro enrutador en el borde de la red, un circuito virtual debe ser creado directamente entre ellos.

La creación de estos circuitos es una labor tediosa. Si los requerimientos son de cualquier conexión hacia cualquier conexión entre sitios, se hace necesario tener una malla completa o circuitos virtuales entre sitios, lo cual es engorroso y costoso. Si los sitios están únicamente interconectados como en la figura 79, el tráfico de CE1 a CE2 debe ir primero a través de CE2.

Figura 79. **Red ATM parcialmente en malla**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 17.

5.1.7. Ingeniería de tráfico

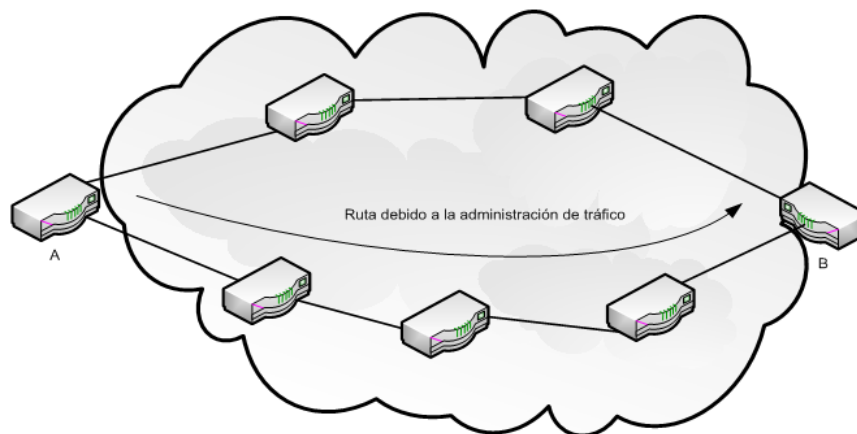
La idea básica detrás de la ingeniería de tráfico es la de utilizar de forma óptima la infraestructura de red, incluyendo enlaces que se encuentren subutilizados, ya que estos no son rutas preferidas.

Esto significa que la ingeniería de tráfico debe proveer la posibilidad de manejar el tráfico a través de la red en caminos diferentes a la ruta preferida, la cual es el camino de menor costo provista por el enrutamiento IP. El camino de menor costo es la ruta más corta computada por el protocolo dinámico de enrutamiento.

Con la ingeniería de tráfico implementada en MPLS, se puede controlar el tráfico que es destinado para un prefijo en particular o con un flujo de calidad de servicio del punto A al punto B, a lo largo de un camino que es diferente de la ruta de menor costo. El resultado es que el tráfico puede ser dispersado por enlaces disponibles en la red y hacer más uso de enlaces subutilizados en la red. La figura 80 muestra este ejemplo.

El operador de la red, con la opción de ingeniería de tráfico de MPLS habilitada, puede dirigir el tráfico del punto A al punto B sobre la ruta del fondo, la cual no es más corta entre A y B (4 saltos contra tres saltos en la ruta de arriba).

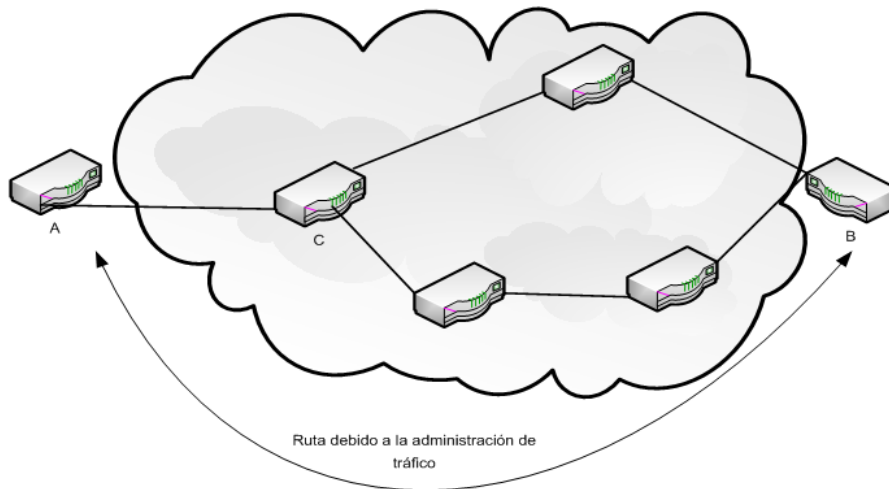
Figura 80. **Ingeniería de tráfico por enlaces disponibles**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 18.

También puede enviar el tráfico a través de enlaces que de otra forma no serían utilizados con regularidad. Se puede guiar el tráfico en esta red en la ruta del fondo, al cambiar las métricas del protocolo de enrutamiento. Examinar la figura 81.

Figura 81. **Ingeniería de tráfico cambiando métricas de enrutamiento**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 18.

Si esta red es solamente una red IP, no se puede hacer que el enrutador C envíe el tráfico a través de la ruta del fondo al configurar dicho enrutador. La decisión de enviar el tráfico por la ruta superior o inferior es exclusiva del enrutador. Si se habilita la ingeniería de tráfico MPLS en esta red, se puede hacer que el enrutador A envíe el tráfico hacia el enrutador B, a través de la ruta inferior. La ingeniería de tráfico de MPLS fuerza al enrutador C a enviar el tráfico A-B en la ruta inferior. Esto puede ser realizado en MPLS debido al mecanismo de transmisión de etiquetas.

El enrutador principal de una ruta bajo el control de ingeniería de tráfico, en este caso el enrutador A, es el que especifica la trayectoria completa que el tráfico tomará a través de la red MPLS. Debido a que es el enrutador principal el que especifica la ruta, la ingeniería de tráfico también es llamada "enrutamiento basado en la fuente".

La etiqueta que es adosada al paquete por el enrutador principal, hace que el paquete fluya a lo largo de la trayectoria como especificó el enrutador principal. Ningún enrutador intermedio transmite el paquete a otra ruta diferente. Una ventaja extra que provee la ingeniería de tráfico MPLS es la posibilidad del reenrutamiento rápido (FRR). El FRR permite reenrutar el tráfico etiquetado alrededor de un enlace o enrutador que se encuentre fuera de servicio. El reenrutamiento del tráfico sucede en menos de 50 ms, lo cual es bastante más rápido que los estándares actuales.

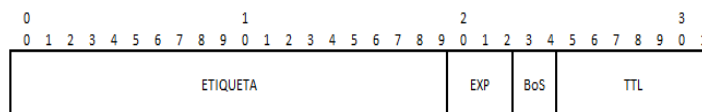
5.2. Arquitectura MPLS

La conmutación de etiquetas indica que los paquetes conmutados ya no son paquetes IPv4, paquetes IPv6, ni tramas de nivel 2, sino etiquetas. El elemento más importante en MPLS es la etiqueta.

5.2.1. Etiquetas MPLS

Una etiqueta MPLS es un campo de 32 *bits* con cierta estructura. La figura 82 muestra la sintaxis de una etiqueta MPLS.

Figura 82. **Sintaxis de una etiqueta MPLS**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 25.

Los primeros 20 *bits* son el valor de la etiqueta. Este valor puede estar en 0 y $2^{20} - 1$, o 1 048,575.

Sin embargo, los primeros 16 valores están exentos del uso normal, esto es, tienen un significado especial. Los *bits* 20 al 22 son tres *bits* experimentales (EXP).

Estos *bits* son utilizados únicamente para la calidad del servicio (QoS). El *bit* 23 es el *bit* de fondo de pila (BoS), es 0 a menos que sea la etiqueta del fondo en la pila. Si esto es así, el *bit* BoS es puesto a 1. La pila es la colección de etiquetas que son encontradas encima del paquete. La pila puede consistir de solo una etiqueta, o tener más. El número de etiquetas (eso es, un campo de 32 *bit*) que se puede encontrar en una pila es ilimitado, a pesar de que se encontrará a veces una pila que consiste de cuatro o más etiquetas.

Del *bit* 24 al 31 son los ocho *bits* utilizados para el *Time To Live* (TTL). Este TTL tiene la misma función que el TTL encontrado en el encabezado IP. Este simplemente decrece en 1 en cada salto (*hop*), y su función principal es la de evitar que un paquete quede atrapado en un ruta cíclica. Si una ruta cíclica ocurre y no existe el TTL, el paquete se queda circulando indefinidamente. Si el TTL de la etiqueta alcanza el 0, el paquete es descartado.

5.2.2. Apilamiento de etiquetas

Los enrutadores con capacidad de manejar MPLS pueden necesitar más de una etiqueta encima del paquete para enrutar dicho paquete a través de la red MPLS. Esto es realizado al empacar las etiquetas en una pila. La primera etiqueta en la pila es llamada "*top label*", y la última etiqueta es llamada "*bottom label*", entre estos dos se puede tener cualquier número de etiquetas. La figura 83 muestra la estructura de la pila de etiquetas.

Debe notarse que la pila de etiquetas en la figura 83 muestra que el *bit* BoS es 0 para todas las etiquetas, excepto para la del fondo “*bottom label*”. Para la etiqueta del fondo, el *bit* BoS es puesto a 1. Algunas aplicaciones MPLS actualmente necesitan más de una etiqueta en la pila de etiquetas para transmitir los paquetes de etiquetas.

Dos ejemplos de esto son MPLS VPN y AToM. Ambos MPLS VPN y AToM colocan dos en la pila de etiquetas.

Figura 83. **Pila de etiquetas**

ETIQUETA	EXP	0	TTL
ETIQUETA	EXP	0	TTL
...			
ETIQUETA	EXP	1	TTL

Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 25.

5.2.3. Codificación de MPLS

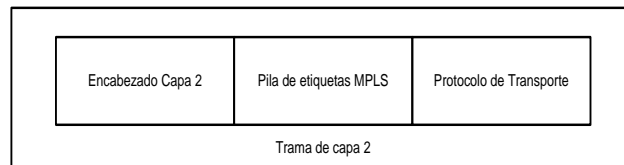
¿Dónde reside esta pila de etiquetas? La pila de etiquetas se encuentra enfrente del paquete de capa 3, esto es, antes del encabezado del protocolo transportado, pero después del encabezado de la capa 2. A menudo, la pila de etiquetas MPLS es llamada “encabezado cuña” por su ubicación. La figura 84 muestra la ubicación de la pila de etiquetas para paquetes etiquetados.

La encapsulación de la capa 2 del enlace puede ser casi cualquier encapsulación: PPP, *High-Level Data Link Control* (HDLC), *Ethernet* y demás.

Asumiendo que el protocolo transportado es IPv4, y la encapsulación de un *link* es PPP, la pila de etiquetas está presente después del encabezado PPP pero antes del encabezado IPv4.

Debido a que la pila de etiquetas en la trama de capa 2 está ubicada antes del encabezado de la capa 3 u otro protocolo transportado, se deben tener nuevos valores para el campo del protocolo de la capa de enlace de datos, indicando que lo que sigue al encabezado de la capa 2 es un paquete etiquetado MPLS. El campo del protocolo de la capa de enlace de datos es un valor que indica qué tipo de “*payload*” o carga de información, en la trama de capa 2 se está transportando. La tabla VIII muestra cuáles son los nombres y valores para el campo Identificador de protocolo en el encabezado de la capa 2, para los diferentes tipos de encapsulación de capa 2.

Figura 84. **Encapsulación**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 27.

ATM está ausente de la tabla VIII, porque utiliza una forma única de encapsulamiento de la etiqueta. Para *Frame Relay*, el NLPID es 0x80, indicando que un encabezado del protocolo IEEE de acceso a subredes (SNAP) es utilizado. El encabezado SNAP es utilizado en *Frame Relay* para indicar al receptor qué protocolo transporta *Frame Relay*. El encabezado SNAP contiene un Identificador organizacional único (OUI) de 0x000000 y un Ether-tipo de 0x8847, indicando que el protocolo transportado es MPLS.

Tabla VIII. **Valores de identificador para el protocolo MPLS para encapsulamiento de capa 2**

Tipo de encapsulación capa 2	Nombre de identificador capa 2	Valor hexadecimal
PPP	Campo de protocolo PPP	0281
Ethernet/802.3 LLC/ Encapsulación SNAP	Valor Ether-tipo	8847
HDLC	Protocolo	8847
<i>Frame Relay</i>	NLPID	80

Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 27.

5.2.4. MPLS y el modelo de referencia OSI

El modelo de referencia OSI contiene de 7 capas. La capa del fondo es la capa 1, o la capa física. La capa superior es la capa 7, o de aplicación. Donde la capa física se refiere a las características mecánicas y eléctricas, la capa 2, la de enlace de datos, está relacionada con darle formato a las tramas. Ejemplos de la capa de enlace de datos son *Ethernet*, PPP, HDLC y *Frame Relay*. El significado de la capa de enlace es solamente en un enlace entre dos máquinas, pero no más allá. Esto significa que el encabezado de la capa de enlace de datos es siempre reemplazado por el equipo en el otro extremo.

La capa 3, la de red, está relacionada con darle formato a los paquetes. Tiene importancia más allá de la capa de enlace. El ejemplo más conocido de un protocolo de capa 3 es el IP. ¿Dónde encaja MPLS? MPLS no es un protocolo de capa 2 porque la encapsulación de capa 2 todavía está presente con los paquetes etiquetados.

MPLS tampoco es un protocolo capa 3, porque esta también se encuentra presente. Por esto, MPLS no encaja en el modelo OSI muy bien. Tal vez la forma más fácil de verlo es ubicar a MPLS como un protocolo de capa 2.5, y conformarse con esto.

La figura 85 muestra el modelo OSI.

Figura 85. **Modelo OSI**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 28.

5.2.5. **Enrutador de conmutación de Etiquetas (LSR)**

Un enrutador de conmutación de etiquetas (LSR) es el que soporta MPLS. Es capaz de entender las etiquetas MPLS y de recibir y transmitir un paquete etiquetado en un enlace de datos. Existen tres clases de LSR en una red MPLS:

- LSR de ingreso: el LSR de ingreso recibe un paquete que aún no se encuentra etiquetado, inserta una etiqueta enfrente del paquete, y lo envía a través de un enlace de datos.

- LSR de egreso: el LSR de egreso recibe los paquetes etiquetados, remueve la etiqueta, y lo envía a través de un paquete de datos. Los LSR son enrutadores en los extremos de la red.
- LSR intermedios: los LSR intermedios reciben un paquete entrante, realizan una operación en él, conmutan el paquete, y envían el paquete en el enlace de datos correcto.
- Un LSR puede realizar tres operaciones: *pop*, *push* o *swap*.

El LSR debe ser capaz de remover una o más etiquetas de la parte superior de la pila de etiquetas antes de conmutar el paquete y enviarlo a la red. Un LSR también debe ser capaz de “empujar” (*push*) una o más etiquetas en un paquete recibido. Si el paquete recibido ya está etiquetado, el LSR empuja una o más etiquetas en la pila de etiquetas y conmuta el paquete.

Si el paquete aún no ha sido etiquetado, el LSR crea una pila de etiquetas y las empuja en el paquete. Finalmente el LSR debe ser capaz de intercambiar una etiqueta. Esto simplemente significa que cuando un paquete etiquetado es recibido, la etiqueta superior de la pila es intercambiada con una nueva etiqueta y el paquete es conmutado para su envío a través de un enlace de datos.

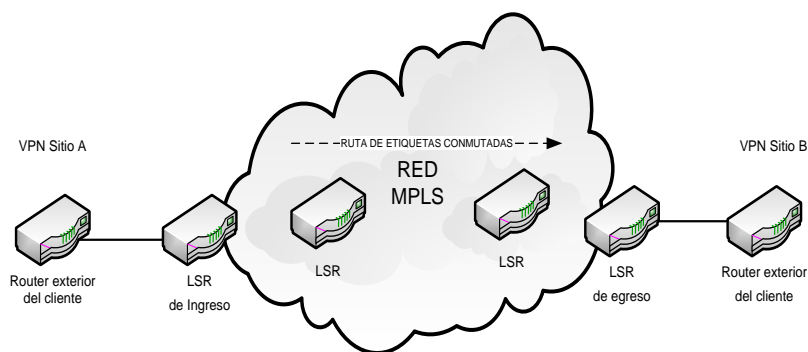
Un LSR que empuja etiquetas en un paquete que no ha sido etiquetado es llamado LSR “impositivo” porque es el primer LSR en imponer etiquetas en un paquete. El que realiza la imposición es el LSR de egreso. Un LSR que remueve todas las etiquetas del paquete etiquetado antes de conmutar el paquete es un LSR “descargador”. El LSR que desecha las etiquetas es el de egreso.

5.2.6. Ruta de etiquetas conmutadas

Un camino de etiquetas conmutadas LSP es una secuencia de LSR que conmuta un paquete etiquetado a través de una red MPLS o parte de de una red MPLS. Básicamente, el LSP es la ruta a través de la red MPLS o una parte de esta que el paquete toma. El primer LSR de un LSP es el LSR de ingreso para ese LSP, donde el último LSR del LSP es el LSR de egreso. Todos los LSR en medio de los LSR de ingreso y egreso son los LSR intermedios. En la figura 86, la flecha superior indica la dirección, porque un LSP es unidireccional. El flujo de paquetes etiquetados en otra dirección (derecha a izquierda) entre los mismos LSR extremos sería otro LSP. El LSR de ingreso de un LSP no es necesariamente el primer enrutador en etiquetar el paquete.

El paquete puede que ya haya sido etiquetado por un LSR anterior. En tal caso debería existir un LSP anidado, que es, un LSP dentro de otro LSP.

Figura 86. **Rutas de etiquetas conmutadas**

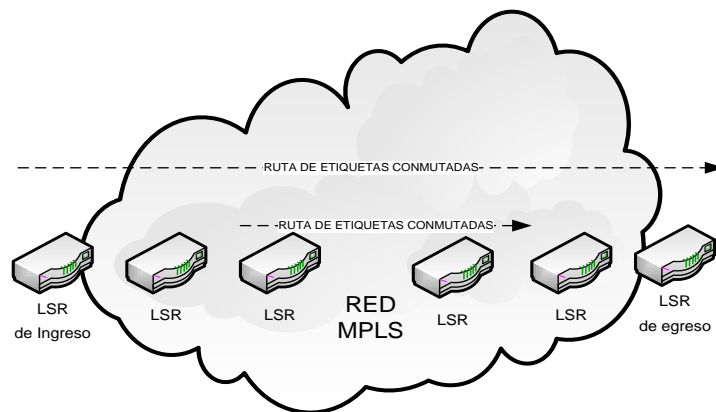


Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 30.

En la figura 87, se puede observar un LSP abarcando el ancho completo de la red MPLS.

Otro LSP comienza en el tercer LSR y finaliza en el siguiente LSR. Por tanto, cuando el paquete entra al segundo LSP en su LSR de ingreso (este es el tercer LSR), ya se encuentra etiquetado. Este LSR de ingreso del LSP anidado, empuja una segunda etiqueta en el paquete. La pila de etiquetas del paquete en el segundo LSP tiene dos etiquetas ahora. La etiqueta superior pertenece al LSP anidado, y la etiqueta en el fondo de la pila pertenece al LSP que abarca la red MPLS completa.

Figura 87. **LSP anidado**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 30.

5.2.7. Transmitiendo clases equivalentes (FEC)

Una transmisión de clases de equivalencia (FEC), es un grupo o flujo de paquetes que son transmitidos a lo largo de la misma trayectoria y se les da el mismo tratamiento de transmisión. Todos los paquetes pertenecientes al mismo FEC tienen la misma etiqueta.

No todos los paquetes que tienen la misma etiqueta pertenecen al mismo FEC porque sus valores EXP pueden variar.

El tratamiento de transmisión puede ser diferente y estos paquetes pueden pertenecer a diferentes FEC. El enrutador que decide cuál paquete pertenece a cuál FEC, es el LSR de egreso. Esto es lógico debido a que el LSR de ingreso clasifica y etiqueta los paquetes.

A continuación algunos ejemplos de FEC:

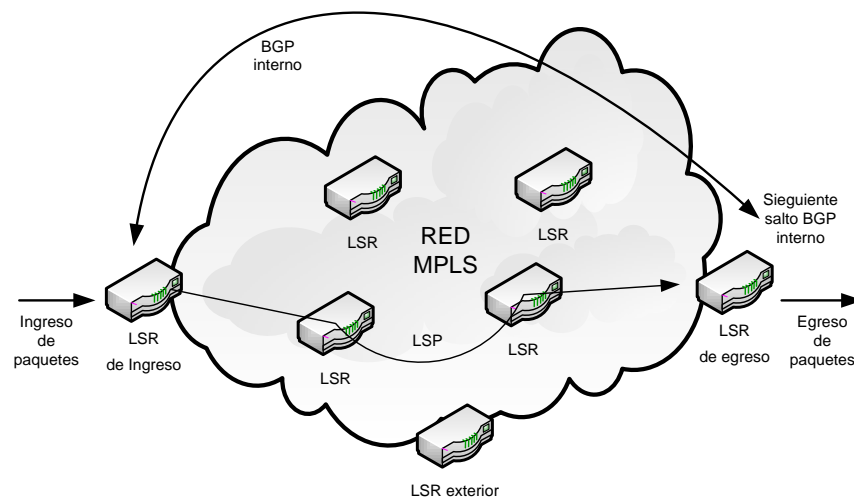
- Paquetes de capa 3 con direcciones IP de destino que concuerden con cierto prefijo.
- Paquetes multicast pertenecientes a cierto grupo.
- Paquetes con el mismo tratamiento de transmisión, basados en la precedencia o campo *IP DiffServ Code Point* (DSCP).
- Tramas de capa 2 transportados a través de una red MPLS recibida en un VC o subinterfaz en el LSR de egreso.
- Paquetes con dirección de destino IP de capa 3 que pertenecen a un conjunto de prefijos de protocolo de puerta de frontera (BGP), todos con el mismo siguiente salto BGP.

Esto último de un FEC es particularmente interesante. Todos los paquetes en el LSR de ingreso para el cual la dirección destino IP apunta a un conjunto de rutas BGP en la tabla de enrutamiento (todos con la misma dirección de salto BGP siguiente) pertenecen a un FEC. Esto significa que todos los paquetes que entran en la red MPLS obtienen una etiqueta dependiendo en qué siguiente salto BGP se encuentre.

En la figura 88 se muestra una red MPLS en la cual todos los LSR de los extremos corren internamente BGP (iBGP). La dirección de destino IP de todos los paquetes IP entrando al LSR de ingreso serán revisados en la tabla de transmisión IP. Todas estas direcciones pertenecen a un conjunto de prefijos que son conocidos en la tabla de enrutamiento como prefijos BGP. Muchos prefijos BGP en la tabla de enrutamiento tienen la misma dirección de siguiente salto BGP, es decir LSR único de egreso.

Todos los paquetes con una dirección destino IP para la cual la revisión del IP en la tabla de enrutamiento recurre a la misma dirección del siguiente salto BGP, será mapeado al mismo FEC. Como ya se mencionó, todos los paquetes que pertenecen al mismo FEC obtienen la misma etiqueta impuesta por el LSR de ingreso.

Figura 88. **Red MPLS con enrutadores exteriores LSR corriendo BGP interno**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 31.

5.2.8. Distribución de etiquetas

La primera etiqueta impuesta en el LSR de ingreso pertenece a un LSP. La ruta del paquete a través de la red MPLS está unida al LSP.

Todos esos cambios se deben a que la etiqueta superior en la pila de etiquetas es intercambiada a cada salto. EL LSR de ingreso impone una o más etiquetas en el paquete. Los LSR intermedios intercambian la etiqueta superior (la etiqueta que entra) del paquete recibido con otra etiqueta (la etiqueta de salida) y transmite el paquete en un enlace de salida. El LSR de egreso del LSP retira las etiquetas de este LSP y transmite el paquete.

Si se considera el ejemplo de IPv4 plano sobre MPLS, el cual es el ejemplo más simple de una red MPLS. Ipv4 sobre MPLS es una red que consiste de LSR que corren un protocolo de puerta interior IGP (por ejemplo, *Open Shortest Path First* OSPF), un sistema intermediario a sistema intermediario (IS-IS) y el protocolo de enrutamiento de puerta interior mejorado (EIGRP).

El LSR de ingreso revisa la dirección destino IPv4 del paquete, impone una etiqueta, y transmite el paquete. El siguiente LSR (y otro LSR intermediario cualquiera) recibe el paquete etiquetado, intercambia la etiqueta entrante con una de salida y transmite el paquete. El LSR de egreso remueve la etiqueta y transmite el paquete IPv4 sin etiquetas en el enlace de salida. Para que esto funcione, los LSR adyacentes deben acordar cuál etiqueta utilizar para cada prefijo IGP.

Por tanto, cada LSR intermediario debe ser capaz de interpretar con cuál etiqueta de salida, la etiqueta de entrada debe ser intercambiada.

Esto significa que se necesita un mecanismo para decirle a los enrutadores cuáles etiquetas utilizar cuando se transmitan paquetes. Las etiquetas son locales para cada par de enrutadores adyacentes. Las etiquetas no poseen significado global a través de la red.

Para que los enrutadores adyacentes acuerden cuál etiqueta utilizar para cada prefijo, estos necesitan algún tipo de comunicación entre ellos; de otra manera, los enrutadores no tienen forma de saber qué etiqueta de salida necesitan concordar otra semejante. Un protocolo de distribución de etiquetas es necesario.

Se puede distribuir etiquetas de dos maneras:

- Transportar las etiquetas en un protocolo de enrutamiento IP existente
- Tener un protocolo de distribución de etiquetas por separado

5.2.8.1. Transportar las etiquetas en un protocolo de ruteo IP

El primer método tiene la ventaja de que un nuevo protocolo no es necesario para correr en los LSR, pero cada protocolo de enrutamiento IP necesita ser extendido para transportar las etiquetas. Esto no es siempre una tarea fácil.

La gran ventaja de tener un protocolo de enrutamiento que transporta las etiquetas es que el enrutamiento y la distribución de etiquetas están en sincronía, lo que significa que no se puede obtener una etiqueta si el prefijo no existe o viceversa. También elimina la necesidad de otro protocolo corriendo en el LSR para realizar la distribución de etiquetas.

La implementación para los protocolos de enrutamiento por vector de distancia (tal como el EIGRP) es directa, debido a que cada enrutador origina un prefijo de su tabla de enrutamiento. El enrutador entonces, solo tiene que unir la etiqueta a ese prefijo.

Los protocolos de enrutamiento de estado (tales como IS-IS y OSPF) no funcionan en esa manera. Cada enrutador origina enlaces de estado actualizados que son transmitidos sin cambio por todos los enrutadores dentro de un área. El problema es que para que funcione MPLS, cada enrutador necesita distribuir una etiqueta para cada prefijo IGP aun cuando los enrutadores no sean los originadores de ese prefijo.

Los protocolos de enrutamiento de estado de enlace necesitan ser mejorados en gran parte para ser capaces de realizar esto. Ninguno de los IGP ha sido cambiado para mostrar este primer método. De cualquier forma, BGP es un protocolo de enrutamiento que puede transportar prefijo y distribuir etiquetas al mismo tiempo. Además, BGP no es un IGP, es utilizado para transportar prefijos externos. BGP es utilizado primariamente para distribución de etiquetas en redes MPLS VPN.

5.2.8.2. Protocolo de distribución de etiquetas por separado

El segundo método (correr un protocolo de distribución de etiquetas por separado) tiene la ventaja de ser un protocolo independiente del enrutamiento. Cualquiera que sea el protocolo de enrutamiento IP, ya sea si es capaz de distribuir etiquetas o no, un protocolo separado distribuye las etiquetas y permite que el protocolo de enrutamiento distribuya los prefijos. La desventaja de este método es que un nuevo protocolo es necesario en los LSR.

La elección de todos los vendedores de enrutadores fue la de tener un nuevo protocolo de distribución de etiquetas para prefijos IGP. Este es el protocolo de distribución de etiquetas (LDP). LDP no es el único protocolo que puede distribuir etiquetas MPLS.

Existen varias clases de protocolos de distribución de etiquetas, tales como:

- Protocolo de distribución de etiquetas (*Tag Distribution Protocol*)
- Protocolo de distribución de etiquetas (*Label Distribution Protocol*)
- Protocolo de reserva de recursos (*Resource Reservation Protocol*)

TDP, el cual precede a LDP, fue el primer protocolo para la distribución de etiquetas desarrollado e implementado. TDP es un protocolo propietario. La IETF lo formalizó después como LDP. LDP y TDP son similares en la forma en que operan, pero LDP tiene más funcionalidad que TDP.

Con la amplia disponibilidad de LDP en general, TDP fue rápidamente reemplazada por LDP. El resultado es que TDP se está volviendo obsoleto. La distribución de etiquetas por RSVP es utilizada para MPLS solamente.

5.2.9. Distribución de etiquetas con LDP

Para cada prefijo IGP IP en la tabla IP de enrutamiento, el LSR crea una unión local o vínculo, esto es, une la etiqueta al prefijo de IPv4. El LSR entonces distribuye este vínculo a todos sus LDP vecinos. Estas conexiones recibidas se convierten en vínculos remotos. Los vecinos entonces almacenan estos vínculos remotos y locales en una tabla especial; esta es la base de información de etiquetas (LIB).

Cada LSR tiene únicamente un vínculo local por prefijo, por lo menos cuando el espacio de la etiquetas es por plataforma. Si el espacio de la etiqueta es por interfaz, una etiqueta local vinculada puede existir por prefijo y por interfaz, pero el LSR obtiene más de un vínculo remoto debido a que usualmente tiene más de un LSR adyacente.

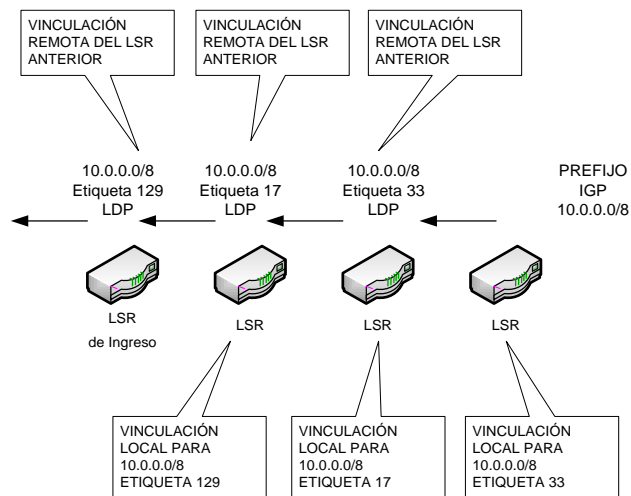
Fuera de todos los vínculos remotos para un prefijo, el LSR necesita tomar solamente un prefijo y utilizarlo para determinar la etiqueta de salida para ese prefijo IP. La tabla de enrutamiento (algunas veces llamada instancia base de enrutamiento o RIB) determina cuál es el prefijo IPv4 para el siguiente salto.

El LSR escoge qué vínculo remoto será recibido del LSR posterior, el cual es el siguiente salto en la tabla de ruteo para este prefijo. Este utiliza esta información para ajustar la base de información de transmisión de etiquetas (LFIB) donde la etiqueta del vínculo local sirve como una etiqueta de entrada y la etiqueta del vínculo remoto elegido por medio de la tabla de enrutamiento sirve como etiqueta de salida.

Por tanto, cuando un LSR recibe un paquete etiquetado, es capaz de intercambiar la etiqueta entrante asignada con la etiqueta de salida asignada por el LSR adyacente para su siguiente salto. La figura 89 muestra la publicación por parte del LDP de los vínculos entre los LSR para el prefijo IPv4 10.0.0.0/8. Cada LSR asigna una etiqueta por prefijo IPv4. El vínculo local es este prefijo y su etiqueta asociada. La figura 90 muestra el paquete IPv4 destinado para 10.0.0.0/8 entrando a la red MPLS en el LSR de ingreso, donde se le impone la etiqueta 129 y es conmutado hacia el siguiente LSR. El segundo LSR intercambia la etiqueta entrante 129 con la etiqueta saliente 17 y transmite el paquete hacia el tercer LSR.

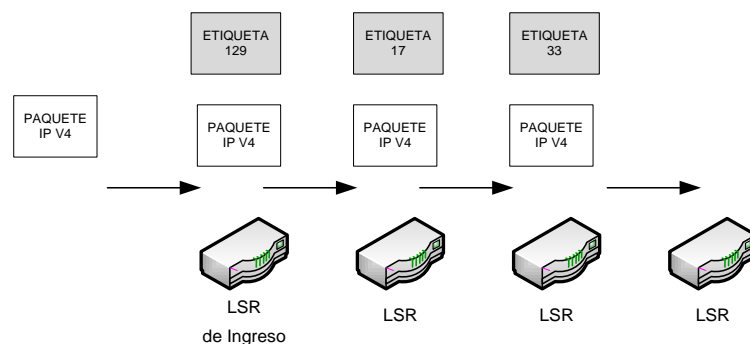
El tercer LSR intercambia la etiqueta entrante 17 con la etiqueta saliente 33 y transmite el paquete al siguiente LSR; este proceso continúa hasta que el paquete sale de la red MPLS.

Figura 89. **IP V4 sobre MPLS corriendo LDP**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 35.

Figura 90. **IP V4 en una red MPLS corriendo LDP. Conmutación de paquetes**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 35.

5.2.10. Instancia base de transmisión de etiquetas LFIB

El LFIB es la tabla utilizada para transmitir los paquetes etiquetados. Está llena de las etiquetas entrantes y salientes para los LSP. La etiqueta entrante es la del vínculo local en un LSR en particular. La etiqueta saliente es la del vínculo remoto escogida por el LSR de todos los posibles vínculos remotos. Todos estos vínculos remotos se encuentran en el LIB.

El LFIB escoge únicamente uno de las posibles etiquetas salientes de todos los posibles vínculos remotos en el LIB y los instala en el LFIB. La etiqueta remota escogida depende de cuál ruta es la mejor en la tabla de enrutamiento. En el ejemplo de IPv4 sobre MPLS, la etiqueta es vinculada al prefijo IPv4. De cualquier manera, el LFIB puede estar lleno con etiquetas que LDP no asigne. En este caso de ingeniería de tráfico MPLS, las etiquetas son distribuidas por el RSVP. En el caso de MPLS VPN, la etiqueta VPN es distribuida por BGP. En cualquier caso, el LFIB es siempre utilizado para transmitir un paquete etiquetado entrante.

5.2.11. Carga de información de MPLS

La etiqueta MPLS no tiene campo de identificador de protocolo de nivel de red. Este campo se encuentra presente en todas las tramas de capa 2 para indicar qué tipo de protocolo capa 3 se transmite. ¿Cómo reconoce el LSR el tipo de protocolo detrás de la pila de etiquetas?, o en otras palabras, ¿Cómo determina el LSR cuál es el *payload* MPLS?

La mayoría de los LSR no necesitan saberlo, porque estos recibirán un paquete etiquetado, intercambiarán la etiqueta superior, y enviarán el paquete al enlace de salida. Este es el caso para LSR intermedios o enrutadores P.

LSR intermedios no necesitan saber cuál es el *payload* de MPLS porque toda la información necesaria para conmutar el paquete es conocida y revisada únicamente en la etiqueta superior. Si la pila de etiquetas consiste de más de una, las etiquetas debajo de la superior pueden no ser asignadas por el LSR y por tanto los LSR intermedios pueden no tener conocimiento de las mismas. Sumado a esto, el LSR puede no conocer cuál es el *payload* de MPLS transportado.

Debido a que los LSR intermedio revisan únicamente la etiqueta superior para realizar una decisión de transmisión, esto no es un problema. Para la transmisión basada en la etiqueta superior para ser correcto, el LSR intermedio debe tener un vínculo local y remoto para la etiqueta superior.

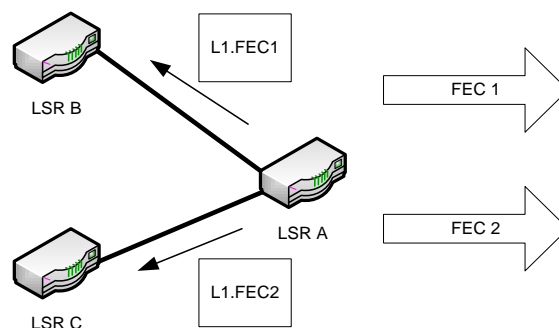
Un LSR de egreso que remueve todas las etiquetas que se encuentran encima del paquete debe saber cuál es la carga o *payload* de MPLS, porque debe transmitir el *payload* más adelante. El LSR de egreso debe saber qué valor utilizar para el campo identificador del protocolo de nivel de red en la trama de salida. Este LSR de egreso es aquel que hizo el vínculo local, lo cual significa que asignó una etiqueta local a ese FEC, y es esa etiqueta la que se utiliza como entrante en el paquete. Por tanto, el LSR de egreso conoce el *payload* de MPLS al revisar la etiqueta, debido a que es el LSR de egreso el que creó el vínculo de la etiqueta para ese FEC, y sabe cuál es el FEC.

5.2.12. Espacio de etiquetas MPLS

En la figura 91, LSR A puede publicar la etiqueta L1 para FEC1 a LSR B y etiqueta L1 para FEC2 a LSR C, pero únicamente si LSR A puede distinguir después, de cuál LSR el paquete con la etiqueta L1 fue recibido.

En el caso que LSR B y LSR C estén directamente conectados a LSR A vía enlaces punto a punto, esto puede fácilmente ser alcanzado por la implementación de MPLS en el LSR. El hecho de que la etiqueta L1 sea única por interfaz, presta su nombre a este enfoque de etiqueta: espacio de etiqueta por interfaz. Si el espacio de etiqueta por interfaz es utilizado, el paquete no es transmitido basado únicamente en la etiqueta, sino basado en la interfaz entrante y la etiqueta.

Figura 91. **Espacio de etiqueta por interfaz**

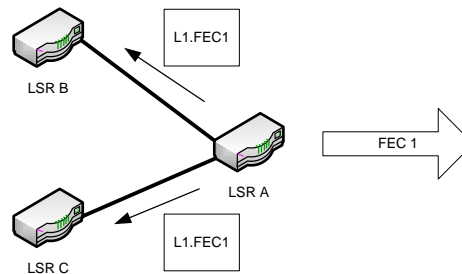


Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 37.

La otra posibilidad es que la etiqueta no sea única por interfaz pero a lo largo del LSR asignando etiquetas. Esto es llamado espacio de etiqueta por plataforma. En ese caso, LSR A distribuye FEC 1 con etiqueta L1 a LSR B y C, como se muestra en la figura 92.

Cuando LSR A distribuye una etiqueta para FEC 2, esta debe ser una etiqueta diferente que la L1. Si el espacio de etiqueta por plataforma es utilizado, el paquete es transmitido, basado únicamente en la etiqueta, independientemente de la interfaz entrante.

Figura 92. **Espacio de etiqueta por plataforma**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 37.

5.2.13. **Diferentes modos MPLS**

Un LSR puede utilizar diferentes modos cuando se distribuyen etiquetas a otros LSR; entre estos están:

- Modo de distribución de etiquetas
- Modo de retención de etiquetas
- Modo de control LSP

5.2.13.1. **Modo de distribución de etiquetas**

La arquitectura MPLS tiene dos maneras de distribuir los vínculos de las etiquetas:

- *Downstream-on-Demand (DoD)*
- *Unsolicited Downstream (UD)*

En el modo DoD, cada LSR solicita su siguiente salto (esto es, *downstream*) LSR en un LSP, un vínculo de etiqueta para ese FEC.

Cada LSR recibe un vínculo por FEC solamente de su LSR *downstream* en ese FEC. El LSR *downstream* es el enrutador del siguiente salto, indicado por la tabla de enrutamiento IP. En el modo UD, cada LSR distribuye un vínculo a sus LSR adyacentes, sin los LSR que solicitan una etiqueta. En el modo UD, un LSR recibe un vínculo de etiqueta remota de cada LSR adyacente.

En el caso de DoD, el LIB muestra solamente un vínculo remoto, mientras que en el caso de UD, se verá más de uno. El modo de distribución de etiquetas utilizado depende de la interfaz y de la implementación.

5.2.13.2. Modo de retención de etiquetas

Existen dos posibles modos de retención de etiquetas:

- Modo liberal de retención de etiquetas (LLR)
- Modo conservativo de retención de etiquetas (CLR)

En el modo LLR, un LSR mantiene todos los vínculos remotos recibidos en el LIB. Uno de estos vínculos es el vínculo remoto recibido del *downstream* o siguiente salto para ese FEC. La etiqueta de ese vínculo remoto es utilizada en el LFIB, pero ninguna de las etiquetas de otros vínculos son colocadas en el LFIB, por tanto, no todas son utilizadas para transmitir paquetes.

¿Por qué mantener etiquetas que no son utilizadas? Porque el enrutamiento es dinámico; en cualquier momento, la topología de enrutamiento puede cambiar, por ejemplo debido a un enlace que esté fuera de servicio o un enrutador que esté defectuoso; por esto, el enrutador del siguiente salto (*next-hop router*) para un FEC en particular puede cambiar.

En ese momento, la etiqueta para el nuevo enrutador ya se encuentra en el LIB y el LFIB puede ser rápidamente actualizado con la nueva etiqueta de salida.

El segundo modo de retención es el CLR. Un SLR que está corriendo este modo no almacena todos los vínculos en el LIB, pero almacena únicamente los vínculos remotos que están asociados con el LSR siguiente para un FEC en particular.

El modo LLR provee una rápida adaptación a los cambios de enrutamiento, mientras que el modo CLR provee pocas etiquetas para almacenar y una mejor utilización de la memoria disponible en el enrutador.

5.2.13.3. Modo de control LSP

Los LSR pueden crear un vínculo local para un FEC de dos maneras:

- Modo de control LSP independiente
- Modo de control LSP ordenado

El LSR puede crear un vínculo local para un FEC independientemente de otros LSR. Esto es llamado Modo de Control LSP Independiente. En este modo de control, cada LSR crea un vínculo local para un FEC en particular, tan pronto como reconoce al FEC. Usualmente esto significa que todos los prefijos para el FEC están en su tabla de enrutamiento.

En el modo de control LSP ordenado, un LSR solamente crea un vínculo local para un FEC si este reconoce su LSR de egreso para el FEC o si el LSR ha recibido un vínculo de etiqueta del siguiente salto para este FEC.

La desventaja del control LSP independiente es que algunos LSR comienzan a conmutar paquetes etiquetados antes de que LSP sea completamente implementado de inicio a fin, por esto, el paquete no es transmitido de la manera correcta. Si el LSP no está completamente ajustado, el paquete puede no recibir el tratamiento de transmisión indicado o ser descartado.

Como un ejemplo para ambos métodos de control, se puede revisar en el LDP como modo de distribución para vínculos de etiquetas de prefijos IGP. Si el LSR está funcionando en el modo de control independiente, este asignaría un vínculo local para cada prefijo IGP en la tabla de enrutamiento. Si el LSR está funcionando en el modo de control ordenado, este LSR podría asignar solamente vínculos de etiquetas locales para los prefijos IGP que son marcados como conectados en su tabla de enrutamiento y también para los prefijos IGP para los cuales ya ha recibido un vínculo de etiqueta del enrutador siguiente.

5.3. Redes privadas virtuales (VPN) con MPLS

Las redes privadas virtuales (VPN), son la implementación más popular y extendida de la tecnología MPLS. Su popularidad ha crecido exponencialmente desde que fue inventada, y aún sigue creciendo.

La mayoría de los proveedores de servicios han implementado esta tecnología como un sustituto para los servicios *Frame Relay* y ATM que fueron populares antes que este. MPLS VPN puede proveer escalabilidad y dividir en redes más pequeñas, lo cual es necesario en las grandes redes empresariales, donde la infraestructura debe ofrecer redes aisladas por departamentos.

5.3.1. Definición de VPN

Una VPN es una red que emula una red privada sobre una infraestructura común. La VPN puede proveer comunicación en la capa 2 y 3. La VPN usualmente pertenece a una compañía y tiene varios sitios interconectados a través de la infraestructura del proveedor de servicios. La red privada requiere que todos los sitios del cliente sean capaces de interconectarse y estén completamente separados de otras VPN, este es el requerimiento mínimo de conectividad.

Los modelos VPN que están en la capa IP requieren más que este mínimo requisito. Estas pueden proveer conectividad entre diferentes VPN cuando es requerido, y proveer conectividad al internet.

Las VPN son posibles debido a que los proveedores de servicio corren MPLS en el *backbone* de la red, las cuales proveen un desacoplamiento del plano de transmisión y del plano de control que IP no puede.

5.3.2. Modelos VPN

Las VPN existieron antes que llegara MPLS. Las más populares fueron *Frame Relay* y ATM, que proveían servicios VPN en la capa 2. El proveedor de servicios tenía un *backbone* en su red de *Frame Relay* o ATM y proveía conectividad de capa 2 a los enrutadores de los clientes. Esto fue comúnmente llamado como modelo *overlay* o modelo de capas.

El proveedor de servicios puede poseer o administrar los enrutadores del borde de la red que eran conectados a la red del cliente. El punto es que los *routers* se ubicaban físicamente en las instalaciones del cliente.

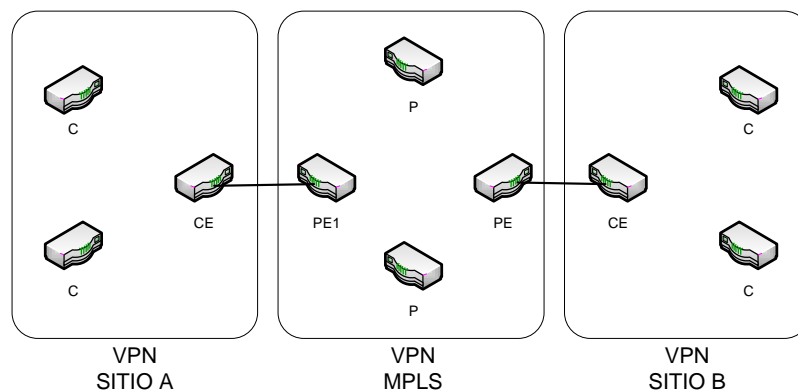
5.3.3. Modelo MPLS VPN

Es importante familiarizarse con la terminología referente a las VPN. En la figura 93 se muestra un modelo VPN. Un proveedor de servicio provee la infraestructura pública común que utilizan los clientes.

Un enrutador PE es un enrutador de borde del proveedor; este tiene una conexión directa con el enrutador de borde del cliente (CE) en la capa 3.

El enrutador de proveedor (P) es un enrutador sin la conexión directa a los enrutadores del cliente. En la implementación MPLS VPN, ambos enrutadores P y PE corren MPLS. Esto significa que estos deben ser capaces de distribuir etiquetas entre ellos y transmitir paquetes etiquetados. Un enrutador CE tiene conexión directa de capa 3 con el enrutador PE. El enrutador del cliente (C) no tiene conexión directa al enrutador PE. El enrutador CE no necesita correr MPLS. Debido a que los enrutadores CE y PE interactúan en la capa 3, estos deben correr un protocolo de enrutamiento (o enrutamiento estático) entre ellos.

Figura 93. Esquema de una red VPN MPLS



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 174.

El enrutador CE posee solamente un cliente fuera de su propio sitio: el enrutador PE. Si el enrutador CE es multicliente, este puede dar servicio a múltiples enrutadores PE. El enrutador CE no se relaciona con cualquiera de los enrutadores CE de los otros sitios a través de la red del proveedor de servicios, como en el modelo de capas.

La P en VPN significa “privado”, por tanto, los clientes del proveedor de servicios están en disposición de tener su propio esquema de direcciones IP. Esto significa que no solo pueden utilizar direcciones IP registradas sino también direcciones IP privadas o incluso, utilizar direcciones IP que son utilizadas por otros clientes que están conectados al mismo proveedor de servicios; esto es conocido como direccionamiento IP traslapado.

Si los paquetes fueran transmitidos como paquetes IP dentro de la red del proveedor de servicio, esto causaría problemas, porque los enrutadores P se confundirían. Si el esquema de dirección IP privada y de IP traslapada no es permitida, entonces cada cliente debe utilizar un rango único de direcciones IP.

En este caso, los paquetes pueden ser transmitidos al observar la dirección IP destino, en cada enrutador en la red del proveedor de servicios. Esto implica que todas los enrutadores P y PE deben poseer la tabla de enrutamiento completa de cada usuario, lo cual llevaría a una tabla muy grande.

El único protocolo de enrutamiento que es capaz de portar un gran número de rutas es el protocolo de compuerta de frontera (BGP). Eso significa que todos los enrutadores P y PE deberían corren un BGP interno (iBGP) entre ellos. Por tanto, este no es un esquema VPN, porque no es privado para los usuarios.

Otra solución es que cada enrutador P y PE posea una tabla privada de enrutamiento para cada usuario. Varios procesos de un protocolo de enrutamiento (un proceso por VPN) pueden correr en todos los enrutadores para distribuir las rutas VPN. Correr un proceso de enrutamiento por VPN en cada enrutador P no es una solución escalable.

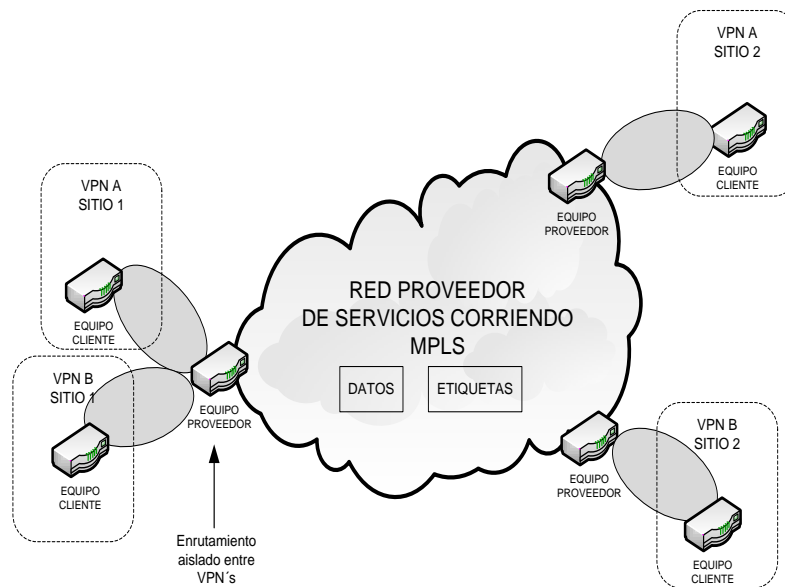
Cada vez que una VPN es agregada a la red, un nuevo proceso de enrutamiento debe ser agregado para cada enrutador P. Yendo más allá, si un paquete IP entra en un enrutador P, ¿cómo determina el enrutador P a cuál VPN pertenece el paquete para determinar cuál tabla de enrutamiento privada utilizar para transmitir el paquete? Si se trata de un paquete IP, esto no es posible. Se puede agregar un campo extra al paquete IP indicando a cuál VPN el paquete IP pertenece.

Los enrutadores P pueden entonces transmitir los paquetes IP al examinar en este campo extra y en la dirección IP destino. Otra vez, todos los enrutadores P deben estar al tanto de este campo extra. Una solución escalable sería la de tener enrutadores P sin conocimiento de las VPN. Entonces los enrutadores P no serían cargados con la información de enrutamiento para las rutas VPN. Esto se puede lograr utilizando MPLS.

Los paquetes IP del cliente son etiquetados en la red del proveedor de servicios para alcanzar una VPN privada para cada cliente. Los enrutadores P no necesitan tener una tabla de enrutamiento de los clientes al utilizar dos etiquetas MPLS. Por tanto, el protocolo BGP no se necesita en los enrutadores P. Las rutas VPN son conocidas únicamente en los enrutadores PE, por tanto, el conocimiento de la red VPN se encuentra presente únicamente en los enrutadores de borde de las redes MPLS VPN, lo que hace de MPLS VPN una solución escalable.

La figura 94 muestra el modelo MPLS VPN de paquetes con etiqueta conmutada en la red del proveedor de servicios y enrutadores PE que se encuentran al tanto de la VPN.

Figura 94. **Modelo de VPN MPLS**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 176.

5.4. **Arquitectura de las VPN**

Para conformar una MPLS VPN, se necesitan varios componentes en los enrutadores PE.

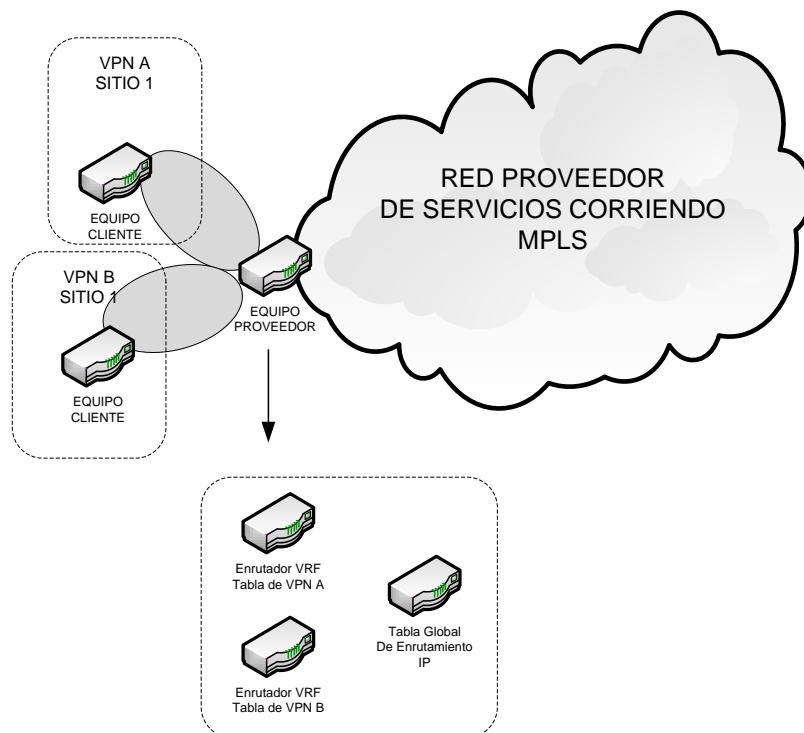
Esto bloques son: *Virtual routing forwarding (VRF)*, *route distinguisher (RD)*, *route targets (RT)*, propagación de rutas a través de MP-BGP y la transmisión de paquetes etiquetados.

5.4.1. Transmisión / enrutamiento virtual

El enrutamiento/transmisión virtual (VRF) es una instancia de enrutamiento y transmisión. Es el nombre para la combinación de la tabla de enrutamiento VPN, la tabla VRF *Express forwarding* (CEF) y los protocolos de enrutamiento IP asociados en el enrutador PE.

Un enrutador PE posee una instancia VRF para cada VPN conectada. Al observar la figura 95 se determina que el enrutador PE mantiene la tabla de enrutamiento IP global, pero también una tabla de enrutamiento VRF por cada VPN conectada al enrutador PE.

Figura 95. VRF sobre enrutadores de frontera del proveedor



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 177.

Ya que el enrutamiento debe ser separado y privado para cada cliente (VPN) en un enrutador PE, cada VPN debe tener su propia tabla de enrutamiento. Esta tabla de enrutamiento privada es llamada tabla de enrutamiento VRF. La interfaz en el enrutador PE hacia el enrutador CE puede pertenecer a solamente un VRF, así como todos los paquetes recibidos en la interfaz VRF son identificados como pertenecientes a ese VRF.

Debido a que existe una tabla separada por VPN, también existe una tabla CEF separada por VPN para transmitir estos paquetes en el enrutador PE. Esta es la tabla CEF VRF. Así como en la tabla de enrutamiento global y en la tabla CEF global, la tabla VRF CEF se deriva de la tabla de enrutamiento VRF.

5.4.2. Reconocedor de rutas RD

Los prefijos VPN se propagan a través de la red MPLS VPN por medio del Multiprotocolo BGP (MP-BGP). El problema es que cuando BGP transporta estos prefijos IPv4 a través de la red del proveedor de servicios, estos deben ser únicos. Si un cliente tiene direccionamiento IP traslapado, el enrutamiento puede estar equivocado; para resolver este problema, el concepto de RD fue concebido para hacer únicos los prefijos IPv4.

La idea básica es que cada prefijo de cada cliente reciba un identificador único (el RD) para distinguir el mismo prefijo de diferentes clientes. Un prefijo derivado de la combinación de los prefijos IPv4 y el RD es llamado prefijo vpv4. El MP-BGP necesita transportar estos prefijos vpv4 entre los enrutadores PE. Un RD es un campo de 64 *bits* utilizado para hacer únicos los prefijos VRF cuando MP-BGP los transporta. El RD no indica a qué prefijo pertenece el VRF.

La función del RD no es el de identificador de la VPN debido a que se pueden presentar escenarios VPN más complejos que requieran más que un RD por VPN. Cada instancia VRF en un enrutador PE debe poseer un RD asignado, este valor de 64 *bits* puede tener dos formatos: ASN:nn o IP-address:nn, donde nn representa un número.

El formato más utilizado es ASN:nn, donde ASN significa número de sistema autónomo, que la IANA (*Internet Assigned Numbers Authority*) asigna al proveedor de servicios y nn es el número que el proveedor de servicios asigna al VRF. El RD es utilizado únicamente para identificar las rutas VPN. Esto es necesario porque las rutas IPv4 de un cliente pueden estar traslapadas con otras rutas IPv4. La combinación del RD con el prefijo IPv4 provee un prefijo vpv4, del cual la dirección es 96 *bits* de longitud. La máscara es de 32 *bits* de largo, al igual que lo es para un prefijo IPv4. Si se toma un prefijo IPv4 10.1.1.0/24 y un RD 1:1, el prefijo vpv4 se convierte en 1:1:10.1.1.0/24.

Un cliente puede utilizar diferentes RD para la misma ruta IPv4. Cuando un sitio VPN está conectado a dos enrutadores PE, las rutas de un sitio VPN puede tener dos diferentes RD, dependiendo en cuál enrutador PE las rutas son obtenidas. Este permitiría al BGP ver las rutas como diferentes y aplica una diferente regla a las mismas.

5.4.3. Rutas destino RT

Si los RD son utilizados únicamente para identificar una VPN, la comunicación entre sitios de diferente VPN sería problemático. El sitio de una compañía A no sería capaz de comunicarse con el sitio de la compañía B ya que los RD no son los mismos. El concepto de tener sitios de la compañía A capaces de comunicarse a sitios de la compañía B se llama *extranet* VPN.

El simple caso de la comunicación entre sitio de la misma compañía (la misma VPN) se llama *intranet*. La comunicación entre sitios es controlada por otra característica de MPLS VPN llamada RT.

Una RT es un BGP extendido que indica qué rutas deben ser importadas de MP-BGP al VRF. Exportar un RT significa que la ruta vpnv4 exportada recibe un BGP extendido adicional (este es el RT) configurado en el enrutador PE, cuando la ruta es redistribuida de la tabla de enrutamiento VRF en el MP-BGP.

Importar un RT implica que la ruta vpnv4 recibida del MP-BGP es revisada para una comunidad extendida (esta es la ruta destino) con la que se encuentran en la configuración. Si el resultado coincide, el prefijo es puesto en la tabla de enrutamiento VRF como una ruta IPv4. Si no ocurre una coincidencia, el prefijo es desechado.

5.4.4. Propagación de rutas VPNv4

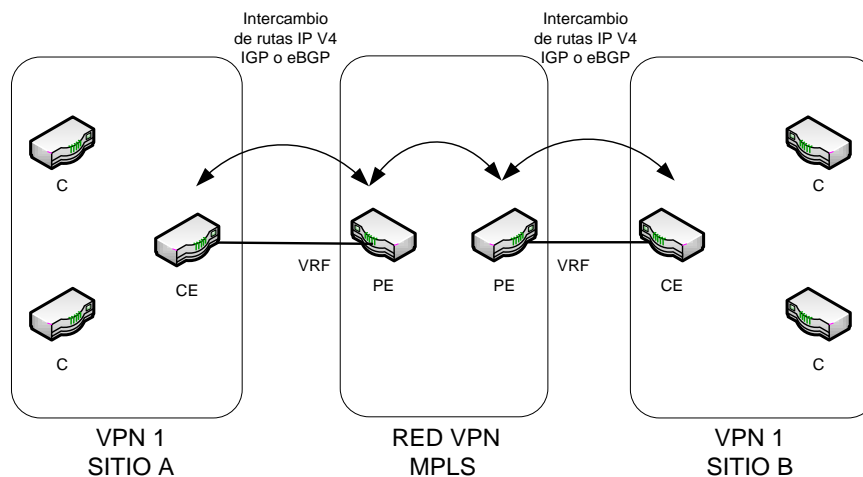
El VRF separa las rutas del cliente en los enrutadores PE, pero ¿cómo se transportan los prefijos a través de la red del proveedor de servicios?

Porque, potencialmente varias rutas (tal vez cientos de miles) pueden ser transportadas; BGP es el candidato ideal ya que es un protocolo de enrutamiento estable para transportar muchas rutas.

BGP es el protocolo de enrutamiento estándar para transportar la tabla completa de enrutamiento de internet. Ya que las rutas VPN del cliente son únicas al añadir el RD a cada ruta IPv4 (convirtiéndolas en rutas vpnv4) todas las rutas de los clientes pueden ser transportadas de forma segura a través de la red MPLS VPN.

En la figura 96 se muestra un esquema de la propagación de las rutas en una red MPLS VPN. El enrutador PE recibe una ruta IPv4 del enrutador CE a través del protocolo de puerta interior (IGP) o de un BGP externo.

Figura 96. **Propagación de rutas en una red VPN MPLS**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 185.

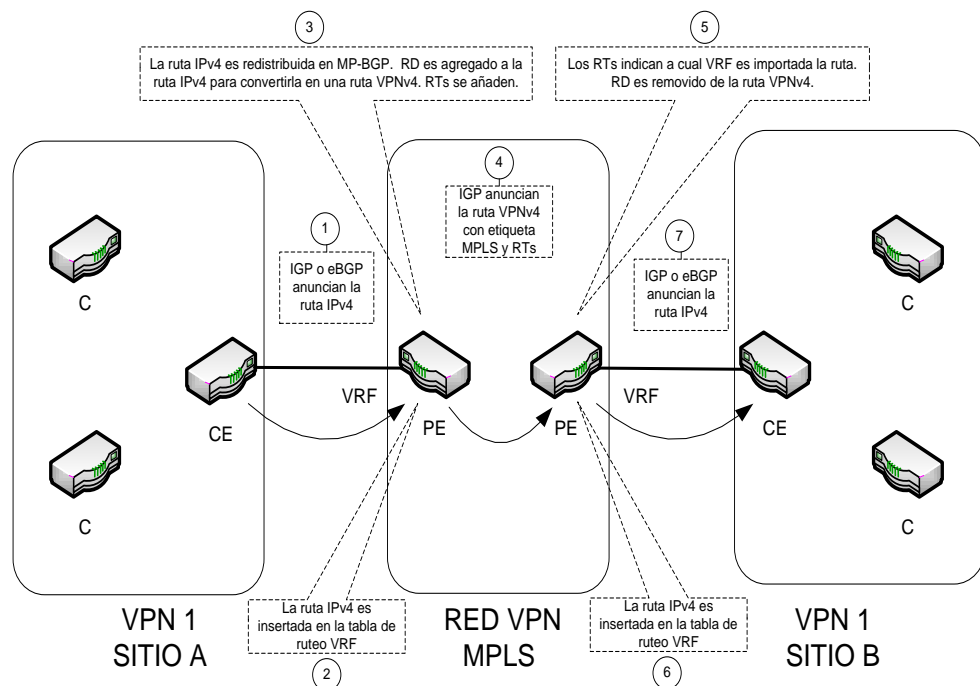
Estas rutas IPv4 del sitio VPN se colocan en la tabla de enrutamiento VRF. Cuál VRF es utilizado, depende del VRF que es configurado en la interfaz, en el enrutador PE hacia el enrutador CE. Dichas rutas son añadidas con el RD que es asignado a ese VRF. Por tanto, estos se convierten en rutas vpnv4 las cuales son colocadas en el MP-BGP. El BGP cuida de distribuir estas rutas vpnv4 a todos los enrutadores PE en una red MPLS VPN.

En los enrutadores PE, las rutas vpnv4 son extraídas de los RD y ubicadas en las tablas de enrutamiento VRF como rutas IPv4. Si la ruta vpnv4 después de ser extraída del RD es puesta en el VRF, depende de si el RT permite importar hacia el VRF.

Estas rutas IPv4 son entonces anunciadas al enrutador CE a través de un IGP o un BGP externo que corre entre el enrutador PE y el CE. La figura 97 muestra los pasos en la propagación de la ruta de un CE a otro CE a través de la red MPLS VPN.

Debido a que el proveedor de servicios que corre una red MPLS VPN corre BGP en un sistema autónomo, iBGP corre entre dos enrutadores PE. La propagación de eBGP (corriendo entre el enrutador PE y el CE) a MP-iBGP en la red MPLS VPN y viceversa, es automática y no necesita configuración alguna. La redistribución de MP-iBGP en el IGP que está corriendo entre el enrutador PE y el CE no es automática. Se requiere configurar una redistribución mutua entre MP-iBGP y el IGP.

Figura 97. **Propagación de rutas CE a CE en una red VPN MPLS**



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 185.

5.4.5. Transmisión de paquetes en una VPN

Como ya se ha mencionado, los paquetes no pueden ser transmitidos como paquetes IP puros entre sitios.

Los enrutadores P no pueden transmitirlos debido a que estos no poseen la información VRG de cada sitio. MPLS puede solventar esta situación al etiquetar los paquetes. Los enrutadores P deben contar únicamente con la información de transmisión correcta en la etiqueta para que se transmita el paquete.

La manera más común es la de configurar el *Label Distribution Protocol* o Protocolo de distribución de etiquetas (LDP) entre todos los enrutadores P y PE, de manera que todo el tráfico IP entre ellos es conmutado por medio de etiquetas.

También se puede utilizar RSVP con extensiones para ingeniería de tráfico (TE) cuando se implemente MPLS TE, pero LDP es el más común para MPLS VPN.

Los paquetes IP son etiquetados y transmitidos con una etiqueta proveniente del enrutador PE de ingreso al enrutador PE de egreso. Un enrutador P nunca tiene que ejecutar una revisión de la dirección IP destino.

Esta es la forma en que los paquetes son conmutados entre el enrutador PE de ingreso y el enrutador PE de egreso. Esta etiqueta es llamada etiqueta IGP, porque es la que está pegada a un prefijo IPv4 en la tabla de enrutamiento global del enrutador P y el PE, y el IGP de la red del proveedor de servicios lo anuncia.

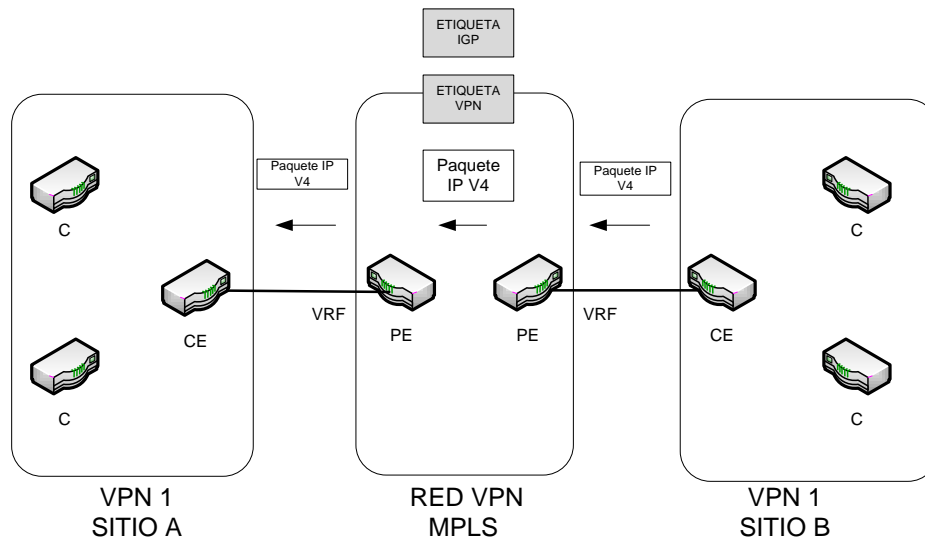
¿Cómo determina el enrutador PE de egreso a qué VRF pertenece un paquete? Esta información no se encuentra en el *header* o encabezado del paquete IP y no puede ser derivado de la etiqueta IGP, porque esta es utilizada únicamente para transmitir el paquete a través de la red del proveedor de servicios. La solución es agregar otra etiqueta en la pila de etiquetas de MPLS. Esta etiqueta indica a qué VRF pertenece un paquete. Por tanto, todos los paquetes del cliente son transmitidos con dos etiquetas: la etiqueta IGP como la etiqueta superior y la etiqueta VPN como la etiqueta del fondo.

La etiqueta VPN debe ser colocada por el enrutador PE de ingreso para indicarle al enrutador PE de egreso a cuál VRF pertenece un paquete. ¿Cómo le indica el enrutador PE de egreso al enrutador PE de ingreso cuál etiqueta utilizar para el prefijo VRF? Por medio del MP-BGP, ya que este es utilizado para anunciar el prefijo vpnv4; también señala la etiqueta VPN (llamada etiqueta BGP) que está asociada con el prefijo vpnv4. Es importante aclarar que, el concepto de tener una etiqueta VPN indicando a que VRF pertenece un paquete no es del todo correcto. Esto puede ser verdadero en ciertos casos, pero en la mayoría del tiempo no lo es.

Una etiqueta VPN usualmente indica el siguiente salto que el paquete debe realizar para ser transmitido por un enrutador PE de egreso. Por tanto, en la mayor parte del tiempo, su propósito es el de indicar el enrutador CE correcto como el siguiente salto del paquete.

La figura 98 muestra la transmisión de paquetes en una red MPLS VPN. El paquete ingresa al enrutador PE en una interfaz VRF como un paquete IPv4. Este es transmitido a través de la red MPLS VPN con dos etiquetas. Los enrutadores P transmiten el paquete al inspeccionar la etiqueta superior. La etiqueta superior es intercambiada en cada enrutador P.

Figura 98. Transmisión de paquetes en una red VPN MPLS



Fuente: DE GHEIN, Luc. MPLS fundamentals. p. 188.

Las etiquetas son extraídas en el enrutador PE de egreso y los paquetes son transmitidos como paquetes IPv4 en la interfaz VRF hacia el enrutador CE. El enrutador CE correcto es encontrado al inspeccionar la etiqueta VPN.

5.5. Protocolo de compuerta de frontera

BGP versión 4 ha sido utilizado desde hace algunos años y es el protocolo estándar para el enrutamiento interdominios. BGP es el protocolo que hace que internet trabaje muy bien.

Los proveedores de servicios que hacen posible el internet corren BGP entre sí. Estos se conectan con otros proveedores de servicios a través de eBGP y corren iBGP en sus propias redes.

BGP es un protocolo de enrutamiento que está desarrollado para transportar cientos de miles de rutas y ha probado su eficiencia en dicha tarea. BGP también es un protocolo de ruteo que permite políticas extensas y flexibles para su implementación.

Es por esto que es tan buen candidato para transportar las rutas de MPLS VPN. La combinación de RD con los prefijos IPv4 resulta en los prefijos vpnv4; es este prefijo el que iBGP necesita transportar entre enrutadores PE.

5.6. El futuro de MPLS

MPLS se ha hecho popular y ha visto muchas implementaciones por parte de proveedores de servicio. La idea original para inventar MPLS fue la búsqueda de una mejor integración del protocolo IP en las redes ATM.

Sin embargo, MPLS o conmutación de etiquetas como se llamaba originalmente, ha tenido un éxito que sorprendió a mucha gente en la industria.

Una gran parte de la sensación es el resultado del gran éxito de MPLS VPN. Los proveedores de servicios rápidamente reconocieron los grandes beneficios de MPLS VPN e implementaron rápidamente este servicio aun cuando las características para este se estaban desarrollando. MPLS VPN es por mucho la aplicación más popular y madura de MPLS.

CONCLUSIONES

1. Los satélites de comunicaciones forman parte integral de las comunicaciones mundiales desde su introducción a mediados del siglo XX.
2. Los satélites han generado una variedad de nuevos servicios que se basarán más y más en el uso efectivo de las capacidades de acceso múltiple, de distribución y flexibilidad de las constelaciones satelitales.
3. Los satélites de órbita baja LEO representan una nueva forma de comunicación inalámbrica para la transmisión de voz, utilizando constelaciones que circundan la Tierra, proveyendo conexión directa a teléfonos móviles similar a la cobertura de una celda terrestre, con la excepción de que la cobertura es la que se desplaza en lugar del suscriptor.
4. Los satélites se sitúan en la capa física del modelo de referencia OSI, por lo que necesitan esquemas de modulación por desplazamiento de fase (PSK) para la transmisión de datos.
5. En el proceso de transmisión y recepción de información utilizando enlaces satelitales se integran técnicas de corrección de errores en adelante, para añadir redundancia y así detectar y corregir errores en términos de procesamiento de señal.

6. ATM es una tecnología diseñada para transferencias a alta velocidad de voz, vídeo y datos a través de redes públicas y privadas, utilizando tecnología de conmutación de celdas.
7. ATM combina los beneficios de la conmutación de circuitos (valor constante del retardo en la transmisión y calidad de servicio garantizada) con aquellos propios de la conmutación de paquetes (flexibilidad y eficiencia en tráfico de naturaleza intermitente o de ráfaga).
8. El servicio orientado a la conexión permite el enrutamiento de celdas a través de la red ATM sobre conexiones virtuales llamadas circuitos virtuales.
9. La longitud reducida de la celda la hace adecuada para transferencias de datos en tiempo real (voz y vídeo) ya que este tráfico tiene una baja tolerancia a los retardos.
10. Los beneficios que ATM provee a las redes actuales son un alto rendimiento de conmutación por hardware, uso eficiente del ancho de banda, un manejo dinámico de tráfico en ráfaga, soporte a clases de servicios multimedia, escalabilidad en tamaño, alta velocidad de red y arquitectura común para redes LAN y WAN.
11. En el proceso de maduración de ATM, surgieron nuevas tecnologías con implementaciones sobre IP tales como MPLS, que puede considerarse como la evolución de los protocolos ATM a futuro.

12. MPLS (*Multi-protocol label switching*) o multiprotocolo de conmutación de etiquetas, es una tecnología de nueva generación que introduce un nuevo paradigma de servicios orientados a conexión, basados en la conmutación de etiquetas de tamaño fijo como medio de ruteo de paquetes.
13. MPLS surgió inicialmente como apoyo a la integración de IP sobre ATM, ya que estas tecnologías poseen grandes diferencias haciendo compleja su integración.
14. MPLS fusionó exitosamente los beneficios de IP y ATM ya que combina las tecnologías de alta velocidad de conmutación de capa 2 del modelo OSI a las tecnologías de ruteo de capa 3.
15. La fase inicial de MPLS se centrará en el aprovechamiento de las redes ATM las cuales se encuentran implementadas a gran escala en las redes de proveedores de servicios.
16. Los beneficios que MPLS brinda a las redes basadas en el protocolo IP son: mejor ingeniería de tráfico, portabilidad de tráfico con diferentes clases de servicio (CoS), diferentes calidades de servicio (QoS) y la creación de redes virtuales privadas (VPNs), que es la aplicación más difundida.
17. La migración de redes ATM hacia redes MPLS será lenta ya que ATM aún es un generador de ingresos para los proveedores de servicios de internet, los cuales están más interesados en incrementar sus ingresos que migrar hacia nuevas tecnologías únicamente por la tecnología como tal.

18. La constante evolución en los protocolos y tecnologías de comunicación son factores apremiantes para cerrar la brecha entre las tendencias de uso de los servicios y la calidad de estos.

RECOMENDACIONES

1. Al implementar un enlace satelital, debe verificarse la naturaleza del tráfico que portará el enlace (voz o datos), ya que la elección del tipo de satélite depende directamente de esta información.
2. Si el enlace está planificado para transmitir datos únicamente, pueden elegirse los satélites geoestacionarios.
3. La transmisión de voz a través de satélites geoestacionarios sufre un retardo de medio segundo debido al tiempo de propagación de la señal en el espacio, en su recorrido hacia y desde el satélite, por lo que rara vez son utilizados para esta clase de tráfico. Para aplicaciones de voz se aconseja utilizar satélites de órbitas bajas (LEO).
4. ATM debe ser implementado para constituir el *backbone* de la red de proveedores de telefonía por su robustez, cumpliendo con los requerimientos de tráfico multimedia de forma confiable y segura.
5. La ingeniería de tráfico permitirá al operador monitorear y administrar el tráfico ATM de la red, optimizando el uso de los recursos y maximizando los ingresos sin afectar la calidad de servicio (QoS) ofrecida a los usuarios.

6. Ante la planeación de la expansión de los *backbones* de los proveedores de servicios, es importante verificar la base instalada de redes ATM o redes MPLS que posea el operador y con base en ello, implementar una nueva instalación ATM para complementar las existentes o planear una migración de las redes ATM a redes MPLS, según sea el caso.

7. Los protocolos de comunicaciones y las tecnologías satelitales se encuentran en constante desarrollo, por lo que el ingeniero electrónico debe poseer los conocimientos que le ayuden al planeamiento, diseño, implementación, administración y diagnóstico de las diferentes tecnologías involucradas en el pujante sector de las telecomunicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALLES, Antony. *ATM Internetworking*. USA: Cisco Press 1995. 58 p.
2. ANTTALAINEN, Tarmo. *Introduction to Telecommunications Network Engineering*. 2nd ed. USA: Artech House, 2003. 377 p. Artech House telecommunications library. ISBN: 1-58053-500-3.
3. CISCO SYSTEMS. *Guide to ATM Technology for the Catalyst 8540 MSR, Catalyst 8510 MSR, and LightStream 1010 ATM Switch Routers*. USA: Cisco Press 2000. 266 p.
4. ELBERT, Bruce. *The Satellite Communication Applications Handbook*. 2nd ed. USA: Artech House, 2004. 532 p. Space Technology and Applications Series. ISBN: 1-58053-490-2.
5. FITZ, Michael. *Fundamentals of Communications Systems*. USA: McGraw-Hill Professional, 2007. 672 p. ISBN: 0-07-151029X.
6. FREEMAN, Roger. *Fundamentals of Telecommunications*. USA: John Wiley & Sons, 1999. 676 p. Telecommunications and Signaling Processing Series. ISBN: 0-471-29699-6.
7. GHEIN, Luc De. *MPLS Fundamentals*. USA: Cisco Press 2007. 651 p.
8. GOLDSMITH, Andrea. *Wireless Communications*. USA: Cambridge University Press, 2005. 561 p. ISBN: 0-521-83716-2.

9. GOLENIEWSKI, Lillian. *Telecommunications Essentials*. USA: Addison Wesley, 2001. 608 p. ISBN: 0-201-76032-0.
10. GOLIO, Mike. *The RF and Microwave Handbook*. USA: CRC Press, 2001. 1356 p. The Electrical Engineering Handbook Series. ISBN: 0-8493-8592-X.
11. HA, Tri T. *Digital Satellite Communications*. 2nd ed. Singapur: McGraw-Hill, 1990. 641 p. Communication Series. ISBN: 0-07-025389-7.
12. HAC, Anna. *Mobile Telecommunications Protocols for Data Networks*. England: John Wiley & Sons, 2003. 246 p. ISBN: 0-470-85056-6.
13. HAYKIN, Simon. *Communication Systems*. 4th ed. USA: John Wiley & Sons, 2001. 1397 p.
14. HUANG, Bormin. *Satellite Data Compression*. USA: Springer, 2011. 309 p. ISBN: 978-1-4614-1182-6.
15. IPPOLITO, Louis J. *Satellite Communications Systems Engineering*. England: John Wiley and Sons, 2008. 376 p. Wireless Communications and Mobile Computing. ISBN: 978-0-470-72527-6.
16. ITU. *Handbook on Satellite Communications*. 3rd. ed. USA: John Wiley & Sons, 2002. 1076 p.
17. ITU-T. Global Information Infrastructure terminology: terms and definitions. Switzerland: ITU Press, 2001. 12 p. Series Y: Global Information Infrastructure and Internet Protocol Aspects.

18. ITU-T. *International Telephone Routing Plan*. Switzerland: ITU Press, 1988. 11 p. Series E: Telephone Network and ISDN.
19. KASERA, Sumit. *ATM Networks Concepts and Protocols*. 2nd ed. India: Tata McGraw-Hill Professional, 2006. 488 p. Networking Series. ISBN: 978-0-07-058353-5.
20. KOLAWOLE, Michael. *Satellite Communication Engineering*. USA: Marcel Dekker, 2002. 270 p. ISBN: 0-8247-0777-X.
21. LATHI, Bhagwandas Pannalal. *Modern Digital and Analog Communication Systems*. 3rd ed. New York, USA: Oxford University Press, 1998. 781 p. The Oxford Series In Electrical and Computer Engineering. ISBN: 0-19-511009-9.
22. NASSAR, Carl. *Telecommunications Demystified*. 3rd ed. USA: LLH Technology Publishing, 2001. 353 p. Demystifying Technology Series. ISBN: 1-878707-55-8.
23. NEWTON, Harry. *Newton's Telecom Dictionary*. 20th ed. USA: CMP Books, 2004. 973 p. ISBN: 1-57-820309-0.
24. PERROS, Harry. *Connection-Oriented Networks*. England: John Wiley & Sons, 2005. 332 p. ISBN 0-470-02163-2.
25. PROAKIS, John G. *Digital Communications*. 4th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1998. 1002 p. Electrical and Computer Engineering. ISBN: 0-07-232111-3.

26. MANOLAKIS, Dimitris G. *Digital Signal Processing*. 3rd ed. USA: Prentice Hall, 1996. 968 p. Electrical and Computer Engineering. ISBN: 0-13-394338-9.
27. RODDY, Dennis. *Satellite Communications*. 3rd ed. USA: McGraw-Hill, 2001. 552 p. Telecom Engineer. ISBN: 0-07-137176-1.
28. SCOTT, Allan. *Understanding Microwaves*. USA: John Wiley & Sons, 1993. 545 p. ISBN: 0-471-57567-4.
29. TAUB, Herbert; SCHILLING, Donald. *Principles of Communications systems*. 2nd ed. India: McGraw-Hill, 2001. 759 p. Electrical and Computer Engineering. ASIN: B000VLGZRU.
30. TERPLAN, Kornel; MORREALE, Patricia. *The Telecommunications Handbook*. 3rd ed. USA: CRC Press, 2000. 412 p. ISBN: 0-8493-3137-4.