



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

CONFIGURACIÓN DE CIRCUITOS ETHERNET SOBRE SDH EN EQUIPOS OMS

José Andrés Grajeda García

Asesorado por el Ing. MSc. PhD. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, mayo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONFIGURACIÓN DE CIRCUITOS ETHERNET SOBRE
SDH EN EQUIPOS OMS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JOSÉ ANDRÉS GRAJEDA GARCÍA

ASESORADO POR EL ING. MSEE. PHD. (CAND) ENRIQUE EDMUNDO RUIZ
CARBALLO

AL CONFERÍRSE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, MAYO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Julio Cesar Solares Peñate
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

CONFIGURACIÓN DE CIRCUITOS ETHERNET SOBRE SDH EN EQUIPOS OMS

tema que fuera asignado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 23 de febrero de 2009.

José Andrés Grajeda García

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Guatemala, 5 de mayo de 2009

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Ingeniero
Julio Cesar Solares Peñate
Coordinador Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Coordinador:

Por este medio tengo el gusto de informar a usted, que he concluido con el asesoramiento del trabajo de graduación del estudiante **José Andrés Grajeda García**, con carné **200313128** el desarrollo de esta investigación como previo a su graduación se titula **Configuración de Circuitos Ethernet sobre SDH en Equipos OMS**. Después de Revisar detenidamente su contenido final, considero su aprobación como trabajo científico de graduación.

Por lo tanto, el autor del trabajo de graduación y yo su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,

Ing. MsEE. PhD. (cand) Enrique Edmundo Ruiz Carballo
Colegiado No. 2225



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 11 de mayo de 2009

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado:
“**CONFIGURACION DE CIRCUITOS ETHERNET SOBRE SDH EN EQUIPOS OMS**”, desarrollado por el
estudiante **José Andrés Grajeda García**, ya que considero que cumple con los requisitos
establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

REF. EIME 28.2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación del estudiante; José Andrés Grajeda García titulado: CONFIGURACIÓN DE CIRCUITOS ETHERNET SOBRE SDH EN EQUIPOS OMS, procede a la autorización del mismo.

Una firma manuscrita en tinta que parece decir 'M. R. Escobedo Martínez'.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR

GUATEMALA, 14 DE MAYO 2,009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF – DTG 138-2009.

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **CONFIGURACION DE CIRCUITOS ETHERNET SOBRE SDH EN EQUIPOS OMS**, presentado por el estudiante universitario: José Andrés Grajeda García, autoriza la impresión del mismo.

IMPRIMASE


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO:



Guatemala. Mayo de 2009.

/CDS

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS	Por sus bendiciones, amor, fé y permitirme la oportunidad de honrar a mis padres
Mis Padres	Por su insuperable amor, esfuerzo, comprensión y valores que me han hecho una mejor persona, así como ser el hijo más orgulloso que puede existir
Mis Hermanos	Por su gran amor, apoyo y confianza que me han ayudado enormemente a superar metas
Familiares y amigos	Por su apoyo incondicional
USAC	Por ser la casa de estudios, donde se inició mi formación profesional

ACTO QUE DEDICO A:

MIS PADRES

Ing. Rolando Grajeda Tobar
Marcia Liliana García de Grajeda

MIS HERMANOS

Ing. Rolando Antonio Grajeda García
Lic. MSc. Marcia Lucía Grajeda García
Ing. Pedro Augusto Grajeda García

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
GLOSARIO	V
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES GENERALES: ETHERNET	
1.1 Ethernet (Evolución de LAN hacia WAN).....	1
1.1.1 Conceptos básicos de Ethernet.....	1
1.1.2 Evolución de LAN hacia WAN.....	4
1.2 Teoría de transporte Ethernet.....	5
1.3 Evolución para el transporte de Ethernet	8
1.3.1 Soluciones para la estructura de trama Ethernet (Framework).....	8
1.3.2 Transportando Ethernet sobre cobre.....	10
1.3.3 Transportando Ethernet sobre un híbrido de Fibra-Coaxial.....	11
1.3.4 Transportando Ethernet sobre fibra óptica y WDM.....	12
1.3.5 Transportando Ethernet sobre SDH/SONET.....	15
1.3.6 Evolución de las soluciones para el transporte de Ethernet.....	16
1.4 El mercado de oportunidad de Ethernet y su impacto a SDH/SONET.....	18
1.4.1 Proveedores de servicio Ethernet y sus ofertas.....	19
1.4.2 Plan para el transporte optimo de Ethernet.....	19
1.4.3 Impacto a SDH/SONET del nuevo plan de transporte Ethernet.....	20
2. SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA: SDH/SONET	
2.1 Introducción a los sistemas de comunicación por fibra óptica.....	21
2.2 Fibra óptica, transmisores, receptores y amplificadores ópticos.....	25

2.2.1	Fibra óptica.....	25
2.3	SDH/SONET.....	40
2.3.1	Arquitectura y estructura de trama: SDH/SONET.....	41
3.	EVOLUCIÓN DE SDH/SONET PARA TRANSPORTAR ETHERNET	
3.1	Esquema en el ajuste de la capacidad del enlace.....	43
3.1.1	LCAS para la concatenación virtual.....	44
3.1.2	Cambiando el tamaño del grupo de concatenación virtual.....	45
3.1.3	Interacción de LCAS con Non-LCAS.....	46
3.2	Protocolo LCAS.....	47
3.3	Procedimiento Genérico de Tramas.....	47
3.3.1	Aspectos comunes del GFP para el alineamiento de octetos.....	49
3.3.1.1	Señal básica de la estructura para las tramas de los clientes GFP..	49
3.3.1.2	Tramas GFP del cliente.....	50
3.3.1.3	Control de tramas GFP.....	51
3.3.2	Aspectos específicos del cliente para el mapeo de las tramas GFP....	51
3.3.2.1	Carga útil de una MAC Ethernet	52
3.3.2.2	Carga útil IP/PPP.....	53
3.3.2.3	Mapeo directo en MPLS.....	54
4.	CIRCUITOS EN EQUIPOS OMS	
4.1	Parámetros en la configuración Ethernet sobre SDH en equipos OMS.....	55
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES.....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Modelo IEEE asociado al modelo OSI	2
2	Trama Ethernet	3
3	Ejemplo de Red típica LAN	4
4	Atributos del transporte de Ethernet	7
5	Interfaces de Ethernet de 10Gbit sobre fibra óptica	13
6	Servicios de línea privada Ethernet (EPL) sobre fibra (EoF) y WDM (EoWDM)	14
7	Posibles escenarios de gestión de EoF y EoWDM	15
8	Panorama de soluciones del transporte Ethernet hoy en día	16
9	Evolución de la capacidad de los sistemas de comunicación	22
10	Evolución de los sistemas de comunicación óptica	23
11	Corte transversal de una fibra óptica	26
12	Corte longitudinal de una fibra óptica	27
13	Curvas de atenuación y dispersión para diferentes tipos de fibra óptica	29
14	Efecto de la dispersión cromática sobre la tasa de error en un sistema digital	32
15	Efecto de FWDM	37
16	Arquitectura SDH/SONET	41
17	Ambientes en los que GFP opera en la estructura de multiplexación	48
18	Orden de transmisión de GFP PDU	49
19	Relación PDU Ethernet a PDU GFP	52

20	Relación PPP/HDLC a GFP	53
21	Relación entre el PDU MPLS y PDU GFP-F	54
22	Diagrama a bloques de una configuración Ethernet sobre SDH	57

GLOSARIO

ATM	Modo de Transferencia Asíncrona o Asynchronous Transfer Mode.
ANSI	Instituto de Estandarización Nacional Americano o American National Standardization Institute.
Bucle	Estado cíclico constante infinito.
DCE	Equipamiento de Comunicación de Datos o Data Communication Equipment.
DOCSIS	Especificación de Interface para Servicios de Datos Sobre Cable o Data Over Cable Service Interface Specification.
DTE	Equipo Terminal de Datos o Data Terminal Equipment.
EoF	Ethernet sobre Fibra o Ethernet over Fiber.
EoWDM	Ethernet sobre WDM o Ethernet over WDM.
EPL	Línea Privada Ethernet o Ethernet Private Line.
Ethernet	Familia de tecnologías de redes basada en tramas.

ETSI	Instituto de Estandarización de Telecomunicaciones Europeo o European Telecommunications Standards Institute.
FPA	Aceptación de Falsos Paquetes o False Packet Acceptance.
Frame Relay	Técnica de comunicación mediante retransmisión de tramas.
GFP	Procedimiento de Trama Genérico o Generic Framing Procedure.
IEEE	Instituto de Ingenieros Electricos y Electronicos o Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IEEE 802.3	Colección de estándares regulados por la IEEE que definen Ethernet en una LAN. Desde 2005, también en una WAN.
IEEE 802.3ah	Colección de protocolos especificados en la IEEE 802.3, que define Ethernet en redes de acceso.
IEEE 802.1Q	Estándar regulado por la IEEE que define el significado de una VLAN.
IEEE 802.1w	Estándar regulado por la IEEE que define la reconfiguración rápida de un árbol de extensión.
IP	Protocolo de Internet usado para la comunicación de datos a través de una red de paquetes conmutados.
IPTV	Televisión sobre Protocolo de Internet.

ITU-T	Sector de Estandarización de Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones o Telecommunication Standarization Sector of the International Telecommunications Union.
LAN	Redes de Área Local o Local Area Network.
LCAS	Esquema de Ajuste de Capacidad de Enlace o Link Capacity Adjustment Scheme.
LLC	Control de Enlace Lógico o Logical Link Control.
MAC	Control de Acceso a Medio o Media Access Control.
MAN	Red de Área Metropolitana o Metropolitan Area Network.
MEF	Foro Metro Ethernet o Metro Ethernet Forum.
MPLS	Conmutación Multiprotocolar mediante Etiquetas o Multiprotocol Label Switching.
MSPP	Plataforma de Aprovisionamiento Multiservicio o Multiservice Provisioning Platform.
MTU	Unidad Máxima de Transmisión o Maximun Transmission Unit.
Multiplexación	Combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión

NMS	Sistema de Gestión de Red o Network Management System.
OAM	Operaciones, Administración y Mantenimiento
OMS	Multi-Servicio Óptico u Optical Multi-Service
OSI	Interconexión de Sistemas Abiertos u Open Systems Interconnection.
OPEX	Gastos de Operación u Operating Expense.
PDU	Unidad de Protocolo de Datos o Protocol Data Unit.
QoS	Calidad de Servicio o Quality of Service.
RSTP	Protocolo de Árbol de Extensión Rápido o Rapid Spanning Tree Protocol
SDH	Jerarquía Digital Síncrona o Synchronous Digital Hierarchy.
SONET	Red Óptica Síncrona o Synchronous Optical Networking.
STP	Protocolo de Árbol de Extensión o Spanning Tree Protocol.
Trama	Unidad de envío de datos.
VC	Contenedor Virtual o Virtual Container.
VCAT	Concatenación Virtual o Virtual Concatenation.

VCG	Grupo de Concatenación Virtual o Virtual Concatenation Group.
VLAN	Red de Área Local Virtual o Virtual Local <i>Area</i> Network.
VoIP	Voz sobre Protocolo de Internet o Voice over Internet Protocol.
WAN	Red de Área Extensa o Wide Area Network.
WDM	Multiplexación por División de Longitud de Onda o Wavelength Division Multiplexing.

RESUMEN

Consideraciones generales

Ethernet, comúnmente, se refiere a la tecnología de redes dominante que se utiliza en las Redes de Área Local o Local *Area* Network (LAN) para la conexión, la comunicación y el trabajo interinstitucional de los ordenadores personales, impresoras, servidores y otros dispositivos. Una LAN opera normalmente dentro de un área geográficamente limitada (como un edificio de oficinas o un pequeño grupo de edificios en un radio de pocos kilómetros y normalmente es de propiedad y administrados por una sola entidad de la empresa).

Ethernet está definido por el estándar IEEE 802.3 y permite half-duplex (se transmite en una dirección a la vez, en un medio físico compartido), así como full-duplex (se transmite simultáneamente en ambas direcciones) comunicación de datos, y proporciona las capacidades de la arquitectura en tres capas: Física, Control de Acceso a Medio o Media Access Control (MAC) y el Control de Enlace Lógico o Logical Link Control (LLC). Estas características corresponden con las dos primeras proporcionados por el modelo de referencia OSI, las cuales son Física y Enlace de Datos.

Transportando Ethernet

Una tradición en Ethernet es que el método para transportar la trama en el cableado debe ser bastante resistente en cuanto a la aceptación de falsos paquetes. La Aceptación de Falsos Paquetes o False Packet Acceptance (FPA) es la probabilidad de corrupción no detectada. La tecnología Ethernet sobre cobre usa un esquema llamado codificación 64/65, donde hay 1 byte de encabezado por cada 64 bytes de datos.

Con el incremento del requerimiento de ancho de banda de clientes finales hay un gran deseo en migrar hacia Ethernet redes tanto MAN como WAN. En la última década ha habido desarrollos cruciales en cuanto a la transmisión de Ethernet sobre fibra. Notablemente hay dos tendencias clave en redes ópticas, llamados Multiplexación por División de Longitud de Onda o Wavelength Division Multiplexing (WDM) y la estandarización de nuevas interfaces “Ethernet Ópticas”. Dos grandes logros han surgido de este tema, llamados directamente Ethernet Sobre Fibra o Ethernet Over Fiber (EoF) y Ethernet sobre WDM o Ethernet Over WDM (EoWDM).

Fibra óptica

En su forma más simple, una fibra óptica está formada por un núcleo de vidrio con índice de refracción n_1 rodeada por una capa de índice de refracción n_2 , siendo n_2 ligeramente menor a n_1 de modo de aprovechar fenómeno de reflexión total en la interface entre los dos medios. Estas fibras se denominan <<graded-index>> en las cuales el índice de refracción decrece de forma gradual desde el centro del núcleo hacia la interface. Dos parámetros importantes que caracterizan a las fibras ópticas son la diferencia relativa de índices de refracción núcleo-capa Δ dada por:

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1,$$

Y el llamado parámetro V , dado por:

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

Donde $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ es la longitud de onda y a es el radio del núcleo de la fibra. Este parámetro indica el número de modos que se pueden propagar en la fibra y se puede demostrar que una fibra “step-index” permite propagar un solo modo si $V < 2.405$. Las fibras que satisfacen esta condición se llaman “fibras monomodo”; de lo contrario, se

llaman “fibras multimodo”. La diferencia geométrica más relevante entre las fibras monomodo y las multimodo viene dada por el tamaño del núcleo. Para estas últimas, el radio a es típicamente 25-30 μm , mientras que las fibras monomodo, con diferencias relativas de índice de refracción $\Delta \approx 0.003$, tienen radios típicamente menores a 5 μm . Además, las fibras multimodo sufren del fenómeno de “dispersión modal” por el cual diferentes modos “viajan” a diferentes velocidades, conduciendo el ensanchamiento temporal de los pulsos de forma mucho más severa que en el caso de la dispersión cromática. Es por este motivo que no se usan fibras multimodo para sistemas de alta capacidad, restringiéndose su uso a sistemas “cortos” (algunas decenas de kilómetros de alcance).

Efectos lineales: dispersión cromática

El índice de refracción del núcleo de una fibra óptica depende de la longitud de onda de la luz que se propaga en ella. Este fenómeno se conoce como «dispersión material» y hace que los pulsos aumenten su duración temporal a medida que se propagan en la fibra. Este mecanismo, como se muestra en la Fig.5, puede producir errores de detección originados en la presencia de potencia óptica en los bits «0». Una forma aproximada del «factor de ensanchamiento temporal» de un pulso de forma «gausiana» está dada por :

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{B_2 L}{T_0^2} \right)^2},$$

Donde T_1 es la duración del pulso a la salida de la fibra de longitud L . T_0 es la duración inicial del pulso y B_2 es el llamado «parámetro de Dispersión de la Velocidad de Grupo» (parámetro de *GVD-Group Velocity Dispersion*); este parámetro nos dice cómo varía la velocidad del pulso con la frecuencia y es consecuencia de la dispersión material del núcleo de la fibra óptica.

Esquema de Ajuste de la Capacidad del Enlace

En una red SDH/SONET u OTN, el contenedor de carga transportado puede ser combinado eficientemente con la señal del cliente en cuanto al ancho de banda usando Concatenación Virtual o Virtual Concatenation (VCAT). El contenedor de carga es transportado por contenedores concatenados virtualmente VC-n-Xv y generalmente referido como Grupo de Concatenación Virtual o Virtual Concatenation Group (VCG), el cual consiste en X contenedores virtuales (VC), generalmente referidos como miembros del VCG. Para cambiar la capacidad del contenedor de carga contiguo, la metodología anteriormente mencionada provee grandes capacidades, por ejemplo en el decremento de la capacidad de la carga del VCG si un miembro experimenta una falla en la red y se el incremento de ésta cuando la falla es reparada. Esta metodología es estandarizada y puede encontrarse en la recomendación ITU-T G.7042, y es referida como el Esquema para el Ajuste de Capacidad del Enlace o Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS). La metodología será aplicada al VCG entero, lo que supone que cada miembro del mismo VCG debe soportar LCAS.

Procedimiento Genérico de Tramas

El Procedimiento Genérico de Tramas o Generic Framing Procedure (GFP), es definido en la ITU-T, en la recomendación G.7041 y es utilizada para encapsular el tamaño variable de carga de varias señales de clientes para transporte subsecuente sobre redes SDH y OTN. La definición incluye los formatos de trama de las Unidades de Datos de Protocolo o Protocol Data Units (PDU's), transferidos mediante puntos de fuente GFP y recepción GFP. Incluye también el procedimiento de mapeo, para las señales de clientes en los PDU's dentro de GFP. La figura 9 muestra el ambiente en el que GFP opera en la estructura de multiplexación.

OBJETIVOS

General:

Ofrecer una guía completa y detallada de la combinación de las tecnologías Ethernet y SDH, a efecto que después de este estudio, se facilite la configuración de este tipo de circuitos, y consecuentemente ofrecer una solución a las necesidades de los grandes clientes que trabajan con Ethernet.

Específicos:

1. La conservación de inversiones del cliente, permitiendo el empleo de SDH en cuanto al transporte de la red para crear conexiones punto-punto para los flujos de Ethernet.
2. Explicar los fundamentos necesarios de Ethernet para captar mejor la combinación con SDH.
3. Repasar los conocimientos necesarios para entender SDH con enfoque a redes Ethernet.
4. Explicar la concatenación necesaria y toda la estructura de la trama de Ethernet sobre SDH.

INTRODUCCIÓN

El aumento en la demanda del tráfico de Ethernet sobre redes de SDH tiene que ser optimizado por métodos para reducir la capacidad de transporte de SDH necesaria alineada con la verdadera velocidad de datos en la red de Ethernet. Además de nuevas normas para mapear y normas de ajuste de capacidad complementan la caja de herramientas para reducir el tamaño de banda necesaria en SDH, simultáneamente aumentando la capacidad de transporte de datos.

Para introducir servicios de Ethernet, el operador de red acepta el hecho que la red del futuro será basada en tramas, con Ethernet como el interfaz de servicio universal para la entrega de Datos y Voz. Como se mostrará en ésta tesis el cambio de tecnología de la red no tiene que ser imprudente, sino más bien debe ser una migración manejada con cuidado.

Para la mayoría de los operadores SDH domina la base de su tecnología. La utilización de SDH también protege la inversión y la experiencia dentro del grupo de tecnología de un operador grande, así no hay ninguna necesidad de cálculos de gastos operativos adicionales: el personal, el entrenamiento, ahorros, entre otros.

1. PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES GENERALES: ETHERNET

1.1 Ethernet (Evolución de LAN hacia WAN)

Esta primera sección ofrece una introducción para Ethernet, en aras de la integridad con el resto del texto. Ethernet ha estado por varias décadas y, como era de esperar, hay una buena cantidad de literatura disponible. Parte de esta literatura se señala en la sección de referencia al final de este texto y se debe consultar para una información más completa sobre Ethernet.

1.1.1 Conceptos básicos de Ethernet

Ethernet, comúnmente, se refiere a la tecnología de redes dominante que se utiliza en las Redes de Área Local o Local Area Network (LAN) para la conexión, la comunicación y el trabajo interinstitucional de los ordenadores personales, impresoras, servidores y otros dispositivos. Una LAN opera normalmente dentro de un área geográficamente limitada (como un edificio de oficinas o un pequeño grupo de edificios en un radio de pocos kilómetros y normalmente es de propiedad y administrados por una sola entidad de la empresa).

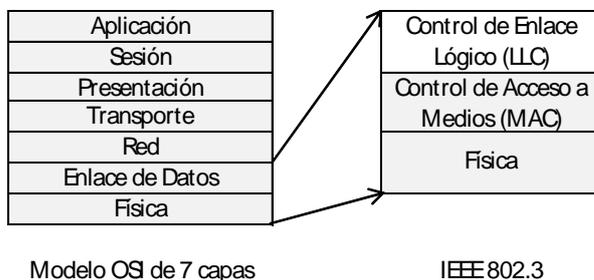
Ethernet específicamente abarca lo siguiente:

- La interfaz física de un dispositivo que interconecta un coaxial, fibra o algún otro medio de comunicación.
- Las tramas que se utilizan como contenedores para la transmisión y recepción de datos entre las interfaces físicas de los dispositivos en la LAN.

- El protocolo empleado para la comunicación entre estos dispositivos. Esto incluye la construcción de las tramas, transmitir las, así como recibir las, el procesamiento de estas tramas para los errores, el direccionamiento y toda la señalización asociada para entablar la comunicación.

Ethernet está definido por el estándar IEEE 802.3 y permite half-duplex (se transmite en una dirección a la vez, en un medio físico compartido), así como full-duplex (se transmite simultáneamente en ambas direcciones) comunicación de datos, y proporciona las capacidades de la arquitectura en tres capas: Física, Control de Acceso a Medio o Media Access Control (MAC) y el Control de Enlace Lógico o Logical Link Control (LLC). Estas características corresponden con las dos primeras proporcionados por el modelo de referencia OSI, las cuales son Física y Enlace de Datos. Esto se muestra en la Figura 1 y debe quedar claro que las correspondientes a la MAC y LLC son sub capas en el modelo IEEE y están destinadas a tener la misma función que la capa de Enlace de Datos en el modelo OSI. La capa MAC tiene como funciones básicas la encapsulación y la gestión del acceso a los medios. LLC se encarga de la multiplexación y demultiplexación de las tramas soportadas a través de la MAC, además de proveer control de flujo, reconocimiento y recuperación (de ser necesario).

Figura 1. Modelo IEEE asociado al modelo OSI



Fuente: Abdul Kasim. **Delivering Carrier Ethernet Extending Ethernet Beyond The LAN** Pág. 5

El estándar IEEE 802.3 ha definido un formato de base de la trama Ethernet, (como se muestra en la Figura 2), también conocida como la Unidad de Protocolo de Datos o Protocol Data Unit (PDU).

Figura 2. Trama Ethernet

Campo	Bytes	Descripción
Preambulo	7	Indica que la trama esta llegando
Delimitador de Comienzo	1	Indica donde comienza la trama
Dirección Destino	6	Identifica el dispositivo que recibirá la trama
Dirección Fuente	6	Identifica el dispositivo que envía la trama
Longitud o Tipo	2	Identifica el número de bytes de trama o el ID de la trama
Datos	46-1500	Datos actualmente acarreados
Secuencia de Chequeo de Trama	4	Chequeo de redundancia ciclica
	<1526	

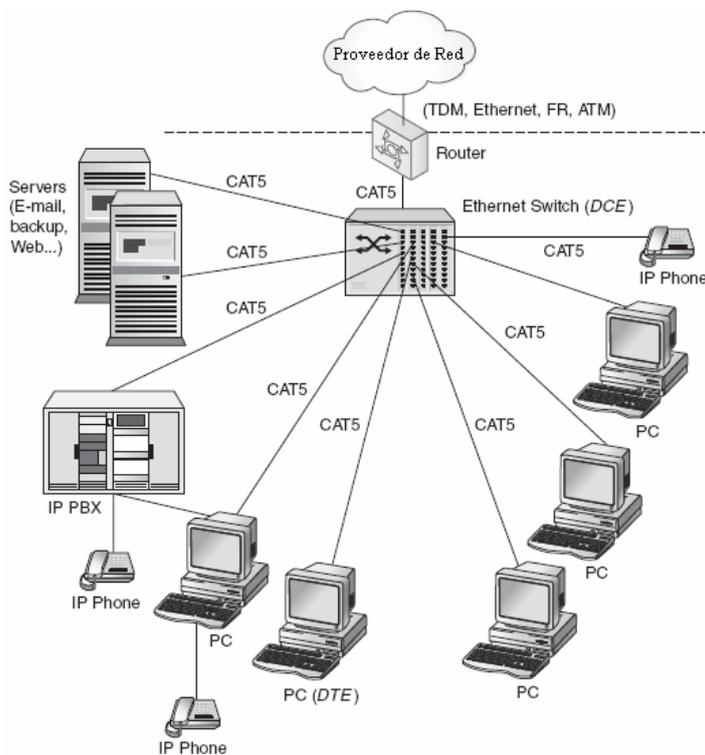
Fuente: Abdul Kasim. **Delivering Carrier Ethernet Extending Ethernet Beyond The LAN** Pág. 7

El tamaño máximo de una trama, denominado Unidad Máxima de Transmisión o Maximun Transmission Unit (MTU), en el caso normal es 1526 bytes (1 byte = 8 bits), incluido el contenido máximo de datos de carga útil de hasta 1500 bytes. Si los datos de carga útil son más grandes, se desglosa en tamaños más pequeños y encapsulados dentro de las tramas Ethernet.

Una Red de Área Local Virtual o Virtual-LAN (VLAN), definida en la IEEE 802.1Q, la cual permite la extensión necesaria de la trama requerida para acomodar 4 bytes para la VLAN. Ésta permite el tráfico de datos para establecer prioridades, para ser categorizado y para una forma más eficiente de manejarlos, por ejemplo el tráfico puede ser separado y categorizado para que se trate de una forma distinta, además de simplificar la gestión de la LAN. Los elementos de la VLAN que conforman el corazón

de la red, representada en la Figura 3, son el Equipo Terminal de Datos o Data Terminal Equipment (DTE), el cual es el dispositivo fuente o destino y el Equipamiento de Comunicación de Datos o Data Communication Equipment (DCE), el cual define los dispositivos intermedios para recibir y enviar la trama, tales como routers o switches.

Figura 3. Ejemplo de Red típica LAN



Fuente: Abdul Kasim. **Delivering Carrier Ethernet Extending Ethernet Beyond The LAN** Pág. 8

1.1.2 Evolución de LAN hacia WAN

La red más allá de la LAN es el proveedor de servicios de la red y está segmentado en el acceso, MAN y WAN. Una Red de Área Metropolitana o Metropolitan Area Network (MAN), como el término sugiere, se refiere a un red que abarca un área metropolitana, usualmente una ciudad y sus zonas circundantes, normalmente cubre decenas de kilómetros. Como una LAN, una MAN es una red de alta velocidad,

interconectando muchas entidades, aunque a través de una amplia zona geográfica. A diferencia de una LAN, que es por lo general privada, los proveedores de servicios poseen y operan normalmente una infraestructura de MAN. La capacidad en la creación de redes MAN se ofrece como un servicio (o servicios) por los prestadores de servicios por un pago periódico. Una MAN puede interconectar muchas LAN en el área metropolitana. Cada una de estas LAN, sin embargo, opera como una entidad independiente de la MAN.

Una Red de Área Extensa o Wide Area Network (WAN) se refiere a una red que cubre un área geográfica más grande que no sea cubierto por una MAN. No existe ninguna definición estándar, pero en general una WAN abarca la red que se extiende más allá de la distancia típica de la MAN. En nomenclatura tradicional de telecomunicaciones, una WAN hace referencia a redes que incluyen el núcleo metro, regionales, larga distancia y redes de ultra larga distancia. También conecta múltiples LAN y MAN, y es por lo general operada por varios proveedores de red. Generalmente utiliza fibra óptica como medio físico de transmisión y por lo general tiene un nivel mucho más alto de capacidad de ancho de banda que la MAN. Dentro de los beneficios más allá de la LAN se encuentran; la ubicuidad, la simplicidad, un único acceso convergente para todos los servicios, bajos costos, mínimos gastos operativos (OPEX), la familiaridad y experiencia con la tecnología. Además, a los proveedores del servicio, ofrece ventajas de mayor potencial de ingresos a través de un mayor ancho de banda, la entrega de múltiples servicios en una misma interfaz, reducción de costos de prestación de servicios, retención del cliente, conocer y reunir las demandas del cliente con nuevas oportunidades de crecimiento.

1.2 Teoría de transporte Ethernet

El Foro Metro Ethernet o Metro Ethernet Forum (MEF) a definido el “transporte ethernet” como un ubicuo, normalizado servicio de clase de transporte definido por

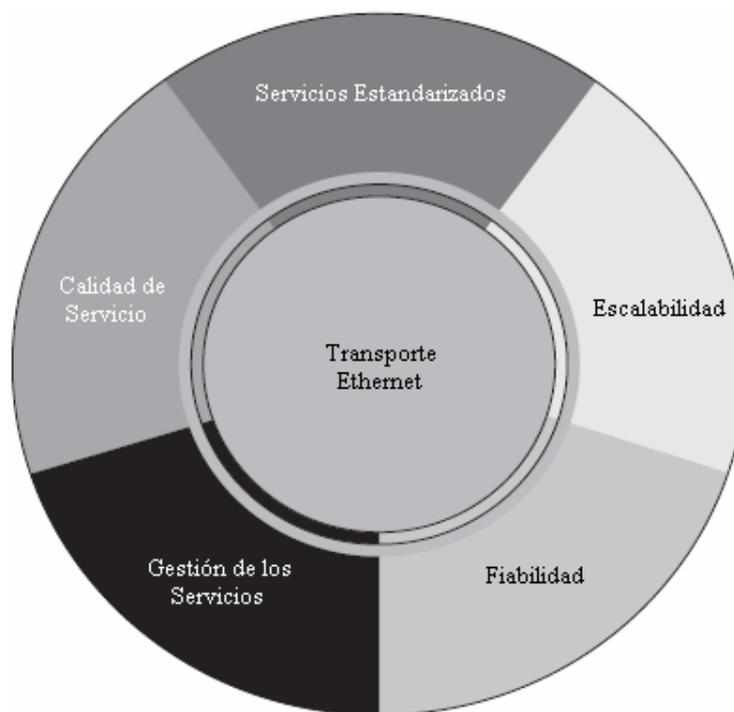
cinco atributos que distinguen el transporte Ethernet de la conocida LAN, como se muestra en la figura 4, estos cinco atributos son:

1. Servicios estandarizados: Permite, a un proveedor de servicios, ofrecer una gama de paquetes de servicios multipunto de una forma eficiente y determinística en cuanto a las plataformas del equipo. Estos servicios se basan en las múltiples aplicaciones que van surgiendo en cuanto a voz, datos y video.
2. Escalabilidad: En proveedores de servicios de red, por lo general hay cientos de usuarios finales y como consecuencia más conexiones para las aplicaciones basadas en Ethernet, simplemente porque cubre mayor área geográfica, mas soluciones de transporte de Ethernet, así mismo, varias dimensiones a considerar serían: usuarios o puntos finales, alcance geográfico, aplicaciones y ancho de banda, lo cual lleva consigo problemas de entrega, aislamiento, solución de problemas y en general el manejo de cientos de usuarios de forma sólida.
3. Fiabilidad: Dentro de los servicios de transporte de Ethernet se espera soporte para aplicaciones críticas a gran escala, además de la habilidad para detectar rápida y remotamente cualquier falla que pueda surgir en la infraestructura física, lo cual es esencial.
4. Calidad de Servicio (QoS): Proveer calidad de servicio es necesario en el transporte de Ethernet ya que debe considerarse como un sustituto de tecnologías como ATM, Frame Relay, entre otras y últimamente como un mecanismo de convergencia para entregar todas las tecnologías. La calidad del servicio esencialmente es

conformada para tener una calidad de rendimiento esperada para aplicaciones que lo exigen.

5. Gestión de los Servicios: Gestionar un número grande de clientes sobre una red extendida a un área geográfica amplia, exige a los proveedores tener una sofisticada capacidad de instalación, solución de problemas y mejora de los servicios Ethernet de manera rentable y rápida.

Figura 4. Atributos del transporte de Ethernet



Fuente: Abdul Kasim. **Delivering Carrier Ethernet Extending Ethernet Beyond The LAN Pág. 48**

Dentro de los desafíos en el transporte de Ethernet, se encuentra su disponibilidad, dentro de lo cual, tomando en cuenta el crecimiento de grandes y medianas empresas como clientes, debe ponerse gran atención a la disponibilidad de fibra, a la falta de disponibilidad en todas las locaciones, ya que esto obliga a las empresas a tener varios

proveedores y no solo uno. Otro desafío es la falta de atributos de transporte clave, tal es el legado de ATM, Frame Relay y servicios de líneas privadas que ofrecen aplicaciones de video, voz y datos, todo esto junto debe ofrecerse en una plataforma que los soporte, que además tenga la capacidad de monitoreo, de operaciones y mantenimiento. Debe tomarse en cuenta también la curva de demanda de ancho de banda, donde con servicios Ethernet puede ofrecer incrementos de hasta 10Mbps sin ningún problema, claro que esto conlleva a un desafío económico, pero con ésta tecnología ambas partes pueden beneficiarse, reduciendo costos tanto en proveedor como en cliente. Debe tomarse en cuenta también como desafíos la interoperabilidad y los esfuerzos de la estandarización.

1.3 Evolución para el transporte de Ethernet

En esta sección se define un marco de trabajo simple que intenta clarificar y poner en perspectiva, las distintas soluciones de red que son empleadas en proveedores de servicios para entregar servicios Ethernet.

1.3.1 Soluciones para la estructura de trama Ethernet (Framework)

Se debe hablar ahora acerca del modelo que muestra, según el MEF, cuatro capas, las cuales se describen a continuación.

1. Capa Física: Abarca lo que es la infraestructura que permite la transmisión física de datos e incluye cableado (cobre, coaxial, fibra óptica) y medios inalámbricos.
2. Capa de Transporte y Red: Provee el transporte de Ethernet en términos de la trama y utiliza una variedad de diferentes tecnologías operando sobre la capa física.

3. Capa Ethernet: Permite la instanciación de la conectividad de los servicios Ethernet. Ésta capa es la responsable en lo que respecta al flujo, incluyendo operaciones, administración, mantenimiento y aprovisionamiento necesarios para soportar servicios de conectividad.
4. Capa de Aplicación: Soporta las aplicaciones acarreadas sobre los servicios Ethernet proveídos en la capa Ethernet.

Con el fin de evaluar de manera significativa la diversidad de soluciones descritas en este texto, se desarrollará una solución estructurada. Esta estructura se utilizará en el debate de cada una de las soluciones para garantizar una evaluación global de la solución que abarca las empresas, la tecnología y consideraciones operativas, así como para proporcionar una medida de la uniformidad a través de las diferentes soluciones. Los componentes individuales de esta solución estructurada y sus respectivos objetivos, se describen a continuación.

- Descripción Tecnológica: Describe la solución subyacente tecnológica y pone de relieve sus principales características. También se debe tomar en cuenta cómo cada uno de los atributos del transporte Ethernet son (o serán), dirigidos en esta solución, y se determinarán otros elementos necesarios para la entrega de Ethernet. La discusión en general detalla los tres planos de la solución los cuales son de datos, control y gestión.

- Controladores para ésta solución: Aquí se provee información de la razón original por la cual ésta solución se desarrolló. Y se mira como ésta solución a evolucionado para acomodarse en la entrega de Ethernet.

- Ajustar la solución: Esta discusión se enfoca en los escenarios donde la solución es mejor situada.

1.3.2 Transportando Ethernet sobre cobre

Una tradición en Ethernet es que el método para transportar la trama en el cableado debe ser bastante resistente en cuanto a la aceptación de falsos paquetes. La Aceptación de Falsos Paquetes o False Packet Acceptance (FPA) es la probabilidad de corrupción no detectada. La tecnología Ethernet sobre cobre usa un esquema llamado codificación 64/65, donde hay 1 byte de encabezado por cada 64 bytes de datos. Este esquema de codificación es asombrosamente eficiente, lo cual es vital en las tecnologías de acceso que deben adaptarse al medio ambiente y ofrecer la máxima velocidad posible dada las condiciones de planta externa. A diferencia de los tradicionales LAN Ethernet, la implantación del cableado para Ethernet de banda media, es insustituible y si se debe sustituir será por fibra óptica. Por lo tanto la tecnología debe adaptarse al cambio y ser eficiente para utilizar mejor el medio ambiente.

Las técnicas de agregación de bucle de la IEEE 802.3ah son simples y poderosas. Las tramas son pasadas de la capa de agregación de bucle desde una capa superior, donde es fragmentada y distribuida a través de los bucles dentro de los agregados. Cuando se transmite a través de los bucles individuales, un encabezado de fragmentación es prepuesto, el cual incluye una secuencia numérica y marcas de trama. Éste encabezado es usado por el receptor para secuenciar los fragmentos y para reconstruirlos en la trama completa. Para permitir diferencias entre vendedores, el algoritmo del particionado de tramas a través de los bucles no está especificado. Sin embargo el algoritmo del particionado debe obedecer ciertas reglas, en cuanto a que los fragmentos deben obedecer ciertos tamaños y que los bucles deben obedecer cierta rata y reglas de retraso diferencial. Siempre y cuando se obedezcan estas reglas y restricciones

cualquier algoritmo de fragmentación puede ser manejado, siendo una flexible e interoperable solución.

Las empresas continúan adoptando más y más aplicaciones basadas en IP y dramáticamente han aumentado su requerimiento de capacidad. Aplicaciones como compartición de archivos, entrenamiento, capacidad de almacenamiento y video conferencia, están creciendo junto con la necesidad de ancho de banda. Voz sobre IP (VoIP) está empezando a reemplazar la clásica analógica, como el mecanismo primario de telefonía. Todos los proveedores están desarrollando cada vez más aplicaciones relacionadas con VoIP y removiendo su dependencia de servicios de voz tradicionales.

Ethernet ha ganado por mucho la batalla en convertirse en el método natural para aplicaciones IP. Los estándares Ethernet IEEE 802.3 han extendido velocidades para interfaces eléctricas y ópticas desde 10Mbps hasta 10Gbps y mas allá. Tarjetas para interfaces de este tipo han empezado a ofrecer mayor capacidad a menor costo, resultando esto en una dominancia sobre otras tecnologías. Las empresas ahora desean interconectar múltiples sitios y conectarse a internet manteniendo el desempeño de sus aplicaciones y Ethernet de banda media permite esto.

1.3.3 Transportando Ethernet sobre un híbrido de Fibra-Coaxial

La tecnología predominante usada para proveer servicios de Ethernet sobre un híbrido de Fibra-Coaxial es el estándar de Especificación de Interface para Servicios de Datos-Sobre-Cable o Data-Over-Cable Service Interface Specification (DOCSIS). Éste estándar provee una solución efectiva para los costos, ya que puede transportar señales digitales tanto como analógicas, de hecho está diseñado para coexistir fácilmente con servicios nativos de video y puede aportar garantías de calidad de servicio. En cuanto a términos de la descripción de la tecnología puede decirse que es un estándar diseñado sobre capa 1 y capa 2 que aplica el Control de Enlace Lógico (LLC), el cual hace

referencia al estándar IEEE 802.2, así como también utiliza el esquema de direccionamiento el Control de Acceso a Medios (MAC), que hace referencia al IEEE 802.3.

1.3.4 Transportando Ethernet sobre fibra óptica y WDM

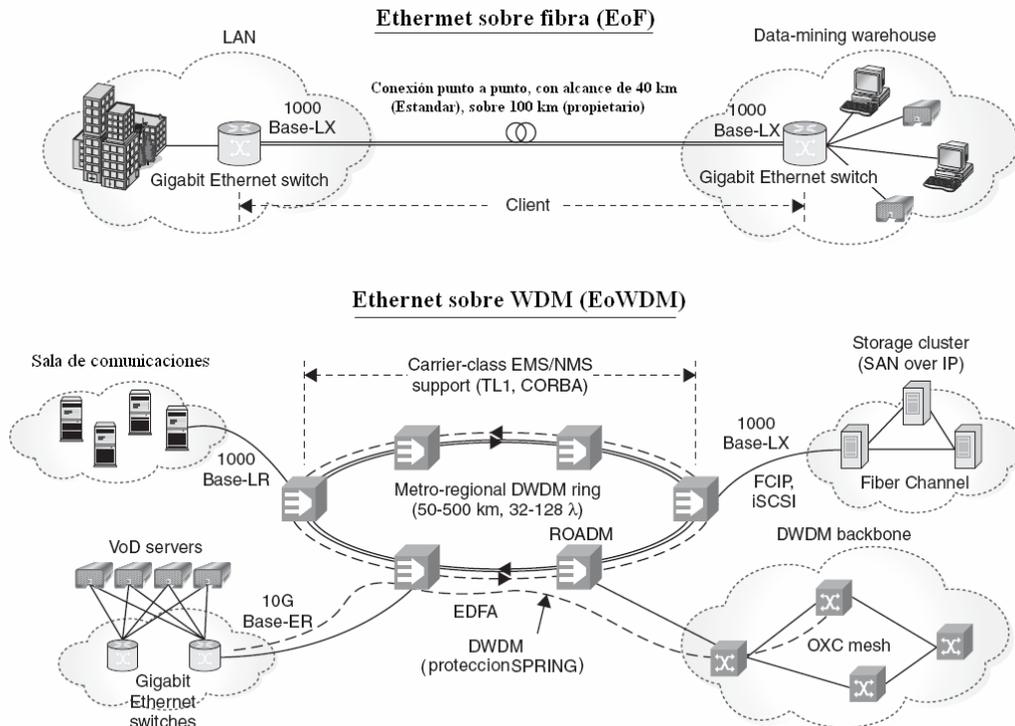
La fibra óptica representa uno de los medios de transmisión más conocidos, ofreciendo una gran escalabilidad en cuanto al ancho de banda, además que esta tecnología tiene una excelente inmunidad a la interferencia electromagnética y de radio frecuencia, una muy buena protección contra la intrusión y costos mínimos de mantenimiento a largo plazo. Como resultado la fibra se ha convertido en la solución a elegir para infraestructuras de gran escala, regionales, etc.

Actualmente Ethernet ha evolucionado en el último cuarto de siglo, convirtiéndose en la tecnología preferida para las redes en el campo empresarial de redes de área local (LAN). Ethernet ha probado tener costos bajos, simplicidad de instalación y uso.

Con el incremento del requerimiento de ancho de banda de clientes finales hay un gran deseo en migrar hacia Ethernet redes tanto MAN como WAN. En la última década ha habido desarrollos cruciales en cuanto a la transmisión de Ethernet sobre fibra. Notablemente hay dos tendencias clave en redes ópticas, llamados Multiplexación por División de Longitud de Onda o Wavelength Division Multiplexing (WDM) y la estandarización de nuevas interfaces “Ethernet Ópticas”. Dos grandes logros han surgido de este tema, llamados directamente Ethernet Sobre Fibra o Ethernet Over Fiber (EoF) y Ethernet sobre WDM o Ethernet Over WDM (EoWDM).

Un área crucial que ha tenido progreso es el diseño de interfaces Ethernet. Aquí se remarca que Ethernet continúa teniendo habilidades de adaptabilidad a diferentes medios físicos en varias sub capas. Este tipo de interfaces han jugado un papel propulsor en una

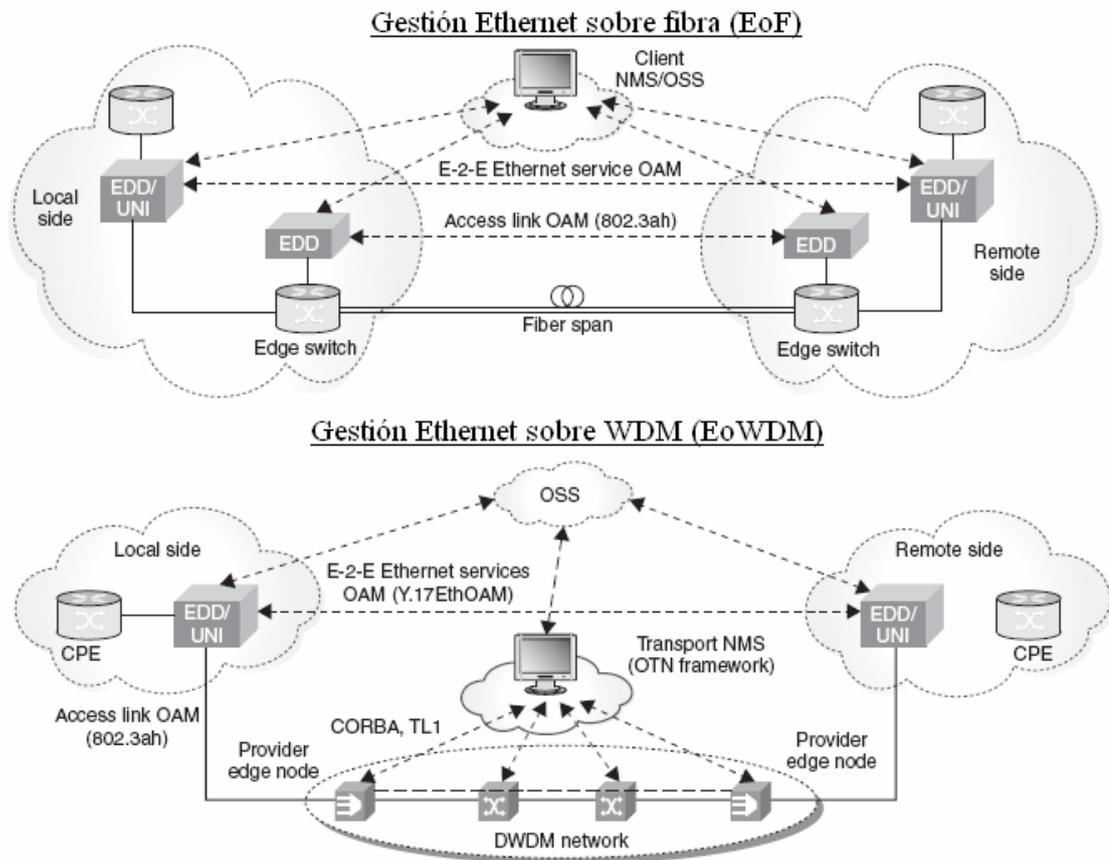
Figura 6. Servicios de línea privada Ethernet (EPL) sobre fibra (EoF) y WDM (EoWDM)



Fuente: Abdul Kasim. **Delivering Carrier Ethernet Extendig Ethernet Beyond The LAN** Pág. 217

Esto es claramente problemático si no se cuenta con soporte altamente capacitado y con el conocimiento necesario para la resolución de problemas. Por ejemplo los servicios de protección probablemente deben usar protocolos de red que gestionen enlaces redundantes como el RSTP, el cual trabaja sobre la segunda capa del modelo OSI, especificado en la IEEE 802.1w, el cual es una evolución del STP, reemplazándolo en la edición 2004 del 802.1d. Este protocolo reduce significativamente el tiempo de convergencia de la topología de la red, cuando ocurre un cambio en ésta. En términos generales si la ruta principal se cae, el RSTP activa la ruta redundante, configurando de nuevo la topología de la red adecuadamente, disminuyendo el tiempo de convergencia cuando un enlace falla, tomándose para la operación alrededor de 30 a 60 milisegundos. Otro protocolo usado es el MPLS.

Figura 7. Posibles escenarios de gestión de EoF y EoWDM



Fuente: Abdul Kasim. *Delivering Carrier Ethernet Extending Ethernet Beyond The LAN* Pág. 217

1.3.5 Transportando Ethernet sobre SDH/SONET

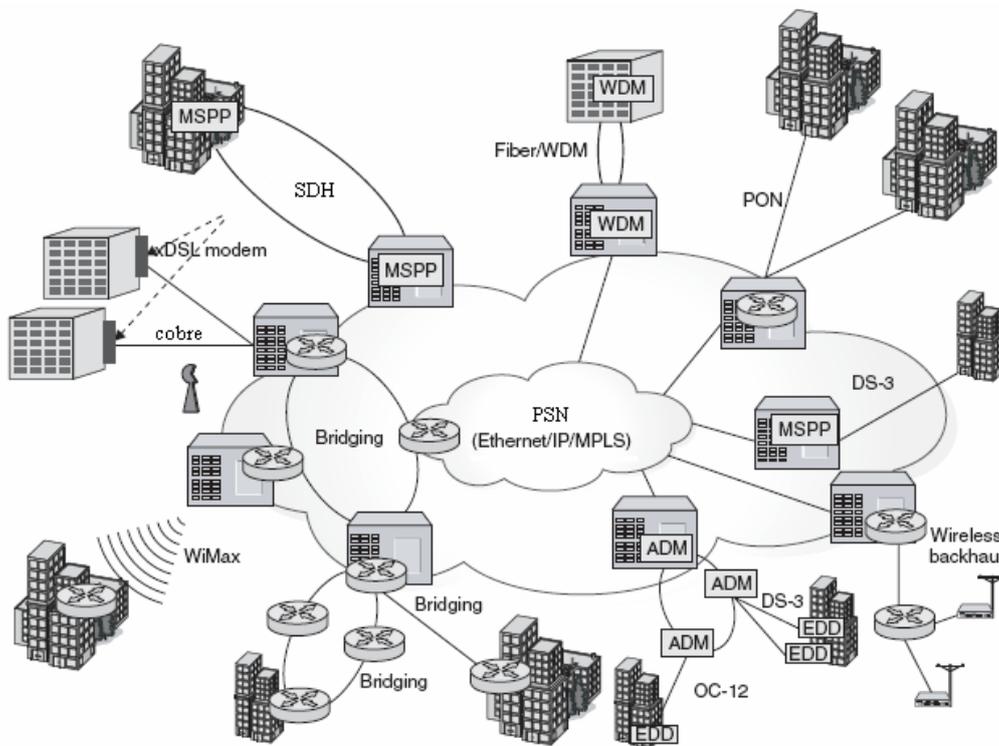
Desde su estandarización, la tecnología SONET ha crecido como el método predominante en acceso óptico en Norteamérica. Por lo que es natural que los proveedores quieran usar servicios Ethernet en sus grandes bases instaladas de equipos SONET. Esto estimuló la implementación de Ethernet sobre SONET (EoS). A finales de los 90's se vio el nacimiento de la Plataforma de Aprovisionamiento Multiservicio o Multiservice Provisioning Platform (MSPP), que es una red que combina el transporte SONET, switcheo SONET y capacidades de datos como EoS. Poco después, varias tecnologías clave incluyendo el Procedimiento de Trama Genérico o Generic Framing

Procedure (GFP), concatenación virtual (VCAT) y Esquema de Ajuste de Capacidad de Enlace o Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS), ayudaron a incrementar el ancho de banda de forma eficiente para implementaciones EoS e incluso a bajar los precios.

1.3.6 Evolución de las soluciones para el transporte Ethernet

Habiendo ya hablado de varias formas de transporte de servicios Ethernet, esto expande los diversos medios físicos, tecnologías de transporte, enfoques de diseño, soporte de aplicaciones y economía. Algunas están mejor paradas que las otras, dependiendo de las circunstancias, sin embargo todas son comercialmente viables. La figura 8 ilustra un panorama de estas soluciones usado en la entrega de servicios Ethernet a diversas empresas.

Figura 8. Panorama de soluciones del transporte Ethernet hoy en día



Fuente: Abdul Kasim. **Delivering Carrier Ethernet Extending Ethernet Beyond The LAN** Pág. 502

Mientras el transporte de Ethernet esté muy bien posicionado como la plataforma de entrega de aplicaciones de próxima generación, es importante entender que esto automáticamente no asegura su crecimiento, mucho menos su dominancia, especialmente en el futuro. Hay diversas variables independientes que van a determinar lo que vendrá. Algunos puntos clave deben observarse:

- Hay ocho influencias identificadas como: Aplicaciones (soportadas), Economía, Regulación, Substitutos, Tecnología, Competencia, Despliegue de fibra y Estandarización

- Cada uno de estos factores son influenciados por un conjunto de factores secundarios: por instancia, la economía es invariablemente una función del mercado, tomando como referencia los precios, el costo del servicio de los proveedores, etc.

- Casi todos los factores pueden ser considerados como influencias directas en la demanda del transporte de Ethernet.

- La demanda en sí directamente también influencia la economía, la estandarización, tecnología, despliegue de fibra y competencia de una manera positiva. De hecho con la excepción de la competencia, se forma un bucle reforzado con cada una de las otras influencias.

- Hay varias influencias severas en la relación entre los factores en sí; en estos casos, ellas son indirectamente influenciadas por la demanda del transporte Ethernet.

- Voz/Voz sobre IP (VoIP)

- IPTV/Video

- Aplicaciones de negociación
- Internet de alta velocidad
- Aplicaciones móviles e inalámbricas
- Ancho de banda
- Distancia
- Mejoras del transporte Ethernet
- Ethernet en la WAN
- Operación y mantenimiento de Ethernet

1.4 El mercado de oportunidad de Ethernet y su impacto a SDH/SONET

Ethernet tiene un largo suministro en cuanto a computadoras personales para la oficina, negocios, gobierno, colegios y universidades, es naturalmente la base para todas las LAN, incluyendo cerca del 98% del negocio de LAN. Esta ubicuidad ha presionado a los proveedores transportistas a usar Ethernet en sus redes. Es un costo efectivo desplegar y a los clientes les gusta y quieren servicios Ethernet. Aquí vemos que tiene beneficios substanciales para ambas partes.

Al hacer más grande el ancho de banda, está presente también la necesidad de actualizar el hardware, tanto para el proveedor como para el cliente con demoras inevitables mientras todo es probado. El ancho de banda puede hacerse más grande en cuestión de horas o minutos a través de software, con varios resultados deseados o un mejor proveedor, eficiencia de operaciones, clientes rápidamente satisfechos, retención de clientes y ahorro de costos en equipos para ambas partes.

1.4.1 Evolución de las soluciones para el transporte Ethernet

Dos temas se han combinado para formar el rango de servicios Ethernet, tanto en ofertas como en la habilidad de los proveedores de ofrecerlas:

- Las organizaciones y las corporaciones están demandando servicios Ethernet, con la expectativa de bajos precios por bit para satisfacer necesidades de crecimiento de capacidad de red.

- Ante el crecimiento del tráfico de datos, el viejo paradigma del transporte del tráfico de datos en redes diseñadas para tráfico de voz, ya no es válido. Los proveedores de servicios están adaptando sus tecnologías para soportar tanto exigencias de voz, como de video.

La demanda de las corporaciones por Ethernet está creciendo, ya que estas están encontrando y excediendo los límites de capacidad de tecnologías como Frame Relay, ATM y redes de líneas privadas. Dado que estas barreras se están excediendo, las corporaciones están buscando soluciones tecnológicas que puedan proveer el ancho de banda que necesitan por un precio considerablemente menor y la respuesta natural es Ethernet. Ethernet actualmente conforma una porción muy pequeña entre las millones de conexiones WAN en el mundo. Las primarias son T1/E1/J1 y T3/E3/J3, SONET/SDH y WDM; estas conexiones están moviendo Ethernet considerablemente rápido, pero siguen siendo las minoritarias.

1.4.2 Plan para el transporte óptimo Ethernet

Los proveedores de servicios han hecho inversiones considerables en el transporte Ethernet y están considerando cual es el modo más eficiente para lograr ofrecer servicios Ethernet. Muchos proveedores todavía usan varios tipos de redes, para ofrecer servicios Ethernet sobre SONET/SDH. Construir una red separada Ethernet, se

ha convertido en la solución para la mitad de proveedores de servicios. Para alcanzar más tipos de negocios, los proveedores de servicios están usando Ethernet sobre IP/MPLS y Ethernet sobre redes de menor costo.

1.4.3 Impacto a SDH/SONET del nuevo plan de transporte Ethernet

Así como la industria aérea, las telecomunicaciones tienen una industria intensa. Tiene bajos márgenes de costos y es extremadamente competitiva. Eso quiere decir que un proveedor de servicios debe antes invertir en considerables cantidades antes de ofrecer sus servicios, en otras palabras eso requiere enormes cantidades, en activos de red, para financiar cierta cantidad de ventas, y la automatización lleva a cada vez menos trabajo para operar la red. La desregulación y liberación a finales de los 90's, creó una feroz competencia alrededor del mundo, en numerosos nuevos proveedores en mercados regionales, nacionales e internacionales. La competencia lleva también los precios al margen más bajo posible, lo que elimina a los proveedores que no manejan su economía de una forma eficiente.

2. SISTEMA DE COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA: SDH/SONET

2.1 Introducción a los sistemas de comunicación por fibra óptica

La era moderna de las comunicaciones comienza en 1830 con la invención del telégrafo. Los hitos importantes en la evolución de los sistemas de comunicación están resumidos en la figura 9, donde se muestra el incremento de la capacidad de los sistemas de comunicación en los últimos 170 años. La capacidad está definida usando la figura de mérito de tasa por distancia, expresada ésta en bits transmitidos por segundo (bits/s) y kilómetros (km). Esta figura de mérito captura adecuadamente el concepto de que no es importante solamente cuanta información es transmitida por unidad de tiempo, sino qué tan lejos es el alcance. Hitos históricos señalados en la figura 9 incluyen la invención del teléfono, la introducción de sistemas operando sobre cables coaxiales (1940) y enlaces de microondas (1948).

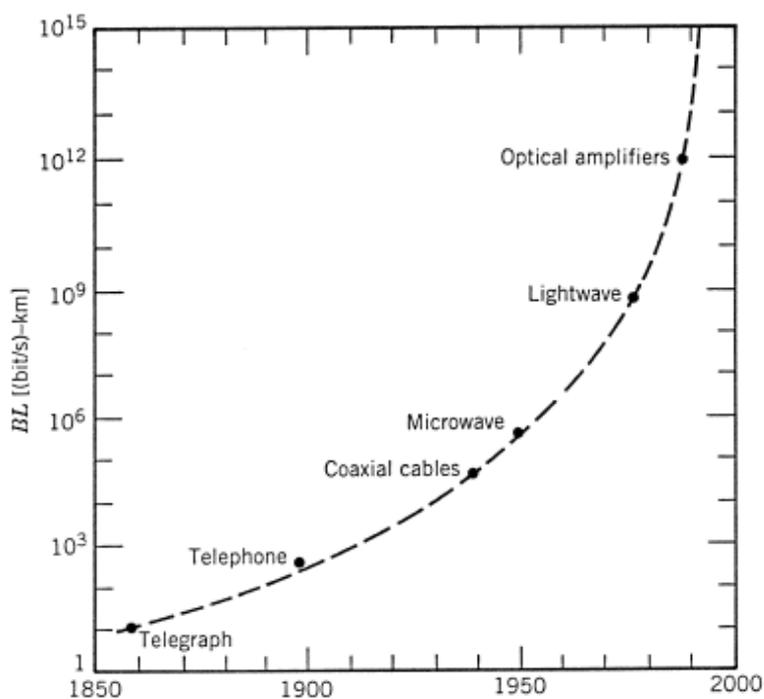
En 1980 se introduce el primer sistema óptico comercial operando a una tasa de 45 Mb/s, poniendo fin a un período de aproximadamente 100 años dominado por los sistemas de comunicación eléctrico y analógicos.

Ya en la segunda mitad del siglo XX se advirtió que utilizar luz como medio de transporte de información podía incrementar significativamente la capacidad de los sistemas de comunicación. Sin embargo, hubo que esperar la demostración del primer láser en 1960 para contar con una fuente de luz coherente e intensa.

El siguiente problema lo constituyó la ausencia de un medio de transmisión adecuado que confinara a la luz transmitida. En los años 60 muchas ideas fueron consideradas, inclusive la de utilizar lentes gaseosas. En 1966 se sugirió que las fibras ópticas podían representar la mejor alternativa para superar este problema. Sin embargo, las fibras ópticas disponibles en la época presentaban una atenuación de la señal

excepcionalmente alta, del orden de un decibel/m (en unidades lineales, esto representa una atenuación de aproximadamente 20% por cada metro recorrido), tornándolas imprácticas para aplicaciones reales. En 1970 se fabricaron las primeras fibras ópticas de baja atenuación: 20dB/Km en la región de longitudes de onda de 1 μm . Al mismo tiempo, el desarrollo de láseres de semiconductores capaces de operar a temperatura ambiente permitió contar con fuentes ópticas compactas.

Figura 9. Evolución de la capacidad de los sistemas de comunicación.

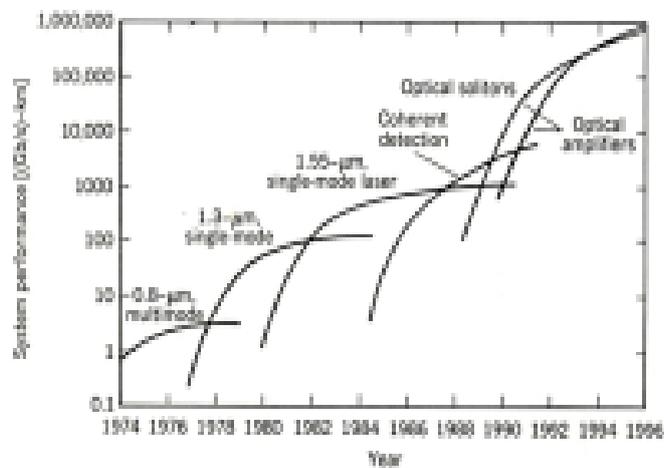


La disponibilidad de fibras ópticas de baja atenuación y de fuentes ópticas adecuadas dio un gran impulso al desarrollo de sistemas de comunicación óptica de alta capacidad.

<<Ventanas>> de comunicación y generaciones de sistemas de comunicación óptica. La evolución de la capacidad de los sistemas de comunicación óptica, y de las correspondientes ventanas de transmisión y generaciones, se muestra esquemáticamente

en la figura 10. En esta figura se detallan las longitudes de onda que caracterizan a las respectivas ventanas de transmisión: 0.8, 1.3 y 1.5 μm . Para sistemas que operan en longitudes de onda de 1.5 μm se detalla, también, la aparición de nuevas generaciones que, empleando diferentes técnicas, permitieron incrementar ampliamente la capacidad de transmisión de estos sistemas.

Figura 10. Evolución de los sistemas de comunicación óptica.



La primera generación de sistemas de comunicación óptica, introducida comercialmente en 1980, operaba en longitudes de onda de 0.8 μm , i.e. la llamada primera ventana de las comunicaciones ópticas. Estos sistemas operaban a una tasa de transmisión de 45 Mbits/s con una distancia entre repetidores (puntos de regeneración de la señal) de 10 km. La máxima distancia posible entre repetidores estaba dada por la atenuación de las fibras ópticas que limitaban la relación señal-ruido entregada por el sistema.

Quedaba claro en la época que era deseable transmitir información en longitudes de onda más largas aprovechando la menor atenuación de las fibras y así conseguir aumentar la distancia entre repetidores. Esto impulsó el desarrollo de láseres de semiconductores que emitieran luz en longitudes de onda de 1.3 μm , donde la atenuación de la fibra es menor a 1dB/km. Esta nueva generación operando en la segunda ventana

fue introducida en la primera mitad de los 80 y, como explicaremos más adelante, estos sistemas estaban limitados a una capacidad menor a 100 Mbits/s debido a la dispersión modal propia de las fibras multimodo. Este último problema fue solucionado mediante el uso de fibras monomodo y, en 1987, ya existían sistemas comerciales con capacidades de 1.7 Gbits/s y repetidores separados por 50 km.

Desde el punto de vista de la atenuación de la fibra, está claro que es deseable trabajar en torno del mínimo en la región de $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, donde la atenuación es $\alpha = 0.2$ dB/Km. Esta región es llamada tercera ventana. Sin embargo, las llamadas fibras monomodo Standard presentan un valor de dispersión cromática elevado en la tercera ventana.

La dispersión cromática, cómo mostraremos en la próxima sección, es consecuencia de la dependencia del índice de refracción de la fibra con la longitud de onda; es decir, diferentes componentes de frecuencia de los pulsos transmitidos viajan a diferentes velocidades, produciendo un ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos. Este efecto puede originar la superposición de diferentes pulsos, aumentando así la probabilidad de ocurrencia de errores de detección.

La búsqueda de una fibra óptica que presentara un mínimo de dispersión cromática en la tercera ventana llevó al desarrollo, y posterior introducción comercial a comienzos de los años 90, de las llamadas fibras DSF (*Dispersión-Shifted Fibers*). Estas fibras tienen una dispersión cromática aproximadamente 10 veces inferior al de las fibras monomodo estándar.

Posteriormente, y por motivos que explicaremos más adelante, la introducción fibras DSF llevó a la producción de nuevos tipos de fibras ópticas con valores de dispersión en la tercera ventana mayores a las DSF pero menores a las fibras estándar. Estas fibras son llamadas NZ-DSF (*Non-Zero Disesion Shifted Fibers*).

Finalmente la introducción comercial a comienzos de los años 90, de los amplificadores ópticos y de esquemas de Wavelength Division Multiplexing (WDM), en los cuales se transmiten varios canales a diferentes longitudes de onda por la misma fibra óptica, produjo un enorme incremento de la capacidad de transmisión de los sistemas de transporte óptico.

2.2 Fibra óptica, transmisores, receptores y amplificadores ópticos

2.2.1 Fibra óptica

En su forma más simple, una fibra óptica está formada por un núcleo de vidrio con índice de refracción n_1 rodeada por una capa de índice de refracción n_2 , siendo n_2 ligeramente menor a n_1 de modo de aprovechar fenómeno de reflexión total en la interface entre los dos medios. Estas fibras se denominan <<graded-index>> en las cuales el índice de refracción decrece de forma gradual desde el centro del núcleo hacia la interface. Dos parámetros importantes que caracterizan a las fibras ópticas son la diferencia relativa de índices de refracción núcleo-capa Δ dada por:

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1,$$

Y el llamado parámetro V , dado por:

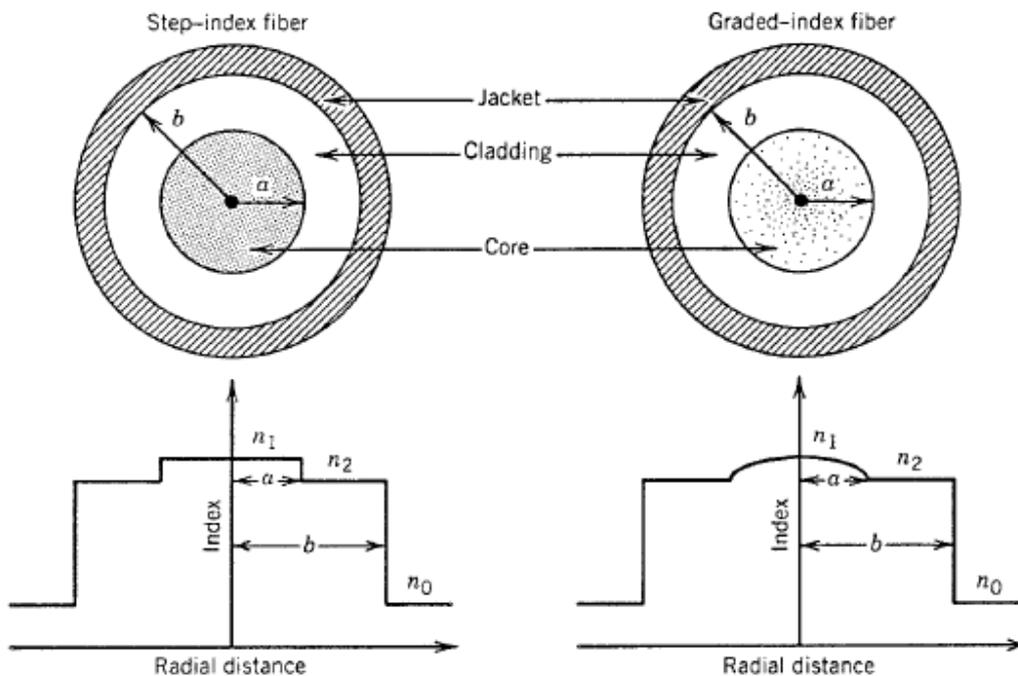
$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

Donde $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ es la longitud de onda y a es el radio del núcleo de la fibra. Este parámetro indica el número de modos que se pueden propagar en la fibra y se puede demostrar que una fibra “step-index” permite propagar un solo modo si $V < 2.405$. Las

fibras que satisfacen esta condición se llaman “fibras monomodo”; de lo contrario, se llaman “fibras multimodo”.

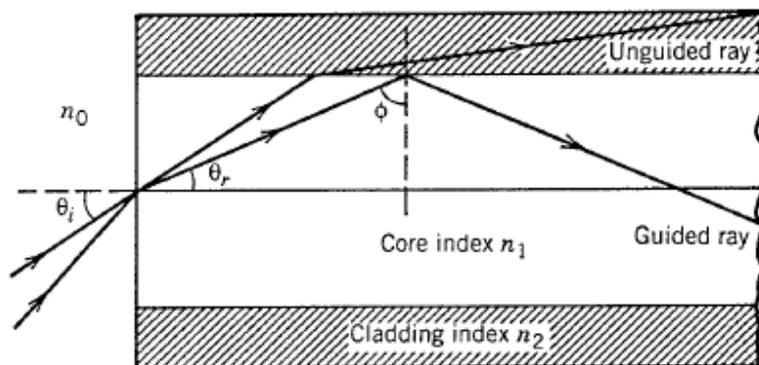
La diferencia geométrica más relevante entre las fibras monomodo y las multimodo viene dada por el tamaño del núcleo. Para estas últimas, el radio a es típicamente 25-30 μm , mientras que las fibras monomodo, con diferencias relativas de índice de refracción Δ - 0.003, tienen radios típicamente menores a 5 μm . Además, las fibras multimodo sufren del fenómeno de “dispersión modal” por el cual diferentes modo “viajan” a diferentes velocidades, conduciendo el ensanchamiento temporal de los pulsos de forma mucho más severa que en el caso de la dispersión cromática. Es por este motivo que no se usan fibras multimodo para sistemas de alta capacidad, restringiéndose su uso a sistemas “cortos” (algunas decenas de kilómetros de alcance).

Figura 11. Corte transversal de una fibra óptica.



En la figura 11 se muestra un corte transversal de una fibra óptica y la respectiva variación de índice de refracción en función de la coordenada radial, para fibras “step-index”(usadas en sistemas de alta capacidad) y “graded-index”(usadas en sistemas de baja capacidad, como redes locales).

Figura 12. Corte longitudinal de una fibra óptica.



El radio b de la capa de índice de refracción n_2 es mucho menos crítico siempre y cuando sea lo suficientemente grande como para confinar completamente al modo. Un valor típico es $b = 62.5 \mu m$ y es el mismo tanto para fibras monomodo como para fibras multimodo.

Otro parámetro importante a tener en cuenta es el que caracteriza a la pérdida de potencia que experimenta una señal que viaja por una fibra óptica. Llamemos P_0 a la potencia óptica al comienzo de la fibra.

Después de recorrer una longitud L , la potencia transmitida P_T es:

$$P_T = P_0 \exp(-\alpha L),$$

Donde el coeficiente de atenuación α , da una medida de todas las pérdidas de la fibra óptica.

Es común expresar a α en unidades de dB/km. La conversión entre las unidades lineales y de decibeles viene dada por:

$$\alpha_{\text{dB}} = - (10 / L) * \log (P_T / P_0) = 4.343 \alpha.$$

Como es de esperar, el coeficiente de atenuación depende de la longitud de onda (ver figura 13), como se expuso en la sección anterior, adquiere su valor mínimo $\alpha=0.2$ dB/km en la tercera ventana ($\lambda=1.5 \mu\text{m}$).

En el rango de longitudes de onda de interés, el coeficiente de atenuación muestra una dependencia con la longitud de onda dada, esencialmente, por el “scattering de Rayleigh” (el mismo fenómeno por el cual el cielo es azul).

En la región de $1.4 \mu\text{m}$ existe una resonancia en la absorción material correspondiente a una armónica de la frecuencia vibracional del ion OH (impureza presente en el vidrio de silicio del núcleo de la fibra) que ocurre en $\lambda = 2.73 \mu\text{m}$. Existen, desde el año 2000, fibras ópticas disponibles comercialmente en las cuales esta resonancia no está presente y que, por lo tanto, tienen pérdidas uniformes y muy bajas en toda la región espectral de $1.3 - 1.6 \mu\text{m}$ (segunda y tercera ventana).

Como mencionamos al comienzo de esta sección, los sistemas ópticos transmiten información por modulación de amplitud. Sin embargo, en los últimos años, han ganado popularidad los formatos de modulación de «fase»; estos formatos, en los cuales la información se transmite modulando la fase de una onda portadora, y que han sido empleados en sistemas de comunicación electrónicos y de radio desde hace muchos años, permiten, en sistemas ópticos, ampliar la distancia transmitida y tal vez, ofrecer mayor resistencia a degradaciones «no-lineales» de la información [6].

Los bloques fundamentales de un sistema de comunicación son:

Transmisor: toma la información (secuencia de bits) que es una señal eléctrica (por ejemplo, una o varias llamadas telefónicas) y la transforma en una secuencia de bits «óptica» en algún formato determinado. Este paso se llama «codificación».

En general, en sistemas ópticos de alta capacidad, el transmisor está formado por un láser continuo (CW Continuous Wave) que opera en una longitud de onda en tercera ventana $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, seguido por un modulador externo. El modulador se comporta como una «llave» óptica que es controlada por la secuencia eléctrica de pulsos (bits) que se quiere transmitir; un bit «1» corresponderá a un estado de baja pérdida óptica del modulador (deja pasar la luz del láser) y un bit «0» aun estado de alta pérdida (bloquea la luz). El «contraste» entre la potencia del bit «1» y la del bit «0» se denomina *grado de extinción* y es un parámetro importante en el diseño de un sistema óptico: cuanto mejor es el grado de extinción menor será la relación señal-ruido requerida para obtener un nivel de desempeño determinado.

Canal de comunicación: el medio físico que permite que los bits lleguen del transmisor al receptor. En nuestro caso este medio es la fibra óptica. El canal de comunicación, en general, «corrompe» la información transmitida mediante la adición de ruido y distorsiones «lineales» (que no dependen de la potencia de la señal

transmitida) y «no-lineales» (que dependen de la potencia de la señal transmitida). La elección del formato de codificación está generalmente basada en su «resistencia» a las distorsiones lineales y no-lineales y, posiblemente, a sus características espectrales.

Receptor: recibe la secuencia de bits ópticos, la transforma en una secuencia de bits «eléctricos» (este paso se denomina «fotodetección»), recupera la «sincronización» (se dice que «recupera el reloj») y toma una decisión sobre el valor del bit recibido mediante la comparación con un valor de umbral generalmente fijo: si la potencia recibida en el intervalo de tiempo supera al valor de umbral el detector decidirá «1», caso contrario decidirá «0». Un error de detección se produce cuando un bit «1» transmitido es detectado como un bit «0» y viceversa.

Los sistemas de comunicación modernos de alta capacidad trabajan con «tasas de error» inferiores a una detección errónea cada 10¹⁶ bits transmitidos (un sólo error cada diez mil billones de bits). Para cumplir con este estricto criterio a lo largo de toda la vida útil del sistema (típicamente 20 años) se utilizan técnicas electrónicas de corrección de errores (Forward Error Correction), implementadas en el receptor, que permiten mantener una adecuada tasa de error aún en presencia de degradaciones de relación señal-ruido, lineales y no-lineales [7]. El costo que se paga es el de transmitir la información a una tasa que puede ser entre 7% y 20% mayor. Esto se denomina «overhead» y requiere la utilización de componentes electrónicos de mayor ancho de banda (y costo, sobre todo para sistemas que operan a tasas de 40 Gb/s).

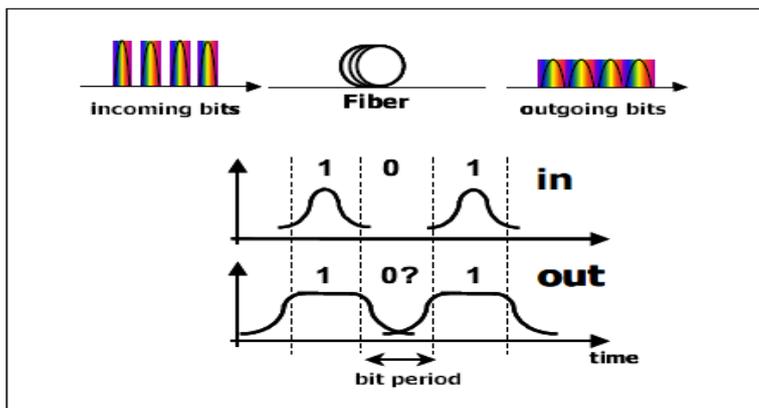
Efectos lineales: dispersión cromática. El índice de refracción del núcleo de una fibra óptica depende de la longitud de onda de la luz que se propaga en ella. Este fenómeno se conoce como «dispersión material» y hace que los pulsos aumenten su duración temporal a medida que se propagan en la fibra. Este mecanismo, cómo se muestra en la Fig.5, puede producir errores de detección originados en la presencia de

potencia óptica en los bits «0». Una forma aproximada del «factor de ensanchamiento temporal» de un pulso de forma «gaussiana» está dada por:

$$\frac{T_1}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{B_2 L}{T_0^2} \right)^2},$$

Donde T_1 es la duración del pulso a la salida de la fibra de longitud L . T_0 es la duración inicial del pulso y B_2 es el llamado «parámetro de Dispersión de la Velocidad de Grupo» (parámetro de GVD-*Group Velocity Dispersion*); este parámetro nos dice cómo varía la velocidad del pulso con la frecuencia y es consecuencia de la dispersión material del núcleo de la fibra óptica.

Figura 14. Efecto de la dispersión cromática sobre la tasa de error en un sistema digital.



Una forma de estimar el impacto de la dispersión cromática en un sistema se obtiene al pedir que los pulsos transmitidos conserven la mayor parte de su energía en el intervalo temporal que tienen asignado (i.e., en el respectivo bit slot), lo cual impone una cota superior al cociente T_1/T_0 . Esto se traduce en la condición:

$$B\sqrt{|\beta_2|}L \leq 1/4,$$

Donde B es la tasa del sistema. Es decir, un sistema limitado por efectos de dispersión cromática podrá transportar información a una tasa máxima de 10 Gb/s a lo largo de, aproximadamente, 30 km de fibra SSMF, con un parámetro $\beta_2 = -20$ ps²/km.

En la práctica, los sistemas de alta capacidad emplean *Módulos Compensadores de Dispersión* (DCMs, según la sigla en inglés) que permiten cancelar el efecto de la dispersión cromática acumulada. Estos DCMs son, generalmente, fibras ópticas con parámetro $\beta_2 > 0$ aunque, recientemente, se han introducido módulos que se basan en otros principios y no requieren fibras ópticas (como, por ejemplo, DCMs basados en interferómetros de Gires-Tournois [9]).

Efectos no-lineales: automodulación de fase (Self Phase Modulation-SPM). El origen de los efectos no-lineales está en la dependencia del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica con la intensidad de los pulsos transmitidos. Este fenómeno se conoce como «efecto Kerr óptico». El índice de refracción queda expresado como:

$$n(I, \omega) = n_0 + n_2 I,$$

Donde n_0 es el índice de refracción a baja intensidad (y cuya dependencia con la frecuencia ω es el origen de la dispersión cromática), n_2 es el índice de refracción «no-lineal» y, para fibras ópticas de silicio, tiene un valor aproximado de 3×10^{-20} Watts/m²; I es la intensidad de los pulsos transmitidos (i.e., potencia por unidad de área). Como consecuencia del efecto Kerr óptico, un pulso con potencia $P(t)$ que se propaga a través de una fibra óptica de longitud L ensancha su espectro una cantidad $\Delta\omega$ dada (despreciando la atenuación de la fibra óptica) por:

$$\Delta\omega = \gamma L \frac{dP(t)}{dt},$$

Donde γ es el llamado «parámetro no-lineal» expresado como:

$$\gamma = n_2 \omega_0 / A_{eff} c .$$

Donde ω_0 es la frecuencia central del pulso, A_{eff} es el «área efectiva del modo» (que vale, aproximadamente, $A_{eff} = \pi r^2$, donde r es el radio del núcleo de la fibra) y c es la velocidad de la luz en el vacío. En fibras ópticas usadas en sistemas de comunicación γ varía, típicamente, entre 1.2 y 2 (W-km)⁻¹.

El efecto de la SPM es, por lo tanto, el de aumentar el ancho espectral de los pulsos transmitidos. En la práctica este efecto por sí solo no afecta el desempeño del sistema de transmisión. Sin embargo, la combinación de efectos de dispersión cromática con efectos de SPM puede conducir a la degradación de los pulsos transmitidos o, en algunos casos muy particulares, a una mejora del rendimiento del sistema. Es importante notar que los efectos no-lineales dependen de la potencia de la señal transmitida; recordando que ésta decrece como consecuencia de la atenuación α de la fibra óptica, eventualmente se vuelven muy pequeños comparados con los efectos lineales. Si no despreciamos la atenuación de la fibra, la ecuación anterior se modifica:

$$\Delta\omega = \gamma L_{eff} \frac{dP(t)}{dt} ,$$

Donde la «longitud efectiva» L_{eff} / α . Para una fibra óptica típica L_{eff} 20 km. El concepto de longitud efectiva es muy útil: una señal que viaja por una fibra de longitud $L \gg L_{eff}$ experimentará efectos no-lineales en los primeros 20 km, aproximadamente; es decir, mientras la potencia de la señal es grande. Si $L \ll L_{eff}$, los efectos no-lineales serán importantes a lo largo de toda la longitud de la fibra. Más adelante definiremos una longitud efectiva para los fenómenos no-lineales con mayor precisión.

Efectos no-lineales en sistemas WDM: modulación de fase cruzada (X Phase Modulation-XPM) y mezcla de cuatro ondas (Four Wave Mixing-FWM).

Como mencionamos más arriba, los sistemas WDM son sistemas en los cuales varias longitudes de onda, cada una transportando diferente información, son «multiplexadas» y transmitidas por una misma fibra óptica. Este esquema ha permitido aumentar enormemente la capacidad de transmisión de los sistemas de comunicación óptica.

En sistemas WDM, y como consecuencia del índice de refracción no-lineal, las diferentes longitudes de onda o «canales», interactúan dando origen a los fenómenos de «modulación de fase cruzada» XPM y de «mezcla de cuatro ondas» FWM. La modulación de fase cruzada actúa de modo semejante a la auto modulación de fase; sin embargo, en el caso de la XPM, el ensanchamiento espectral que sufre un canal con potencia $P_1(t)$ en presencia de un canal con potencia $P_2(t)$ está dado por:

$$\Delta\omega = \gamma L \frac{d|E_1(t)|^2}{dt} + 2\gamma L \frac{d|E_2(t)|^2}{dt}$$

Donde el primer término es la SPM y el segundo término es la XPM. Observamos que el efecto de la XPM es el de producir una interacción entre diferentes canales. En presencia de dispersión, este efecto conduce a la distorsión de los pulsos transmitidos y representa un factor limitante en el desempeño de los sistemas WDM de alta capacidad.

El fenómeno de FWM consiste en la creación de nuevas frecuencias a partir de las frecuencias de los canales transmitidos en un sistema WDM. Si tres canales con

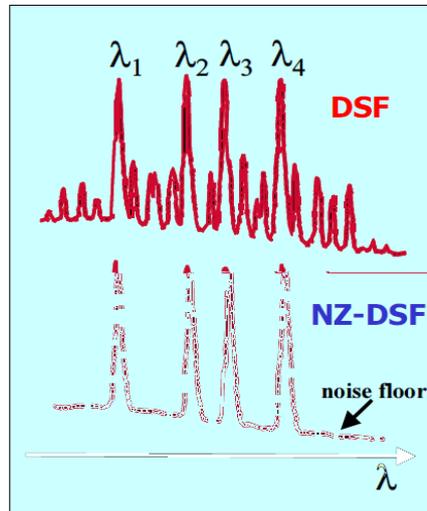
frecuencias f_i, f_j, f_k se propagan por la misma fibra, la interacción de FWM producirá una nueva componente de frecuencia (ver Fig.15):

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k.$$

La eficiencia de este proceso depende fuertemente de la dispersión de la fibra, como podemos ver en la Fig.15. En casos donde la dispersión de la fibra es muy baja (fibra DSF) la generación de «tonos» de FWM es muy alta e, incluso, puede producirse una resonancia en la interacción de FWM para determinados espaciamientos de frecuencia entre canales WDM [11]. La generación de nuevas frecuencias a través del mecanismo de FWM afecta al desempeño de un sistema de comunicación de dos formas diferentes:

- La frecuencia generada f_{ijk} crece a expensas de la potencia de las frecuencias transmitidas f_i, f_j, f_k .
- f_{ijk} puede coincidir con la frecuencia de un cuarto canal transmitido, interfiriendo con éste y degradando la calidad de los pulsos transmitidos al momento de la recepción. Para combatir los efectos de FWM se utilizan fibras NZ-DSF3 que tienen dispersión cromática acotada en el rango de longitudes de onda de interés y, posiblemente, un espaciamiento en frecuencia no-uniforme a lo largo de la banda de transmisión, de modo de evitar la interferencia entre las frecuencias generadas y las transmitidas.

Figura 15. Efecto de FWM



La figura 15 muestra el efecto de FWM y su dependencia con la dispersión de la fibra: un pequeño valor de dispersión cromática (fibras NZ-DSF) es suficiente para impedir la generación de tonos de FWM.

Esta última opción, sin embargo, no suele utilizarse en la práctica y el uso de una fibra NZ-DSF adecuada suele ser suficiente para evitar los efectos de FWM. En general, para sistemas de muy alta capacidad (varios canales de 10 Gb/s), los efectos de XPM son mucho más importantes que los de FWM y son el factor determinante del desempeño del sistema.

Escalas típicas de los fenómenos lineales y no-lineales. Los efectos de atenuación, dispersión cromática y no-lineales tienen asociadas escalas de longitud características. En el caso de la atenuación, vimos que esta escala estaba dada por una longitud efectiva L_{eff}/α . Las restantes longitudes características están dadas por:

Longitud de Dispersión:
$$L_D = T_0^2 / |\beta_2|$$

Longitud No-Lineal: $L_{NL} = 1/(\gamma P_o)$

Donde T_o y P_o son la duración y potencia inicial del pulso transmitido, respectivamente. Estas longitudes características nos permiten prever qué efecto será relevante en un sistema dado. Por ejemplo, un sistema que opere a 10 Gb/s ($T_o=100$ ps), sobre fibra SSMF ($\beta_2=-20$ ps²/km) con una potencia inicial $P_o= 2$ mW tiene $LD=500$ km y LNL 410 km. Si la longitud de fibra es tal que $L \ll LD$, LNL entonces los efectos dispersivos y no-lineales serán pequeños. Es decir, para un segmento de $L = 50$ km sólo deberemos tener en cuenta la atenuación de la fibra.

En cambio, si la potencia inicial es de $P_o = 20$ mW, entonces LNL 40 km, comparable con la longitud del enlace; en este caso, los efectos no-lineales serán más importantes que los dispersivos y no podrán despreciarse. En un sistema de última generación, operando a una tasa $B = 40$ Gb/s, la longitud de dispersión para fibra SSMF es de LD 30 km, de modo que los efectos dispersivos se vuelven muy importantes en enlaces cortos.

Es importante recalcar que las longitudes características introducidas en esta sección son útiles para estimar la importancia relativa de los diferentes efectos, pero será necesario recurrir a la simulación numérica y experimental para conocer exactamente qué impacto tendrán en un sistema en particular.

Solitones Ópticos. En las secciones anteriores discutimos los efectos de dispersión cromática y auto modulación de fase; estos efectos tienen asociadas longitudes características que nos permiten prever, para un sistema determinado, cuál dominará las características de la propagación. En particular, los casos en los cuales uno de los efectos es dominante son muy interesantes porque admiten soluciones analíticas. En el caso más general, la evolución de la señal transmitida puede ser complicada y se requerirá de

simulaciones numéricas y/o experimentales para determinar la evolución de los pulsos. Existe, sin embargo, un interesante caso en el cual estos efectos tienen una magnitud similar y, aún así, es posible obtener una solución analítica para la evolución de los pulsos transmitidos.

Físicamente, el efecto de la dispersión cromática es el de «reacomodar» las componentes de frecuencia del pulso debido a la diferencia de velocidad que experimentan. En el llamado «régimen de dispersión normal», caracterizado por un parámetro de GVD $\beta_2 > 0$, las componentes «rojas» (baja frecuencia) viajan más rápido que las componentes «azules» (alta frecuencia). En el «régimen de dispersión anómala» ($\beta_2 < 0$) ocurre lo opuesto. En particular, en la tercera ventana, la mayor parte de las fibras ópticas que se emplean en sistemas de comunicación tiene un parámetro de GVD $\beta_2 < 0$.

En cuanto al efecto de auto modulación de fase, como discutimos anteriormente, es responsable de crear nuevas frecuencias a medida que el pulso se propaga. Ambos fenómenos, dispersión cromática y SPM, tienen como resultado la aparición de *chirp* en los pulsos transmitidos, es decir, los pulsos adquieren un *exceso de ancho espectral*. Es posible mostrar que, en el régimen anómalo (y despreciando la atenuación de la fibra), los efectos de GVD y SPM pueden cancelarse exactamente para un pulso cuya forma inicial es de la forma secante hiperbólica ($sech(T/T_0)$) y cuando la relación entre los parámetros iniciales satisface:

$$\gamma P_0 = |\beta_2| / T_0^2,$$

Es decir, $LD = LNL$. Un pulso que tenga una forma del tipo *sech* y duración y potencia iniciales que satisfagan esta última condición se propagará sin cambios en su perfil temporal/espectral. Este pulso, llamado *soliton*, no sufre distorsiones no importa

cuán lejos se propague, lo cual lo transforma en un candidato ideal para sistemas de comunicación.

En la práctica, sin embargo, podemos notar que el balance entre los efectos dispersivos y no-lineales no puede mantenerse indefinidamente debido a la pérdida de potencia del pulso por la atenuación de la fibra óptica por lo que, estrictamente, en un sistema de comunicación convencional no es posible propagar solitones a menos que se logre eliminar la atenuación de la fibra o se utilicen las llamadas «dispersion-decreasing fibers» (DDF) que presentan una atenuación que disminuye con la distancia de forma exponencial, es decir, «siguiendo» la pérdida de potencia y, de ese modo, manteniendo punto a punto el balance entre la dispersión cromática y la auto-modulación de fase. Sin embargo, estas fibras sólo se usan en experimentos de laboratorio y no en sistemas comerciales.

2.3 SDH/SONET

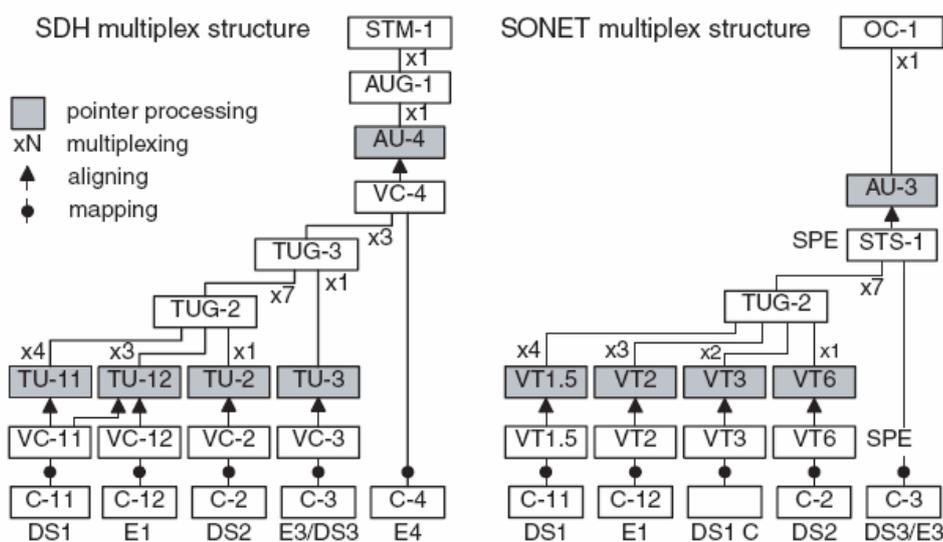
Durante la evolución del multiplexaje digital, desde las ratas primarias de multiplexaje como el E1 2048 kbit/s y el DS1 1544 kbit/s, hasta el cuarto orden como el E4 139.264 Mbit/s y el DS4 274.176Mbit/s, generalmente referidos señales de la Jerarquía Digital Plesiócrina o Pleisiochronous Digital Hierarchy (PDH), se hizo claro que la aplicación de estos multiplexajes en redes extensas requerían una mejora en la sincronización y en mejores operaciones, además de un sistema de gestión más versátil. Para cubrir con estas necesidades surge la revolucionaria Jerarquía Digital Síncrona o Synchronous Digital Hierarchy (SDH) y la Red Óptica Síncrona o Synchronous Optical Network (SONET). Una ventaja adicional de este diseño revolucionario fue que la señales tributarias son mapeadas en carga útil dentro de contenedores. Estos contenedores, juntos con su información de tramas y encabezados útiles para las operaciones, administración y mantenimiento, son transportados en contenedores virtuales independientes en la red SDH/SONET. La estructura de multiplexación de

SDH/SONET es diseñada para soportar la evolución de multiplexajes de mayor orden para transportar más y más carga. En el capítulo siguiente para un buen detalle, de cómo puede proveerse el incremento de ancho de banda, definiendo la Concatenación Contigua o Contiguous conCATenation (CCAT) y la introducción a CCAT en redes existentes usando Concatenación Virtual o Virtual conCATenation (VCAT).

2.3.1 Arquitectura: SDH/SONET

El conjunto estándar original de contenedores de carga, para SDH: VC-4, VC-3, VC-2, VC-12 y VC-11, y para SONET: VT6, VT3, VT2, VT1.5, pueden proveer un gran rango de capacidades de carga, desde 1600kbit/s hasta 149.76Mbit/s. Los tamaños de carga para que PDH pueda transportarse eficientemente, se multiplexa desde 1.544 Mbit/s (DS1), 2048 Mbit/s (E1), 44.736 Mbit/s (DS3) y 139.264Mbit/s (E4). La figura muestra las estructuras de multiplexaje para SDH y SONET. Los tributarios PDH son mapeados en el contenedor de carga apropiado C-n o C-m.

Figura 16. Arquitectura SDH/SONET



3. EVOLUCIÓN DE SDH/SONET PARA TRANSPORTAR ETHERNET

Este texto trata de cubrir estándares de SDH tanto como de SONET, como son definidos o recomendados por el Comité de Estandarización Global ITU-T y por el Instituto de Estandarización de Telecomunicaciones Europeo ETSI y estándares SONET definidos por el Instituto de Estandarización Nacional Americano ANSI T1. Para evitar confusiones este texto usa abreviaciones y términos que ya están definidos por la ITU-T.

3.1 Esquema de Ajuste de la Capacidad del Enlace

En una red SDH/SONET u OTN, el contenedor de carga transportado puede ser combinado eficientemente con la señal del cliente en cuanto al ancho de banda usando Concatenación Virtual o Virtual Concatenation (VCAT), demostrada en el capítulo 2. El contenedor de carga es transportado por contenedores concatenados virtualmente VC-n-Xv y generalmente referido como Grupo de Concatenación Virtual o Virtual Concatenation Group (VCG), el cual consiste en X contenedores virtuales (VC), generalmente referidos como miembros del VCG.

Para cambiar la capacidad del contenedor de carga contiguo, la metodología anteriormente mencionada provee grandes capacidades, por ejemplo en el decremento de la capacidad de la carga del VCG si un miembro experimenta una falla en la red y si el incremento de ésta cuando la falla es reparada. Esta metodología es estandarizada y puede encontrarse en la recomendación ITU-T G.7042, y es referida como el Esquema para el Ajuste de Capacidad del Enlace o Link Capacity Adjustment Scheme (LCAS). La ANSI T1 ha adoptado esta recomendación como un estándar, por lo que es aplicable

a señales SONET. La metodología será aplicada al VCG entero, lo que supone que cada miembro del mismo VCG debe soportar LCAS.

3.1.1 LCAS para la concatenación virtual

LCAS asume que cualquier cambio en la capacidad de carga de la VCAT es responsabilidad de los sistemas de gestión de elementos y de la red (NMS).

Para sincronizar todos los cambios en la capacidad de la carga del transmisor o del lado de la fuente o del receptor, un control de paquetes es usado para transmitir la información de control necesaria, ésta es enviada continuamente, aunque no haya cambios en la información contenida. Por definición, cada paquete de control describe el estado de los miembros durante el siguiente paquete de control. De esta forma todos los cambios son enviados en avance para que del lado del receptor pueda conmutarse a una nueva configuración en cuanto arribe y sea validada. Esto asegura que todos los cambios planeados del VCG no se pierdan. Este paquete se explica detalladamente de la siguiente manera:

En dirección frontal, del lado de la fuente al destino:

- Campo indicador de multitrama o Multi-Frame Indicator (MFI).
- Campo indicador de secuencia o Sequence Indicator (SQ).
- Campo de control (CTRL).
- Identificación de grupo o Group Identification (GID).

En la dirección de retorno, del receptor a la fuente:

- Campo del status del miembro o Member Status (MST).
- Bit de reconocimiento de re-secuencia o Re-Sequence Acknowledge (RS-Ack).

En ambas direcciones:

- Campo CRC.
- Bits no usados que son reservados y deben tener como valor '0'.

3.1.2 Cambiando el tamaño del grupo de concatenación virtual

El primer paso que se tomará cuando el proceso de LCAS en la fuente recibe un comando ADD desde la interface de gestión, es para notificar al destino de la adición intencionada. Cuando un miembro es añadido al VCG, es recomendado que siempre sea asignada una secuencia de números, uno más largo que el actual más grande de la secuencia actual. El miembro con el número con la secuencia actual más grande tiene el CTRL, por ejemplo cuando se añade un miembro al VCG de tamaño n, debe ser asignado SQ=n, porque la secuencia numérica comienza en cero. Cuando múltiples miembros son añadidos al mismo tiempo, cada uno de estos deben ser asignados a una secuencia única de tal manera que haya un reporte MST único para cada miembro adicional. Siguiendo con un comando ADD, el primer miembro en responder con el MST=OK, debe ser colocado el próximo número de secuencia más grande y debe cambiar su código de CTRL a EOS, coincidiendo con el actual número de secuencia más grande, cambiando su código CTRL a NORM. En el caso de que dos o más miembros sean añadidos al VCG, y la MST=OK es recibida simultáneamente, para más de un miembro, entonces la localidad de números SQ, es arbitrariamente siempre dicho

que ellos serán el próximo número de secuencia p, después del número de secuencia actual más grande.

Cuando los miembros son borrados del VCG, los números de secuencia, y el número de status del miembro correspondiente de los otros miembros, pasarán a mantener una consecutiva SQ. El miembro borrado debe enviar un código de IDLE, en su campo de CTRL y poner SQ a su máximo valor.

El paso final para borrar un miembro del VCG es remover el área de carga de ese miembro en particular del contenedor de carga del VCG. La última trama de contenedor que contiene la carga del miembro borrado, debe ser el último bit de la trama del contenedor del paquete de control, conteniendo el código IDLE en el campo de CTRL, por primera vez.

3.1.3 Interacción de LCAS con non-LCAS

Durante el desarrollo de LCAS, fue previsto que en una fase transitoria, el equipo que soportara LCAS, podría estar conectado con uno que todavía no lo soportara. La interacción entre la concatenación virtual non-LCAS y LCAS, puede ser lograda como se describe a continuación.

Una fuente LCAS puede interactuar con un receptor non-LCAS, en modo non-LCAS sin ninguna consideración especial. La fuente LCAS, pondrá la MFI y SQ como se describe al comienzo de este capítulo, mientras que el receptor non-LCAS, solo utilizará la información MFI y SQ, e ignorará el resto de bits, por ejemplo la información de encabezado de LCAS. El status del miembro MST, regresado desde el receptor a la fuente siempre será MST=OK, porque los bits de reserva siempre se recomienda ponerlos a cero.

Un receptor LCAS normalmente espera un código de CTRL, que no sea '0000', y un CRC correctamente calculado, dentro del paquete de control. Una fuente non-LCAS, transmitirá '0000' en el encabezado del campo CTRL, así mismo en el campo CRC, porque en modo non-LCAS estos bits son reservados y se recomienda sean todos cero. Cuando una receptor LCAS interactúa con una fuente non-LCAS y recibe (código CTRL='0000') AND (CRC='0000'), debe ignorar toda la información (excepto MFI y SQ) y usar MFI y SQ para la detección como se define para la concatenación virtual.

3.2 Protocolo LCAS

El tamaño de un VCG es determinado por tres parámetros, los cuales son usados para definir la carga en los contenedores C-n-Xc transportador por un VC-n-Xv.

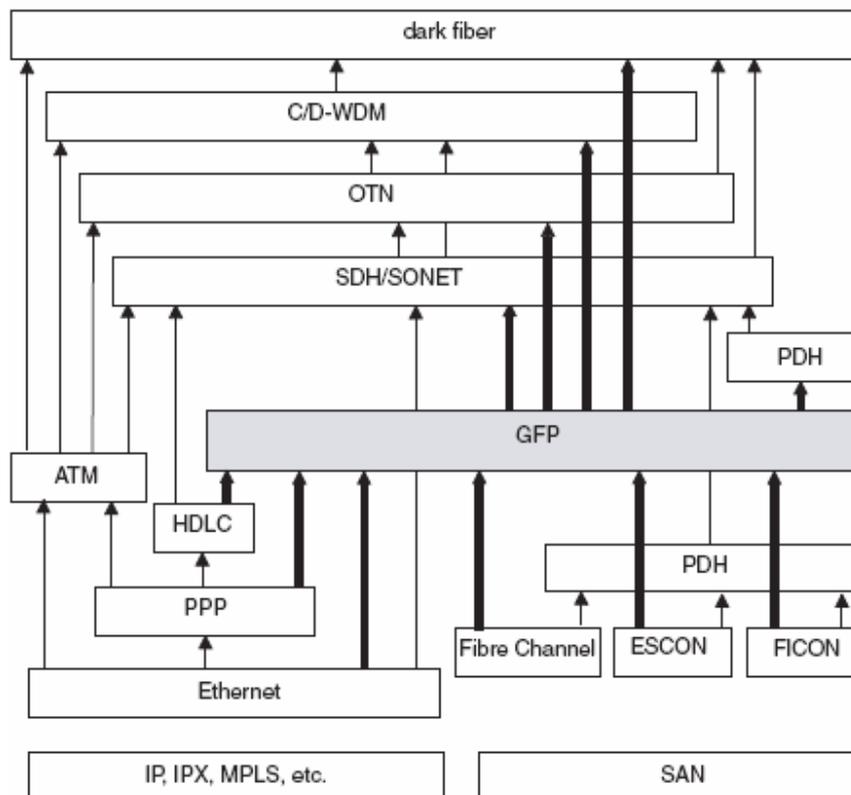
1. El parámetro Xm, indicando el tamaño máximo del VCG. El valor de éste parámetro será determinado, por especificaciones del equipo, dependiendo de la tecnología. Para SDH la definición de la ITU-T es M=63 para C-11, C-12, C-2 y M=255 para C-3 y C-4.
2. El parámetro Xp, indicando el número de miembros provisionales en el VCG.
3. El parámetro Xa, indicando el miembro actual en los miembros activos del VCG.

3.3 Procedimiento Genérico de Tramas

El Procedimiento Genérico de Tramas o Generic Framing Procedure (GFP), es definido en la ITU-T, en la recomendación G.7041 y es utilizada para encapsular el tamaño variable de carga de varias señales de clientes para transporte subsecuente sobre

redes SDH y OTN. La definición incluye los formatos de trama de las Unidades de Datos de Protocolo o Protocol Data Units (PDU's), transferidos mediante puntos de fuente GFP y recepción GFP. Incluye también el procedimiento de mapeo, para las señales de clientes en los PDU's dentro de GFP. La figura 17 muestra el ambiente en el que GFP opera en la estructura de multiplexación.

Figura 17. Ambientes en los que GFP opera en la estructura de multiplexación.



Fuente: Huub van Helvoort. **Next Generation SDH/SONET Evolution or Revolution?** Pág. 100

El procedimiento de mapeo descrito por GFP puede ser aplicado a la encapsulación y transporte de tramas enteras, por ejemplo un cliente PDU, como IP/PPP o una trama Ethernet MAC, es mapeado en un único GFP PDU. El mapeo y transporte de caracteres en datos de cliente, por ejemplo canales de fibra o bloques de código

ESCON/SBCON, son mapeados en bloques de código eficientes para transportarse como GFP PDU.

3.3.1 Aspectos comunes de GFP para el alineamiento de octetos

Dos tipos de trama GFP son definidos: tramas GFP de cliente y tramas GFP de control. Los formatos de trama para las tramas de GFP cliente y control son definidos a continuación. GFP también es compatible con mecanismos de extensión de encabezados flexibles (carga) para facilitar la adaptación de GFP, para usarse con mecanismos de transporte diversos.

3.3.1.1 Estructura básica de señal para tramas GFP clientes

El formato para tramas GFP se muestra en la figura 18. GFP PDU's son octetos alineados y consisten en un encabezado de núcleo GFP y, excepto por tramas GFP Inactivas, un área de carga GFP. El orden de transmisión empieza en el bit 1 del octeto 1, hasta el bit 8 del octeto n.

Figura 18 Orden de transmisión de GFP PDU



Fuente: Huub van Helvoort. **Next Generation SDH/SONET Evolution or Revolution? Pág. 103**

El encabezado de núcleo, permite la independencia de la delineación de trama del contenido de la capa superior PDU. Los cuatro octetos del encabezado de núcleo de

GFP, consisten en: un campo PDU de 16 bits indicador de longitud y un campo de 16 bits de Chequeo de Errores de Encabezado de Núcleo o Core Header Error Check (cHEC).

Todos los octetos en la trama GFP, después del encabezado de núcleo, se le llama Área de Carga de GFP, la cual es usada para transportar la información de protocolo específica del cliente. Esta área variable en tamaño, puede tener de 4 a 65,535 octetos.

El encabezado de carga es un área variable, con tamaño de 4 a 64 octetos de longitud, con la intención de soportar procedimientos de manejo de datos de enlace, especificados en la señal de cliente. El área contiene 2 campos mandatorios, el Tipo y los campos de tHEC, y un número variable de campos de encabezado de carga adicionales. Éste grupo de campos de encabezado de carga es referido también como el Encabezado Extensión.

3.3.1.2 Tramas de Datos de Clientes GFP

Las Tramas de Datos de Clientes (CDF) GFP, son usados para transportar datos, de la señal de cliente. Estas tramas consisten en un Encabezado Núcleo y un Área de Carga. El campo Tipo de un CDF usa los siguientes valores de subcampos Tipo:

- PTI=000;
- PFI=Específico de carga, toma un valor requerido (FCS habilitado o deshabilitado);
- EXI=Específico de carga, toma valores dependiendo de los requerimientos de la multiplexación y la topología, para la conexión GFP;

- UPI=Específico de carga, es acorde al tipo de señal de cliente a ser transportada.

Las Tramas de Manejo de Cliente (CMF) GFP, son usadas para transportar información asociada al manejo de la señal de cliente o la conexión GFP. Proveen un mecanismo genérico para los procesos de adaptación de fuente GFP específicos del cliente, opcionalmente para mandar información de manejo a los procesos de adaptación específicos del receptor. CMF consiste de un encabezado de núcleo y un área de carga.

3.3.1.3 Tramas de Control GFP

Las Tramas de Control GFP son usadas en la gestión de la conexión GFP. La única trama de control especificado a este momento es la trama de Inactividad GFP, es cual es una trama de control GFP especial de cuatro octetos, consistiendo de solamente el Encabezado de Núcleo GFP, con los campos PLI y cHEC a cero, sin Área de Carga. Es usada para mantener una rata de bit constante, cuando no hay PDU's clientes disponibles.

PDU's GFP de múltiples puertos y múltiples tipos de clientes, pueden ser multiplexados en una base PDU-por-PDU en un único flujo. Cuando no hay PDU's GFP clientes disponibles para la transmisión, las tramas de Inactividad GFP, serán insertadas, para proveer un flujo constante de PDU's GFP para mapear en un octeto de capa física alineado.

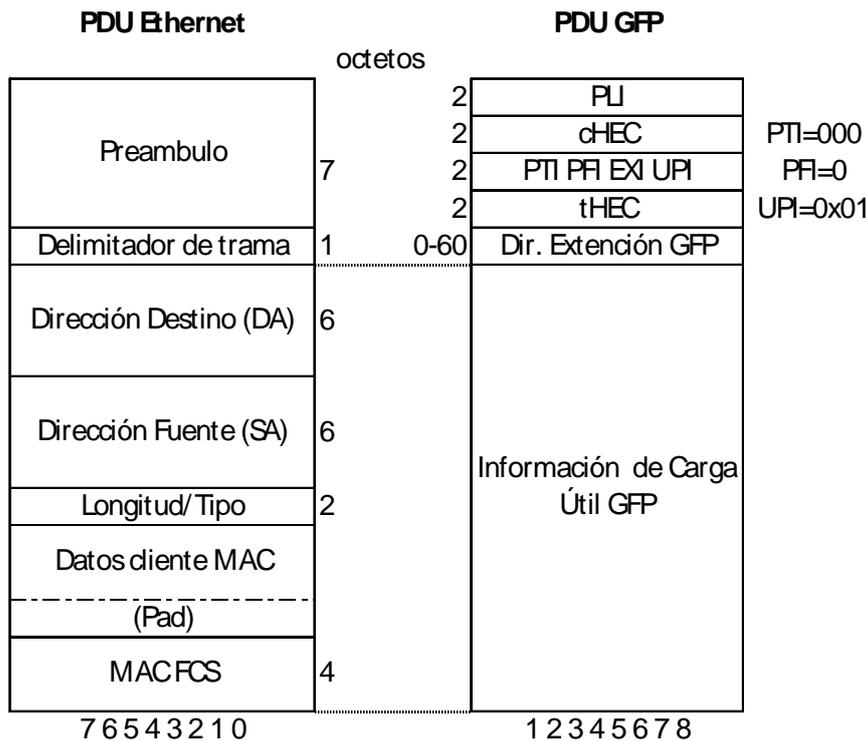
3.3.2 Aspectos específicos del cliente para el mapeo de tramas GFP

Ésta sección describe los aspectos específicos de la encapsulación genérica usando un mapeo trama-por-trama de los PDU's cliente dentro de GFP.

3.3.2.1 Carga útil de un MAC Ethernet

El formato de las tramas MAC Ethernet está definido en la IEEE 802.3, sección 3.1. Hay un mapeo uno-a-uno entre un cliente PDU y un PDU GFP. La relación, entre las PDU's MAC Ethernet y las PDU's GFP se ilustra en la figura 19. Los octetos MAC Ethernet de la Dirección Destino a través de la Secuencia de Chequeo de Trama, inclusiva, son colocados en el campo de Información de Carga Útil GFP. Específicamente, en una base octeto-por-octeto, los bits 0 y 7 en la IEEE 802.3 parte 3, corresponden a los bits 8 y 1, respectivamente, en la especificación GFP.

Figura 19. Relación PDU Ethernet a PDU GFP.

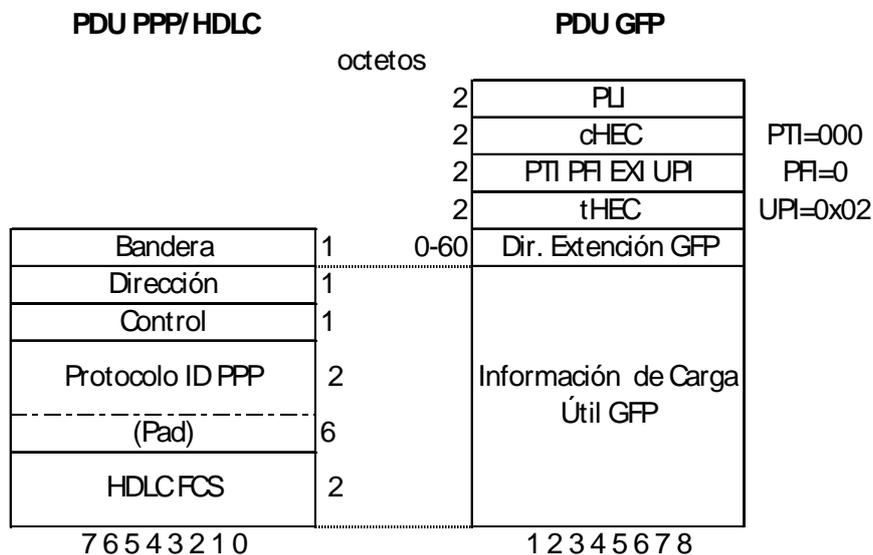


Fuente: Huub van Helvoort. **Next Generation SDH/SONET Evolution or Revolution ? Pág. 115**

3.3.2.2 Carga útil IP/PPP

Las cargas útiles IP/PPP, primero son encapsuladas en una trama HDLC. El formato de una trama PPP está definido en la IETF RFC 1661, sección 2. El formato de una trama HDLC está definido en la RFC 1662, sección 3. A diferencia de RFC 1662, no se efectúa un procedimiento de relleno de octetos en bandera o caracteres de control. Hay un mapeo uno-a-uno, entre una capa superior PDU PPP/HDLC y un PDU GFP. La relación entre la trama PPP/HDLC y la trama GFP se ilustra en la figura 20. Todos los octetos desde la trama PPP/HDLC, incluyendo cualquier campo de información PPP opcional, son colocados en el campo de Información de Carga Útil de la trama GFP. Los bits 0 y 7 del byte PPP/HDLC, corresponden a los bits 8 y 1, del byte de carga útil GFP, respectivamente. Los procedimientos de configuración de la carga útil PPP, son especificación-cliente y transparente al proceso GFP.

Figura 20. Relación PPP/HDLC a GFP.

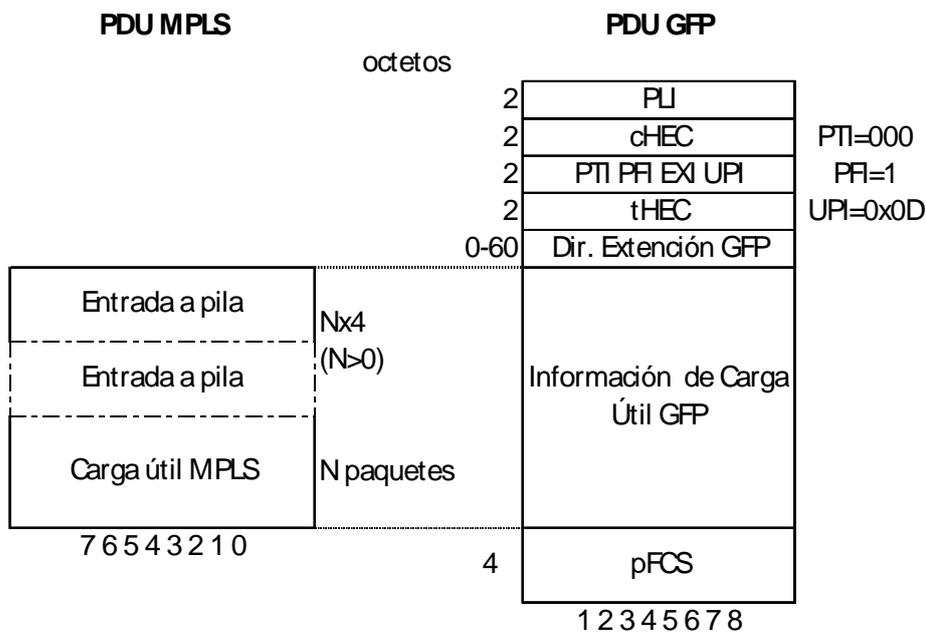


Fuente: Huub van Helvoort. *Next Generation SDH/SONET Evolution or Revolution ?* Pág. 116

3.3.2.3 Mapeo directo de MPLS

La trama PDU MPLS contiene uno o más campos de información de carga útil MPLS. Todos los octetos del PDU MPLS están colocados en el campo de información de carga útil de una trama GFP-F. Tanto los octetos de alineación como el bit de identificación dentro de los octetos son mantenidos dentro del PDU GFP-F. La carga útil GFP FCS es requerida e insertada en el campo pFCS. El campo PFI se pone en 1. La relación entre el PDU MPLS y PDU GFP-F se muestra en la figura 21.

Figura 21. Relación entre el PDU MPLS y PDU GFP-F



Fuente: Huub van Helvoort. *Next Generation SDH/SONET Evolution or Revolution ?* Pág. 118

4. CIRCUITOS EN EQUIPOS OMS

Ante la necesidad del transporte de información a gran escala surgió como una solución primaria la implementación de equipos Multiplexores Adición-Entrega o Add-Drop Multiplexers (ADM), los cuales sirvieron para el transmisión de SDH/SONET, en diversas velocidades estandarizadas según su modelo y aplicación. Actualmente existen varios tipos de multiplexores, pero hay un grupo que soporta la combinación de tecnologías y que se han implementado en varias empresas de telecomunicaciones, los cuales son los Multi-Servicio Óptico u Optical Multi-Service (OMS), estos tienen la capacidad de croconectar circuitos SDH, desde velocidades básicas como un 2048 Mbps (E1), hasta STM-1, STM-4, STM-16, STM-64, con el atractivo de poder sacar tributarios de todas las velocidades estandarizadas para SDH. Esta situación hace de los OMS equipos versátiles, además también de los servicios de gestión, control de errores, diagnóstico, etc. Así mismo poseen puertos Ethernet, los cuales pueden ser la terminación de un circuito SDH, esto les da una ventaja sobre el resto de multiplexores y a continuación se enumeran los principales parámetros que deben tomarse en cuenta para su configuración.

4.1 Parámetros en la Configuración Ethernet sobre SDH en equipos OMS

Los parámetros que se deben tomar en cuenta para la configuración de un puerto Ethernet en un OMS, según la necesidad y aplicación son:

- Rata máxima de interface, la cual por lo general es de 100000 kbit/s.
- El tipo de conector que se utilizará, como por ejemplo RJ45.

- La condición de alarma en la auto-negociación, recomendada la condición de no errores.

- Modo de pausa operacional, por ejemplo Asimétrico

- El estado administrativo de la interface.

- La dirección MAC.

Dentro de la capa física existen varios parámetros, los cuales son:

- El estado administrativo del puerto.

- El monitoreo del puerto, el cual puede ser auto-monitoreado.

- El tipo de capa física, por ejemplo 100BASE-TX FD.

- La inversión del estado del puerto, utilizada únicamente para pruebas.

En cuanto a las características Ethernet, están:

- La clasificación del tráfico o prioridad.

- El monitoreo del puerto, el cual puede ser auto-monitoreado.

- Tamaño máximo de paquete, por ejemplo 1600 bytes.

- Protocolo que se utilizará para el mapeo SDH, por ejemplo GFP.

- Alarmas que activaremos para un mejor monitoreo.

Existen más parámetros que podemos tomar en cuenta, que varían en cuanto a los modelos y marcas del fabricante. En la figura 22 se muestra el diagrama a bloques de las partes involucradas en una configuración Ethernet sobre SDH, donde se configura la

capa física, la concatenación virtual y su unión con la matriz de crosconexión SDH para su salida, ya sea en un contenedor virtual o en un puerto tributario.

Figura 22. Diagrama a bloques de una configuración Ethernet sobre SDH

CONCLUSIONES

1. Es esencial para cualquier empresa de telecomunicaciones que provea servicios que involucren transmisión de datos a gran escala, tener planificada una estrategia económica para soportar servicios de Ethernet sobre SDH/SONET, ya que esto es actualmente, más que un lujo, una necesidad.
2. La ampliación del ancho de banda, respecto a la necesidad de los clientes, no tiene porque ser una planificación muy elaborada desde el punto de vista del transporte. Para esto los servicios Ethernet sobre la red de transmisión se hace más versátil, cumpliendo con estas necesidades.
3. La forma más eficiente para la unificación de Ethernet sobre la red de transporte es la utilización de la concatenación virtual, para poder implementar de una forma sencilla y estándar este tipo de servicios.
4. Al utilizar LCAS, como metodología, para la variación de la capacidad del contenedor de carga contiguo, se deja entendido que el sistema de gestión de los elementos y la red (NMS) tiene la responsabilidad de soportarlo.

RECOMENDACIONES

1. Los servicios Ethernet de los proveedores, debe ofrecer ventajas significativas tanto al operador de red como a sus clientes antes que sea aceptado como la tecnología de conectividad preferida para la entrega de servicios de datos. Muchos de estas ventajas son sólo posibles cuando Ethernet es usado con una red SDH.
2. El proveedor debe ofrecer beneficios como estandarización sobre una conectividad, quitando la necesidad de múltiples redes y múltiples servicios, así mismo, quitar gastos operativos grandes.
3. El procedimiento que se recomienda para la encapsulación del tamaño variable de carga de varias señales de clientes para redes de transporte es el Procedimiento Genérico de Tramas (GFP).

BIBLIOGRAFÍA

1. Abdul Kasim, Delivering Carrier Ethernet Extending Ethernet Beyond The LAN, 2005.
2. Govind P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 2002.
3. Huub van Helvoort, Next Generation SDH/SONET Evolution or Revolution ?, 2006.