



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANALISIS DE FACTIBILIDAD EN LA IMPLANTACION DE
100 GbE SOBRE FIBRA SMF A 40 KM**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

INGENIERIA ELECTRICA - TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A :

JOSE HECTOR GUTIERREZ PEREZ



TUTOR:

DR. RAMON GUTIERREZ CASTREJON

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gómez Castellanos Javier

Secretario: Dr. Rangel Licea Víctor

Vocal: Dr. Gutiérrez Castrejón Ramón

1er. Suplente: Dr. Vicente Vivas Esau

2do. Suplente: M.I. Haro Ruíz Luis Arturo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Gutiérrez Castrejón Ramón

FIRMA

A mis padres, María Cruz y Jose Tirso:

A quienes admiro, quiero y respeto. Por su ayuda incansable, su consejo oportuno y cimiento en la vida.

A mis hermanos, Araceli y David:

Que los que he respeto y quiero, gracias por su confianza y afecto.

A Ana Lilia

Por paciencia y apoyo incondicional.

A mi asesor de tesis, Dr. Ramón:

Por su guía, apoyo, paciencia y colaboración.

A la Universidad, Facultad y Maestros, que han colocado piedra tras piedra, en la culminación de una nueva etapa en mi vida.

Agradezco al Dr. Marcus Duellk, de Bell Labs Alcatel/Lucent, por facilitar el paquete de simulación de sistemas ópticos.

Agradezco a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, UNAM, por el apoyo brindado mediante el proyecto PAPIIT IN103008, para la realización de esta investigación.

Contenido

Índice de Tablas

Índice de Figuras

Introducción	i
1. Antecedentes	1
1.1. Historia de Ethernet	1
1.2. Ethernet/IEEE 802.3	3
1.3. Fast Ethernet	7
1.4. Gigabit Ethernet	10
1.5. 10 Gigabit Ethernet	16
2. Planeación del Proyecto	27
2.1. Proyecto hacia la estandarización	27
2.1.1. Objetivos	28
2.1.2. PAR y Task Force	29
2.2. Justificación de 40 GbE y 100 GbE	31
2.2.1. Demandas y aplicaciones	32
2.2.2. Puntos clave	34
2.3. Propuestas de Arquitecturas	35
2.3.1. Arquitectura MLD, APL y PBL	36
2.3.2. Subcapa PMD para 100 GbE	40
2.3.2.1. Longitud de onda central	41
2.3.2.2. Tipo de transmisor	42
2.3.2.3. Presupuesto de potencia	43
2.3.2.4. Espacio Intercanal	44
2.3.2.5. Alternativa más conveniente	45
3. Diseño del sistema	47
3.1. Elementos del sistema de subcapa PMD	47
3.1.1. Transmisor óptico	48
3.1.2. Modulador	52

3.1.3. Multiplexor/Demultiplexor	54
3.1.4. Fibra óptica	56
3.1.5. Amplificador óptico	58
3.1.6. Detector óptico	62
3.2. Desempeño del sistema	66
3.2.1. Bit Error Rate	66
3.2.2. Presupuesto de potencia	68
4. Análisis	71
4.1. Introducción	71
4.2. Descripción del simulador	72
4.3. Parámetros de los dispositivos	74
4.4. Resultados de las simulaciones	75
4.4.1. Comportamiento del sistema con ER de 4 dB	76
4.4.2. Comportamiento del sistema con ER de 6 dB	79
4.4.3. Comportamiento del sistema con ER de 8 dB	81
4.4.4. Comportamiento del sistema con ER de 10 dB	83
4.5. Análisis de resultados	85
4.6. Conclusiones	88
5. Conclusiones Generales	89
Bibliografía	93
Glosario	97

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Tipos de medio físico y sus características que son utilizados en Ethernet/IEEE 802.3	6
Tabla 1.2 Tipos de medio físico y sus características que son utilizados en Fast Ethernet... 10	
Tabla 1.3 Tipos de medio físico y sus características que son utilizados en Gigabit Ethernet15	
Tabla 1.4 Características de los tipos de PMDs que fueron seleccionados por la Task Force, para el estándar de la IEEE 802.3ae	23
Tabla 2.1 Especificaciones de capa física definidos para el estándar de la IEEE 802.3ba ...36	
Tabla 2.2 En la tabla se muestran las alternativas de diseño en la subcapa PMD para 100 GbE a 10 y 40 km.; donde OA es el Amplificador Óptico y DC es la Fibra de Compensación para la Dispersión.....	41
Tabla 3.1 Frecuencia y longitud de onda propuestos por la Task Force para alcanzar los 100 Gbps	51
Tabla 3.2 Recomendaciones y características de la especificación G.652.A para fibra monomodo	58
Tabla 3.3 Parámetros de un SOA pre-amplificado	61
Tabla 3.4 Parámetros y valores de operación de fotodetectores de tipo PIN	64
Tabla 3.5 Cálculo del presupuesto de potencia del sistema óptico de la subcapa PMD, con valores típicos de pérdidas y ganancias de los componentes.....	69
Tabla 4.1 Valores de parámetros de los dispositivos que conforman el sistema óptico de la subcapa PMD	75
Tabla 4.2 Valores mínimos de -Log (BER) en enlace de 0 a 12 km transmitiendo 4 x 25.78 Gbps. Los valores en celda gris no reúnen los requerimientos del BER para los 100 Gbps.....	86
Tabla 4.3 Valores mínimos de -Log (BER) en enlace de 12 a 40 km transmitiendo 4 x 25.78 Gbps. Los valores en celda gris no reúnen los requerimientos del BER para los 100 Gbps .	87

Índice de Figuras

Figura 1.1 Dibujo del primer sistema Ethernet por Robert Metcalfe	2
Figura 1.2 Relación de capas de la especificación de Ethernet a 10 Mbps con la del modelo OSI	4
Figura 1.3 Definición de los campos de los frames (a) IEEE 802.3 y (b) Ethernet (DIX).....	4
Figura 1.4 Diagrama de flujo del funcionamiento del método de acceso CSMA/CD.....	6
Figura 1.5 Se muestran las modificaciones de la capa física para el estándar IEEE 802.3u..	8
Figura 1.6 Estructura de capas en la arquitectura IEEE 802.3z Gigabit Ethernet	12
Figura 1.7 Formato de frame para la tecnología Gigabit Ethernet.....	13
Figura 1.8 Formato de frame bursting, utilizado para la eficiencia del canal de transmisión.	14
Figura 1.9 Arquitectura serial de capa PHY para 10 Gigabit Ethernet	18
Figura 1.10 Arquitectura en paralelo de capa PHY para 10 Gigabit Ethernet	19
Figura 1.11 Arquitecturas utilizadas para LAN PHY y WAN PHY en 10 Gigabit Ethernet....	20
Figura 1.12 Integración de las capas XGMII, XAUI y XGXS en la arquitectura de 10 GbE...	21
Figura 1.13 Integración de la interface XSBI en la arquitectura serial en el estándar de 10 GbE	22
Figura 1.14 Resumen de características generales de 10 Gigabit Ethernet	25
Figura 2.1 Desarrollo histórico de la tecnología Ethernet a través de los años	28
Figura 2.2 Línea de tiempo de la IEEE 802.3 para la estandarización de 40 GbE y 100 GbE	30
Figura 2.3 Predicción del crecimiento de datos en servidores y la interconexión en el core.	31
Figura 2.4 El ecosistema Ethernet muestra las redes propuestas en la implementación de la IEEE 802.3ba	32
Figura 2.5 Arquitectura MLD propuesta por el grupo de estudio HSSG, para velocidades de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps.....	37
Figura 2.6 Arquitectura APL propuesta por el grupo de estudio HSSG, para velocidades de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps.....	38
Figura 2.7 Arquitectura PBL propuesta por el grupo de estudio HSSG, para velocidades de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps.....	39
Figura 2.8 En la figura se muestra la dispersión que tiene la fibra óptica monomodo a diferentes longitudes de onda.....	42
Figura 2.9 Tipos de láser DML y EAML, y la modulación para cada uno de ellos.....	42

Figura 2.10 Gráficas de potencia y chirp después de la modulación del láser DML (A) y el EAML (B)	43
Figura 2.11 Trayectoria de un sistema óptica para el cálculo del presupuesto de potencia..	44
Figura 2.12 Espaciamiento intercanal de LAN WDM y DWDM, para la longitud de onda central igual a 1310 nm	45
Figura 3.1 Arquitectura del enlace óptico de 4 x 25 Gbps. Los elementos sombreados en gris son componentes eléctricos	48
Figura 3.2 Láser de onda continúa con un modulador externo a la salida del láser	49
Figura 3.3 Estructura de un láser Distributed FeedBack	50
Figura 3.4 Sección longitudinal simple de un modulador de electro-absorción	53
Figura 3.5 La función de un Multiplexor es la de combinar longitudes de onda hacia un puerto de salida	55
Figura 3.6 La figura muestra características importantes de la forma espectral de filtros ópticos, λ_0 es el centro de longitud de onda del filtro y λ denota la longitud de onda de la señal de luz	56
Figura 3.7 Diagrama esquemático de un Amplificador Óptico de Semiconductor	59
Figura 3.8 Diagrama del proceso de emisión estimulada en un sistema de dos niveles, E_2 nivel superior y E_1 nivel inferior	60
Figura 3.9 Gráfica de la ganancia típica de un SOA contra la potencia de la señal de salida	60
Figura 3.10 Representación esquemática y diagrama simplificado de un fotodetector óptico de tipo PIN	64
Figura 3.11 Diagrama de diseño de un receptor óptico	65
Figura 3.12 Cálculo del presupuesto de potencia y la atenuación mínima en un sistema óptico	69
Figura 4.1 Diagrama de módulos del simulador de sistemas ópticos LabVIEW	73
Figura 4.2 Gráfica del BER en función de la distancia de la SMF para un ER = 4 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA	76
Figura 4.3 Gráfica del ER a la salida del SOA en función de la distancia de la SMF para un ER = 4 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA	78
Figura 4.4 Gráfica del OSNR a la salida del SOA en función de la distancia de la SMF para un ER = 4 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA	79
Figura 4.5 Gráfica del BER en función de la distancia de la SMF para un ER = 6 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA	80

Figura 4.6 Gráfica del ER a la salida del SOA en función de la distancia de la SMF para un ER = 6 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA.....	81
Figura 4.7 Gráfica del BER en función de la distancia de la SMF para un ER = 8 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA	82
Figura 4.8 Gráfica del ER a la salida del SOA en función de la distancia de la SMF para un ER = 8 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA.....	83
Figura 4.9 Gráfica del BER en función de la distancia de la SMF para un ER = 10 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA	84
Figura 4.10 Gráfica del ER a la salida del SOA en función de la distancia de la SMF para un ER = 10 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA	84

Introducción

Un recurso que el hombre ha empleado para mejorar su condición de vida, ha sido poder comunicarse con otros de manera eficiente; ya sea por alguna necesidad o bien con fines de esparcimiento. A partir de ello las formas de comunicarse han ido adaptándose a las necesidades de desarrollo de la sociedad en general, donde la comunicación ha sido y seguirá siendo un factor de éxito.

Hoy en día, las redes de datos facilitan la comunicación, haciendo la vida personal más sencilla o mejorando la productividad de un grupo dentro de una empresa. Son muchos los ejemplos de aplicaciones que corren sobre una red de datos, pero estos son cada vez más y con mayor cantidad de información, para satisfacer las necesidades de los usuarios. Sin embargo, las redes de datos no operan por sí solas, cada una de ellas es un complejo sistema donde convergen tecnologías de información; que bajo un análisis, diseño e implementación dará el servicio de comunicación deseado.

El proyecto de tesis contempla un análisis de factibilidad en la implantación de la tecnología Ethernet a una velocidad de transmisión mayor a la actual, para brindar una mejor comunicación entre los usuarios; los cuales empiezan a utilizar aplicaciones que requieren mayor ancho de banda. El análisis está enfocado en la tecnología Ethernet para una velocidad de transmisión de 100 Gbps a una distancia de 40 km, y en específico en la interface física.

Planteamiento del problema

En la última década se ha estado observando un crecimiento continuo de tráfico de datos en las redes de información. Este intercambio de datos se origina principalmente en cuatro tipos de redes, que son: redes de Acceso a Banda Ancha, redes de Contenido, redes Empresariales y redes de Investigación.

Estas redes se interconectan entre sí generando una sola red global llamada ecosistema, donde circula la información, aplicaciones, servicios, etc, de cada una de las redes; y por consiguiente, se requiere de un mayor ancho de banda y velocidad de transmisión de datos. Estos requerimientos son

indispensables para satisfacer las demandas y necesidades de los usuarios, los cuales se van integrando cada vez más a este ecosistema.

Es por ello que se requiere de una tecnología, en la redes de datos, para garantizar el intercambio de información de manera satisfactoria. Esta tecnología a implementar es la llamada Ethernet, la cual es la más usada, la cual deberá de tener una mayor velocidad de transmisión que la de su antecesor (10 Gbps). Para lo cual se plantea una velocidad de transmisión de 100 Gbps, que cumpla con los objetivos planteados por la IEEE y garantizar con ello el intercambio de información.

Objetivo

El proyecto tiene como principal objetivo realizar un estudio numérico del sistema óptico, principalmente de la interface física, en la implantación de 100 Gbps sobre fibra monomodo a una distancia de 40 km.

Alcance

El alcance del proyecto de tesis es la estandarización de la velocidad de transmisión a 100 Gbps para la tecnología Ethernet, sobre fibra monomodo a una distancia de 40 km; delimitado a la interface física de sistema óptico. Cabe mencionar que el estándar final incluye también la velocidad de transmisión de 40 Gbps, para diferentes distancias y medios de transmisión, pero que no está en la discusión de este proyecto.

Organización del documento

La elaboración del proyecto de análisis de factibilidad en la implantación de 100 GbE sobre fibra SMF a 40 km, se realizó en diferentes etapas para su análisis con el fin de obtener resultados para su estudio y conclusión. Los procedimientos generales que se realizaron en cada capítulo se explican a continuación.

El primer capítulo proporciona los antecedentes de la familia Ethernet, que sienta las bases para entender su evolución y desarrollo que ha tenido a través de sus más de 30 años de existencia. Así, como también sus características más importantes de tecnología para cada uno de los que integran esta familia.

En el capítulo 2 está la planeación del proyecto en base a las reuniones de trabajo de Higher Speed Study Group y la Task Force de la IEEE. El capítulo contempla la justificación, demanda y aplicaciones de implementar velocidades de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps. Así como también, la descripción de arquitecturas para el sistema óptico, con algunas consideraciones de la interface física a estudiar para la velocidad de transmisión de los 100 Gbps.

El capítulo 3 contempla el diseño del sistema óptico de la interface física, el cual está conformado por dispositivos que son descritos con sus características principales. Además, también en el capítulo se describen parámetros de desempeño para el análisis de sistema.

Una vez que se han descrito los dispositivos del sistema óptico, en el capítulo 4 se realiza el análisis del sistema a partir de los resultados que son proporcionados por simulaciones. Los resultados a su vez están descritos en cuatro comportamientos, que fueron clasificados en base a parámetros ya establecidos. Al final se realizan conclusiones preliminares en base al análisis de resultados.

Por último, en el capítulo 5 lo integran las conclusiones generales realizadas a través del estudio completo del proyecto, integrado por los capítulos anteriormente descritos.

1. Antecedentes

1.1. Historia de Ethernet

Las raíces históricas de la tecnología Ethernet son muy interesantes, su inicio nace de la red ALOHA, la cual fue desarrollada en la Universidad de Hawaii en 1968. Esto fue uno de los primeros ejemplos de una LAN (Local Área Network) y es considerado un antecesor de todos los medios de comunicación compartido de la red que posteriormente siguieron. Mientras Norm Abramson implementaba la red ALOHA, un estudiante llamado Robert Metcalfe se encontraba realizando estudios de doctorado en la Universidad de Harvard trabajando para ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network). En un viaje a Washington Metcalfe estuvo en casa de Steve Crocker (inventor de los RFCs de Internet), para poder conciliar el sueño empezó a leer una revista científica donde encontró un artículo de Abramson en el que describía la red ALOHA. Metcalfe pensó cómo se podría mejorar el protocolo utilizado, y escribió un artículo describiendo un protocolo que mejoraba sustancialmente el rendimiento de ALOHA; este artículo se convertiría en su tesis doctoral que presentó en 1973.

En 1972 Metcalfe se mudó a California para trabajar en Xerox PARC (Palo Alto Research Center), allí se estaba diseñando lo que se consideraba la “oficina del futuro”, Metcalfe encontró en este lugar un ambiente de trabajo perfecto para desarrollar sus inquietudes. Se estaban probando unas computadoras denominadas “Alto”, que ya disponían de capacidades gráficas y mouse, y fueron consideradas las primeras computadoras personales; también se estaban fabricando las primeras impresoras láser. A Metcalfe se le encomendó la tarea de diseñar y construir la red que uniera todos

los equipos; contaba con la ayuda de un estudiante de doctorado de Stanford llamada David Boggs [1].

Las primeras experiencias de la red que denominaron “Alto ALOHA Network” fueron mejorando gradualmente el prototipo, hasta que el 22 de mayo de 1973 Metcalfe escribió un memorándum interno en el que informaba de la nueva red. Para evitar que se pudiera pensar que sólo servía para conectar computadoras “Alto” cambió el nombre de la red por el de Ethernet, que hacía referencia a la teoría de la física hoy ya abandonada según la cual las ondas electromagnéticas viajaban por un medio denominado “ether”, que suponía llenaba todo el espacio. Las dos computadoras “Alto” utilizadas para las primeras pruebas de Ethernet fueron bautizadas con los nombres de Michelson y Morley, en alusión a los dos físicos que demostraron en 1887 la inexistencia del “éter”. En la figura 1.1 se muestra el dibujo original de Metcalfe, en el refiere que a lo largo del cable viajan los datos como “el ether” [2]

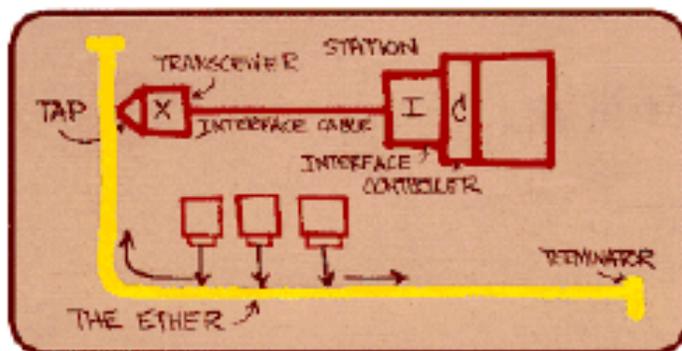


Figura 1.1 Dibujo del primer sistema Ethernet por Robert Metcalfe

Para 1973 Ethernet ya tenía todas las características esenciales de la Ethernet actual, empleaba el método de acceso CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), para minimizar la probabilidad de colisión de paquetes. Para el caso en que la red se produjera una colisión se habilitaría un mecanismo denominado “binary exponential backoff”, el cual serviría para reducir gradualmente los intentos de transmisión del emisor, con lo que éste se adaptara a las situaciones de los diversos niveles de tráfico. También tenía topología de bus y funcionaba a 2.94 Mbps (Megabits por segundo), sobre un segmento de cable coaxial de 1.6 Km de longitud. En 1975 Metcalfe y Boggs describieron a Ethernet en un artículo que enviaron a Communications of the ACM (Association for Computing Machinery), publicado en 1976 [3]; en él ya describían el uso de repetidores para aumentar el alcance de la red. En 1977 Metcalfe, Boggs y otros dos ingenieros de Xerox recibieron una patente por la tecnología básica de Ethernet, y en 1978 Metcalfe y Boggs recibieron otra por el repetidor.

1.2. Ethernet/IEEE 802.3

Las especificaciones de Ethernet a 10 Mbps fueron desarrolladas en conjunto por las corporaciones de DEC (Digital Equipment Corporation), Intel (Integrated Electronics) y Xerox; que se publico en septiembre de 1980. Estas especificaciones son conocidas como el estándar DEC-Intel-Xerox (DIX), el libro azul de Ethernet versión 1 (llamado como Ethernet DIX80). La segunda revisión liberada fue en noviembre de 1982 como Ethernet versión 2 (llamado como Ethernet DIX82); este es el estándar que conocemos hoy como Ethernet. Este documento cubrió aspectos de la MAC (Media Access Control) y la capa física; y dio una explicación relativamente clara de la operación de una red completa.

El comité 802 de la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) desarrolla estándares que conforman las tres capas más bajas del modelo OSI (Open Systems Interconnect), que fue desarrollado por la ISO (International Organization for Standardization) en 1978. El propósito del modelo OSI fue la de proveer un modelo de arquitectura de red que permitiera una flexibilidad en el desarrollo de la misma; así como la interconectividad con otras redes orientadas al modelo OSI [4], como se muestra en la figura 1.2. En 1980, la IEEE formó su Proyecto 802 para proporcionar un marco de trabajo en la estandarización de la tecnología LAN, posteriormente en el año de 1985 se publico el estándar IEEE 802.3. Este estándar provee un sistema tipo Ethernet basado, pero no idéntico, al estándar DIX original; el nombre correcto para esta tecnología es IEEE 802.3 CSMA/CD pero casi siempre es referido como Ethernet.

La subcapa PLS (Physical Layer Signaling) y el subsistema de AUI (Attachment Unit Interface) soportan el esquema de señalización entre la capa de MAC (Media Access Control) y el MAU (Medium Access Unit). La capa MAU consiste en dos subcapas y es responsable de enviar a la interface física señales eléctricas u ópticas entre la estación y el medio de transmisión. La primera subcapa del MAU es la de PMA (Physical Medium Attachment), la cual es también conocida como un “transceiver”. La PMA define la señalización eléctrica u óptica, líneas de estado, pauta de reloj, codificación de datos y circuitería necesaria para la transmisión y recepción de datos. La otra subcapa del MAU es el MDI (Medium Dependent Interface), el cual es un conector que acopla el transceiver con el medio de transmisión físico.

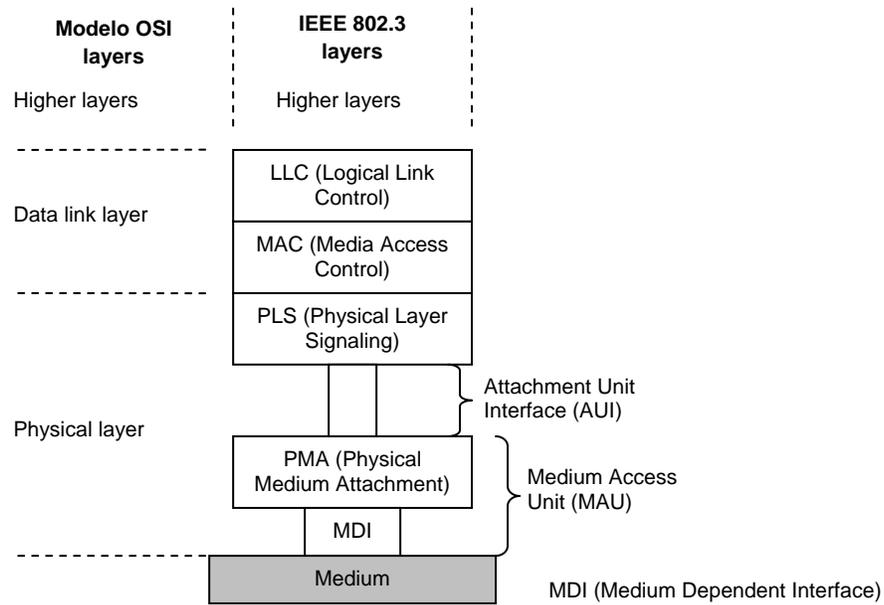


Figura 1.2 Relación de capas de la especificación de Ethernet a 10 Mbps con la del modelo OSI

Para transmitir un mensaje a través del medio físico de Ethernet se construye un frame, que consta de un número finito de bytes organizados en varios campos. Los campos del frame para Ethernet (DIX) y de IEEE 802.3, se muestran en la figura 1.3 y son descritos a continuación:

Bytes	7	1	6	6	2	0 - 1500	0 - 46	4
(a)	Preamble	SFD	DA	SA	Lenght	Data	PAD	FCS
(b)	Preamble		DA	SA	Type	Data	PAD	FCS

Figura 1.3 Definición de los campos de los frames (a) IEEE 802.3 y (b) Ethernet (DIX)

- *Preamble*.- Es un patrón alternado de unos y ceros que informa a las estaciones que un frame está por llegar.
- *SFD (Start Frame Delimiter)*.- El byte delimitador en IEEE 802.3 termina con dos bits 1s consecutivos, lo cual indica que el siguiente bit será el bit más significativo del campo de la dirección MAC destino.

- *DA (Destination Address)*.- Los primeros tres bytes de la dirección están especificados por la IEEE con base en el fabricante. Los tres últimos bytes son especificados por el fabricante Ethernet o IEEE 802.3. La dirección destino puede ser unicast, multicast o broadcast.
- *SA (Source Address)*.- El campo contiene la dirección física del dispositivo que está enviando el frame.
- *Lenght*.- Indica la cantidad de bytes en el campo de datos.
- *Type*.- El campo especifica el protocolo de la capa superior que recibe los datos una vez terminado el procesamiento de Ethernet.
- *Data*.- El campo de datos lleva un mínimo de 46 bytes y un máximo de 1500 bytes.
- *PAD*.- Si hay menos de 46 bytes de datos, el campo será rellenado a la longitud mínima.
- *FCS (Frame Check Sequence)*.- Este campo tiene un valor de 4 byte para CRC (Cyclical Redundancy Check), creado por el dispositivo emisor y recalculado por el dispositivo receptor para verificar si hay frame dañados [5].

El método de acceso CSMA/CD es una versión particular del método ALOHA, en el cual cada emisor es libre de administrar su transmisión de frames en función de sus necesidades y de la disponibilidad del medio. Cuando no hay frames para transmitir, la estación queda en silencio y escucha a los demás frames que circulan por el medio. Cuando una estación necesita transmitir actuará independientemente de las otras estaciones, porque todas las estaciones están conectadas al medio y tienen la misma posibilidad de transmitir en cualquier momento. El método de acceso es distribuido y es llamado como método de "Multiple Access" (MA); así la estación observa el medio en un intento para detectar un carrier (carrier sense, CS). Es un hecho que si dos estaciones diferentes transmiten simultáneamente habrá una interferencia de la señal y es una pérdida de frame para ambos, para este caso se transmite una señal "jam" de 32 bits que es enviada para asegurar que todos en el medio detecten que hubo una colisión. Para minimizar el riesgo de una segunda colisión se espera un tiempo aleatorio antes que la estación vuelva a intentar transmitir, para lo cual se habilita un algoritmo especial llamado "truncated binary exponential backoff" que permite a las estaciones ajustarse a las condiciones de tráfico de la red. Sólo después de 16 intentos consecutivos de retransmisión el frame es descartado (por sobrecarga del canal o porque el canal está roto). La figura 1.4 muestra un diagrama de flujo del funcionamiento de método de acceso al medio CSMA/CD.

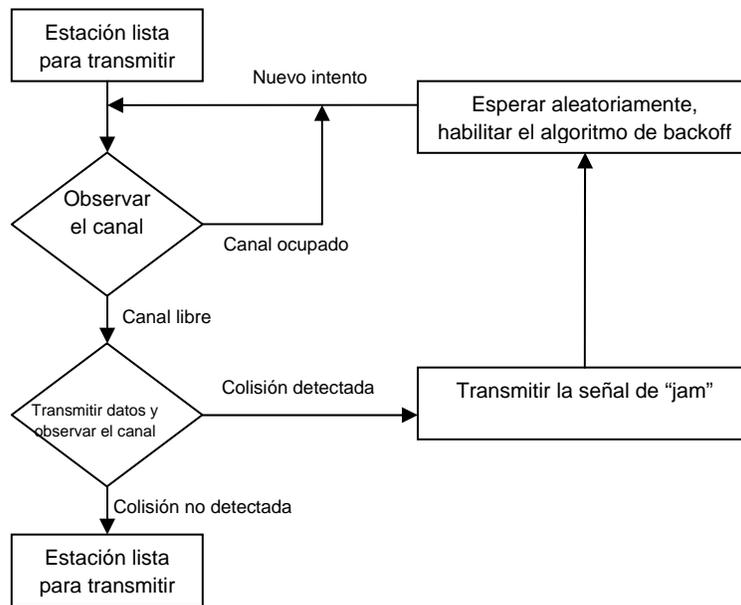


Figura 1.4 Diagrama de flujo del funcionamiento del método de acceso CSMA/CD

La tecnología Ethernet maneja varias opciones del medio con sus respectivas características, ver tabla 1.1, a continuación se describen las diferentes tecnologías:

Parámetros	10Base5	10Base2	10Base-T	10Broad36	10Base-FP	10Base-FL	10Base-FB
Velocidad	10 Mbps						
Medio de transmisión	Cable coaxial grueso RG-11	Cable coaxial delgado RG-58	Cable UTP cat. 3, 4 y 5	Cable coaxial CATV RG-59	Fibra óptica multimodo (62.5/125 μm)		
Tipo de transmisión	Banda Base Manchester			Banda Ancha DPSK	Banda Base Manchester		
Tipo de conector	AUI	BNC	RJ-45	AUI	ST (Straight tip)		
Longitud máxima de segmento	500 m	185 m	100 m	3600 m	500 m	2000 m	2000 m
Número máximo de estaciones	100	30	1024	-----	33	2	2

Tabla 1.1 Tipos de medio físico y sus características que son utilizados en Ethernet/IEEE 802.3

- ❖ **10Base5.-** Es la tecnología original que utiliza coaxial grueso (50 ohms). La técnica de transmisión es en banda base. Su longitud máxima de segmento son 500 m. Técnica de codificación es Manchester. Máximo número de nodos en el segmento son 100.

- ❖ **10Base2.-** Tecnología que utiliza coaxial delgado (50 ohms). La técnica de transmisión es banda base. Su longitud máxima del segmento son 185 m. La técnica de codificación es igualmente Manchester. Máximo número de nodos por segmento son 30.
- ❖ **10Base-T.-** Tecnología sobre cable UTP (Unshielded Twisted Pair), siguiendo una topología de cableado horizontal en forma de estrella. La técnica de transmisión es banda base. Su máxima longitud del segmento son 100 m. La técnica de codificación es Manchester. Máximo número de estaciones son 1024.
- ❖ **10Base-F.-** Esta tecnología utiliza como medio de transmisión fibra óptica multimodo (62.5/125 μ m). La técnica de transmisión es banda base. La técnica de codificación es Manchester. Consiste realmente en tres especificaciones:
 - **10Base-FP (Fiber Passive)-** Provee especificaciones para enlaces entre múltiples dispositivos sobre un canal de transmisión de fibra óptica sin la utilización de repetidores activos.
 - **10Base-FL (Fiber Link)-** Esta especificación reemplaza a la FOIRL (Fiber Optic Inter-Repeater Link). Es utilizado entre dos dispositivos de red, dos repetidores o entre un repetidor y un dispositivo de red. La máxima longitud del segmento son 2000 m.
 - **10Base-FB (Fiber Backbone)-** La especificación describe un segmento troncal o backbone de fibra óptica. Los enlaces pueden ser de hasta 2000 m de longitud.
- ❖ **10Broad36.-** Es un estándar ya obsoleto sobre un cable coaxial CATV de 75 ohms con una longitud de 3600 m. Técnica de transmisión en banda ancha, utilizando codificación DPSK (Differential Phase Shift Keying).

1.3. Fast Ethernet

La tecnología Fast Ethernet fue creado por el grupo de trabajo IEEE 802.3, el mismo comité que generó las especificaciones originales de Ethernet. El trabajo de estandarización concluyo rápidamente (mediante las normas de los comités de estándares) y el resultado fue IEEE 802.3u, el cual fue adoptado oficialmente por la IEEE en junio de 1995. Técnicamente el estándar IEEE 802.3u

no es un nuevo estándar, sino un agregado del IEEE 802.3; para enfatizar su compatibilidad con la Ethernet existente. En Fast Ethernet utiliza el mismo protocolo de control de acceso que es CSMA/CD. Respecto al formato del frame es prácticamente idéntico al de su antecesor Ethernet; esto permitió una mejora en el rendimiento utilizando tecnología homóloga. La idea básica de Fast Ethernet era mantener todos los formatos anteriores, interfaces y reglas de procedimientos, y sólo reducir el tiempo de bits de 100 ns a 10 ns [6]. La figura 1.5 muestra las modificaciones que se realizaron para el estándar IEEE 802.3u.

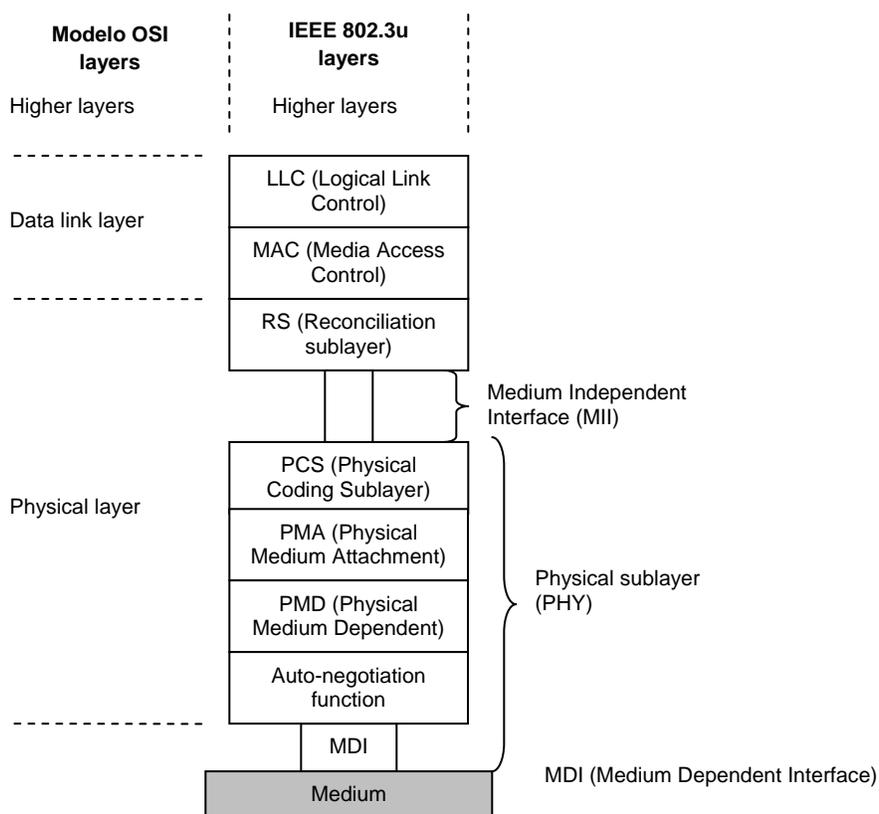


Figura 1.5 Se muestran las modificaciones de la capa física para el estándar IEEE 802.3u

La función de la subcapa MII (Medium Independent Interface) es esencialmente la misma que la del subsistema AUI, y es la de acoplar características específicas de señalización entre la capa MAC y la subyacente capa PHY (Physical Sublayer). Así también la de permitir a la MAC operar sin cambios con una variedad de medios físicos, los cuales generalmente requieren diferentes funciones de señalización física. Una diferencia significativa entre las subcapas MII y la AUI es la transferencia de datos; la subcapa MII lo hace en bloques de 4 bits (conocido como un *nibble*); en contraste a 1 bit que es lo que soporta el subsistema AUI. La subcapa MII puede ajustarse a dos velocidades de

transmisión de datos (10 y 100 Mbps), por tanto permite soportar nodos de los dos estándares (Ethernet y Fast Ethernet). Para acoplar la señal de la subcapa MII con la señal de la capa MAC se utiliza una capa llamada RS (Reconciliation sublayer), que provee un mapeo entre la cadena de datos y la capa MAC; así como el ancho de *nibble* en las interfases del transmisor y receptor de la subcapa MII.

La subcapa PCS (Physical Coding Sublayer) es la responsable para la codificación de datos, transmisión, recepción y funciones de carrier sense. La subcapa PMA (Physical Medium Attachment) proporciona una interfase de servicio de señalización entre la subcapa PCS y la subyacente subcapa PMD (Physical Medium Dependent). Este servicio convierte la cadena de bit en paralelo de la subcapa PCS dentro de una cadena de bit serial, lo cual es necesario en la subcapa PMD para enviar información sobre el medio físico. La subcapa PMD traduce la cadena de bit serial eléctrica entrante de la subcapa PMA dentro de un formato para la transmisión sobre el medio físico especificado. De manera similar la subcapa MDI es un conector que acopla el transceiver al medio de transmisión físico.

El propósito de la “Auto-negotiation function” es la de permitir la interoperatividad entre redes de 10Base-T y 100Base-TX, es definido solo para un 100Base-TX PHY. Cuando una conexión es establecida entre dos dispositivos de red, el mecanismo de auto-negotiation sensa los modos de operación de cada dispositivo y automáticamente configura el enlace para un mejor desempeño posible de operación entre los dispositivos [7]. Otra característica que maneja Fast Ethernet es la de modo de transmisión de datos llamado “Full duplex”. Esta técnica es la del flujo simultáneo de datos en ambas direcciones a través de un enlace. Full duplex trabaja solo entre dos switches o entre un switch y un DTE (Data Terminal Equipment) [8].

El estándar IEEE 802.3u hace referencia a los diferentes tipos de medio que utiliza Fast Ethernet, ver tabla 1.2, así como algunas características y que se explican a continuación:

- ❖ **100Base-TX.**- Utiliza cable UTP categoría 5 y cable STP (Shielded Twisted Pair) usando dos pares de una longitud de 100 m, un par para emisión y el otro par en recepción. Usa una codificación llamada 4B/5B y señalización MLT-3 (Multiline transmission).

- ❖ **100Base-FX.**- Utiliza un par de fibras ópticas multimodo (62.5/125 μm), con una longitud de onda óptica de 1300 nm, además de una codificación de 4B/5B y señalización NRZI (Non

return to zero, inverted). Las distancias máximas utilizadas son: switch-to-switch 412 m y switch-to-switch full duplex 2000 m, utilizando un tipo de fibra multimodo [9].

- ❖ **100Base-T4.-** Es un sistema que utiliza cuatro pares de cable categoría 3/4/5. Utiliza una codificación 8B/6T, donde cada byte es convertido dentro de una secuencia de seis niveles ternarios transmitidos en paralelo sobre tres pares simultáneamente. Por lo anterior 100Base-T4 no puede funcionar en modo full duplex.
- ❖ **100Base-T2.-** Es una tecnología completamente compatible con 100Base-T (100Base-TX y 100Base-FX). Utiliza dos pares de cable UTP categoría 3/4/5, usa ambos pares par transmitir y recibir simultáneamente; lo anterior es llevado a cabo por una técnica de procesamiento de señal digital. Utiliza un codificación más compleja denominada PAM-5 (5-level Pulse Amplitude Modulation) [10]; y la longitud máxima del segmento es de 100 m.

Parámetros	100Base-TX	100Base-FX	100Base-T4	100Base-T2
Velocidad	100 Mbps			
Medio de transmisión	2 pares UTP cat 5 ó 2 pares STP	2 pares de fibra multimodo/monomodo	4 pares de UTP cat 3/4/5	2 pares de UTP cat 3/4/5
Tipo de conector	RJ-45	SC duplex (Subscriber conector)	RJ-45	RJ-45
Tipo de transmisión	Banda base 4B/5B-MLT3	Banda base 4B/5B-NRZI	Banda base 8B/6T	Banda base PAM-5
Modo de transmisión	Half duplex (HD) Full duplex (FD)	Half duplex (HD) Full duplex (FD)	Half duplex (HD)	Half duplex (HD) Full duplex (FD)
Longitud máxima de segmento	100 m	412m HD multimodo 2 km FD multimodo	100 m	100 m

Tabla 1.2 Tipos de medio físico y sus características que son utilizados en Fast Ethernet

1.4. Gigabit Ethernet

La tecnología de Gigabit Ethernet fue trazado al tiempo en que el comité de la IEEE 802.3 creó la Task Force IEEE 802.3z (1 000 Mbps). Este comité se dio a la tarea de desarrollar el estándar que

debería dirigir la necesidad para una tecnología de alta velocidad en redes de backbone y de acceso local. El estándar IEEE 802.3z (Gigabit Ethernet) es una extensión del estándar base IEEE 802.3; por lo tanto tiene mucho en común respecto a las características de la capa MAC y el formato del frame. Solo hay modificaciones en la capa física y de enlace de datos, donde se habilitan características para operar a una velocidad considerablemente alta. Los objetivos de diseño en la especificación de Gigabit Ethernet (GbE), que fueron incluidos en la Task Force son los siguientes:

- Debe ofrecer 10 veces más de ancho de banda (de 100 a 1000 Mbps), debe usar el formato de frame Ethernet de la IEEE 802.3
- Debe emplear el mismo esquema de operación en MAC (half duplex y full duplex) como sus predecesores.
- Debe ser compatible con las tecnologías de 10 y 100 Mbps.
- Debe soportar todos los protocolos de red existente usados con la familia Ethernet.

El estándar IEEE 802.3z fue liberado en 1998, el cual especifica el uso de fibra óptica y cable de cobre corto (menos de 25 m) STP como medio de transmisión. Subsecuentemente se desarrolló el estándar IEEE 802.3ab para 1000 Gbps sobre UTP cat 5. La figura 1.6 muestra la estructura de capas para Gigabit Ethernet.

La función de la subcapa RS (Reconciliation sublayer) es similar en la de Fast Ethernet; sin embargo, en este caso el mapeo de datos se realiza en bloques de 1 byte para la subcapa MAC. La subcapa GMII (Gigabit Medium Independent Interface) proporciona la interacción lógica entre las subcapas MAC y PHY. La subcapa GMII es opcional para todas las alternativas del medio físico, excepto UTP. Es implementado como un circuito integrado y permite la compatibilidad de los componentes de las subcapas MAC y PHY. La capa subcapa GMII es similar a la subcapa de MII de Fast Ethernet, la diferencia es que en la subcapa GMII la dirección de datos de la subcapa MAC a la subcapa PHY es de 1 byte de longitud; es decir, que durante cada ciclo de reloj 1 byte de datos es movido a través de la subcapa GMII. Para la transmisión y recepción de datos el reloj opera a 125 MHz, para proveer una velocidad total de 1 Gbps. Para las conexiones de redes de 10Base-T o Fast Ethernet, la subcapa GMII también puede dar velocidades de datos de 10 y 100 Mbps, en tales casos su operación es idéntica como en la subcapa MII.

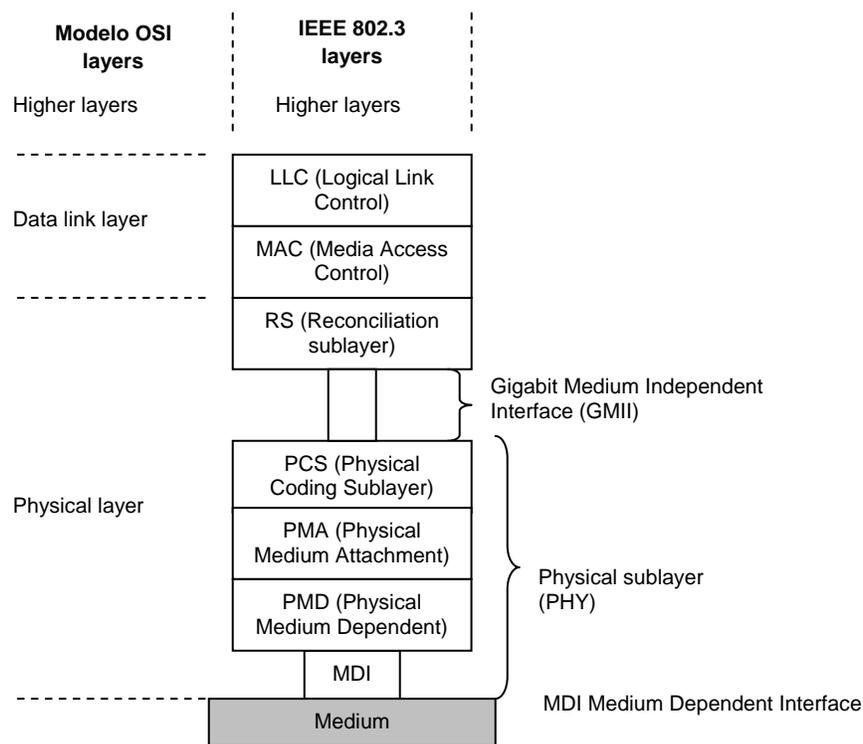


Figura 1.6 Estructura de capas en la arquitectura IEEE 802.3z Gigabit Ethernet

La subcapa PCS implementa una codificación/decodificación de 8B/10B, para uso con fibra óptica y cable de cobre STP. En adición, las funciones de auto-negotiation y control de flujo están ahora especificados en la capa PCS. El proceso de auto-negotiation determina la velocidad de enlace y el modo de operación, ya sea full duplex o half dúplex; para el modo half duplex la subcapa PCS hace el proceso de carrier sense y la detección de colisión. La función de la subcapa PMA es la serialización de los bits provenientes de la subcapa PCS; es decir, se reciben bloques de 10 bits de datos codificados a 8B/10B para después ser sincronizados a una velocidad de 125 MHz, los cuales a su vez son cambiados a una cadena de bit serial para ser entregados a la subcapa de PMD. En dirección inversa la subcapa PMA recibe datos seriados de la subcapa PMD y genera bloques de 10 bits de datos después ser entregados a la subcapa PCS. Similar a Fast Ethernet las subcapas PMD y MDI especifican los transceivers y conectores respectivamente, para los diferentes tipos de medio físico [11].

Aunque la estructura del frame en Gigabit Ethernet queda de forma similar al del estándar original (IEEE 802.3), se requieren modificaciones en la subcapa MAC. La razón de lo anterior es que como se incrementa la velocidad de transmisión la distancia máxima entre las estaciones debe ser

reducida, de tal forma que todas las estaciones sobre el medio compartido puedan detectar colisiones exitosamente. Esto significa que si la distancia entre las estaciones está limitada a una distancia de 2000 m para 10 Mbps (Ethernet) y a 200 m para Fast Ethernet, entonces el diámetro de una red Gigabit Ethernet podría ser solo de 20 m, lo cual no es particularmente útil. Así, la primera modificación para el estándar fue ampliar el tamaño de frame mínimo, esto permite que la transmisión del frame a la estación remota llegue a ser completado, permitiendo llegar a sentir una colisión y con ello ampliar la distancia entre estaciones conectadas. Por consiguiente, el frame mínimo fue extendido a 512 bytes (4096 bits) en Gigabit Ethernet. Los frames menores a este mínimo deberán de ser incrementados por un proceso llamado “carrier extension”, que consiste en agregar un conjunto de símbolos al final de un frame, como se muestra en la figura 1.7.

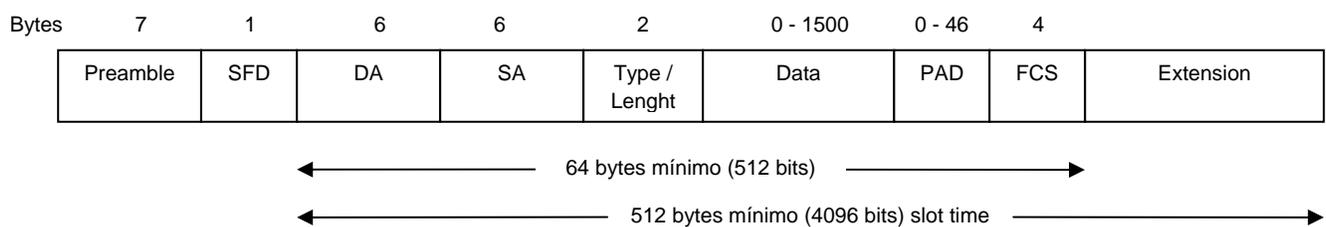


Figura 1.7 Formato de frame para la tecnología Gigabit Ethernet

El carrier extension es demasiado ineficiente en el canal para la transmisión de los frames, que son menores a 512 bytes, para ello se agrega otra característica adicional conocido como frame bursting; que también ha sido incorporado dentro del esquema de CSMA/CD usado en Gigabit Ethernet. El frame bursting permite a las estaciones que van a transmitir enviar un número de frames cortos, de tal forma que todo el ancho de banda disponible este siendo usado. Cuando una estación tiene un número de paquetes para transmitir, el primer paquete es enviado usando la carrier extensión, si es necesario. Los subsecuentes paquetes son transmitidos uno detrás de otro (en ráfagas), con el “Inter-frame gap” (IFG, 96 bits) hasta un máximo de 65 536 bit times. Esta técnica, como se muestra en la figura 1.8, incrementa sustancialmente la eficiencia del canal y permite a los usuarios explotar totalmente la velocidad nativa de Gigabit Ethernet.

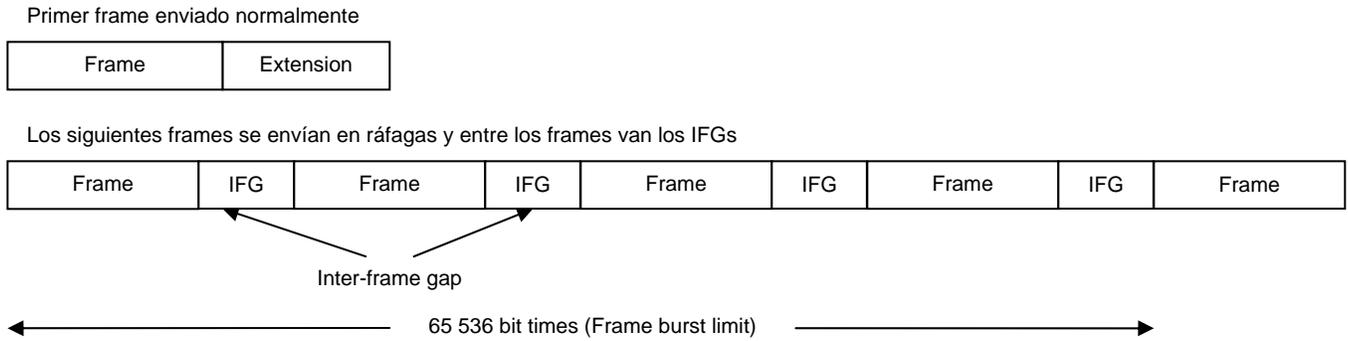


Figura 1.8 Formato de frame bursting, utilizado para la eficiencia del canal de transmisión

Con las características antes mencionadas, el “carrier extension” y el “frame bursting”, y además con la ayuda de formulas que utilizaremos a continuación podemos verificar eficiencia del canal para Gigabit Ethernet en el peor de los casos. Con la ecuación 1.1 comprobaremos que tan eficiente es el canal solo con la parte de carrier extension:

$$S = \frac{L_p}{\max[L_{slot}] + I + L_{preamble}} \quad (1.1)$$

Donde L_p es la longitud mínima del frame, el cual es de 64 bytes (512 bits). El término $\max [L_{slot}]$ es el tamaño máximo de la longitud del frame mínimo en Gigabit Ethernet, que son 512 bytes (4096 bits). La parte de I es el Inter-frame gap, de 96 bits y por último $L_{preamble}$ es la longitud del preámbulo correspondiente a 64 bits. Sustituyendo valores en la ecuación 1.1 tenemos que en el peor de los casos la eficiencia del canal es la siguiente:

$$S = \frac{512}{4096 + 96 + 64} = 12\% \quad (1.2)$$

El resultado anterior no es particularmente eficiente; ahora bien, cuando el frame bursting es agregado la eficiencia del canal es calculado por la ecuación 1.3, como se muestra a continuación:

$$S = \frac{(n+1)L_p}{\max[L_{slot}] + n(L_p + I + L_{preamble})} \quad (1.3)$$

Donde n es el número de frames consecutivos que son transmitidos en el primer burst después del primer frame con la parte de carrier extension, si es que lo necesita. Ahora si el burst timer es fijado para transmitir una longitud máxima, $L_{timer} = 65\,536$ bits, entonces el número de frames que pueden ser transmitidos dentro del burst es calculado con la ecuación 1.4, como se muestra a continuación:

$$S = \frac{L_{timer} - L_{slot}}{L_p + I + L_{preamble}} = \frac{65536 - 4096}{512 + 96 + 64} = 92 \quad (1.4)$$

Entonces de la ecuación 1.3 puede calcular la eficiencia del canal en el peor de los casos, y que es la siguiente:

$$S = \frac{(92+1) \times 512}{4096 + 92(512 + 96 + 64)} = 72\% \quad (1.5)$$

Sin embargo, aún con los cambios de carrier extension y frame bursting, el mecanismo de control de acceso al medio (CSMA/CD) ha alcanzado su límite operacional para las distancias limitadas de cerca de los 200 m. Como resultado de esto, y conjuntamente con el desarrollo del estándar de Gigabit Ethernet, los proveedores de equipo en Telecomunicaciones empezaron a aplicar esquemas de switching para incrementar significativamente las capacidades de distancias. Un switch LAN puede proveer el modo de operación en full duplex dedicado, por lo tanto las características de carrier extension y frame bursting ya no son necesarias y también por consiguiente CSMA/CD tampoco se usa.

Las opciones en los medios de transmisión de capa física en Gigabit Ethernet son los siguientes, y también se muestran en la tabla 1.3:

Parámetros	IEEE 802.3ab	IEEE 802.3z		
	1000Base-TX	1000Base-LX	1000Base-SX	10Base-CX
Velocidad	1 Gbps			
Medio de transmisión	4 pares UTP cat 5	2 pares de fibra monomodo/ multimodo (1310nm)	2 pares de fibra multimodo (850 nm)	2 pares de alambre de cobre STP
Tipo de conector	RJ-45	SC duplex (Subscriber conector)	SC duplex (Subscriber conector)	Conector HSSDC
Tipo de transmisión	Banda base PAM-5	Banda base 8B/10B	Banda base 8B/10B	Banda base 8B/10B
Modo de transmisión	Half duplex (HD) Full duplex (FD)			
Longitud máxima de segmento	100 m	550m / 5km	275m / 550m	25 m

Tabla 1.3 Tipos de medio físico y sus características que son utilizados en Gigabit Ethernet

- ❖ **1000Base-LX.-** Soporta fibra óptica usando una longitud de onda de 1310 nm. Para backbone con alcance corto la máxima longitud es de 550 m, usando fibra multimodo de 62.5 μm . Para backbone tipo campus con alcance largo puede llegar a distancias de 5 km en fibras monomodo.

- ❖ **1000Base-SX.-** Es usado para backbone de alcance corto a una longitud de onda de 850 nm. La longitud del enlace puede llegar a ser de 275 m en fibra multimodo de 62.5 μm y de hasta 550 m con fibra multimodo de 50 μm .

- ❖ **1000Base-CX.-** Soporta enlaces cortos entre dispositivos (en un site de comunicaciones o en equipos instalados en rack). Los cables utilizados son alambre de cobre STP, con una longitud máxima de 25 m.

- ❖ **1000Base-TX.-** Especifica características en cables de un gabinete a un nodo de red usando los cuatro pares de cable UTP cat 5 o 5E; la máxima longitud del cable son 100m.

1.5. 10 Gigabit Ethernet

La especificación más reciente de la familia Ethernet es la de 10 Gigabit Ethernet (10GbE), para ello en 1999 se creó la Task Force, llamando al nuevo estándar IEEE 802.3ae; el cual fue concluido en el 2002. La estructura global del estándar es substancialmente la misma que la de su antecesor, Gigabit Ethernet, los cambios son implementados para cubrir las especificaciones de la alta velocidad de transmisión. El estándar de 10 GbE cumple con los objetivos que fueron planteados de inicio por la Task Force y que son los siguientes [12]:

- a) Soportar el modo de operación de full dúplex
- b) Proveer la tasa de transmisión de datos de 10 Gbps en la subcapa XGMII (10 Gigabit Media Independent Interface).

- c) Soportar la tasa de transmisión de 10 Gbps en la subcapa PMD (Physical Medium Dependent) LAN y en la subcapa PDM WAN operando en SONET (Synchronous Optical Network) STS-192c/SDH (Synchronous Digital Hierarchy) VC-4-64c.
- d) Soportar cable de fibra óptica conforme a la ISO/IEC 11801:1995.
- e) Permitir para una red extenderse a una longitud de 40 km.
- f) Soportar la transmisión de 10 Gbps sobre cable twinaxial para site de comunicaciones y aplicaciones en centros de datos.
- g) Soportar un BER (Bit Error Rate) de 10^{-12} .

Aunque el estándar fue especificado en un inicio solo en fibra óptica, como medio de transmisión, actualmente ya se están realizando especificaciones para alambre de cobre, como son: IEEE 802.3an (10GBase-T) par trenzado e IEEE 802.3ak (10GBase-CX4) cable coaxial. Así, en esta sección solo se describirá el estándar de la IEEE 802.3ae, debido a que este estándar se está tomando como base en la propuesta de 100 GbE. La definición de arquitectura de 10 Gigabit Ethernet parte de dos propuestas de solución en la capa PHY; las cuales son: la implementación serial y la implementación en paralelo. Estas soluciones tienen sus ventajas y desventajas de implementación y serán discutidas a continuación.

La solución serial, como se muestra en la figura 1.9, utiliza un solo canal de transmisión a 10 Gbps y está compuesto por un bloque conformado por las subcapas PCS/PMA/PMD. Para la transmisión de información la Reconciliation Sublayer deja pasar los bits que llegan de la subcapa de datos MAC, posteriormente byte por byte pasa la información a través del bus XGMII hacia la subcapa PCS. En la subcapa PCS se codifican los bytes con una técnica de codificación predefinida y los bytes codificados pasan a la subcapa PMA. Esta subcapa realiza la “serialización” de los bytes codificados y los pasa como flujo de datos a la subcapa PMD. La subcapa PMD transmite el flujo de datos sobre la fibra a una tasa de transmisión de 10 Gbps, para la recepción del flujo de datos en el receptor el proceso es inverso.

El principal atributo de la arquitectura serial es su simplicidad, la operación de transmisión y de recepción; que son en ambos casos sencillas. No se requiere de un complicado módulo de multiplexaje/demultiplexaje como se verá más adelante en la arquitectura en paralelo. Además, en esta arquitectura solo se requiere de un canal en fibra óptica y un láser, por lo que el costo de implementación es mínimo. Sin embargo, la desventaja es la necesidad de una tecnología de circuitos lógicos de alta velocidad [13].

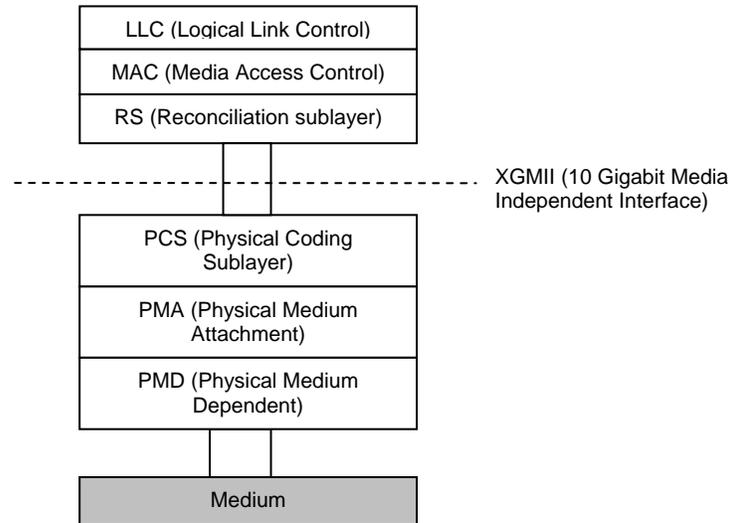


Figura 1.9 Arquitectura serial de capa PHY para 10 Gigabit Ethernet

La arquitectura en paralelo, como se muestra en la figura 1.10, tiene múltiples canales físicos; es decir, usa bloques de circuitos compuestos por subcapas de PCS/PMA/PMD, y cada bloque opera a velocidades bajas. Para la transmisión de información se necesita de un “distribuidor” que haga la función de multiplexaje de los bits que llegan de la subcapa MAC, y que posteriormente se convierten en un flujo de datos. Usando un esquema de Round Robin, el flujo de datos pasa a cada bloque o subcanal que será transmitido a su vez a la subcapa PCS. Para cada subcapa PCS se codifica el flujo de datos recibido y posteriormente se transmite a la subcapa PMA para la “serialización”. Después de esta fase, cada subcapa PMD transmite flujo de datos serializados a una velocidad de bit fraccionada, esta velocidad es determinada por el nivel de paralelismo que este siendo usado. Para la recepción del flujo de datos en el receptor el proceso es inverso.

La principal ventaja de la implementación en paralelo es que la velocidad de operación en las subcapas PCS/PMA es menor; además esta arquitectura utiliza una tecnología CMOS lo cual hace que los dispositivos empleados sean baratos. La desventaja es que necesita de un módulo “distribuidor/colector”, también el uso de múltiples conjuntos de circuitos lógicos y los transmisores láseres. Hay dos técnicas que se utilizan para lograr los múltiples canales: uno es a través de cable paralelo y el otro de la tecnología WDM (Wavelength Division Multiplexing). Sin embargo, la solución de cable paralelo no es aplicable para la infraestructura existente. En contraste, la solución WDM puede ser usada sobre el cable existente pero es necesaria la utilización de equipo óptico, lo que provoca que se eleven los costos de esta solución [14].

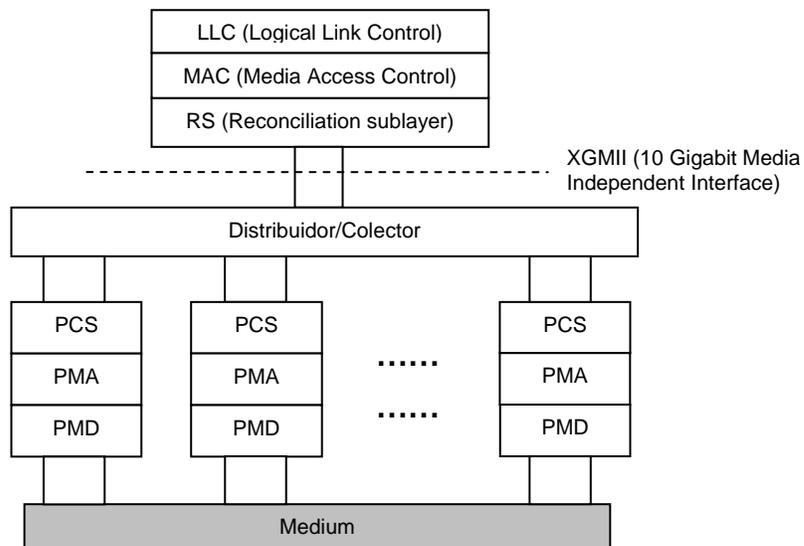


Figura 1.10 Arquitectura en paralelo de capa PHY para 10 Gigabit Ethernet

La IEEE 802.3ae también define dos tipos de capa PHY, uno en redes LANs (LAN PHY), y otro en redes WANs (WAN PHY). La LAN PHY se utiliza principalmente en aplicaciones nativas de Ethernet; a su vez hay dos tipos de LAN PHY:

- WWDW (Wide Wavelength Division Multiplex) LAN PHY: esta tecnología basa su codificación de datos de la subcapa PCS en un código de 8B/10B sobre cuatro canales o también llamados “Lanes”. Cada Lane tiene una velocidad de operación a 2.5 Gbps, con una velocidad de línea codificada de 3.125 Gbps. Esta LAN PHY utiliza una arquitectura en paralelo.
- Serial LAN PHY: inicialmente parecía ser viable utilizar el código 8B/10B, usado en Gigabit Ethernet para 10 GbE. Sin embargo, el grupo de estudio se dio cuenta que la velocidad resultante de 12.5 Gbps sería una técnica con un elevado costo, así como también de implementación. Por lo que decidió emplear un código más eficiente, como es el 64B/66B, el cual reduce la velocidad de bauds serial a 10.3125 Gbps.

Respecto a WAN PHY es utilizado en conexiones a 10 Gbps sobre SONET/SDH, y solo hay un tipo:

- Serial WAN PHY: esta tecnología agrega una subcapa adicional llamada WAN Interface Sublayer (WIS), requerida entre las subcapas PCS y PMA. La capa WIS realiza un proceso de “acoplamiento” de los bits a un frame, esto bits son los que llegan de la subcapa PCS. El frame es el utilizado para redes SONET/SDN y su velocidad de transmisión es de 9.95328

Gbps [15]. La figura 1.11 muestra las arquitecturas empleadas para el estándar de 10 GbE, así como los tipos de capa PHY en LAN y WAN.

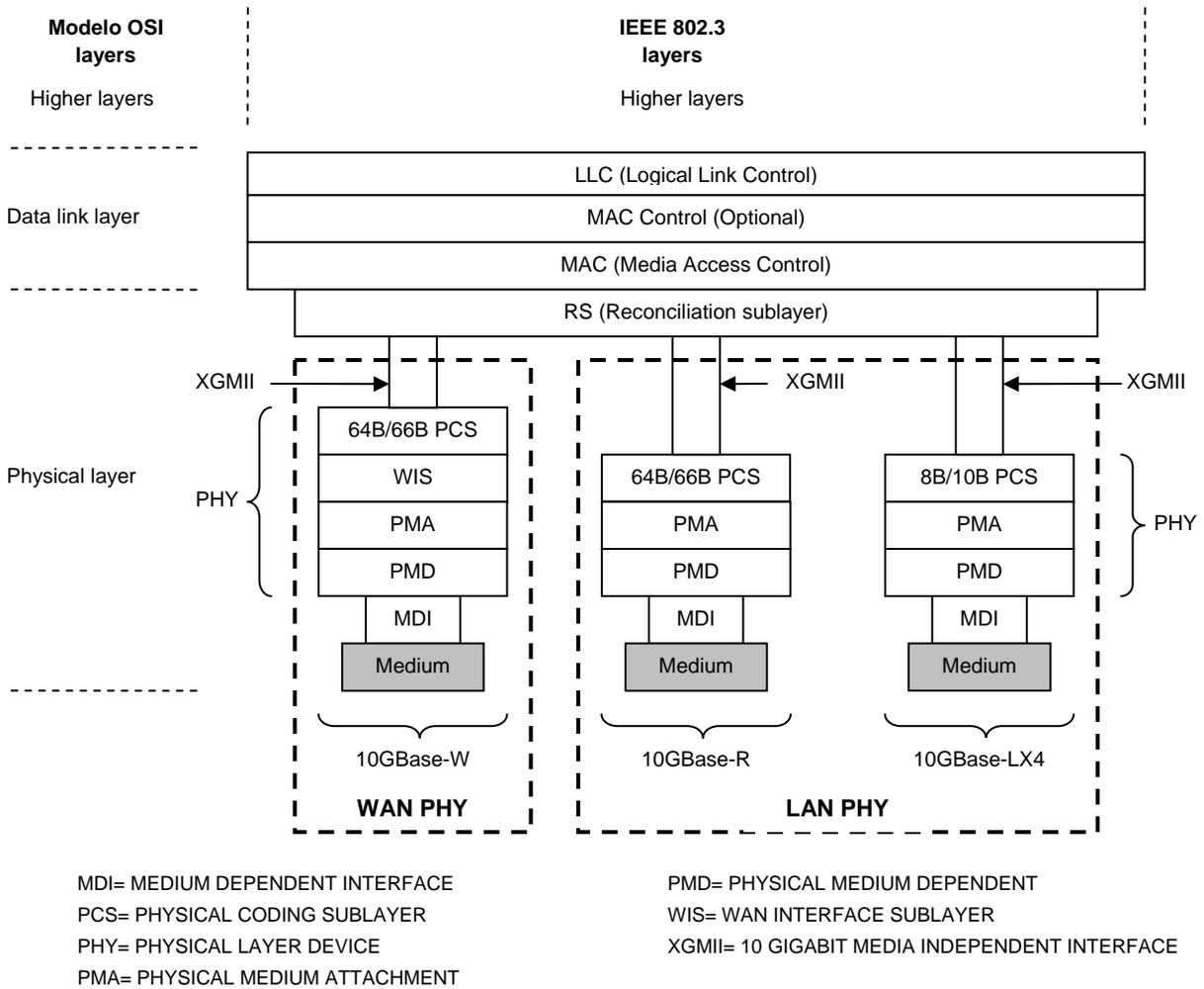


Figura 1.11 Arquitecturas utilizadas para LAN PHY y WAN PHY en 10 Gigabit Ethernet

La subcapa RS realiza la siguiente función: el flujo de datos seriales que proviene de la capa MAC lo genera a un flujo de datos en paralelo, para posteriormente pasarlo al bus XGMII. En esta subcapa se generan caracteres de control o datos sobre la transmisión, a su vez también espera caracteres de control o datos en la recepción. Entre la subcapa MAC y la PCS está el bus XGMII, que provee el modo de operación full dúplex a una velocidad de transmisión de 10 Gbps. Este bus tiene un direccionamiento de datos de 32 bits, con un ancho de banda de 74 bits, que va de la subcapa MAC a la subcapa PCS y viceversa; también el bus proporciona bits de control y señales de reloj. El bus tiene una distancia corta de 7 cm, por esta razón las aplicaciones en circuitos chip-to-chip, board-to-

board y en módulo chip-to-board no son prácticas para esta interfaz. Por consecuencia, el bus XGMII tiene limitaciones sobre el número de puertos que se puede implementar en un sistema de tarjetas como puede ser un switch.

Para superar las limitaciones antes mencionadas la Task Force propuso el desarrollo de una interface llamada XAUI (10 Gigabit Attachment Unit Interface), mostrada en la figura 1.12. La interface XAUI opera en modo full dúplex y utiliza cuatro enlaces diferenciales self-clocked para alcanzar la velocidad de transmisión a 10 Gbps. Cada enlace opera a tasa de transmisión de 3.125 Gbps y utiliza una codificación de 8B/10B. La naturaleza misma de los enlaces self-clocked elimina la oblicuidad entre los bits de datos y la señal de reloj, lo que pasaba en el bus XGMII. El agregar la interface XAUI a la arquitectura de 10 GbE hace posible se amplíe el alcance, aproximadamente 50 cm, y mayor funcionalidad en el bus XGMII. Otra característica adicional de la tecnología XAUI es la baja interferencia electromagnética. La conversión de bit entre las interfaces de XGMII y la XAUI ocurre en la subcapa XGXS (XAUI Extender Sublayer) [16].

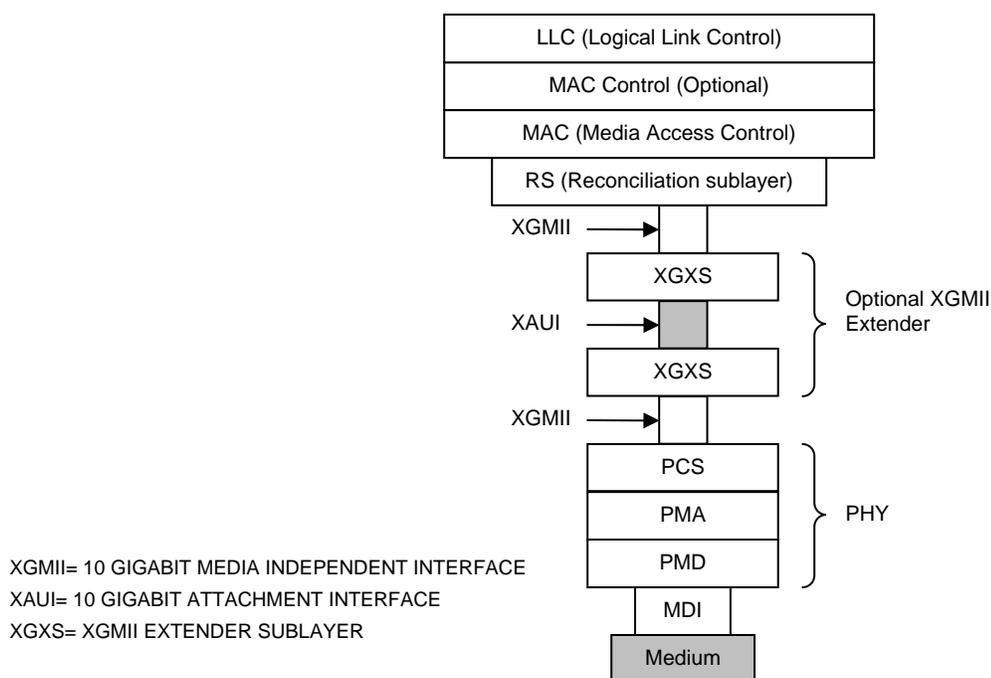


Figura 1.12 Integración de las capas XGMII, XAUI y XGXS en la arquitectura de 10 GbE

En la subcapa PCS se proponen dos tipos de codificación: un código de 64B/66B utilizado para las tecnologías 10GBase-R y 10GBase-W. Este código consiste en bloques de 8 bytes (64 bits) y además le son agregados 2 bits más como preámbulo, estos 2 bits pueden ser “01” para indicar que

el bloque es de datos y “10” para indicar que el bloque es de control. El otro tipo de codificación es el 8B/10B utilizado para la tecnología 10GBase-LX4, este código se emplea en el estándar de 1000Base-X [17]. La subcapa PMA desempeña la función de serialización/deserialización de los bloques de código para su transmisión/recepción en la capa subyacente. En esta subcapa también se realiza la sincronización de los bits para una adecuada decodificación de los datos.

Adicionalmente en la solución serial, específicamente para 10GBase-R y 10GBase-W, se incluye en el estándar una característica adicional llamada 10 Gigabit Sixteen Bit Interface (XSBI). Esta característica realiza las siguientes funciones: proporciona una señal de reloj en la transmisión/recepción a la subcapa PMA, también la serialización/deserialización del flujo de bits serial a un flujo en paralelo de 16 bits de datos, y la transmisión de este flujo de datos en paralelo a la subcapa PMA. Aunque XSBI es una interface opcional, se utiliza ampliamente como una base en la arquitectura serial del estándar de 10 GbE [18], como se muestra en figura 1.13.

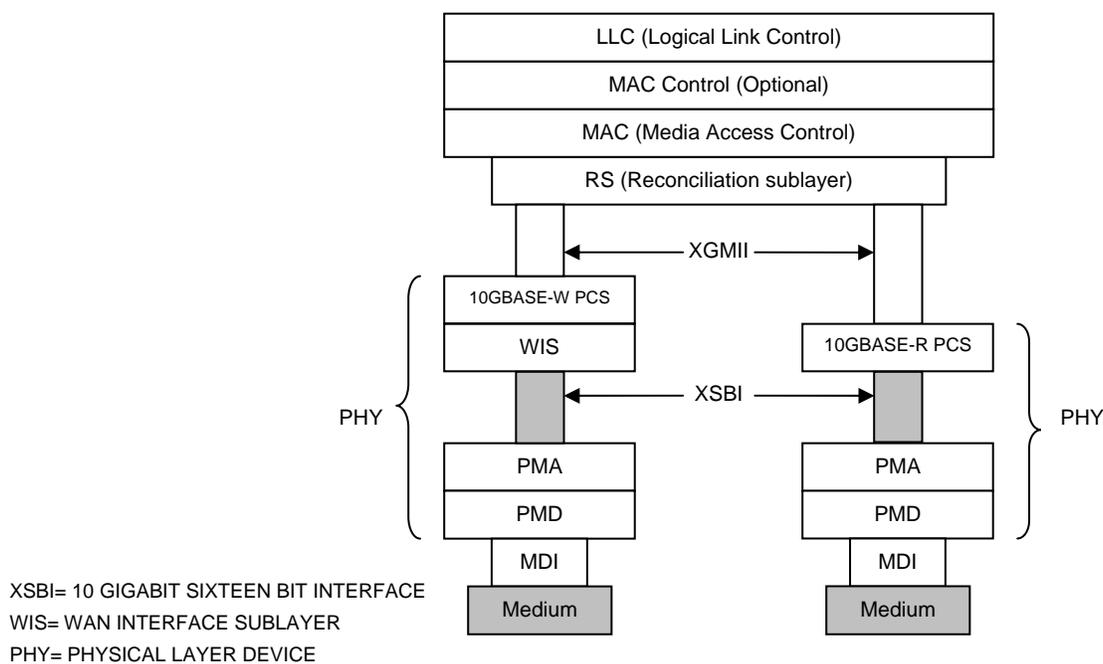


Figura 1.13 Integración de la interface XSBI en la arquitectura serial en el estándar de 10 GbE

En relación a la subcapa PMD y en vista de las aplicaciones de 10 Gigabit Ethernet, la Task Force de la IEEE 802.3ae ha especificado los siguiente PMDs en la arquitectura serial. La cual utiliza como medio de transmisión la fibra óptica, para alcanzar grandes distancias:

- ❖ Un PMD con longitud de onda de 1550 nm, para alcanzar la distancia de 40 km en SMF.

- ❖ Un PMD con longitud de onda de 1310 nm, para alcanzar distancias de 2 km a 10 km en SMF.
- ❖ Un PMD con longitud de onda de 850 nm, para alcanzar distancias de 65 m a 300 m en MMF.

Adicionalmente, la Task Force propuso dos PMDs más para la arquitectura en paralelo (WWDW LAN PHY), y son las siguientes:

- ❖ Un PMD con longitud de onda de 1310 nm, para distancia de 10 km en SMF.
- ❖ Un PMD con longitud de 1310 nm, para distancia de 300 m en MMF [19].

En la tabla 1.4 resume algunas características de los tipos de PMDs, como son: la longitud de onda, el tipo de fibra, el tipo de láser utilizado, nombre propuesto la Task Force, así como la máxima distancia alcanzada [20].

PHY	Longitud de onda	Tipo de Fibra	Tipo de Laser	Nombre	Máxima distancia
LAN	1310 nm WWDW	MMF	Directly modulated DFB or VCSEL	10GBASE-LX4 (4-wave optical multiplexing)	10 km
	850 nm	MMF	Directly modulated VCSEL	10GBASE-SR (Short Range)	300 m
	1310 nm	MMF	Directly modulated DFB laser	10GBASE-LR (Long Range)	10 km
	1550 nm	SMF	Directly DFB laser	10GBASE-ER (Extended Range)	40 km
WAN	850 nm	MMF	Directly modulated VCSEL	10GBASE-SW	300 m
	1310 nm	SMF	Directly modulated DFB laser	10GBASE-LW	10 km
	1550 nm	SMF	Directly DFB laser	10GBASE-EW	40 km

Tabla 1.4 Características de los tipos de PMDs que fueron seleccionados por la Task Force, para el estándar de la IEEE 802.3ae

Por último, después de la pila de subcapas que conforman la capa PHY se tiene la interface MDI, que se refiere a un conector físico. Los tipos de conectores se definen dependiendo al medio físico de transmisión y al dispositivo de la subcapa PMD.

La capa MAC de 10 Gigabit Ethernet en redes WAN usa un mecanismo llamado de “pacing”, para la adaptación de la velocidad y controles de flujo. El mecanismo de “pacing” permite a la capa MAC

poder transmitir velocidades, por ejemplo, de 1 Gbps o 10 Gbps sobre redes LAN; así como también la tasa de transmisión de 9.953 Gbps a través de redes WAN. Para alcanzar esta característica, la capa MAC tiene la habilidad de pausar la transmisión de datos para un periodo de tiempo especificado, y con ello proveer un control de flujo o una velocidad de adaptación. Hay dos técnicas para el mecanismo de “pacing”: la primera utiliza un mecanismo de retención llamado word-by-word y la segunda una técnica de extensión llamado Inter-Frame Gap (IFG). En la primera técnica la capa MAC hace pausas para enviar 32 bits de datos (un word), en un periodo pre-especificado de tiempo a petición de la capa física. En la segunda técnica la capa MAC envía el IFG extendido, en un periodo de tiempo predefinido con o sin una petición de la capa física. La principal desventaja de IFG es que requiere un buffer grande para los datos, por el algoritmo de operación. La técnica de word-by-word es la más aceptada, esto se debe a su principal ventaja y es la de soportar cualquiera de las técnicas de codificación. Adicionalmente, no es necesario un buffer grande para los datos en la manipulación de los múltiples frames de la capa MAC; por lo tanto el tamaño del buffer es independiente de la velocidad del enlace.

Básicamente en el estándar Ethernet hay dos modos de operación, half dúplex y full dúplex. El modo half dúplex ha sido definido desde la versión original de Ethernet, en este modo se utiliza el método de acceso CSMA/CD, como un medio compartido. Su principal desventaja de este modo de operación es que no es tan eficiente y además de su limitación en distancias grandes; esta distancia es también limitada por el tamaño mínimo del frame. Para la tasa de transmisión de 10 Gbps el modo de operación half duplex no es atractivo en el mercado de las Telecomunicaciones, ya que en muchos de los enlaces las conexiones punto a punto son de fibra óptica. Así, la mejor opción es el modo de operación full duplex, en la que no hay contención. Además, la distancia del enlace esta limitada por las características físicas del medio de transmisión, los dispositivos, el presupuesto de potencia y la modulación [21].

El propósito clave en el desarrollo del estándar 10 Gigabit Ethernet fue usar el mismo formato de frame en capa MAC, como sus predecesores, esto permite la integración de 10 Gigabit Ethernet con las redes Ethernet existentes. Con el modo de operación full duplex, la distancia entre los enlaces no modifica el tamaño del frame mínimo, que es igual a 64 bytes, como esta especificado en las anteriores versiones de Ethernet. Además, el proceso de carrier extension en el formato del frame ya no es necesario. La figura 1.14 muestra un resumen de las características de 10 Gigabit Ethernet.

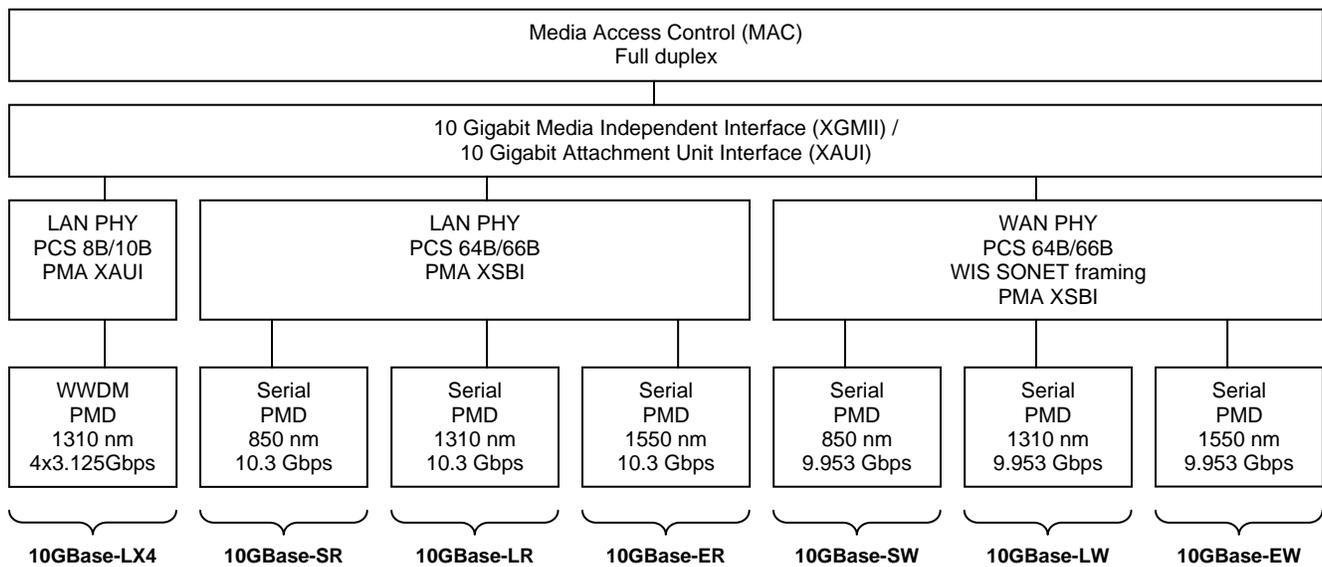


Figura 1.14 Resumen de características generales de 10 Gigabit Ethernet

Hay dos conceptos importantes relacionados con el rendimiento de 10 GbE y son: frame rate y throughput. El frame rate es un simple cálculo aritmético basado sobre la velocidad del bit y el formato del frame. El throughput, definido en la IETF RFC 1242, es la velocidad más alta en la cual el sistema bajo pruebas puede reenviar la carga ofrecida sin pérdidas. La velocidad del bit a la cual opera 10 GbE en la capa MAC, 10 billones de bits por segundo, es solo uno de los parámetros en definir la velocidad de transmisión para esta tecnología. La descripción habitual del rendimiento de red verdadero es el frame rate, el cual indica cuantos frames Ethernet son movidos a través de la red. El máximo frame rate para 10 GbE es determinado por una fórmula que divide los 10 billones de bits por segundo entre el preamble, longitud del frame y el campo del IFG, expresados en bits; como se muestra en la ecuación 1.6.

$$\text{MáximoFrameRate} = \frac{\text{MACTransmitBitRate}}{(\text{Preamble} + \text{FrameLength} + \text{IFG})} \quad (1.6)$$

El máximo frame rate es calculado usando los valores mínimos de los siguientes parámetros, tal y como se describe en el estándar IEEE 802.3ae [22]:

- Preamble 8 bytes = 64 bits

- Longitud del frame mínimo 64 bytes = 512 bits
- Inter-frame gap 12 bytes = 96 bits

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 1.6, tenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{MáximoFrameRate} &= \frac{\text{MACTransmitBitRate}}{(\text{Preamble} + \text{FrameLength} + \text{IFG})} \\ &= 10,000,000,000 / (64 + 512 + 96) \\ &= 10,000,000,000 / 672 \\ &= 14,880,952.38 \text{ frame por segundo (fps)}^* \end{aligned}$$

* Máximo frame rate teórico.

2. Planeación del Proyecto

2.1. Proyecto hacia la estandarización

La tecnología Ethernet ha tenido un largo camino desde que Robert Metcalfe de Xerox PARC inventó el sistema en 1973; entonces era simplemente otro estándar de red entre muchos, y pocos pensaron que derrotaría a los estándares ya establecidos en ese momento, como el Token Ring de IBM. Metcalfe promovió la tecnología Ethernet como un nuevo estándar, saltando de velocidades de 3 Mbps a 10 Mbps, que se consideraba rápido en aquel momento [23]. Ethernet ha evolucionado varias veces multiplicando su velocidad por múltiplos de diez; así de los 10 Mbps (Ethernet) del estándar original pasó a los 100 Mbps (Fast Ethernet), posteriormente a 1 Gbps (Gigabit Ethernet o 1 GbE) y por último a los 10 Gbps (10 Gigabit Ethernet o 10 GbE). El 10 GbE es el estándar de Ethernet (IEEE 802.3ae) de mayor velocidad actualmente. La figura 2.1 muestra la evolución que ha tenido la tecnología Ethernet en sus 30 años de existencia [24].

En julio del 2006, un grupo de más de cincuenta empresas (Cisco, Google, Hewlett Packet, Nortel, etc.) decidieron unirse para fomentar la creación de un grupo de estudio llamado Higher Speed Study Group (HSSG) dentro del Instituto de estandarización de la IEEE 802.3; el propósito del grupo de estudio es definir un estándar más allá de 10 Gbps. El enfoque inicial del grupo HSSG, es determinar los requerimientos de ancho de banda en la interconexión del core, aplicaciones en centro de datos, intercambio de Internet y con proveedores de servicio. Los cuales están siendo administrados más allá de sus capacidades existentes en aplicaciones que demandan más ancho de banda, tales como video en demanda, investigación y desarrollo, computación de alto desempeño, virtualización de servidores, etc.

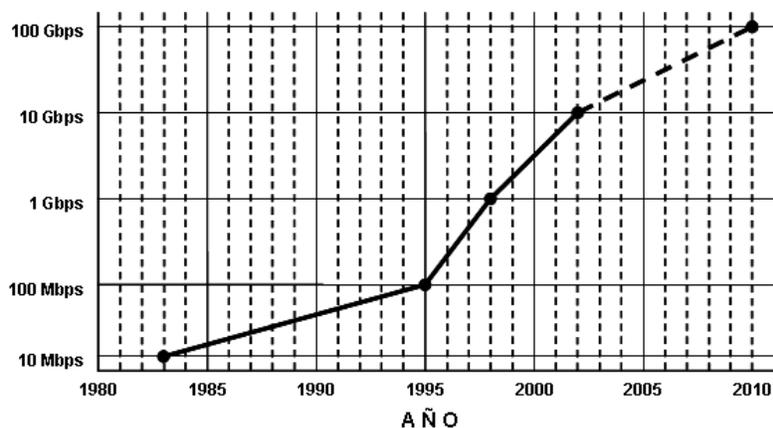


Figura 2.1 Desarrollo histórico de la tecnología Ethernet a través de los años

Al principio del proyecto había múltiples propuestas de velocidades en la creación del estándar, las cuales eran de 40, 80, 100 y 120 Gbps, finalmente fueron reducidas a sólo dos velocidades; por lo que el grupo HSSG decidió que el nuevo estándar de Ethernet tenga velocidades de 40 Gbps y 100 Gbps. Inicialmente en la definición del estándar había dos grupos que querían estándares diferentes: miembros que estaban interesados en aplicaciones de servidor-switch con velocidades a 40 Gbps. Mientras que otros miembros estuvieron más interesados en el desarrollo de una columna vertebral de red más robusta, favoreciendo una velocidad de 100 Gbps. Originalmente, el grupo HSSG previó pasar directamente a un estándar de 100 GbE, pero la industria de las telecomunicaciones basándose en los requerimientos de los clientes aconsejó al grupo HSSG disponer de dos velocidades, 40 Gbps y 100 Gbps. La razón de lo anterior fue el argumento de que “diferentes áreas de aplicaciones crecen de forma diferente” [25].

2.1.1. Objetivos

El grupo HSSG juntó a expertos de la industria que analizaron las tendencias y determinaron el alcance del proyecto, para especificar las velocidades de transmisión del nuevo estándar Ethernet. La meta fue tratar de determinar qué velocidades en el mercado se requieren para los siguientes años. En julio del 2007 el grupo HSSG votó para aprobar los siguientes objetivos y desarrollar el estándar Ethernet para 40 GbE y 100 GbE [26]:

- Soportar solo el modo de operación full-duplex.
- Mantener el formato de frame Ethernet 802.3 utilizando en la capa MAC (Media Access Control).
- Mantener el mínimo y máximo de tamaño de frame del estándar IEEE 802.3
- Fijar un Bit Error Rate (BER) mejor o igual a 10^{-12} en la interfase del servicio de las capas MAC/PLS (Media Access Control/Physical Layer Signaling).
- Proporcionar un medio de apoyo para OTN (Optical Transport Network).
- Soportar una velocidad de datos en capa MAC de 40 Gbps.
- Proporcionar especificaciones de capa física la cual soporte transferencias de 40 Gbps sobre:
 - Por lo menos a 100 m en OM3 MMF
 - Por lo menos a 10 m en cobre
 - Por lo menos a 1 m en el Blackplane
- Soportar una velocidad de datos en capa MAC de 100 Gbps.
- Proporcionar especificaciones de capa física la cual soporte transferencias de 100 Gbps sobre:
 - Por lo menos a 40 km en SMF
 - Por lo menos a 10 km en SMF
 - Por lo menos a 100 m en OM3 MMF
 - Por lo menos a 10 m en cobre.

2.1.2. PAR y Task Force

El grupo HSSG ha aprobado un Project Authorization Request (PAR) para el nuevo estándar, llamado IEEE 802.3ba, que promoverá Ethernet a velocidades de 40Gbps y 100 Gbps. Con la realización del proceso de aprobación del PAR el grupo HSSG concluyó con su participación, y en enero del 2008 se forma la Task Force para el estándar de la IEEE 802.3ba. El PAR contiene elementos claves en el proyecto de estandarización [27], y son los siguientes:

1. El proyecto es una enmienda del estándar de la IEEE 802.3
 - a. Título: Estándar de la IEEE para tecnologías de la Información-Sistemas de Intercambio de Información y Telecomunicaciones-Redes de Área Local y

Metropolitanas-Método de Acceso: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) y especificaciones de capa física.

b. Fecha de cumplimiento del proyecto: Mayo 2010.

2. Alcance: Definir los parámetros en capa MAC, especificaciones de capa física y parámetros de administración para la transferencia de los frames con el formato 802.3 a 40 Gbps y 100 Gbps.
3. Propósito: El propósito de este proyecto es ampliar el estándar de la IEEE 802.3 a velocidades de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps, para brindar un incremento significativo de ancho de banda, mientras se mantiene la máxima compatibilidad con la base instalada de interfaces de 10 GbE. El proyecto es proporcionar la interconexión de equipos satisfaciendo requerimientos de distancia y de las aplicaciones.
4. Necesidad: El proyecto es necesario porque brindará una solución para aplicaciones que necesitan más ancho de banda, los cuales superan las capacidades existentes. Estas aplicaciones se incluyen dentro de los centros de datos, intercambio de Internet, computación de alto desempeño, entrega de video en demanda, etc.

En este proceso de estandarización de 40 GbE y 100 GbE se creó una línea de tiempo, en la cual se contempla la evolución del proyecto, desde la formación del grupo HSSG hasta la terminación del estándar, pasando por la creación del PAR y la Task Force. Así como con las revisiones y votaciones que se realizarán durante los próximos años, y que concluirá con la aprobación del estándar a principios del año 2010, esto se despliega gráficamente en la figura 2.2.

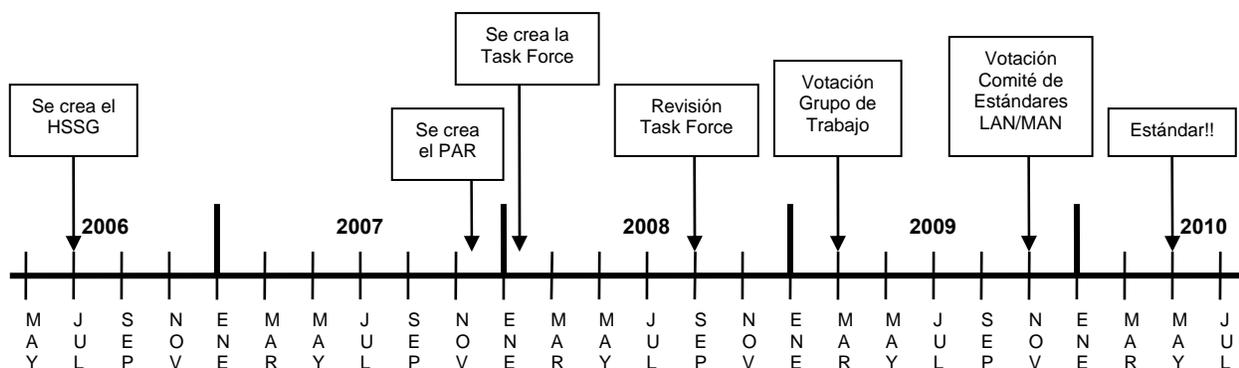


Figura 2.2 Línea de tiempo de la IEEE 802.3 para la estandarización de 40 GbE y 100 GbE

2.2. Justificación de 40 GbE y 100 GbE

En la última década se ha observado un continuo crecimiento de tráfico de datos en proveedores de redes. Según IDC (International Data Corporation), la cantidad de información creada, copiada y transmitida se incrementará anualmente, lo cual hace necesaria la creación de nuevos estándares de Ethernet con velocidades de transmisión más rápida. Así, mientras que la salida de datos de los servidores se duplica cada 24 meses, la cantidad de tráfico sobre las redes de los proveedores lo hace cada 18 meses [28], esto se despliega gráficamente en la figura 2.3.

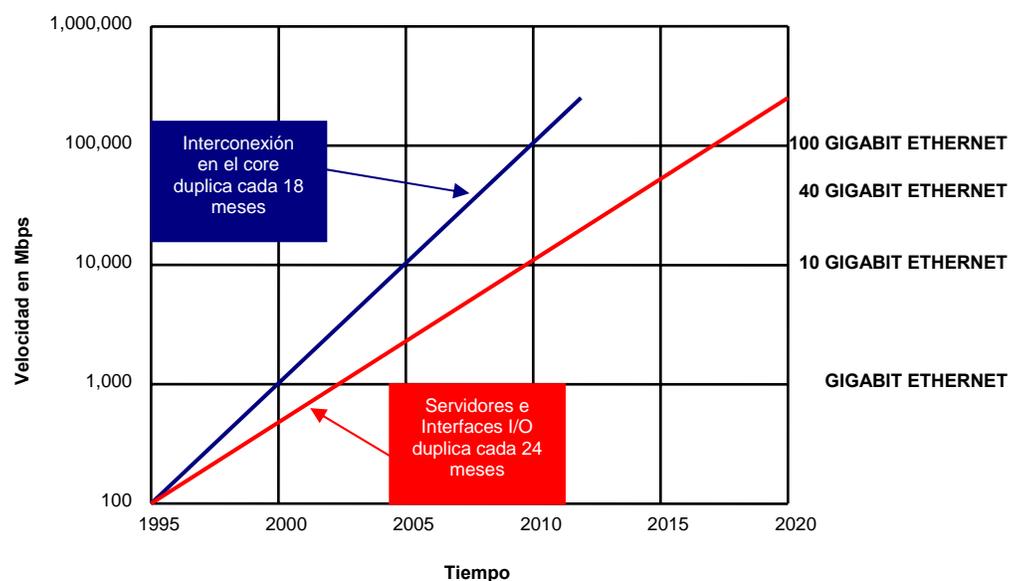


Figura 2.3 Predicción del crecimiento de datos en servidores y la interconexión en el core

El crecimiento de velocidad de transmisión de los datos en servidores se ha mantenido de forma lineal, en una escala logarítmica, desde los años noventa y se pronostica que siga creciendo a través de los años de igual forma. Esto es debido al desarrollo que está teniendo el cómputo en distintas aplicaciones y por tanto necesita mayores velocidades de transmisión, para lo cual se requiere que haya una velocidad de transmisión de 40 Gbps. Haciendo una proyección se prevé que mantenga ese crecimiento lineal (en una escala logarítmica) y llegar a los 100 Gbps después del 2015, en lo que se refiere a la salida de datos en servidores [29]. Con respecto a la interconexión en el core de la red, el crecimiento en velocidad sigue siendo lineal (en una escala logarítmica) pero en menor tiempo, en comparación a los datos en servidores. Esto se debe a que cada vez hay más aplicaciones que demandan más ancho de banda, por ello este crecimiento es más significativo, para

lo cual se necesitan velocidades de 100 Gbps, y se espera que en el 2010 esté disponible para su implementación.

2.2.1. Demanda y aplicaciones

La tecnología Ethernet se ha desenvuelto muy bien en las conexiones de computadoras y ha continuado expandiendo su huella, demostrando por si mismo que es un estándar de red fiable y valiosa. En suma, Ethernet continúa su expansión como una tecnología preferente para otras que se están consolidando, tales como las tecnologías inalámbricas de WiFi (Wireless-Fidelity) y WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), que brindan un puente de comunicación dentro de las redes Ethernet. A partir de esto la IEEE 802.3 propuso un modelo llamado “El Ecosistema Ethernet”, como se muestra en la figura 2.4, donde se plantea la unificación de redes y por tanto la implementación del nuevo estándar a este modelo.

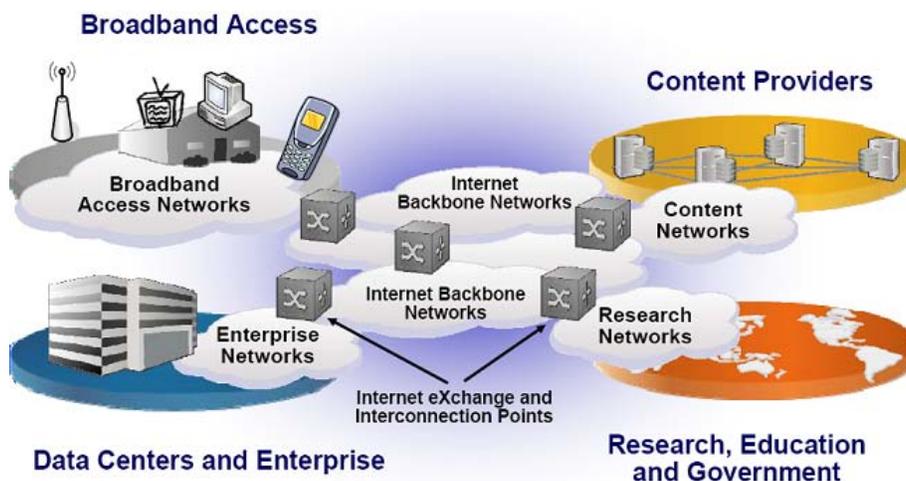


Figura 2.4 El ecosistema Ethernet muestra las redes propuestas en la implementación de la IEEE 802.3ba

El Ecosistema Ethernet engloba principalmente a cuatro tipos de redes, donde se están interconectando entre sí ya sea por la necesidad de comunicación y/o por el intercambio de información. Dentro de este Ecosistema están las Redes de Acceso a Banda Ancha, donde hay aplicaciones tales como Video en Demanda, Voz sobre IP, Televisión sobre IP, etc.; que tienen una tendencia de crecimiento en estos últimos años y los próximos será aún más. El hecho de la convergencia de algunas aplicaciones que son llevadas a nuestra casa para ser nuestra vida más

cómoda y entretenida, lo que se denomina como “casa digital”; aquí se utiliza el término llamado quadruple play (televisión/video, voz, internet y wireless). Y sobre todo, en lo referente a Televisión sobre IP la demanda de más ancho de banda es urgente, por la capacidad de alta definición, video en demanda, interactividad, etc. [30]

El siguiente tipo de red son las Empresariales y de Centros de Datos, donde el comercio electrónico, la distribución de contenido de entretenimiento, comunicaciones de Internet, etc. están aumentando el uso de los recursos de cómputo. Para reunir la demanda, los fabricantes están entregando tecnologías emergentes que incluyen procesamiento multi-core, virtualización en servidores y almacenamiento en red; los cuales contribuyen a un mejor desempeño, costo y eficiencia en potencia. Con la ya existente tecnología de 10 GbE, hay una creciente necesidad en enlaces de los switches de una mayor velocidad para el flujo de información [31].

El otro tipo de red previsto en el ecosistema es la de los Proveedores de Contenido, quienes generan tráfico de información por sus aplicaciones que están ofertando como es Televisión sobre IP, servicios de video en demanda, almacenamiento remoto, servicios de VPN (Virtual Private Network), etc. y que crecen rápidamente. Este crecimiento es debido al número de usuarios de casa, empresariales, investigación, educación y gobierno que se están conectando a la red, y por consecuencia están demandando mayor ancho de banda. Sumado a lo anterior, el también desarrollo, crecimiento y disponibilidad de tecnologías de acceso a Internet, como son WiFi, WiMAX y servicios móviles 3G (3° Generación), hace más demandante un estándar con mucho mayor velocidad de transmisión.

Por último las redes de Investigación, Educación y Gobierno, que pueden considerarse de mayor productividad, por el tipo de aplicación que producen. Por ejemplo, en lo referente a la investigación y educación, se utilizan aplicaciones como son: videoconferencia, streaming, multicast, telemedicina, virtualización, etc., que requieren más ancho de banda para satisfacer la demanda de usuarios conectados. También con aplicaciones de investigación de redes corporativas universitarias, como es el CUDI (Corporación Universitaria para el Desarrollo de Internet), donde se maneja la conexión de Internet2, que es de uso exclusivo para la investigación, no es comercial. Este tipo de conexión ayuda al fortalecimiento de la educación por la interconexión con redes similares de Norteamérica, Centroamérica, Sudamérica y Europa. Algo similar ocurre con redes gubernamentales, donde se requiere mantener una infraestructura a la vanguardia de las telecomunicaciones y también por las aplicaciones que genera la propia milicia.

2.2.2. Puntos claves

Con la creciente demanda de usuarios, aplicaciones en los centros de datos, almacenamiento de contenido, etc., el grupo HSSG ha tenido que justificar el proyecto de un solo estándar para las dos velocidades de transmisión (40 y 100 Gbps), atendiendo a cinco criterios básicos:

- 1 Mercado potencial. Las exigencias de ancho de banda relacionadas con las aplicaciones que se ejecutan para cómputo y el core de la red están creciendo a diferentes velocidades, por lo cual exigen el desarrollo de transmisiones de datos de más alta velocidad. A continuación se explica lo referente a cómputo y la interconexión en el core de la red:
 - Servidores, computación de alto desempeño, redes SAN (Storage Area Network) y NAS (Network Attached Storage) están actualmente utilizando interfaces de 1 GbE y 10 GbE, con un significativo crecimiento en el 2007 y para el 2008. Las proyecciones de ancho de banda en las interfaces de In/Out, para las aplicaciones de servidores y de cómputo, indican que habrá un significativo crecimiento en el mercado potencial para interfaces de 40 GbE.
 - Las aplicaciones en la interconexión del core tienen la necesidad de mayor ancho de banda, más allá de sus capacidades existentes, y también en las proyecciones de los requerimientos en aplicaciones de computación. Es por ello que en lo referente a switching, routing, intercambio de Internet, proveedores de servicio y aplicaciones, se ha demostrado la necesidad de utilizar una interface de 100 GbE.

- 2 Compatibilidad. El proyecto propuesto quedará en conformidad con la arquitectura y visión general de la IEEE 802.3, así como un puente para los estándares de la IEEE 802.1D y IEEE 802.1Q. El proyecto también seguirá con la estructura existente de la MIB (Management Information Base) de la IEEE 802.3. Conformará el modo de operación full duplex en la capa MAC, así como las especificaciones en capa física serán definidas para las velocidades de operación de 40 Gbps y 100 Gbps. Por último, se pretende mantener la máxima compatibilidad con la base que ya está instalada de Ethernet.

- 3 Identidad distinta. Esto se refiere a que debe ser esencialmente diferente de los otros estándares de la IEEE 802. El estándar será conformado como una colección de nuevas cláusulas haciéndolo fácil para el lector y que pueda seleccionar especificaciones relevantes. Que sea una solución única del problema y no dos soluciones para un problema.

- 4 Factibilidad técnica. Demostrar que el sistema es factible de realizar, esto ya se ha desarrollado y comprobado en sistemas donde se han agregado canales con anchos de banda iguales o superiores a los 100 Gbps. Debe ser fiable en componentes y sistemas, para que puedan ser propuestos en ambientes con un alto grado de confianza.

- 5 Factibilidad económica. El factor de costo en los componentes y sistemas debe ser bien conocido, esto porque se pueden presentar nuevos costos y deben ser cuantificados. Como ya se ha indicado anteriormente, en el mercado de servidores y cómputo la velocidad óptima para proveer el mejor desempeño y costo es de 40 Gbps. Por otro lado, en el mercado de interconexión del core la velocidad óptima para el mejor desempeño y costo es de 100 Gbps. En relación a los costos de instalación, el proyecto espera usar los medios de transmisión ya implementados, que incluye fibra óptica y cobre. El costo de diseño de red, instalación y mantenimiento son mínimos para conservar la arquitectura, administración y software de la red [32].

2.3. Propuestas de Arquitecturas

Con las justificaciones antes mencionadas los miembros de la Task Force han propuesto varias arquitecturas, las cuales se definirán más adelante. Al final a través de la investigación, estudio y pruebas se elegirá a la mejor; la cual ofrecerá una selección de interfaces físicas dependiendo de su velocidad, alcance y aplicación. Habrá especificaciones de capa física para la velocidad de transmisión de 40 Gbps, con alcances de hasta un metro de distancia en los blackplanes para switches, de 10 metros de distancia en cobre y 100 metros en fibra multimodo OM3; los cuales se implementarán para las interfaces entre servidores. La fibra OM3 ha sido desarrollada de acuerdo a los últimos estándares como es 10 GbE, que permite la transmisión de datos a distancias de hasta 300 metros a una longitud de onda de 850 nm [33].

En el caso de 100 Gbps se estandarizarán enlaces de cobre a 10 metros, de 100 metros con fibra multimodo OM3 y por último distancias de 10 y 40 kilómetros con fibra monomodo; los cuales se implementarán en las interfaces de interconexión en el core. Las anteriores especificaciones, como es

la velocidad de transmisión y el medio de transmisión, se relacionan con el tipo de aplicación que se genera en el mercado, como se muestra en la Tabla 2.1 [34].

	Velocidad de datos en MAC 40 Gbps	Velocidad de datos en MAC 100 Gbps
Tipo de Aplicación	Interfaces de Computación y Servidores	Redes en el Core
Especificación de Capa Física		
1 metro Backplane	√	X
10 metros cobre	√	√
100 metros OM3 MMF	√	√
10 kilómetros SMF	?	√
40 kilómetros SMF	X	√

Tabla 2.1 Especificaciones de capa física definidos para el estándar de la IEEE 802.3ba

La tabla 1 muestra el tipo de aplicación donde se implementaran las dos velocidades de transmisión (40 y 100 Gbps), así como el tipo de medio de transmisión a utilizar dependiendo de la distancia para cada velocidad de transmisión. Los campos marcados con una “√”, indican que son las especificaciones de capa física más factibles para su implementación. Por el contrario, las marcadas con una “X” son las menos factibles; ya sea por su complicada electrónica y/o porque no aplica. El campo marcado con el signo de “?”, es porque está en discusión de ser o no aceptada, ya que su implementación requiere una electrónica bastante complicada y de alto costo.

2.3.1. Arquitectura MLD, APL y PBL

Para la IEEE 802.3 no ha sido tarea fácil la estandarización del proyecto IEEE 802.3ba, como se comento en un principio un grupo estaba a favor por una velocidad de transmisión de 100 Gbps y otro grupo favoreciendo a la de 40 Gbps. Después de varias discusiones se llegó a un acuerdo para incluir a las dos velocidades de transmisión en un solo estándar. Hoy surge un nuevo debate en la discusión de una arquitectura para el nuevo estándar, este debate se centra en utilizar una sola arquitectura para ambas velocidades de transmisión o utilizar diferente arquitectura para cada una de las velocidades de transmisión. Así, se derivaron tres propuestas que han sido presentadas ante la Task Force, y son las siguientes: Multi-Lane Distribution (MLD), Aggregation at the Physical Layer (APL) y Physical Bundling Layer (PBL). Las arquitecturas mencionadas incluyen las dos velocidades de

transmisión, esto es debido a que los integrantes de la Task Force y principalmente los fabricantes de equipos de telecomunicaciones, no quieren que se prolongue aún más el proyecto de estandarización. Otro motivo también se debe a que es poco factible tener dos arquitecturas, debido al elevado costo, escalamiento en velocidad, etc. El profundizar a detalle cada una de las arquitecturas propuestas esta fuera del alcance y objetivos planteados en el tema de tesis, por lo que solo se hará una descripción somera de las arquitecturas.

En la arquitectura MLD, se define como una subcapa que se encuentra entre la subcapa PCS y la PMA, como se muestra en la figura 2.5. Esta arquitectura emplea un término llamado “Lane”, que se define como un canal de conexión y comunicación entre las subcapas. Primero los datos de capa MAC son codificados en un flujo de bloques continuos, la codificación empleada en la arquitectura MLD está basada en su antecesor de 10 GbE, la cual es 64B/66B. Posteriormente este flujo de bloques es dividido dentro de las “n” Lanes, generando una alineación para cada una de las “m” Lanes. Lo anterior permite que todos los bits de datos puedan ser transmitidos sobre la misma combinación de Lanes eléctricas y Lanes ópticas. En esta arquitectura se utilizan interfaces eléctricas de “n” Lanes en la subcapa PCS y de “m” Lanes ópticas en la subcapa PMD; para el caso de 100 GbE se requieren de $n=10$ Lanes eléctricas y de $m=4$ Lanes ópticas. Cada una de las Lanes eléctricas tiene una velocidad de transmisión de 10.3125 Gbps y las Lanes ópticas de 25 Gbps [35].

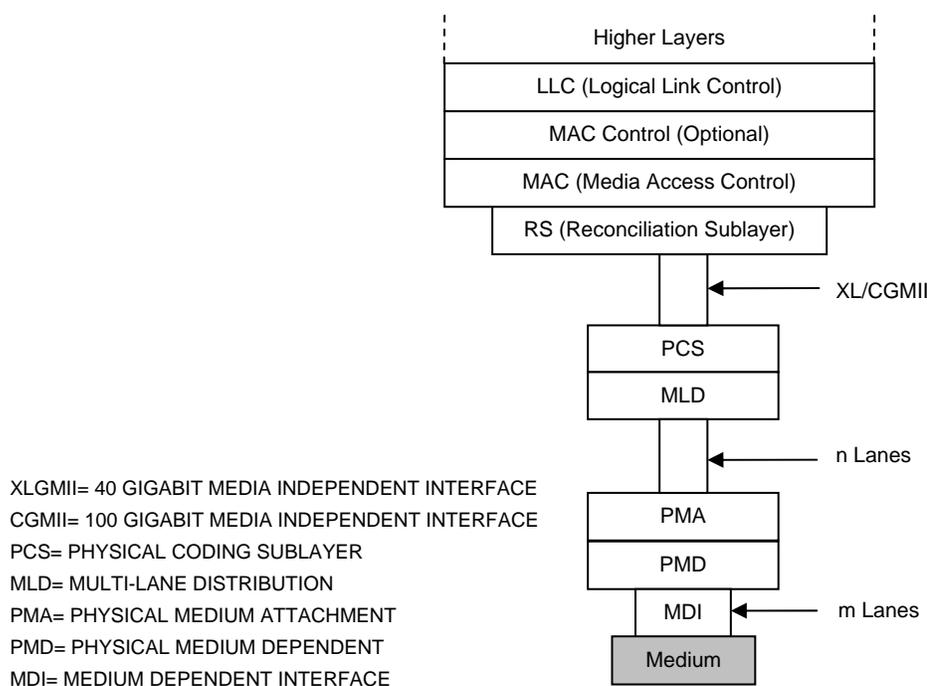
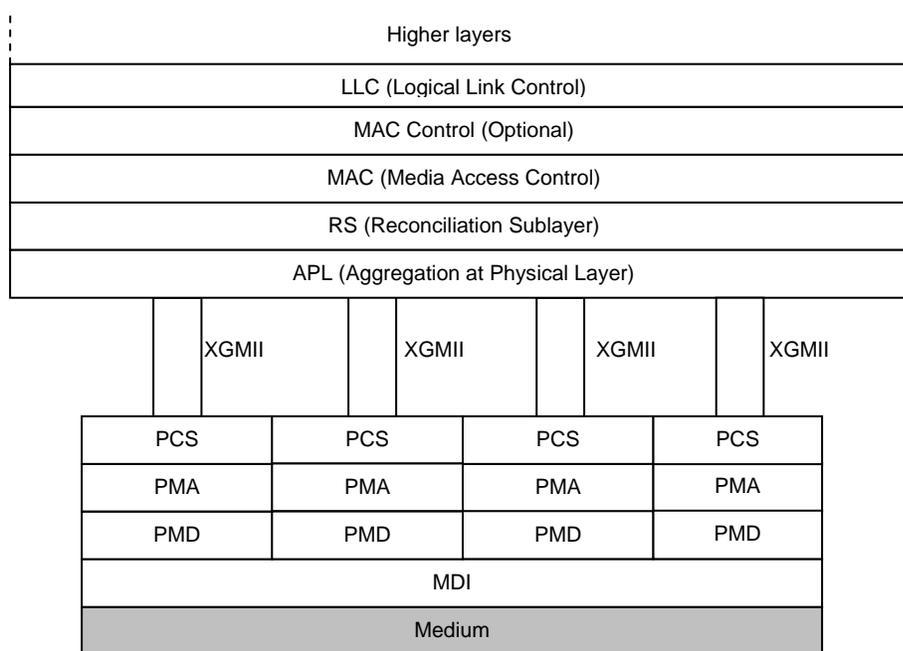


Figura 2.5 Arquitectura MLD propuesta por el grupo de estudio HSSG, para velocidades de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps

La siguiente arquitectura es la Aggregation at the Physical Layer, que es una subcapa que se anexa entre las capas MAC y PCS, como se muestra en la figura 2.6. Esta arquitectura define un mecanismo que hace más eficiente la agregación (uniones) entre los enlaces físicos, para alcanzar velocidades más altas, y por lo tanto soporta la velocidad de transmisión de 100 Gbps. Utiliza una codificación con base en el estándar de 10 GbE, que es 64B/66B. También se espera que sea compatible con los dispositivos de capa PHY de 10 GbE, y en el futuro lo sea para n GbE. La arquitectura APL proporciona una característica específica en la unión con las Lanes, la cual se basa en la fragmentación de los frames de datos de capa MAC; el tamaño del frame es mayor o igual a 64 bytes y la fragmentación se realiza con un tamaño menor o igual a 256 bytes. Este mecanismo de fragmentación se distribuye a través de las Lanes, que se realiza en el transmisor, posteriormente la regeneración de la fragmentación de los paquetes se realiza en el receptor de la capa PHY [36].



XGMII= 10 GIGABIT MEDIA INDEPENDENT INTERFACE PMD= PHYSICAL MEDIUM DEPENDENT
 PCS= PHYSICAL CODING SUBLAYER MDI= MEDIUM DEPENDENT INTERFACE
 PMA= PHYSICAL MEDIUM ATTACHMENT

Figura 2.6 Arquitectura APL propuesta por el grupo de estudio HSSG, para velocidades de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps

Por último se tiene la arquitectura de Physical Bundling Layer, que es una subcapa que se encuentra entre la capa MAC y la PCS, como se muestra en la figura 2.7. Esta tecnología es similar a la arquitectura APL, la diferencia más apreciable consiste en que solo se utiliza un bus de conexión, ya sea XLGMII (40 Gigabit Media Independent Interface) para una velocidad de transmisión de 40 Gbps

o CGMII (100 Gigabit Media Independent Interface) para la transmisión de 100 Gbps. En la subcapa PBL es donde se realizan las uniones con la subcapa PCS, para cada una de las Lanes. Este mecanismo de unión con las Lanes puede ser complejo para esta arquitectura, por tal motivo está todavía bajo estudio. El procedimiento básicamente consiste en el flujo de transmisión de bloques de 64 bits, generados en la capa MAC, posteriormente los bloques son transmitidos a través del bus ya sea para XLGMII o CGMII. Una vez que son transmitidos por el bus, los bloques son distribuidos por las Lanes para llegar al proceso de codificación, el cual es 64B/66B. Finalmente se genera una estructura de matriz de bits, adaptada para las Lanes ópticas, la cual es utilizada para realizar el multiplexaje al medio de transmisión [37].

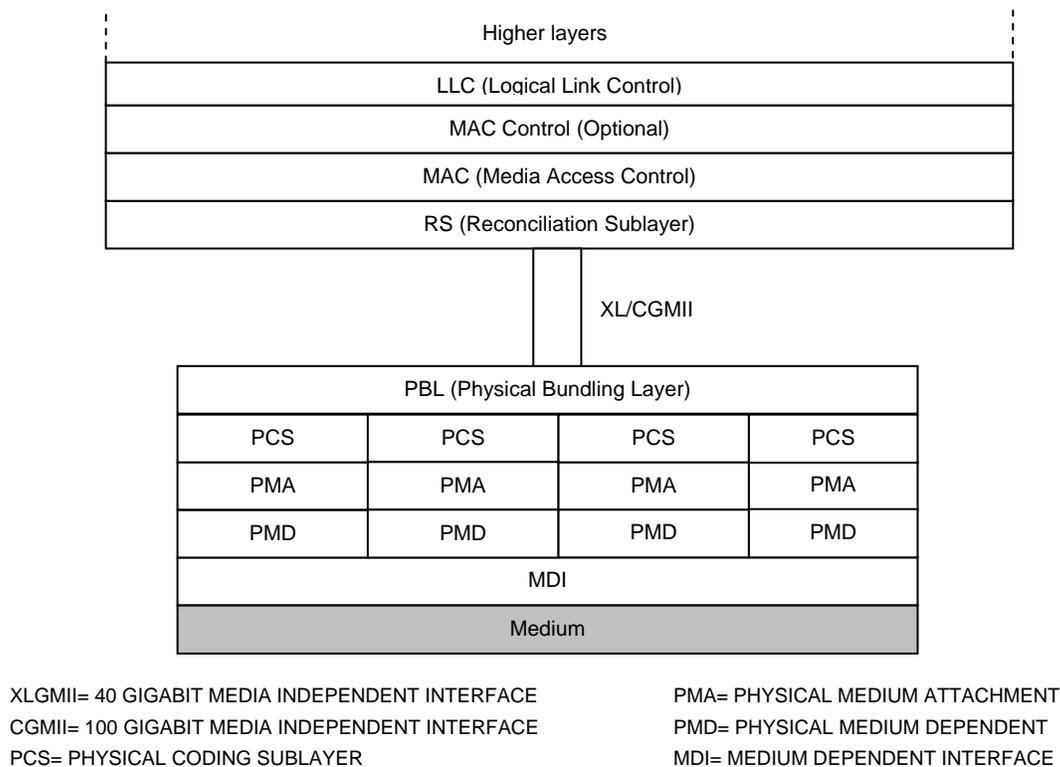


Figura 2.7 Arquitectura PBL propuesta por el grupo de estudio HSSG, para velocidades de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps

Las propuestas de arquitectura, para ambas velocidades de transmisión, han sido evaluadas por la Task Force con los criterios de simplicidad, facilidad en la implementación, escalabilidad y un mínimo en potencia, calor y tamaño. Con los criterios anteriores se realizó dicha evaluación y se llegó a las siguientes conclusiones para cada arquitectura:

- MLD.- Tiene bajo nivel de complejidad comparado con las arquitecturas de APL y PBL. Para su implementación se requiere de la tecnología VLSI (Very Large Scale Integration) que se utiliza actualmente, por lo tanto no es necesario la creación de otra tecnología. Por último tiene simplicidad con drivers, bajo consumo de potencia y mínima generación calor.
- APL.- Esta arquitectura tiene alto nivel de complejidad, por consecuencia baja escalabilidad, probablemente con un alto nivel de procesamiento. También tiene dificultad en la implementación, porque requiere de una nueva tecnología VLSI. Para concluir tiene complejidad en drivers, aumento en potencia y por tanto calor.
- PBL.- Tiene un nivel moderado de complejidad es su estructura, por consecuencia baja escalabilidad. También posee dificultad en la implementación, lo cual requiere de una nueva tecnología de VLSI. Para concluir tiene complejidad en drivers, aumento en potencia y por tanto de calor [38].

Con las anteriores conclusiones, la Task Force determinó que la arquitectura Multi-Lane Distribution es la más viable para implementarla en las velocidades de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps. Lo anterior se determinó también porque la arquitectura MLD se basó en la arquitectura de su antecesor (10 GbE). Por tal motivo se requirió de menos cambios y de no implementar nuevas tecnologías que puedan llegar a retrasar el proceso del nuevo estándar (IEEE 802.3ba).

2.3.2. Subcapa PMD para 100 GbE

Una vez explicadas las arquitecturas, en este apartado se presentan las alternativas de diseño más viables que han sido propuestas por los integrantes de la Task Force para la capa PMD. Dado lo extenso que es cubrir el tema para las dos velocidades de transmisión y el alcance en distancia para cada una de ellas, como se mostraron en la tabla 2.1, en esta tesis nos limitaremos al estudio de la capa PMD para una tasa de transmisión de 100 Gbps a 40 km en fibra SMF solamente.

En principio se propusieron varias técnicas para alcanzar la meta de 100 Gbps a una distancia de 40 km, estas técnicas son las siguientes:

- La de 10x10 Gbps, son 10 canales a una tasa de transmisión de 10 Gbps por cada canal.
- La de 4x25 Gbps, son 4 canales a una velocidad de transmisión de 25 Gbps por canal.
- La de 2x50 Gbps, son dos canales con una velocidad de 50 Gbps en cada canal.

- La de 1x100 Gbps, un solo canal a una velocidad de transmisión de 100 Gbps.

Después de analizar cada una de las técnicas propuestas solo han seguido las que, según las investigaciones realizadas por los integrantes de la Task Force, son las más viables para su implementación y son la de 10x10 Gbps y 4x25 Gbps, como se muestra en la tabla 2.2. Estas dos técnicas de implementación tienen a su vez la alternativa de utilizar dos tipos de transmisor óptico, el láser DML (Direct Feedback Laser) y el láser EAML (Electro Absorption Modulator Laser), que se explicarán a detalle más adelante. Así, delimitando más las técnicas propuestas por la Task Force, las opciones que están sombreadas son las que se distinguen aún más por sus características factibles de implementación, desde el punto de vista tecnológico y económico.

SMF	10 km 1310 nm	40 km 1310 nm	10 km 1550 nm	40 km 1550 nm
10x10 G DML		OA		OA
10x10 G EAML		OA		OA
4x25 G DML		OA		OA + DC
4x25 G EAML		OA		OA + DC

Tabla 2.2 En la tabla se muestran las alternativas de diseño en la subcapa PMD para 100 GbE a 10 y 40 km.; donde OA es un Optical Amplifier y DC es la Fibra de Compensación para la Dispersión

La opción que nos corresponde estudiar y desarrollar, como la propuesta que mejor se adecua al estándar es la de 4x25 Gbps con EAML a una distancia de 40 km; lo anterior por las razones que explicaremos a continuación:

2.3.2.1 Longitud de onda central

Una característica mostrada en la tabla 2.2 es la especificación de dos longitudes de onda, de 1310 nm y 1550 nm, para la fibra SMF. Con una longitud de onda de 1310 nm la dispersión es cercana a cero, como se muestra en la figura 2.8. Por el contrario, para la misma fibra SMF con longitud de onda de 1550 nm la dispersión es mayor, por lo que se necesitaría una fibra para compensar esa diferencia de dispersión. El tipo de fibra que se utiliza para compensar la dispersión se llama

Dispersion Compensation Fiber (DCF). La dispersión en la fibra óptica es un efecto lineal que produce el ensanchamiento de los pulsos de luz, los cuales representan los bits de información. El agregar la fibra DCF al sistema elevaría los costos de implementación y también de mantenimiento, por lo tanto la mejor opción en longitud de onda se recomienda que sea de 1310 nm [39].

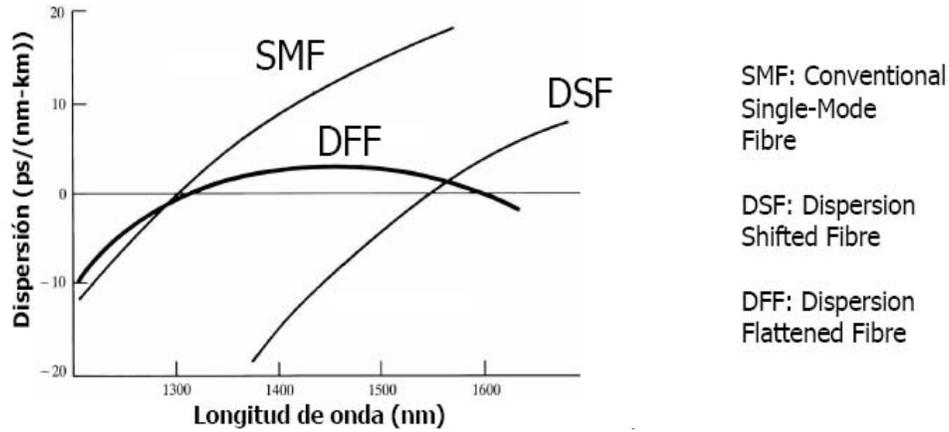


Figura 2.8 En la figura se muestra la dispersión que tiene la fibra óptica monomodo a diferentes longitudes de onda

2.3.2.2 Tipo de transmisor

En lo referente al tipo de transmisor óptico utilizado, el cual tiene como función la emisión de luz, como se menciono anteriormente hay dos tipos el DML y el EAML. El láser DML, mostrado en la figura 2.9 (A), utiliza la modulación directa de la fuente de luz que es el láser. Por el contrario el láser EAML, mostrado en la figura 2.9 (B), utiliza un módulo adicional (modulador), el cual modula la señal continua de la fuente de luz generada por el láser.

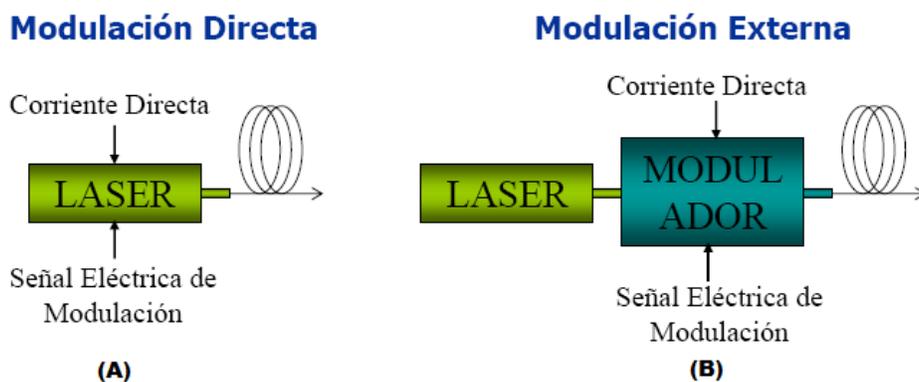


Figura 2.9 Tipos de láser DML y EAML, y la modulación para cada uno de ellos

Graficando la salida de la modulación, tanto en potencia como en fase (Chirp), para ambos tipos de transmisores ópticos, se observan algunas características que explicaremos a continuación. Respecto al láser DML, mostrado en la figura 2.10 (A), se observan picos en la gráfica de potencia. Estos picos son llamados oscilaciones de relajación, dando como resultado que la señal no sea tan “limpia” como deseamos; estas mismas oscilaciones también se observa en la gráfica del chirp. En lo que se refiere al láser EAML, mostrado en la figura 2.10 (B), la gráfica de potencia a la salida se genera más “limpia”, al igual que en la gráfica de chirp cuyo valor es prácticamente nulo. Dado que el chirp al interactuar con la dispersión de la fibra puede provocar el ensanchamiento de los pulsos, y debido a que la gráfica de potencia no presenta oscilaciones de relajación, se concluye que la mejor opción es utilizar un transmisor del tipo EAML como generador de fuente de luz para el sistema. Además, el espectro de una señal modulada directamente resulta ser más ancho, por lo que de utilizarse DML sería necesario emplear también un mecanismo de enfriamiento para el láser. Ya que de otra manera ocurriría un corrimiento que se produce con el calor en el láser y podría ocasionar una superposición del espectro entre canales adyacentes [40].

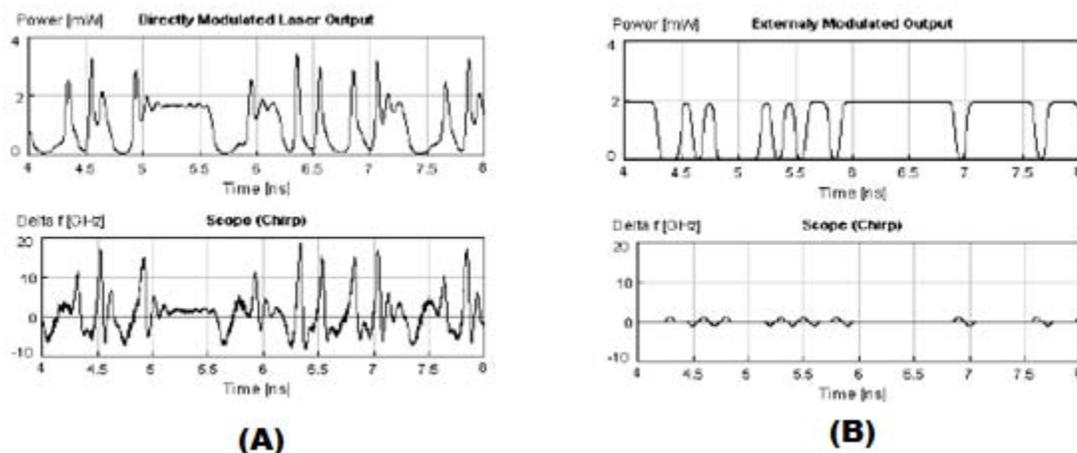


Figura 2.10 Gráficas de potencia y chirp después de la modulación del láser DML (A) y el EAML (B)

2.3.2.3 Presupuesto de potencia

Una característica importante que hay que tener en cuenta en el diseño del sistema es el presupuesto de potencia. Es decir, es necesario calcular la potencia de la señal desde la fuente de luz que es generada por el láser hasta el detector óptico de luz en el receptor, mostrado en la figura 2.11.

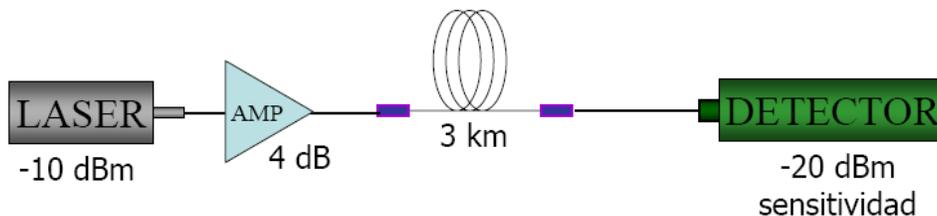


Figura 2.11 Trayectoria de un sistema óptico para el cálculo del presupuesto de potencia

En esta trayectoria hay pérdidas de potencia que son inevitables, que son las siguientes:

- Pérdidas por unión, que son los empalmes entre las uniones de las fibras ópticas.
- Pérdidas por conexión, estas pueden ser entre las conexiones de la fibra y el láser, amplificador y la fibra.
- Pérdidas del cable, que son propias por su naturaleza de la fibra óptica.

Después de que los pulsos de luz han pasado a través de la trayectoria, todavía falta que el detector óptico reciba la potencia mínima necesaria para trabajar, a esta potencia mínima requerida se le llama sensibilidad y es del orden de los -30 dBm (0.001mW).

Por lo tanto, para alcanzar la distancia de 40 km en fibra SMF es necesario hacer uso de un amplificador óptico. El tipo de amplificador óptico que el grupo HSSG ha propuesto es el llamado Semiconductor Optical Amplifier (SOA). Este tipo de amplificador se escogió debido a su capacidad de integración, tamaño pequeño y a su considerable ancho de banda (de unos 50nm) [41].

2.3.2.4 Espacio Intercanal

Un punto clave en el diseño de la propuesta de 4x25 Gbps para su implementación, son las consideraciones del espaciado intercanal que hay alrededor de la longitud de onda central, la cual es de 1310 nm. Hay dos alternativas que están en estudio, las cuales son LAN WDM (Local Area Network - Wavelength Division Multiplexing) y CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing).

Para LAN WDM se tiene un espaciado intercanal de 2 a 4 nm, mostrado en la figura 2.12 (A). La máxima dispersión de la última longitud de onda, que está en los 1319 nm, es de 18 ps/nm; y la pérdida máxima es de 4.2 dB. En el caso de CWDM se tiene un espaciado intercanal de 20 nm, mostrado en la figura 2.12 (B). La máxima dispersión de la última longitud de onda, que está en los

1356 nm, es de 52 ps/nm; y la pérdida máxima es de 4.7 dB. Con lo anterior podemos concluir que entre mayor sea el espaciado intercanal mayor es la dispersión y las pérdidas; por lo tanto la mejor opción del espaciado intercanal es LAN WDM [42].

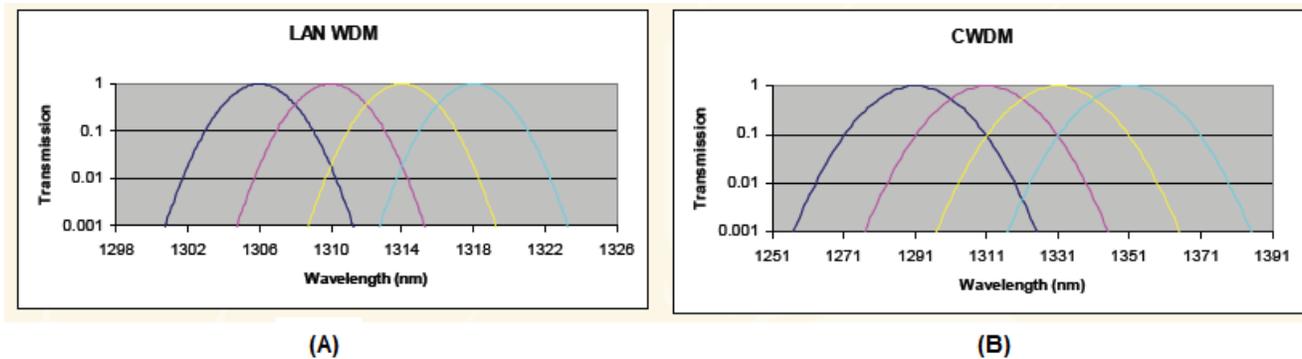


Figura 2.12 Espaciado intercanal de LAN WDM y DWDM, para la longitud de onda central igual a 1310 nm

2.3.2.5 Alternativa más conveniente

A partir de los puntos arriba señalados y que fueron explicados detalladamente, la alternativa más conveniente en la cual nos enfocaremos en el siguiente capítulo es la correspondiente a las siguientes características:

- Una longitud de onda central de 1310 nm.
- Un transmisor óptico, como fuente de luz, del tipo EAML.
- Un amplificador SOA para alcanzar la distancia de 40 km y con ello estar dentro del límite necesario de presupuesto de potencia.
- Un espaciado intercanal de LAN WDM.

3. Diseño del sistema

3.1. Elementos del sistema de subcapa PMD

En este capítulo se describirán los elementos que componen el sistema de subcapa PMD, el cual lo constituye un transmisor óptico, el modulador, un multiplexor/demultiplexor, la fibra óptica, el amplificador óptico y el receptor óptico. Posteriormente también se definirán algunas consideraciones para el desempeño del sistema, como son el presupuesto de potencia y la tasa de error.

En la configuración de la subcapa PMD para la velocidad de transmisión de 100 Gbps a una distancia de 40 km lo más prometedor es tener un enlace de 4x25 Gbps, cuatro longitudes de onda a una velocidad de 25 Gbps para cada una de ellas. El transmisor óptico está constituido por cuatro láseres modulados externamente por electro-absorción (EML). Para el transmisor EML se considera un espaciado intercanal de 400 GHz ($\approx 2.3\text{nm}$), este valor se designa para lograr un Bit Error Rate (BER) de 10^{-12} , el cual está contemplado dentro de los objetivos del grupo HSSG. Cada EML está construido por un láser Distributed FeedBack (DFB) a una longitud de onda en particular, alrededor de los 1310 nm. Posteriormente la señal óptica entra a un modulador de electro-absorción (EAM), que es manejado por un transmisor eléctrico individual (Tx). La longitud de onda de 1310 nm es designada para la Single Modo Fiber (SMF), porque la dispersión cromática es la más baja en esta ventana de longitud de onda. El formato de modulación óptica utilizado para el sistema es el NRZ (Non Return to Zero).

Las señales ópticas que salen de los moduladores son multiplexadas dentro de la SMF, la longitud del enlace de fibra varía entre 0 y 40km. Para las aplicaciones de grande alcance, distancias de hasta

40 km, se requiere de amplificación óptica que supere la atenuación de la fibra óptica. En aplicaciones de menor alcance, distancias menores a 10 km, la amplificación óptica ya no es requerida. Posteriormente, la recepción de la señal óptica está compuesta por un amplificador óptico de semiconductor (SOA), que amplifica simultáneamente las cuatro longitudes de onda antes que sean demultiplexadas. Por último la señal óptica es recibida por interfaces ópticas individuales (OFEs), cada OFE es conectado a un receptor eléctrico (Rx). La arquitectura total del enlace se muestra en la figura 3.1.

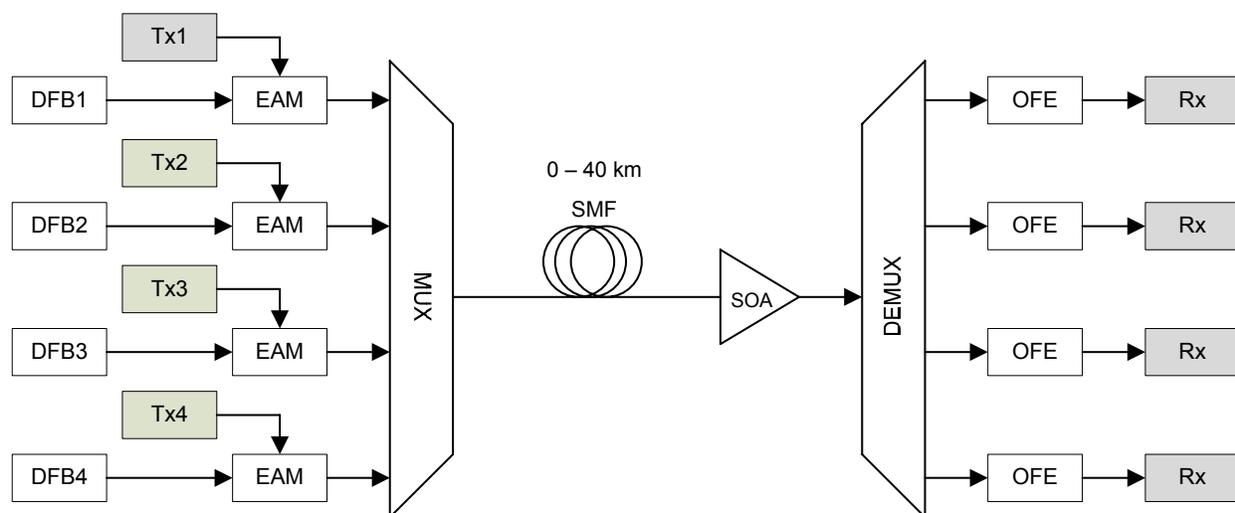


Figura 3.1 Arquitectura del enlace óptico de 4 x 25 Gbps. Los elementos sombreados en gris son componentes eléctricos

3.1.1. Transmisor óptico

Uno de los componentes importantes en los sistemas de comunicaciones ópticas es el transmisor, llamada también fuente de luz, esta debe ser compacta, monocromática (emiten la misma frecuencia), estable y de larga duración (muchos años). En la práctica no hay fuentes de luz monocromáticas, solo hay fuentes que emiten luz dentro de una banda estrecha de longitudes de onda. También debe tener una estabilidad constante en los niveles de potencia óptica (en tiempo, voltaje y variaciones de temperatura) y una longitud de onda constante. Las fuentes de luz están clasificadas como coherentes (los fotones están en fase) y no coherentes (los fotones están aleatoriamente y fuera de fase). En la primera clasificación están incluidos todos los láseres (Light

Amplification by Stimulated Emission of Radiation) y en la otra se incluyen los LED (Light Emitting Diodes) y fuentes incandescentes.

Los láseres usados en comunicaciones ópticas están constituidos de la unión de estructuras heterogéneas de semiconductor. La unión heterogénea consiste de dos materiales semiconductores adyacentes con diferentes niveles de energía y con una separación entre bandas. La conducción de un semiconductor puede ser incrementada agregando impurezas con un número extra de portadores de carga al semiconductor, a este proceso se le llama “dopaje”. Si las impurezas contienen más electrones que el material semiconductor puro, el material se denomina “semiconductor de tipo n”. En este tipo de material aparecen niveles de energía adicionales muy cercanos a la banda de conducción. Si las impurezas contienen menos electrones que el material semiconductor, los niveles de energía extras aparecen cerca de la banda de valencia; a este tipo de material se denomina “semiconductor de tipo p” [43]. Cuando la unión heterogénea es polarizada directamente, se da un proceso de recombinación entre electrones y huecos, dando lugar a la generación de la luz y por ende al proceso láser.

El láser también puede ser clasificado como onda continua (continuous wave, CW) y como modulada. En comunicaciones ópticas, el láser CW requiere de un modulador externo que es colocado a la salida del láser. En este esquema, una señal eléctrica se representa como un flujo de datos que pasa a través del modulador, afectando el flujo continuo de la luz que pasa por él, como se muestra en la figura 3.2 [44].

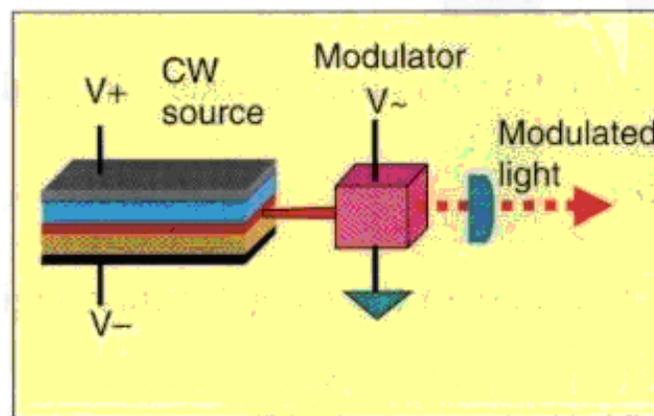


Figura 3.2 Láser de onda continua con un modulador externo a la salida del láser

La corriente manejada dentro del láser de semiconductor es fijada por encima del umbral de 1 bit y por debajo del umbral del bit 0, a esta razón de potencias de salida se le llama Extinction Ratio (ER). Cabe mencionar que el láser modulado directamente (mencionado en el capítulo anterior) solo es

capaz de alcanzar ER entre los 6 dB y 8 dB, por lo que no son prácticos en velocidades de bit mayores a los 10 Gbps. Por lo tanto, el transmisor de modulación externa es el más recomendado, además que en el esquema de 100 GbE se utilizarán láseres modulados externamente. El láser semiconductor fabricado de materiales de InGaAsP es ampliamente usado en muchos sistemas ópticos.

El láser de una sola longitud de onda utilizado en muchos sistemas ópticos es el láser DFB, donde una rejilla de difracción grabada en el sustrato cerca de la región activa proporciona una retroalimentación selectiva de frecuencia, lo cual hace que el láser emita una sola longitud de onda, como se muestra en la figura 3.3. En este esquema las capas semi-aislantes ayudan a confinar la corriente en la región activa y también proporciona un índice de guía al modo óptico [45].

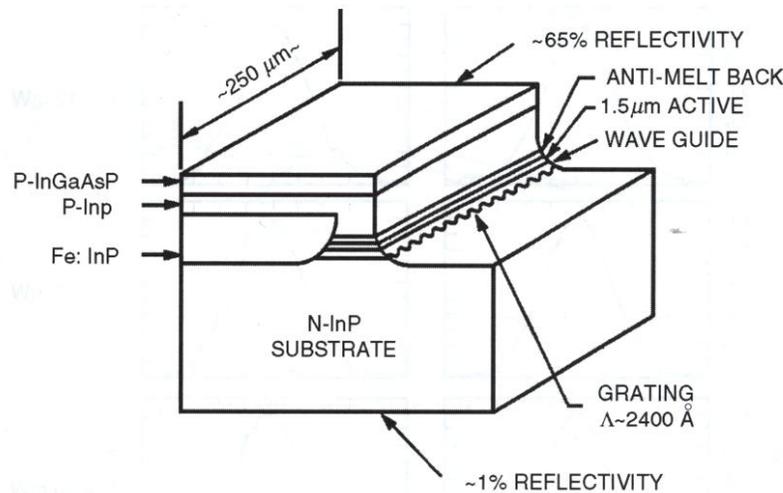


Figura 3.3 Estructura de un láser Distributed FeedBack

En el diseño de la subcapa PMD es necesario utilizar cuatro láseres de tipo DFB, estos van a generar una longitud de onda diferente, por lo que la separación entre las longitudes de onda es llamada espaciamiento intercanal. Por un lado, es recomendado tener un espaciamiento lo suficientemente grande, ya que es más fácil el proceso de multiplexaje y demultiplexaje de los canales; así como de los requerimientos de estabilidad de longitud de onda. Un espaciamiento intercanal grande permite futuras actualizaciones para tasa de bits más altas por canal, lo que no puede ser viable con un espaciamiento muy angosto. Por ejemplo, los sistemas actuales con espaciamiento de 100 GHz operan a velocidades de bit de los 10 Gbps por canal. Alternativamente, el espaciamiento puede ser mantenido a 100 GHz y una velocidad de bit por canal de hasta 40 Gbps. Otra ventaja de un espaciamiento grande es que también reduce la penalización de Four Wave Mixing (FWM) [46]. El efecto de FWM es causado por el índice de refracción dependiente de la potencia óptica, lo que crea

una nueva señal a la frecuencia de batimiento de otras dos ondas, produciendo diafonía (cross-talk) y degradando la calidad de la señal transmitida.

La ITU (International Telecommunication Union) creó la recomendación G.694.1 (Grids espectral para aplicaciones WDM: grid de frecuencias para DWDM), la cual establece la ubicación y separación de canales de comunicación dentro de las bandas S, C y L. Esta ubicación y separación se establece en un sistema de 40 canales y una frecuencia base de 193.1 THz, con separaciones de 0.8nm ($\approx 100\text{GHz}$), 0.4nm ($\approx 50\text{GHz}$), 0.2nm ($\approx 25\text{GHz}$) y 0.1nm ($\approx 12.5\text{GHz}$) [47]. El espaciamiento intercanal propuesto por la Task Force, para alcanzar los 100 Gbps es de 400 GHz ($\approx 2.3\text{nm}$) por canal, tomando como base la longitud de onda a los 1312nm ($\approx 228.5\text{THz}$) [48]. Los demás valores del espaciamiento intercanal se muestran en la tabla 3.1.

Láser	400 GHz de espaciamiento intercanal	
	Frecuencia Nominal [THz]	Longitud de onda [nm]
DFB 1	229.1	1308.57
DFB 2	228.7	1310.85
DFB 3	228.3	1313.15
DFB 4	227.9	1315.46

Tabla 3.1 Frecuencia y longitud de onda propuestos por la Task Force para alcanzar los 100 Gbps

Se debe tener en cuenta que la recomendación de la ITU G.694.1 se toma como referencia la frecuencia, y no la longitud de onda. La razón principal es que ciertos materiales emiten frecuencias ópticas bien conocidas, que pueden ser utilizadas como puntos de referencia precisas. También que la frecuencia sigue siendo la misma que la luz que viaja a través del material, pero no la longitud de onda, ya que está influenciada por el índice de refracción del material.

En las simulaciones se utilizarán tres valores diferentes para la potencia de salida, bajo la modulación del EML, y que son 0, +2 y +4 dBm. Cada EML tiene una Optical Signal-to-Noise Ratio (OSNR) de 40 dB, el OSNR está definido como la potencia de la señal recibida promedio entre la potencia óptica de ruido recibido. En la simulación, cada EML genera un patrón de prueba de 1024 bits, que fue escogido para capturar el comportamiento del BER en el peor de los casos; este patrón es generado por una secuencia de bit pseudo-aleatoria.

3.1.2. Modulador

La modulación directa de los láseres está limitada por el ancho de banda, el chirp, la dispersión y la capacidad para transmitir a grandes distancias. Por el contrario, los moduladores externos tienen gran ancho de banda, así como la capacidad de propagación de ondas de luz a grandes distancias, por lo que los hacen los mejores en sistemas de comunicaciones ópticas. Los moduladores externos son fabricados de cristales dieléctricos como niobato de litio y tantalite de litio, y también de semiconductores que incluyen GaAs, InP, InGaAs, etc., y polímeros.

- Los moduladores basados en niobato de litio tienen la ventaja de gran ancho de banda, bajo chirp, bajas pérdidas de inserción, mejor fiabilidad y también facilidad de fabricación. Las desventajas son que manejan altos voltajes, gran tamaño del dispositivo, así como su costo.
- Los moduladores de semiconductor tienen ventajas de tamaño pequeño, maneja bajos voltajes, bajo costo relativo y compatibilidad en un futuro con la integración de dispositivos de semiconductor. Las desventajas son grandes pérdidas de inserción, pequeñas distancias de transmisión y chirp. Este es el tipo de modulador que se utilizará para el sistema en la subcapa PMD a 100 Gbps.

Los moduladores ópticos pueden ser clasificados principalmente en dos tipos, basados en el fenómeno físico que utilizan para modular la señal de luz. Una categoría de estos moduladores es la que cuenta con el efecto electro-óptico, para cambiar el índice efectivo de una guía de onda y modular la fase de una señal óptica. Este tipo de modulador típicamente emplea un interferómetro Mach-Zehnder para convertir el cambio de fase en una intensidad de la modulación. La otra categoría de modulador está basado en el efecto de electro-absorción, el cual cambia la absorción de una guía de onda óptica para modular la intensidad de una onda de luz que pasa a través de él.

En un modulador de electro-absorción, el cual se utilizará en las simulaciones del capítulo cuatro, tiene la capacidad de absorber radiación y que la cantidad de potencia que éste deja pasar es modulable por medio de un voltaje existente entre sus extremos. En el caso de los semiconductores, esta capacidad de control de absorción se consigue aprovechando el efecto Franz-Keldysh o el efecto Stark de confinamiento cuántico; según el cual el ancho de la banda de separación y las longitudes de onda con posibilidad de ser absorbidas varían con el campo eléctrico aplicado. La fabricación de este tipo de moduladores con materiales semiconductores facilita su integración junto con el láser, lo que reduce las pérdidas de acoplamiento entre el láser y el modulador.

Las fuentes de modulación de electro-absorción ofrecen muchas ventajas potenciales para las presentes y futuras generaciones de los sistemas de comunicaciones ópticas. Estas ventajas sobre otros moduladores son en tamaño, costo, manejo de voltaje y compatibilidad con la integración monolítica con el láser. El diseño de un modificador de electro-absorción involucra un gran número de consideraciones ópticas y eléctricas. En su forma más simple un modificador de electro-absorción consiste de un semiconductor óptico de guía de onda, el cual está formado por capas con un alto índice de refracción. La capa del núcleo está entre dos capas con bajo índice de refracción, llamadas capas de revestimiento, como se muestra en la figura 3.4.

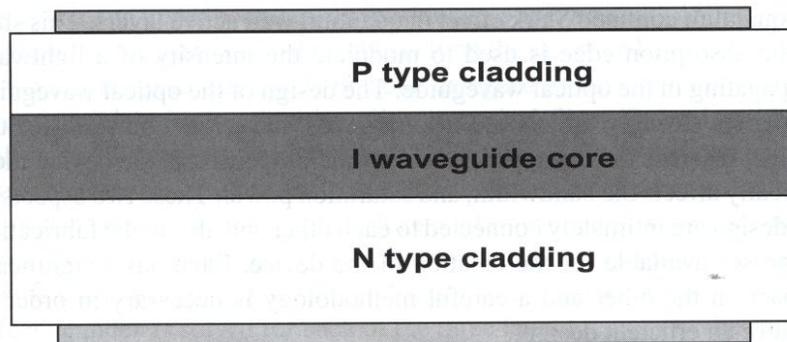


Figura 3.4 Sección longitudinal simple de un modificador de electro-absorción

El confinamiento lateral para la guía de onda puede ser alcanzado de diferentes maneras, formando una cresta superficial en la capa de revestimiento, o grabando una profunda cresta todo el camino a través de la capa del núcleo. Típicamente las capas de revestimiento superiores son un semiconductor dopado de material del tipo-p, la capa del núcleo es un semiconductor intrínseco, y la capa baja de revestimiento es del tipo-n. La capa activa está compuesta de un material que tiene una energía en la banda de separación, que es ligeramente mayor a la energía del fotón, para la longitud de onda en la que el dispositivo está diseñado para operar. Aplicando una polarización inversa el dispositivo crea un fuerte campo magnético en la capa intrínseca, que desplaza la absorción en el borde del material de menor energía; este desplazamiento es usado para modular la intensidad de una onda de luz propagándose en la guía de onda óptica. El diseño de la guía de onda óptica afecta las propiedades de pérdidas de inserción y la ER, mientras que las propiedades electrónicas del dispositivo afectan más críticamente al ancho de banda y a la potencia de saturación. Estos dos aspectos del diseño están íntimamente conectados y también a los procesos de fabricación disponibles para la creación del modificador [49].

Un requerimiento fundamental del modulador EA en un sistema de transmisión es que debe tener suficiente ancho de banda de modulación para permitir la transmisión y recepción de la información. Para los sistemas digitales el formato más comúnmente utilizado es el Non Return to Zero, en donde el ancho de banda del sistema necesita ser superior a la mitad de la tasa de bits. En la práctica el desempeño óptimo en la transmisión de datos es utilizado el formato NRZ, y se ha demostrado que el tiempo de subida y caída en el transmisor debe ser 40% del tiempo del bit; lo cual es igual a $1/B$, donde B es la tasa del bit. Esto corresponde a una señal pequeña de ancho de banda en el orden del 90% de la tasa del bit. Como ya se mencionó anteriormente, en la subcapa PMD que está en estudio es utilizado un formato de modulación NRZ.

En el simulador que se utiliza para la tesis, el EAM es modelado usando una función de transferencia variante en el tiempo, que es aplicado sobre una forma de onda óptica (normalmente onda continua). Esta función de transferencia está en función del voltaje que se aplica al dispositivo, los términos que describen la función de transferencia son modelados usando polinomios de orden N, donde $N < 5$; que fueron ajustados utilizando curvas experimentales. Además el modulador tiene un ancho de banda de 25 GHz modelado con un filtro Bessel de quinto orden.

3.1.3. Multiplexor/Demultiplexor

Los filtros ópticos son componentes esenciales en sistemas de transmisiones ópticas, y se pueden ocupar en por lo menos dos aplicaciones: para multiplexar y demultiplexar longitudes de onda en un sistema WDM; estos dispositivos son también llamados multiplexor/demultiplexor. Otra función de los filtros ópticos es la de proporcionar una ecualización de la ganancia y filtrado de ruido en amplificadores ópticos. Un multiplexor combina señales a diferentes longitudes de onda en sus puertos de entrada hacia un puerto de salida común, y un demultiplexor lleva acabo la función opuesta; como se muestra en la figura 3.5.

Hay una gran variedad de tecnologías de filtrado óptico disponibles, sus características claves para su uso en sistemas ópticos son las siguientes:

- ❖ Un buen filtro óptico debe tener bajas pérdidas de inserción. La pérdida de inserción es la pérdida de entrada-salida del filtro.
- ❖ Las pérdidas deben ser independientes del estado de polarización de las señales de entrada. El estado de polarización varía aleatoriamente con el tiempo en muchos sistemas, si el filtro tiene una pérdida dependiente de polarización, la potencia de salida variará con el tiempo también, lo cual es una característica no deseable.
- ❖ El filtro paso banda debe ser insensible a variaciones en temperatura ambiente. El coeficiente de temperatura se mide con la cantidad que cambia la longitud de onda por la variación de grados en temperatura. El requisito del sistema es que sobre el rango de temperatura de operación total (cerca de los 100°C), el cambio de longitud de onda debe ser mucho menor que el espaciamiento de longitud de onda entre canales adyacentes en un sistema WDM.
- ❖ Mientras más y más filtros son cascadeados, en un sistema WDM, el filtro paso banda llega a ser progresivamente más angosto (concatenación de filtros). Para asegurarse que el filtro paso banda sea bastante ancho al final del cascadeado, los filtros individuales deben tener el la banda muy plana (amplio). Esto es medido por el ancho de banda de 1 dB, como se muestra en la figura 3.6.
- ❖ Al mismo tiempo, los bordes laterales del filtro paso banda deben ser “cortantes”, para reducir la cantidad de energía que puede llegar a pasar a los canales adyacentes. Esta energía es llamada crosstalk y degrada el desempeño del sistema, también llamado diafonía [50].

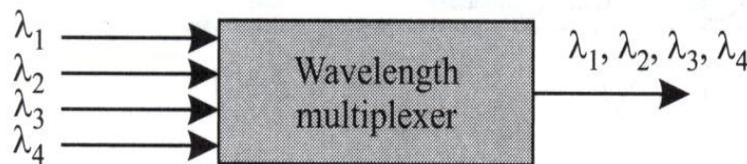


Figura 3.5 La función de un Multiplexor es la de combinar longitudes de onda hacia un puerto de salida

En las simulaciones, el multiplexor óptico se modela con un filtro paso banda Gaussiano de tercer orden, con un ancho de banda de 3 dB a 175 GHz ($\approx 1\text{nm}$). El crosstalk del canal está fijado a 25 dB y las pérdidas de inserción para el multiplexor es de -3.7 dB y de -5.2 para el demultiplexor.

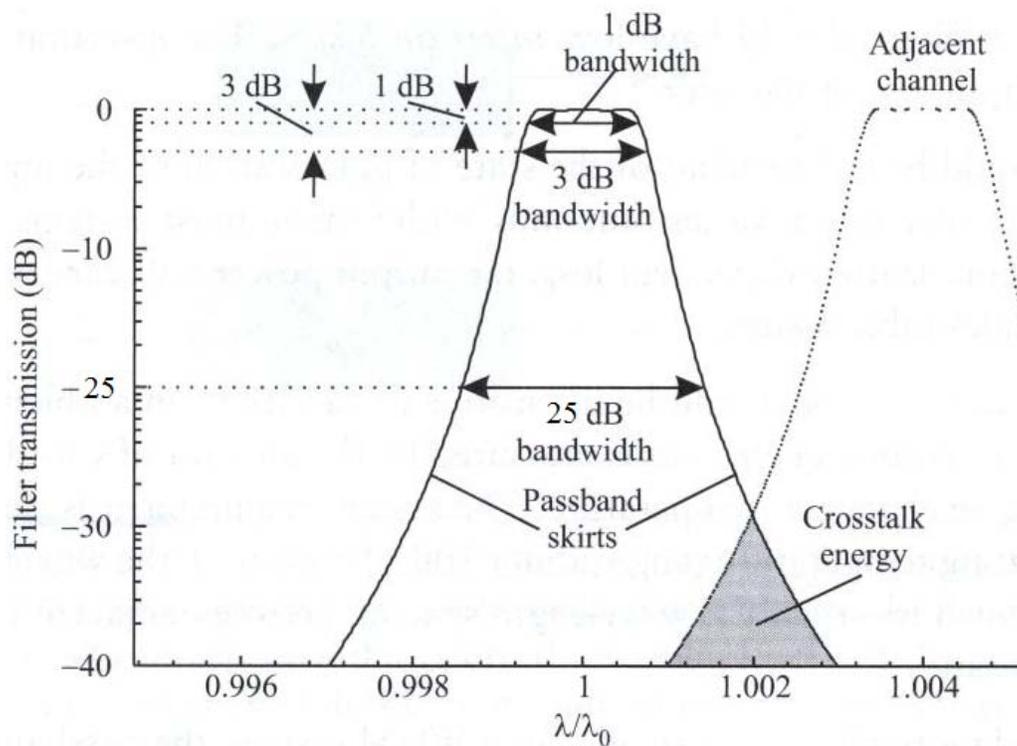


Figura 3.6 La figura muestra características importantes de la forma espectral de filtros ópticos, λ_0 es el centro de longitud de onda del filtro y λ denota la longitud de onda de la señal de luz

3.1.4. Fibra óptica

La fibra óptica que se utilizará en la simulación para el diseño de la subcapa PMD es la Single Mode Fiber (SMF). La estructura y diseño de la fibra óptica son conocidas y por tanto no se detallarán aquí. El estándar de la SMF establece que la dispersión es nula alrededor de la longitud de onda situada a los 1310 nm. Los siguientes puntos son recomendaciones y características más importantes de la SMF, los cuales proporcionan la estructura esencial mínima de diseño; y se describen a continuación:

- Diámetro del campo modal.- El valor nominal y la tolerancia del mismo se especifican para los 1310 nm. El valor nominal está entre los 8,6 - 9,5 μm y la tolerancia no debe exceder el valor especificado de $\pm 0,6 \mu\text{m}$.
- Diámetro de revestimiento.- El valor nominal recomendado del diámetro de revestimiento es de 125 μm , y una tolerancia cuyo valor no debe ser superado de $\pm 1 \mu\text{m}$.

- Error de concentricidad del núcleo.- El error de concentricidad del núcleo no debe exceder el valor especificado de 0,6 μm .
- Coeficiente de dispersión cromática.- El coeficiente de dispersión cromática (D), se especifica estableciendo límites para los parámetros de una curva de dispersión cromática que sea función de la longitud de onda en la región de los 1310 nm. El límite del coeficiente de dispersión cromática para cualquier longitud de onda (λ), se calcula utilizando la longitud de onda mínima de dispersión nula ($\lambda_{0\text{mín}}$), la longitud de onda máxima de dispersión nula ($\lambda_{0\text{máx}}$) y el coeficiente de la pendiente máxima de dispersión nula ($S_{0\text{máx}}$). Para realizar el cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{\lambda S_{0\text{máx}}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\text{máx}}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0\text{máx}}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\text{mín}}}{\lambda} \right)^4 \right]$$

Los límites de los valores son los siguientes: para $\lambda_{0\text{mín}}$ es 1300 nm, $\lambda_{0\text{máx}}$ es 1324 nm y $S_{0\text{máx}}$ es 0,092 ps/nm² x km. Estos valores son tomados de los atributos G.652.A y G.652.B de la ITU [51].

- Coeficiente de atenuación. El valor del coeficiente de atenuación de la fibra óptica no debe exceder el valor de 0,5 dB/km, este valor es del atributo G.652.A, y de 0,4 dB/km para el atributo G.652.B. Para las simulaciones del sistema de comunicación óptico se tomará el promedio de ambos atributos, el cual será de 0.45 dB/km.

La SMF es modelada como un elemento no lineal caracterizado por la ecuación diferencial de Schrodinger. El método "split-step", consiste de un algoritmo iterativo que resuelve independientemente la parte no lineal y la dispersiva de la ecuación a lo largo de pequeños segmentos de la fibra que es usada. Adicionalmente, en las simulaciones para cada longitud de fibra se asume una pérdida adicional de 2 dB, en conectores de fibra y empalmes.

Dentro de la fibra se manifiestan contribuciones muy pequeñas de los efectos no lineales, esto podría deberse a los valores bajos de dispersión observada por todos los canales; lo cual reduce el impacto de la modulación en fase cruzada y del espaciado intercanal propuesto de 400 GHz que reduce el efecto de FWM. Las pequeñas degradaciones descritas por los efectos no lineales de la fibra pueden ser consideradas prácticamente insignificantes, comparado con las no linealidades y la reducción del OSNR en el módulo del amplificador óptico.

En la tabla 3.2 se resumen las recomendaciones y características más importantes de los atributos en la especificación G.652.A de la ITU, para la fibra óptica monomodo.

Atributos de la Fibra		
Atributo	Dato	Valor
Diámetro de campo modal	Longitud de onda	1310 nm
	Gama de valores nominales	8,6 - 9,5 μm
	Tolerancia	$\pm 0,6 \mu\text{m}$
Diámetro del revestimiento	Nominal	125 μm
	Tolerancia	$\pm 1 \mu\text{m}$
Error de concentricidad del núcleo	Máximo	0,6 μm
No circularidad del revestimiento	Máximo	1,0 %
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260
Pérdida de macroflexión	Radio	30 mm
	Número de vueltas	100
	Máximo a 1550nm	0,1 dB
Prueba de tensión	Mínimo	0,69 GPa
Coeficiente de dispersión cromática	$\lambda_{0\text{mín}}$	1300 nm
	$\lambda_{0\text{máx}}$	1324 nm
	$S_{0\text{máx}}$	0,092 ps/nm ² xkm.
Atributos del cable		
Atributo	Dato	Valor
Coeficiente de atenuación	Máximo a 1310 nm	0,5 dB/km

Tabla 3.2 Recomendaciones y características de la especificación G.652.A para fibra monomodo

3.1.5. Amplificador óptico

En un sistema de comunicación óptica las señales del transmisor son atenuadas por la fibra óptica al propagarse a través de ella, además de otros componentes ópticos tales como multiplexores y acopladores. Después de una distancia considerable, las pérdidas acumuladas de la señal llegan a ser demasiado débiles para ser detectadas; antes de que esto pase la potencia de la señal debe ser restaurada. Un amplificador óptico ofrece esto y otras ventajas, tales como ser insensible a la velocidad del bit o formatos de la señal. Además los amplificadores ópticos tienen ganancias muy

grandes y poseen amplios anchos de banda; además, un amplificador puede simultáneamente amplificar varias señales de un sistema WDM.

Sin embargo, los amplificadores no son dispositivos perfectos, ya que introducen adicionalmente ruido; el cual se va acumulando. Los amplificadores ópticos pueden ser clasificados en dos clases: amplificadores de fibra óptica (Optical Fiber Amplifiers, OFA) y en amplificadores ópticos de semiconductor (Semiconductor Optical Amplifiers, SOA). Los SOA originalmente fueron creados para realizar una amplificación lineal y además extender el alcance de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica. Sin embargo, recientes investigaciones en las propiedades no lineales de los dispositivos han demostrado su versatilidad en el procesamiento fotónico de información y serán una pieza importante para la implementación de redes WDM.

Para nuestro sistema de comunicación óptico se utilizará un amplificador SOA, un diagrama esquemático de este es mostrado en la figura 3.7. La mayoría de los dispositivos ópticos modernos están hechos de una combinación de materiales semiconductores, metales y aislante, entre los cuales se incluyen: sílice (Si), galio (Ga), arsénico (As), indio (In), fósforo (P) y germanio (Ge).

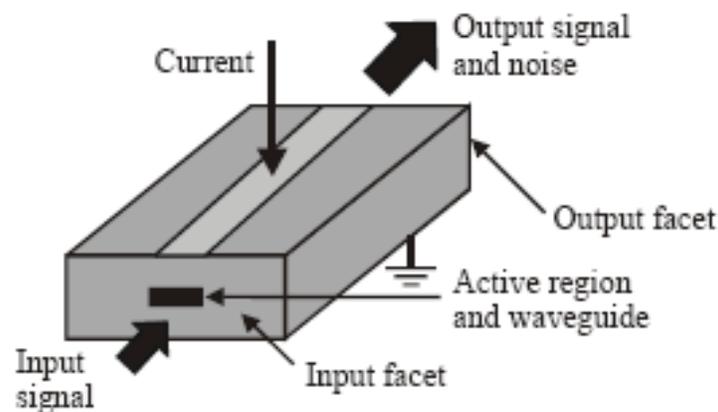


Figura 3.7 Diagrama esquemático de un Amplificador Óptico de Semiconductor

El dispositivo maneja una corriente eléctrica, como medio de bombeo, y en la parte de la región activa del dispositivo es donde se proporciona la ganancia; la cual es generada por emisión estimulada, como se muestra en la figura 3.8. Esta emisión se produce cuando la energía del fotón induce una transición de una partícula de un nivel alto a un nivel de energía más bajo, en el proceso se emite un fotón clonado del mismo modo que el fotón inicial; es decir, a la misma frecuencia, polarización, fase y dirección. Estos dos fotones en turno pueden servir para estimular la emisión de dos fotones adicionales y continuar de esta manera la amplificación de la señal. La señal de salida que

corresponde a una señal de entrada amplificada es acompañada de ruido, este ruido es consecuencia de la amplificación de la emisión espontánea y del ruido mismo que entra al amplificador.

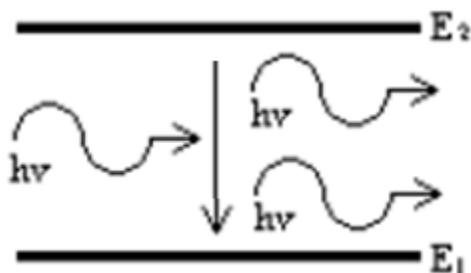


Figura 3.8 Diagrama del proceso de emisión estimulada en un sistema de dos niveles, E₂ nivel superior y E₁ nivel inferior

Los amplificadores SOA son sensitivos a la polarización, esto es debido a un número de factores que incluyen la estructura de guía de onda y la ganancia del material. La sensibilidad de polarización puede ser mejorada mediante el uso de guía de onda con sección transversal cuadrática y del material cuántico. La ganancia de un SOA es directamente afectada por la potencia de señal de entrada y por el ruido interno generado en el proceso de amplificación. Cuando la potencia de la señal de salida se incrementa lo suficiente la ganancia disminuye, a este punto de corte es llamado potencia de salida de saturación ($P_{0,sat}$), y es mostrada en la figura 3.9. Este proceso de saturación puede causar distorsión en la señal significativamente; esto también puede limitar la ganancia alcanzable cuando el SOA es usado como un amplificador multicanal en sistemas WDM [52].

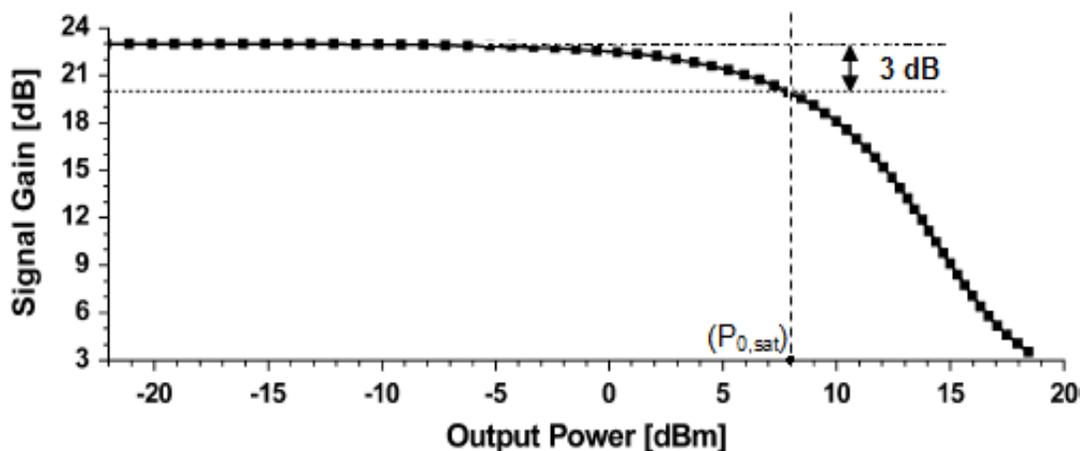


Figura 3.9 Gráfica de la ganancia típica de un SOA contra la potencia de la señal de salida

Los SOA son normalmente usados para amplificar señales de luz moduladas, si la potencia de la señal es muy alta a la entrada del amplificador, entonces la ganancia amplificada puede superar la potencia de saturación. Esto no sería un problema serio si el amplificador al generar la ganancia lo realizará en un proceso suficientemente rápido. Sin embargo, la ganancia en los SOAs está determinada por el tiempo de vida de los portadores (unos cuantos cientos de picosegundos). Esto significa que la ganancia del amplificador reacciona con relativa lentitud, para los cambios en la potencia de señal de entrada, lo cual produce efectos de distorsión de la señal conocido como “data patterning”. El comportamiento no lineal del SOA también puede causar problemas tales como el chirp y la generación de intermodulación, como puede ser el FWM.

Las aplicaciones principales de los SOAs en los sistemas de comunicaciones ópticas pueden ser clasificadas en tres áreas:

- Post-amplificación o amplificador booster, es utilizado para incrementar la potencia del láser.
- Amplificador en línea, es utilizado para compensar pérdidas en la fibra y otras que ocurren en la transmisión a lo largo del enlace.
- Pre-amplificación, es utilizado para mejorar la sensibilidad en el receptor. Este es el tipo de amplificador que se utiliza en la subcapa PMD a 100 GbE con alcance de 40 km.

La función de un pre-amplificador óptico es incrementar el nivel de potencia de una señal de datos óptica antes de la demodulación y la detección en el receptor; por consiguiente puede aumentar la sensibilidad del receptor. La parte del receptor consiste de un pre-amplificador óptico, un filtro óptico de banda angosta, un fotodiodo seguido por un circuito de detección y uno de decisión; el cual se detalla en el siguiente apartado. En la tabla 3.3 se muestran parámetros de un SOA pre-amplificador.

Parámetros de SOA	Valor
Ganancia	23 dB
Potencia de saturación de salida	8 dBm
Longitud de onda en el pico de ganancia	1310 nm
Figura de ruido del SOA	6 dB

Tabla 3.3 Parámetros de un SOA pre-amplificado

En el proceso de amplificación también se agrega un ruido a la salida de la señal, generado por el mismo amplificador, el ruido de un amplificador óptico se caracteriza por la figura de ruido (NF); el cual se define como la cantidad de degradación de la razón señal a ruido que entra al amplificador. El

SOA fundamentalmente tiene límites inferiores de NF, no es sustancialmente diferente de cualquier otro amplificador lineal. La NF es un parámetro importante en el sistema y debe ser lo más baja posible, ya que en parte determina el valor de la sensibilidad que pueda alcanzar el receptor.

El modelo de solución del SOA se basa en la integración analítica de la ecuación de densidad de propagación de fotones, a lo largo de la coordenada longitudinal y la integración numérica de las ecuaciones que caracterizan al material semiconductor. Los efectos no lineales varían en función de la separación entre canales, las interacciones más fuertes de un canal debido a los efectos FWM ocurren en sus vecinos más cercanos. Por lo tanto, en un plan de canales de espaciamiento uniforme de cuatro canales, la aparición del crosstalk es más fuerte en los dos canales centrales. En consecuencia, el más bajo rendimiento del sistema se observa en estos dos canales; por ello nuestras mediciones se realizarán en uno de estos canales.

3.1.6. Detector óptico

La función principal de un receptor óptico es convertir la señal óptica a una señal eléctrica, su principal componente es un fotodetector que convierte la luz en electricidad por medio del efecto fotoeléctrico. Los requerimientos de un fotodetector son similares a los de una fuente óptica, y son alta sensibilidad, rápida respuesta, bajo ruido, bajo costo y alta fiabilidad; además que su tamaño debe ser compatible con el tamaño del núcleo de la fibra. Estos requerimientos están mejor reunidos por fotodetectores hechos de materiales de semiconductores.

Un parámetro importante del detector es la responsividad R , el cual es un valor que indica la eficiencia del detector en la detección de luz y posteriormente la conversión en energía eléctrica. La responsividad puede ser expresada en términos de una cantidad fundamental, llamado eficiencia cuántica η . La eficiencia cuántica se define como la relación de los electrones generados entre el número incidente de fotones por segundo, y es expresado como:

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{in} / h\nu} = \frac{h\nu}{q} R$$

Despejando la responsividad R de la expresión anterior tenemos que:

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} \approx \frac{\eta\lambda}{1.24}$$

Donde $\lambda = c/\nu$ es expresado en micrómetros. La responsividad de un fotodetector se incrementa con la longitud de onda λ , simplemente porque más fotones están presentes para la misma potencia óptica. Tal dependencia lineal en λ no se espera por siempre, ya que eventualmente la energía del fotón llega a ser demasiado pequeña para generar electrones. En semiconductores, esto pasa para $h\nu < E_g$, donde E_g es la energía de la banda de separación; entonces la eficiencia cuántica baja a 0.

El ancho de banda de un fotodetector es determinado por la velocidad con la cual responde a las variaciones de la potencia óptica incidente. Es importante mencionar el concepto de tiempo de subida (T_r), definido como el tiempo sobre el cual sube la forma de la corriente de 10% a 90% de su valor final cuando la potencia óptica incidente es cambiada abruptamente. El tiempo de subida puede ser expresado como:

$$T_r = (\ln 9)(\tau_{tr} + \tau_{RC})$$

Donde τ_{tr} es el tiempo de circulación y τ_{RC} es la constante de tiempo del circuito equivalente RC. Los valores numéricos de τ_{tr} y τ_{RC} dependen del diseño en el detector y pueden variar sobre un amplio rango. El ancho de banda Δf es entonces expresado de la siguiente forma:

$$\Delta f = [2\pi(\tau_{tr} + \tau_{RC})]^{-1}$$

Junto con el ancho de banda y la responsividad, la corriente de oscuridad (I_d) de un fotodetector es el tercer parámetro importante del detector. La I_d es definida como la corriente generada de un fotodetector en la ausencia de cualquier señal óptica, ya sea por pérdida de luz o en la generación térmica de los pares electrón-hueco. En un buen fotodetector, la corriente de oscuridad debe ser despreciable ($I_d < 10$ nA).

Los fotodetectores de tipo PIN son los más comunes en los sistemas de transmisión por fibra óptica. Estos dispositivos se forman a partir de una capa central de material semiconductor ligeramente contaminado, llamado región intrínseca (i), la cual se coloca entre dos capas de material semiconductor, uno de tipo p y otro del tipo n. Cuando se le aplica una polarización inversa al fotodetector se crea una zona desértica (libre de portadores), en la región intrínseca, y en donde se forma un campo eléctrico. En la figura 3.10a se muestra la representación esquemática del

fotodetector PIN como un circuito externo; un diagrama simplificado de los niveles de energía se muestra en la figura 3.10b respectivamente [53].

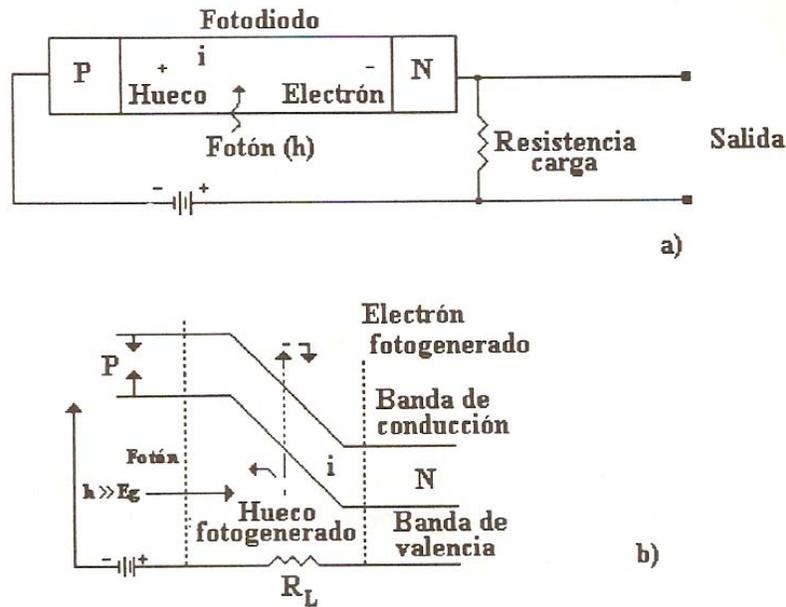


Figura 3.10 Representación esquemática y diagrama simplificado de un fotodetector óptico de tipo PIN

A manera de resumen en la tabla 3.4 se listan parámetros y valores de operación de tres fotodetectores de tipo PIN más comunes.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Si	Ge	InGaAs
Longitud de onda	λ	μm	0.4-1.1	0.8-1.8	1.0-1.7
Responsividad	R	A/W	0.4-0.6	0.5-0.7	0.6-0.9
Eficiencia cuántica	η	%	75-90	50-55	60-70
Corriente de oscuridad	I_d	nA	1-10	50-500	1-20
Tiempo de subida	T_r	ns	0.5-1	0.1-0.5	0.05-0.5
Ancho de banda	Δf	GHz	0.3-0.6	0.5-3	1-5
Voltaje de polarización	V_p	V	50-100	6-10	5-6

Tabla 3.4 Parámetros y valores de operación de fotodetectores de tipo PIN

El diseño de un receptor óptico depende principalmente de la forma de modulación usada por el transmisor, en particular depende si la señal es transmitida en forma analógica o digital; ya que la mayoría de los sistemas de onda de luz emplea la forma digital. La figura 3.11 muestra el diagrama de bloques de un receptor óptico, sus componentes están divididos en tres grupos: el extremo frontal, el canal lineal y la sección de recuperación de datos.

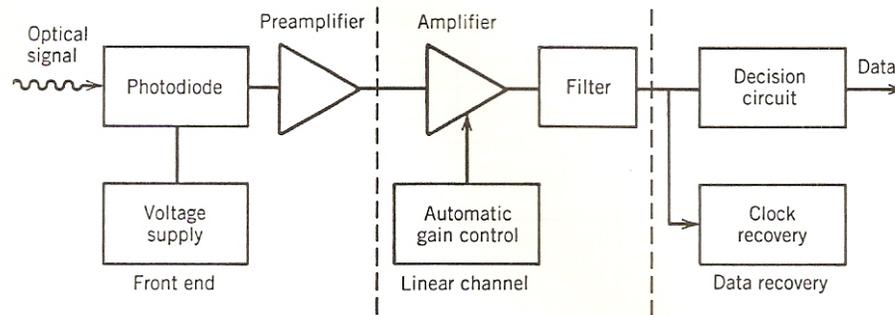


Figura 3.11 Diagrama de diseño de un receptor óptico

La parte del extremo frontal consiste de un fotodetector seguido por un preamplificador, la entrada de la señal óptica al fotodetector es conectada usando un esquema de acoplamiento similar al que se utiliza en los transmisores ópticos. El fotodetector convierte el flujo de bits ópticos a una señal eléctrica variante en el tiempo. La función del preamplificador es amplificar la señal eléctrica para un procesamiento más rápido. El diseño del extremo frontal requiere de una relación entre la velocidad de procesamiento y la sensibilidad, ya que el voltaje de entrada en el preamplificador puede ser incrementado por el uso de una resistencia de carga R_L . Aunque la carga R_L es grande, la realimentación negativa reduce la impedancia de entrada efectiva por un factor de G , donde G es la ganancia del amplificador.

El canal lineal consiste de un amplificador de alta ganancia (el amplificador principal) y un filtro paso bajas; algunas veces es incluido un ecualizador justo antes del amplificador para corregir el ancho de banda limitado del extremo frontal. El amplificador de alta ganancia es controlado automáticamente para limitar el voltaje de salida promedio a un nivel fijo. El filtro paso bajas reduce el ruido y la interferencia inter-símbolo (ISI), el ancho de banda del receptor es determinado por el filtro paso bajas usado en el canal lineal.

La sección de recuperación de datos consiste de un circuito de decisión y un circuito de recuperación de reloj; el propósito de este último es aislar la componente espectral de $f = B$ de la señal recibida. Esta componente espectral provee información acerca del slot del bit ($T_B = 1/B$), para el circuito de decisión; y por consiguiente ayuda a sincronizar el proceso de decisión. La recuperación de reloj es más difícil en el caso del formato NRZ, porque la señal recibida carece del componente espectral de $f = B$. Una técnica comúnmente usada genera tal componente por rectificación y cuadratura de la componente espectral de $f = B/2$, que puede ser obtenida por el paso de la señal recibida a través de un filtro paso altas.

El circuito de decisión compara la salida del canal lineal a un nivel de umbral; el umbral determina los tiempos de muestreo, realizado por el circuito de recuperación de reloj, y decidir si la señal corresponde al bit "1" o al bit "0". Por la existencia del ruido inherente en cualquier receptor, hay siempre una probabilidad finita en la que un bit podría ser identificado incorrectamente por el circuito de decisión. Los receptores digitales están diseñados para operar de tal manera que la probabilidad de error sea lo bastante pequeña (generalmente $< 10^{-9}$) [54].

Como se comentó al inicio del capítulo el receptor óptico comprende un pre-amplificador SOA, un demultiplexor y cuatro interfaces ópticas que están conectadas a cuatro receptores eléctricos. Las interfaces ópticas consisten de un fotodetector y un amplificador de trans-impedancia (TIA). El demultiplexor, similar al modelo del multiplexor, es un filtro paso banda Gausiano de tercer orden con un ancho de banda de 175 GHz, un crosstalk de 25 dB y con una pérdida de inserción de -5.2 dB. El fotodetector tiene un ancho de banda opto-electrónico de 3 dB a 25 GHz, modelado con un filtro Bessel de quinto orden y una responsividad de 0.7 A/W. El TIA tiene una ganancia de conversión de 1400 Ω , con una corriente de entrada de densidad de ruido de 18 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$. La interfase óptica conectada al receptor eléctrico tiene una potencia de sensibilidad de -13.2 dBm; utiliza una señal NRZ a 25.78 Gbps, con una ER de 10 dB y una OSNR de 40 dB a la salida del modulador.

3.2. Desempeño del sistema

Una vez que se ha realizado el diseño del sistema con los componentes descritos en la sección anterior, es importante medir el desempeño del sistema de comunicaciones óptico. En este apartado se describirán los parámetros de medición, los más relevantes que serán explicados son: el Bit Error Rate (BER) y el presupuesto de potencia.

3.2.1. Bit Error Rate

En los sistemas de telecomunicaciones, la razón de error es el número de bits de errores (elementos o bloques que son recibidos incorrectamente) entre el número total de bits (elementos o bloques que son enviados durante un intervalo de tiempo específico). Esta razón es más comúnmente llamada Bit Error Rate y es expresada de la siguiente manera:

$$BER = \frac{\text{número de errores}}{\text{número total de bits}}$$

El valor del BER está acotado entre los valores de 0 y 1, para un valor cercano a cero indica que el sistema es muy bueno, y para un valor cercano al 1 indica que el sistema es muy malo. Dentro de los objetivos establecidos en la estandarización de 100 GbE, se establece que el BER sea menor o igual a 10^{-12} . El BER no puede ser medido directamente en el dominio fotónico, para ser esta medición la señal óptica es convertida en una señal eléctrica, y la señal eléctrica es utilizada para medir el BER.

Para la medición del BER, el receptor convierte la señal óptica en un patrón de datos eléctricos, además de que recupera la señal de reloj y pasa los datos a un detector de error. El detector de error es el circuito de decisión, el cual compara la señal de datos de entrada (I) con un nivel de decisión (I_d) en un tiempo de decisión (t_d), el cual es determinado por el reloj en el receptor; lo ideal es que " t_d " este en el centro del tiempo del bit. El valor de muestra " I " fluctúa aleatoriamente en uno de dos valores establecidos, " I_1 " o " I_0 ", dependiendo del bit recibido; es decir, si es un "1" o un "0". Si el valor de la muestra (I) es más grande que el nivel de decisión (I_d), el circuito de decisión lo considera que ha sido transmitido un "1". Si por el contrario el valor de " I " es menor al nivel de " I_d ", se considera que se ha enviado un "0". Si se asume que las fluctuaciones de los niveles siguen una distribución de probabilidad Gaussiana, con una anchura σ (varianza) centrado en el nivel de señal promedio; entonces el BER puede ser calculado analíticamente, usando la expresión siguiente [55]:

$$BER = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{I_1 - I_d}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{I_d - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) \right]$$

donde erfc representa la función de error complementaria definida como:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy$$

además se asume que:

$$\frac{I_d - I_0}{\sigma_0} = \frac{I_1 - I_d}{\sigma_1}$$

la expresión anterior es utilizada para minimizar el error. Por lo tanto, el BER puede ser reescrito como:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right)$$

donde Q es el factor de calidad y esta dado por:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

3.2.2. Presupuesto del potencia

Un punto clave en el diseño de redes en sistemas DWDM, es calcular el presupuesto de potencia óptica basado en la estimación de los niveles de potencia óptica en toda la red. El transmisor óptico es diseñado para operar con una potencia de salida aproximadamente constante, se puede establecer un rango de potencia de salida donde la potencia del transmisor puede variar. El receptor óptico esta diseñado para operar con un BER aceptable; es decir, la potencia de entrada esta dentro del rango entre la potencia máxima de sobrecarga y la potencia mínima de sensibilidad. Para los propósitos de este proyecto de tesis y por especificación del estándar IEEE 802.3ba, el BER máximo será de 10^{-12} . La diferencia entre la potencia mínima a transmitir y la sensibilidad mínima en el receptor es conocida como presupuesto de potencia óptica.

Para garantizar que el diseño de un sistema de comunicaciones óptico es fiable, el presupuesto de potencia es un valor que debe ser igual o más grande a la suma de las pérdidas, el valor es calculado en la trayectoria del transmisor hacia el receptor óptico más un margen de diseño. Todas estas pérdidas son originadas por conectores, uniones, atenuación de la fibra y penalidades de potencia. Para evitar daños en el receptor, también se debe asegurar un margen mínimo de atenuación. La figura 3.12 muestra el cálculo del presupuesto de potencia y el margen de atenuación.

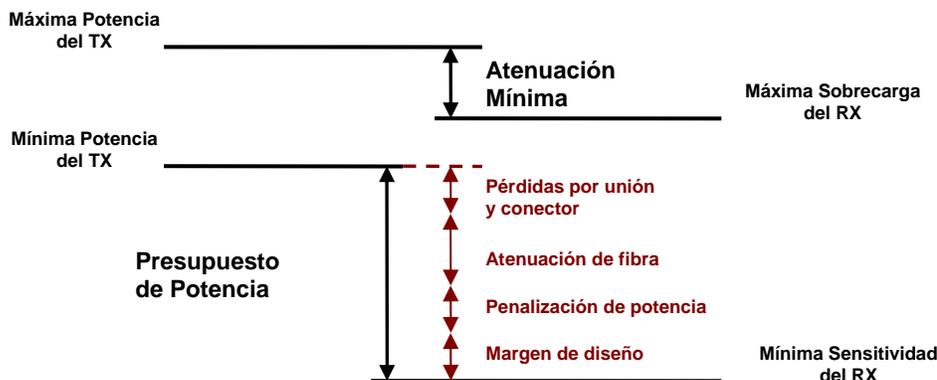


Figura 3.12 Cálculo del presupuesto de potencia y la atenuación mínima en un sistema óptico

El cálculo aproximado del presupuesto de potencia, considerando los componentes de sistema óptico de la subcapa PMD estudiado, se muestran en la tabla 3.5. Este cálculo del presupuesto de potencia esta realizado para las tres potencias de salida de los moduladores, y que también se utilizarán en las simulaciones del capítulo siguiente.

Componente	Perdidas y ganancia	Potencia a la salida del Láser de Modulación Externa		
		0 dBm	2 dBm	4 dBm
Multiplexor	-3.7 dB	-3.7 dBm	-1.7 dBm	0.3 dBm
Fibra	-18 dB	-21.7 dBm	-19.7 dBm	-17.7 dBm
Acoplamiento	-2 dB	-23.7 dBm	-21.7 dBm	-19.7 dBm
Amplificador (SOA)	+23 dB	-0.7 dBm	1.3 dBm	3.3 dBm
Demultiplexor	-5.2 dB	-5.9 dBm	-3.9 dBm	-1.9 dBm
Total		-5.9 dBm	-3.9 dBm	-1.9 dBm

Tabla 3.5 Cálculo del presupuesto de potencia del sistema óptico de la subcapa PMD, con valores típicos de pérdidas y ganancias de los componentes

De acuerdo a este cálculo preliminar, donde se asume un amplificador no saturado, podemos concluir que el presupuesto de potencia es suficiente para las necesidades del enlace estudiado. Un análisis más apegado a la realidad, basado en simulaciones, se presenta en el capítulo siguiente.

4. Análisis

4.1. Introducción

En este capítulo se realizará un análisis exhaustivo de resultados que son obtenidos a través de simulaciones. Para tales simulaciones fue necesario recurrir a un paquete de simulación de sistemas ópticos de transmisión escrito en LabVIEW, cuya función principal es simular el sistema óptico en estudio, que se basa en un diagrama de módulos de la subcapa PMD propuesta por la Task Force 802.3ba. En él se introducen valores de los parámetros de cada uno de los dispositivos; los cuales son: el transmisor óptico, modulador de electro-absorción, el multiplexor, el medio de transmisión (SMF), el amplificador óptico de semiconductor, demultiplexor y por último el detector óptico. En la segunda sección se presentan valores de los parámetros para cada dispositivo, los cuales son especificados en base a estudios matemáticos y estándares, a partir de su definición en el capítulo anterior.

Las simulaciones proporcionan resultados para la generación de gráficas y posteriormente se realizará un análisis del comportamiento del BER, la ER y el OSNR a la salida del SOA. En la sección de resultados se realiza una descripción del comportamiento del sistema óptico con base en la representación de las gráficas; para el BER, la ER y el OSNR. La descripción se realiza en función de la distancia de la fibra (de 0 a 40 km), donde se observan dos tipos de comportamiento: uno para distancias cortas (de 0 a 12 km) y otro para distancias largas (de 12 a 40 km).

Finalmente, se realiza un análisis de resultados con base en los dos tipos de comportamientos, obtenidos de las gráficas específicamente del BER. En el primer comportamiento se identifica un fenómeno físico, denominado “No Linealidades” (NL), esto es originado por la elevada potencia que recibe el amplificador óptico. El segundo comportamiento hay un decremento de la potencia conforme aumenta la distancia, lo que se origina que haya una degradación del OSNR, y como consecuencia es más difícil para el detector óptico diferenciar el símbolo correspondiente a la señal recibida.

4.2. Descripción del simulador

Para la realización de las simulaciones se utilizó un paquete de simulación de sistemas ópticos de telecomunicaciones, desarrollado por Bell Labs en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Dicho paquete está escrito en el lenguaje gráfico de programación llamado LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) y desarrollado por National Instruments. La naturaleza gráfica de este lenguaje, en contraste con los lenguajes tradicionales basados en texto, lo hace ideal para mediciones, automatización, control de instrumentación, adquisición de datos y aplicaciones de análisis de datos; pero sobre todo para la simulación de sistemas electrónicos u ópticos.

LabVIEW utiliza el concepto de un elemento de programación, similar a una subrutina llamado “Instrumento Virtual” (IV); un “IV” consiste de un panel frontal, diagrama de módulos y un ícono que representa el programa. El panel frontal es usado para desplegar controles e indicadores para el usuario, mientras el diagrama de módulos contiene el código del “IV”. El ícono, el cual es una representación gráfica del “IV”, tiene conectores para programas de entradas y salidas de señales. Los lenguajes de programación, tales como “C” y “BASIC”, usan funciones y subrutinas como elementos de programación; en LabVIEW se usa el “IV”. El “IV” puede ser usado como la interface de usuario o como subrutina en una aplicación [56], esta flexibilidad permite a LabVIEW utilizarlo para crear e interconectar de manera sencilla un gran conjunto de subrutinas o “IVs”. Además, el paquete puede ir creciendo conforme se agregan nuevos “IVs”, de acuerdo a las necesidades de simulación.

En concreto, el paquete de simulación de sistemas ópticos está constituido por cientos de “VIs”, cada uno de los cuales representa diferentes módulos, en donde se realiza el procesamiento de una señal óptica; caracterizada por una estructura de datos específica. Así pues, existen módulos para equipos

de transmisión, codificador de datos, conectores, diferentes tipos de fibras ópticas, amplificadores tipo EDFA o de semiconductor, filtros ópticos y eléctricos, detectores, sistemas digitales de decisión, etc.; todos ellos están interconectados y controlados por una subrutina o “IV”. Los parámetros propios de cada simulación, se introducen en el panel frontal de cada instrumento o desde el “IV” de orden superior conocido como “main”; además, cada módulo consta de sus propios valores por defecto (default). El paquete también es capaz de leer un conjunto de parámetros necesarios para una simulación, esto se realiza a partir de un archivo con formato específico, lo que facilita la reproducción de simulaciones.

En la Figura 4.1, se muestra el diagrama de módulos principales de que consta el paquete de simulación que se utilizó. Para el tipo de simulación que se llevo a cabo se utilizaron los módulos que son descritos a continuación, sobre los que fue fluyendo la estructura de datos que representa a la señal óptica. La señal es “grosso modo” una señal muestreada, que representa el campo eléctrico escalar y adicionalmente un conjunto de “noise bins” para representar la potencia espectral del ruido. El primer módulo es el láser tipo CW, que es modulado con el modulador de electro-absorción y este a su vez es controlado por el generador de Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria (PRBS), en el módulo de *Data Encoder*. En nuestra simulación no se utilizó el módulo *EAM Pulse Carver*, ya que el formato de modulación fue NRZ, ni tampoco fue necesario utilizar ningún amplificador tipo “Booster”. El siguiente módulo a ser utilizado fue el multiplexor, que en nuestro caso multiplexa las cuatro señales a 25 Gbps; cada una a lambda diferente.

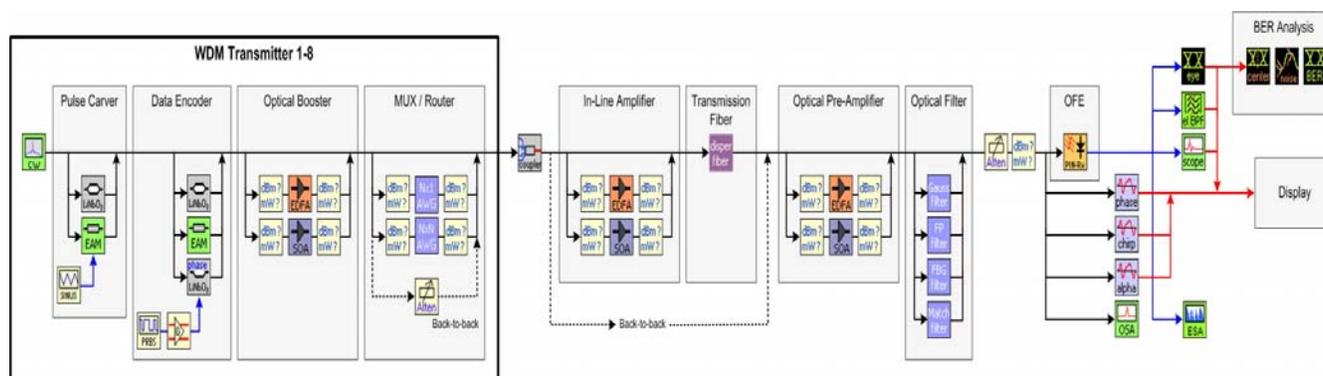


Figura 4.1 Diagrama de módulos del simulador de sistemas ópticos LabVIEW

El módulo de amplificador en línea no se utilizó, el siguiente es el de la fibra de transmisión, para nuestra simulación es la SMF que será modificada con los valores ya especificados en tramos de 2.5 km. El siguiente módulo corresponde a la pre-amplificación óptica del SOA, donde se introducen valores igualmente ya establecidos. Mediante un filtro óptico se demultiplexan las señales para ser analizadas, cada una es introducida al módulo del OFE (optical front-end) que es parte del detector óptico.

En última parte es importante mencionar que también el simulador LabVIEW proporciona diagramas de ojo y analizador de espectro óptico de las señales recibidas. Sin embargo, el módulo más importante (y complicado) es aquel que realiza el análisis del BER, ya que utiliza procedimientos estadísticos complejos, cuya explicación está fuera de los alcances de esta tesis.

4.3. Parámetros de los dispositivos

Es esta sección se definen parámetros de los dispositivos que conforman el sistema óptico, en específico de la subcapa PMD. Para los valores de parámetros se tuvo una amplia consulta entre los integrantes del grupo HSSG, realizada durante las reuniones que este grupo llevó a cabo y que está constituido por expertos en cada una de las áreas de especialidad. Algunos otros parámetros se obtuvieron de las hojas de especificaciones de algunos fabricantes y en el caso de no contar con ella (menos de ellos), se utilizó el sentido común y la experiencia.

La tabla 4.1 muestra los valores de parámetros de los dispositivos del sistema óptico, los cuales son ingresados al simulador LabVIEW. Al terminar de ejecutar la simulación se despliega en una ventana los resultados del BER, el ER y la OSNR a la salida del SOA, y con base en ellos son generadas sus gráficas; para posteriormente ser descritas en la siguiente sección de resultados.

Dispositivo	Parámetro	Valor	Unidad
Transmisor óptico	Frec. DFB 1 (1308.57 nm)	229.1	THz
	Frec. DFB 2 (1310.85 nm)	228.7	THz
	Frec. DFB 3 (1313.15 nm)	228.3	THz
	Frec. DFB 4 (1315.46 nm)	227.3	THz
	Razón de Extinción	4, 6, 8 y 10	dB
	Potencia	0, +2, +4	dBm
	OSNR	40	dB
Multiplexor	Frecuencia de modulación	25.781	Gbps
	Ancho de banda	175	GHz
	Crosstalk	25	dB
Fibra óptica	Perdidas de inserción	-3.7	dB
	Atenuación	-0.45	dB/km
	Dispersión@1310 nm	-0.20	ps/nm/km
Amplificador Óptico de Semiconductor	Slope@1310 nm	-6.8E-5	ps/nm ³ /km
	Ganancia	23	dB
	Potencia de saturación	8	dBm
	Figura de ruido	6	dB
	Ancho de ganancia	60	nm
Demultiplexor	λ de Pico de ganancia	1310	nm
	Ancho de banda	175	GHz
	Crosstalk	25	dB
Receptor Óptico	Perdidas de inserción	-5.2	dB
	Responsividad	0.70	A/W
	Ancho de banda	25	GHz
	Trans-Impedancia	1400	Ω
	Densidad de corriente de ruido	18	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
	Corriente de oscuridad	20	nA

Tabla 4.1 Valores de parámetros de los dispositivos que conforman el sistema óptico de la subcapa PMD

4.4. Resultados de las simulaciones

En esta sección se presentan los resultados generados por el simulador, anteriormente descrito, para el estudio, análisis y obtención de conclusiones. Los resultados se obtienen a partir de ejecutar en el

LabView los valores de parámetros de los dispositivos que conforman el sistema óptico, previamente mencionados en la sección anterior. Los parámetros importantes que se tomaron en cuenta son los siguientes: los ERs de 4, 6, 8 y 10 dB, la OSNR de 40 dB, una NF de 6 dB para el SOA y tres valores de potencia a la salida del modulador externo de 0, +2 y +4 dBm.

Como ya se mencionó, el simulador proporciona resultados, los cuales representan valores que serán graficados más adelante. Estos valores nos ayudarán a medir el desempeño del sistema a partir de los siguientes parámetros: -Log (BER), la Extinction Ratio y la OSNR, ambos a la salida del SOA; y que son graficados en función de la distancia del enlace, con el valor máximo de 40 km.

4.4.1. Comportamiento del sistema con ER de 4 dB

En esta primera descripción del sistema óptico con ER de 4 dB, el parámetro a medir es el -Log (BER), en función de la distancia de la SMF. El umbral para el -Log (BER) es de 12, de acuerdo a los objetivos especificados por la Task Force 802.3ba; por lo tanto, para valores superiores a este umbral el comportamiento del sistema se considera bueno o sin errores. En la figura 4.2 se muestra gráfica de -Log (BER), para tres valores de potencia (EMLs = 0, +2 y +4 dBm) en distancias que van de los 0 a 40 Km.

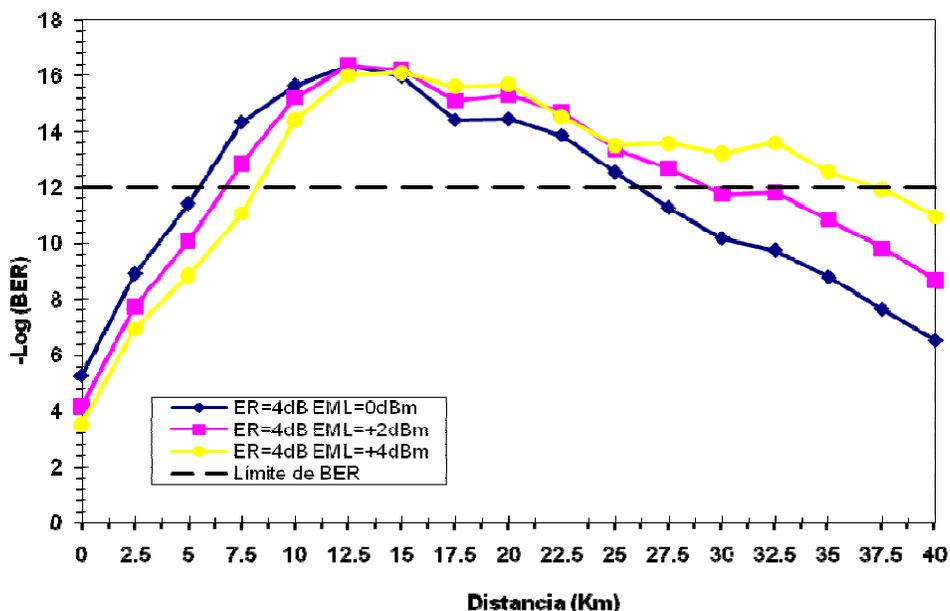


Figura 4.2 Gráfica del BER en función de la distancia de la SMF para un ER = 4 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA

En la figura se puede observar dos tipos de comportamientos del sistema óptico, en función de la distancia del enlace. Primero se observa un comportamiento de forma creciente, en los primeros 12 km de fibra, a este primer intervalo de la gráfica le llamaremos zona “A” (distancias cortas). Posteriormente, después de los 12 km y hasta los 40 km de la fibra, se observa un comportamiento monotonamente decreciente del $-\text{Log}(\text{BER})$, y lo llamaremos zona “B” (distancias largas). Particularizando aún más se observa que para potencias grandes, tomando el caso de $\text{EML} = +4$ dBm, el desempeño del sistema es menor en la zona “A”, mientras que en la zona “B” el desempeño del sistema es mejor. Por el contrario, para potencias bajas ($\text{EML} = 0$ dBm) el desempeño del sistema es mejor en la zona “A”, mientras que en la zona “B” el desempeño del sistema es menor; lo anteriormente descrito es en términos del $-\text{Log}(\text{BER})$. Podemos decir entonces que para una misma potencia su comportamiento es diferente, dependiendo si esta en distancias cortas o distancias largas.

Una observación adicional que se aprecia en la gráfica es que para distancias muy cortas el $-\text{Log}(\text{BER})$ cae muy por debajo del umbral del BER. Posteriormente, conforme se avanza hay una “cresta” que sobrepasa el umbral, el cual es un punto de comparación de los dos comportamientos ya mencionados. En distancias largas el $-\text{Log}(\text{BER})$ va disminuyendo y pasa por debajo del umbral nuevamente; por lo tanto, para el caso del ER de 4 dB no se alcanza el límite mínimo permitido del BER y el desempeño del sistema no es en general aceptable. Más adelante se observará que conforme va aumentando el valor del ER los valores de $-\text{Log}(\text{BER})$ también van aumentando, por lo que se tiene un mejor desempeño del sistema. El comportamiento del BER, respecto a su crecimiento y disminución en función de la distancia, se explicará más adelante en la sección de análisis de resultados.

El siguiente parámetro a medir en el desempeño del sistema es la ER a la salida del SOA, en función de la distancia de la fibra para los tres valores de potencia EMLs, mostrada en la figura 4.3. En este caso se observa que independientemente de la distancia la ER presenta un comportamiento monótono ascendente; es decir, que siempre va creciendo. Los valores van creciendo a medida que aumenta la distancia de la fibra; es decir, que en distancias cortas se empieza con una mayor degradación y en distancias largas se va teniendo una disminución en la degradación, hasta prácticamente alcanzar su valor inicial (para este caso el valor del ER de 4 dB).

Otra observación que se aprecia en la gráfica, es que las potencias mayores (EML = +4 dBm) se encuentran por debajo de las potencias menores (EML = 0 dBm); es decir, que una señal más potente sufrirá una degradación mayor de su ER en comparación con una señal más débil.

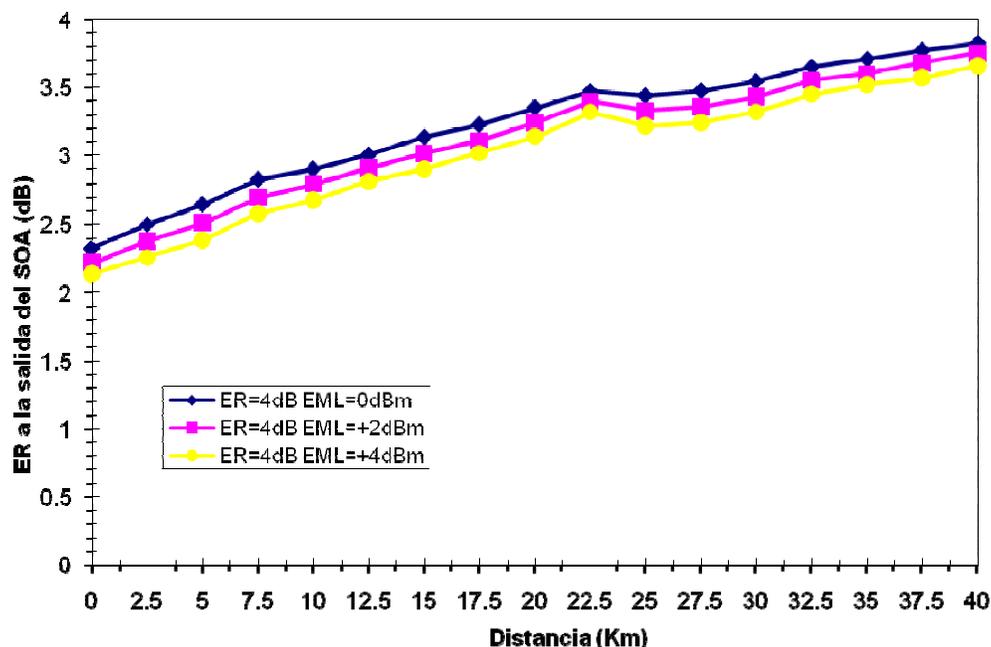


Figura 4.3 Gráfica del ER a la salida del SOA en función de la distancia de la SMF para un ER = 4 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA

Por último, el parámetro de desempeño del sistema a medir es la OSNR a la salida del SOA, en función de la distancia de la fibra, mostrado en la figura 4.4. Aquí, al contrario de la ER se observa un comportamiento monótonico descendente en función de la distancia de la fibra; además, en distancias cortas el OSNR tiene una menor degradación y conforme se avanza la degradación va en aumento.

Una observación adicional que se aprecia en la gráfica, es para potencias que son mayores (EML = +4 dBm), el sistema tiene un mejor desempeño; por el contrario, para potencias menores (EML = 0 dBm) el sistema se comporta peor. Lo anterior indica que en relación a la OSNR, al final del enlace, las potencias mayores tienen mejor desempeño que las potencias menores.

Cabe mencionar que la forma de la gráfica del ER y la del OSNR es totalmente diferente, ya que la primera se comporta ascendente y la segunda decrece; esto se debe a que la OSNR es independiente de la ER de la señal que se introduce al sistema. El comportamiento descrito,

mostrado en la figura 4.4, se aplica en los casos de ER = 6, 8, y 10 dB; por lo tanto se obtienen las mismas conclusiones.

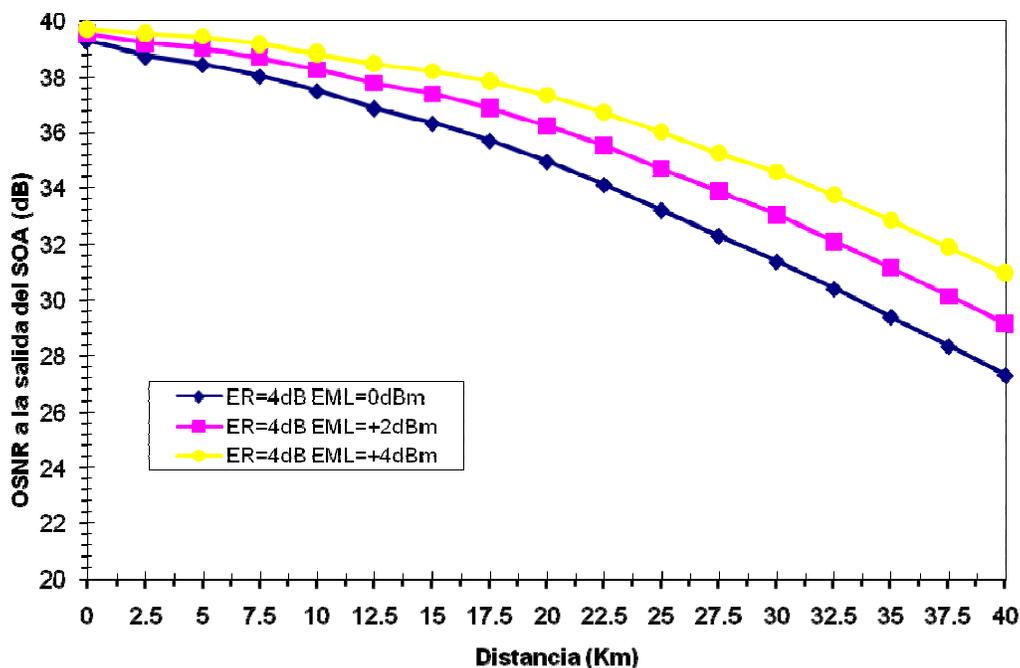


Figura 4.4 Gráfica del OSNR a la salida del SOA en función de la distancia de la SMF para un ER = 4 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA

4.4.2. Comportamiento del sistema con ER de 6 dB

Ahora para el comportamiento del sistema con una ER de 6 dB, se mide el parámetro de desempeño del BER, mostrado en la figura 4.5. En este caso, se puede observar un comportamiento similar a la figura 4.2 (ER de 4 dB), pero con valores ligeramente mayores. Esto se debe a que el ER de la señal de entrada tiene un valor mayor; por lo tanto, se esperaría tener también un mejor desempeño del sistema en general. Su comportamiento es monótono ascendente para distancias cortas y monótono descendente para distancias largas, en concordancia con lo observado anteriormente (Figura 4.2).

Particularizando se observa en la gráfica que la potencia más alta (EML = +4 dBm), presenta un BER por debajo del umbral establecido [-Log (BER) = 12]; en la distancia de 0 km. Pero su contra parte, en distancias largas, se observa que tiene un mejor desempeño y se encuentra por arriba del umbral, en

comparación con las otras dos potencias. Para la potencia baja (EML= 0 dBm) el BER está por encima del umbral establecido, distancias cortas; sin embargo, en distancias largas la potencia decrece y para la distancia máxima la potencia se encuentra por debajo del umbral. En general, se puede decir que el desempeño del sistema para un ER de 6 dB tiene un mejor desempeño comparado con el ER de 4 dB.

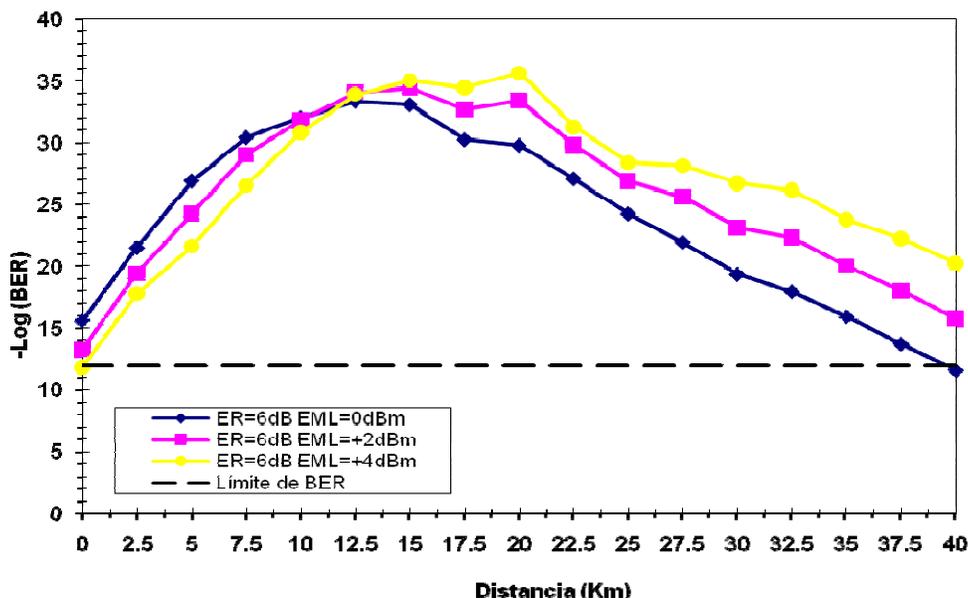


Figura 4.5 Gráfica del BER en función de la distancia de la SMF para un ER = 6 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA

El siguiente parámetro a medir es el ER a la salida del SOA, en función de la distancia de la fibra, para los tres valores de potencias EMLs; mostrado en la Figura 4.6. En este caso, se observa que el comportamiento es casi igual que al de la Figura 4.3 (ER de 4 dB); es decir, se presenta un comportamiento monotónico ascendente, a medida que aumenta la distancia de la fibra.

También se observa que las potencias EMLs casi alcanzan el valor inicial del ER (6 dB) a los 40 km; es decir, que en distancias cortas empieza con una mayor degradación y en distancias largas va teniendo una disminución en la degradación. Al igual que para la ER de 4 dB, la potencia mayor (EML = +4 dBm) se encuentran por debajo de potencia menor (EML = 0 dBm), como se mencionó anteriormente.

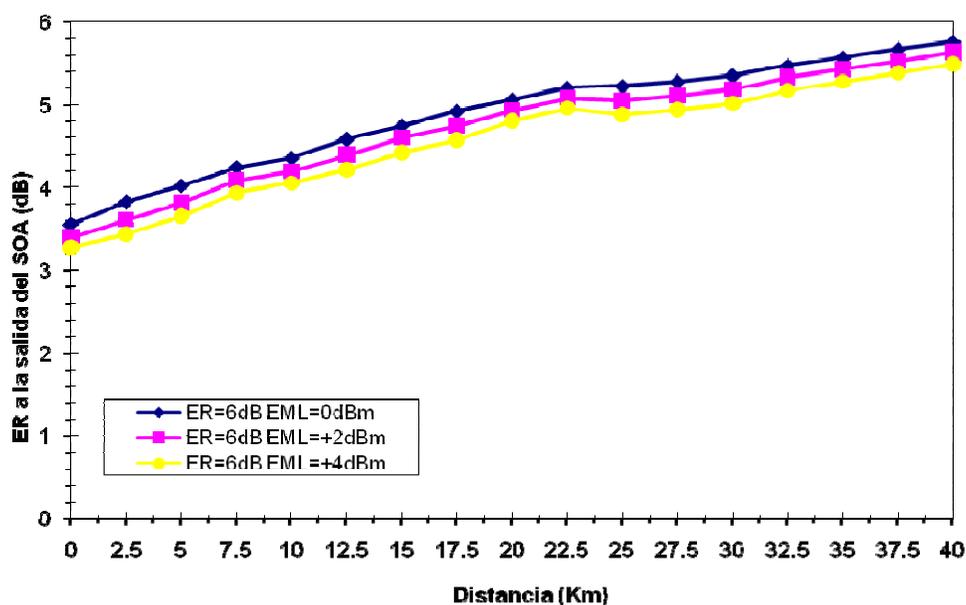


Figura 4.6 Gráfica del ER a la salida del SOA en función de la distancia de la SMF para un ER = 6 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA

Como ya se mencionó, la descripción del OSNR en este caso es innecesaria, ya que el OSNR es independiente del ER; esto fue comprobado en las correspondientes simulaciones y por lo cual ya no son mostradas.

4.4.3. Comportamiento del sistema con ER de 8 dB

La siguiente descripción del comportamiento del sistema es con una mejor ER (8 dB), donde se mide el desempeño del BER, mostrado en la Figura 4.7. Aún cuando el comportamiento es similar a las anteriores gráficas del BER, los valores aumentaron significativamente más, por lo que se esperaría tener cada vez más un mejor desempeño del sistema. En este caso, por ejemplo, no hay combinaciones de distancia y potencia que se encuentren por abajo del umbral establecido. Igualmente se observa un comportamiento monótono ascendente, en distancias cortas, y un comportamiento monótono descendente, en distancias largas; todo esto en concordancia con nuestras observaciones previas.

Para esta ER ya se puede apreciar que las tres potencias EMLs se encuentran por encima del umbral establecido [$-\text{Log}(\text{BER}) = 12$]. En general, el desempeño del sistema para una ER de 8 dB es aún mejor comparado al ER de 6 dB.

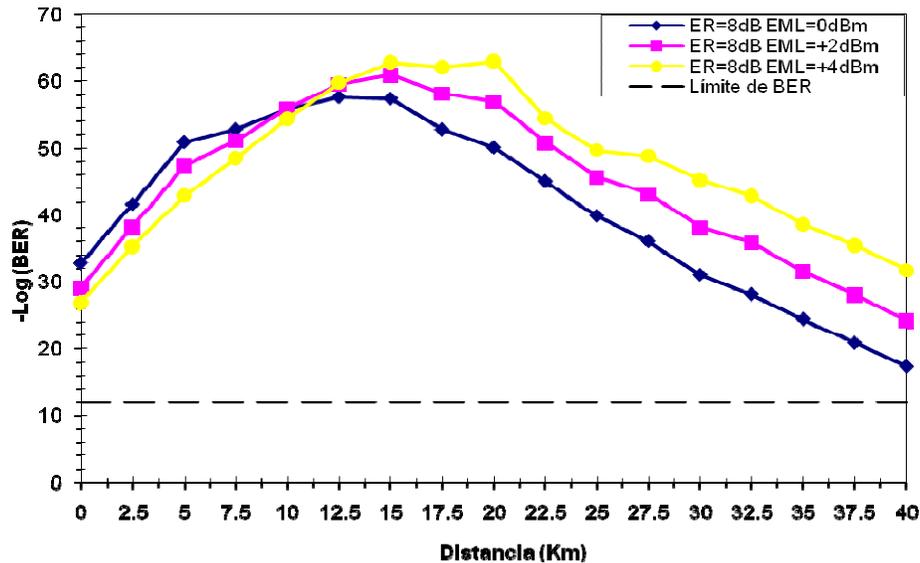


Figura 4.7 Gráfica del BER en función de la distancia de la SMF para un ER = 8 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA

El siguiente parámetro a describir es la ER a la salida del SOA, en función de la distancia de la fibra, para los tres valores de potencias EMLs; mostrado en la Figura 4.8. Igual que en las anteriores gráficas de ER, se observa un comportamiento monótonico ascendente, a medida que aumenta la distancia de la fibra; también, que las potencias EMLs alcanzan casi el valor inicial del ER (8 dB) a los 40 km.

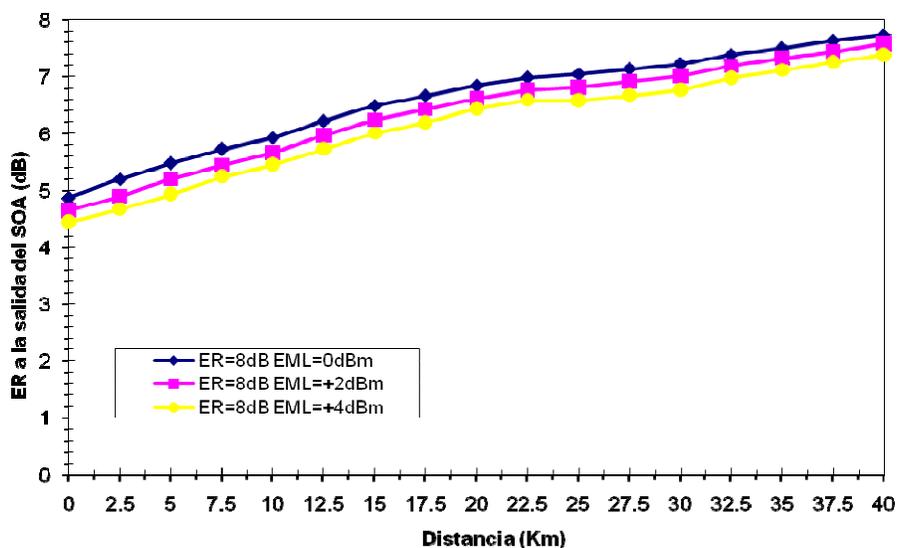


Figura 4.8 Gráfica del ER a la salida del SOA en función de la distancia de la SMF para un ER = 8 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA

4.4.4. Comportamiento del sistema con ER de 10 dB

Por último, se realiza una descripción del comportamiento del sistema con la mayor ER propuesta (10dB), para medir el parámetro de desempeño del BER, mostrado en la Figura 4.9. Como se aprecia en la gráfica, los valores aumentaron mucho más, por lo que se esperaría que este sistema tenga el mejor desempeño; respecto a los demás valores de ER.

Algo adicional que se puede mencionar, es el comparativo de la gráfica del BER para el ER de 4 dB respecto a de 10 dB. Lo que se observa, es que los valores del ER de 10 dB son muy altos, en promedio 12 veces más el valor respecto al ER de 4 dB, esto al inicio de la distancia del sistema. El siguiente comportamiento es el ascenso de la potencia llegando al máximo valor, el de la “cresta”, que es de aproximadamente 6 veces el valor máximo con respecto al ER de 4 dB. La parte de distancias largas el comportamiento es igual que todas las anteriores gráficas, de forma descendente; solo que los valores del ER de 10 dB son en promedio 4 veces mayor respecto al ER de 4 dB. En general, las potencias EMLs siguen el mismo comportamiento de las demás gráficas del BER, para los cuatro valores de las ER (4, 6, 8 y 10 dB).

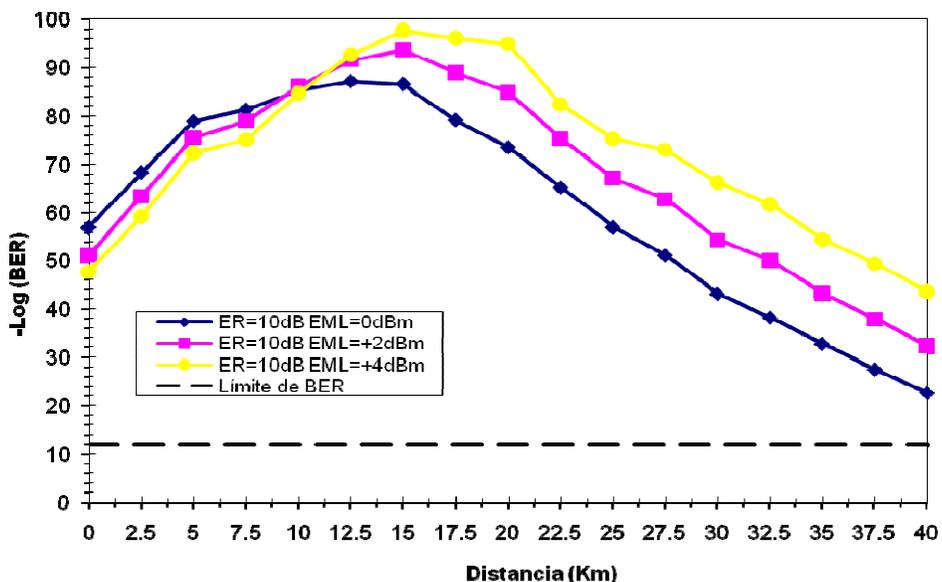


Figura 4.9 Gráfica del BER en función de la distancia de la SMF para un ER = 10 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA

Por último, la descripción el parámetro a medir es la ER a la salida del SOA, en función de la distancia de la fibra para los tres valores de potencia EMLs, mostrada en la figura 4.10. Igual que al principio de las anteriores gráficas de ER, se observa un comportamiento monotónico ascendente, a medida que aumenta la distancia de la fibra. Además que las potencias EMLs alcanzan casi el valor inicial del ER de entrada (10 dB) para los 40 km.

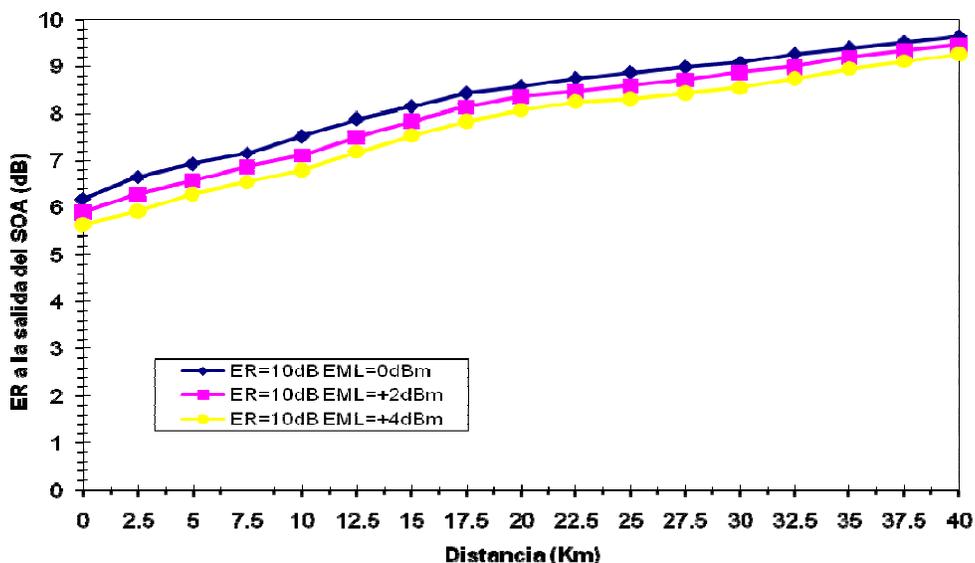


Figura 4.10 Gráfica del ER a la salida del SOA en función de la distancia de la SMF para un ER = 10 dB, potencias EMLs = 0, +2 y +4 dBm, un OSNR = 40 dB y una NF =6 dB del SOA

4.5. Análisis de resultados

En esta sección se discutirá el análisis de los resultados, que fueron descritos en la sección anterior, para un mejor entendimiento del sistema. En el análisis del BER, para todas las gráficas presentadas en la sección anterior, se apreciaron dos comportamientos en función de la distancia: primeramente, un comportamiento de forma creciente en distancias cortas que comprenden los primeros 12 km; y un segundo comportamiento de forma decreciente en distancias largas que comprenden de los 12 a 40 km. Estos dos comportamientos están diferenciados por una “cresta” (valor máximo del BER), la cual es notoriamente visible en todas las gráficas, y además en los cuatro ERs analizados superan el umbral [-Log (BER) = 12]. Más adelante se realizarán tablas comparativas de los resultados para ambos comportamientos.

Para el análisis del primer comportamiento (distancias cortas), se observa un crecimiento de los valores del -Log (BER) respecto a la distancia de la fibra. Tal comportamiento se debe a que cuanto menor es la distancia de la fibra óptica mayor es la potencia incidente a la entrada del SOA; por lo que en un inicio los valores del -Log (BER) son muy bajos y conforme aumenta la distancia también aumentan los valores del -Log (BER). Lo anterior indica que la reducción del -Log (BER) es en este caso debido a un efecto físico llamado “comportamiento No Lineal” (NL), que es causado en el SOA; ya que como es sabido este fenómeno es más notorio cuanto mayor es la potencia de entrada al amplificador óptico. Lo anteriormente descrito puede ser confirmado si observamos las gráficas de los ERs contra la distancia de la fibra, que fueron analizados en la sección anterior. De ahí se observa que los valores de los ERs son menores (de 2 a 4 dB del valor inicial) para cuando las distancias también lo son y van en aumento, conforme aumenta también la distancia, hasta llegar casi a su valor inicial al final de los 40 km. Esta reducción del ER al inicio es debido a las NL que ocasiona que haya distorsión en la señal, que caracteriza el desempeño del sistema óptico, reduciendo en consecuencia el -Log (BER) del sistema.

En lo referente al análisis del segundo comportamiento (distancias largas), se observa un decremento de los valores del -Log (BER), esto es apreciable para los cuatro casos analizados; es decir, a mayor distancia mayor es el decremento del -Log (BER). En este segundo comportamiento las NL no son el factor del decremento y se considera que el sistema trabaja en un régimen lineal; la causa del decremento del -Log (BER) es por consiguiente otro factor. Podemos deducir que conforme se aumenta la distancia de la fibra disminuye la potencia de entrada al SOA, pero a su vez el SOA produce ruido por la Amplificación de Emisión Espontánea (ver capítulo anterior). Además de la

disminución en la potencia a la entrada del SOA se agrega el ruido, propio del sistema, a la señal que contiene la información, que por ende tiene un efecto más perjudicial. En consecuencia a la salida del SOA tenemos una señal de bajo OSNR, respecto al valor inicial (40 dB), a esto se le llama una degradación de OSNR. Este fenómeno explica el decremento del $-\text{Log}(\text{BER})$, conforme aumenta la longitud de la fibra; es decir, disminuye la potencia. Lo anterior se confirma mediante la observación de la gráfica del OSNR (Figura 4.4), en función de la distancia de la fibra presentada en la sección anterior, en donde para los cuatro casos las gráficas son iguales. En esta gráfica se observa que conforme aumenta la distancia de transmisión, el OSNR medido en el detector también disminuye, lo cual confirma nuestra explicación.

En resumen, se puede decir que el desempeño del sistema es dominado por dos fenómenos físicos, los efectos “No Lineales” en el SOA, en distancias cortas, y la degradación del OSNR, en distancias largas. La combinación de ambos fenómenos da por resultado las gráficas de BER, en función de la distancia, presentadas en la sección anterior. Con base en esta observación, se puede dividir el estudio de los datos en dos conjuntos: aquel que corresponde a las distancias cortas, tramo de enlace de 0 a 12 km, y aquel que corresponde a las distancias largas, tramo de enlace de 12 a 40 km.

En la tabla 4.2 se presentan los valores mínimos de $-\text{Log}(\text{BER})$, que fueron arrojados por el simulador en distancias cortas, en dicha tabla se presentan todas las combinaciones de las potencias de los EMLs y las ERs analizadas en este trabajo. Las celdas sombreadas en gris indican que no alcanzan a reunir el requerimiento mínimo del umbral establecido, correspondiente a la Task Force de $-\text{Log}(\text{BER}) = 12$. En la tabla también se muestra que ERs menores, principalmente la de 4dB, no son aceptables ya que no alcanzan el umbral establecido para los 100 Gbps. Solo a partir de un ER de 6dB, con potencia EML menor a los +4 dBm, puede alcanzar los requerimientos mínimos de desempeño. Una observación adicional indica que a potencias bajas y a partir del ER mayor de 8 dB, se pueden alcanzar valores más altos de $-\text{Log}(\text{BER})$; los cuales superan sin problemas el umbral establecido y nuestro sistema está en la posibilidad de operar en un ambiente “libre de errores”.

	EML = 0 dBm	EML = +2 dBm	EML = +4 dBm
ER = 4 dB	5.247	4.158	3.5
ER = 6 dB	15.606	13.269	11.841
ER = 8 dB	32.81	29.026	26.879
ER = 10 dB	56.975	51.167	47.709

Tabla 4.2 Valores mínimos de $-\text{Log}(\text{BER})$ en enlace de 0 a 12 km transmitiendo 4 x 25.78 Gbps. Los valores en celda gris no reúnen los requerimientos del BER para los 100 Gbps

De la misma forma a lo anterior, en la tabla 4.3, se presentan valores mínimos de $-\text{Log}(\text{BER})$ pero en distancias largas (de 12 a 40 km). Las celdas sombreadas en gris indican las combinaciones que no alcanzan el umbral necesario de $-\text{Log}(\text{BER})$. Al igual que en distancias cortas, para el ER de 4 dB, no se supera el límite del umbral; solo a partir de un ER de 6 dB y con potencias de al menos +2 dBm. Por otro lado, también se observa que para potencias altas y con ERs superiores a los 8 dB, se logra superar fácilmente el umbral de $-\text{Log}(\text{BER})$.

	EML = 0 dBm	EML = +2 dBm	EML = +4 dBm
ER = 4 dB	6.493	8.681	10.968
ER = 6 dB	11.572	15.752	20.266
ER = 8 dB	17.356	24.172	31.746
ER = 10 dB	22.686	32.305	43.516

Tabla 4.3 Valores mínimos de $-\text{Log}(\text{BER})$ en enlace de 12 a 40 km transmitiendo 4 x 25.78 Gbps. Los valores en celda gris no reúnen los requerimientos del BER para los 100 Gbps

Por lo tanto, relacionando las tablas 4.2 y 4.3 se sugiere utilizar un ER de por lo menos 8 dB con una potencia EML también de por lo menos +2 dBm; de esta manera se supera sin problemas el umbral del $-\text{Log}(\text{BER}) = 12$. Lo anterior da lugar a un óptimo desempeño del sistema y por consiguiente operar en un ambiente confiable; es decir “libre de errores”. Los resultados obtenidos de nuestro análisis marcan pautas de diseño para los transmisores que deseen cumplir con las especificaciones del estándar 802.3ba a 100 Gbps.

Considerando los dos fenómenos físicos que determinan el bajo desempeño, de cada uno de los dos comportamientos, se pueden proponer soluciones distintas para ampliar el rango de operación del sistema a valores más bajos del ER. Una solución factible a realizar para el primer comportamiento, de distancias cortas, es el uso de atenuadores variables. Ya que con esto se puede variar la potencia de los EMLs que inciden en el SOA y no saturar en un inicio la potencia de entrada al SOA, evitando los efectos de las NL, ocasionadas por el amplificador. Para el caso del segundo comportamiento, de las distancias largas, una posible solución es la utilización de amplificadores ópticos con una NF menor a los 6 dB, que fue utilizado en nuestro sistema. Desafortunadamente estos componentes en tecnología de semiconductor se encuentran todavía en proceso de desarrollo y por ende no está considerado en el trabajo.

4.6. Conclusiones

En conclusión, en el análisis de resultados descritos y obtenidos en la sección anterior, se pueden resumir en tres puntos muy importantes y son los siguientes:

- Respecto a las gráficas del BER se tienen dos tipos de comportamiento. El primero en distancias cortas (los primeros 12 km), donde se observa un crecimiento de los valores del BER en función de la distancia de la fibra en el sistema óptico. Y donde el efecto que degrada el desempeño del sistema son las NL, que son ocasionadas por la potencia alta de entrada al SOA. El segundo comportamiento es para las distancias largas (de 12 a 40 km), donde el comportamiento del BER es decreciente en función también de la distancia. Esto es debido a cuanto mayor es la distancia hay mayor disminución de la potencia a la entrada del SOA; además, el amplificador produce ruido por la Amplificación de Emisión Estimulada. Lo anterior provoca que a la salida del amplificador la OSNR de la señal sea menor al valor original, lo que es llamado degradación del OSNR.
- De las dos tablas de la sección anterior, generadas a partir de los dos comportamientos y de las posibles combinaciones de potencias EMLs y ERs, se llegó a la conclusión, que para superar el umbral establecido $[-\text{Log}(\text{BER}) = 12]$ se debe utilizar un ER de por lo menos 8 dB y la potencia EML de +2 dBm; esto para tener un sistema confiable “libre de errores”.
- Por último, y como posibles soluciones a los fenómenos físicos que afectan a los dos comportamientos del BER, podemos proponer lo siguiente: para el primer comportamiento (en distancias cortas), se puede utilizar un mecanismo de atenuación que pueda variar la potencia de entrada al SOA y así disminuir las NL del SOA debido a la saturación. En el segundo comportamiento (en distancias largas) es utilizar SOAs con menores figuras de ruido a la utilizada en nuestro sistema (NF de 6 dB) para disminuir en la medida de lo posible la degradación de OSNR.

5. Conclusiones Generales

En los últimos años la necesidad de comunicación, el intercambio de datos y la movilidad han crecido de manera significativa, lo que contribuye a que las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), estén en un continuo crecimiento e innovación. Una de estas TIC es la tecnología Ethernet, que es un estándar de comunicación para redes de computadores de área local; su antecesor ALOHA, fue un primer ejemplo de comunicación en red. Posteriormente fue Robert Metcalfe en colaboración con David Boogs, quienes mejoraron la tecnología para la comunicación en red, la cual empleaba un mecanismo de contención llamado CSMA/CD para minimizar la probabilidad de colisión de paquetes originados por el transmisor. Teniendo una topología tipo bus, teniendo en un inicio una velocidad de transmisión de datos de 2.94 Mbps de cable coaxial a una distancia de 1.6 km de longitud.

Ya con un primer inicio se continuó con el desarrollo de la tecnología, la cual siguió con el Ethernet de 10 Mbps, el cual definía el método de acceso al medio, la topología y el medio físico como características principales; y con lo que la IEEE la estandarizó como 802.3 CSMA/CD. Con un estándar más consolidado el grupo de trabajo de la IEEE 802.3 trabajo rápidamente, mediante normas de los comités de estándares, dando como resultado un Ethernet a 100 Mbps (IEEE 802.3u), llamado comúnmente Fast Ethernet. En este el tiempo de bits de transmisión era más reducido, manteniendo los formatos anteriores, interfaces físicas y reglas de procedimientos. Para la siguiente velocidad en transmisión de datos, 1 000 Mbps (estándar IEEE 802.3z), la tecnología Ethernet fue mejorando considerablemente, teniendo como objetivos de diseño: ofrecer 10 más tiempo de ancho de banda que su antecesor (Fast Ethernet), usar el mismo formato de frame de Ethernet (IEEE 802.3), un esquema de operación en MAC (half duplex y full duplex), ser compatible con las

tecnologías 10 y 100 Mbp y soportar protocolos usados con la familia Ethernet. La especificación más reciente de la familia Ethernet es el 10 GbE (10 Gigabit Ethernet), llamando al estándar IEEE 802.3ae, su estructura global es la misma que su antecesor Gigabit Ethernet. Para el nuevo estándar se cubren objetivos planteados por la Task Force y son: modo de operación full-duplex, transmisión de datos de 10 Gbps, soportar esta velocidad en LAN y WAN, permitir a la red extenderse a una longitud de 40 km y soportar un BER de hasta 10^{-12} .

La evolución que ha tenido la tecnología Ethernet en sus aproximadamente 30 años de existencia, ha quedado rezagada debido al alto crecimiento de datos, es por eso que nuevamente la IEEE se ha puesto a la tarea de realizar un nuevo estándar. Para ello se creó el Higher Speed Study Group, dentro del Instituto de estandarización de la IEEE 802.3, con el propósito de definir un estándar más allá de los 10 Gbps. El enfoque del HSSG es determinar los requerimientos de ancho de banda en la interconexión del core, aplicaciones en centro de datos, intercambio de Internet y proveedores de servicio. Los cuales demandan más ancho de banda, por las nuevas aplicaciones como son: video en demanda, investigación y desarrollo, computación de alto desempeño, virtualización de servidores, etc. Con lo anterior el grupo HSSG ha aprobado objetivos para el desarrollo de un estándar Ethernet de 40 GbE, para ser utilizado en servidores e interfaces In/Out y un Ethernet de 100 GbE, utilizado en la Interconexión en el core; lo cual se denomina IEEE 802.3ba. Los objetivos propuestos para el desarrollo de los estándares son los siguientes: modo de operación full dúplex, mantener mismo formato de frame del Ethernet 802.3, un BER 10^{-12} , proporcionar una Red de Transporte Óptico como medio y soportar velocidades de transmisión de 40 y 100 Gbps. En nuestro proyecto se tiene considerado en específico la velocidad de transmisión de 100 Gbps, con la característica de por lo menos 40 km en SMF.

La Task Force en su objetivo de alcanzar la velocidad de transmisión de los 100 Gbps y en específico a los 40 km con SMF, ha propuesto en general tres arquitecturas y que son: Multi-Lane Distribution, Agregación at the Physical Layer y Physical Bundling Layer. Cada una de las cuales tiene características de complejidad, tecnología, escalabilidad, etc; lo que las hace diferentes pero con un mismo objetivo, el alcanzar los 100 GbE. La Fuerza de Tarea determinó que la arquitectura MLD es la más viable para alcanzar los 40 y 100 Gbps, porque toma como base la arquitectura de su antecesor de 10 GbE, por lo que requiere menos cambios y de implementar nuevas tecnologías que llevaría un retraso en la estandarización.

Para el análisis numérico de esta tesis se delimitó más al estudio a la Physical Medium Dependent, que es la parte donde está basado la transmisión de los 100 Gbps y como se comentó anteriormente para un enlace de 40 km en SMF. De igual forma se propusieron varias técnicas de implementación como 10x10 Gbps, que son 10 canales a una tasa de transmisión de 10 Gbps, otra técnica 4x25 Gbps, 2x50 Gbps y la de 1x100 Gbps. Después de un análisis realizado por los integrantes de la Fuerza de Tarea, se llegó a la conclusión que la más viable para su implementación es la de 4x25 Gbps. Este es el sistema cuya factibilidad se analizó en esta tesis.

El sistema óptico de la capa PMD, que fue estudiado está constituido por los siguientes dispositivos: transmisor óptico, el modulador de electro-absorción, el multiplexor, el medio de transmisión (fibra óptica monomodo), el amplificador óptico de semiconductor, demultiplexor y detector óptico. Tales dispositivos, con parámetros y valores especificados en base a estudios matemáticos y estándares, fueron estudiados como parte de un sistema de capa física en un simulador de sistemas ópticos de telecomunicaciones basado en el lenguaje de programación LabVIEW. Con él se obtuvieron resultados para la generación de gráficas del BER, como parámetro de desempeño del sistema (subcapa PMD), de la razón de extinción y de la razón señal a ruido óptico; todos ellos en función de la distancia de la fibra (de 0 a 40 km). Con las gráficas ya elaboradas se realiza el análisis del comportamiento de ellas, de sus posibles fenómenos o causas que originan su mal desempeño; así como su posible solución.

Para el análisis de los resultados, en relación a las gráficas del BER se aprecian dos tipos de comportamiento en función de la distancia de la fibra: primero un comportamiento de forma creciente, para distancias cortas que comprende los primeros 12 km y un segundo comportamiento que es decreciente, para distancias largas que comprende de 12 a 40 km. En el primer comportamiento el efecto que degrada el desempeño del sistema son las “No Linealidades”, ocasionadas por la potencia alta a la entrada del amplificador. En el segundo comportamiento donde se observa el decremento de $-\text{Log}(\text{BER})$ es por la disminución de la potencia de entrada al amplificador en función de la distancia, además, el amplificador produce ruido por la amplificación de emisión estimulada, lo que provoca en definitiva una degradación del OSNR. Las posibles soluciones para estos efectos que degradan el desempeño del sistema es: en el primer comportamiento, utilizar un mecanismo de atenuación que pueda variar la potencia de entrada al amplificador óptico y así disminuir la NL; en el segundo comportamiento, utilizar amplificadores con menores figuras de ruido a la utilizada por el sistema (NF de 6dB) y disminuir en la medida de lo posible la degradación de OSNR.

Por último, con la ayuda de las gráficas y de tablas, que fueron generadas a partir del análisis de resultados, se proponen valores de EMLs y ERs para tener un sistema que supere el umbral establecido [$-\text{Log}(\text{BER}) = 12$], propuesto por la Task Force 802.3ba; estos valores es de un ER de por lo menos 8 dB y una potencia de EML de +2 dBm. Con los valores anteriores podemos decir que el sistema propuesto es confiable; es decir, “libre de errores”.

Bibliografía

- [1] <http://es.wikipedia.org/wiki/Ethernet> (consultado en Enero, 2008).
- [2] Harrington, Jan L. "Ethernet Networking Clearly Explained". M. Kaufmann, 1999.
- [3] Metcalfe, Robert M. y Boggs, David R. (Julio 1976). "Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks". Communications of the ACM 10 (5): 395-405.
- [4] Hancock, Bill. "Designing and Implementing Ethernet Networks". Qed Information Sciences, 1988.
- [5] Ford, Merilee. "Tecnologías de Inter-conectividad de Redes". Prentice-Hall. 1998.
- [6] Tanenbaum, Andrew S. "Redes de computadoras". Pearson Educación, 2006.
- [7] Keiser, Gerd. "Local Area Network". McGraw Hill, 2001.
- [8] Johnson, Howard W. "Fast Ethernet: Dawn of a new network". Prentice-Hall, 2001.
- [9] Reynders, Deon y Wright, Edwin. "Practical TCP/IP and Ethernet Networking". Elsevier Science, 2003.
- [10] Ferrero, Alexis. "The Eternal Ethernet". 2º edición. Edit Addison-Wesley, 1998.
- [11] Norris, Mark. "Gigabit Ethernet technology and applications". Artech House, 2003.
- [12] IEEE 802.3-2005_section4. "Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications". Clause 44.1.2, 2005.
- [13] Norris, Mark. "Gigabit Ethernet technology and applications". Chapter 3, 10 Gigabit Ethernet. Sección 3.2.1.1. Artech House, 2003.
- [14] Norris, Mark. "Gigabit Ethernet technology and applications". Chapter 3, 10 Gigabit Ethernet. Sección 3.2.1.2. Artech House, 2003.
- [15] Waters, Geoff. "10 Gigabit Ethernet and the XAUI interface". Agilent Technologies. January 2002.
- [16] D'Ambrosia, John. Shawn, Rogers. Quilici, Jim. "XAUI: An Overview". Versión 1, marzo 2002.
- [17] IEEE 802.3-2005ae_section4. "Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications". Clause 49.1.4.1, 2005.
- [18] IEEE 802.3-2005ae_section4. "Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications". Clause 51, 2005
- [19] "10 Gigabit Ethernet Technology Overview White Paper". Revision 2, Draft A. April 2002.

- [20] http://www.eu.anritsu.com/files/10GigabitEthernet_EEA1100.pdf (consultado en Enero, 2008).
- [21] Norris, Mark. "Gigabit Ethernet technology and applications". Chapter 3 10 Gigabit Ethernet. Sección 3.2.2. Artech House, 2003.
- [22] Spirent Communications. White Paper "How to Test 10 Gigabit Ethernet Performance". May 2005.
- [23] Reimer, Jeremy. "New Ethernet standard: not 40 Gbps, not 100, but both". Ars Technica. Julio 2007.
- [24] Duelk, Marcus. "Next Generation 100G Ethernet", Bell Labs/Lucent Technologies. Agosto 2007.
- [25] Management & Tecnología. "Ethernet de 40 GbE y 100 GbE, dos velocidades bajo un mismo estándar". Noviembre 2007
- [26] Adaptado por HSSG y aprobado por IEEE 802.3 Objetivos. Reunión plenaria Julio 2007.
- [27] Adaptado por HSSG y aprobado por IEEE 802.3 Project Authorization Request. Reunión plenaria Julio 2007.
- [28] http://www.plazamarkets.com.ar/joomlaspa/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=9 (consultado en Agosto 2007).
- [29] Muller, Shimon. Bechtolsheim, Andy. "HSSG Speeds and Feeds. Reality Check". Presentado en el meeting de la IEEE 802.3 HSSG. Monterey, CA. Enero 2007.
- [30] Alping, Arne. "Higher Speed Ethernet: A telecom system vendors view". Presentado en el meeting de la IEEE 802.3 HSSG. Dallas, TX. Noviembre 2006.
- [31] Nowell, Mark. Vusirikala, Vijay. Hays, Robert. "Overview of Requirements and Applications for 40 Gigabit and 100 Gigabit Ethernet". Cisco, Infinera, Intel. Agosto 2007.
- [32] Adaptado por HSSG y aprobado por IEEE 802.3 Criterios. Reunión plenaria Julio 2007.
- [33] <http://www.hubersuhner.com/mozilla/products/hs-fiberoptics/hs-fiber optic-cables/hs-p-fo-cab-know/hs-p-fo-cab-know-om3> (consultado en Febrero 2008).
- [34] Hankins, Greg. "IEEE P802.3ba 40 GbE and 100 GbE Standards Update". FORCE10. Febrero 2008.
- [35] Gustlin, Mark. "100GE and 40GE PCS and MLD Proposal". Presentado en el meeting de la IEEE 802.3ba Task Force. Portland, OR. Enero 2008.
- [36] Frazier, Howard "Aggregation at the Physical Layer". Presentado en el meeting de la IEEE 802.3ba Task Force. Portland, OR. Enero 2008.

-
- [37] Malpass, Trey. Li, Zeng. Min, Ye. "PBL Solution for High Speed Ethernet". Presentado en el meeting de la IEEE 802.3ba Task Force. Portland, OR. Enero 2008.
- [38] Green, Larry. "Lane Bonding Considerations". Technologist. Presentado en el meeting de la IEEE 802.3ba Task Force. Portland, OR. Enero 2008.
- [39] Gutiérrez-Castrejón, Ramón. "Sistemas de Transmisión Óptico, Clases de Fibra". México, D.F.: Instituto de Ingeniería de la UNAM. Junio 2007.
- [40] Gutiérrez-Castrejón, Ramón. "Sistemas de Transmisión Óptico, Desempeño de Sistemas de Transmisión/Chirp". México, D.F.: Instituto de Ingeniería de la UNAM. Junio 2007.
- [41] Gutiérrez-Castrejón, Ramón. "Sistemas de Transmisión Óptico, Desempeño de Sistemas de Transmisión/Presupuesto de Potencia". México, D.F.: Instituto de Ingeniería de la UNAM. Junio 2007.
- [42] Cole, Chris. Huebner, Bernd. "100 GE 10 Km SMF Technology Alternatives". Presentado en el meeting de la IEEE 802.3ba Task Force. Portland, OR. Enero 2008.
- [43] <<http://www.seeic.org/articulo/laser/las-diodo.htm>> (Consultado en Mayo 2008).
- [44] Kartalopoulos, Stamatios. "DWDM. Networks, Devices and Technology". Section 2.13 Light Sources. Wiley-Interscience. Año 2003.
- [45] Dutta, Achyut K. Dutta, Niloy K. Fujiwara, Masahiko. "WDM Technologies Active Optical Components". Chapter 2.4 Distributed Feedback Lasers. Academic Press. Año 2002.
- [46] Ramaswami, Rajiv. Sivarajan, Kumar N. "Optical Networks, A Practical Perspective". Chapter 5.12.6 Interchannel Spacing and Number of Wavelengths. Morgan Kaufmann Publishers. Second Edition. Año 2002.
- [47] <http://www.rediris.es/jt/jt2004/archivo/ficheros/adolfo_garcia-redes-opticas.pdf> (Consultado en Junio 2008)
- [48] Kiyoo Hiramoto, Masato Shishikura, Atsushi Takai, Matt Traverso. "SMF 1310nm PMD Link Comments". Presentado en el meeting de la IEEE 802.3 HSSG. Atlanta, GA. November 2007.
- [49] Dutta, Achyut K. Dutta, Niloy K. Fujiwara, Masahiko. "WDM Technologies Active Optical Components". Chapter 7 Electroabsorption Modulators. Academic Press. Año 2002.
- [50] Ramaswami, Rajiv. Sivarajan, Kumar N. "Optical Networks, A Practical Perspective". Chapter 3.3 Multiplexers and Filters. Morgan Kaufmann Publishers. Second Edition. Año 2002.
- [51] UIT-T G.652. Características de las fibras y cables ópticos monomodo. (06/2005).
- [52] Connelly, Michel. "Semiconductor Optical amplifiers and their Applications". Dept. Electronic and Computer Engineering. University of Limerick, Ireland. Año 2006.
-

- [53] Aguilar Hildeberto, Jardón. "Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas". Alfaomega: Instituto Mexicano de comunicaciones. Año 1995.
- [54] Keiser, Gerd. "Optical Fiber Communications". McGraw-Hill. Año 1991.
- [55] Dutta, Achyut K. Dutta, Niloy K. Fujiwara, Masahiko. "WDM Technologies Active Optical Components". Chapter 7.4.4 Bit Error Ratio Testing. Academic Press. Año 2002.
- [56] Bitter, Rick. Mohiuddin, Taqi. Nawrocki, Matt. "LabVIEW, Advanced Programming Techniques". CRC Press. Año 2000.

Glosario

ACM - Association for Computing Machinery
APL - Aggregation at the Physical Layer
ARPANET - Advanced Research Projects Agency Network
AUI - Attachment Unit Interface
BER - Bit Error Rate
CGMII - 100 Gigabit Media Independent Interface
CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CUDI - Corporación Universitaria para el Desarrollo de Internet
CWDM - Coarse Wavelength Division Multiplexing
DCF - Dispersion Compensation Fiber
DEC - Digital Equipment Corporation
DFB - Distributed FeedBack
DML - Direct Feedback Laser
DPSK - Differential Phase Shift Keying
EAML - Electro Absorption Modulator Laser
ER - Extinction Ratio
FOIRL - Fiber Optic Inter-Repeater Link
FWM - Four Wave Mixing
GbE - Gigabit Ethernet
Gbps - Gigabits por segundo
GMII - Gigabit Medium Independent Interface
HSSG - Higher Speed Study Group
IDC - International Data Corporation
IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers
Intel - Integrated Electronics
ISO - International Organization for Standardization
ITU - International Telecommunication Union
LabVIEW - Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LAN - Local Área Network
LAN WDM - Local Area Network - Wavelength Division Multiplexing
Laser - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

MAC - Media Access Control
MAU - Medium Access Unit
Mbps - Megabits por segundo
MDI - Medium Dependent Interface
MIB - Management Information Base
MII - Medium Independent Interface
MLD - Multi-Lane Distribution
NAS - Network Attached Storage
NL - No Linealidades
NRZ - Non Return to Zero
NRZI - Non return to zero, inverted
OFE - Optical Front-End
OSI - Open Systems Interconnect
OSNR - Optical Signal-to-Noise Ratio
OTN - Optical Transport Network
PAR - Project Authorization Request
PARC - Palo Alto Research Center
PBL - Physical Bundling Layer
PCS - Physical Coding Sublayer
PHY - Physical Sublayer
PLS - Physical Layer Signaling
PMA - Physical Medium Attachment
PMA - Physical Medium Attachment
PMD - Physical Medium Dependent
RS - Reconciliation Sublayer
RS - Reconciliation Sublayer
SAN - Storage Area Network
SDH - Synchronous Digital Hierarchy
SMF - Single Mode Fiber
SOA - Semiconductor Optical Amplifier
SONET - Synchronous Optical Network
STP - Shielded Twisted Pair
UTP - Unshielded Twisted Pair
VLSI - Very Large Scale Integration
VPN - Virtual Private Network

WDM - Wavelength Division Multiplexing

WiFi - Wireless-Fidelity

WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access

WIS - WAN Interface Sublayer

WDDW - Wide Wavelength Division Multiplex

XAUI - 10 Gigabit Attachment Unit Interface

XGMII - 10 Gigabit Media Independent Interface

XGXS - XAUI Extender Sublayer

XLGMII - 40 Gigabit Media Independent Interface

XSBI - 10 Gigabit Sixteen Bit Interface