

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**REDES DE TRANSPORTE DE NUEVA GENERACIÓN SDH**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRONICO**

**PRESENTADO POR:**

**ELÍAS ENRIQUE GUZMÁN NAUPAY**

**PROMOCIÓN  
2001 - I**

**LIMA – PERÚ  
2006**

## REDES DE TRANSPORTE DE NUEVA GENERACIÓN SDH

A mis padres por ser ejemplo de constancia y esfuerzo.

## SUMARIO

La demanda de servicios de telecomunicaciones crece y se diversifica. El tráfico cursado no para de incrementarse. El mercado demanda la extensión de las Redes de Área Local. Los servicios de almacenamiento distribuido irrumpen con fuerza. Sin embargo, son tiempos difíciles para las operadoras, hay fuertes recortes de presupuestos que dificultan los nuevos despliegues, hay que rentabilizar las cuantiosas inversiones realizadas y los precios de los servicios cada vez son más bajos.

El gran problema es que las redes de transporte existentes no están orientadas a los nuevos servicios. La solución inmediata para satisfacer la demanda con estas condicionantes es la adaptación de las redes actuales a los nuevos servicios. A medio plazo, con el fin de cubrir tanto la demanda creciente de capacidad como el mercado emergente de servicios puramente ópticos, se desarrollara la capa óptica ofreciendo funcionalidades de conmutación además de las de transmisión. En un plazo mayor, como resultado de la evolución de las tecnologías ópticas, de las redes de transporte, en especial su capa óptica y de los equipos de datos, se desarrollará la "Red todo Óptica".

Las soluciones actuales (PoS, GigaEthernet) son ineficientes en el uso del ancho de banda y no garantizan todos los parámetros de calidad de servicio. El presente informe realiza un análisis de la evolución de las Redes de Transporte, analizando de manera particular esta primera etapa de la evolución. Esta primera etapa es la adaptación de las Redes SDH a la demanda de nuevos servicios, asegurando la eficiencia del uso del ancho de banda y calidad de servicio (QoS).

## ÍNDICE

### PRÓLOGO

### CAPÍTULO I

#### REDES DE TRANSPORTE

1.1 Jerarquía Digital Plesiocrona (PDH)	3
1.1.1 La necesidad de flexibilidad:	3
1.1.2 Multiplexación PDH	4
1.2 Jerarquía Digital Síncrona (SDH)	6
1.2.1 Desarrollo de la tecnología SDH	6
1.2.2 SDH - Recomendaciones ITU-T (ex CCITT)	6
1.2.3 Principios de SDH	6
a) General	6
b) Características de SDH	7
1.2.4 Arquitectura de la Jerarquía SDH	7
a) La trama SDH	7
b) Trama de transmisión STM-n	11
c) Estructura de multiplexado	11
d) Estructura de la trama básica SDH	12
1.2.5 Arquitectura funcional SDH	15
a) SDH en término de un modelo de capas	15
b) Recursos lógicos o niveles de una red SDH	17
c) Elementos de la red	18
d) Topologías	19
e) Protección	20
1.3 Multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM)	20
1.3.1 Desarrollo de la tecnología DWDM	20
1.3.2 DWDM - Recomendaciones ITU-T (ex CCITT)	24
1.3.3 Principios de DWDM	24
a) General	24
b) Características de DWDM	25
1.3.4 Arquitectura funcional DWDM	25
a) DWDM en término de un modelo de capas	25

b) Esquema funcional DWDM	26
c) Factores que limitan la transmisión	27
d) Componentes ópticos y Operación	28
e) Operación extremo a extremo de un sistema DWDM	36
f) Elementos de la red	37
g) Topologías para DWDM	38
h) Esquemas de protección para DWDM	39

## **CAPÍTULO II**

### **REDES DE TRANSPORTE DE NUEVA GENERACIÓN**

2.1 SDH de Nueva Generación (NG-SDH)	42
2.1.1 GFP (Generic Frame Procedure)	43
2.1.2 Trama GFP	43
a) Core Header	44
b) Payload Headers	44
c) CPI - Client Payload Information Field	47
d) Optional Payload FCS	48
2.1.3 VCAT (Virtual Concatenation)	49
a) Aplicaciones	51
2.1.4 LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme)	52
a) Paquetes de control del LCAS	53
b) Aplicaciones	54
2.2 OPTICAL TRANSPORT NETWORK (OTN)	56
2.2.1 La Visión OTN – Propiedades de la OTN	57
2.2.2 Los estándares ITU-T G.709 para la OTN	59
2.2.3 Estructuras de capas de la OTN	60
2.2.4 Estructura del canal óptico	62
a) La cabecera del canal óptico	62
2.2.5 Nivel de la sección de multiplexación y transmisión óptica	70
2.2.6 El futuro del OTN	70.

## **CAPÍTULO III**

### **REDES OPTICAS ETHERNET SOBRE REDES DE TRANSPORTE NG-SDH**

3.1 Situación Actual	71
3.2 Redes Ethernet	72
3.2.1 Trama Ethernet	72

3.2.2 Adaptación de la trama Ethernet	73
3.3 Redes Ópticas Ethernet	74
3.3.1 Topologías	74
a) Ethernet over Fiber (EoF) IEEE 802.3	74
b) Ethernet over DWDM (EoDWDM)	74
c) Ethernet over Resilient Packet Ring (EoRPR) IEEE 802.17	75
d) Ethernet over SDH (EoS)	76
3.3.2 Mapeo	77
a) Ethernet over LAPS (ITU-T X.85 & 86)	77
b) Ethernet over ATM (IETF RFC 1483)	77
c) Ethernet over GFP (ITU-T G.7041)	78
3.4 Redes Ópticas Ethernet sobre Redes de Transporte NG-SDH	79

## **CAPÍTULO IV**

### **EVOLUCIÓN DE LAS REDES DE TRANSPORTE**

4.1 Introducción	82
4.2 Evolución de la red de transporte	83
4.2.1 Evolución de la ruta de las redes de transporte	83
a) El primer paso en la ruta de la evolución de la red	83
b) El segundo paso en la ruta de la evolución de la red	84
c) El paso futuro	84
4.2.2 Evolución de las tecnologías para las redes de transporte	86
a) Capa Óptica	86
b) Capa eléctrica (SDH, Gigabit Ethernet)	86
4.3 Red toda óptica como objetivo en la evolución de las redes de transporte	88
4.3.1 Introducción	88
4.3.2 Opciones de evolución	91
a) La opción de evolución por defecto	91
b) La opción de red GMPLS	92
c) La opción red todo óptica independiente	94

### **CONCLUSIONES**

### **BIBLIOGRAFÍA**

## PRÓLOGO

La infraestructura de transmisiones proporciona capacidad y recursos de transmisión a todas las redes de las operadoras locales, nacionales e internacionales. Constituye el esqueleto básico que, dotado de la capacidad y flexibilidad suficiente, permite satisfacer todas las necesidades de transmisión para hacer frente de una manera eficiente a los requerimientos de los clientes/usuarios tanto en lo relativo a medios como a servicios y su calidad asociada.

Bajo la denominación genérica de Transmisión se incluyen todos los sistemas que facilitan el transporte de señales eléctricas u ópticas de manera guiada por medio de portadores físicos: par de cobre, coaxial ó fibra óptica.

Se distinguen dos áreas perfectamente diferenciadas: Sistemas para el nivel de Transporte y Sistemas para el nivel de Acceso; En el Nivel de Transporte se consideran los equipos y sistemas que facilitan el transporte masivo de información y con los que se construye la infraestructura básica de las operadoras. Y en el Nivel de Acceso se consideran los equipos y sistemas que facilitan el transporte de la información de las diferentes interfaces que puede disponer el usuario en su domicilio, hasta el primer centro de la red.

El presente informe es un trabajo de investigación de la evolución de las Redes de Transporte y en particular de la Red de Transporte SDH. El objetivo es describir en forma detallada la primera etapa de esta evolución, la adaptación de las Redes de Transporte SDH a los requerimientos de los nuevos servicios, a dicha red se le denomina NG-SDH (SDH de Nueva Generación).

El capítulo I abarca una descripción de las Redes de Transporte actuales, como las redes PDH, SDH y DWDM; conceptos básicos, características, arquitectura de la jerarquía y su arquitectura funcional (topologías, protecciones, etc).

En el capítulo II se realiza el estudio de la Redes de Transporte de Nueva Generación. La primera red a estudiar es la Red de Transporte NG-SDH (SDH de Nueva Generación), los protocolos y métodos usados con los cuales se hace un mejor uso del ancho de banda frente a las Redes de Transporte SDH actuales. Y la segunda parte describe las Nuevas Redes Ópticas (OTN), lo cual es una evolución de las actuales Redes de Transporte

DWDM, haciendo de estas más eficientes en cuanto a operación, mantenimiento, gestión y aprovisionamiento.

El capítulo III muestra una aplicación de la Red de Transporte NG-SDH (SDH de Nueva Generación), se detalla las ventajas de la Red NG-SDH frente a otras Redes de Transporte en el transporte de una de las tecnologías más difundidas en las redes locales "Ethernet".

Finalmente, en el capítulo IV se describen las diferentes tendencias en la evolución de las Redes de Transporte.

# CAPÍTULO I

## REDES DE TRANSPORTE

### 1.1 Jerarquía Digital Plesiocrona (PDH)

El termino síncrono se utiliza para expresar el hecho de que el reloj se recupera de una señal recibida. En las velocidades de transmisión, se debe tener en cuenta las diferencias de reloj. Los trenes de bits provienen, de hecho, de relojes plesiócronicos. [1]

Las tramas de mayor velocidad se obtienen por medio de multiplexación plesiócrona (PDH), adicionando bits por medio de la técnica de justificación / dejustificación.

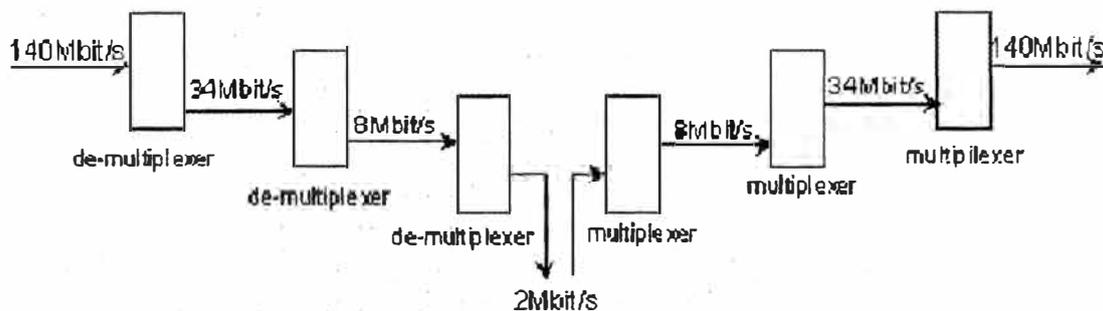


Fig. 1.1 Niveles PDH

#### 1.1.1 La necesidad de flexibilidad:

Las viejas redes de telecomunicaciones fueron desarrolladas cuando las transmisiones punto a punto eran su principal aplicación. La tecnología PDH no contempla, dentro de su estructura de señal, funciones de gestión y mantenimiento.

Con el crecimiento de las redes y la interconexión entre ellas la estructura creció en complejidad y se requerían mayor cantidad de multiplexores para una mayor distribución de tramas y la necesidad de tener control sobre ellas.

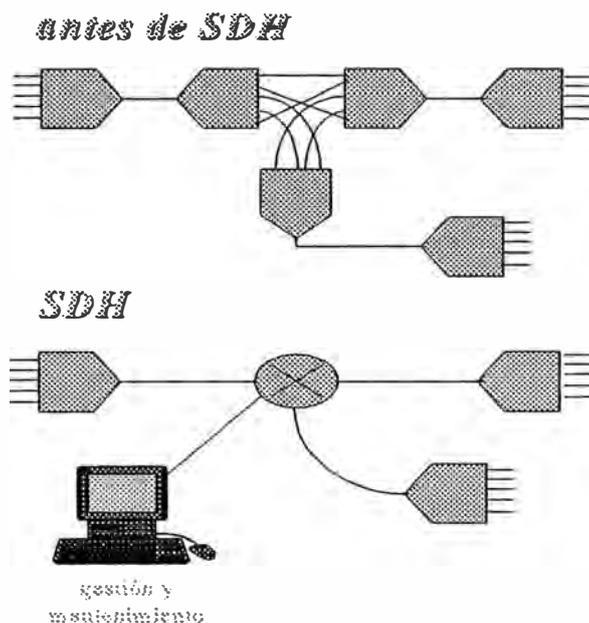


Fig. 1.1 PDH vs SDH

### 1.1.2 Multiplexación PDH

Las limitaciones en la jerarquía PDH fueron determinantes en la decisión para definir un nuevo modelo de transmisión.

El incremento en las velocidades de transmisión trae consigo el aumento en la capacidad de canales a transmitir en una estructura multi-nivel. En tasas altas de transmisión (ej.: 565 Mb/s), al no existir una recomendación, las interfaces eran propietarias. Esto incurre en altos costos debido a que los enlaces siempre deben ser del mismo proveedor.

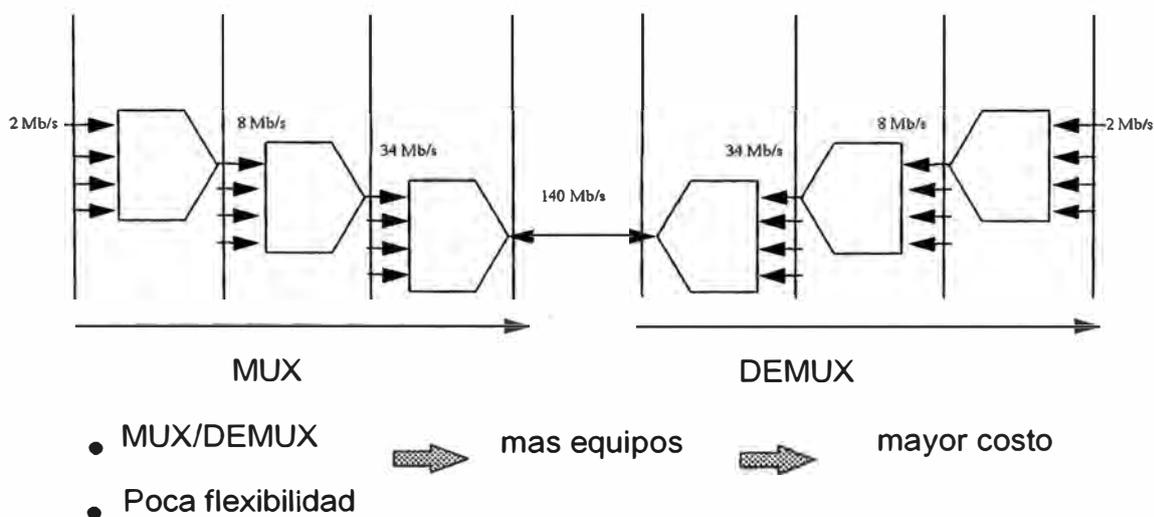


Fig. 1.3 Multiplexación PDH

En cada nivel:

Tx:

- Inserción de palabra de alineación de trama.
- Adición de bits de relleno y justificación.
- Adición de señales de servicio.

Rx:

- Extracción del clock.
- Recuperación de la Palabra de alineación de trama
- Recuperación de los bits adicionales

## 1.2 Jerarquía Digital Síncrona (SDH)

### 1.2.1 Desarrollo de la tecnología SDH:

Antes del SDH no había estándares comunes en 140 Mb/s que asegure la compatibilidad entre diferentes proveedores de equipos. Esto requería tener el mismo proveedor en los extremos de una línea.

El trabajo de estandarización en SDH comenzó en Junio de 1986.

El objetivo fue producir un estándar común de transmisión por fibra óptica el cual proveería a las compañías operadoras una red simple, económica y flexible.

En 1988 fue aprobado el primer estándar SDH (Rec. G707, G708, G709). Estas recomendaciones definen las funcionalidades y prestaciones de los sistemas de transmisión basados en los principios de la multiplexación síncrona.

Estos estándares están siendo ampliados constantemente, definiendo nuevas funcionalidades. [1,2]

### 1.2.2 SDH - Recomendaciones ITU-T (ex CCITT)

La rec.G707: define los niveles estándar de SDH. Los principios de SDH se enuncian en la rec. G708, que describe la trama básica. La rec. G709 especifica la estructura de multiplexado desde la trama base.

La rec. G781 simplemente presenta la estructura de las recomendaciones correspondientes a los equipos SDH. La G782 presenta las características generales de equipos SDH y la G783 la estructura de los mismos en bloques funcionales.

La rec. G784 especifica aspectos del monitoreo de performance (Performance Monitoring). [3]

### 1.2.3 Principios de SDH

#### a) General

La jerarquía PDH o plesiócrona esta basada en el concepto de transparencia. No hay ningún concepto prefijado entre la trama y su contenido en cada nivel 2, 8, 34, 140 o 565 Mb/s. Existe una transición entre un nivel dado y el nivel inmediato superior usando justificación en la señal. Es así como el acceso a señales de bajo nivel implica una demultiplexación y asume la operación inversa de de-justificación y recuperación de la señal.

Lo interesante de la multiplexación síncrona es la posibilidad de acceso a tributarios sin incurrir en la operación de demultiplexado. Sin embargo, a pesar de que las señales están sincronizadas, estas llegan con fase variable debido a las diferencias de tiempo de propagación o a las desviaciones de frecuencia entre relojes de sincronismo (clocks). Una de las principales funcionalidades de SDH es el uso de puntero y de técnica de justificación, con la que es posible conservar el correcto funcionamiento de los tributarios a pesar de las variaciones en frecuencia.

## **b) Características de SDH**

### **Mayores velocidades de transmisión:**

Facilidad de multiplexación a niveles mayores, usando la técnica de entrelazado de bytes.

### **Flexibilidad de la red y fácil acceso a tributarios:**

El principio de multiplexación SDH ofrece una visibilidad directa de los tributarios desde el terminal múltiplex. Las señales pueden ser recuperadas e insertadas sin la necesidad de multiplexación y demultiplexación. Además, es posible transmitir señales de diferente velocidad de transmisión.

### **Mayores distancias:**

Debido a que SDH es una tecnología orientada a transmisión por fibra óptica, los módulos ópticos se ajustan a estándares de potencia y sensibilidad que permiten optimizar la distancia en los enlaces.

### **Gestión y mantenimiento integrados:**

La tasa de transmisión básica en SDH de 155.520 Mb/s ofrece espacio suficiente para incorporar canales de servicio y de mantenimiento.

### **Compatibilidad entre fabricantes.**

Dadas las recomendaciones que alcanzan tanto a las estructuras de equipos, como a las tramas se brinda la posibilidad de interconectar diferentes proveedores de equipos SDH.

## **1.2.4 Arquitectura de la Jerarquía SDH:**

### **a) La trama SDH:**

La señal SDH es una secuencia serial de bits organizada en una estructura definida. Por conveniencia se la representa como una matriz NxM dividida en bytes (conjunto de 8 bits).

Los bits a ser transmitidos por la línea son enviados por filas de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo [2]

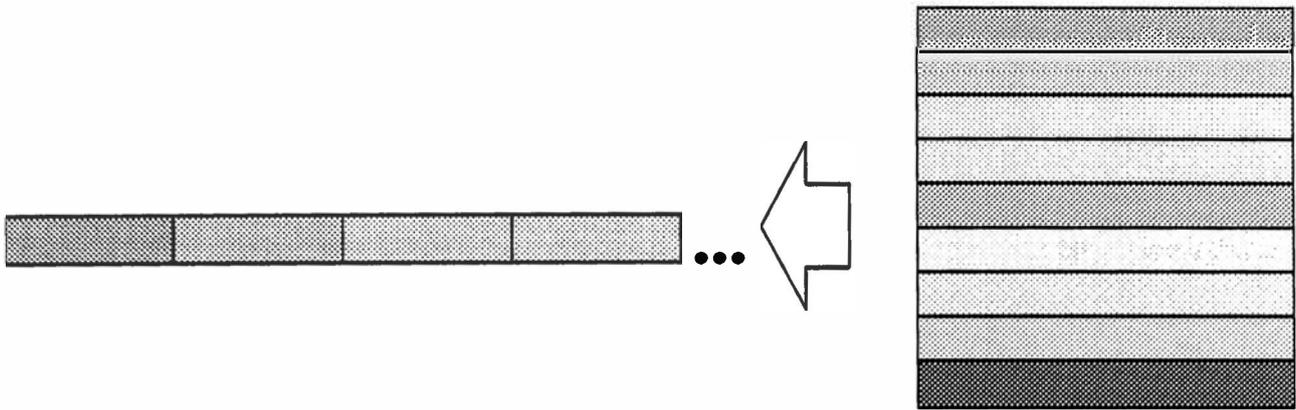


Fig. 1.4 Transmisión de bits en SDH

Los siguientes puntos de este capítulo describen en detalle la trama SDH. También se muestra en etapas el proceso de mapeo de las diferentes señales PDH dentro de la nueva estructura tipo matriz de la trama básica SDH.

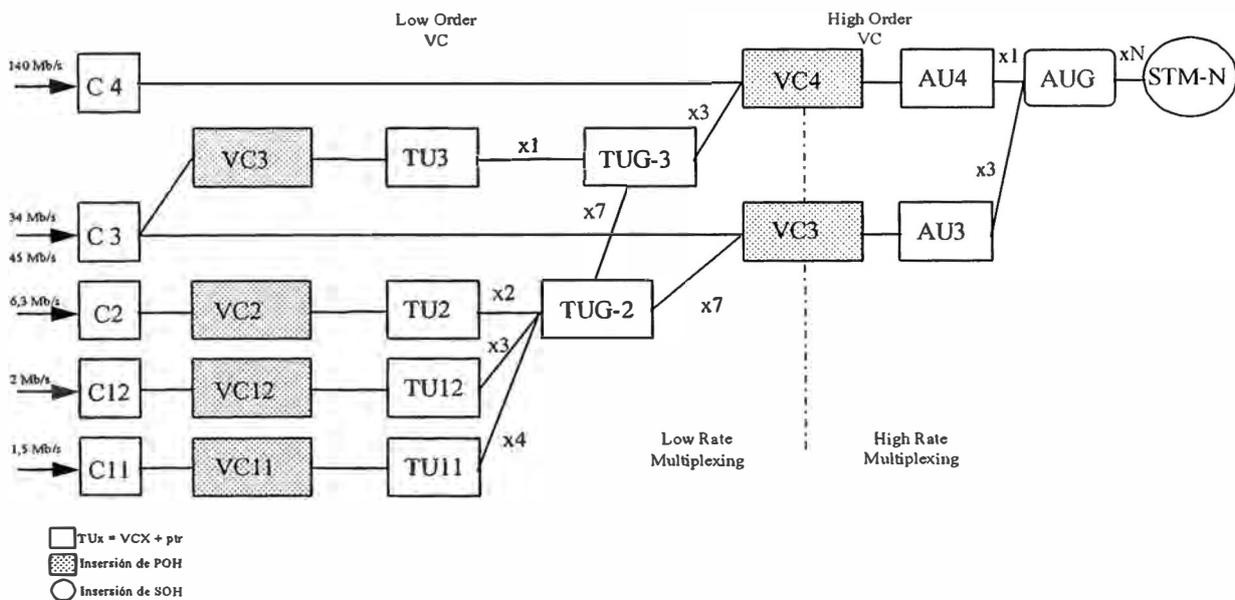


Fig. 1.5 Estructura de multiplexado ITU-T

### Contenedor: Cn

Una señal transmitida por la red síncrona es previamente encapsulada dentro de un contenedor el cual está preparado para albergar esta señal y mantiene la estructura de trama síncrona. El contenedor es una entidad cuya capacidad está definida de manera que asegure la transmisión de señales tributarias definidas en la jerarquía plesiócrona (PDH).

Los tributarios PDH son estructurados en bytes (8 bits). La operación de colocarlos en correlación es llamada mapeo. El mapeo organiza los bytes de información, de relleno y de servicio dentro del contenedor. Esta operación está definida en la rec. G709 de CCITT.

Ejemplo: Una señal PDH a 140 Mb/s se inserta dentro de un contenedor de índice 4, formando un C4.

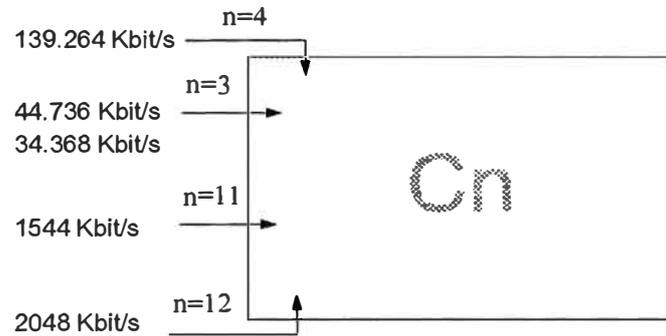
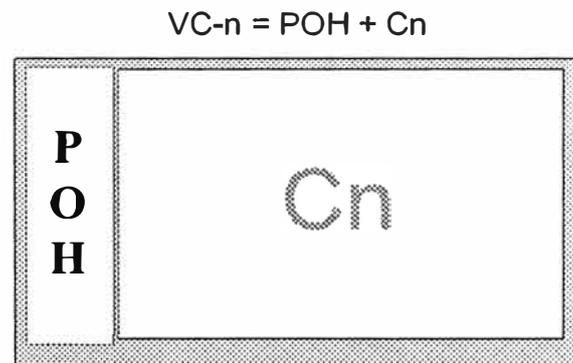


Fig. 1.6 Contenedor Cn

n : índice de referencia del contenedor.

### VC - Virtual Container: (Contenedor Virtual)

Al contenedor Cn se le asocia un encabezado de sección llamado POH (Path Over Head). Se denomina contenedor virtual VC al conjunto de contenedor más el encabezado de sección.



### •VC-n : Contenedor Virtual

Fig. 1.7 Contenedor Virtual ( VC )

Se hace una distinción entre contenedores virtuales de bajo orden (VC11, 12, 2 ,y 3) y los de alto orden (VC3 y 4).. Los VC de bajo orden están formados por un contenedor y su POH correspondiente.

Los VC de alto orden pueden contener también a VCs de bajo orden.

### TU - Tributary Unit (Unidad Tributaria)

Los TUs están compuestos por un contenedor virtual de bajo orden mas un puntero.

El puntero indica el lugar en el cual comienza el VC en la trama.

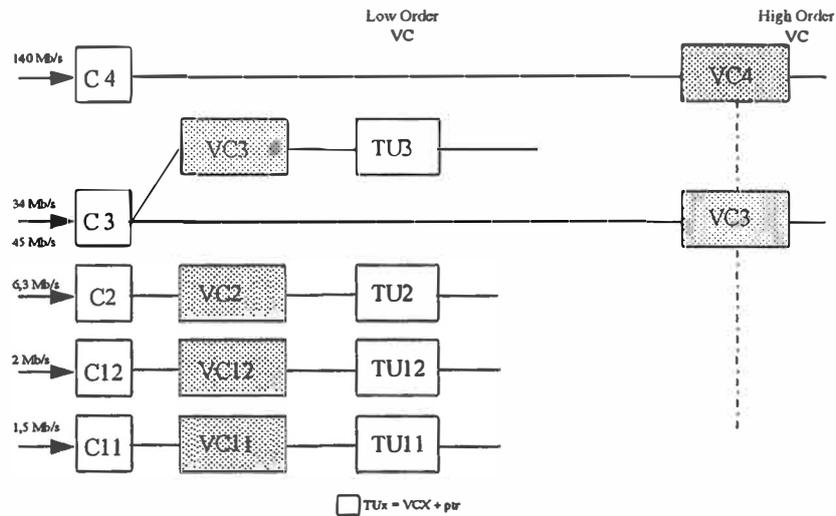


Fig. 1.8 Formación de TU

### TUG - Tributary Unit Group: Grupo de unidad tributaria

El TUG está compuesto por un conjunto de TUs multiplexados.

El TUG2 puede estar formado por 4xTU11, o 3xTU12, o 1xTU2.

El TUG3 puede formarse con 7xTUG2 o 1xTU3.

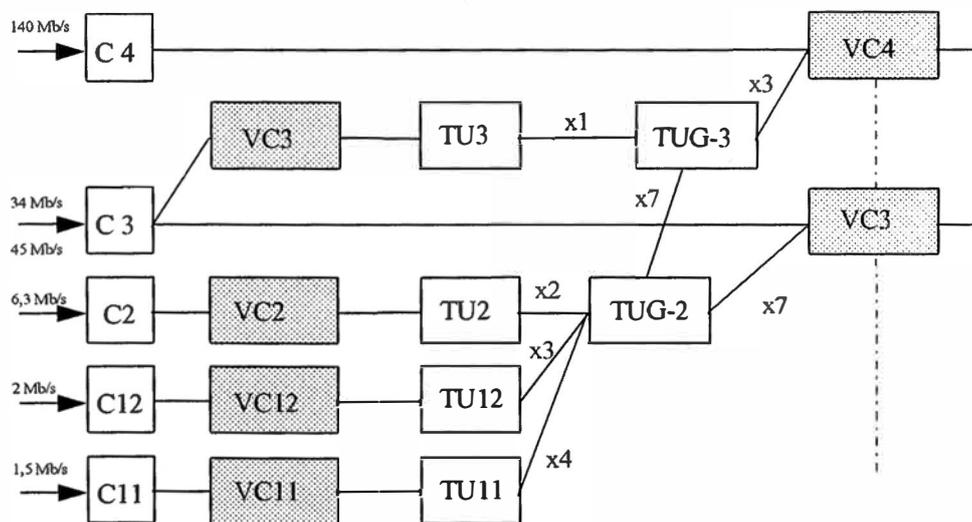


Fig. 1.9 Formación de TUG

### AU - Administrative Unit ( Unidad Administrativa)

El AU lo compone un VC de alto orden más un puntero de AU.

El valor del puntero indica el punto de comienzo del VC en la trama usada.

Un AU4 se compone de un VC4 más un puntero asociado.

Un AU3 se compone de un VC3 más un puntero asociado.

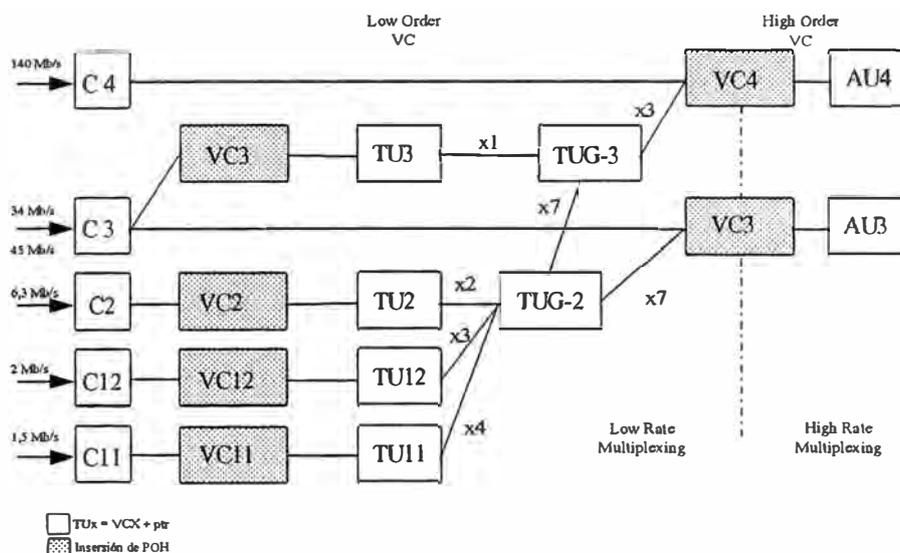


Fig. 1.10 Formación de AU

### AUG - Administrative Unit Group (Grupo de unidades administrativas)

El AUG no es una nueva estructura física. Es sólo una estructura virtual dentro de la trama SDH.

EL AUG es el espacio que ocupa un AU4 con su trama de transmisión, o el que ocupan 3 AU3 multiplexados.

### b) Trama de transmisión STM-n

La trama STM-n (Synchronous Transport Module) se obtiene:

- Multiplexando n AUGs
- Agregando un encabezado de sección, llamado SOH (Section Over Head)

Ejemplos:

- STM-1 (155,520 Mb/s) es la trama básica, la cual contiene 1 AUG y su SOH.
- STM-4 (622,080 Mb/s), consta de 4 AUGs y su SOH.
- STM-16 (2488,320 Mb/s), contiene 16 AUGs y su SOH.
- STM-64, contiene 64 AUGs y su SOH.
- STM-256, contiene 256 AUGs y su SOH.

### c) Estructura de multiplexado

#### Estructura de multiplexado ITU-T

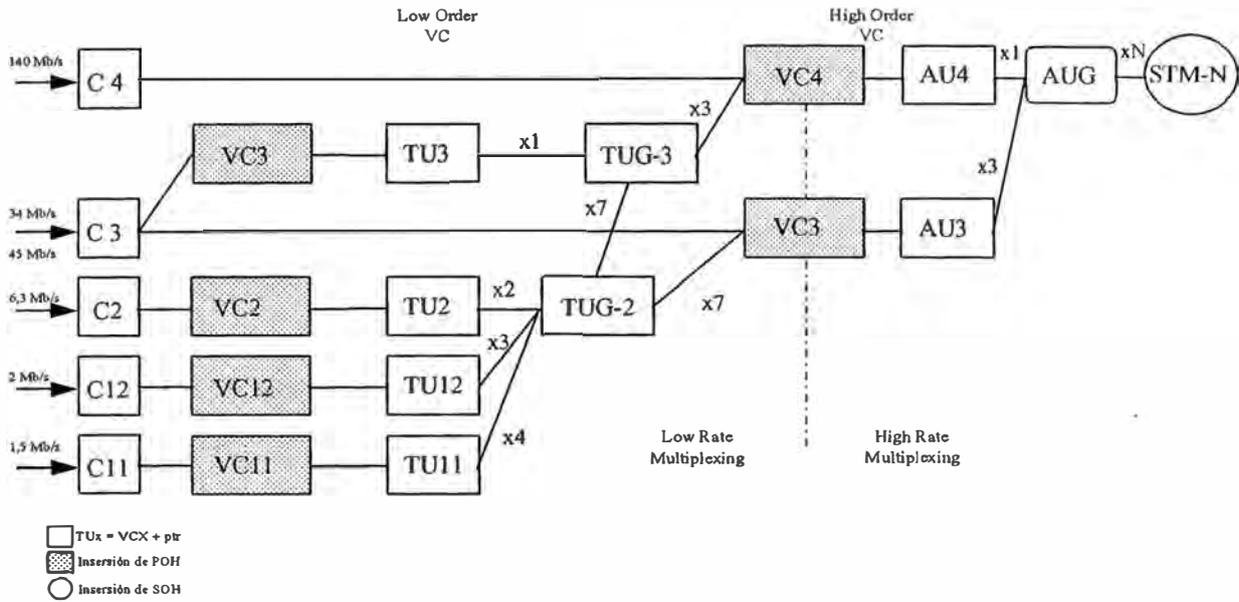


Fig. 1.11 Estructura de multiplexado ITU-T

**Estructura de multiplexado ETSI**

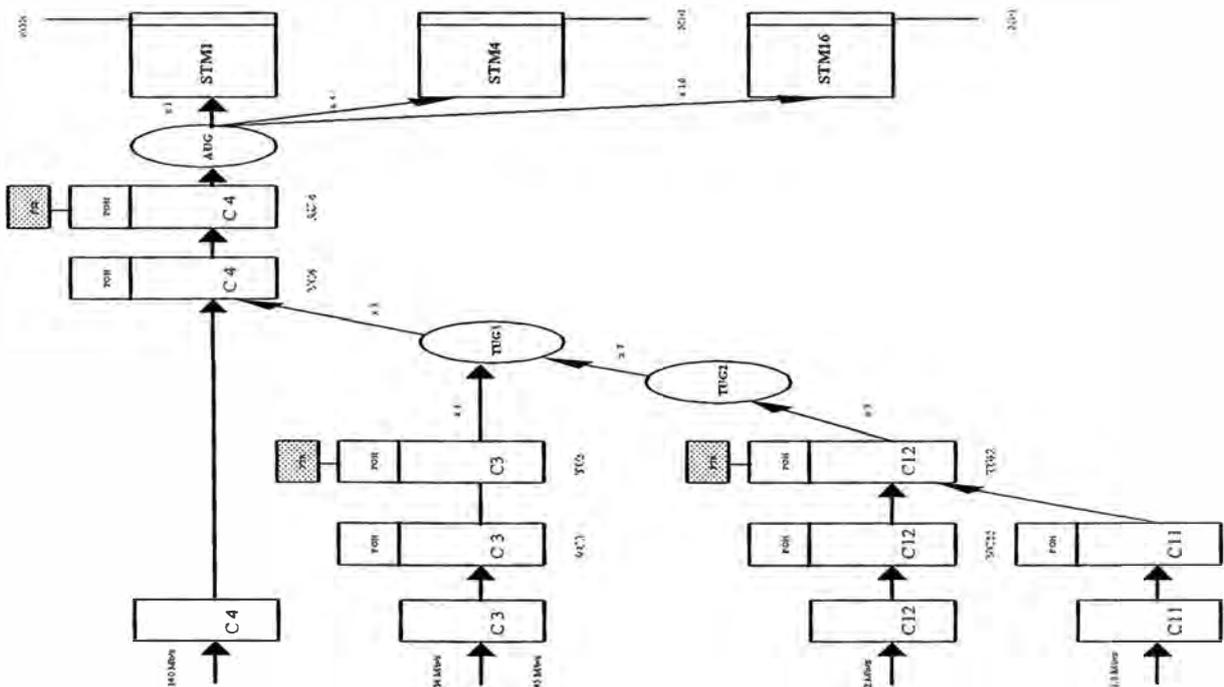


Fig. 1.12 Estructura de multiplexado ETSI

**d) Estructura de la trama básica SDH**

La trama básica adoptada por UIT es la llamada STM-1, está estructurada en bytes y tiene las siguientes características:

Largo: 2430 Bytes

Duración: 125  $\mu$ seg.  
 Velocidad: 155,520 Mb/s  
 Carga útil (Payload): 2349 bytes (149,760 Mb/s)

La trama STM-1 provee una matriz de 9 filas por 270 columnas (bytes). La matriz está ordenada de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

Se divide en tres zonas:

1. SOH ( Section Over Head), o encabezado de sección: el cual a su vez está subdividido en dos , un encabezado para secciones regeneradoras llamado RSOH , y otro para secciones multiplexoras llamado MSOH.
2. Punteros de AU.
3. Payload (C4)

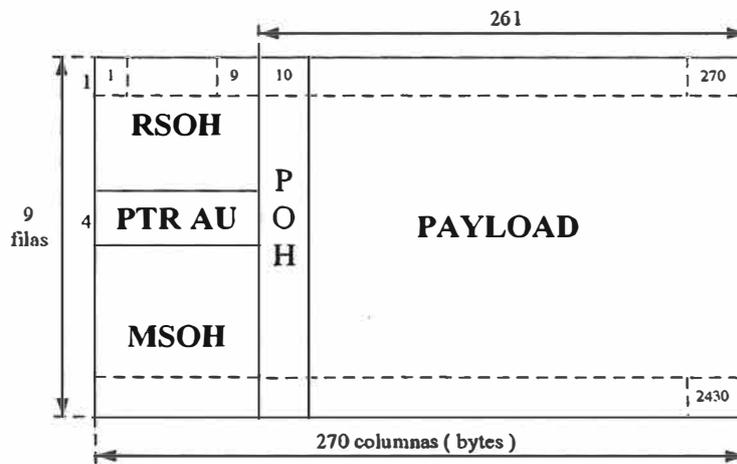


Fig. 1.13 Trama básica STM-1

### Utilización de los encabezados

Los encabezados tienen por función, entre otras, el monitoreo de calidad entre las diferentes secciones.

También son los encargados de brindar canales de servicio, datos y gestión.

A través de bytes de los encabezados viaja el protocolo de gestión con el cual se conectan los equipos SDH a la red de gestión TMN (Telecommunication Management Network).

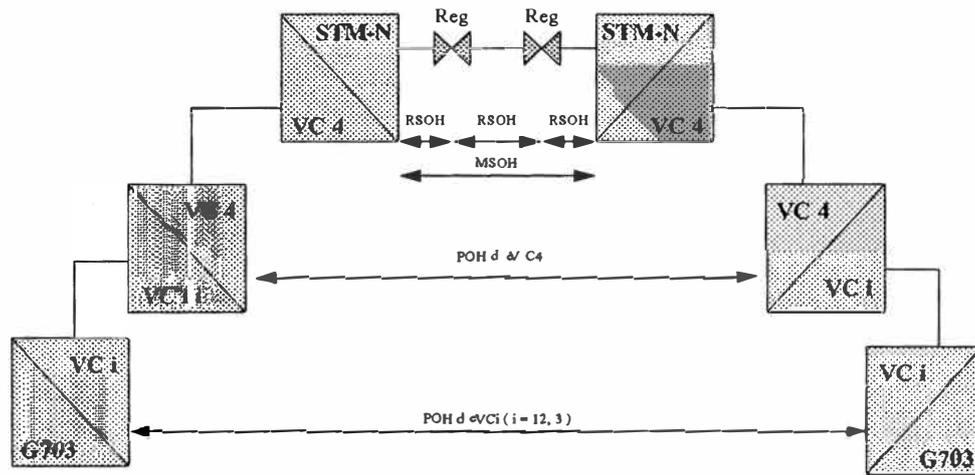


Fig. 1.14 Uso de encabezados

- RSOH: Monitoreo de sección regeneradora.
- MSOH: Monitoreo de sección multiplexora.
- POH de VC4: Monitoreo de VC de alto orden.
- POH de VC<sub>i</sub>: Monitoreo de VC de bajo orden.

**Descripción del encabezado de sección de STM-1**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	C1	UN	UN	} <b>RSOH</b> Regeneration Section OverHead
2	B1	⊗	⊗	E1	⊗	⊗	F1	UN	UN	
3	D1	⊗	⊗	D2	⊗	⊗	D3	⊗	⊗	
4	Puntero de AU									
5	B2	B2	B2	K1	⊗	⊗	K2	⊗	⊗	} <b>MSOH</b> Multiplex Section OverHead
6	D4	⊗	⊗	D5	⊗	⊗	D6	⊗	⊗	
7	D7	⊗	⊗	D8	⊗	⊗	D9	⊗	⊗	
8	D10	⊗	⊗	D11	⊗	⊗	D12	⊗	⊗	
9	S1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	E2	UN	UN	

⊗ Bytes no usados  
UN: Bytes reservados para uso local o nacional

Fig. 1.15 Descripción del SOH

**Bytes del RSOH**

- A1, A2 : F.A.W. ( Palabra de alineación de trama)
- C1 : identificador de AUG
- B1 : byte reservado para monitoreo de errores de bits en la sección regeneradora. (entre dos regeneradores)
- E1 y F1: Estos dos bytes proveen canal de servicio y canal de usuario.

- D1 a D3: DCC (Data communication channel) de la sección regeneradora Bytes del MSOH
- B2: tres bytes reservados para monitoreo de errores de bits en la sección multiplexora.
- K1, K2: Dos bytes reservados para APS (Automatic Protection Switching) 1+1 y 1:n, dentro de K2 tres bits son para AIS y FERF.
- D4-D12: DCC (Data communication channel) de la sección multiplexora.
- Z1, Z2: Uso futuro.
- E2: Canal de servicio 64 Kbit/s entre terminales.
- S1: Marker de sincronismo.
- M1: MS-FEBE, numero de errores detectados en B2 del equipo remoto.

### **Función de los punteros**

El AU4 está formado por un VC4 más un puntero asociado dentro de la trama STM-1.

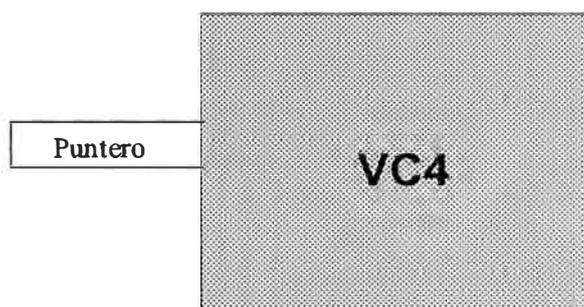


Fig. 1.16 Puntero de trama SDH

El puntero indica la dirección de comienzo del VC4 (posición del byte J1).

La dirección 0, para un VC4, esta definida cuando el byte J1 está luego del noveno byte del puntero de AU4.

### **Justificaciones**

Antes de analizar el uso de punteros, recordemos la necesidad de la técnica de justificación en PDH. La justificación es la operación por la cual es posible insertar una señal de tasa variable dentro de una trama fija.

De hecho, cada nivel en PDH o SDH se define dentro de una tasa nominal de  $X$  bits/s. Esta tasa puede oscilar dentro de un rango  $\square \Delta x$  bits/s.

Ejemplo: PDH orden 4:      139,264 Mb/s  $\square$  15 ppm  
    139,264 Mb/s  $\square$  2,083 Kb/s

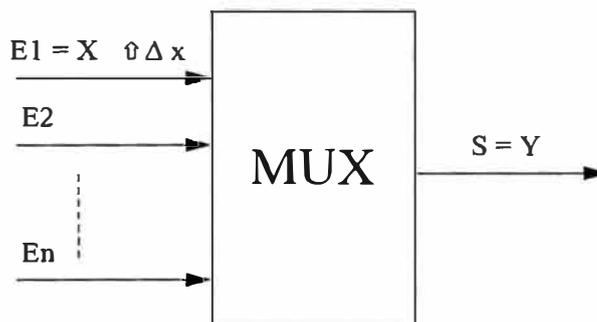


Fig. 1.17 Justificaciones

### Utilización del puntero

El puntero hace posible el manejo de las pérdidas o defasajes de sincronismo debido a diferentes relojes usados en la sincronización de los equipos.

El puntero asociado con un proceso de justificación (positiva, negativa o nula) provee a la trama SDH el manejo de señales desfasadas en frecuencia sin pérdida de información.

De hecho, el clock de una señal STM-1 puede ser independiente del VC4 transportado. En caso de haber un desfase entre las velocidades de trama y VC4, el valor del puntero se incrementará o decrementará según sea necesario.

### Uso de los punteros en la red

El proceso de punteros introduce un nuevo deterioro en la señal llamado "Jitter por ajuste de puntero". Este jitter aparece, luego de la recuperación de un VC4 con ajuste de puntero, en la señal tributaria. La señal tributaria debe estar dentro de las curvas de Jitter especificadas en las recomendaciones de CCITT, por ende debe ponerse especial cuidado en la distribución de sincronismo de la red para reducir los movimientos de puntero.

## 1.2. 5 Arquitectura funcional SDH

### a) SDH en término de un modelo de capas

Las tecnologías de telecomunicación son aplicadas generalmente usando el modelo de capas. Las redes SDH están subdivididas dentro de varias capas que están directamente relacionadas a la topología de red. [4]

**La capa Física**, la capa mas baja y representa el medio de transmisión (usualmente fibra de vidrio, cobre, enlace de radio ó satélite)

**La Sección Regeneradora**, es la ruta entre regeneradores. Parte de la cabecera (RSOH, Regenerator Section Overhead) esta disponible para las necesidades requeridas dentro de esta sección.

**La Sección Multiplexora**, cubre la parte de la multiplexación de varios tributarios y demultiplexarlas en el otro extremo. Es la ruta entre multiplexores. Parte de la cabecera (MSOH, Multiplex Section Overhead) esta disponible para las necesidades requeridas dentro de esta sección.

**La Capa de VC (Virtual Containers)**, tiene que ver con emisiones de extremo a extremo y representa a los contenedores virtuales donde se realiza el proceso de mapeo. Ejemplo, en la siguiente Fig. 1.18 existen dos capas de VC, El mapeo de VC-4 es usado para señales PDH de 140Mbps, señales ATM ó señales IP y el mapeo de VC-12 es usado para señales PDH de 2Mbps.

En general las capas más altas representan las aplicaciones de la red de transporte SDH.

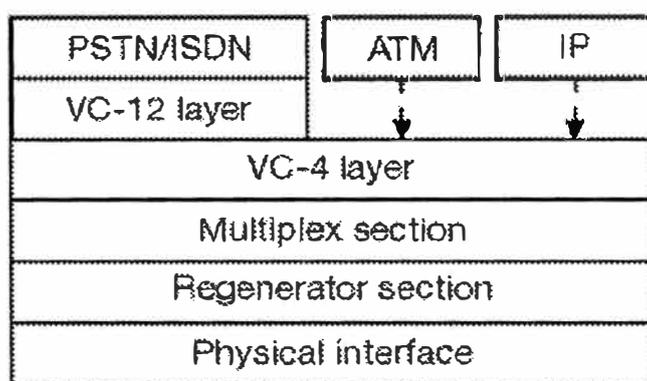


Fig. 1.18 El modelo de capas SDH

## b) Recursos lógicos o niveles de una red SDH

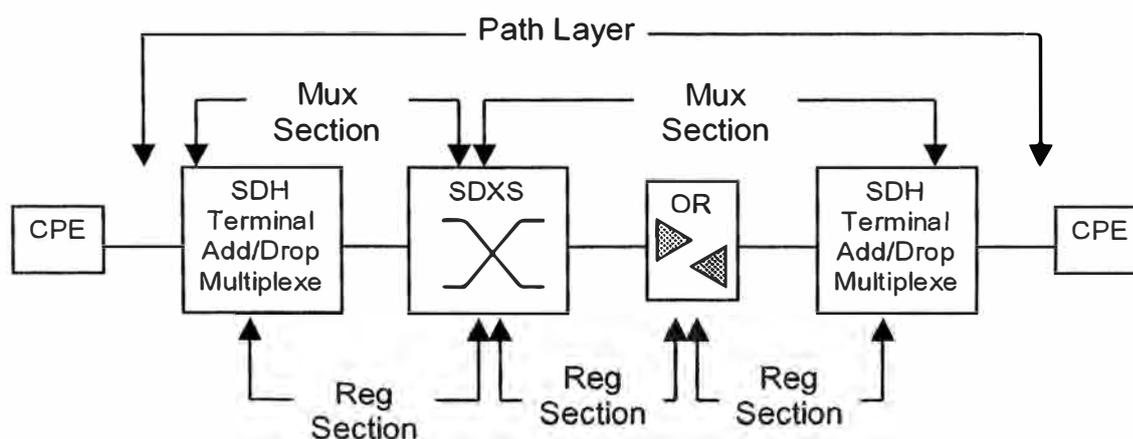


Fig. 1.19 Niveles de una red SDH

### Path Layer

- Empieza donde las señales no-SDH de baja tasa entran en la red
- Información en el POH representa end-to-end status

### Multiplexer Section Layer

- Tiene terminación en todos los nodos importantes (con crossconexión).
- Aquí es donde la mayor parte de la información entre los nodos principales es transportada.

### Regenerator Section Layer

- La terminación está en todos los nodos.

### c) Elementos de la red

Para la SDH se han identificado diversos elementos de red (NE)

#### SDCX (Cross-connect Digital síncrono)

Permite la conmutación de líneas de transmisión con distintas velocidades de transmisión.

Una SDCX puede conectar y desconectar señales de orden inferior.

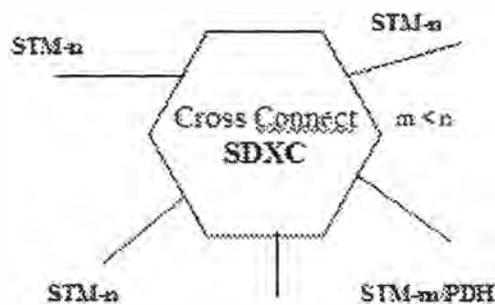


Fig. 1.20 SDCX (SDH Digital Cross-connect)

#### ADM (Multiplexor de inserción y extracción)

Permite la inserción y extracción de señales de orden inferior.

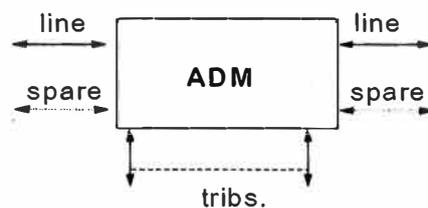


Fig. 1.21 ADM (Add / Drop Multiplexer)

#### MUX (Multiplexores síncronos)

Pueden funcionar como interfaz entre señales PDH y señales SDH y entre señales SDH de orden inferior y señales SDH de orden superior. Un MUX será una parte de las SDCX y de los ADM.

### Multiplexor terminal

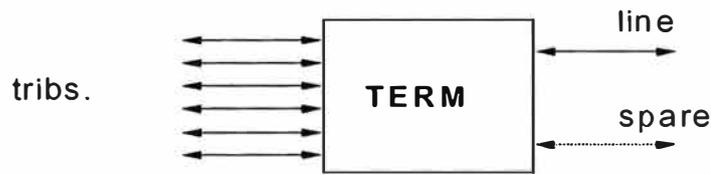


Fig. 1.22 Multiplexor Terminal

### Multiplexor doble terminal

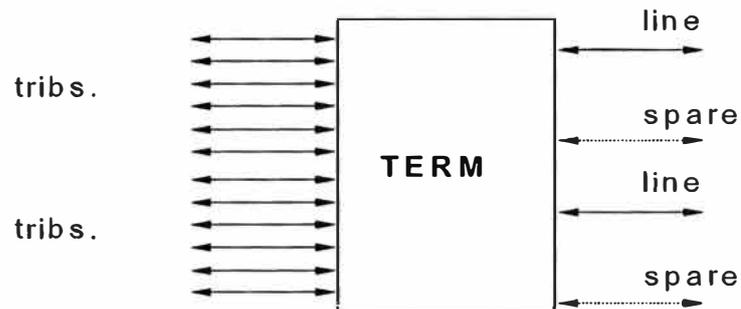


Fig. 01.23 Multiplexor Doble Terminal

### REG (Regeneradores síncronos)

Restablecen la señal de línea entrante.



Fig. 1.024 Regenerador

### d) Topologías

Estos distintos tipos de configuración de equipos se insertan en el la red siguiendo las diferentes topologías a saber:

#### Punto a punto

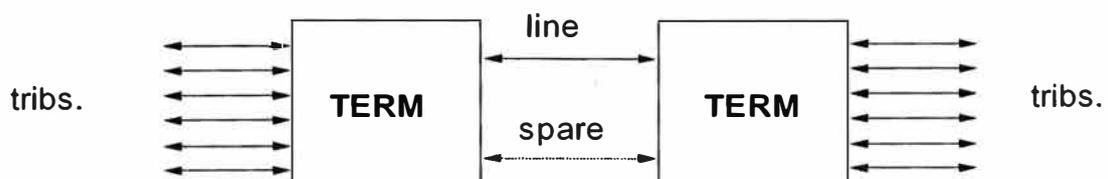


Fig. 1.25 Punto a punto

## Inserción / extracción lineal (Bus)

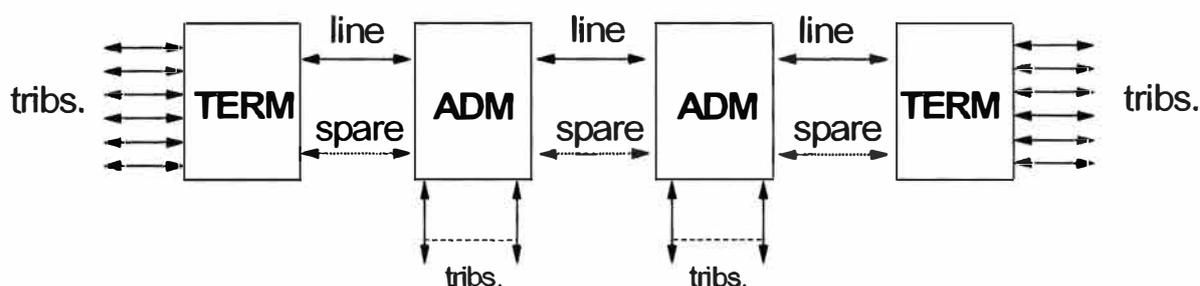


Fig. 1.26 Inserción / Extracción lineal

## Anillo

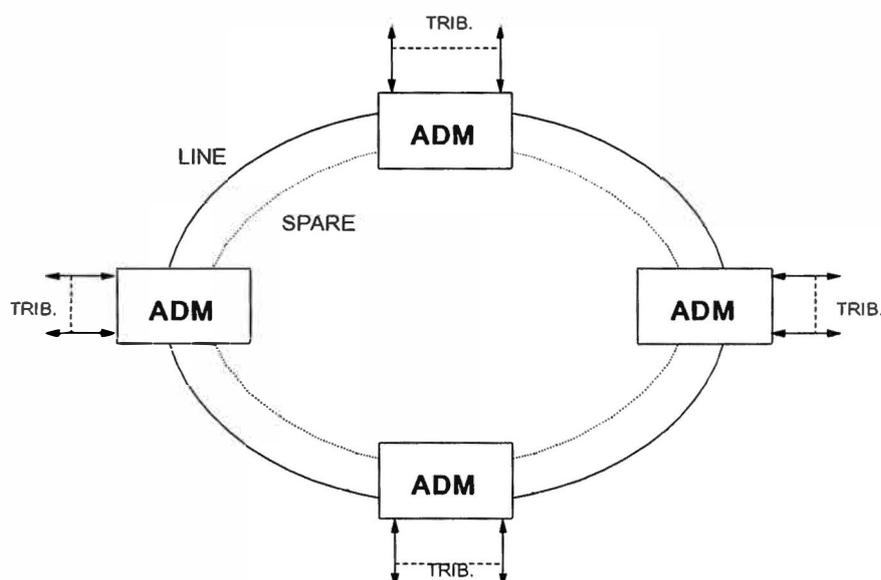


Fig. 1.27 Anillo STM-n

### e) Protección

Los equipos SDH cuentan con diferentes tipos de protección contra falla internas o externas. Existen diferentes arquitecturas y tipos de protección.

#### 1) Tipos de arquitectura:

- 1+1 : 1 placa / línea de reserva por cada placa /línea activa.
- N+1 : 1 placa / línea de reserva por N placas / líneas activas.
- 1:1 :1 placa / línea de reserva ,que se usa normalmente para cursar trafico de baja prioridad, reemplaza en caso de falla a 1 placa / línea activa.
- 1:N : 1 placa / línea de reserva ,que se usa normalmente para cursar trafico de baja prioridad, reemplaza en caso de falla a una de N placas / líneas activas.

## 2) Tipos de protección

La ITU-T definió una nueva terminología para los diferentes tipos de protección con la idea de unificar criterios entre los distintos proveedores.

Se utilizan las protecciones APS, EPS y PPS y dentro de los nuevos términos de protección se encuentran: MS-SPRING, MS-DPRING, SNC-P /I, SNC-P /N, etc.

### Protección A.P.S.:

La A.P.S. o Automatic Protection Switching actúa cuando hay una falla en la conexión de línea que está activa pasando a una conexión de reserva.

La conmutación APS puede ser causada por falla en la línea o por falla de hardware. En los equipos SDH esta protección se aplica a los agregados y a los tributarios ópticos.

La APS permite dos modos de operación, estos son:

**Bidireccional:** En este modo la falla en una dirección de la línea activa, determina el uso de la línea de reserva en ambas direcciones.

**Unidireccional:** En este modo la línea de reserva se usa sólo en la dirección donde se ocurrió la falla.

La APS es del tipo NO REVERTIVA, es decir, que no vuelve al estado inicial luego de desaparecer la falla que provocó la conmutación.

Ejemplo de protección APS:

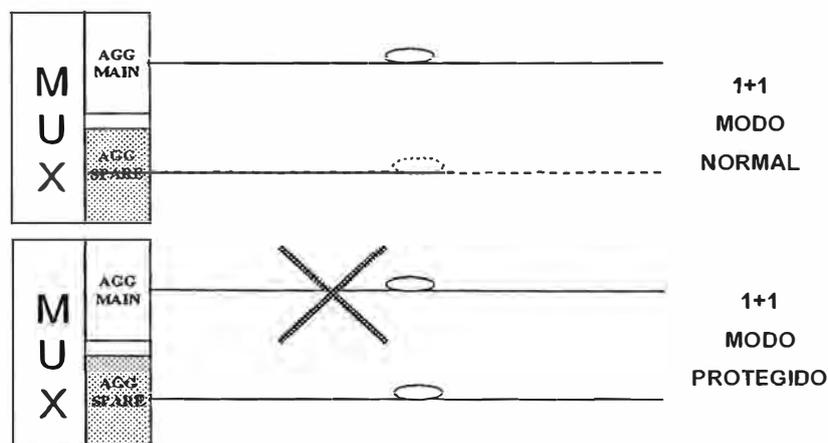


Fig. 01.28 A.P.S. 1+1

### Protección E.P.S.

La EPS o Equipment Protection Switching se utiliza para proteger las placas en caso de falla interna en la unidad.

La EPS puede ser:

**Revertiva** : Vuelve al estado inicial al recomponerse la falla luego de un tiempo de restablecimiento (W.T.R.= Wait Time to Restore) seteado previamente. (caso placas de tributarios)

**No revertiva:** No vuelve al estado inicial luego de recomponerse la falla (caso placas de sincronismo y matrices)

Ejemplo de EPS:

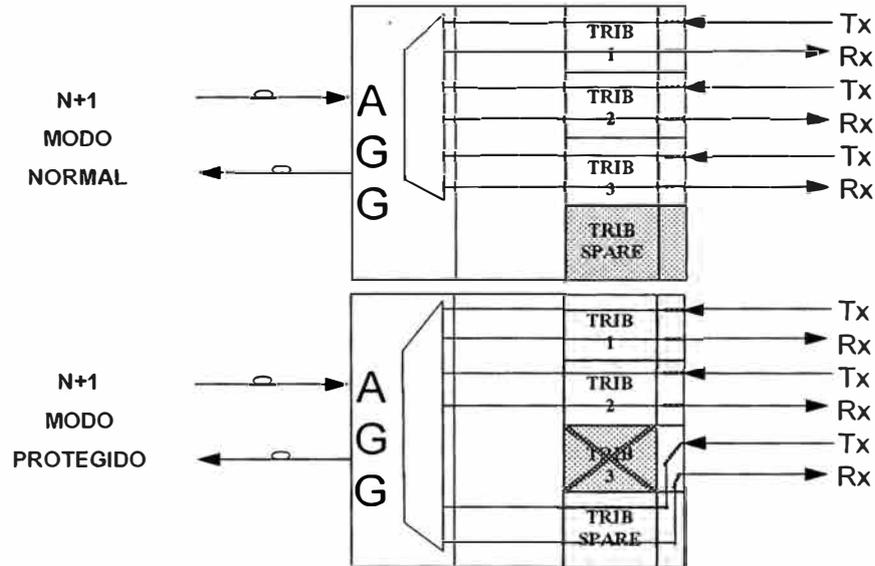


Fig. 1.29 E.P.S. N+1

### Protección PPS (SNC-P):

La protección PPS o Path Protection Switching se utiliza en anillos. La conmutación se produce en el lado recepción del equipo, cuando hay una falla en el trayecto del circuito. La transmisión se realiza hacia los dos lados y es la recepción la que debe seleccionar de que lado tomará la señal.

La P.P.S. se realiza a nivel de VC4, TU12 o TU3.

En la nueva terminología de protección ITU-T define a la P.P.S. como SNC-P (Sub-Network Connection Protection).

La P.P.S. puede ser .

**Revertiva** : Vuelve al estado inicial al recomponerse la falla en el trayecto .

**No revertiva:** No vuelve al estado inicial luego de recomponerse la falla

Ejemplo P.P.S.:

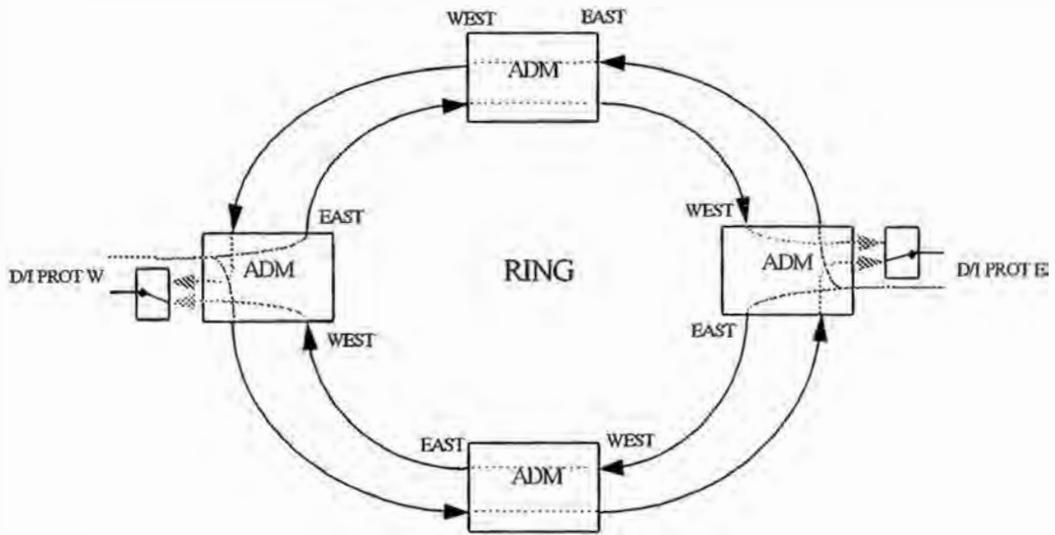


Fig. 1.30 P.P.S. en anillo STM-N

### 1.3 Multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM)

#### 1.3.1 Desarrollo de la tecnología DWDM

WDM empezó a finales de la década de 1980 usando las dos longitudes de onda muy espaciadas, 1310 nm y 1550 nm, a veces llamado WDM de banda ancha. Una de las fibras se usa para transmitir en un sentido y la otra en el sentido contrario. Es la disposición más eficiente y la que se encuentra normalmente en los sistemas DWDM. [6]

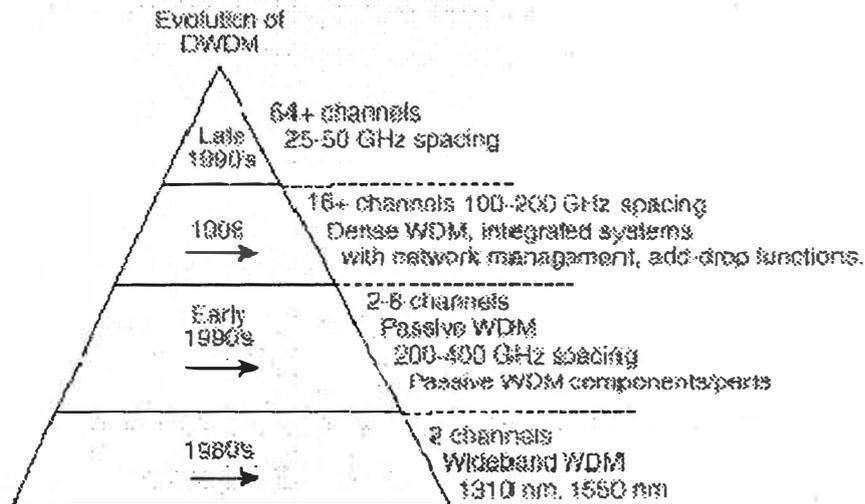


Fig. 1.31 Evolución de DWDM

A inicios de la década de 1990 vino la segunda generación de WDM, a veces llamada WDM de banda estrecha en que se usaban de 2 a 8 canales. Ahora estos canales están espaciados en un intervalo de unos 400 Ghz en la ventana de 1550nm. A mediados de la década de 1990 los sistemas DWDM que estaban emergiendo consistían de 16 a 40 canales y un espaciado de 100 a 200 Ghz. A finales de la década de 1990 los sistemas DWDM evolucionaron hasta el punto de que son capaces de tener 64 a 160 canales en paralelo y espaciados cada 50 o 25 Ghz.

El incremento de la densidad de los canales de la tecnología DWDM ha tenido un dramático impacto en la capacidad de transporte de la fibra, En 1995 cuando los primeros sistemas de 10 Gbps aparecieron, la tasa de incremento en capacidad fue de un múltiplo lineal de cuatro veces cada cuatro años en cuatro años.

#### 1.3.2 DWDM - Recomendaciones ITU-T (ex CCITT)

#### 1.3.3 Principios de DWDM

##### a) General

SDH/SONET TDM toma las señales síncronas y asíncronas y las multiplexa a una velocidad de transmisión más alta con una sola longitud de onda sobre fibra. Las señales

de entrada pueden tener que ser convertidas de eléctricas a ópticas o de ópticas a eléctricas y vuelta a ópticas antes de ser multiplexadas. WDM toma varias señales ópticas, las mapea en longitudes de onda individuales y multiplexa las longitudes de onda en una fibra. A continuación algunas otras características de WDM

### **b) Características de DWDM**

Desde la perspectiva técnica y económica, la posibilidad de suministrar potencialmente una capacidad de transmisión ilimitada es la ventaja más obvia de la tecnología DWDM. La actual inversión en fibra no solo puede ser preservada sino también optimizada con al menos un factor igual a 32. A medida que la demanda cambia, se puede añadir más capacidad, ya sea actualizando el equipamiento ya sea aumentando el número de longitudes de onda de la fibra sin coste de actualización.

Aparte del ancho de banda, las ventajas técnicas más convincentes del DWDM son las siguientes:

- **Transparencia.** Porque el DWDM es una arquitectura de nivel físico, que puede transportar transparentemente TDM (SDH) y formatos de datos tales como ATM, Gigabit Ethernet, ESCON y Fibre Channel con interfaces abiertas sobre un nivel físico común.
- **Escalabilidad.** El DWDM puede hacer que la abundancia de fibra en MAN y redes empresariales, permita cubrir rápidamente los aumentos de demanda de ancho de banda de los enlaces punto a punto o de los anillos SDH /SONET actuales.
- **Aprovisionamiento dinámico.** El aprovisionamiento rápido, simple y dinámico de las conexiones de red dan a los proveedores la posibilidad de suministrar servicios de banda ancha en días en vez de meses.

### **1.3.4 Arquitectura funcional DWDM**

#### **a) DWDM en término de un modelo de capas**

La emergencia del DWDM es uno de los fenómenos más recientes e importantes en el desarrollo de la tecnología de transmisión por fibra óptica. A continuación se presenta el modelo de capas, nivel definido por ITU especialmente para describir DWDM. [7]

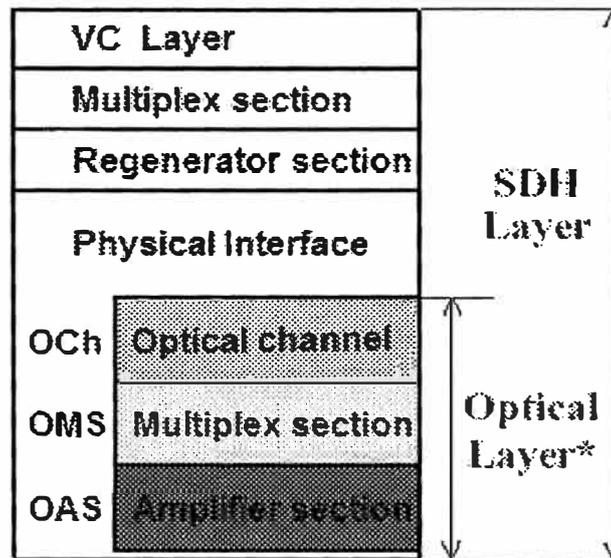


Fig. 1.32 El modelo de capas DWDM

### b) Esquema funcional DWDM

En su corazón, el DWDM consta de un pequeño número de funciones de nivel físico. Cada canal funciona con una longitud de onda específica. La longitud de onda se expresa (usualmente en nanómetros) como un punto absoluto en el espectro electromagnético. La luz efectiva a una determinada longitud de onda se confina estrechamente alrededor de su longitud de onda central.

El sistema realiza las siguientes funciones principales:

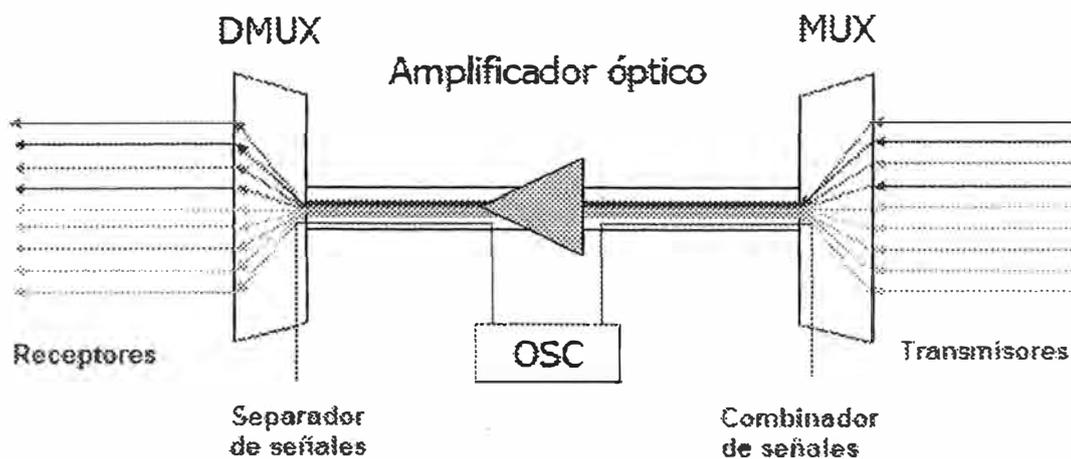


Fig. 1.33 Esquema funcional DWDM

- Generación de la señal. La fuente, un láser de estado sólido, debe suministrar una luz estable dentro de un ancho de banda específico y estrecho, que transporta los datos digitales modulados como una señal analógica. Esta función lo realizan los transponders.

- **Combinación de señales.** Los modernos sistemas DWDM emplean multiplexadores para combinar las señales. Hay alguna pérdida inherente asociada a la multiplexación y demultiplexación. Esta pérdida depende del número de canales pero se puede mitigar con amplificadores ópticos que amplifican todas las longitudes de onda a la vez sin conversión eléctrica. Esta función lo realiza el multiplexor óptico.
- **Transmisión de señales.** Los efectos de diafonía y la degradación o pérdida de la señal óptica deben tenerse en consideración en la transmisión por fibra óptica. Estos efectos pueden ser minimizados mediante el control de las variables tales como el espaciado entre canales, la tolerancia de la longitud de onda, y los niveles de potencia del láser. En un enlace de la transmisión, se puede necesitar una amplificación de la señal.
- **Separación de las señales recibidas.** En el lado del receptor, las señales multiplexadas deben ser separadas. Aunque esta tarea parece ser simplemente el opuesto a la combinación de señales, en la actualidad es técnicamente más difícil. Esta función lo realiza el demultiplexor.
- **Recepción de señales.** La señal demultiplexada es recibida por un fotodetector. Además de estas funciones, un sistema DWDM también debe estar equipado con interfaces en el lado cliente para recibir la señal de entrada. Esta función la realizan los transponders.

### c) Factores que limitan la transmisión

La transmisión de luz en fibra óptica presenta varios factores que limitan la transmisión y podemos clasificarlos en efectos lineales y no-lineales. [9]

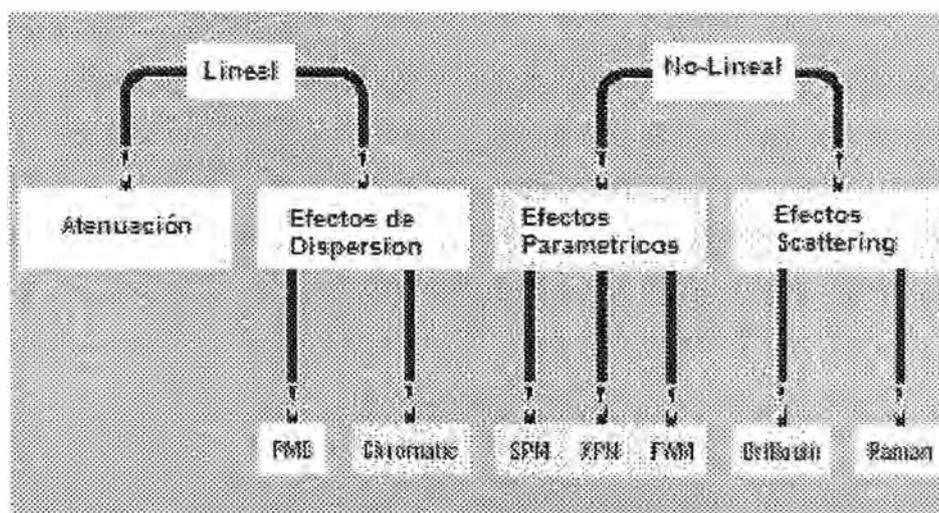


Fig. 1.34 Factores que limitan la transmisión en las fibras monomodo

## 1) Efectos Lineales

- **Atenuación.** Caída de la fuerza de la señal, o pérdida de la potencia de luz, a medida que la señal se propaga por la fibra.
- **Dispersión cromática.** Ampliación de los pulsos de luz a medida que viaja por la fibra.
- **Dispersión en modo polarizado (PMD).** El efecto de los diferentes modos de polarización (horizontal y vertical) viajan a velocidades diferentes debido a imperfecciones de la fibra.

## 2) Efectos no lineales

Efectos acumulativos de la interacción de la luz con el material a medida que viaja por la fibra, cuyos resultados son cambios de la longitud de onda e interacciones entre longitudes de onda. Cada uno de estos efectos tiene varias causas, y no todas ellas afectan al DWDM.

### Efectos parametricos

- **SPM (Self Phase Modulation).** Producido por las altas intensidades de la señal, la luz induce cambios locales variables en el índice de refracción de la fibra conocido como el efecto Kerr, que produce una variación de fase en el mismo canal.
- **XPM (Cross Phase Modulation).** Es cuando un canal tiene la fase de otro canal y es producido por el efecto Kerr pero solo se presenta de la transmisión de múltiples canales sobre la misma fibra.
- **FWM (Four Wave Mixing).** Debido a la interferencia la frecuencia de tres señales las cuales inducen señales no deseadas conocidas como canales fantasmas. Este fenómeno es crítico cuando se usan fibras DSF.

### Efectos Scattering

- **SRS (Stimulated Raman Scattering).** Es la transferencia de potencia de una longitud de onda más pequeña a una más grande. Las ondas de las señales de luz interactúan con fotones ópticos en la fibra de silicio y son expandidas en todas las direcciones.
- **SBS (Stimulated Brillouin Scattering).** Es el proceso inverso, mejor dicho de contracción al actuar con fotones ópticos lo cual causa la pérdida de potencia como en el caso anterior.

## d) Componentes ópticos y Operación

DWDM es una tecnología a utilizar en el corazón de una red de transporte óptico. Los componentes esenciales del DWDM se pueden clasificar por su posición en el sistema de la manera siguiente:

- En el lado transmisor, láseres con longitud de onda precisa y estable.
- En el enlace, fibra óptica con bajas pérdidas y buen rendimiento en la transmisión en el espectro de la longitud de onda relevante además de amplificadores ópticos de ganancia plana para amplificar la señal en distancias largas.
- En el lado receptor, fotodetectores y demultiplexadores ópticos usando filtros de poco espesor o elementos difractivos.
- Multiplexores ópticos add/drop y componentes cross-connect ópticos.

Estos y otros componentes, junto a sus tecnologías asociadas, se discuten a continuación. Mientras mucha de esta información, particularmente los pros y contras de varias tecnologías competidoras, puede ser de más importancia al diseñador del sistema que al usuario final o al diseñador de la red, también puede ser de interés a otros lectores. A continuación se hace una breve descripción de las mismas haciendo énfasis en cuanto a sus aplicaciones en DWDM. [5]

### 1) Fibras ópticas

Los diseños de la fibra monomodo han evolucionado a medida que pasan los años. Los tres principales tipos y sus especificaciones ITU-T son:

- NDSF (Non-Dispersion-Shifted Fiber), G 652
- DSF (Dispersion-Shifted Fiber), G 653
- NZ-DSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber), G 655

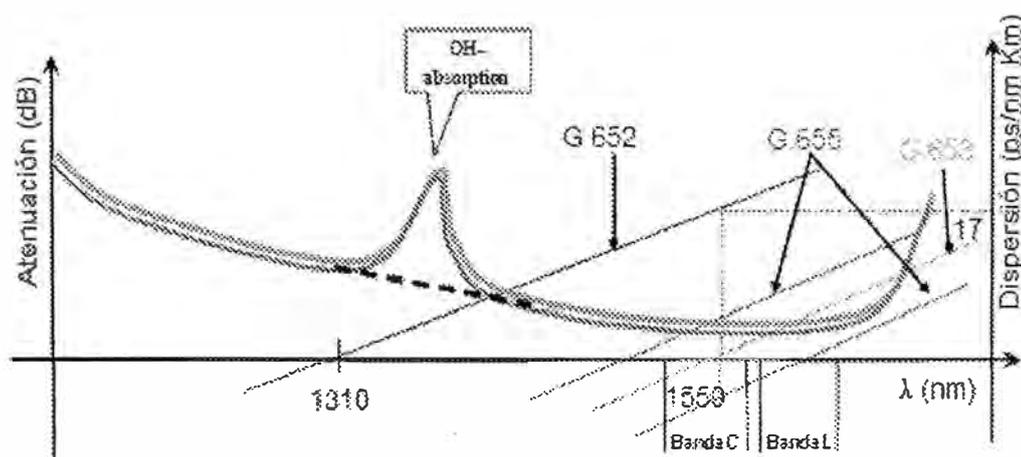


Fig. 1.35 Dispersión VS Tipo de Fibra

Como se ha explicado antes, hay cuatro ventanas dentro del espectro infrarrojo que ha sido explotado en la transmisión por fibra óptica. La primera ventana, cerca de los 850nm, se usó casi exclusivamente para aplicaciones multimodo de distancias cortas. Las fibras NDSF (G.652), comúnmente llamadas la fibra monomodo estándar, se diseñó para usarla en la segunda ventana, cerca de los 1310 nm. Para optimizar el rendimiento de la fibra

óptica en esta ventana, la fibra fue diseñada de forma que la dispersión cromática fuera cercana a cero para una longitud de onda de 1310nm.

A medida que la fibra óptica se hacía más común y aumentaban las necesidades de un mayor ancho de banda y mayores distancias, se explotó una tercera ventana, cercana a los 1550nm, en transmisión monomodo. La tercera ventana o banda C, ofreció dos ventajas: tenía mucha menos atenuación y su frecuencia de operación era la misma que la de los nuevos amplificadores dopados con erbio (EDFAs). Sin embargo sus características de dispersión lo limitan severamente. Esto se solucionó con el uso de láseres de una banda más estrecha y más potentes. Pero debido a que la tercera ventana tiene menor atenuación que la ventana de 1310 nm, los fabricantes se han decantado por el tipo DSF (G.553), que desplaza el punto de dispersión cero a la región de los 1550 nm. Aunque ahora esta solución significa que la atenuación óptica menor y el punto de dispersión cero coinciden con la ventana de 1550 nm, resulta que hay no linealidades destructivas en la fibra óptica cerca del punto de distorsión cero y no hay compensación efectiva a ello. Por esta limitación, estas fibras no sirven para aplicaciones DWDM.

El tercer tipo, NZ-DSF, está diseñado específicamente para cubrir las necesidades de las aplicaciones DWDM. La dirección de este diseño es hacer la dispersión baja en la región de 1550 nm, pero no cero. Efectivamente esta estrategia introduce una cantidad controlada de dispersión, que cuenta los efectos no lineales tales como la mezcla de cuatro ondas que pueden perjudicar el rendimiento de los sistemas DWDM.

### **Aplicaciones de las fibras ópticas según su tipo**

Los principales tipos de fibra monomodo y sus aplicaciones se puede resumir de la manera siguiente:

- Fibra NDSF (fibra estándar SM) – Está en el 95% de las instalaciones; útil para TDM (un canal) y usa la región de los 1310nm o DWDM en la región de los 1550nm (con compensadores de dispersión). Este tipo de fibra también puede soportar 10Gigabit Ethernet hasta 300 m.
- Fibra DSF – Útil para TDM en la región de los 1550 nm pero no útil para DWDM en esta región.
- Fibra NZ-DSF – Buena para TDM y DWDM en la región de los 1550 nm.
- Fibras de nueva generación – Incluyen tipos que permiten a la energía viajar incluso en el “cladding”, creando una pequeña cantidad de dispersión para contrarrestar la mezcla de cuatro ondas, y las fibras de dispersión planas que permiten el uso de longitudes de onda mayores que la óptima sin ensanchamiento del pulso.

## 2) Fuentes de luz y detectores

Los emisores de luz y los detectores de luz son dispositivos activos en extremos opuestos de un sistema de transmisión óptico. Las fuentes de luz, o los emisores de luz, son dispositivos en el lado transmisor que convierten las señales eléctricas a pulsos de luz. El proceso de esta conversión, o modulación, se puede llevar a cabo mediante modulación externa de una onda continua de luz o usando un dispositivo que puede generar luz modulada directamente. Los detectores de luz realizan la función opuesta de la función de los emisores de luz. Son dispositivos opto-electrónicos en el lado receptor que convierten los pulsos de luz en señales eléctricas.

### Emisores de luz – LEDs y láseres

Se usan dos tipos generales de dispositivos emisores de luz en transmisión óptica, los LEDs (Light-Emitting Diodes) y los láseres (diodos o semiconductores).

Los LEDs son dispositivos lentos, útiles para velocidades inferiores a 1 Gbps, tienen un espectro relativamente ancho, y transmiten la luz en un cono relativamente ancho. Estos dispositivos baratos se usan a menudo en comunicaciones con fibra multimodo.

Por otro lado los láseres semiconductores tienen como característica un rendimiento mejor y se pueden utilizar en aplicaciones con fibra monomodo.

Los requerimientos para láseres incluyen una longitud de onda precisa, un ancho del espectro estrecho, suficiente potencia, y control del chirp (el cambio en frecuencia de una señal en el tiempo). Los láseres semiconductores satisfacen bien los tres primeros requerimientos. Sin embargo el chirp puede estar afectado por los medios usados para modular la señal. En los láseres modulados directamente, la modulación de la luz que representa el dato digital se hace internamente. Con la modulación externa, la modulación se hace en un dispositivo externo. Cuando los láseres semiconductores son modulados directamente, el chirp puede llegar a ser un factor limitador a altas velocidades (por encima de 10 Gbps). Por otro lado la modulación externa ayuda a limitar el chirp.

Los tipos de láseres semiconductores habituales son: láseres monolíticos Fabry-Perot, y láseres con realimentación distribuida (DFB). El segundo tipo se adapta bien a las aplicaciones DWDM, emitiendo una luz casi monocromática, que es capaz de funcionar a altas velocidades, tiene una favorable relación señal/ruido, y tiene una linealidad superior. Los láseres DFB también tienen frecuencias centradas en la región de los 1310 nm y de 1520 a 1565 nm. El último rango de longitud de onda es compatible con EDFAs. Hay muchos otros tipos y subtipos de láseres. Los láseres sintonizables de espectro estrecho son útiles, pero su rango de sintonización está limitado a 100-200 GHz aproximadamente.

En desarrollo hay un amplio espectro de láseres sintonizables, que serán importantes en las redes ópticas con conmutación dinámica.

### **Detectores de luz**

En el lado receptor, es necesario recuperar las señales transmitidas a diferentes longitudes de onda en la fibra. Debido a que por naturaleza los fotodetectores son dispositivos de banda ancha, las señales ópticas son desmultiplexadas antes del detector. Se utilizan fundamentalmente dos tipos de fotodetectores, el fotodiodo PIN (Positive-Intrinsic-Negative) y el fotodiodo de avalancha (APD). El fotodiodo PIN trabaja bajo principios similares a los LEDs pero al revés, es decir, la luz es absorbida más que emitida, y los fotones se convierten en electrones en una relación 1:1. Los APDs son dispositivos similares a los fotodiodos PIN, pero su ganancia se obtiene a través de un proceso de amplificación. Un fotón actuando en el dispositivo libera muchos electrones. Los fotodiodos PIN tienen muchas ventajas, incluido su coste y su fiabilidad, pero los APDs tienen mayor sensibilidad de recepción y mayor exactitud. Sin embargo los APDs son más caros que los fotodiodos PIN, y pueden tener requerimientos de intensidad mayores y más sensibles a la temperatura.

### **3) Amplificadores ópticos**

Debido a la atenuación, hay límites en cuanto a la longitud de un segmento de fibra. Si se sobrepasan es necesaria una regeneración de la señal. Antes de la existencia de los amplificadores ópticos (OA), había que haber un repetidor por cada señal transmitida, como se ha visto anteriormente. El OA ha hecho posible el hecho de poder amplificar todas las longitudes de onda a la vez y sin conversión OEO (Optical-Electric-Optical). Además de ser usados en enlaces ópticos, los amplificadores ópticos también se pueden usar para aumentar la potencia de la señal después de la multiplexación o antes de la desmultiplexación, dado que ambos procesos introducen pérdidas en el sistema. [6]

#### **Amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA)**

El EDFA fue una tecnología clave para hacer posible el transporte de gran cantidad de información de que es capaz el DWDM de transmitir a largas distancias, Al mismo tiempo, ha sido un gran hito en el desarrollo de otros elementos y tecnologías de las redes.

El erbio es un raro elemento que, cuando se excita, emite luz alrededor de  $1,54\mu\text{m}$  – la longitud de onda de menor pérdida para las fibras ópticas usadas en DWDM.

En la Fig. siguiente se ve un diagrama simplificado de un EDFA. Una señal débil entra en una fibra dopada con erbio, en que la luz a  $980\text{nm}$  ó  $1480\text{nm}$  es inyectada mediante una bomba láser. De esta manera la luz inyectada estimula los átomos de erbio que liberan su energía almacenada como luz adicional de  $1550\text{nm}$ . Como este proceso continua por la

fibra, la señal se refuerza. Las emisiones espontáneas en el EFDA también añaden ruido a la señal como se ve en la Fig..

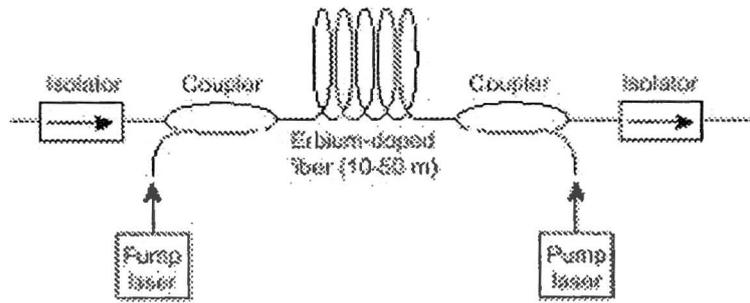


Fig. 1.36 Amplificador EDFA

Los parámetros clave de los amplificadores ópticos son la ganancia, la igualdad de ganancia, el nivel de ruido y la potencia de salida. Típicamente los EFDA son capaces de ganancias de hasta 30dB ó más y potencias de salida de +17dB o más. Sin embargo los parámetros clave cuando se selecciona un EFDA son el bajo ruido y la igualdad de la ganancia. La ganancia es plana porque todas las señales deben ser amplificadas uniformemente. Mientras la ganancia de señal suministrada por la tecnología EFDA depende inherentemente de la longitud de onda, se puede corregir con filtros de ganancia plana. A menudo estos filtros se construyen en modernos EFDA.

El bajo ruido es un requerimiento porque el ruido es amplificado con la señal. Dado que su efecto es acumulativo, y no se puede filtrar, la relación señal /ruido es un factor limitativo en el número de amplificadores que se pueden concatenar y, por tanto, la longitud del enlace de una sola fibra. En la práctica, las señales pueden viajar hasta 120 km. entre amplificadores. A distancias superiores de 600 a 1000Km. la señal se debe regenerar. Esto es porque el amplificador óptico solo amplifica las señales y no realiza las funciones 3R (Reshape, Retime, Retransmit). Los EFDA se pueden emplear en las bandas C y L.

#### 4) Multiplexadores y demultiplexadores

Dado que los sistemas DWDM envían señales de varias fuentes sobre una sola fibra, debemos incluir algunos dispositivos para combinar las señales de entrada. Esto lo hace un multiplexador, que toma las longitudes de onda ópticas de múltiples fibras y las convierte en un solo rayo. En el extremo receptor, el sistema debe poder separar los componentes de luz así que puedan ser discretamente detectados.

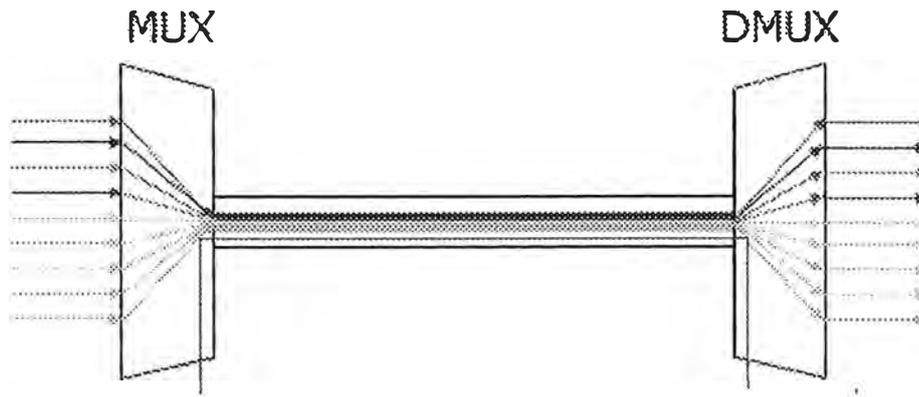


Fig. 1.37 Multiplexador y desmultiplexador DWDM

Los desmultiplexadores realizan esta función desglosando el rayo receptor en sus componentes de longitud de onda y acoplándolos a la fibra individual. La desmultiplexación se debe hacer antes de la detección de la luz, porque los fotodetectores inherentemente son dispositivos de banda ancha y no pueden selectivamente detectar una sola longitud de onda.

En un sistema unidireccional, hay un multiplexor en el lado emisor y un desmultiplexor en el lado receptor. Se requerirían dos sistemas en cada extremo en las comunicaciones bidireccionales, y se necesitarían dos fibras separadas. En un sistema bidireccional, hay un multiplexador / desmultiplexador en cada extremo y la comunicación es sobre un solo par de fibras.

Los multiplexadores y los desmultiplexador pueden ser de diseño pasivo o activo. El diseño pasivo se basa en prismas, rejillas de difracción, o filtros mientras que el diseño activo combina dispositivos pasivos y filtros sintonizables. Los principales retos en estos dispositivos es minimizar la diafonía y maximizar la separación de canal. La diafonía es una medida de cuanto están separados los canales, mientras que la separación de canales se refiere a la posibilidad de distinguir cada longitud de onda.

## 5) Transponders (OTU's)

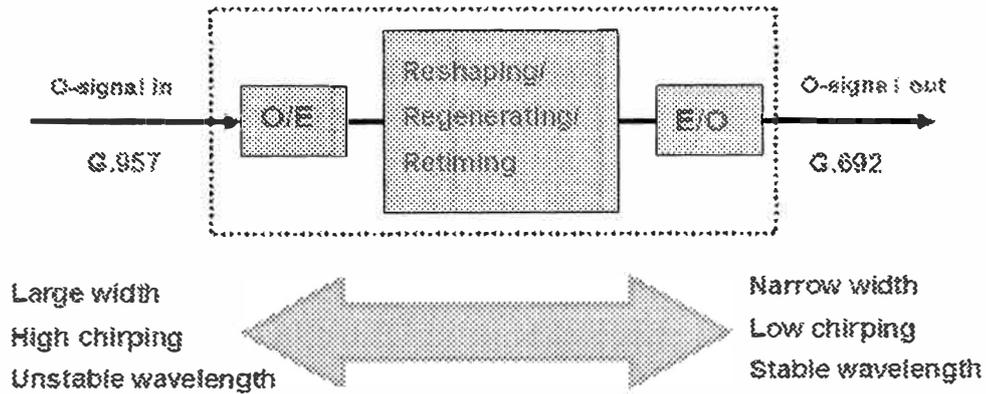


Fig. 1.38 Transponder

Dentro de un sistema DWDM, un transponder convierte la señal óptica cliente a una señal eléctrica y realiza las funciones 3R (Reshape, Retime, Retransmit). Esta señal eléctrica se usa entonces para controlar un láser WDM. Cada transponder dentro del sistema convierte su señal cliente a una longitud de onda ligeramente distinta. Las longitudes de onda de todos los transponders del sistema son entonces multiplexadas ópticamente. En la recepción del sistema DWDM, tiene lugar el proceso inverso. Las longitudes de onda individuales son filtradas desde las fibras multiplexadas y alimentan a los transponders individuales, que convierten la señal a eléctrica y la dirigen a través de un interface estándar al cliente. Los futuros diseños incluyen interfaces pasivas, que aceptan la luz según las normas ITU directamente de un conmutador o enrutador conectado a una interfaz óptica.

#### e) Operación extremo a extremo de un sistema DWDM

La Fig. muestra una operación extremo a extremo de un sistema DWDM unidireccional.

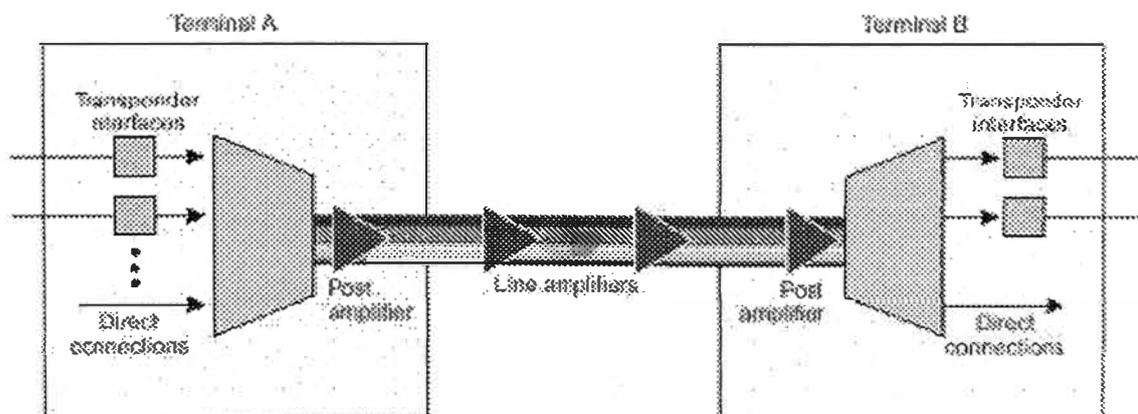


Fig. 1.39 Anatomía de un sistema DWDM

Los pasos siguientes describen el sistema de la Fig. anterior:

1. El transponder acepta la entrada en la forma de un láser estándar monomodo o multimodo. La entrada puede venir de distinto medio físico y diferentes protocolos y tipos de tráfico.
2. La longitud de onda de cada señal de entrada es mapeada a una longitud de onda DWDM.
3. Las longitudes de onda DWDM del transponder son multiplexadas en una sola señal óptica y enviada por a la fibra. El sistema también puede incluir la posibilidad de aceptar señales ópticas directas al multiplexador; tales señales pueden venir, por ejemplo, de un satélite.
4. Un post-amplificador refuerza la señal óptica a la salida del sistema (opcional) 5. Los amplificadores ópticos se usan a lo largo del enlace óptico según necesidades (opcional)
6. Un pre-amplificador refuerza la señal antes de que entre en un extremo del sistema (opcional)
7. La señal de entrada es desmultiplexada en lambdas DWDM individuales (o longitudes de onda)
8. Cada lambda individual DWDM es mapeada según el tipo de salida requerido (por ejemplo, fibra monomodo OC-48) y enviada a través del transponder.

#### **f) Elementos de la red**

Son formados de la combinación de componentes ópticos, estos se forman de acuerdo a los requerimientos del cliente. Así, se puede formar tres tipos de elementos (tipos de nodo). [8]

##### **Multiplexadores terminales ópticos (OTM)**

El OTM está localizado en las estaciones terminales. En el lado de transmisión es usado para convertir señales de longitud de onda no-standard de los equipos de acceso (ejemplo, equipos SDH ) en señales de longitud standard que cumplen con la recomendación G.692, luego se multiplexa en una fibra para amplificar y transmitir.

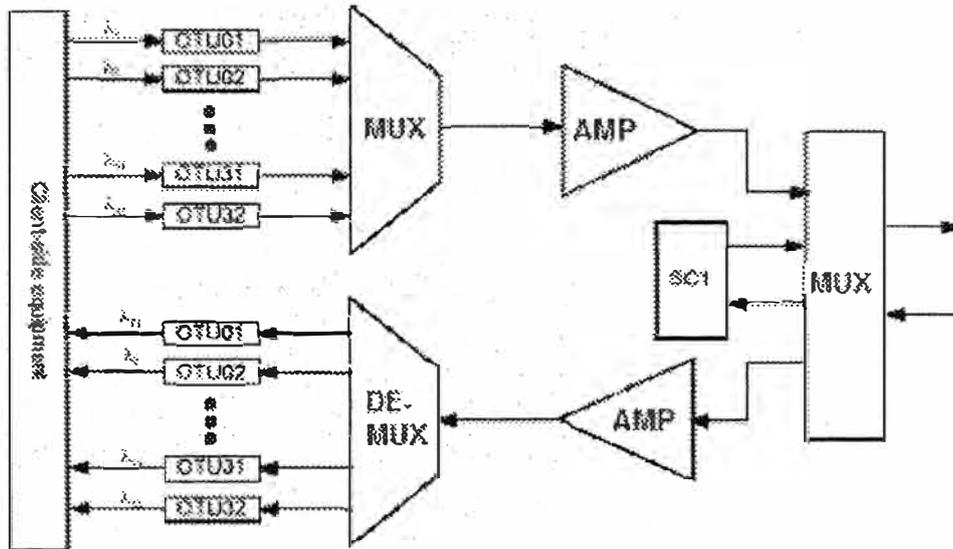


Fig. 1.40 OTM usando un MUX/DEMUX de  $32\lambda$

### Multiplexadores ópticos add/drop (OADM)

Entre puntos de multiplexación y demultiplexación de los sistemas DWDM, hay un área en la que existen múltiples longitudes de onda. A menudo es deseable remover o insertar una o más longitudes de onda en algún punto del enlace. Un multiplexador óptico add/drop (OADM) realiza esta función. Mas que combinar o separar todas las longitudes de onda, los OADM pueden remover algunas mientras dejan pasar las restantes. Los OADMs son una parte clave en cuanto a las redes ópticas. Los OADMs son similares en muchos aspectos a los ADM de SONET, excepto que solamente las longitudes de onda ópticas son añadidas o removidas, y no hay conversión de la señal de óptico a eléctrico.

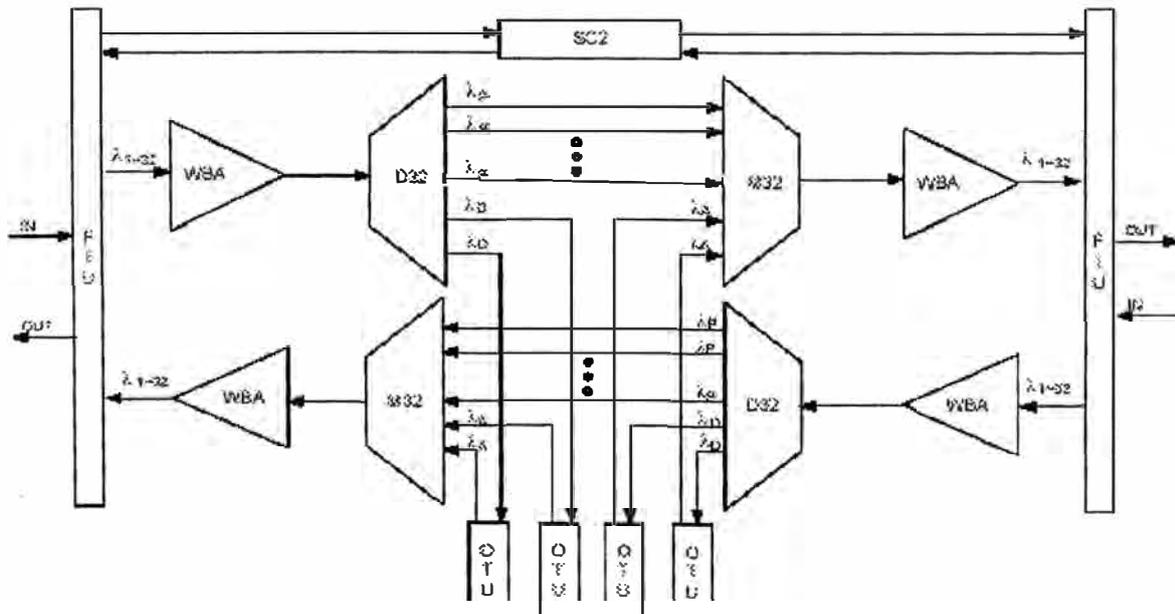


Fig. 1.41 OADM usando un MUX/DEMUX de  $32\lambda$

(Se extrae/adiciona  $2\lambda$  con el uso de 4 OTU's)

### Amplificador de línea óptico (OLA)

Los OLA's ofrecen amplificación óptica en cada dirección de transmisión, en la siguiente Fig. se observa que se extrae el canal de supervisión (SC2), luego amplifica la señal principal y finalmente lo adiciona el canal de supervisión con los datos modificados para seguir transmitiendo la señal ya amplificada.

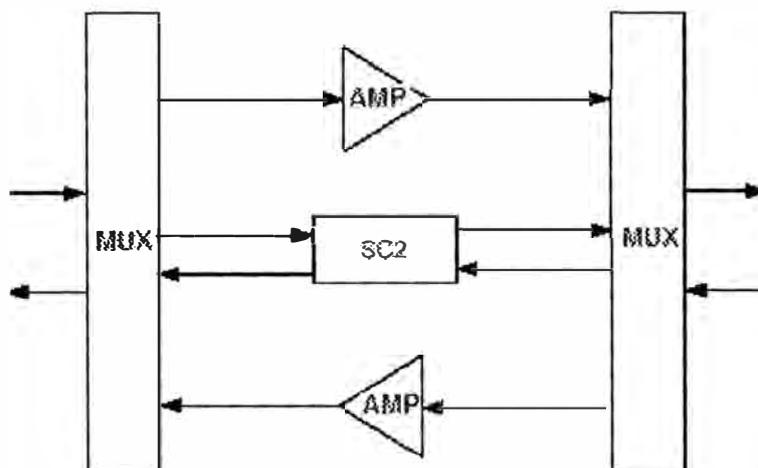


Fig. 1.42 OLA

### g) Topologías para DWDM

Las arquitecturas de red se basan en muchos factores, incluyendo tipos de aplicaciones y protocolos, distancias, uso y formas de acceso, y topologías de redes antiguas. En el mercado metropolitano, por ejemplo, las topologías punto a punto se pueden usar para conectar distintas ubicaciones de empresas, las topologías en anillo para conectar sucursales entre si, y para accesos residenciales, y topologías malladas se pueden usar para conexiones entre POP y conexiones a la "backbone" de larga distancia. En efecto, el nivel óptico debe ser capaz de soportar muchas tecnologías y, porque hay desarrollos impredecibles en esta area, estas topologías deben ser flexibles.

#### Topologías punto a punto

Las topologías se pueden implementar con o sin OADM. Estas redes se caracterizan por las ultra velocidades por canal (10 a 40 Gbps), alta integridad y fiabilidad de la señal, y restauración rápida del camino. En las redes de larga distancia, la distancia entre el transmisor y el receptor puede ser de varios centenares de kilómetros, y el número necesario de amplificadores entre extremos puede ser menor de 10.



Fig. 1.43 Topología punto-a-punto

## Topología en anillo

Los anillos es la arquitectura más común en las redes metropolitanas con varias decenas de kilómetros.

Las configuraciones en anillo se pueden instalar con uno o más sistemas DWDM, soportando cualquier tipo de tráfico. En los nodos OADMs, las longitudes de onda seleccionadas son removidas o añadidas, mientras que las demás pasan de forma transparente. De esta manera, las arquitecturas en anillo permiten que los nodos en anillo suministren acceso a elementos de red como enrutadores, conmutadores o servidores con añadir o remover canales de longitud de onda en el dominio óptico. Sin embargo incrementando el número de OADMs, la señal tiene más pérdidas y se puede necesitar amplificación.

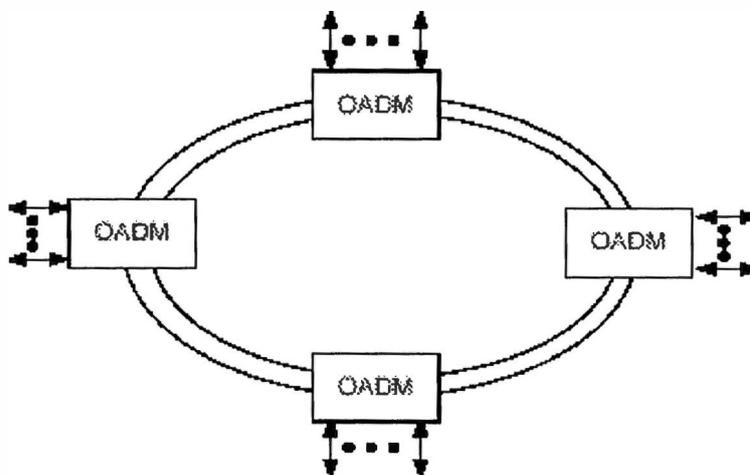


Fig. 1.44 Topología en anillo

## h) Esquemas de protección para DWDM

Los esquemas de protección se basan en la redundancia del nivel de sistema, tarjeta o fibra.

### 1) Protección de canal óptico

La protección de canal óptico es un mecanismo de protección a nivel de longitud de onda. El concepto es idéntico a la protección usada en los sistemas SDH. En el lado de transmisión la misma señal es alimentada respectivamente en el canal principal y en el de protección. En el lado de recepción el canal con mejor calidad es elegido.

#### Protección de canal óptico por OTU's dobles

Algunas OTU's tienen la función de doble alimentación y selección de la mejor señal en el lado de recepción. Esta configuración se usa cuando se tiene protección a nivel de fibra óptica en una topología punto-a-punto ó en una topología en anillo.

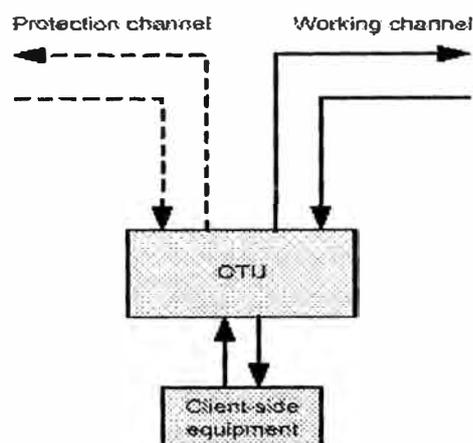


Fig. 1.45 Protección de canal óptico por OTU's dobles

Protección de canal óptico por tarjetas que tienen doble salida en diferente longitud de onda (SCS) para lo cual es necesario dos OTU's, una principal y la otra de protección. Esta configuración se usa cuando se tiene topologías punto-a-punto sin protección de fibra ó en una topología en anillo.

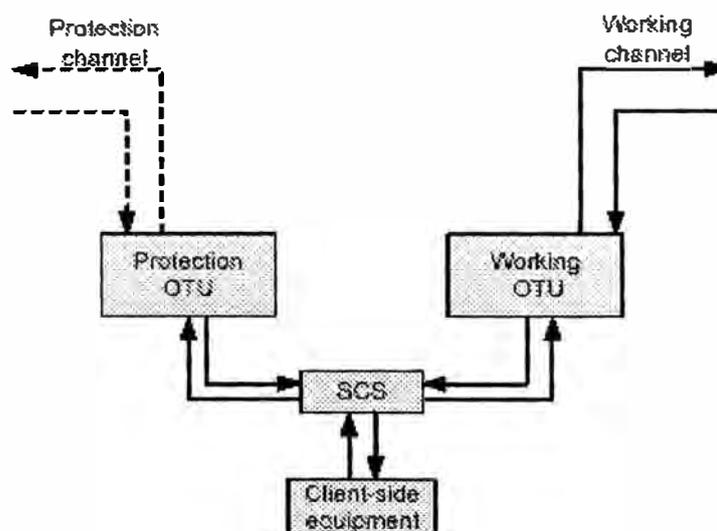


Fig. 1.46 Protección usando la tarjeta SCS

Protección de canal óptico usando una tarjeta spliter (OLP-Optical line protection). La tarjeta OLP divide la señal como cualquier spliter. Esta configuración se usa cuando se tiene protección a nivel de fibra óptica en una topología punto-a-punto ó en una topología en anillo.

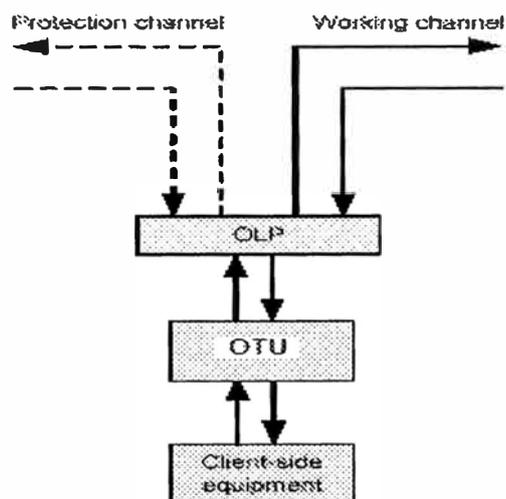


Fig. 1.47 Protección usando la tarjeta OLP

## 2) Protección de línea óptica

Se provee la protección de línea 1+1 con la ayuda de una tarjeta splitter (OLP)

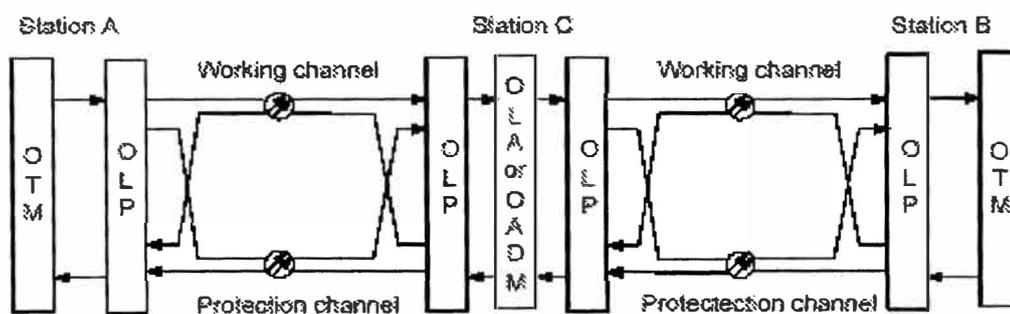


Fig. 1.48 Protección de línea óptica

En la Fig. se muestra que un enlace de fibra óptica trabaja como ruta principal y la otra como protección. En caso de alguna anomalía en la ruta principal, el tráfico automáticamente conmutará a la ruta de protección a través de la OLP.

## CAPÍTULO II

### REDES DE TRANSPORTE DE NUEVA GENERACIÓN

#### 2.1 SDH de Nueva Generación (NG-SDH)

La Jerarquía Digital Síncrona (SDH) es una técnica estandarizada, madura y muy conocida. Desde que este fue inicialmente optimizado para el transporte de los servicios TDM, una capacidad rígida de la carga tanto como una jerarquía de multiplexación de tasa fija fue definida. Estas características actuales de la SDH causan problemas bien conocidos mientras transporta señales de datos que son inherentemente ráfagas (especialmente con la utilización eficiente del ancho de banda). Desde que el tráfico de datos superó el tráfico de voz en las redes centrales esos problemas llegaron a ser más y más significativos e imponen nuevos requerimientos a las redes de transporte, especialmente a los sistemas SDH los cuales son la base para muchas redes de transporte en el mundo. La técnica SDH de nueva generación trata de cubrir todos estos requerimientos. El protocolo GFP, la Concatenación Virtual (VC) y el Esquema de Ajuste de la Capacidad del Enlace (LCAS) son los conceptos mas recientes. [10]

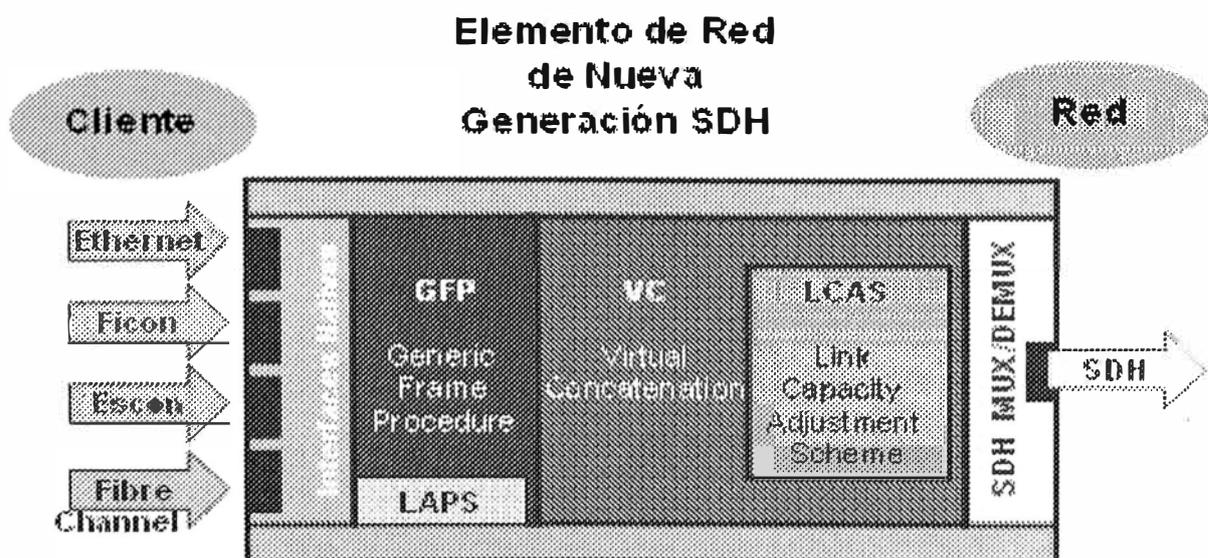


Fig. 2.1 Elemento de Red de Nueva Generación SDH

**2.1.1 GFP (Generic Frame Procedure)**

Estandarizado por la ITU-T G.7041, el GFP es un mecanismo genérico creado para adaptar múltiples tipos de servicios de capa 1 (Fibre Channel, Gigabit Ethernet, ESCON, FICON) y 2 (PPP, IP/MPLS, Ethernet, RPR), en un canal de transmisión bit-síncrono (WDM) ó octeto-síncrono (SDH,OTN) de forma flexible, robusta y con poco "overhead". Se trata de un algoritmo simple y estable compatible con cualquier servicio de nivel superior y con cualquier tecnología de redes. Como no requiere nuevos equipos en el backbone, solamente en los extremos. El GFP crea nuevas oportunidades tecnológicas y económicas.

Para el presente estudio, SDH utiliza este protocolo para adaptar diversos tipos de servicio como Ethernet, FastEthernet, GigaEthemet, Escon, Ficon, Fiber Channel, etc. sobre SDH. Para ello hace uso de los contenedores virtuales (VC's) propios del SDH tradicional.

**2.1.2 Trama GFP**

Las cuatro partes que comprende la trama del procedimiento GFP son: el encabezado principal "Core Header", el encabezado de carga útil "Payload Headers", la información de la carga del cliente "Client Payload Information" y el campo opcional para detección de errores "Optional Payload FCS".

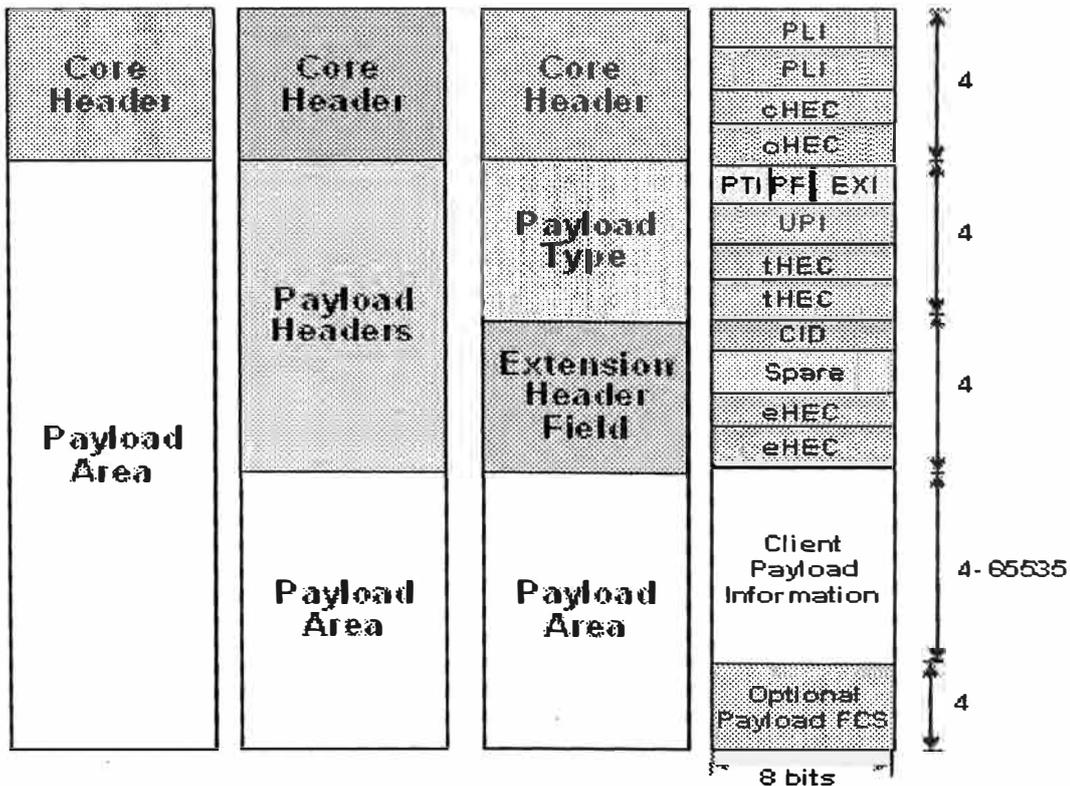


Fig. 2.2 Trama GFP

### a) Core Header

“Core Header” define la longitud de la trama GFP (Payload Área) y se encarga de la detección y corrección de errores con el código CRC-16 de esta cabecera. Su longitud es de 4bytes.

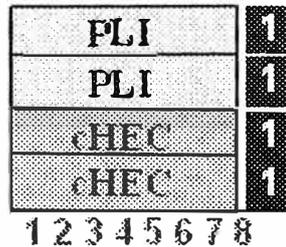


Fig. 2.3 Core Header

#### PLI - PDU Length Indicator

Campo de 16 bits conteniendo un número binario que representa la longitud del campo **payload area**:

mín.: 4 bytes (PLI = 00 04hex)

max.: 65535 byte (PLI = FF FFhex)

PLI = 0hex a 3hex reservado para tramas de control, son usados para la gestión de la conexión GFP.

Solo una trama de control esta especificado PLI= 00 00hex, la trama IDLE. Estas tramas IDLE son necesarias para el proceso de adaptación de la tasa y garantizar el proceso de sincronización de tramas..

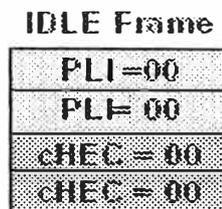


Fig. 2.4 Trama IDLE (PLI=00 00hex)

#### cHEC - Core Header Error Control

Contiene un código de control de errores CRC-16 para proteger la integridad del “Core Header”.

Posibilita:

Corrección de 1 bit errado

Detección de múltiplos bits errados

### b) Payload Headers

“Payload headers” define el tipo de información transportada, ya sean tramas de administración o de clientes, detecta y corrige errores. Su longitud es de 4-64bytes.

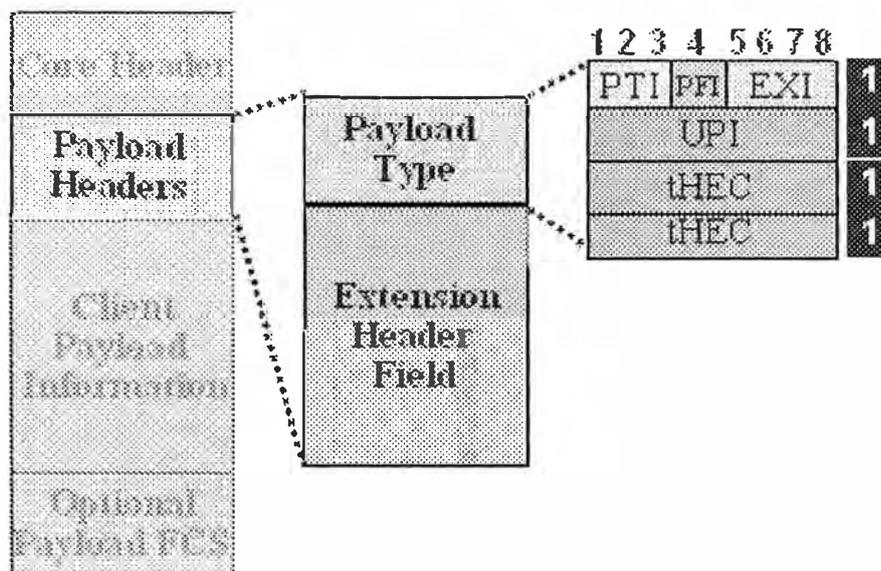


Fig. 2.5 Payload headers

### 1) Payload Type

Campo de 4bytes.

#### PTI - Payload Type Identifier

Campo de 3 bits que indica el tipo de trama del cliente GFP. Actualmente definidos:

PTI = 000 ⇒ Datos del cliente

PTI = 100 ⇒ Administración del cliente

PTI = Otros ⇒ Reservado

#### Tramas de datos del cliente (PTI=000)

Tramas de datos del cliente actualmente definidos:

UPI = 00 & FF ⇒ Reserved and not available

UPI = 01hex ⇒ Ethernet (frame-mapped)

UPI = 02hex ⇒ PPP (frame-mapped)

UPI = 03hex ⇒ Fibre Channel (transparent-mapped)

UPI = 04hex ⇒ FICON (transparent-mapped)

UPI = 05hex ⇒ ESCON (transparent-mapped)

UPI = 06hex ⇒ Gigabit Ethernet (transparent-mapped)

UPI = 07hex ⇒ Reserved for future use

UPI = 08hex ⇒ Multiple-Access Protocol over SDH (frame-mapped)

UPI = 09 to EF ⇒ Reserved for future use

UPI = F0 to FE ⇒ Reserved for proprietary use

#### Tramas de administración del cliente (PTI=100)

Tramas de administración del cliente actualmente definidos:

UPI = 00 & FFhex ⇒ Reserved and not available

UPI = 01hex ( Loss of Client Signal (Client Signal Fail)

UPI = 02hex ( Loss of Character Synchronization

UPI = 03 a FEhex ( For future use

PFI - Payload FCS Indicator

Campo de 1 bit que indica:

PFI = 1 ( Presencia del campo opcional (FCS) del payload

PFI = 0 ( Ausencia del campo opcional (FCS) del payload

EXI - Extension Header Identifier

Campo de 4 bits que indica el formato del campo "Extension Header". Actualmente definidos:

EXI = 0000 ( Null Extension Header

EXI = 0001 ( Linear Frame

EXI = 0010 ( Ring Frame

EXI = Otros ( Reserved

UPI - User Payload Identifier

Esta funcionalidad provee un mecanismo para enviar información de gestión desde el extremo origen del GFP hasta el destino. Campo de 8 bits que identifica el tipo de cliente/servicio encapsulado en el "Client Payload Field" del GFP.

La interpretación de los valores del UPI es diferente para:

tHEC - Type Header Error Control

Campo de 16 bits para control de errores. Corrige 1 bit errado ó detecta múltiples errores de bit en el campo "Payload Type"

## 2) Extensión Header Field

Soporta cabeceras de nivel 2 (data link) específicos de la tecnología (ejemplo: virtual link identifier, source/destination adress, Clase de Servicio). Posee de 0 a 60bytes de longitud y es indicado en el campo Type (EXI).

Tres variantes del Extension Header están actualmente definidas:

EXI = 0000 ⇔ Null Extension Header

Se aplica a conFig.ciones lógicas punto a punto, donde la vía de transporte es dedicada a **un solo cliente** o servicio. El campo "Extension Header" no estará presente

EXI = 0001 ⇔ Linear Frame

Se aplica a conFig.ciones lineales (punto a punto), donde **varios clientes independientes** o servicios son agregados **a una única vía de transporte**

EXI = 0010 ⇒ Ring Frame

Se aplica a conFig.ciones en anillo, aunque actualmente se encuentra en estudio.

EXI = Otros ⇒ Reserved

### Ejemplo

Multiplexación campo a campo de clientes distintos en una conFig.ción lineal (punto a punto). Se observa que tramas IDLE se usan en el caso de no haber señal del cliente.

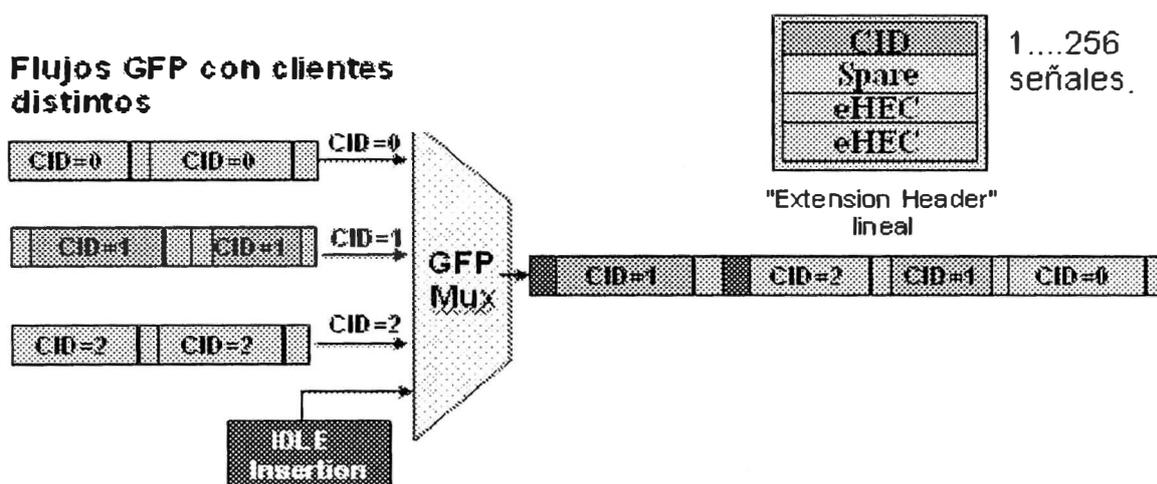


Fig. 2.6 Flujos GFP con clientes distintos en una conFig.ción lineal

### c) CPI - Client Payload Information Field

Campo de longitud variable el cual contiene información útil de cliente/servicio. Máxima longitud: 65535 bytes de payload.

#### GFP-F (frame mapped)

CPI transporta tramas de cliente.

Procedimiento GFP basado en tramas "Frame-based" (GFP-F), mapea los bytes de las tramas de la señal a transmitir trama por trama, por lo que hace un uso mejor del ancho de banda. Sin embargo, sólo es capaz de soportar protocolos orientados a tramas, con adaptación particular para cada uno de los protocolos soportados. Aplicaciones que se mapean con este tipo de procedimiento son Ethernet, Fast Ethernet, Giga Ethernet, IP, etc.

#### GFP-T (transparent mapped)

CPI transporta caracteres de cliente (unframed).

Procedimiento GFP transparente (GFP-T), mapea toda la señal ("todos los bits, útiles o no") bloque por bloque en tramas GFP de tamaño fijo (periódica), lo que hace que sea totalmente transparente, con tiempos muy bajos de latencia de transmisión de la señal y sencilla implantación pero con consumo de mayores anchos de banda. Las aplicaciones

que se mapean con este tipo de procedimiento son Fibre Channel, FICON, ESCON, Ethernet, DVB, etc.

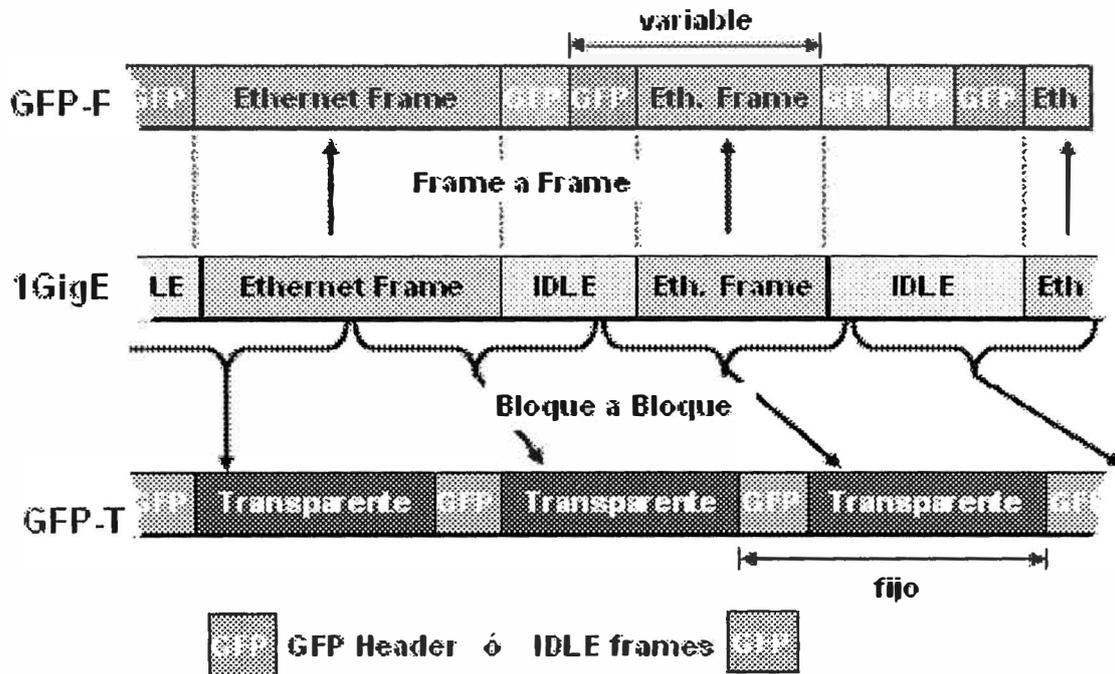


Fig. 2.7 Procedimientos de mapeo en GFP: GFP-F y GFP-T

Cuadro comparativo de algunas características soportadas por los procedimientos GFP.

CARACTERISTICA SOPORTADA	GFP-F	GFP-T
Transparente a códigos de control de trama	NO	SI
Optimización de ancho de banda	SI	NO
Permite monitorización de cada trama	SI	NO
Minimiza la latencia para servicios sensibles al retardo	NO	SI
Permite opcionalmente corrección de errores	NO	SI
Permite compartir el canal de transmisión entre varios clientes	SI	SI

#### d) Optional Payload FCS

La trama opcional FCS detecta errores, protege el campo de "client payload information". Campo de 32bit's (4bytes) y estará presente si PFI=1 en el campo Type (Payload Header)

Aplicaciones del procedimiento de trama genérico GFP. [11]

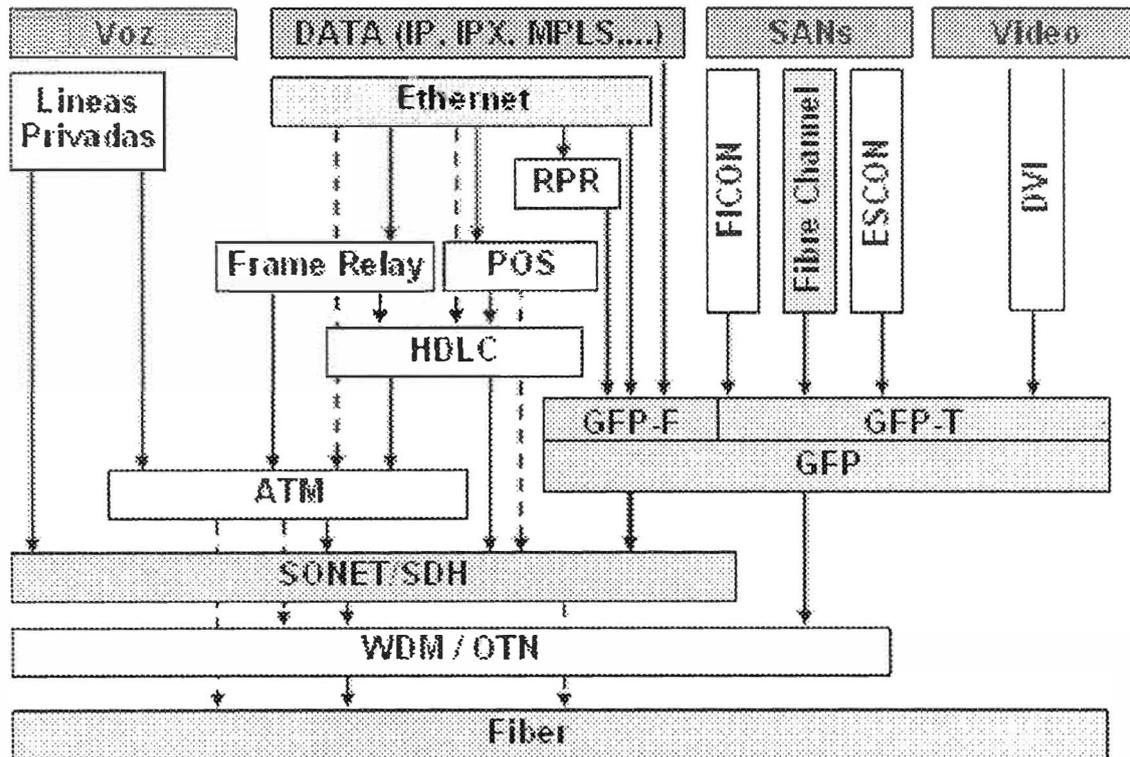
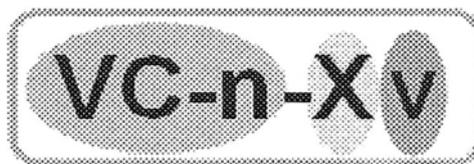


Fig. 2.8 Nuevas aplicaciones de GFP

### 2.1.3 VCAT (Virtual Concatenation)

VCAT (Virtual Concatenation), patrocinada por la ITU-T G.707 para contenedores SDH y por la ANSI T.105 para contenedores SONET. Al contrario de la Concatenación Contigua, la Concatenación Virtual esta patrocinada para contenedores de bajo y alto orden (VC-n-Xv, donde  $n=1,2,3,4$  y  $X=1,2,\dots$ ) Se puede concatenar hasta 64 VCs de bajo orden (LO-VC) o hasta 256 VCs de alto orden (HO-VC), creando una estructura compatible con cada tipo de señal a ser transportado. [10]



La concatenación virtual permite la concatenación elástica de varias cargas SDH. Esto provee el uso efectivo de la capacidad del SDH. Cargas concatenadas virtualmente constituyen un grupo de concatenación virtual (VCG) y los miembros del VCG, como opuestos a la concatenación contigua, podrían no residir en la misma trama STM-N continuamente. Ellos podrían residir en diferentes interfaces STM-N y ser tratados dentro de la misma red separadamente e independientemente. Esto sigue a que, ellos podrían llegar al destino a través de varias rutas y los nodos intermedios no necesitan manejar concatenación virtual. La concatenación virtual debería ser implementada solo en los nodos de terminación de ruta. Esta característica hace que el despliegue de la

concatenación virtual se realice en los equipos SDH actuales de las posibles redes existentes.

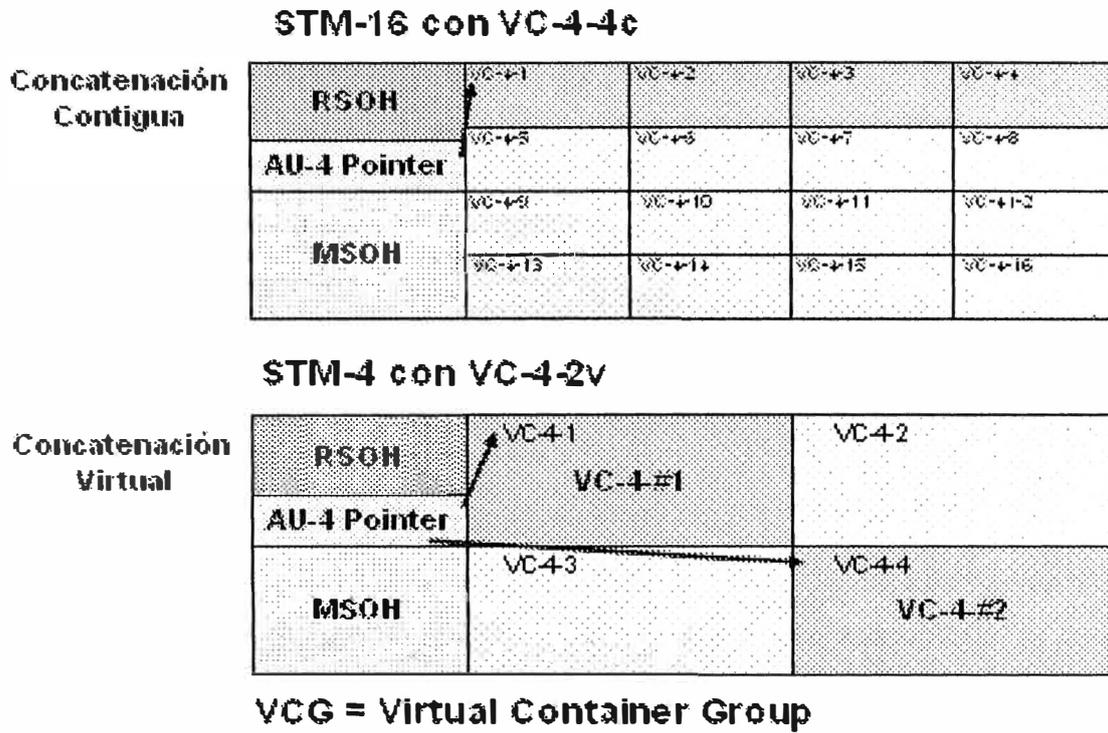


Fig. 2.9 Concatenación Contigua VS Concatenación Virtual

De otro lado, debería ser recordado que las diferencias en retardo de las señales concatenada individual podría ocurrir debido al procesamiento del puntero en los nodos intermedios. La compensación de las diferencias de retardo es manejado por los nodos terminales.

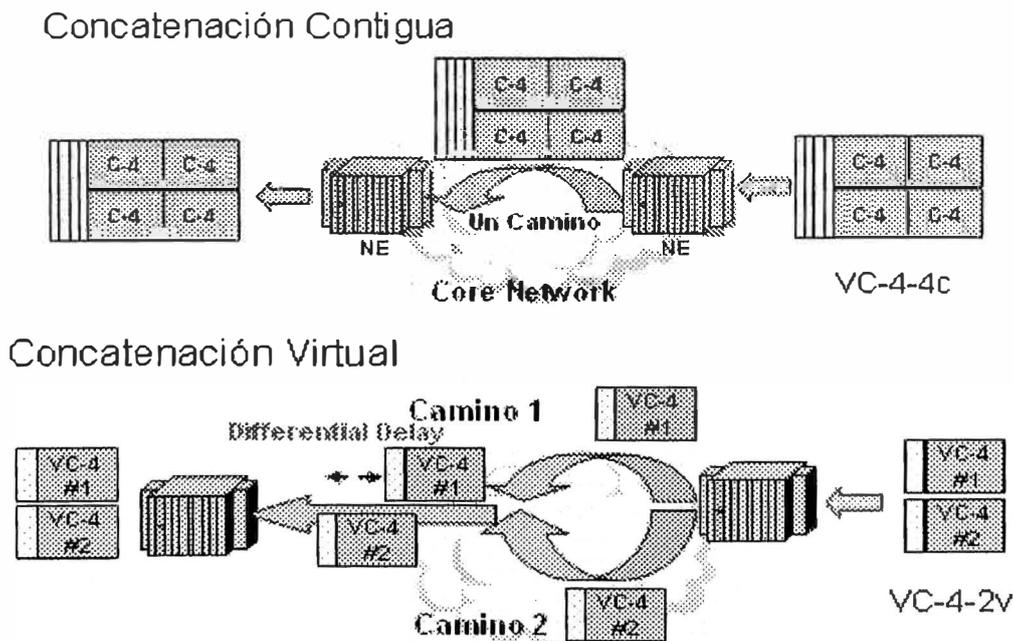


Fig. 2.10 Concatenación Contigua VS Concatenación Virtual 2

Otra ventaja de la concatenación virtual es su posibilidad para dividir el ancho de banda STM-N dentro de varias sub-velocidades. Cada una de ellas podría ser usada para el acomodo de diferentes servicios. El ancho de banda del STM-N podría ser compartido, por ejemplo, por ambos servicios de telefonía y señales de datos.

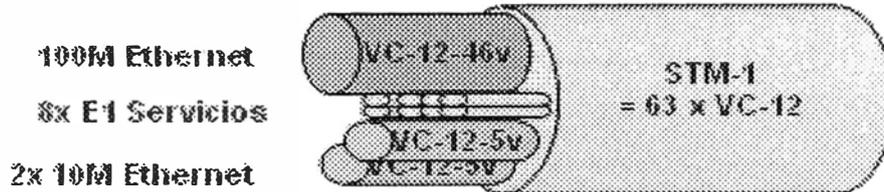


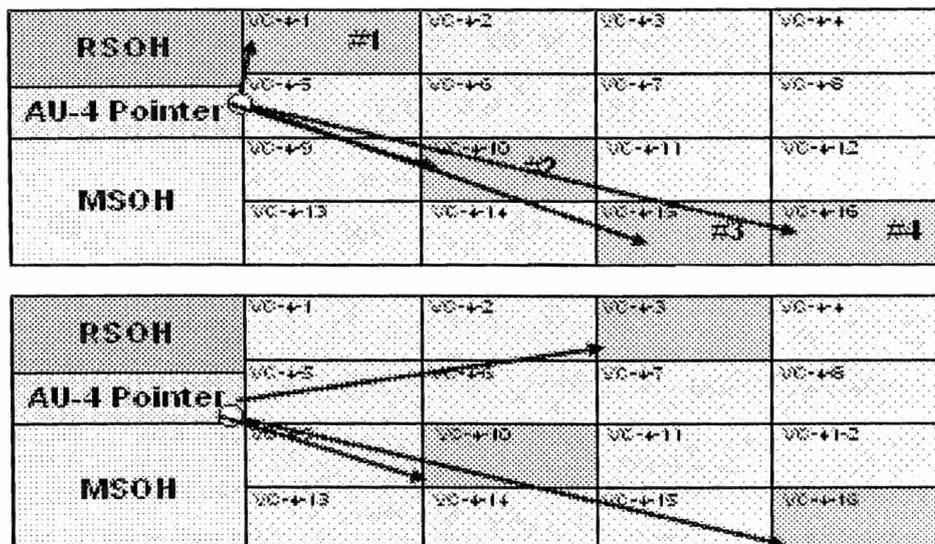
Fig. 2.11 Facilidad de dividir el ancho de banda en VCAT

## a) Aplicaciones

### Ejemplo 1

Un ejemplo con frecuencia mencionado de un uso práctico de concatenación virtual es Gigabit Ethernet (GbE). Se requiere un VC-4-16c (STM-16) para acomodar la señal GbE en la velocidad completa bajo el SDH convencional o clásico. Sin embargo, la capacidad de 1.4Gbps es desperdiciado. De otro lado, la concatenación contigua de cuatro contenedores VC-4-4c provee tan poca capacidad para acomodar toda la señal GbE. La mejor solución podría ser la concatenación de siete VC-4. Esto es posible con la concatenación virtual, el ancho de banda de 1.05Gbps es provisto por VC-4-7v. VCG es apropiado para señales GbE.

### 2 x STM-16 con VC-4-7v



**VCG = Virtual Container Group**

Fig. 2.12 Concatenación Virtual VC-4-7v para 1GBE

## Ejemplo 2

Como proceder entonces si quisiéramos transmitir una señal Ethernet de 10 Mbps por un enlace SDH?

Un VC-12 no se puede usar pues es muy pequeño. La solución sería utilizar un VC-3, pero desperdiciaríamos aproximadamente 38Mbps. La solución óptima es usar concatenación virtual VC-12-5v con lo cual podemos concatenar 5xVC-12.

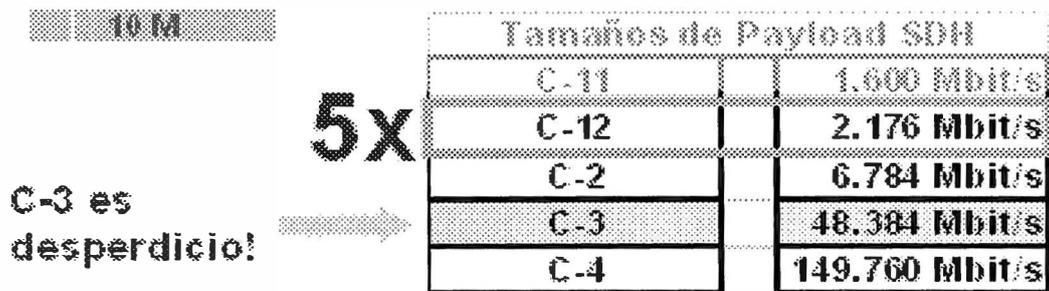


Fig. 2.13 Concatenación Virtual VC-12-5v para Ethernet (10Mbps).

Una operadora que tenga elementos de red con soportes de este tipo de tecnología podría tornar más eficiente sus recursos de red y aún ofrecer servicios diferenciados como la colocación del ancho de banda según-demanda y la colocación de varios servicios sobre una misma infraestructura. Veamos algunos ejemplos:

Tasa de Tx	Eficiencia sin VC	Usando VC
Ethernet (10M)	VC3 ⇒ 20%	VC-12-5v ⇒ 92%
Fast Ethernet (100M)	VC-4 ⇒ 67%	VC-12-46v ⇒ 100%
ESCON (200M)	VC-4-4c ⇒ 33%	VC-3-4v ⇒ 100%
Fibre Channel (800M)	VC-4-16c ⇒ 33%	VC-4-6v ⇒ 89%
Gigabit Ethernet (1G)	VC-4-16c ⇒ 42%	VC-4-7v ⇒ 85%

Fig. 2.14 Eficiencia de VCAT

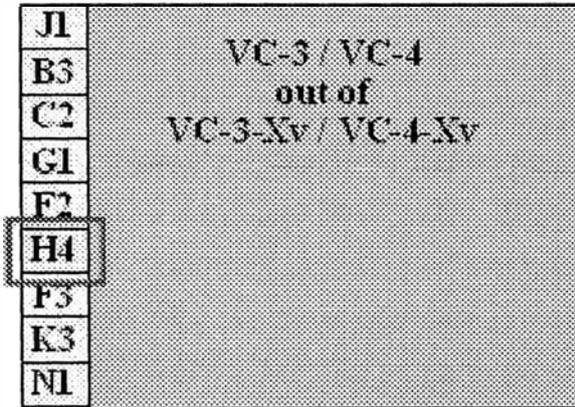
### 2.1.4 LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme)

La forma de tomar dinámica la tarifa de ajustes del ancho de banda esta patrocinada por la ITU-T 6.7042 una extensión para la Concatenación Virtual llamada LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme) [10]. El LCAS es un protocolo que actúa en los elementos de red periféricos (Edge NEs) es una forma de "handshaking" extremo a extremo en tiempo real, que negocia el ajuste de la capacidad del ancho de banda en forma dinámica sin interrumpir el servicio. Los paquetes de control del LCAS son transmitidas por los

bytes H4 (VC de alto orden) y K4 (VC de bajo orden) de la POH de la SDH y son transparentes en el "core" de la red.

### VC de Alto Orden

- Transmitido en el Byte H4
- Multi-trama compuesta por 16 tramas



### VC de Bajo Orden

- Transmitido por un bit del Byte K4
- Multi-trama compuesta por 32 tramas

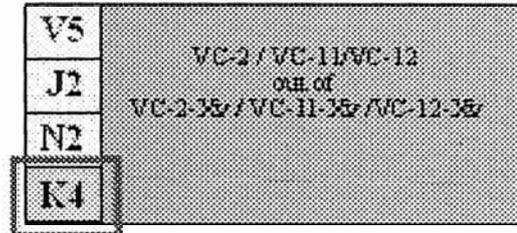


Fig. 2.15 Bytes H4 y K4

### a) Paquetes de control del LCAS

Los paquetes de Información (control) intercambiados por los NEs en los extremos, para el ajuste del ancho de banda, tienen la siguiente representación:

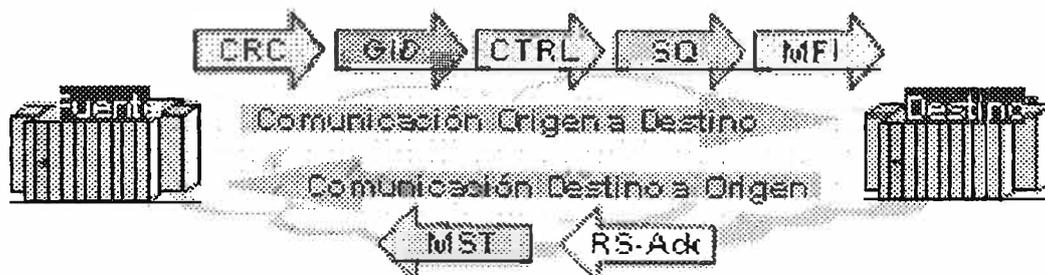
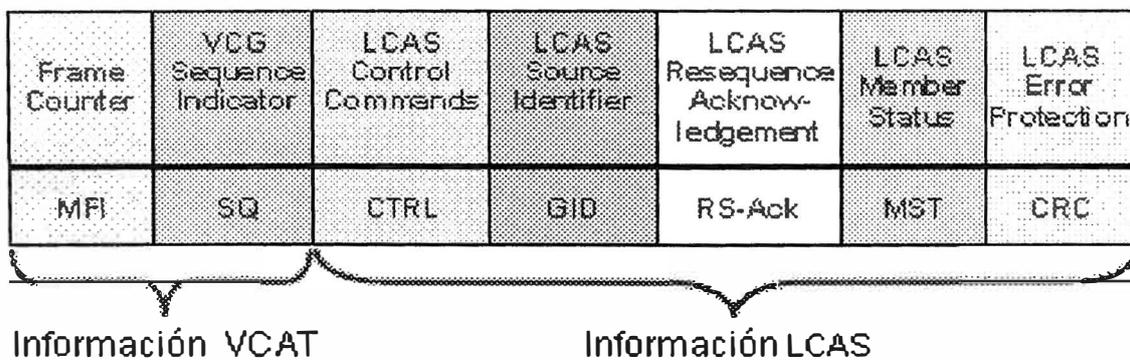


Fig. 2.16 Paquetes de control del LCAS

MFI (Multi-Frame Indicator)

Es un contador para distinguir varios VCGs\*, unos de los otros y es necesario para compensar el Delay Diferencial.

#### **SQ (Sequence Indicator)**

Es un contador para diferenciar cada container VC-n dentro del VCG\* y a la vez se usa para re-ordenar estos containers VC-n en el punto de llegada en caso de que ocurra delay diferencial.

#### **CTRL (LCAS "Control")**

Las palabras/comandos que muestran el status actual de los containers dentro de un VCG\* e inician alteraciones de banda son:

**FIXED** – container en el modo NON-LCAS

**ADD** - container que será adicionado a un VCG

**REMOVE** - container que será removido de un VCG

**NORM** - container que es parte de un VCG activo

**EOS** – último container de un VCG activo

**DNU** - container con fallo ("del not use")

#### **GID (Group Identification Bit)**

Es un mecanismo adicional de verificación para asegurar que todos los miembros de un VCG son parte del mismo grupo, en otras palabras le informa al receptor a cual VCG pertenece cada miembro.

#### **RS-Ack (Re-Sequence Acknowledgement)**

Es un mecanismo, por el cual el destino reporta al origen la detección de cualquier adición/eliminación de un VCG.

#### **MST (Member Status Field)**

Es un mecanismo, por el cual el destino reporta al origen que partes de un VCG están siendo recibidas correctamente(OK=0, FAIL=1).

#### **CRC (Cyclic Redundancy Check)**

Es un mecanismo de protección para la detección de errores de bit en los paquetes de control.

### **b) Aplicaciones**

Con LCAS es posible ofrecer servicios antes no visto como la colocación de banda según-demanda sin interrupción del servicio.

#### **Ejemplo 1**

Suponga que un cliente tenga una conexión a Internet de 6Mbps (VC-12-3v) y necesita una banda adicional de 2Mps por ejemplo: Este cliente puede contactar a su operadora y

solicitar el incremento vía teléfono, entonces la operadora proporcionará un VC-12 adicional vía el LCAS y el cliente no perderá la conexión.

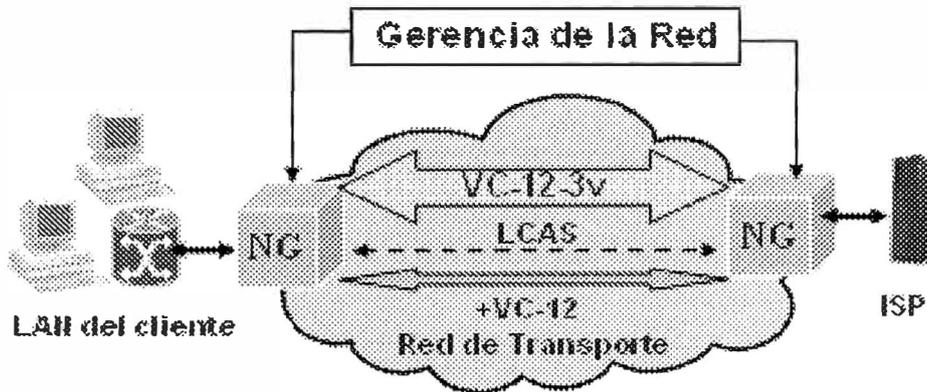


Fig. 2.17 Adición de un VC vía el LCAS

### Ejemplo 2

Es posible también ofrecer un ancho de banda agendado. Supongamos que un banco tenga contrato con un enlace de 100Mbps Ethernet para el servicio de "Virtual Local Area Network" entre su matriz y una agencia. El banco podrá contratar por ejemplo un enlace adicional de 900Mbps ESCON toda la noche, por una hora, para el "backup" de los datos de sus servidores. Esta sería una nueva forma de organizar los servicios de una operadora en horarios de bajo tráfico.

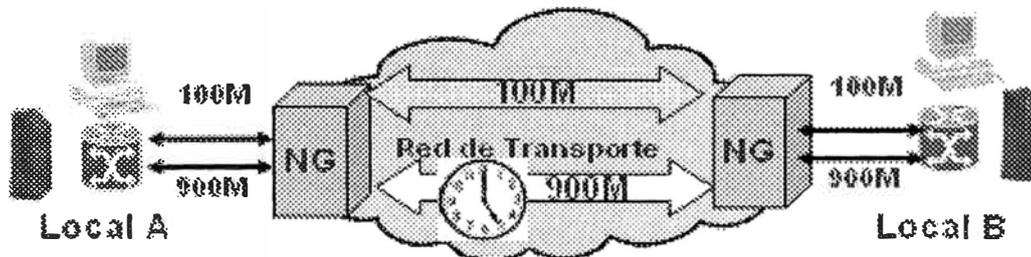


Fig. 2.18 Ancho de banda agendado vía el LCAS

### Ejemplo 3

Como un último ejemplo, podría existir un servicio de la colocación dinámica del ancho de banda, accionado por la utilización del enlace. Los VCs serían pre-provisionados y entrarían en operaciones conforme al aumento del volumen de tráfico del cliente. En el caso que el tráfico disminuya, los VCS dejarían de operar y se colocarían en "stand by" ó serían proporcionados a otros clientes. Al final el cliente solo pagaría por las bandas que realmente utilizó en una especie de "paga por el uso". En caso que haya sobre utilizado el ancho de banda esto puede ser tarifado aparte.

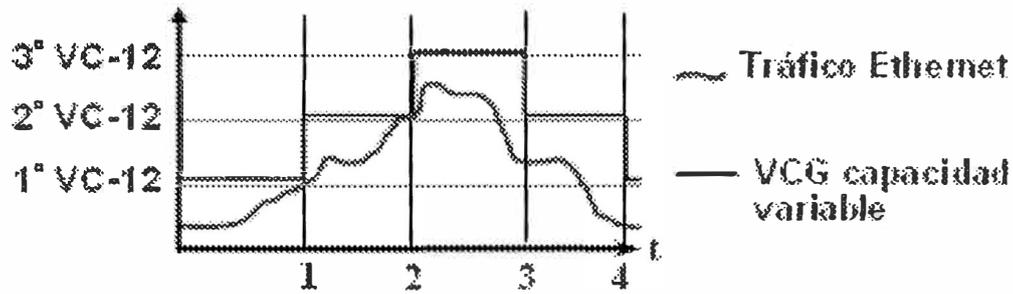


Fig. 2.19 Servicio de colocación dinámica del ancho de banda vía el LCAS

También, el LCAS automáticamente reducirá la capacidad si un miembro del VCG experimenta una falla en la red, e incrementará cuando la red se recupera. Cuando uno de los canales experimenta una falla, el canal fallado automáticamente será removido mientras que los otros canales se mantendrán todavía trabajando. Así, la disponibilidad del ancho de banda será más lenta pero seguirá en servicio y esto hace que disminuya la probabilidad de una falla de conexión completa en el sistema.

Los SLAs patrocinados podrían ser creados a partir de estos nuevos tipos de servicios y nuevas modalidades también podrían ser captadas con un mínimo de inversión.

## 2.2 OPTICAL TRANSPORT NETWORK (OTN)

Desde los 80, SONET/SDH ha cubierto las necesidades de satisfacer lo que el mercado necesita suministrando protección y controlando el rendimiento mientras soporta una mezcla transparente y flexible de protocolos de tráfico incluido IP, Fiber Channel, Ethernet y GFP.

El despliegue de las redes DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) en los últimos años sirvieron para incrementar el ancho de banda de la fibra existente, pero escasean severamente las capacidades de protección y de gestión inherentes a la tecnología SONET/SDH. Para soportar todos estos servicios (SDH/SONET, ATM, GFP) con mayor eficiencia y para al mismo tiempo implementar una mejor supervisión de la capa óptica con posibilidades de corrección de errores, fue definida por la ITU-T la recomendación G.709. [12]

La G.709 crea una nueva jerarquía para transporte en redes ópticas con mecanismos de supervisión de errores y alarmas más sofisticadas y con códigos de redundancia para la recuperación de errores, llamados FEC (Forward Error Correction) que puede dar una

ganancia de hasta 5dB en el trayecto. El FEC utilizado en la G.709 es calculado por el método de Reed Solomon y ocupa 1024 bytes de la trama de línea. La cabecera posee 64bytes y al área de la carga 15232bytes.

La gran ventaja de G.709, además de la implementación del FEC, es el hecho de que el área de la carga soporta mapeos SDH/SONET, ATM y GFP sin la necesidad de dar un trato especial a estas señales.

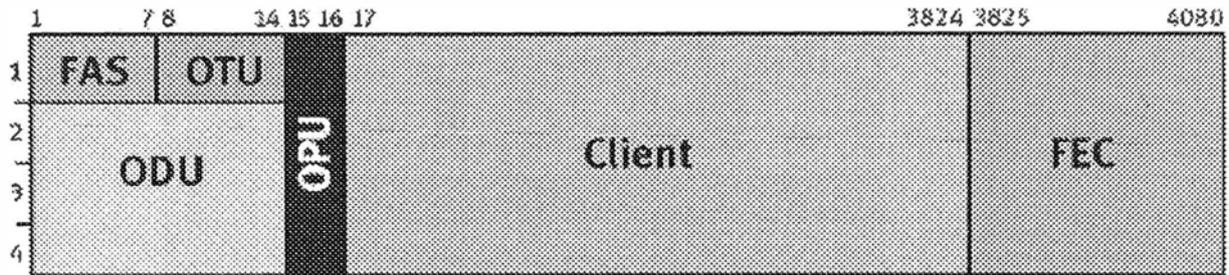


Fig. 2.20 Trama G.709

La meta de la OTN (Optical Transport Network) es combinar los beneficios de la tecnología SONET/SDH con el aumento del ancho de banda del DWDM. En pocas palabras, OTN aplicará la funcionalidad de la Operación, Administración, Mantenimiento y Aprovisionamiento (OAM&P) de la SONET/SDH a las redes ópticas DWDM.

### 2.2.1 La Visión OTN – Propiedades de la OTN

La meta de la OTN es poder hacer el transporte multiservicio de paquetes basado en el tráfico de datos y antiguo, mientras que la tecnología DW (Digital Wrapper) acomoda la gestión no intrusiva y la monitorización de cada canal óptico asignado a una determinada longitud de onda. Por tanto la cabecera “wrapped” (OH) haría posible la gestión y el control de la información de la señal. La Fig. 2.20 ilustra como las capacidades de gestión de la OTN se realizan con la adición de cabeceras en varias posiciones durante el transporte de la señal cliente.

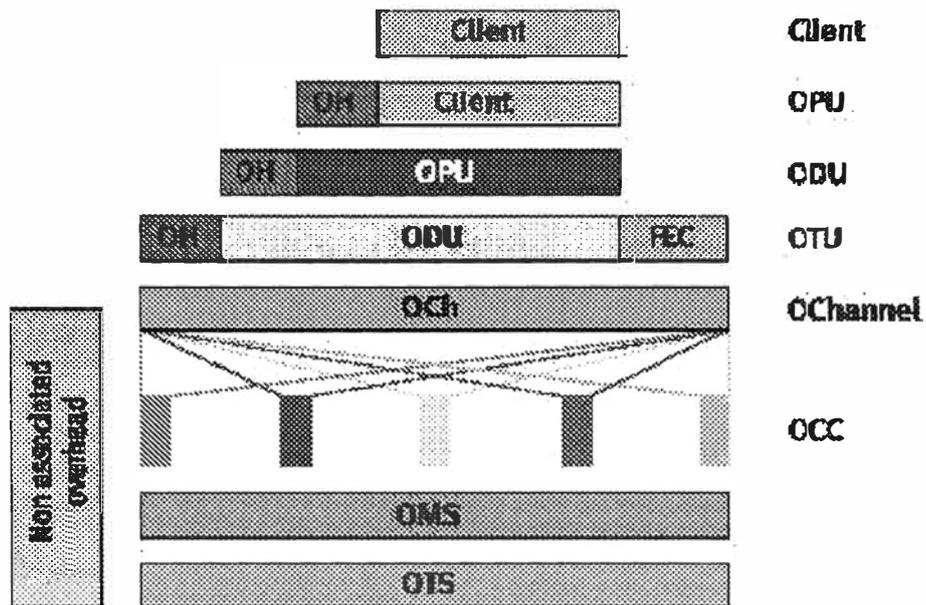


Fig. 2.21 Estructura de transporte básico de la OTN.

Se añaden varias secciones de cabecera a la señal cliente que juntas con el FEC forman la OTU (Optical Transport Unit). Entonces esto es transportado por una longitud de onda como un Canal Óptico (OCh). Si se transportan múltiples longitudes de onda sobre la OTN, se debe añadir una cabecera a cada una de ellas para poder tener la funcionalidad de gestión de la OTN.

Las secciones Multiplexación Óptica y las secciones Transmisión Óptica se construyen usando la cabecera adicional junto con los OCh. La OTN presenta muchas ventajas a los operadores de la red incluyendo:

- Transparencia de protocolo

- Compatibilidad hacia atrás de los protocolos existentes

- Empleo de codificación FEC

- Reducción de regeneración 3R (a través de diseños flexibles ópticos de la red)

El último punto es de particular significación en cuanto minimiza la complejidad de la red que nos lleva a una reducción de costes (menor cantidad de regeneradores).

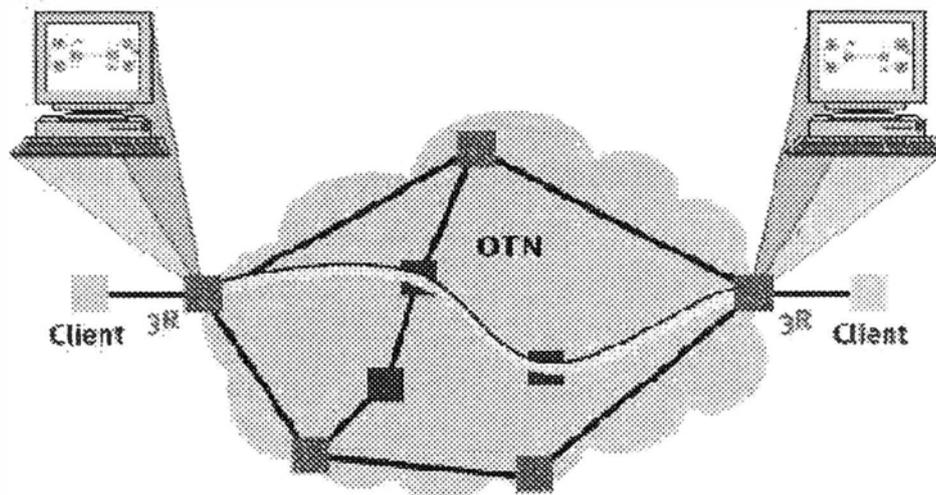


Fig. 2.22 Regeneración 3R en una OTN

La Fig. 2.21 ilustra la regeneración 3R que hay en un IrDI (Inter-domain Interface) de entrada a una OTN. El transporte a través de la red puede tener lugar solamente en el dominio óptico. Sin embargo un punto a resaltar es que en la actualidad no hay capacidades de gestión para negociar con las señales ópticas que no se hayan convertido al formato digital. En contraste a la red transparente, la red opaca realiza regeneración 3R en cada nodo de la red.

### 2.2.2 Los estándares ITU-T G.709 para la OTN

El estándar ITU-T G.709, Network Node Interface para la OTN (Optical Transport Network) define la IrDI (inter-domain interface) de OTN de la manera siguiente:

Funcionalidad de la cabecera en preparar la red óptica multi-longitud de onda.

Estructura de la trama OTU (Optical Transport Unit).

Velocidades y formatos permitidos para el mapeo de los clientes.

Se describen dos tipos de interfaces en la recomendación ITU-T G.872 Architecture of the Optical Transport Networks, las ubicaciones de las cuales se ilustran en la Fig. 2.22.

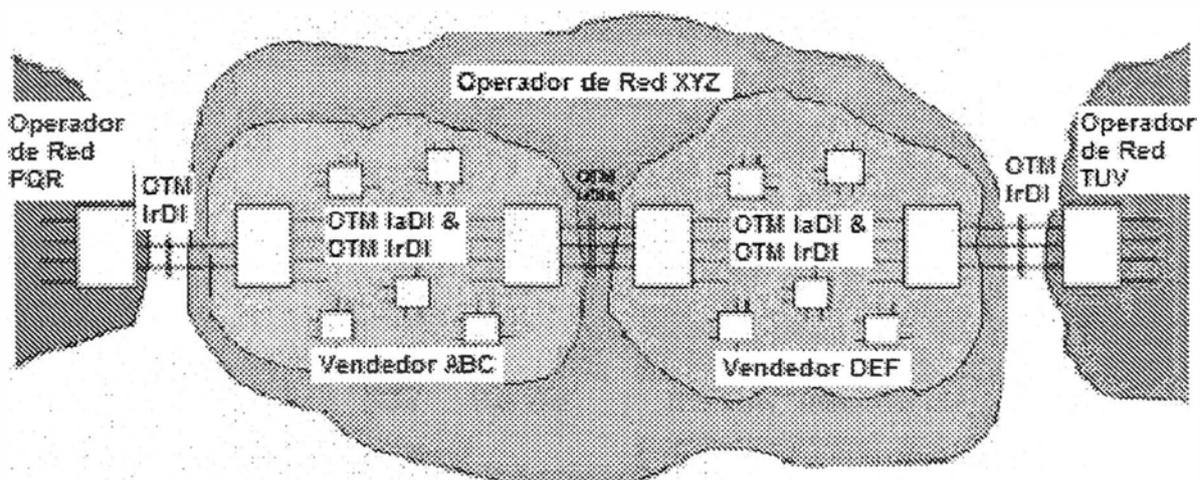


Fig. 2.23 Interfaces de red definidas en ITU-T G.872

### Inter-Domain Interfaces (IrDI)

Estas definen:

- la ubicación entre las redes de dos operadores
- la ubicación entre las subredes de dos fabricantes en el mismo dominio del operador
- la ubicación dentro de la subred de un fabricante

### Intra-Domain Interfaces (IaDI)

Estas definen:

- la ubicación entre el equipo de la subred de un fabricante individual

### 2.2.3 Estructuras de capas de la OTN

Como en SONET/SDH, la OTN tiene un diseño estructurado en niveles.

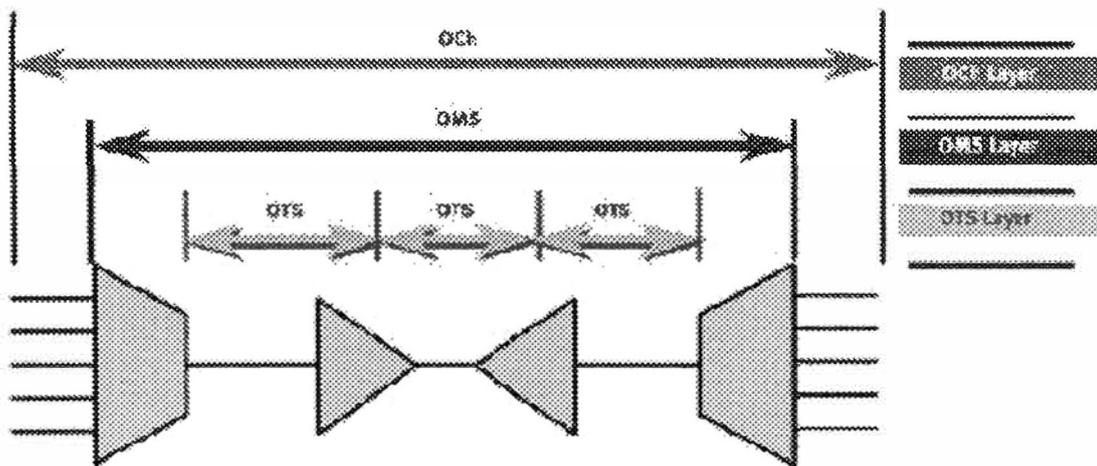


Fig. 2.24 Estructura de capas de la OTN

Los niveles básicos de la OTN son visibles en la estructura del transporte OTN y consta de Canales Ópticos (OCh), Optical Multiplex Section (OMS) y Optical Transmisión Section (OTS) como se ve en la Fig. 2.23.

El transporte de una señal cliente en la OTN sigue el procedimiento indicado a continuación:

Se añade la cabecera a la señal cliente para formar la OPU (Optical Channel Payload Unit)

Entonces se añade una cabecera a la OPU formando así la ODU (Optical Channel Data Unit)

Se añade una cabecera adicional más el FEC para formar la OTU (Optical Channel Transport Unit)

Añadiendo más cabeceras se crea un OCh que es transportado por un color.

Se puede añadir cabeceras adicionales al OCh para poder gestionar múltiples colores en la OTN. Entonces, se construyen el OMS y el OTS.

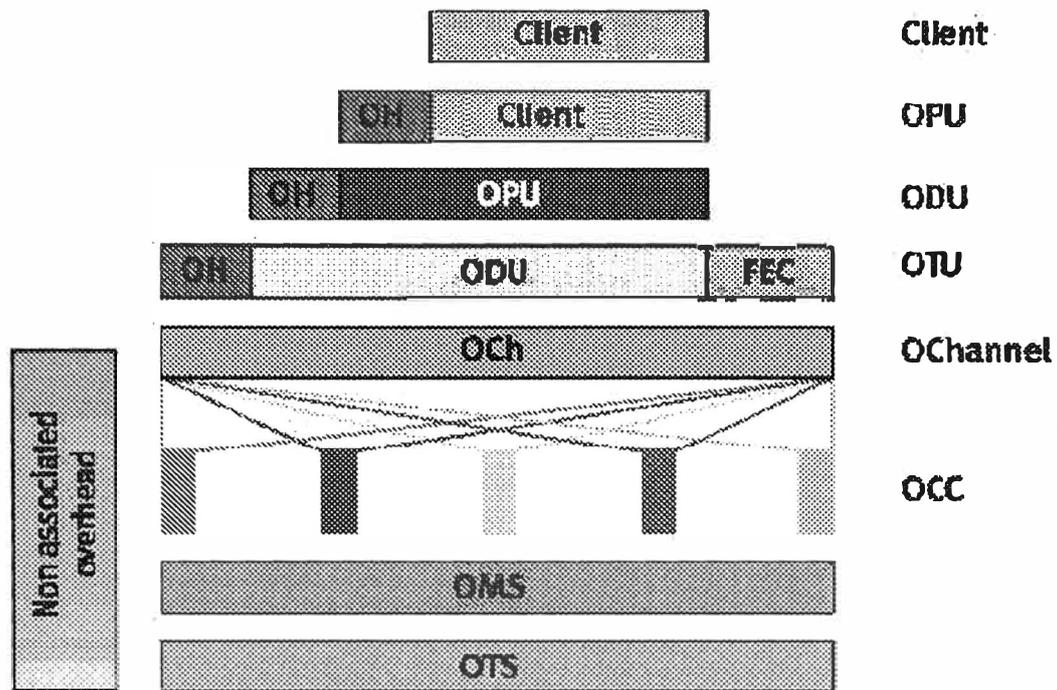


Fig. 2.25 Estructura de transporte básico de la OTN

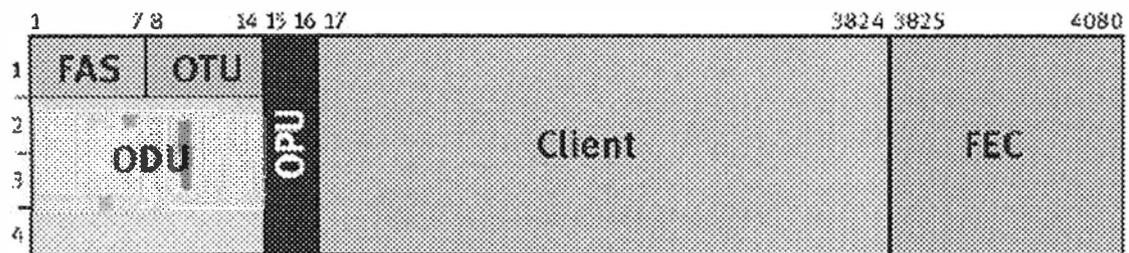


Fig. 2.26 Estructura del canal óptico consistente de los bytes OH, cliente y FEC

El resultado es un canal óptico (OCh) que comprende una sección OH, una señal cliente y un segmento FEC.

## 2.2.4 Estructura del canal óptico

### a) La cabecera del canal óptico

La cabecera del OCh que ofrece la funcionalidad de gestión OTN, contiene 4 subestructuras: OPU (Optical Channel Payload Unit), ODU (Optical Channel Data Unit), OTU (Optical Channel Transport Unit) y FAS (Frame Alignment Signal).

La señal cliente ó los datos actuales a ser transportados – podía ser de cualquier protocolo existente p.e.; SONET/SDH, GFP, IP, GbE.

1) La cabecera del OPU (Optical Channel Payload Unit) se añade a los datos del OPU y se usa para soportar las distintas señales cliente. Regula el mapeo de muchas señales

cliente y suministra información sobre el tipo de señal transportada. Habitualmente la ITU-T G.709 soporta mapeo asíncrono y síncrono de las señales cliente en los datos.

La cabecera del OPU consta del PSI (Payload Structure Identifier) que incluye el PT (Payload Type) y los bits de cabecera asociados con el mapeo de las señales cliente en los datos, como por ejemplo los bits de justificación requeridos para los mapeos asíncronos. Entonces la cabecera del OPU termina en el punto donde el OPU es ensamblado y desensamblado.

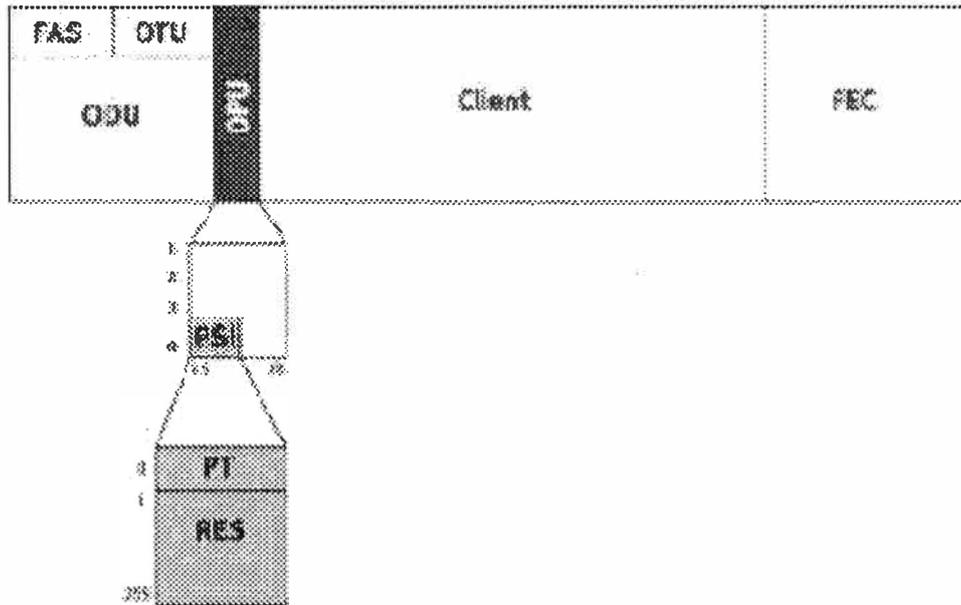


Fig. 2.27 Cabecera del OPU

El campo PSI (Payload Structure Identifier) del OPU transporta un mensaje de 256 octetos alineados con la multitrama ODU. PSI contiene el tipo de datos (PT) identificando los datos a ser transportados. El PT (Payload Type) de OPU es un único octeto definido dentro del PSI para indicar la composición de la señal OPU, o en otras palabras, el tipo de datos a ser transportados en el OPU.

2) La cabecera del ODU (Optical Channel Data Unit) permite al usuario soportar TCM (Tandem Connection Monitoring), PM (Path Monitoring) y APS. También es posible la supervisión del camino extremo a extremo y la adaptación del cliente via el OPU (como se ha descrito previamente).

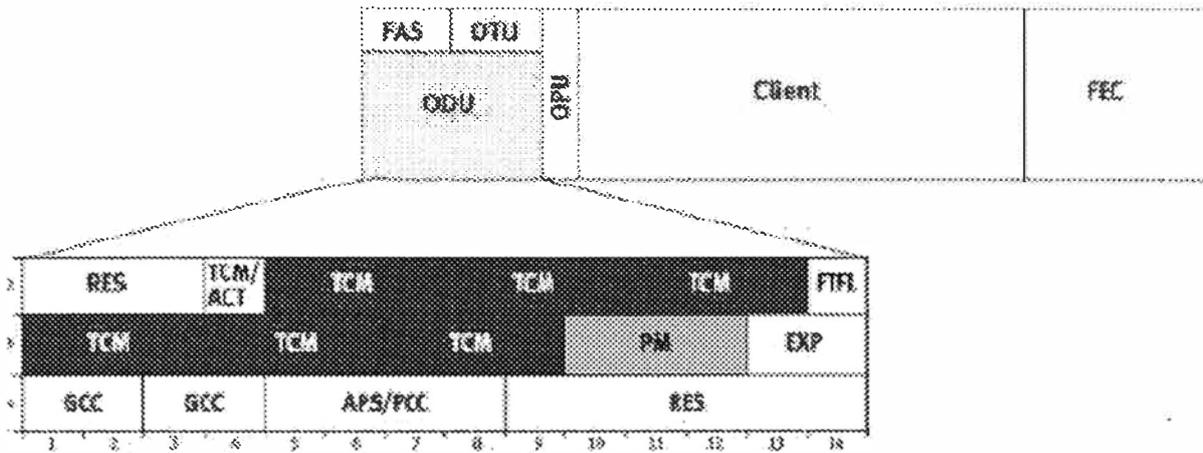


Fig. 2.28 Estructura de la cabecera del ODU

La cabecera del ODU suministra dos importantes cabeceras: la cabecera PM (Path Monitoring) y la cabecera TCM.

La cabecera PM (Path Monitoring) del ODU permite la monitorización de secciones determinadas dentro de la red así como la localización del fallo en la red vía los octetos de la cabecera descritos en la cabecera PM.

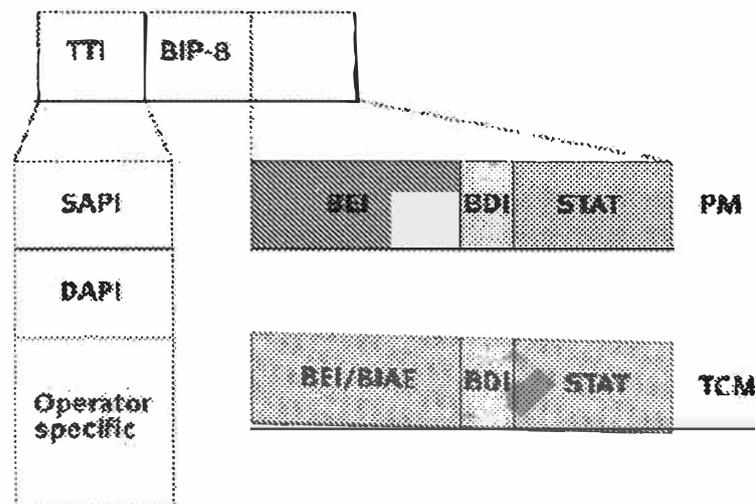


Fig. 2.29 Estructura de las cabeceras PM y TCM.

La cabecera PM (monitorización del camino) está configurada en la fila 3, columnas 10 a 12 para soportar el monitoreo del camino. La estructura del campo PM contiene los siguientes subcampos:

- TTI (Trail Trace Identifier). El TTI es similar al octeto J0 en SONET/SDH. Se usa para identificar la señal del origen al destino dentro de la red. El TTI contiene los Identificadores de Punto de Acceso (API - Access Point Identifiers) que se usan para especificar el Identificador de Punto de Acceso Origen (SAPI) y el Identificador

del Punto de Acceso Destino (DAPI). Los APIs contienen información del país de origen, del operador de la red y otros detalles administrativos.

- BIP-8 (Bit Interleaved Parity). Este es un octeto que se usa para Detección de Error. El octeto BIP-8 provee “bit interleaved parity – 8 code”. El BIP-8 computa todo el OPU y se inserta en el BIP-8 SM dos tramas más tarde.

- BDI (Backward Defect Indication). Este es un único bit que lleva información en cuanto fallo de la señal en la dirección ascendente.

- BEI (Backward Error Indication) y BIAE (Backward Incoming Alignment Error). Estas señales llevan información sobre los bloques “interleaved-bit” detectados con error en la dirección ascendente. También se usan para llevar errores de alineación de entrada (IAE-Incoming Alignment Errors) en la dirección ascendente.

- Bits de estado para la señal de indicación y mantenimiento (STAT - Status bits). Estos tres bits indican la presencia de señales de mantenimiento.

**Cabecera TCM** (Tandem Connection Monitoring) del ODU. Una determinada función implementada en las redes SONET/SDH es TCM (Tandem Connection Monitoring), una funcionalidad que permite la gestión de la señal a través de múltiples redes. La comprobación jerárquica de errores usando los octetos de paridad es otra función que se puede realizar. Además de esto, también el G.709 permite las funciones de gestión de la señal tales como las encontradas por ejemplo en los servicios al por mayor de longitud de onda.

Los octetos de la cabecera TCM están definidos en la cabecera de la fila 2, columnas 5 a 13 así como en la fila 3, columnas 1 a 9 en la cabecera del ODU. Cada campo TCM contiene los subcampos - como ya se describió en Path Monitoring – con BIAE adicional. La funcionalidad TCM implementada en el OTN es capaz de monitorizar hasta 6 “tandem connections” independientemente. TCM permite el anidamiento y el solape de las conexiones de monitorización ODU.

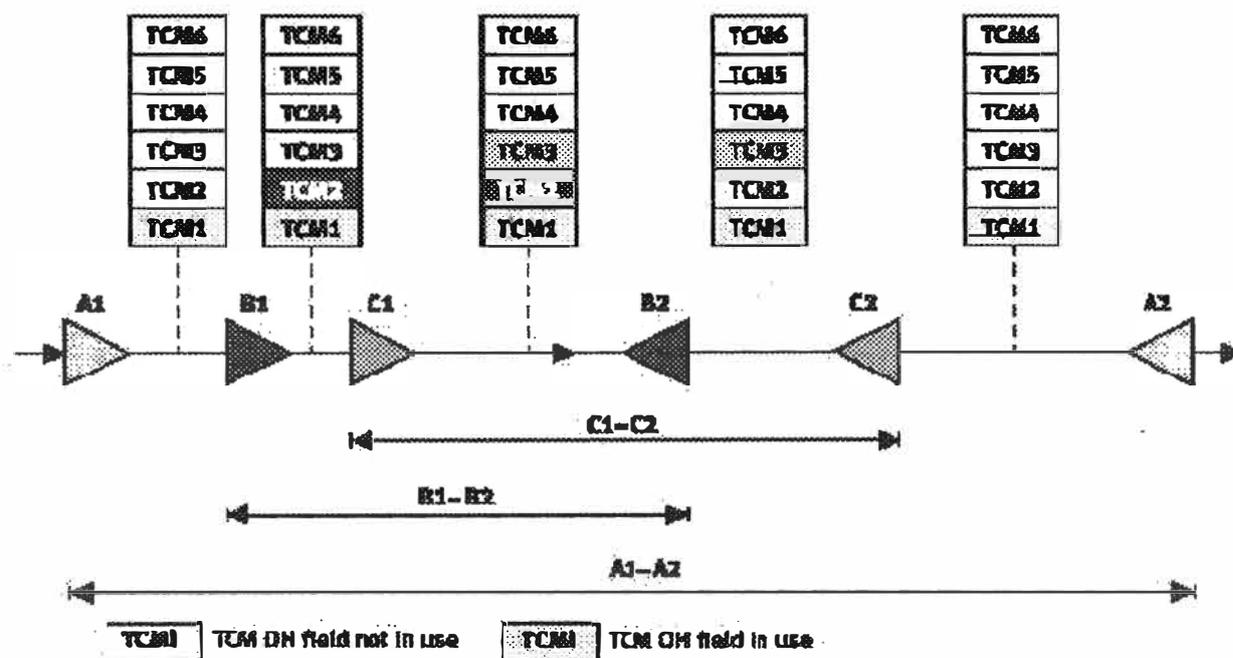


Fig. 2.30 Estructura TCM posible en una OTN

Como se ilustra en la Fig. 2.29, es posible la monitorización entre A1-A2, B1-B2 y C1-C2 en modo anidado. Con B1-B2, solo es posible en modo cascada. Potencialmente estas funcionalidades se pueden usar por portadoras para el mantenimiento de sus propios SLAs (Service Level Agreements) dentro de sus redes. Los octetos adicionales de cabecera del ODU se describen más abajo.

RES. Estos octetos están reservados para la futura estandarización internacional. Todos los octetos están a cero ya que habitualmente no se usan.

TCM/ACT. Este campo de un octeto se usa para la activación y desactivación de los campos TCM. En la actualidad, estos campos aún están en estudio.

EXP. Estos octetos están reservados para futuros usos experimentales.

General communication channels (GCC1, GCC2). Estos dos campos permiten la comunicación entre dos elementos de la red con acceso a la estructura de trama ODU.

Automatic Protection Switching y Protection Communication Channel (APS/PCC). Es posible la conmutación APS en uno o más niveles.

Fault Type y Fault Location channel (FTFL). Se reserva un octeto en la cabecera del ODU para el mensaje FTFL. Este octeto provee información del estado de fallo incluyendo información en cuanto al tipo y ubicación del fallo. El FTFL está relacionado con el tramo TCM.

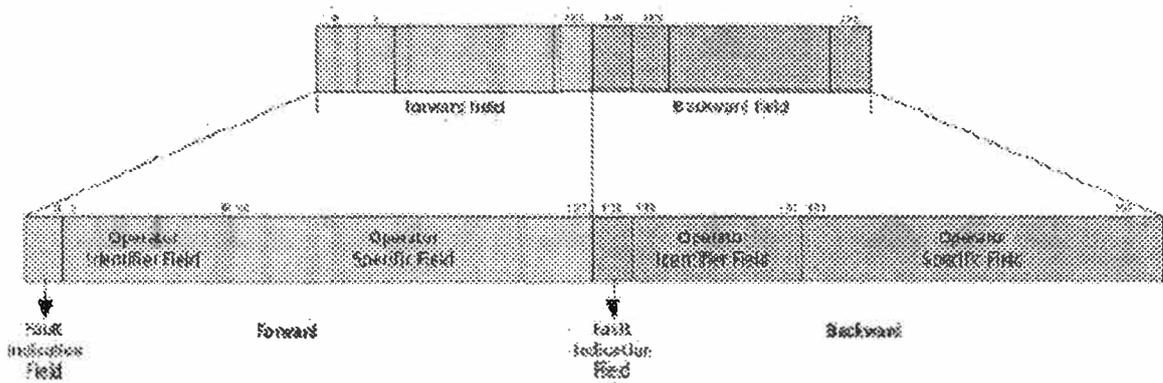


Fig. 2.31 Estructura del campo FTFL con sus correspondientes subestructuras

La subestructura contiene: campos de indicación de fallo hacia adelante y hacia atrás, campos de identificación del operador anterior y posterior, y campos específicos del operador anterior y posterior que realiza las funciones siguientes:

#### Campo de Indicación del Tipo de Fallo

Los códigos especificados indican las situaciones siguientes:

- Sin Fallo
- Fallo de la Señal
- Degradación de la Señal

Los octetos adicionales en el campo del mensaje FTFL están reservados para la futura estandarización internacional.

#### Campo Identificador del Operador

Este campo especifica el origen geográfico del operador e incluye un campo de segmento nacional

#### Campo Específico del Operador

Estos campos no están estandarizados por las recomendaciones ITU-T G.709

### 3) Cabecera del OTU (Optical Channel Transport Unit) y Alineación de la Trama

El OTU se usa en la OTN para soportar el transporte vía una o más conexiones de canal óptico. También especifica la Alineación de Trama y el FEC.

**La cabecera de la Alineación de Trama** es parte de la cabecera del OTU. Se sitúa en la fila 1, columnas 1 a 6 del OTU en que se define una Señal de Alineación de Trama (FAS-Frame Alignment Signal) (Fig. 31). Como las tramas OTU y ODU pueden abarcar múltiples tramas OTU, se define una señal de cabecera estructurada multitrama. La Señal de Alineación Multitrama (MFAS - Multi Frame Alignment Signal) se define en la fila 1, columna 7 de la cabecera OTU/ODU. El valor del octeto MFAS se incrementa con cada trama OTU/ODU.

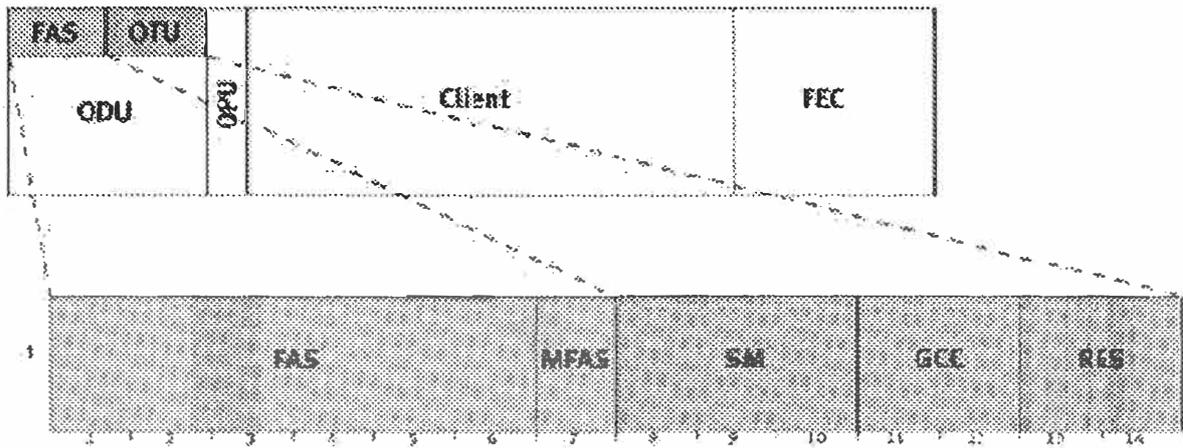


Fig. 2.32 Alineamiento de trama (FAS) y la estructura de la cabecera OTU

La cabecera de la Monitorización de sección consta de los subcampos descritos para la cabecera de la monitorización del camino, con excepción del bit de Error de Alineación de Entrada (IAE - Incoming Alignment Error).

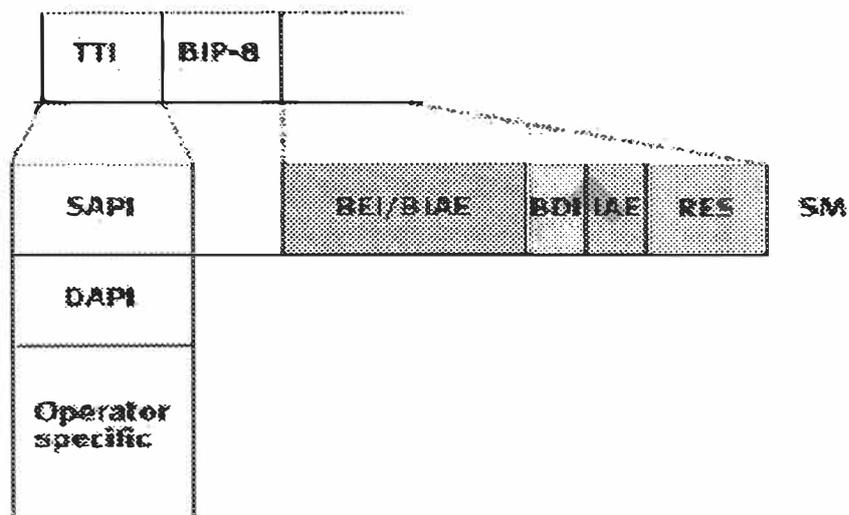


Fig. 2.33 Cabecera de la monitorización de sección (SM)

Este bit permite al punto de entrada informar al punto de salida de que ha sido detectado un error de alineación en la señal de entrada. IAE se pone a "1" cuando ocurre el error, de otra forma es puesto a "0".

General Communication Channel 0 (GCC0) se usa como un canal de comunicación entre puntos de terminación del OTU.

#### 4) Forward Error Correction (FEC)

Junto con la cabecera del OCh del "Digital Wrapper Envelope", se añade un ancho de banda adicional – en este caso el FEC. El algoritmo implementado/FEC permite la corrección y detección de errores en un enlace óptico.

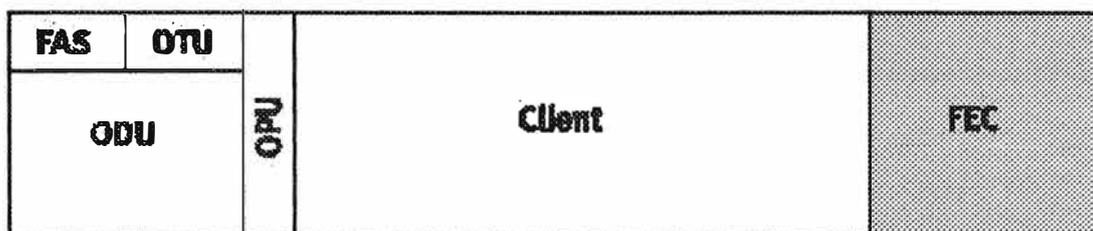


Fig. 2.34 Estructura del FEC del canal óptico

El FEC ya es ampliamente usado por los operadores de cable submarino en varios diseños.

También hay varios algoritmos/códigos que se pueden usar para realizar la corrección del error. La implementación FEC definida en la recomendación G.709 usa el llamado Código Reed-Solomon RS (255/239). Aquí una fila OTU se divide en 16 subfilas cada una de ellas conteniendo 255 octetos. Las subfilas están formadas por "byte interleaved", significando que la primera subfila consta del primer octeto de la cabecera y el primer octeto de los datos. El primer octeto FEC se inserta en el octeto 240 de la primera subfila. Esto es verdad para todas las 16 subfilas.

De estos 255 octetos, 239 se usan para calcular la comprobación de paridad del FEC, el resultado del cual se transmite en los octetos 240 a 255 de la misma subfila.

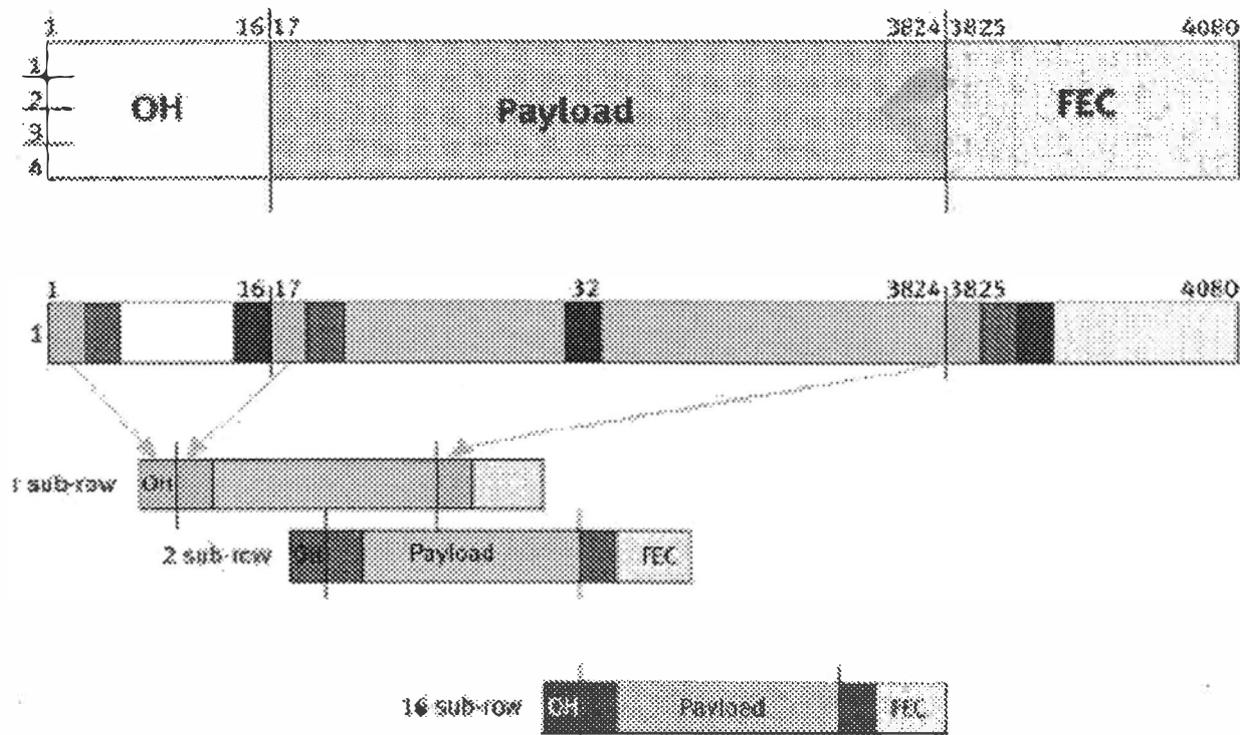


Fig. 2.35 Ilustración del código de Reed-Solomon en la recomendación G.709

El código Reed-Solomon detecta errores de 16 bits o corrige errores de 8 bits en una subfila. El FEC RS (255,239) se especifica para la interfaz plenamente estandarizada IrDI.

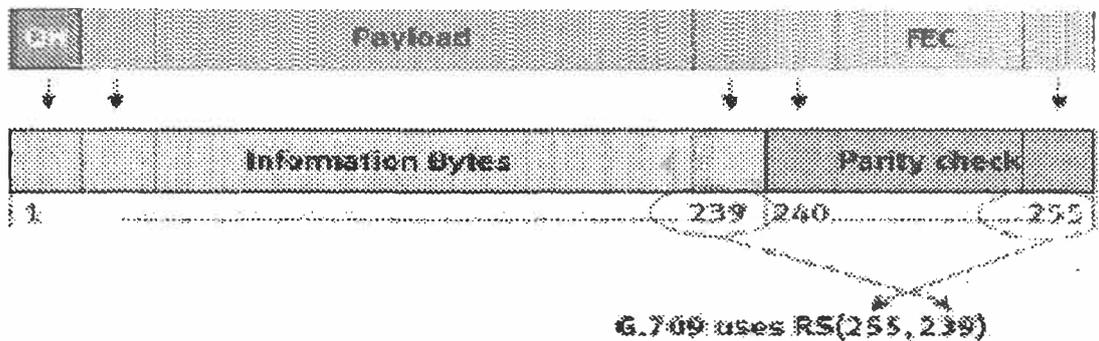


Fig. 2.36 Formación del chequeo de paridad

### El caso de uso de FEC en redes ópticas

FEC permite la detección y la corrección de errores de bits causados por fallos físicos en el medio de transmisión. Estos fallos se pueden clasificar en efectos lineales (atenuación, ruido y dispersión) y no lineales (four wave mixing, self phase modulation, cross phase modulation).

Cuando se usa FEC en un enlace de red, el operador de red puede aceptar una señal de calidad más baja en el enlace ya que estos errores potenciales se pueden corregir.

### Los beneficios del FEC en las redes ópticas

La mejora del potencial en la calidad de la señal en un enlace óptico ofrece muchas ventajas incluyendo:

- ganancia en nivel de potencia de aproximadamente 5 dB. Esto se consigue cuando se usa 7% FEC. ( correlacionando a una expansión de enlace de aproximadamente 20km).
- reducción en el uso de regeneradores 3R. Esto permite incrementar la distancia entre enlaces.
- uso de los enlaces existentes de 2.5Gbit para transportar tráfico de 10Gbit. Esto ha sido intentado y puede ser posible dado que el FEC permite la corrección de una calidad de señal más baja.
- posibilidades de aviso anticipado. Algunos Elementos de la Red (NE) monitorizan los errores corregidos en los enlaces. Este parámetro se puede usar sucesivamente como una herramienta de aviso anticipado mediante el cual la cantidad de errores corregidos en un enlace puede significar el debilitamiento de un componente del propio enlace.

### 2.2.5 Nivel de la sección de multiplexación y transmisión óptica

En el nivel de la Sección de Multiplexación Óptica (OMS), se transportan tanto los datos OMS y como la cabecera no asociada. Los datos OMS constan de OChs multiplexados. La cabecera del OMS, aunque sin definir en este punto, intenta soportar la monitorización de la conexión y asistir a los proveedores de servicio en sus problemas y el aislamiento de los fallos de la OTN.. El nivel de la Sección de Transmisión Óptica (OTS) transporta los datos OTS así como la cabecera de OTS. Similar al OMS, el OTS transporta las secciones multiplexadas ópticamente descritas anteriormente. La cabecera del OTS –sin embargo no completamente definida -se usa para funciones de mantenimiento y operación. El nivel OTS permite al operador de la red realizar tareas de monitorización y mantenimiento entre los elementos de la red que incluyen; OADMs, multiplexadores, desmultiplexadores y conmutadores ópticos.

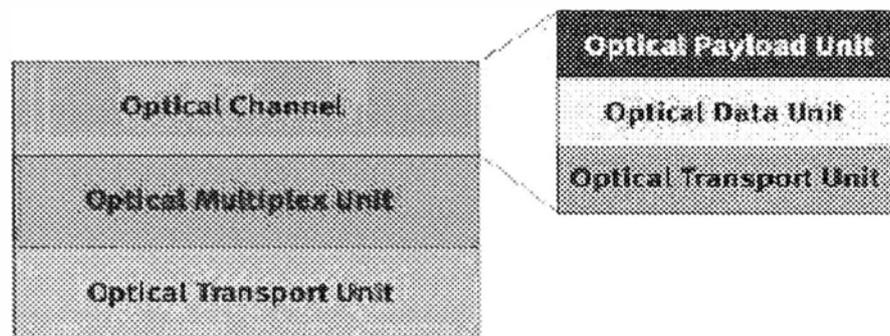


Fig. 2.37 Subestructura del canal óptico y Estructura básica de la OTN.

### 2.2.6 El futuro del OTN

Se intenta que la OTN suministre características de gestión robustas para soportar un ancho de banda alto en las OTNs. La OTN suministra funcionalidad de gestión a las redes DWDM, lo que significa que es capaz de gestionar múltiples colores - una función comparable al efecto del SONET/SDH en una sola longitud de onda.

La principal ventaja del OTN es su completa funcionalidad hacia atrás que hace posible construir en las funcionalidades de gestión existentes disponibles con SONET/SDH. Además de esto, también suministra una completa transparencia de los protocolos de comunicación existentes tales como IP, PoS y GFP.

La OTN y en particular la implementación del FEC, permite a los operadores de la red operar sus redes existentes eficientemente y económicamente. Aunque el estándar G.709 describe la estructura básica de la trama y los campos de gestión, también ya ha finalizado la descripción de la gestión de la red y el establecimiento de las conexiones de los enlaces ópticos en el plano de control óptico.

## CAPÍTULO III

### REDES OPTICAS ETHERNET SOBRE REDES DE TRANSPORTE NG-SDH

#### 3.1 Situación Actual

El mercado de telecomunicaciones cada vez es más competitivo y los proveedores de servicios tienen que enfrentar diariamente enormes desafíos económicos y tecnológicos, una nueva forma de negocio podrá tornar más eficientes las redes actuales en un futuro no muy distante mediante la creación de las redes ópticas Ethernet.

Reducción de costos y aumento de generación de ingresos son en la mayoría de las veces los desafíos económicos de todas las empresas de hoy en día. Estos desafíos combinados con una misión de garantizar QoS (Calidad de Servicio) y parámetros cada vez más rígidos de SLA (Acuerdo de Nivel de Servicio) forman un perfil de los proveedores de servicios de telecomunicaciones.

En cuanto a los desafíos tecnológicos una de las principales preocupaciones es eliminar o garantizar una banda ancha de acceso. [11]

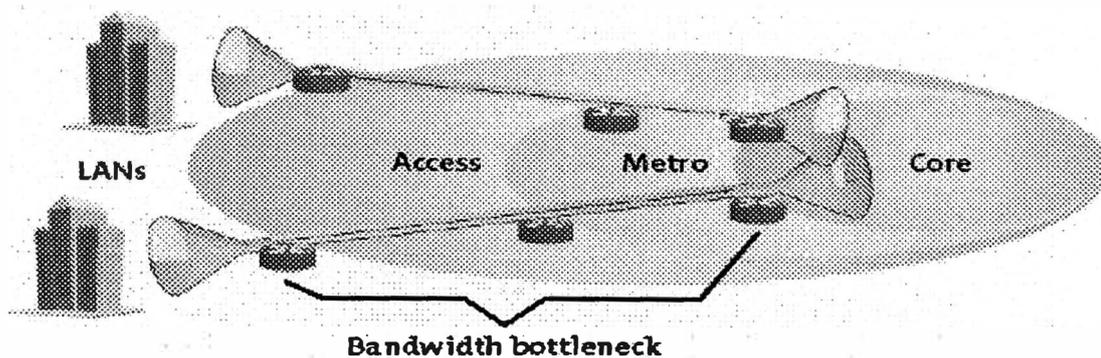


Fig. 3.1 Enlaces de Acceso

Hoy la mayoría de empresas usan enlaces E1 (2Mbps) o también E1s fraccionados (nx64Kbps) para conexión de LAN a WAN. En el mejor de los casos encontramos enlaces DS3 ó E3. Tomemos como ejemplo una empresa con una red de 100 computadoras. Supongamos que 80 usan placas de 100Mbps full-duplex y que el 75% del tráfico generado es para la WAN. En este caso podremos tener 12 Gbps convergiendo a los enlaces de acceso simultáneamente.

Vea que cuando hablamos de redes Ethernet, estamos hablando de un patrón difundido en casi todas las redes locales existentes. Hoy en el mundo, en el ambiente local las tasas de transmisión pueden superar los gigabits por segundo fácilmente.

También, en el ejemplo anterior, si tomamos apenas el 10% del tráfico ya tendríamos 1.2 Gbps que es mucho mas de lo que un enlace E1 ó también el mismo DS3 puede soportar. Los resultados de esto es el descarte de paquetes, retardo excesivo, jitter y bajo rendimiento, parámetros esenciales de la calidad de servicio (QoS)

El problema se torna aún más crítico cuando aplicaciones como voz sobre IP comparten recursos con otras aplicaciones con requisitos de QoS distintos. Las aplicaciones de voz sobre IP son generalmente proyectados para soportar atrasos de hasta 100ms punto-a-punto. En un enlace de 64 Kbps un paquete de 1500 bytes de FTP llevaría 187,5ms para ser transmitido, afectando directamente las calidades de los otros servicios. En una red con recursos compartidos, los paquetes de voz deben tener un intervalo máximo de 20ms entre paquetes para que se tenga un servicio aceptable.

Otras aplicaciones que requieran parámetros rígidos de QoS són: SAN (Storage Area Network), interconexión de LANs, vídeo conferencia y aplicaciones en tiempo real.

## 3.2 Redes Ethernet

### 3.2.1 Trama Ethernet

Analizando la trama Ethernet (Fig. 3.1), basado en el patrón IEEE 802.3, tecnológicamente flexible y simple, observamos que la trama de línea fue prácticamente el mismo mantenido durante toda su evolución. Iniciando en la trama de Ethernet original de 10Mbps, pasamos a 100Mbps Fast Ethernet (802.3u), 1000Mbps Gigabit Ethernet (802.3z / 802.3ab) y hoy a 10 Gigabit Ethernet (802.3 ae).

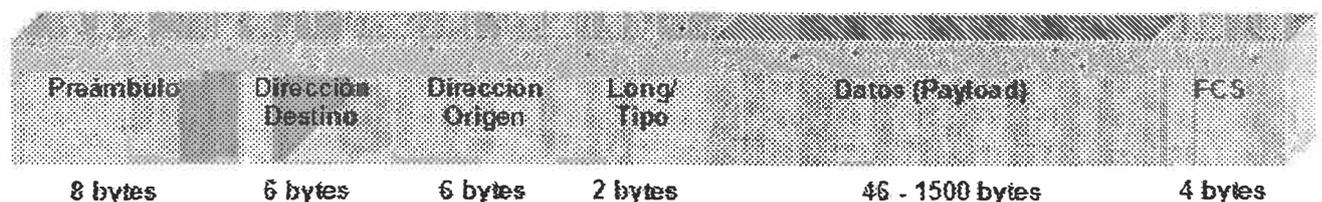


Fig. 3.2 Trama Ethernet

Descripción de los campos de la trama Ethernet

**Preámbulo/SFD:** Campo que permite al receptor, sincronizarse con el flujo de transmisión entrante y la localización del inicio del paquete Ethernet.

**Dirección Destino:** MAC-Address del elemento de red donde el paquete está siendo encaminado o enviado.

**Dirección Origen:** MAC-Address del elemento de red que está originando el paquete.

**Long/Tipo:** Longitud del paquete. Para paquetes tipo DIX, del protocolo de nivel 3, representa la longitud del campo de datos (Payload)

**Datos (Payload):** Campo que contiene información útil del cliente (todos los otros campos son considerados parte de la cabecera)

**FCS:** Frame Check Sequence. El valor es calculado en el elemento de red origen e insertado en el paquete. El elemento de red receptor realiza el mismo cálculo y compara su FCS con el FCS recibido en el paquete. Los switches Ethernet descartarán los paquetes que tuvieran errores de FCS.

### 3.2.2 Adaptación de la trama Ethernet

Algunos campos fueron adicionados para compatibilizar la trama Ethernet a las nuevas realidades del mercado. En 1998 fue creado la trama IEEE 802.1q la cual contiene un campo adicional de 4bytes para la identificación de protocolo, prioridad e identificación de VLANs (Virtual LANs). El VLAN ID (VID) o Q-Tag son 12 bits adicionales que podemos ofrecer hasta 4096 IDs a las tramas Ethernet para segmentar el tráfico, posibilitando así una identificación del cliente a la trama a la que pertenece.

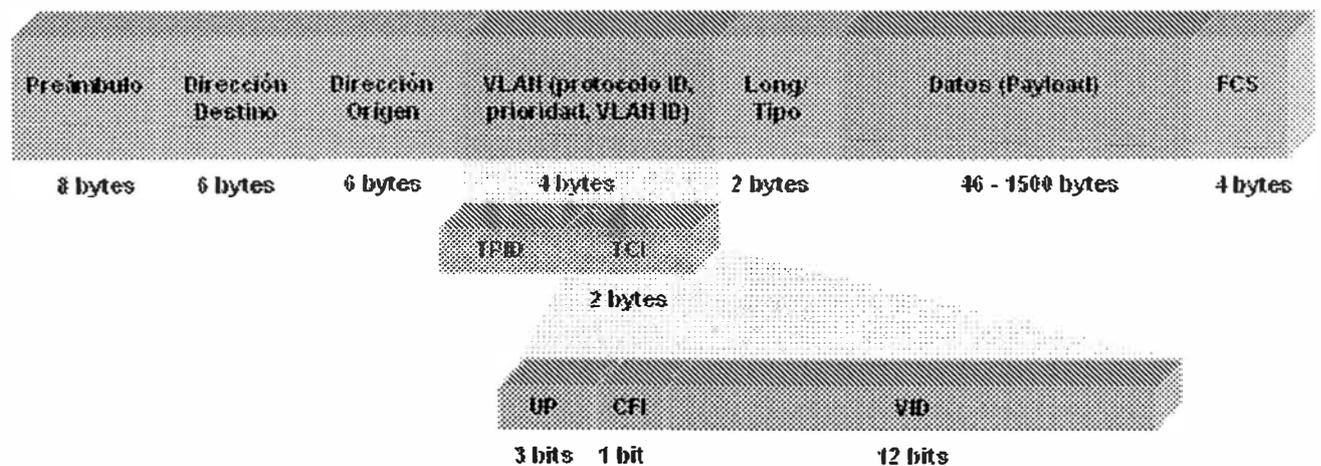


Fig. 3.3 Adaptación de la trama Ethernet

Descripción del campo VLAN

TPID = Tag Protocol Identifier

TCI = Tag Control Information

UP = User Priority (8 niveles, 0 es la menor prioridad)

CFI = Canonical Format Identifier

VID = VLAN Identifier (máximo  $2^{12}-1$  VLANs = 4096 IDs)

### 3.3 Redes Ópticas Ethernet

Una propuesta que se hace hoy es llevar un patrón Ethernet para que además del ambiente local, sea aprovechada la confiabilidad y velocidad de las redes ópticas actuales para transportar tramas Ethernet a las demás fronteras imaginables.

Los beneficios que se conseguiría con eso son significativos. Además de abaratar los costos de infraestructura, se dejaría de lado una tarifa compleja de conversación de protocolos en los perímetros de LAN-WAN y con eso se gana menor jitter y retardo en la transmisión.

#### 3.3.1 Topologías

##### a) Ethernet over Fiber (EoF) IEEE 802.3

Una señal Ethernet puede ser transmitido directamente sobre fibra óptica (IEEE 802.3 EoF – Ethernet over fiber) en topologías punto-a-punto o en forma de malla.

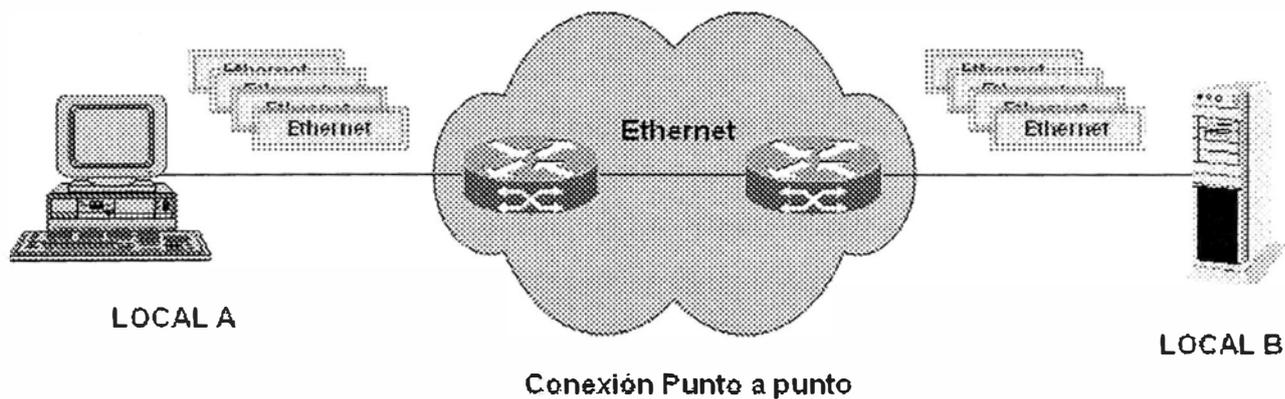


Fig. 3.4 Ethernet sobre Fibra

#### Control de QoS

- Como no hay necesidad de conversión de protocolos de LAN para WAN, conseguimos una reducción en el retardo del 30% y en el jitter de más del 90% (en comparación a las redes ruteadas tradicionales)
- Existen colas y buffers en los puertos de transmisión de los switches, así no hay garantía/control del retardo y del jitter en caso de exceso de tráfico
- No hay un mecanismo eficiente de recuperación de fallos en el caso de degradación o pérdida de un enlace.
- El tráfico Multicast y Broadcast es pasado a los puertos de transmisión consumiendo recursos de forma ineficiente

##### b) Ethernet over DWDM (EoDWDM)

Se puede utilizar el backbone DWDM para transmisión de paquetes Ethernet. La ventaja en este caso es la alta tasa de transmisión que se puede alcanzar. Además de eso, EoDWDM es independiente de la tasa de bit y del protocolo, pudiendo así operar en cualquier configuración de red.

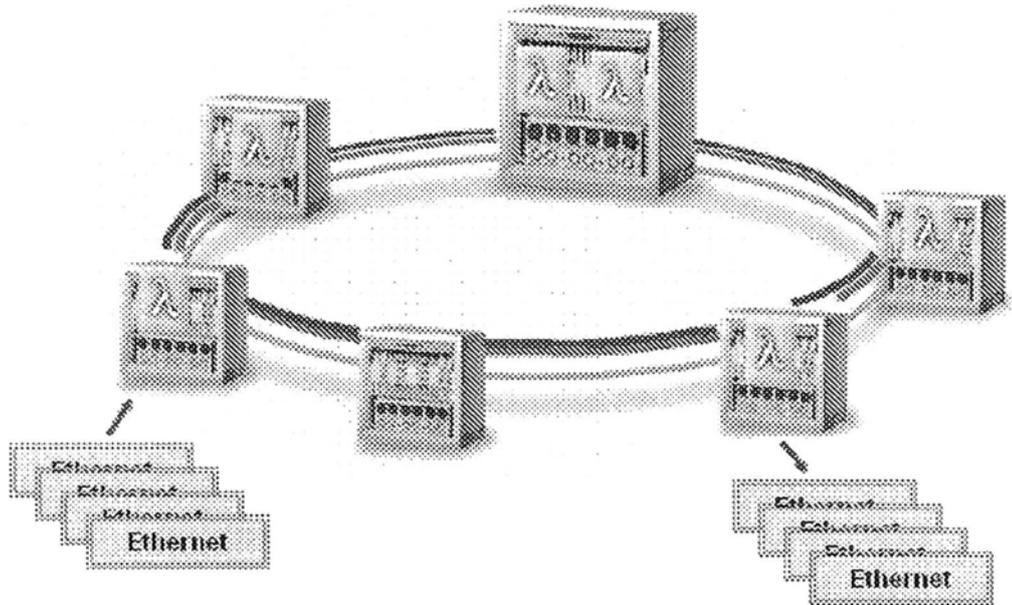


Fig. 3.5 Ethernet sobre DWDM

### c) Ethernet over Resilient Packet Ring (EoRPR) IEEE 802.17

También, existen otras formas de transmitir tramas Ethernet sobre SDH (IEEE 802.17 EoRPR – Ethernet over Resilient Packet Ring). En este caso se puede utilizar y obtener los beneficios de la infraestructura SDH ya existente como una protección que garantice recuperación a fallas en menos de 50ms y alcanzar distancias de millares de Km.

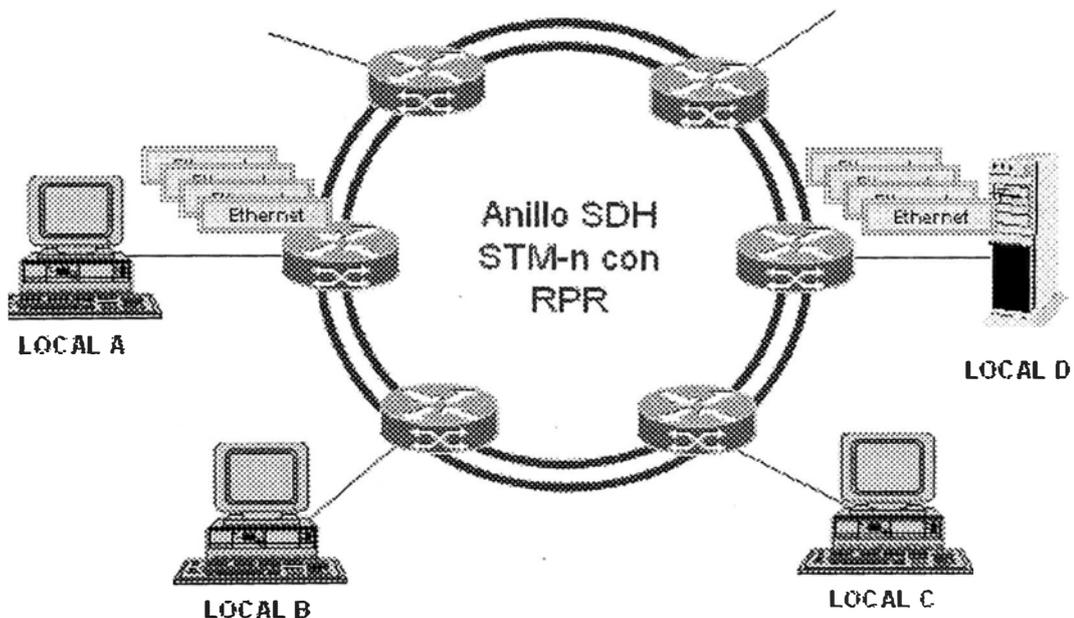


Fig. 3.6 Ethernet sobre RPR

RPR utiliza por lo menos 2 anillos con sentidos contrarios de rotación, en lo cuales la banda es compartida entre los nodos, sin necesidad de aprovisionamiento de circuitos. Los nodos pueden negociar automáticamente la banda necesaria, vía un algoritmo llamado "Fairness Control"

Cada nodo posee un mapa de la topología de la red y puede enviar el tráfico por el mejor/menor camino

Ambos anillos pueden ser usados para tráfico. En caso de fallo en un de los enlaces, está previsto un algoritmo con recuperación en menos de 50 ms.

Control de QoS

- En las redes SDH, el delay y el jitter son controlados, por tanto el paquete que estuviera en el anillo tendrá QoS garantizada.
- No hay descarte de paquetes en el anillo. La política de mapeamiento y descarte será realizada antes de la transmisión.
- Están definidos 3 niveles de prioridad (High, Medium, Low)
- Algoritmo "Spatial Reuse" garantiza compartición y uso eficiente de la banda
- Tráfico multicast y broadcast con un solo paquete transmitido en el anillo
- Cada nodo posee 3 funciones: "Add", "Drop" y "Pass".

#### d) Ethernet over SDH (EoS)

Existen otras formas de mapeo de las tramas Ethernet en el área de carga de SDH. Un hecho importante es que este modelo tecnológico posibilita reducir inversiones y además ofrece servicios nuevos con garantía de calidades superiores a los existentes. Una extensa base ya instalada de redes ópticas SDH, donde hubieron enormes inversiones en capacidad, combinada con una abundancia de Ethernet en las redes locales nos lleva a concluir que las redes puramente IP o Ethernet serán dejadas para un futuro un poco mas distante. Por lo tanto, hasta que el tráfico de datos crezca a una velocidad mayor de lo que se espera, una combinación de Ethernet con SDH parece ser el futuro.

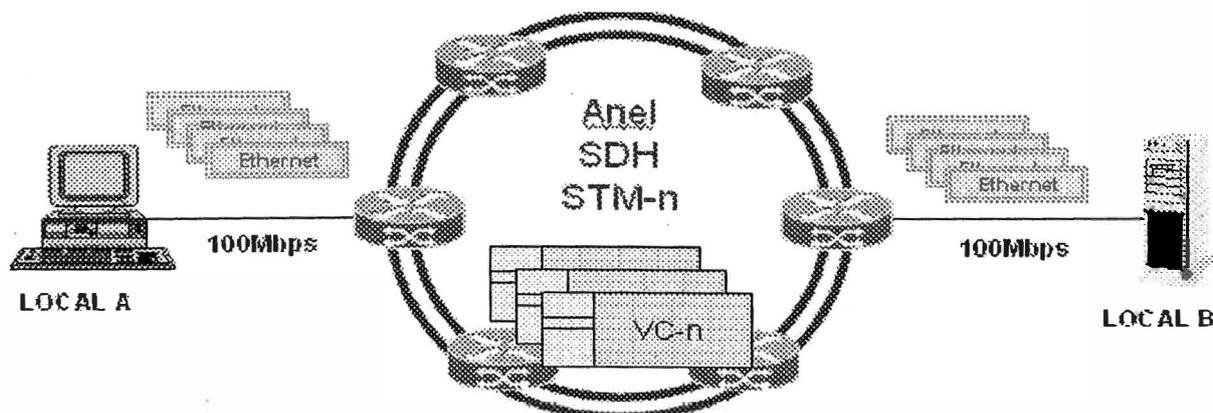


Fig. 3.7 Ethernet sobre SDH

### 3.3.2 Mapeo

#### a) Ethernet over LAPS (ITU-T X.85 & 86)

En una fase inicial, las tramas Ethernet pueden ser mapeadas en un patrón conocido como LAPS (Link Access Procedure Scheme) patrocinado por la ITU-T X.85 y X.86. En el esquema de mapeamiento LAPS, una trama Ethernet es mapeada sobre una trama tipo HDLC, el cual es mapeado sobre un área de la carga de SDH para ser transmitido.

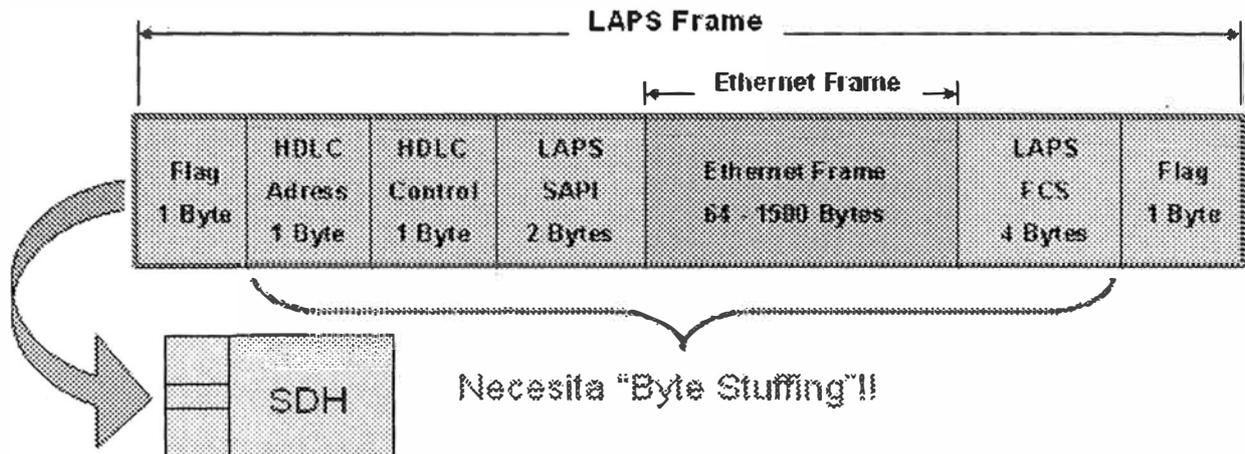


Fig. 3.8 Trama LAPS

Como esta es una adaptación hecha al HDLC, algunos campos de la cabecera dejan de tener utilidad. En verdad se aprovecha solamente los "flags" de inicio y fin de trama para delimitación. En los otros campos se utiliza relleno (8bytes) "Byte Stuffing", que por lo tanto interfieren directamente en la QoS y el ancho de banda. Este patrón es conocido también como PoS (*Packet over SDH*)

#### b) Ethernet over ATM (IETF RFC 1483)

En locales donde predominan redes ATM, también es posible adaptar una transmisión de Ethernet. La RFC 1483 de IETF define el transporte de Ethernet sobre ATM por la capa de adaptación AAL5:

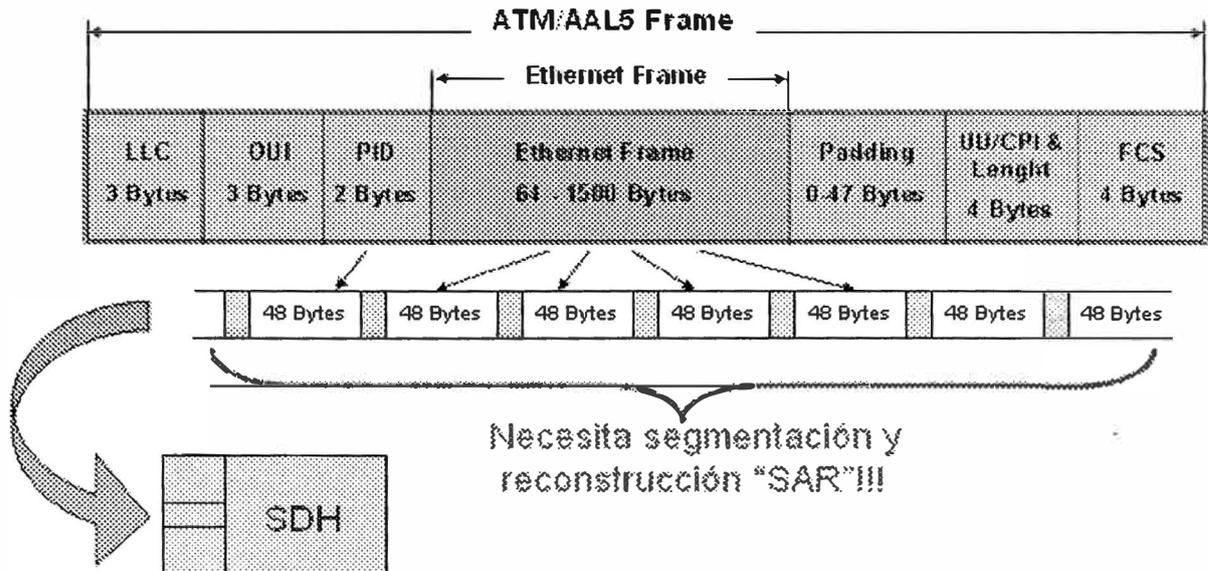


Fig. 3.9 Trama AAL5-ATM

Por las características de ATM, esta forma de mapeo ofrece capacidades óptimas de gestión de QoS, por eso, se torna ineficiente para el transporte de paquetes pequeños por causa del tamaño de las cabeceras de la trama AAL5 de ATM. Para paquetes grandes es preciso utilizar un proceso llamado SAR (Segmentation And Reassembly) ó segmentación en el origen y reensamble en el destino. El proceso SAR a la vez es muy trabajoso en servicios simples.

### c) Ethernet over GFP (ITU-T G.7041)

El GFP es un mecanismo genérico creado para adaptar múltiples tipos de servicios de capa 1 (Fibre Channel, Gigabit Ethernet, ESCON, FICON) y 2 (PPP/IP/MPLS, Ethernet, RPR), en un canal de transmisión bit-síncrono (WDM) ó octeto-síncrono (SDH, OTN). Se trata de un algoritmo simple y estable compatible con cualquier servicio de nivel superior y con cualquier tecnología de redes. Como no requiere nuevos equipos en el backbone, solamente en los extremos. El GFP crea nuevas oportunidades tecnológicas y económicas.

En la Fig. inferior, una trama Ethernet es mapeada sobre una trama GFP (*Ethernet over GFP*), que a su vez está listo para ser transmitido sobre un VC-SDH. El GFP no utiliza ningún tipo de relleno, ni necesita utilizar SAR, visto que su área de carga puede adaptarse a cualquier tamaño de trama Ethernet. La cabecera posee un algoritmo de detección y corrección de errores y es el responsable de transmitir información importante tanto de la señal del cliente como de gestión.

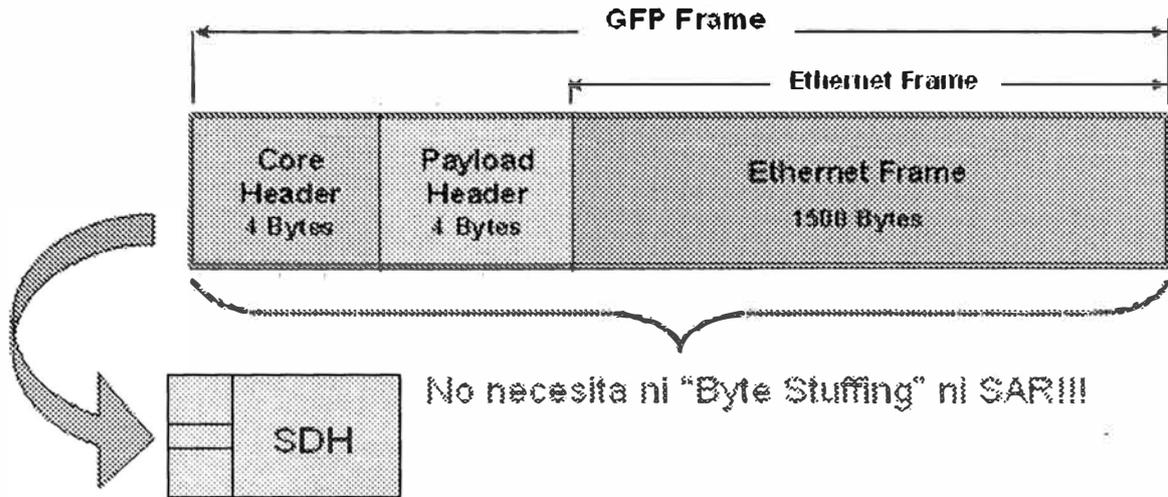


Fig. 3.10 Trama GFP

Como las tramas GFP son transportados por los VCs-SDH, las capacidades de transporte de cada VC precisan ser llevados en consideración en el proyecto. (Por ejemplo: VC-12 = 2.176Mbps, VC-3 = 48.384Mbps, VC-4 = 149.760Mbps, etc)

### 3.4 Redes Ópticas Ethernet sobre Redes de Transporte NG-SDH

A continuación un diagrama de bloques esquemático del transporte de redes Ethernet sobre las redes de transporte NG-SDH (SDH de Nueva Generación).

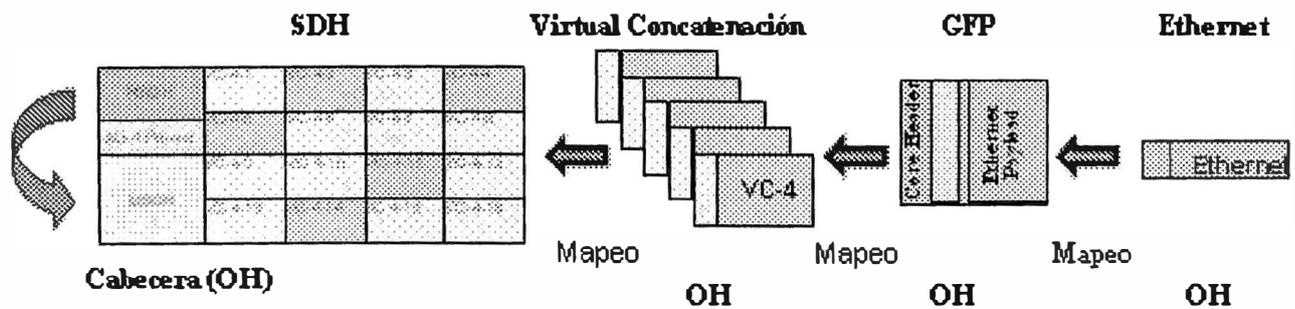


Fig. 3.11 Ethernet sobre NG-SDH

Como ejemplo práctico veremos el transporte de las tramas Ethernet (10Mbps) utilizando mapeo GFP y concatenación virtual VC-12-5v

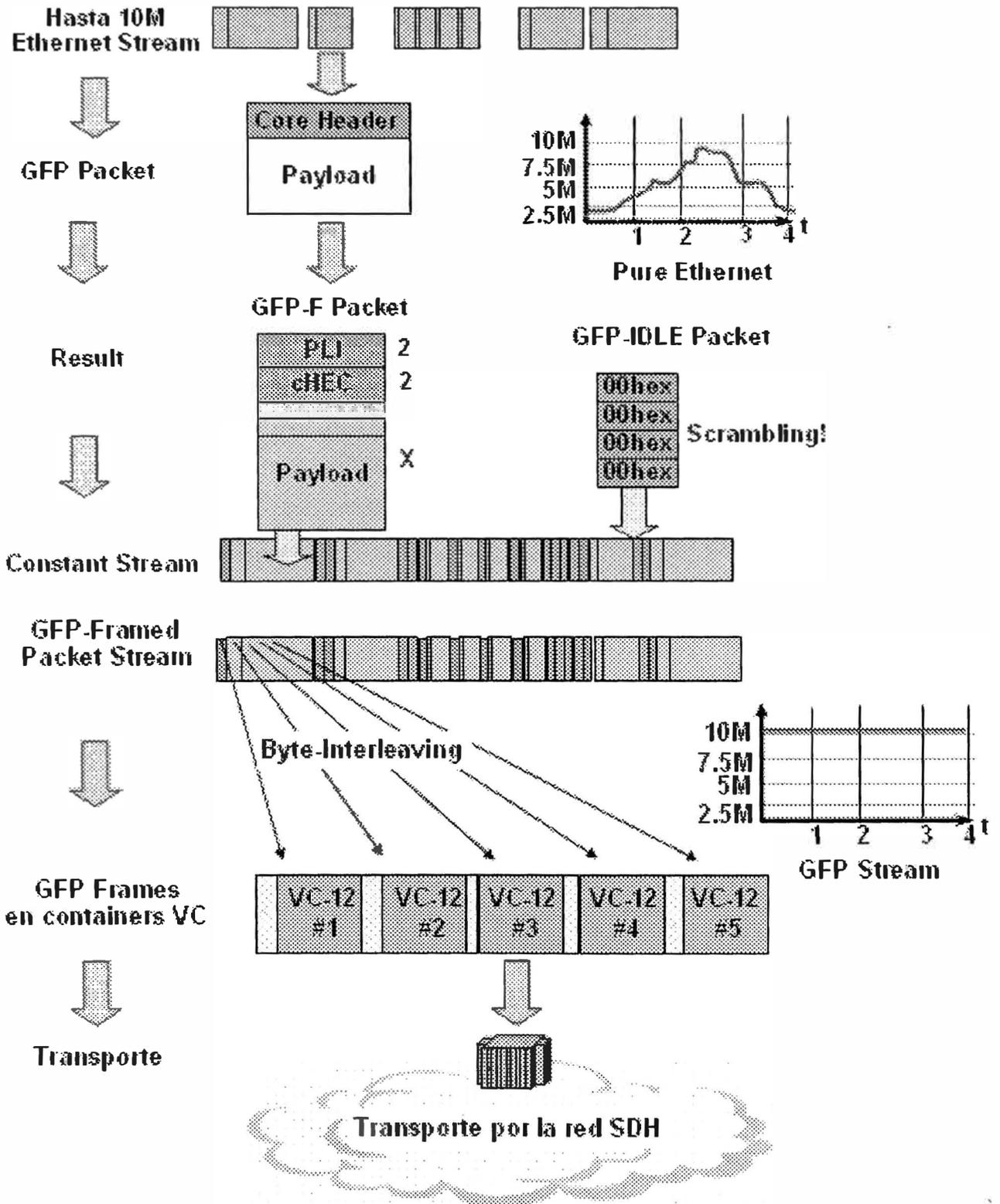


Fig. 3.12 Ethernet (10Mbps) utilizando mapeo GFP y concatenación virtual VC-12-5v

**Especificaciones para las pruebas de Ethernet sobre SDH**

Para equipos con soporte y mapeo GFP ITU-T G.7041, las pruebas propuestas son:

1. Verificación de la transparencia extremo-a-extremo de señales Ethernet con banda variable, transportado por una red SDH;
2. Mapeo y de-mapeo de Ethernet sobre GFP;
3. Transporte transparente de tramas VLAN sobre una red SDH;
4. Verificación del desempeño según la RFC 2544 (throughput, latencia y pérdida de paquetes);
5. Verificación de tráfico unidireccional y bidireccional;
6. Verificación de alarmas, throughput, latencia y pérdida de paquetes cuando los VCs son conFig.dos de modo contiguo (VC-4-4c) variar los tamaños de los paquetes ( 64 a 1518 bytes);
7. Verificación de alarmas, throughput, latencia y pérdida de paquetes cuando los VCs son conFig.dos de modo virtual transportados de modo contiguo en (VC-n-Xv, donde  $n=12, 3,4$   $X= 1,2,..$ ). Variar el tamaño de los paquetes (64 a 1518bytes);
8. Verificación de alarmas, throughput, latencia y pérdida de paquetes cuando los VCs son conFig.dos de modo virtual (ITU-T G.707) y transportados en modo no contiguo o multi-trayecto en (VC-n-Xv, donde  $n=12, 3,4$   $X= 1,2,..$ ). Variar el tamaño de los paquetes (64 a 1518bytes);
9. Verificación del retardo introducido por el efecto del multi-trayecto (differential delay) comparado con un retardo verificado de mediciones de trayectos contiguos. Variar el tamaño de los paquetes (64 a 1518bytes);
10. Provocar un retardo de multi-trayecto (differential delay) y verificar la latencia de extremo-a-extremo y la pérdida de paquetes. Variar el tamaño de los paquetes (64 a 1518bytes);
11. Provocar un corte del canal principal de transporte y verificar el rendimiento de la protección, midiendo una pérdida de paquetes durante la conmutación;
12. Monitoreo de la cabecera GFP con generación de corrección y no corrección de errores.
13. Monitoreo y emulación de paquetes de control de Concatenación Virtual;
14. Verificar el funcionamiento dinámico de la configuración del ancho de banda utilizando el LCAS (Link Capacity Adjustment Écheme) ITU-T G.7042 y el Inter-funcionamiento con la Concatenación Virtual;
15. Monitoreo y emulación del LCAS vía los bytes H4 y K4 (POH). Verificación de la adición y supresión del ancho de banda.

## CAPÍTULO IV EVOLUCIÓN DE LAS REDES DE TRANSPORTE

### 4.1 Introducción

Como se muestra en la Fig. 4.1, Hoy en día las redes de transporte se basan en una infraestructura de fibra con sistemas WDM configurados estáticamente.

En la parte superior de la capa de red WDM estática se encuentra la red SDH con administración centralizada. Los clientes principales de las redes de transporte son redes IP, conectadas con velocidades STM-16 ó STM-64 mayormente. Los routers IP podrían ser conectados directamente vía conexiones WDM estáticas STM-16 y STM-64 si ellos no requieren protección SDH. [14]

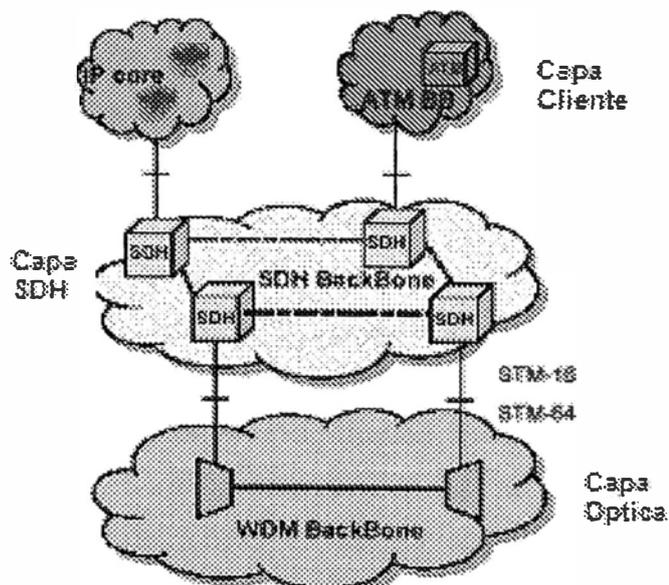


Fig. 4.1 Infraestructura de las Redes de transporte actuales

Actualmente, se está experimentando un crecimiento exponencial del volumen de tráfico de datos. Este crecimiento se debe a que el protocolo IP se está consolidando como capa de integración para servicios múltiples, algunos de ellos con requerimientos de calidad de Servicio (QoS) y también a la introducción de tecnología de acceso de alta velocidad.

Como consecuencia, a surgido la necesidad de emigrar desde las actuales redes hacia una estructura más flexible y dinámica, optimizada para el transporte de tráfico de datos. Un backbone inteligente que soporte requerimientos emergentes tal como el provisionamiento rápido y dinámico de conexiones, descubrimiento automático de la topología, Ingeniería de tráfico reactiva y restauración rápida en caso de fallas.

## 4.2 Evolución de la red de transporte

### 4.2.1 Evolución de la ruta de las redes de transporte

La evolución de la ruta de las redes de transporte actuales esta caracterizado por el escenario de redes centralizado en datos (Fig. 4.2). Tal evolución comprenderá varios pasos dependiendo del tiempo que tome cada evolución.

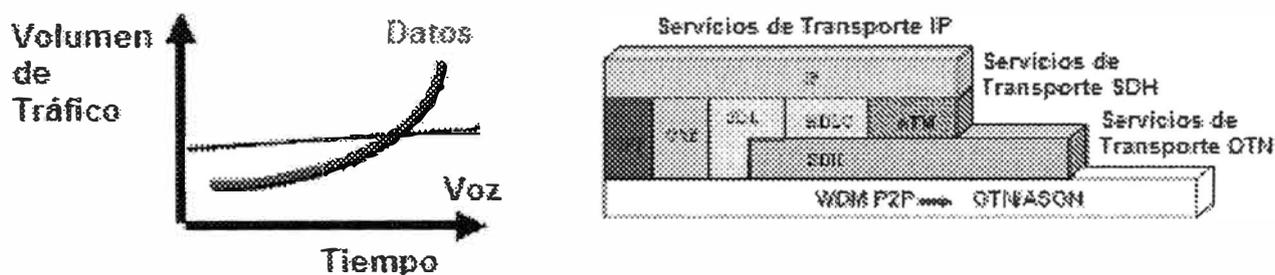


Fig. 4.2 Ruta de evolución hacia redes de datos

#### a) El primer paso en la ruta de la evolución de la red

El primer paso en la ruta de la evolución de la red esta basado en la adición de las funcionalidades de la red (ejemplo, la configuración dinámica del ancho de banda) para las redes actuales SDH a través de la implementación de la Concatenación Virtual (VCAT) y el Esquema del Ajuste de la Capacidad del Enlace (LCAS). La tasa de bits de la carga SDH son rígidos desde que ellos fueron diseñados originalmente para redes de voz tradicionales. VCAT trata de hacer más flexible esta característica basándose en el rompimiento de la carga en canales individuales (miembros llamados Grupo de Concatenación Virtual, VCG), transportando en forma separada cada canal y recombinando ellos dentro de un ancho de banda contigua en el punto final de la transmisión. Esta funcionalidad es necesaria solo en los equipos terminales de ruta.

Con la definición LCAS, el número de carga (miembros) concatenados podrían ser incrementados o reducidos en cualquier tiempo sin afectar el tráfico actual que esta siendo enviado. Además, LCAS automáticamente reducirá la capacidad si un miembro del VCG experimenta una falla en la red. Específicamente, cuando uno de los canales constituyentes experimenta una falla, este será automáticamente removido mientras que

los otros canales estarán todavía trabajando. Así, el ancho de banda disponible será degradado pero la conexión será mantenida.

### **b) El segundo paso en la ruta de la evolución de la red**

El segundo paso en la ruta de la evolución de la red, para ambas redes metropolitanas y extensas es la eliminación de las capas de red SDH.

Además, las capacidades de transporte de SDH (ejemplo, protección y el mapeo de varias tasas de bits a través de los tributarios) están siendo absorbidas por la capa óptica gracias a los avances de la tecnología óptica, y la estandarización de la Red de Transporte Óptico (OTN). Una OTN está compuesta por un conjunto de elementos de red ópticos (Optical Cross-Connects (OXC) y Optical Add Drop Multiplexer (OADM)) conectados por enlaces de fibras. Las OTNs están aptas para proveer funcionalidades de red, como transporte, multiplexación, enrutamiento, administración, supervisión y mantenimiento de los canales ópticos que transportan señales de cliente, evitando el proceso electrónico de la data en los nodos intermedios. Una característica distinguida de la OTN es su provisión de transporte para cualquier señal digital independientemente de los aspectos de especificación del cliente, esto provee independencia en la capa del cliente.

Las redes de transporte (ambas SDH y la entrante OTN) tienden a ser estáticas, lo cual significa que las conexiones (ambos circuitos SDH y rutas de luz en las OTNs) son provistas en forma manual a través de la NMS (conexión permanente). Esta forma de configuración es una pérdida de tiempo, lo cual significa que puede tomar semanas ó aún meses para proveer conexiones de gran ancho de banda.

### **c) El paso futuro**

El paso futuro y no muy lejano en la evolución de la red, comprende la introducción de la Red Óptica Conmutada Automáticamente (ASON). Mientras las redes ópticas actuales solo proveen capacidad de transporte, la característica principal de una ASON es la habilidad para incrementar/reducir automáticamente la capacidad de transmisión en base a la demanda de los clientes. Configurando la inserción/extracción de canales ópticos y el descubrimiento del vecindario en forma automática. Para proveer tales funcionalidades de red, un Plano de control (CP) ha sido definido. El GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) es propuesto para ser el plano de control de las redes ASON. Esta es una extensión del conjunto de protocolos diseñado por la tecnología MPLS.

La implementación de un plano de control basado en GMPLS permite una visión integrada de la red, específicamente la integración entre la capa cliente y la capa de

transporte óptico. Esto es reconocido que tal integración lidera hacia mas bajos costos de red y complejidad.

La introducción de la inteligencia significa que el plano de control es reconocido como la solución óptima para todos los requerimientos, entre otros, el provisionamiento del ancho de banda punto a punto en forma flexible y rápida, descubrimiento automático de la topología y restauración rápida de los enlaces.

En este contexto, uno de los tópicos principales a ser resueltos es como administrar dinámicamente la capacidad disponible en el nivel óptico, para transportar el tráfico del cliente en una forma costo-efectivo, mientras se optimiza la utilización de las redes, reduciendo la complejidad de la red y la ineficiencia de las redes de transporte actuales.

En forma particular en el contexto de las redes metropolitanas, muchas redes usan estructura de anillos físicos. Esto es un ambiente natural para las redes SDH que constituyen el corazón de las redes metropolitanas actuales. Alternativamente, la tecnología Ethernet ofrece una solución mas simple y barata para el tráfico de datos, sin embargo su uso del ancho de banda es ineficiente y no toma ventaja de la topología en anillo para implementar un mecanismo de protección rápida.

La optimización de la utilización de las redes es muy crítica cuando ocurren fallas en la red (como una consecuencia de la necesidad de re-enrutamiento del tráfico afectado. Además, específicamente la capacidad de la red para recuperar el tráfico afectado por fallas, ha llegado a ser de vital importancia en las redes actuales y las de nueva generación necesitarán ser muy robustas para enfrentar estas fallas. Los operadores de red, además, tienen que tomar precauciones especiales para prevenir esto y como existe dificultad para prevenir fallas en la infraestructura de la red (falla de equipos, rotura de cables, etc.) el objetivo es mantener la disponibilidad de los servicios bajo estas condiciones de falla. Para hacer que las redes sean más confiables estas tienen que ser reconfigurables. Esta reconfiguración tiene que ser rápida y optimizar la utilización de la red. Finalmente, esto no tiene que incrementar mucho el costo de la red.

Para enfrentar estas fallas, la estrategia de recupero en una capa-única (una sola capa tiene la responsabilidad para la recuperación) es muy simple desde el punto de vista de implementación. Sin embargo, esto podría no ser lo más eficiente para recuperar la red de cualquier tipo de falla que puede ocurrir. Además, la recuperación multi-capa (varias capas de red pueden participar para las acciones de recuperación) proveen mejor rendimiento no solo en términos de protección si no también términos de optimización de los recursos. Sin embargo, esto requiere coordinación entre los mecanismos de recupero de cada capa.

## 4.2.2 Evolución de las tecnologías para las redes de transporte

### a) Capa Óptica

Los avances recientes en la tecnología habilitan la optimización de la arquitectura de las redes de transporte de telecomunicaciones. El progreso espectacular de la capacidad del ancho de banda por la fibra óptica removi6 el cuello de botella en las redes metropolitanas y regionales. Los sistemas DWDM ya instalados por los operadores de red con frecuencia ofrecen velocidades de 10/40Gbps por portadora 6ptica y 160 de esas portadoras por fibra. Los pron6sticos para los siguientes 3 a 5 a6os prometen varios cientos de landas y de 3 a 6Tbps como capacidad de transporte por fibra.

Actualmente, el esfuerzo principal de los vendedores de equipos y los operadores de red es lo concerniente a los aspectos de arquitectura de la capa 6ptica. Introducci6n de switches 6pticos, llamados Optical Cross-connects (OXC), y Optical Add and Drop Multiplexing (OADM) habilitar6n mayores reducciones de costos en las redes debido a la minimizaci6n del procesamiento de las se6ales electr6nicas y conversiones opto-electr6nicas.

Los operadores de red usualmente adaptan escenarios de evoluci6n progresivos para la capa 6ptica. Un primer paso puede ser basado en la introducci6n de conmutadores del n6cleo integrado, habilitando el procesamiento de la se6al en ambos la capa el6ctrica y 6ptica. Los Integrated optical digital cross-connects (O-DXCs) asegurar6n la compatibilidad con las redes actuales y al mismo tiempo proveer6n la capacidad de conmutaci6n en la capa de canal 6ptico (OCh).

El constante progreso en la tecnolog6a 6ptica traer6 al mercado nodos 6pticos con funcionalidad mejorada. La introducci6n de l6seres sintonizables habilitar6 todos los conmutadores reconfigurables 6pticos y ADMs.

El siguiente paso en un OXC es implementar las especificaciones del plano de control y una red de transporte 6ptica conmutada autom6ticamente tomar6 lugar tan pronto como esta llegue a ser econ6micamente viable.

### b) Capa el6ctrica

#### Capa SDH

La Jerarqu6a Digital S6ncrona (SDH) es una t6cnica estandarizada, madura y muy conocida. Desde que este fue inicialmente optimizado para el transporte de los servicios TDM, una capacidad r6gida de la carga tanto como una jerarqu6a de multiplexaci6n de tasa fija fue definida. Estas caracter6sticas tradicionales de la SDH causa problemas bien conocidos mientras transporta se6ales de datos que son inherentemente r6fagas (especialmente con la utilizaci6n eficiente del ancho de banda). Desde que el tr6fico de

datos superaron el tráfico de voz en las redes centrales esos problemas llegaron a ser más y más significativos e imponen nuevos requerimientos a las redes de transporte, especialmente a los sistemas SDH los cuales son la base para muchas redes de transporte en el mundo. La técnica SDH de nueva generación trata de cubrir todos estos requerimientos. El mapeo con el protocolo GFP, la Concatenación Virtual (VC) y el Esquema de Ajuste de la Capacidad del Enlace (LCAS) son los conceptos mas recientes y fueron explicados en el capítulo II del presente informe.

Otro aspecto relacionado a la evolución de la SDH es el desarrollo de interfaces STM-64 y STM-256. Ambos tipos de interfaces se encuentran hoy disponibles, sin embargo, parece que no será comúnmente usado en el futuro porque no se tiene aplicaciones de tal velocidad STM-256 y además impone requerimientos muy estrictos de la calidad del canal óptico.

### **Gigabit Ethernet**

La tecnología Ethernet es muy conocida y estable; su capacidad para las redes de computadoras no puede ser cuestionada. Desde años, las velocidades de 10 y 100Mbps han sido usadas para la construcción de redes de alta velocidad y a la vez económicas. Y durante los últimos años Gigabit Ethernet ha ingresado a las redes metropolitanas, regionales y extensas. Esta tecnología definitivamente no puede ser omitida en consideraciones de los escenarios de la evolución de las redes de transporte.

La especificación Gigabit Ethernet, comúnmente referida al estándar 802.3z, es actualmente incluida en el estándar 802.3-2002 del ANSI/IEEE publicada en marzo del 2002. Y también ha sido aprobada por el ISO/IEC.

Gigabit Ethernet puede ser usado en modo half-duplex y full-duplex. En el modo full-duplex provee métodos simples de encapsulación y entramado para paquetes de capas altas. El protocolo de acceso al medio CSMA-CD no puede ser usado en esta configuración.

El estándar Gigabit Ethernet (GbE) define GMII (Gigabit Media Independent Interface) provee interconexión entre la subcapa MAC y la capa PHY. El uso de GMII soporta la definición del rango de especificaciones PHY.

La tecnología Gigabit Ethernet ha sido diseñada para desarrollarse no solo en redes homogéneas. Es posible plantear, implementar y operar en redes mixtas de 10/100/1000Mbps. El dispositivo refiere a un "Bridge" multipuerto que puede manejar entradas Ethernet de varias velocidades de data.

10 Gigabit Ethernet continúan la evolución hacia velocidades más altas de transmisión y un rango más extenso. El grupo de trabajo 802.3ae formado en 1999 decidió adoptar solo

el modo de operación de 10GbE full-duplex, en el cual tampoco es posible usar el protocolo de acceso al medio CSMA-CD.

Existen dos tipos de interfaces PHY, el primero es recomendable para operaciones de redes de área local y metropolitana (LAN PHY: 10GBase-X, 10GBase-R) y el siguiente para redes de área extensa (WAN PHY: 10GBase-W). El estándar 10 Gigabit Ethernet propone interfaces físicas basado en fibras monomodo y multimodo

Las implementaciones WAN PHY se diferencian de la LAN PHY por el uso de la trama de SDH con funcionalidades reducidas. La trama para las interfaces WAN se encuentran en la interface Wan Interface Sublayer (WIS) y la salida de la WAN PHY es compatible con el formato de trama síncrono (VC-4-64c) y puede ser transportado fácilmente por la OTN. En cambio la salida de la LAN PHY de 10 Gigabit Ethernet tiene que ser adoptada antes de entrar a la OTN, esto se puede realizar usando el protocolo GFP.

La especificación 802.3ae fue aprobado como un estándar oficial en junio del 2002 por el estándar IEEE, después de tres años de actividad del grupo de trabajo.

La tecnología Ethernet también fue propuesta como una base para redes nuevas de acceso de alta velocidad. El grupo de trabajo 802.3ah comenzó a trabajar a fines del 2002. Este grupo de trabajo ya comenzó a dar sus primeros frutos adaptando la tecnología Ethernet a redes de acceso E-PON (point-to-point and point-to-multipoint), extendiendo de esta manera la cobertura de la tecnología lo cual será ofrecida para clientes residenciales y de negocios.

En cuanto a calidad de servicios la tecnología Ethernet se puede lograr a través del uso de las especificaciones 802.1p (Class of Services) y 802.1q (Virtual LAN)

### **4.3. Red toda óptica como objetivo en la evolución de las redes de transporte**

#### **4.3.1 Introducción**

En este acápite se comparan varias opciones de evolución de la red de transmisión actual, llegando a la conclusión de que la más favorable para un operador de comunicaciones establecido es la de red todo óptica independiente, frente a la tendencia de los fabricantes de grandes routers, que proponen una integración de la red de transmisión óptica con la capa IP.

También se incluye una descripción de los pasos que se deben dar para evolucionar de forma gradual la red actual de enlaces independientes punto a punto hacia una red mallada con reencaminamiento a nivel óptico.

Entrando más en detalle en las redes SDH y PDH, se distingue entre su formato de multiplexación eléctrico, con sus procedimientos de agregación de tráfico y supervisión de calidad, y la transmisión por línea, que es óptica. Hasta la fecha, la transmisión óptica es

funcionalmente muy simple: por una misma fibra se envían varias portadoras independientes, cada una con una longitud de onda diferente, que se generan en un elemento de red y terminan en otro con el que están unidos directamente por fibra. Si la distancia entre los elementos es superior a cien kilómetros, aproximadamente, se insertan en la fibra a intervalos regulares amplificadores ópticos, que amplían la longitud del enlace hasta varios cientos (y miles, en cable submarino) de kilómetros. Como una extensión de estos enlaces, en algunos casos también se insertan en la fibra filtros de extracción e inserción, que permiten derivar o insertar en puntos intermedios una o varias portadoras, de longitudes de ondas fijas. A la transmisión simultánea de varias portadoras se la denomina DWDM, del término inglés Dense Wavelength Division Multiplexing, o multiplexación densa en longitud de onda. En la Fig. 4.3 se representa esta configuración de los enlaces de forma esquemática.

Tal como se muestra en la Fig. 4.3, la frontera entre la red de transporte y un enlace de la red de transmisión óptica está definida por un elemento denominado transpondedor. En el sentido de entrada al enlace, la interfaz proveniente de la red de transporte suele ser óptica de corto alcance, a una longitud de onda indeterminada y con una pureza espectral baja. En el transpondedor la señal de esta interfaz se fotodetecta y regenera eléctricamente, y a continuación la señal resultante se utiliza para modular un transmisor óptico que emite a una longitud de onda específica. La salida de este transpondedor se multiplexa con la de otros, en otras longitudes de onda, y el múltiplex resultante se amplifica e inyecta en la fibra del enlace. [13, 14, 15]

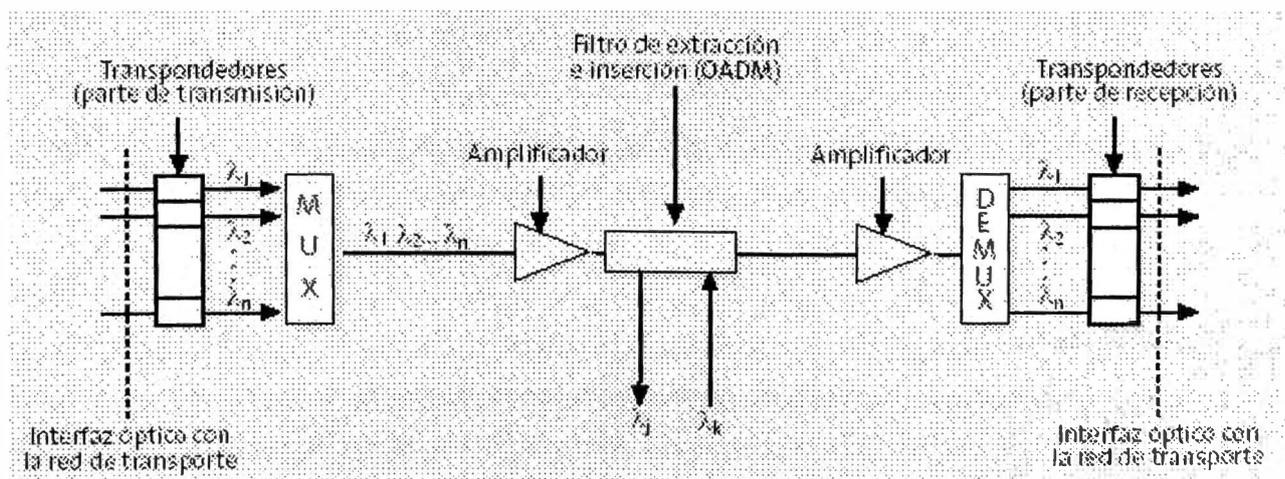


Fig. 4.3 Enlaces DWDM actuales

En el sentido de salida del enlace, el funcionamiento es similar. El conjunto de longitudes de onda que llegan de la planta se demultiplexan, y cada una de ellas se lleva directamente a la interfaz de la red de transporte. Opcionalmente, el transpondedor

incorpora un receptor óptico que fotodetecta y regenera la señal de línea, y a continuación remodula un láser de características genéricas. La salida de este láser, no seleccionado en longitud de onda, se lleva finalmente al elemento terminal de la red de transporte.

La demanda de ancho de banda crece, y continuará creciendo, sobre todo para tráfico de tipo IP. A su vez, se prevé el despliegue de nuevas redes de transporte IP (capa 3) con interfaces de multiplexación eléctrica (capa 2) de tipo Gigabit Ethernet o de paquetes sobre SDH (POS, packet over SDH). En la Fig. 4.4 se muestra una estimación de la demanda de tráfico IP a nivel europeo, diferenciando la parte correspondiente al tráfico nacional (del conjunto de los diferentes países) e internacional (o de interconexión entre ellos).

La demanda de capacidad viene acompañada por la aparición en el mercado de sistemas de transmisión que permiten multiplexar un mayor número de portadoras ópticas.

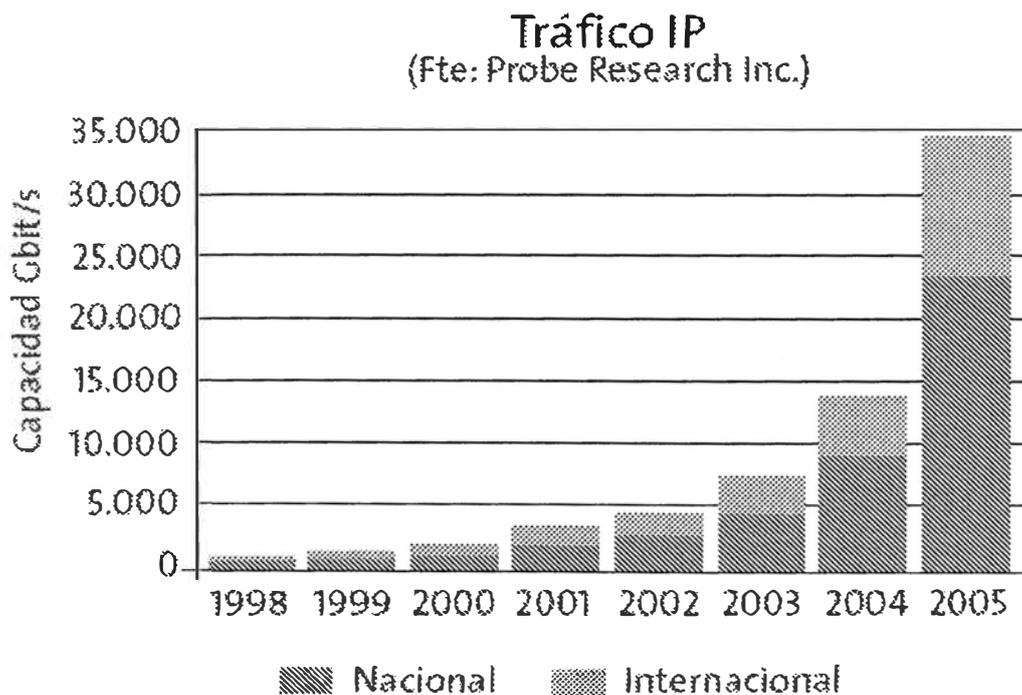


Fig. 4.4 Estimación del crecimiento de tráfico IP en Europa

Están comenzando a aparecer dispositivos que permiten el reencaminamiento de señales ópticas a nivel de portadora, principalmente filtros de extracción e inserción sintonizables y matrices de conmutación. Asimismo, se van perfeccionando elementos ópticos, tales como amplificadores, ecualizadores, compensadores de dispersión, etc.

En base a estos indicadores, se identifican tres opciones de evolución: [15]

a). **Evolución por defecto**, continuación de la red actual sin cambiar su filosofía.

A modo de ejemplo, la ruta Madrid Barcelona, que en el año 1992 disponía de un único enlace a 2,5 Gbit/s, consta en la actualidad de un enlace de 16 longitudes de onda, cada una de ellas modulada a 2,5Gbit/s, resultando en una capacidad total de 40 Gbit/s.

b). **Red GMPLS**, o integración de la transmisión óptica con la capa IP.

c). **Red toda óptica independiente**.

#### 4.3.2 Opciones de evolución

##### a) La opción de evolución por defecto

Consiste en dejar que la red de transmisión continúe creciendo a trozos, en función de las necesidades del momento. En este caso no se puede hablar de una red de transmisión, sino de un conjunto de enlaces ópticos independientes entre sí, que se van estableciendo para interconectar elementos de las redes de transporte. En el momento actual los elementos de red son básicamente Cross-Connects y ADMs del tipo SDH.

Un caso particularmente atractivo de evolución por defecto es el conocido como IP sobre DWDM, que se muestra de forma esquemática en la Fig. 4.5. En este escenario la red de transporte es IP, y todos sus elementos de red son routers. Dependiendo de su capacidad de direccionamiento de tráfico, reciben el nombre de Terarouters (TSR) o Gigarouters (GSR) para capacidades de terabit ( $10^{12}$  bit) o gigabit ( $10^9$  bit) por segundo, respectivamente. Asimismo, los routers se conectan entre sí mediante enlaces ópticos DWDM punto a punto.

En la red IP sobre DWDM, que se representa en la Fig. 4.5, no se realiza ningún proceso a nivel óptico: el reencaminamiento y las funciones de protección se llevan a cabo a nivel eléctrico en los routers. Por consiguiente, si un paquete o conjunto de paquetes IP tienen que atravesar "n" routers, sufren n procesos de conversión optoeléctrica.

La evolución por defecto tiene el atractivo de su simplicidad de planificación: no existe una capa óptica. Por contra, a medida que el tráfico en las rutas sube a centenares de Gbit/s, las conversiones optoeléctricas y de tránsito en los nodos intermedios obliga a aumentar de forma innecesaria el tamaño, consumo y número de los routers, así como la complejidad (y coste) de sus sistemas de gestión. Para corregir este problema, las otras dos evoluciones incluyen una capa de transmisión óptica pura, en la que el direccionamiento grueso se realiza a nivel óptico, que es muy simple y eficiente, y el fino a nivel eléctrico. La frontera entre fino y grueso la constituye la granularidad de la capa óptica: la portadora. En estos momentos el tráfico mínimo por portadora es 2,5 Gbit/s,

correspondiente a una trama STM-16, y se contempla bajar en algunos casos excepcionales a 1 Gbit/s, para asignar una trama Gigabit Ethernet a una portadora individual.

También se contempla la posibilidad de actualizar las rutas de mayor tráfico a 10 Gbit/s por portadora, aunque en la planta de Telefónica son muchas las fibras que no admiten esta velocidad de modulación por problemas de dispersión de polarización.

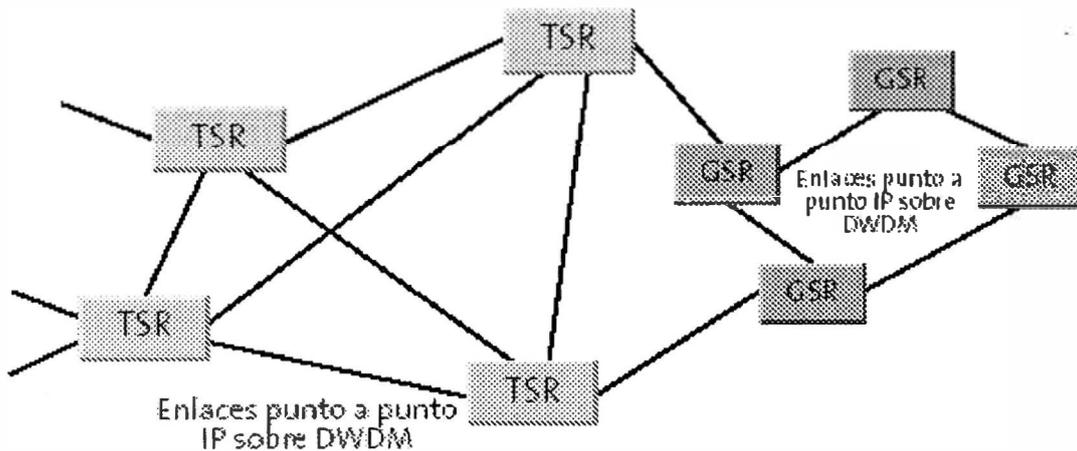


Fig. 4.5 Ejemplo de evolución por defecto, red IP sobre DWDM

#### b) La opción de red GMPLS

GMPLS, acrónimo del término MPLS generalizado, es una propuesta de extensión del estándar MPLS. Los fabricantes de routers la han presentado en el Internet Engineering Task Force (IETF), con la intención de comenzar sus tareas de normalización a lo largo del año 2001 (obviamente, no existe fecha definida para su finalización). El MPLS, a su vez, es un conjunto de mecanismos y tecnologías que permiten realizar ingeniería de tráfico de altas prestaciones en IP [2].

El objetivo que se persigue con el GMPLS es integrar en un mismo plano de control la red IP y los conmutadores ópticos, de forma que el operador vea el reencaminamiento óptico como una funcionalidad más de los router IP [3-4]. En la Fig. 4.6 se representa un esquema de este tipo de red.

En GMPLS se contempla la existencia de matrices de conmutación óptica, OXC (Optical Cross-Connect), que descargan a los router de gran parte del tráfico que no va destinado a ellos. Además, y aquí reside la esencia del GMPLS, los OXCs se consideran como un apéndice o elemento integrado de los routers, de forma que el conjunto de router más OXC se considera a nivel lógico como un único elemento de red, y la agregación de tráfico en portadoras y su direccionamiento se realiza desde una misma plataforma de control y gestión.

Además de la ventaja que representa utilizar conmutadores ópticos, GMPLS ofrece las ventajas propias de las estrategias de integración, las cuales se pueden resumir de la forma siguiente:

Al realizar bajo un mismo proceso la agregación eléctrica con la multiplexación óptica se optimiza el uso del ancho de banda.

La monitorización y protección se realiza a nivel eléctrico, eliminando la necesidad de introducir para ello mecanismos adicionales a nivel óptico.

Como generalización del punto anterior, no existe sistema de gestión de la capa óptica.

Frente a estas ventajas, GMPLS presenta también dos graves inconvenientes, uno de gestión, o de estrategia de operación, y otro de naturaleza física.

El inconveniente de la estrategia de operación se puede describir de la siguiente manera: aunque en GMPLS las capas ópticas y eléctricas son vistas por el operador como una única entidad, en realidad existen como entidades físicas distintas. Por lo tanto, no es evidente que vaya en beneficio del operador integrar las dos capas, porque eso le obliga a comprar la planta de conmutación y transmisión a los mismos suministradores. Por otra parte, en GMPLS se propone que, para poder implementar la función de reencaminamiento de tráfico, todos los conmutadores y routers dispongan de un mapa detallado de toda la planta. Con este condicionante, la diversificación de suministradores sólo es posible si todos los estándares GMPLS están completamente cerrados y las interfaces de control no admiten ambigüedad. Aún así, dado que GMPLS es básicamente software, la interconexión entre subredes de distintos fabricantes exigiría un nivel de estabilidad de los estándares similar al que existe ahora en la planta de conmutación de circuitos; teniendo en cuenta que la definición del GMPLS está arrancando en estos momentos, puede que pasen varios años hasta que se alcance ese nivel.

Para intentar paliar este inconveniente, los fabricantes de routers, conscientes de la importancia que los operadores atribuyen a la posibilidad de gestionar de forma independiente las diferentes capas de la red, han propuesto en el IETF una variante del GMPLS, conocida como *overlay option GMPLS* (GMPLS superpuesta). En esta variante, la plataforma de control de la red sigue siendo única, pero el operador puede separar a nivel administrativo la gestión de los conmutadores ópticos de la gestión de los routers. Frente a ella, la propuesta original de control integrado de toda la red recibe el nombre de *peer option GMPLS* (GMPLS entre iguales). Queda por ver qué grado de independencia de gestión permitirá el IETF a los OXC.

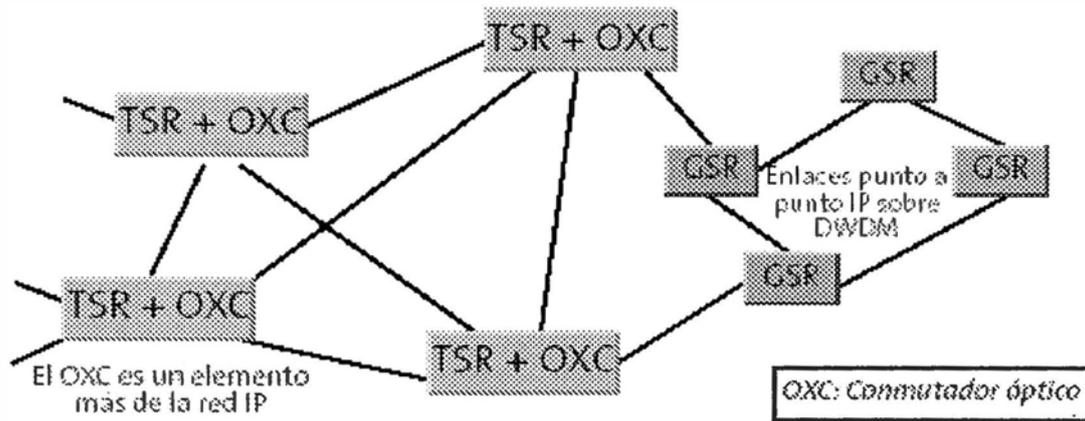


Fig. 4.6 Esquema de red GMPLS

El segundo inconveniente es más crítico y, sorprendentemente, no se menciona en las publicaciones relativas al GMPLS, ni en las conversaciones que los autores han mantenido con los fabricantes. Se refiere al hecho de que una red óptica incluye, o deberá incluir, no solamente conmutadores ópticos, sino otros elementos de red, como filtros sintonizables de extracción e inserción, ecualizadores de intensidad o elementos de compensación de dispersión cromática, y que una capa óptica requiere un mínimo de supervisión, mediante análisis espectral independiente, de las capas de multiplexación eléctrica conmutadores ópticos, sino otros elementos de red, como filtros sintonizables de extracción e inserción, ecualizadores de intensidad o elementos de compensación de dispersión cromática, y que una capa óptica requiere un mínimo de supervisión, mediante análisis espectral independiente, de las capas de multiplexación eléctrica.

Para evitar estos problemas, se propone la tercera opción de evolución: la de red todo óptica independiente.

### c) La opción red todo óptica independiente

En este escenario, representado en la Fig. 4.7 se distinguen diferentes elementos de red óptica (como conmutadores, filtros sintonizables, ecualizadores, etc.) y elementos terminales de red de transporte (como routers, crossconnects o ADM SDH y conmutadores ATM). La red de transmisión proporciona conectividad con reencaminamiento a nivel óptico y granularidad de portadora a las diferentes redes de transporte, y es independiente de todas ellas.

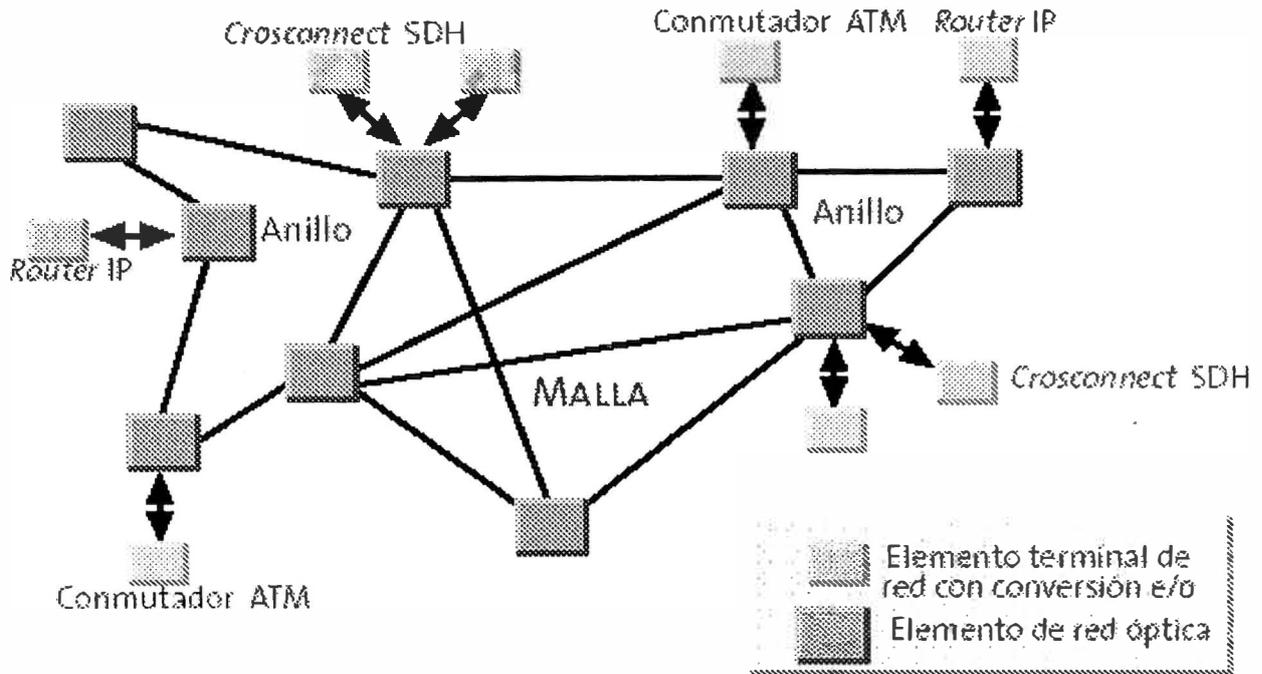


Fig. 4.7 Esquema de red todo óptica independiente

Además de contemplar cualquier tipo de elemento óptico, la principal característica que diferencia a esta opción de las anteriores es la independencia con respecto a las redes de transporte.

Abarca tres aspectos:

1. Independencia de formatos de modulación

La transmisión óptica es independiente del sistema de multiplexación eléctrico, incluso en las capas más bajas (la 1 y 2). La adaptación entre el entorno eléctrico y óptico se realiza en los transpondedores.

2. Independencia de sistemas de gestión

La independencia de los sistemas de gestión persigue dos objetivos:

a) Permitir al operador, si así lo desea, adquirir los sistemas de gestión de suministradores diferentes.

b) Dado que la funcionalidad de la capa óptica es mucho más simple que la de los estándares de multiplexación, el costo de su gestión deberá ser también muy inferior. El operador puede actualizar la gestión de su planta óptica sin verse forzado a adquirir una nueva versión del sistema de gestión de red de transporte, que potencialmente es más cara.

La simplicidad de la gestión de la capa óptica merece una aclaración. El operador puede manipular muy poco a una portadora; únicamente puede variar su intensidad, reencaminarla o filtrarla. Por contra, los elementos de las jerarquías de multiplexación eléctricas acceden al contenido digital de la señal, y sobre él pueden

realizar una gran variedad de actuaciones, como modificar canales de servicio, medir tasas de error, actualizar mecanismos de corrección de errores, y un largo etc. A nivel de gestión, la integración de la transmisión con el transporte se realiza de forma similar a como se integran en la actualidad sistemas y redes diferentes para ofrecer un único servicio: mediante un sistema de gestión de orden superior, tal como se ilustra en la Fig. 4.8 Este sistema lo suele desarrollar el propio operador a su medida.

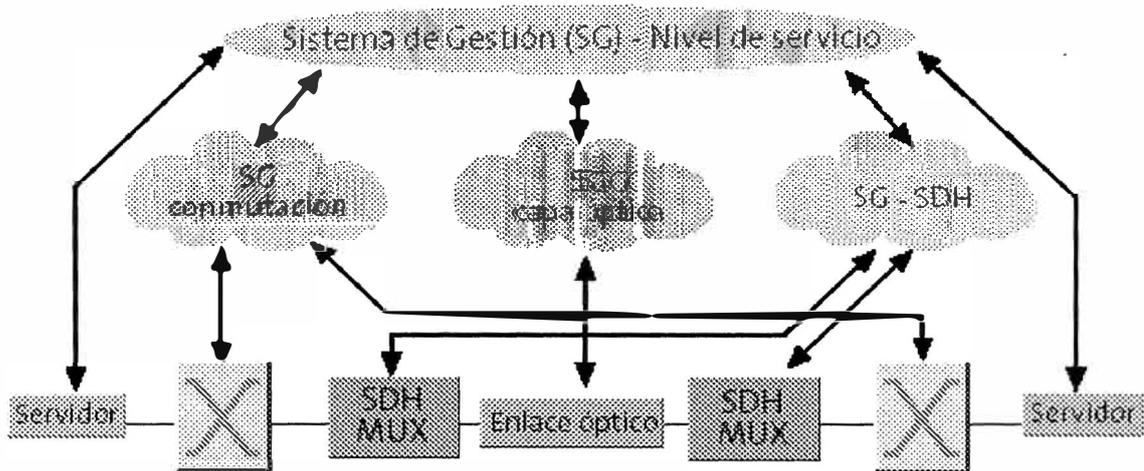


Fig. 4.8 Interconexión de sistemas de gestión

### 3. Independencia de los sistemas de protección

La independencia de los sistemas de protección es una consecuencia directa de la independencia de la transmisión óptica frente a los formatos de modulación. Si los enlaces soportan cualquier tipo de jerarquía de multiplexación, los mecanismos de protección óptica deben ser válidos para todas ellas. Además, la interacción o dependencia de la protección óptica con algún tipo de sistema de multiplexación conllevaría un interfuncionamiento de sus sistemas de gestión, en contra de los intereses descritos en el punto anterior.

De todo lo expuesto hasta este punto, se concluye que la evolución gradual hacia una transmisión todo óptica independiente del transporte constituye probablemente la opción que defiende mejor los intereses a largo plazo de un operador multisuministrador.

## CONCLUSIONES

1. Las operadoras van a cubrir una gran demanda de servicios muy diversos, tanto emergentes como ya habituales. Por lo que actualmente se impone la optimización de las redes existentes. SDH tiene una larga vida por delante al dotarle de nuevas funcionalidades que permiten cubrir los nuevos servicios rentabilizando las inversiones realizadas y el “know-how” adquirido.
2. Estas redes SDH con nuevas funcionalidades, llamadas “SDH de Nueva Generación” (NG-SDH), garantizan QoS (Calidad de Servicio) y parámetros rígidos de SLA (Acuerdo de Nivel de Servicio) motivo por el cual esta siendo ampliamente implementado en el nivel de acceso para usuarios corporativos, garantizando una banda ancha de acceso con QoS.
3. La abundancia de Ethernet en las redes locales y la adaptación de estas sobre las redes NG-SDH muestran una combinación perfecta en lo económico y lo tecnológico. Dos factores importantes son tomados en cuenta por los operadores; el ahorro económico en la implementación de las redes NG-SDH el cual involucra solo los nodos extremos haciendo uso de toda la capacidad de las redes SDH tradicionales ya instalada, y la abundancia y el gran desarrollo de la tecnología de las Redes Ethernet en las redes locales.
4. Esto ultimo nos lleva a concluir que las redes puramente IP o Ethernet serán dejadas para un futuro un poco mas distante. Por lo tanto, hasta que el tráfico de datos crezca a una velocidad mayor de lo que se espera, una combinación de Ethernet con SDH parece ser el futuro.
5. Las OTNs están aptas para proveer funcionalidades de red, como transporte, multiplexación, enrutamiento, administración, supervisión y mantenimiento de los canales ópticos que transportan señales de cliente, evitando el proceso electrónico de la data en los nodos intermedios. Esta Red de Transporte Óptica absorbe las capacidades de transporte de SDH.

6. La futura "red toda óptica" supondrá una "nueva generación" para las tecnologías que soportan las redes troncales de las operadoras, pero tardará en llegar debido al incipiente estado del desarrollo de los estándares, de la inversión y del esfuerzo fructífero para soportar la demanda de servicios sobre redes existentes.

7. El despliegue de una "red todo óptica" en el futuro permitirá al operador disponer de una capa de transmisión de gran capacidad con una gestión muy simple. Será la base sobre la que se puedan construir diferentes redes de transporte IP, o cualquier otro tipo de red que en su momento se necesite.

Esta evolución gradual hacia una transmisión todo óptica independiente del transporte constituye probablemente la opción que defiende mejor los intereses a largo plazo de un operador multisuministrador.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] M.Sexton/A.Reid, "Transmission Networking: SONET & SDH", Hewlett Packard – España, 1998
- [2] ALCATEL CIT, "Introduction to Synchronous Systems" Alcatel Training – España, 1996
- [3] Recomendaciones ITU-T para SDH, "G.707, G.708, G.709, G.781, G.782, G.784" ITU-T - 2002
- [4] Stephan Schultz, "Guide to Synchronous Communications Systems" Acterna – Germany, 1999
- [5] Goff, David R., "Fiber Optic Reference Guide, 2<sup>nd</sup> edition" Focal press – Boston, 1999
- [6] Kartalopoulos, Stamatios V., "Introduction to DWDM Technology" IEEE Press – New York, 1999
- [7] Recomendaciones ITU-T para DWDM, "G.661, G.662, G.663, G.664, G.692" ITU-T - 2003
- [8] HUAWEI Technology, "DWDM Multi-service Transmission System –Technical Manual" Huawei – Shenzhen, China, 2005
- [9] Innes Brunn, "Guide to DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing" Actema – Germany, 1999
- [10] Recomendaciones ITU-T para NG-SDH, "G.7041, G.707, G.7042" ITU-T - 2003
- [11] Luiz Oliveira Jr., "Redes Ethernet Ópticas" Actema – Brasil, 2004
- [12] Recomendaciones ITU-T para OTN, "G.709, G.957, G.959.1" ITU-T - 2003
- [13] Jesús F. Lobo/ Wsewolod Warzanskyj G. "Redes de Transmisión todo Ópticas" Telefónica Investigación y Desarrollo – España, 2001
- [14] Salvatore Spadaro, "Traffic Engineering in IP over Optical Transport Networks for Metropolitan and Wide Area Environments" Tesis para el grado de Doctor en Ingeniería de Telecomunicaciones – UPC, España 2004
- [15] Dario Bonanomi, "Redes de Transporte Inteligente basadas en ASTN" Tesis para el grado de Doctor en Ingeniería de Telecomunicaciones – España, Jun 2005.