

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**ESTUDIO DE LA CONMUTACIÓN POR ETIQUETA ÓPTICA
UTILIZANDO EL MÉTODO DE ETIQUETAMIENTO FSK/IM
(FREQUENCY SHIFT KEYING/INTENSITY MODULATION) EN UNA
RED ÓPTICA HÍBRIDA INTEGRADA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

RICARDO XAVIER LLUGSI CAÑAR
ricardoxllugsic@yahoo.com

DIRECTORA: MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ, MSc.
sjimenez@mailfie.epn.edu.ec

Quito, Mayo de 2008

DECLARACIÓN

Yo, Ricardo Xavier Llugsí Cañar, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Ricardo Xavier Llugsí Cañar

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Ricardo Xavier LLugsi Cañar, bajo mi supervisión.

MSc. María Soledad Jiménez
DIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Primero, para quien en su infinita bondad, ha permitido a quien escribe estas cortas líneas, poder enfrentar uno de sus más grandes desafíos y llevarlo a buen recaudo, para Dios mi mayor agradecimiento. Además quiero agradecer a mis padres, ya que sin su apoyo incondicional y su eterno cariño, no hubiera podido hacer este sueño realidad. Y finalmente a la MSc. María Soledad Jiménez quien no ha sido solamente una excelente guía académica sino una gran amiga, ¡Gracias Ingeniera!

DEDICATORIA

A mi madre

CONTENIDO

RESUMEN	x
PRESENTACIÓN	xi

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN A LA CONMUTACIÓN ÓPTICA

1.1 PRINCIPIOS DE LA CONMUTACIÓN ÓPTICA	1 -
1.1.1 LA CONMUTACIÓN	1 -
1.1.2 TRANSPARENCIA Y OPACIDAD EN REDES ÓPTICAS	3 -
1.2 CONMUTACIÓN DE CIRCUITOS ÓPTICA (OCS)	5 -
1.2.1 TECNOLOGÍAS DE CONMUTACIÓN DE CIRCUITOS ÓPTICA	6 -
1.2.1.1 Conmutación Electro – Óptica (EO).....	6 -
1.2.1.2 Conmutación Opto - Acústica (AO).....	10 -
1.2.1.3 Conmutación Termo - Óptica (TO)	13 -
1.2.1.4 Conmutación Opto – Mecánica (OM)	15 -
1.2.1.4.1 Conmutación Opto – Mecánica (OM) convencional	15 -
1.2.1.4.2 Conmutación Opto – Mecánica (OM) basada en MEMS (Sistemas Micro Electro Mecánicos)	17 -
1.2.1.5 Conmutación Óptica con Amplificador Óptico de Semiconductor (SOA, <i>Semiconductor Optical Amplifier</i>)	19 -
1.2.2 ELEMENTOS DE LA RED ÓPTICA WDM (<i>WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING</i>)	21 -
1.2.2.1 Terminal de Línea Óptico (OLT).....	21 -
1.2.2.2 OXC (<i>Optical Cross Connect</i>)	23 -
1.2.2.2.1 Clasificación de los OXC's (<i>Optical Cross Connects</i>).....	23 -
1.2.2.2.2 Arquitecturas de los Crosconectores Ópticos (OXC, <i>Optical Cross- Connect</i>).....	25 -
1.2.2.3 Multiplexor para Inserción/Extracción Óptica (<i>OADM, Optical Add/Drop Multiplexer</i>)	26 -
1.3 CONMUTACIÓN DE PAQUETES ÓPTICA (OPS)	27 -
1.3.1 TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN DE DISPUTAS.....	29 -
1.3.1.1 Dominio del tiempo – Buffering Óptico.....	29 -
1.3.1.2 Dominio de la Longitud de Onda – Conversión de Longitud de Onda ...	31 -
1.3.1.3 Dominio Espacial – Enrutamiento Desviado.....	32 -
1.4 CONMUTACIÓN DE RÁFAGAS ÓPTICA (OBS) ^[1]	32 -
1.4.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE OBS ^[1]	33 -
1.4.2 PROTOCOLOS DE TRANSMISIÓN ^[1]	34 -
1.4.2.1 Tell-and-Wait (TAW).....	34 -
1.4.2.2 Tell-and-Go (TAG).....	34 -
1.4.2.3 Just-Enough-Time (JET)	35 -
1.5 TÉCNICAS DE ETIQUETAMIENTO ÓPTICO	35 -
1.5.1 ETIQUETAMIENTO DE TIEMPO SERIAL.....	36 -

1.5.2 ETIQUETAMIENTO WDM (<i>WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING</i>)	36 -
1.5.3 ETIQUETAMIENTO OCDM (<i>OPTICAL CODE DIVISION MULTIPLEXING</i>)	37 -
1.5.4 ETIQUETAMIENTO SCM (<i>SUB-CARRIER MULTIPLEXING</i>).....	38 -
1.5.5 ETIQUETAMIENTO ORTOGONAL	39 -

CAPITULO 2: ARQUITECTURA EN REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS

2.1 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS	40 -
2.1.1 ARQUITECTURA DE LA RED ÓPTICA	40 -
2.1.2 EL CONCEPTO DE RED ÓPTICA HÍBRIDA	41 -
2.1.3 ARQUITECTURA DE LA RED ÓPTICA HÍBRIDA.....	42 -
2.1.3.1 Arquitectura de una red basada en Crosconectores Ópticos (<i>OXC's, Optical Cross Connects</i>)	43 -
2.1.3.2 Arquitectura de una red basada en OXC's y OBS's (Arquitectura Híbrida)	44 -
2.2 TIPOS DE REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS	47 -
2.2.1 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS CLIENTE-SERVIDOR.....	47 -
2.2.2 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS PARALELAS	49 -
2.2.3 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS INTEGRADAS.....	50 -
2.3 EJEMPLOS DE REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS	52 -
2.3.1 OBTN (<i>OPTICAL BURST TRANSPORT NETWORK</i>).....	52 -
2.3.1.1 El concepto de OBTN (<i>Optical Burst Transport Network</i>).....	52 -
2.3.1.2 Arquitectura del Nodo OBTN (<i>Optical Burst Transport Network</i>)....	54 -
2.3.2 CHEETAH (ARQUITECTURA DE TRANSPORTE EXTREMO A EXTREMO DE ALTA VELOCIDAD POR CIRCUITO CONMUTADO)	56 -
2.3.2.1 El concepto de CHEETAH	56 -
2.3.2.2 Establecimiento del circuito CHEETAH.....	57 -
2.3.3 ORION (<i>OVERSPILL ROUTING IN OPTICAL NETWORKS</i>)	58 -
2.3.3.1 El concepto de ORION (<i>Overspill Routing in Optical Networks</i>).....	58 -
2.3.3.2 Arquitectura del Nodo ORION (<i>Overspill Routing in Optical Networks</i>).	60 -
2.3.3.3 Casos de Estudio de ORION (<i>Overspill Routing in Optical Networks</i>).....	61 -
2.3.3.4 Elección de la Red Ópticas Híbrida para FSK/IM (<i>Frequency Shift Keying/Intensity Modulation</i>)	66 -

CAPITULO 3: CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS ÓPTICA (OLS)

3.1 EL CONCEPTO DE CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS ÓPTICA.....	67 -
3.2 ENRUTADOR PARA CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS ÓPTICA (<i>OLSR, OPTICAL LABEL SWITCHING ROUTER</i>)	71 -
3.2.1 ARQUITECTURA DEL ENRUTADOR PARA CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS ÓPTICA (<i>OLSR, OPTICAL LABEL SWITCHING ROUTER</i>) .-	72 -

3.2.1.1	Arquitectura del <i>Optical Label Switching Edge Router</i>	72 -
3.2.1.2	Arquitectura del <i>Optical Label Switching Core Router</i>	74 -
3.2.1.2.1	El Controlador de Conmutación	75 -
3.2.1.2.2	Malla de Conmutación Óptica	76 -
3.2.1.2.3	Intercambio de Etiquetas Óptica	79 -
3.2.2	RESOLUCIÓN DE DISPUTAS	79 -
3.3	INTEROPERABILIDAD CON MPLS, MP	82 -
3.3.1	CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS PARA MULTIPROTOCOLO (<i>MPLS, MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING</i>).....	82 -
3.3.2	CONMUTACIÓN DE LONGITUDES DE ONDA PARA MULTIPROTOCOLO (<i>MP λS, MULTIPROTOCOL LAMBDA SWITCHING</i>)....	84 -
3.3.3	CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS PARA MULTIPROTOCOLO GENERALIZADO (<i>GMPLS, GENERALIZED MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING</i>).....	86 -
3.4	FORMATO DE ETIQUETAMIENTO ÓPTICO Y ESQUEMA DE DIRECCIONAMIENTO	88 -
3.5	CASO DE ESTUDIO PARA OLS	92 -
3.5.1	DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS USADOS PARA EL CASO DE ESTUDIO	92 -
3.5.2	RESOLUCIÓN DE DISPUTAS EN EL DOMINIO DE LONGITUD DE ONDA, TIEMPO Y ESPACIO	94 -
3.5.3	COMUNICACIÓN ENTRE ROUTERS DE BORDE Y DE CORE.....	95 -
3.5.4	FORMACIÓN DE PAQUETES EN EL ROUTER DE BORDE.....	100 -
3.5.5	PRIMER CAMPO DE PRUEBA PARA CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS ÓPTICA (<i>FIRST FIELD TRIAL OF OPTICAL LABEL SWITCHING</i>).....	103 -

CAPITULO 4: EL MÉTODO DE ETIQUETAMIENTO FSK/IM

4.1	LA SEÑAL FSK/IM (<i>FREQUENCY SHIFT KEYING/INTENSITY MODULATION</i>)	106 -
4.1.1	Modulación de Frecuencia (<i>FSK, FREQUENCY SHIFT KEYING</i>).....	107 -
4.1.2	MODULACIÓN DE INTESIDAD (<i>IM, INTENSISTY MODULATION</i>)	109 -
4.1.3	CONSECUENCIAS DEL USO DE UNA SEÑAL FSK/IM PARA ETIQUETAMIENTO ÓPTICO.....	110 -
4.2	GENERACIÓN Y DETECCIÓN DE LA ETIQUETA	111 -
4.2.1	GENERACIÓN DE LA ETIQUETA	111 -
4.2.2	DETECCIÓN DE LA ETIQUETA.....	112 -
4.3	ARQUITECTURA DE LOS NODOS DE LA RED	113 -
4.3.1	ESTRUCTURA DEL NODO DE BORDE.....	113 -
4.3.2	ESTRUCTURA DEL NODO DE CORE	115 -
4.4	CASO DE ESTUDIO DE FSK/IM	116 -
4.4.1	ESQUEMA DE ETIQUETAMIENTO FSK/IM EN EL PROYECTO IST- STOLAS	116 -
4.4.2	RED ORION (<i>OVESPILL ROUTING IN OPTICAL NETWORKS</i>)	120 -

4.5 TENDENCIAS FUTURAS EN EL ETIQUETAMIENTO ÓPTICO.....	121 -
4.5.1 EL ETIQUETAMIENTO ÓPTICO UTILIZANDO MODULACIÓN DE FASE DIFERENCIAL/MULTIPLEXACIÓN DE SUB PORTADORA (DPSK/SCM, DIFFERENTIAL-PHASE SHIFT KEYING/ SUBCARRIER MULTIPLEXING)	122 -
4.5.2 ETIQUETAMIENTO DE TIEMPO SERIAL.....	124 -

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES- 126 -
5.2 RECOMENDACIONES- 128 -
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	129 -
ANEXO A: Lithium niobate.....	- 134 -
ANEXO B: Attenuation in Fiber Optics	- 137 -
ANEXO C: EDFA.....	- 143 -

RESUMEN

Se inicia el proyecto de titulación realizando una “Introducción a la Conmutación Óptica”, en este capítulo se analiza el principio de la Conmutación Óptica, revisando los conceptos de Conmutación de Circuitos Óptica (OCS), Conmutación de Paquetes Óptica (OPS) y Conmutación de Ráfagas Óptica (OBS); y, para dar una idea inicial acerca de la conmutación óptica se define también que es una etiqueta óptica y cuáles son las diferentes técnicas de etiquetamiento óptico que existen.

En el segundo capítulo denominado “Arquitectura en Redes Ópticas Híbridas” se aborda el concepto de Red Óptica Híbrida y se estudian los diferentes tipos de redes ópticas híbridas que existen, poniendo énfasis en las Redes Ópticas Híbridas Cliente-Servidor, Paralelas e Integradas.

Afianzados los conocimientos acerca de arquitecturas ópticas, se retoma el estudio de la conmutación óptica en el tercer capítulo, en el cual se describe el formato de etiquetamiento óptico, el esquema de direccionamiento, la arquitectura del nodo que permitirá la conmutación por etiqueta óptica y se habla además de la interoperabilidad con MPLS (Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo), $MP\lambda S$ (Conmutación de Longitudes de Onda para Multiprotocolo) y GMPLS (Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo Generalizado).

En el capítulo cuatro se recogen todos los conceptos estudiados con anterioridad en el presente proyecto de titulación, y se analiza formalmente “El Método de Etiquetamiento FSK/IM”, sus particularidades, los diferentes métodos de generación y detección de la etiqueta óptica, el enrutamiento controlado por etiqueta y la arquitectura del nodo de enrutamiento.

Para finalizar, se realizan las respectivas conclusiones y se anotan ciertas recomendaciones que se derivan del trabajo realizado.

PRESENTACIÓN

La evolución que han tenido los sistemas de comunicación hasta la actualidad con el propósito de lograr manejar una mayor capacidad, velocidad y eficiencia, han desembocado en la necesidad de repotencializar las redes ya existentes (como por ejemplo el Internet) que en su gran mayoría utilizan fibra óptica debido a ventajas tales como su gran ancho de banda, invulnerabilidad a la interferencia, baja atenuación, escalabilidad, etc.; dichas ventajas la convierten en la mejor elección sobre otros tipos de medios tanto guiados como no guiados.

La conmutación óptica busca alcanzar un mejor desempeño en la redes ópticas manejando las operaciones de conmutación en el campo óptico mientras que la conmutación de etiquetas óptica se enfoca en evitar conversiones de medio óptica-electrónica-óptica innecesarias para el análisis de ciertos datos, como por ejemplo: datos de carga útil (*payload*), con lo que se reduce los retardos producidos debido a la creación de los denominados “cuellos de botella”. Por su parte la técnica de etiquetamiento FSK/IM (Frequency Shift Keying/Intensity Modulation) es una técnica de fácil implementación que proporciona dos campos independientes para la transmisión de datos, la frecuencia y la intensidad.

INTRODUCCIÓN A LA CONMUTACIÓN ÓPTICA

[1], [2], [4], [10], [12], [17], [23]

1.1 PRINCIPIOS DE LA CONMUTACIÓN ÓPTICA ^{[1], [2]}

1.1.1 LA CONMUTACIÓN

El proceso de conmutación básicamente consiste en unir una vía de entrada con una de salida, dicho proceso permite tener una trayectoria independiente y exclusiva para la transmisión de señales desde un punto a otro. Existen algunos tipos de conmutación, se puede mencionar primeramente a la conmutación de circuitos, ver **Fig. 1 - 1**, usada en la red pública telefónica conmutada (*PSTN, Public Switching Telephone Network*), que permite reservar una ruta para llevar la señal de voz entre los usuarios telefónicos.

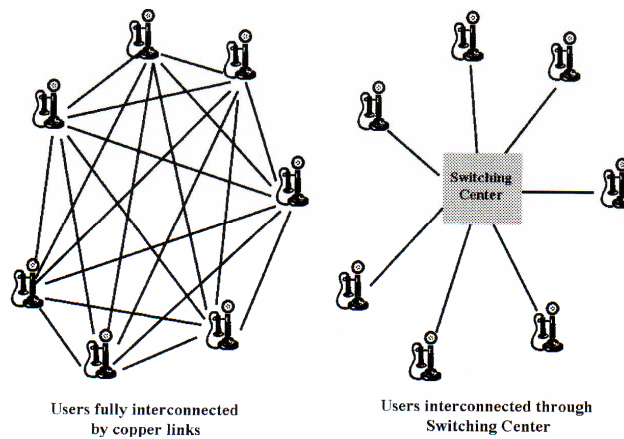


Fig. 1 - 1 Conmutación de circuitos en la PSTN. ^[1]

El mismo concepto mencionado anteriormente se aplicó después para la transmisión de datos, es decir, existe una conexión directa extremo a extremo creada por los conmutadores de la red, los cuales no poseen capacidad de almacenamiento y actúan de forma transparente frente a los datos transmitidos, de forma que, los diversos errores producidos durante la transmisión no pueden ser corregidos. Falencias como la mencionada anteriormente sumada a que una

conexión permanente entre estaciones (que podrían no estar transmitiendo datos) era un desperdicio de recursos, hicieron de la conmutación de circuitos una técnica de conmutación de bajo rendimiento y efectividad tanto tecnológica como comercial. Cabe destacar que en la actualidad los sistemas de telecomunicaciones usan TDM (*Time Division Multiplexing*) para emular la conmutación de circuitos (*Clear Channels*).

Después de la conmutación de circuitos apareció una técnica de conmutación denominada de Mensajes, en ésta, existían discos duros a lo largo de la red y se contaba con un tipo de tecnología *Store and Forward* gracias a la cual se presentó una mejora (con respecto a la Conmutación de Circuitos) en el rendimiento de la red, ya que con esta tecnología se podía realizar un almacenamiento de datos para verificación, pero lamentablemente se presentaron efectos tales como excesiva latencia debido al procesamiento lo cual conllevó a obtener una baja velocidad efectiva de transmisión de datos, para compensar dicha falencia apareció la Conmutación de Celdas¹, cuyo principio de funcionamiento es similar al de la Conmutación de Mensajes, pero cambia el uso de discos duros por el de memorias de tipo aleatorio *RAM* y se usa la tecnología *Hold and Forward*, en la cual aparece solamente una ligera retención de información que no presenta un impacto tan fuerte como en el caso de *Store and Forward*. Cabe destacar que en la Conmutación de Celdas se obtienen algunas ventajas adicionales tales como la existencia de rutas alternativas en caso de fallas en la red y una disponibilidad para la conducción de tráfico a ráfagas ya que no se ocupa permanentemente los canales de comunicaciones, un ejemplo de red que maneje este principio es ATM (*Asynchronous Transfer Mode*).

Otro tipo de conmutación es la de paquetes, en ésta, la información se agrupa en paquetes que tienen una cabecera y carga útil (*Payload*), se envían en base al uso de mensajes (capa de red del Modelo OSI) o tramas (capa de enlace del Modelo OSI); y, pueden recorrer la red de forma independiente, ejemplos de redes que manejen este principio son X.25 o *Frame Relay*. En este caso se tiene que, a diferencia de la conmutación de circuito, los paquetes pueden tomar rutas

¹ Cabe destacar que las Celdas son paquetes de tamaño reducido.

alternativas y pueden, por ejemplo: llegar en desorden al destino o perderse en el camino; para resolver este tipo de problemas existen métodos tales como numeración de paquetes y petición de retransmisión, que permiten al destino obtener toda la información requerida enviada desde el origen a través del uso de paquetes. Se puede mencionar que requerimientos de tráfico de datos tales como: tamaño y velocidad, crearon la necesidad de una conmutación de ráfaga, en la cual todavía se conserva una cabecera pero la variabilidad en la cantidad de datos a transmitirse constituye la mayor diferencia con los otros tipos de conmutación.

Para dar solución a varios requerimientos de transmisión de datos para redes de alta capacidad apareció el concepto de conmutación de etiquetas MPLS (Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo). Éste establece cuál es la ruta que deben seguir los datos para alcanzar un destino solamente con el uso de etiquetas cuyo procesamiento es rápido y sencillo. MPLS establece el uso de etiquetas que permiten dirigir de manera rápida y eficiente los datos básicamente con el establecimiento de una conexión virtual entre dos puntos pertenecientes a una red de paquete conmutado, la misma que permite el flujo de tráfico basado en paquetes.

Finalmente, la Conmutación de Circuitos Óptica², busca que la información no requiera de conversiones de medio, es decir no abandone el campo óptico, ya que por tal conversión se agrega latencia en la transmisión de los datos. Dicha conversión es de tipo Electrónica-Óptica-Electrónica, y es necesaria para realizar el direccionamiento de un paquete dentro de una red óptica.

1.1.2 TRANSPARENCIA Y OPACIDAD EN REDES ÓPTICAS

El uso de WDM permitió manejar mayores capacidades de transmisión evitando los problemas de atascamiento debido al fenómeno del cuello de botella, pero en cambio presentó el problema de la enorme cantidad de canales de longitud de onda que tenían que conmutarse, debido a esto se prefirió convertir las longitudes

² Este concepto será analizado más a profundidad en la sección 1.2

de onda, que transportaban los flujos de datos, en señales eléctricas, exclusivamente para poder conmutarlas, esta técnica todavía se utiliza en la actualidad, pero representa uno de los principales problemas en cuanto a inserción de latencia en las redes ópticas.

De lo anteriormente expuesto se puede decir que, por ejemplo, en los sistemas SDH/SONET la multiplexación, la realización de conexiones y el control *add/drop* se realizan mediante el uso de la electrónica, es decir existe una conversión Óptica – Electrónica – Óptica (OEO), a los sistemas que utilizan este tipo de conversión, para poder efectuar la conmutación, se los denomina Opacos³.

En la actualidad, considerando el nivel de Opacidad, se pueden establecer cuatro tipos de redes ópticas:

1. Las redes basadas en SDH/SONET, en las que se considera una longitud de onda sencilla que se transmite punto a punto ópticamente, a éstas se las denomina Redes Opto – Electrónicas.
2. Las redes que usan WDM para transmitir múltiples longitudes de onda, con un grado tecnológico avanzado, en lo que se refiere a óptica, pero que mantienen a la conmutación y al control en el dominio electrónico, son llamadas Redes Ópticas Opacas.
3. Existen también redes en donde se usa tanto WDM como conmutación óptica, aunque en éstas el control de la conmutación y de la red se lleven a cabo electrónicamente, a este tipo de redes se las conoce como Redes Ópticas con Transparencia Variable, las mismas que pueden llegar a ser:
 - Opacas, si existe conversión al campo electrónico para regenerar señales, o adaptarlas para conmutación o requerimientos de transmisión.

³ Cabe destacar que para otros autores la transparencia en una red implica la capacidad de transferir cualquier tipo de información independientemente del tipo de protocolo, formato de código, velocidad de transmisión y técnica de modulación que se esté usando en dicha red.

- Totalmente transparentes, si no existe conversión Opto – Electrónica; y,
 - Parcialmente transparentes, si por ejemplo, el control es efectuado electrónicamente pero los datos de carga útil (*Payload*) permanecen en el campo óptico.
4. Finalmente, existen redes en donde todas las operaciones y funciones, incluyendo el control de conmutación, son realizados ópticamente, a éstas se las llaman Redes totalmente ópticas (*All-Optical*).

1.2 CONMUTACIÓN DE CIRCUITOS ÓPTICA (OCS) ^{[1], [23]}

La Conmutación de Circuitos Óptica permite establecer una trayectoria específica e invariable para todos los datos. Una vez que los datos llegan a la red óptica, son transformados al dominio óptico en los nodos de Borde, a continuación se establece una ruta a través de los nodos de *Core*, de manera que los datos viajen a través de ella hasta encontrar otro *router* de Borde que les permita abandonar la red y llegar a su destino. Dicho proceso se obtiene con el uso de equipos especiales para la maniobra de fibras ópticas, del haz de luz, de longitudes de onda, etc. A continuación se plantea cuales son los dispositivos que permiten realizar la transmisión óptica, la conmutación óptica; y, el manejo y control de la red óptica.

Para entender de una mejor manera el proceso de conmutación óptica, primero se analiza la conmutación de circuitos óptica, dicho proceso se basa en el manejo de circuitos ópticos para poder llevar a cabo la conmutación.

En un primer plano se analiza las tecnologías de conmutación óptica, para luego, estudiar los demás componentes de las redes ópticas y sus funciones; y, finalmente, se analizará en conjunto todas las partes que permiten llevar a cabo la Conmutación de Circuitos Óptica (OCS).

1.2.1 TECNOLOGÍAS DE CONMUTACIÓN DE CIRCUITOS ÓPTICA

Una clasificación del proceso de conmutación de circuitos óptica se puede dar analizando el efecto físico que es responsable de la conmutación, entre las tecnologías más destacadas de conmutación óptica se puede mencionar las siguientes: Conmutación Electro – Óptica (*EO*), Conmutación Opto - Acústica (*AO*), Conmutación Termo – Óptica (*TO*), Conmutación Opto – Mecánica (*OM*) y conmutación óptica con Amplificador Semiconductor Óptico (*SOA*, *Semiconductor Optical Amplifier*).

Los efectos relacionados a los tipos de conmutación antes mencionados, tales como: el efecto electro – óptico (*EO*), el efecto Opto – Acústico (*AO*), el efecto termo – óptico (*TO*) y el efecto óptico no lineal, son definidos por los cambios en el índice de refracción de un material debido a la aplicación de un campo o una acción externa. A continuación se revisa brevemente cada uno de ellos.

1.2.1.1 Conmutación Electro – Óptica (*EO*)

En este tipo de conmutación el índice de refracción cambia según la aplicación de un campo Eléctrico. En esta se utilizan guías de onda ópticas y acopladores direccionales que están implementados en substratos de Niobato de Litio ($LiNbO_3$ o *LN*), ver **Fig. 1 - 2**.

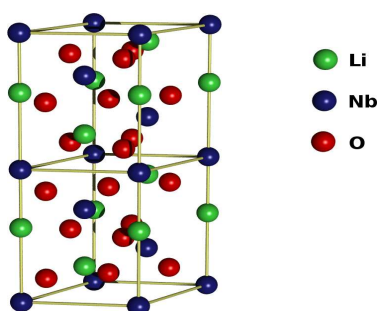


Fig. 1 - 2 Estructura del cristal de Niobato de Litio. ^[23]

Un acoplador direccional es un dispositivo que se compone de dos guías de onda que se encuentran muy cercanas entre si. Al estar ubicadas de esta forma la

potencia óptica que ingresa a una de ellas es transferida a la otra después de haber recorrido una cierta distancia llamada “Distancia de propagación”, y nuevamente regresa a la guía de onda original después de recorrer la misma distancia de propagación una vez más. Al tener el primer caso se establece un estado de *Cross State* en un dispositivo de Conmutación óptica, es decir un haz de luz entra por una guía de onda y sale por otra. Para evitar que la luz cambie de guía de onda, se aplica voltaje a través de la misma obteniéndose de esta manera un cambio en el índice de refracción que impide que la potencia óptica sea transferida a la otra guía de onda, aquí se tiene un estado *Bar State* en la conmutación, ver **Fig. 1 - 3**, es decir la luz que entra en una guía de onda permanece en ésta hasta abandonar el dispositivo de conmutación.

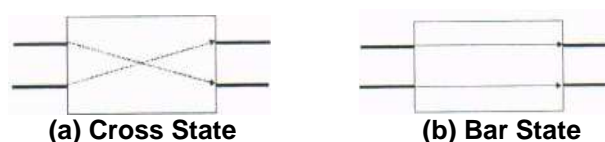


Fig. 1 - 3 Estados en un dispositivo de conmutación. ^[1]

En el efecto EO, un campo eléctrico aplicado causa un desplazamiento de electrones, el cual resulta en un cambio del índice de refracción, a este tipo de fenómeno se le denomina efecto *Pockels*. El LiNbO_3 es un cristal en el que grandes substratos en forma de obleas, pueden crecer y presentar pequeñas constantes dieléctricas. Por lo tanto, teniendo como base al LiNbO_3 ⁴ pueden obtenerse dispositivos de Conmutación Electro-Óptica que presentan tiempos de conmutación que están en el rango de microsegundos e inclusive decenas de nanosegundos, y con consumo bajo de potencia. La **Ecuación 1 - 1** [1], presenta la variación del índice de refracción en función del campo eléctrico:

$$\frac{1}{n^2} = \frac{1}{n_o^2} + rE + hE^2 + \dots \quad \text{Ecuación 1 - 1}$$

⁴ El LiNbO es usado también en la construcción de teléfonos celulares y moduladores ópticos debido a su efectividad en el manejo de ondas acústicas. En el LiNbO , se obtiene un excelente índice de refracción, experimentalmente se ha alcanzado valores entre 2.21 y 2.14 a una longitud de onda de 1.55 μm .

Donde: n : Índice de refracción
 E : Campo eléctrico
 n_o : Índice de refracción en ausencia del campo eléctrico
 r : Coeficiente electro – óptico
 h : El coeficiente electro – óptico de más alto orden

Muchos de los conmutadores de guía de onda electro - óptica, usan dicho efecto para conmutar un haz de luz escogiendo una salida de entre varias, ver **Fig. 1 - 4**.

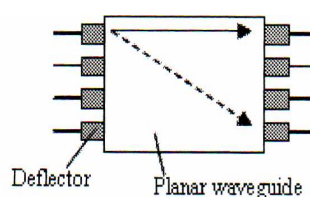


Fig. 1 - 4 Conmutador de longitud de onda tipo deflector 4 x 4. ^[1]

Otros usan elementos ópticos (lentes de guía de onda) los cuales coliman⁵ la luz emitida, ésta a su vez choca sobre un prisma formado por un electrodo, cuyo índice de refracción cambia con la aplicación de voltaje, ver **Fig. 1 - 5**.

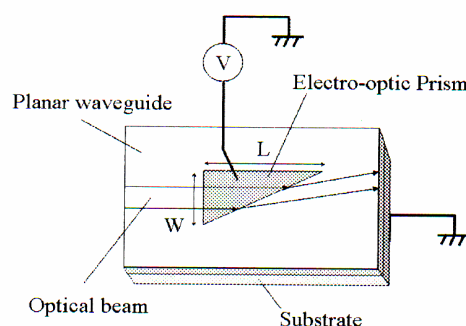


Fig. 1 - 5 Prisma deflector electro – óptico. ^[1]

Existen también arreglos de guía de onda, en los cuales básicamente la luz entrante es dividida entre guías de onda y es sometida a un cambio de fase, ver **Fig. 1 - 6**. Para poder asimilar de una mejor forma este concepto se analiza la **Fig. 1 - 7**.

⁵ Efecto por el cual diversas trayectorias de luz con diferentes direcciones, son agrupadas en una misma dirección.

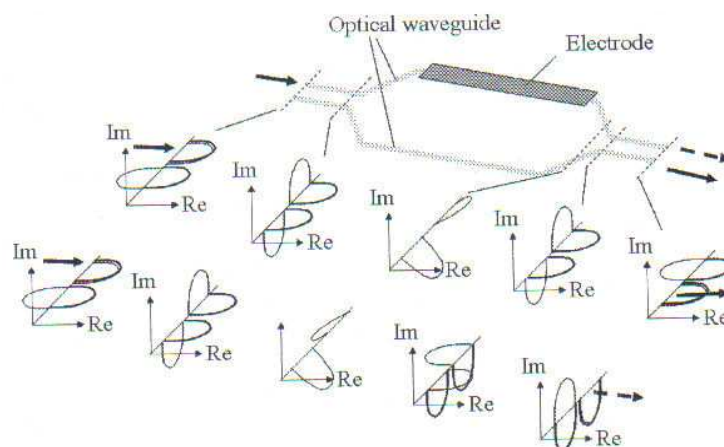


Fig. 1 - 6 Conmutación utilizando cambio de fase en la señal óptica. [1]

Cuando la luz entra al arreglo, un acoplador genera dos tipos de señales ópticas una llamada Modo Simétrico (*Symmetric Mode*) (En la **Fig. 1 - 7** con negro acentuado en los Ejes Im vs. Re) y otra denominada Modo Asimétrico (*Asymmetric Mode*) (En la **Fig. 1 - 7** en los Ejes Im vs. Re con negro no acentuado), cada una destinada a una guía de onda distinta.

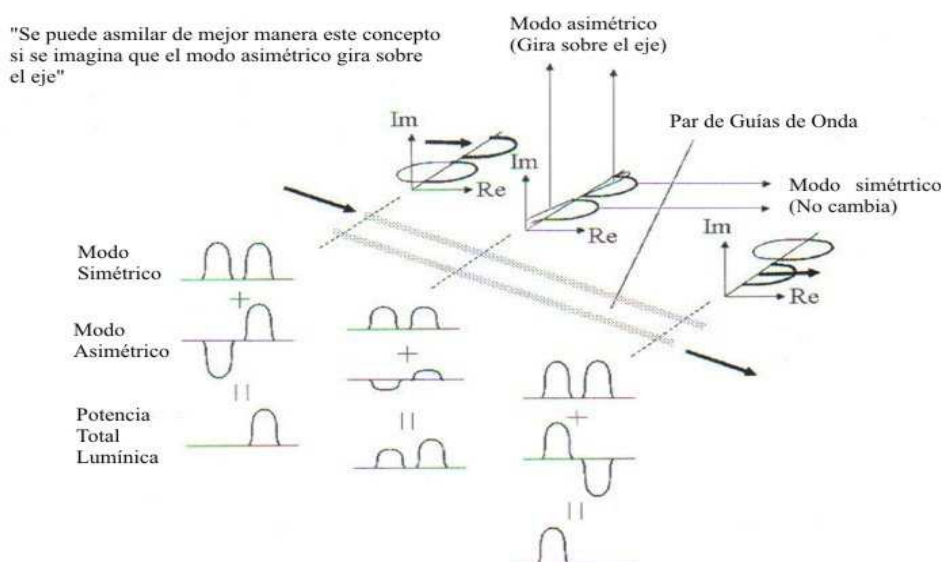


Fig. 1 - 7 Conmutación utilizando cambio de fase. [1]

Sobre la guía de onda que lleva el Modo Asimétrico se aplica voltaje a través de un electrodo para cambiar la fase de dicha señal, mientras que, sobre la otra guía el Modo Simétrico no se ve afectado bajo ningún motivo, ver **Fig. 1 - 6**. A la salida

del arreglo existe otro acoplador que permite sumar las dos señales de manera que se obtenga el estado *Cross State* o el *Bar State*.

Para alcanzar un estado de *Cross State*, el modo asimétrico (ver Ejes Im vs. Re de la **Fig. 1 - 7**) rota sobre su propio eje de tal forma que alcance 180° o π con respecto al modo simétrico, obteniéndose que al momento de sumarse con dicho modo solo exista potencia óptica en la guía de onda contraria a la que entró, ver **Fig. 1 - 7** (Línea continua a la salida de la guía de onda); y, para tener un estado de *Bar State* solo se tiene que manipular la fase en la guía de tal manera que no exista variación en la fase de los dos modos, es decir que aparezcan como al inicio, ver **Fig. 1 - 6** (Línea entrecortada a la salida de la guía de onda).

El modo óptico (Asimétrico o Simétrico) en éste análisis fue tratado como una variable compleja, es decir posee una parte Real (Re) y una Imaginaria (IM), esto básicamente se realiza con el objetivo de analizar la fase como el giro del modo asimétrico sobre su eje. Se puede mencionar también que este es el principio de funcionamiento que tienen los Interferómetros Match Zehnder (*MZI, Match-Zehnder Interferometer*), en los cuales a la suma de los dos modos antes mencionados se la denomina interferencia constructiva o destructiva.

1.2.1.2 Conmutación Opto - Acústica (AO)

Para comprender de mejor manera el efecto opto – acústico, es pertinente primero mencionar al efecto piezoeléctrico y a los materiales isotrópicos. El efecto piezoeléctrico, es básicamente, el efecto por el cual se obtienen señales eléctricas a partir de la aplicación de presión (o sonido) sobre un cuerpo y viceversa, mientras que un material isotrópico es aquel que presenta propiedades físicas constantes en todas las direcciones.

Una onda acústica viajando en un medio presenta variaciones de forma aleatoria, ver **Fig. 1 - 8**, las vibraciones de las moléculas debido a estas variaciones de compresión y dilatación producen una alternancia en la polarización óptica que conlleva a la variación del índice de refracción. Para producir una onda acústica

sobre un medio (ya sea en su superficie o en su volumen) se utiliza un material con características piezoeléctricas, y sobre él se aplica un campo eléctrico de radio frecuencia con la ayuda de electrodos (llamados transductores acústicos), en consecuencia debido al efecto piezoeléctrico, se producirá una onda de sonido sobre el material. Si se utiliza un material que aparte de tener propiedades piezoeléctricas también posee las isotrópicas, se obtiene que la difracción debida al efecto antes mencionado, resulta en la deflexión de la luz emitida a lo largo del medio.

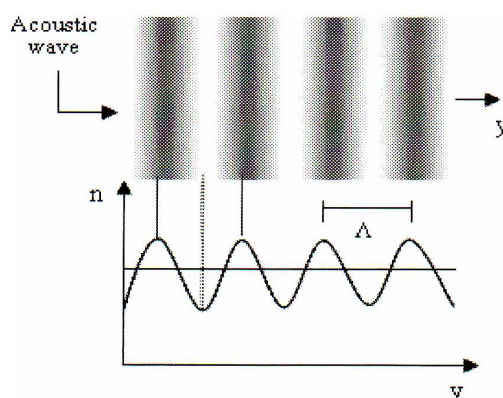


Fig. 1 - 8 Variación del índice de refracción n , inducido por una onda de sonido representada por una secuencia de compresiones (áreas oscuras) y dilataciones (áreas claras) propagándose en la dirección y en el medio con periodo Λ . ^[1]

En los dispositivos ópticos, en los que la luz es confinada en una guía de onda, la onda de superficie producida, provee una eficiencia óptica – acústica más alta que las ondas de volumen, debido a que la potencia de la onda de superficie está concentrada en una delgada capa superficial que es parte de la guía de onda óptica.

El LiNbO_3 posee un excelente efecto óptico – acústico, y debido a que se pueden fabricar guías de onda de pérdidas bajas con las tecnologías existentes, es ampliamente usado con el fin de construir conmutadores que utilicen dicho efecto.

El proceso de difracción mayormente utilizado, es aquel en el que un solo haz es difractado, a este tipo de difracción se le conoce como difracción *Bragg*, ver **Fig. 1 - 9**.

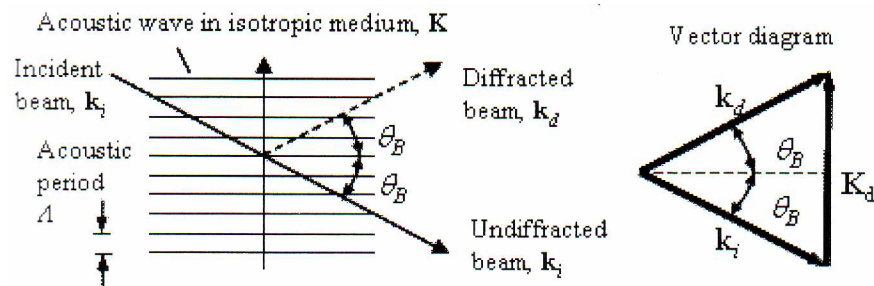


Fig. 1 - 9 Si el medio isotrópico es excitado (Aplicación de un campo eléctrico) el haz es desviado de su trayectoria original (Difracción acústica *Bragg* de periodo Λ).^[1]

Analizando el diagrama vectorial obtenido del análisis anterior, se sabe que, el diagrama formado es un triángulo isósceles en donde los vectores de onda difractados y no difractados son coplanares y forman un ángulo $2\theta_B$, donde θ_B es el ángulo de *Bragg*.

La operación de un conmutador opto - acústico utilizando desviación de haz, se muestra en la **Fig. 1 - 10**.

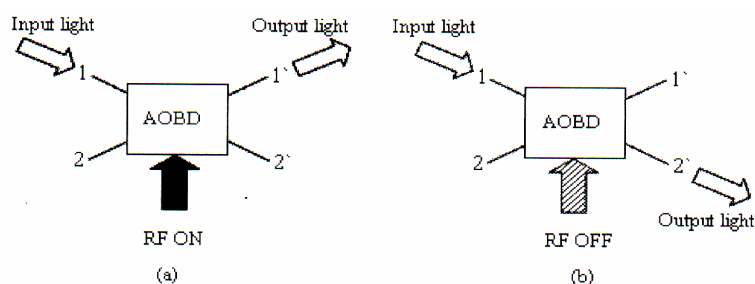


Fig. 1 - 10 Conmutación óptica basada en deflexión de haz opto - acústico (AOBD) con entrada de luz monocromática⁶ a través del puerto 1: (a) estado *Bar State*, (b) estado *Cross State*.^[1]

Aquí básicamente se puede apreciar un dispositivo de desviación de haz opto-acústico (AOBD, *Acousto-Optic Beam Deflector*) con dos entradas y dos salidas. En el estado *Bar State* un haz de luz entra por el puerto 1 y es desviado y enrutado hacia el puerto 1', mediante la aplicación de una señal de control RF

⁶ Radiación electromagnética de una sola longitud de onda.

(Radio Frecuencia); mientras que, el estado *Cross State* es obtenido cuando no se aplica ninguna señal de RF, es decir no se produce desviación.

1.2.1.3 Conmutación Termo - Óptica (TO)

El concepto de conmutación óptica utilizando el efecto termo – óptico (TO), no es nuevo, varios estudios e investigaciones al respecto ya se realizaron en los años 80, pero para aquella época los equipos que podían manejar este tipo de conmutación no eran tan atractivos, ya que tenían una lenta velocidad de conmutación y eran sensibles a los efectos térmicos.

En la actualidad, con el uso de equipos que realizan conmutación óptica, mediante el efecto termo - óptico (TO), se alcanzan velocidades de conmutación que varían en un rango de entre centenas de μ seg. a varios mseg. La conmutación termo - óptica (TO), utiliza la dependencia de temperatura que tiene el índice de refracción en materiales termo - ópticos, expresada como el Coeficiente Termo - Óptico $\left(\frac{dn}{dT}\right)$, para realizar el proceso de conmutación.

La **Tabla 1 - 1**, muestra tres de los materiales termo-ópticos mas utilizados en la fabricación de guías de onda óptica, con sus respectivos Coeficientes Termo - Ópticos, Índices de refracción y Conductividades Térmicas.

Material	Refractive Index (at 1550nm)	$C_{to}=dn/dT$ [$10^{-4}K^{-1}$]	Thermal Conductivity σ_{th} [$WK^{-1}m^{-1}$]
Polymers	1.3 - 1.7	(-1) – (-4)	0.1 - 0.3
Silica	1.5	0.1	1.4
Silicon	3.5	1.8	168

Tabla 1 - 1 Propiedades de los polímeros, silicón y cristal de sílica a temperatura ambiente. ^[1]

Se puede mencionar que los polímeros son la mejor elección a la hora de establecer el material con el que se van a construir guías de onda termo-ópticas, ya que poseen un alto Coeficiente Termo – Óptico (En magnitud) y presentan una baja conductividad térmica que los hace menos sensibles a efectos externos. Los

dos restantes son utilizados en la construcción de conmutadores interferométricos debido principalmente a su alta conductividad térmica.

Con el uso de micro calefactores, ver **Fig. 1 - 11**, una variación de temperatura puede ser inducida entre estructuras de guía de onda, lo que conduce a cambios en el índice de refracción, y por tanto a la conmutación de la trayectoria de la luz.

Como se mencionó anteriormente, la conmutación óptica realizada mediante el efecto termo – óptico (*TO*), se logra mediante variación de temperatura a lo largo de la guía de onda, que se obtienen mediante el uso de micro calefactores que producen energía térmica con la inyección de corriente a los mismos. El cambio de temperatura en las guías de onda puede producir dos de efectos:

1. Cambio en la longitud de las guías de onda para producir variación en la Distancia de Propagación (L)⁷, ver **Fig. 1 - 11**; o,

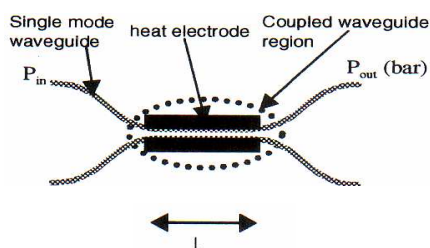


Fig. 1 - 11 Configuraciones básicas de conmutadores con guía de onda termo – óptica. ^[1]

2. Cambio en la fase de una de las guías de onda para producir interferencia constructiva o destructiva⁸, ver **Fig. 1 - 12**.

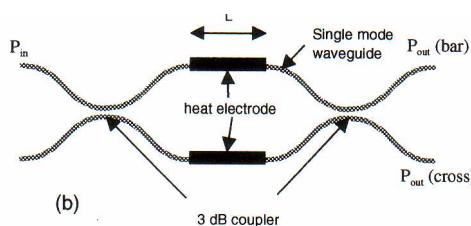


Fig. 1 - 12 Configuraciones básicas de conmutadores con guía de onda termo – óptica. ^[1]

⁷ Revisar el Efecto Electro – Óptico (EO).

⁸ Revisar el Efecto Electro – Óptico (EO), Dispositivos MZI.

1.2.1.4 Conmutación Opto – Mecánica (OM)

1.2.1.4.1 Conmutación Opto – Mecánica (OM) convencional

Este tipo de conmutación se basa en el uso de sistemas de posicionamiento mecánico, en donde la conmutación se lleva a cabo por el movimiento de dispositivos ópticos o por el movimiento de fibras ópticas.

Al revisar el concepto mencionado en el párrafo anterior, se puede decir que, existen dos tipos de conmutadores Opto – Mecánicos (OM), uno que se basa en el movimiento de fibras ópticas, y otro que se basa en el movimiento de componentes ópticos, como prismas, lentes, espejos, colimadores, etc. A los primeros se los denomina *Conmutadores de Fibra* y a los que usan componentes ópticos se les llama de *Haz Traslado*.

El principio que manejan los “*Conmutadores de Fibra*” se puede apreciar en la **Fig. 1 - 13**, en donde el movimiento mecánico se da por la actuación de un magneto sobre un arreglo de fibras ópticas que se revisten con una capa ferromagnética.

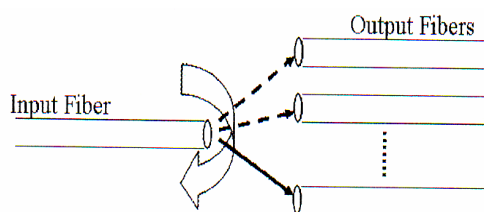


Fig. 1 – 13 Principio de operación del “*Conmutador de Fibra*”. [1]

En los conmutadores mecánicos denominados de “*Haz Traslado*”, el funcionamiento se remite exclusivamente al movimiento de dispositivos ópticos como se muestra en la **Fig. 1 - 14**.

En primera instancia se puede apreciar un dispositivo que emula la actuación de un interruptor de *ON/OFF*, es decir cuando el dispositivo no obstruya el paso de la

luz entre las fibras se tendrá una condición de Encendido, mientras que cuando se sitúe entre las fibras se tendrá una condición de apagado.

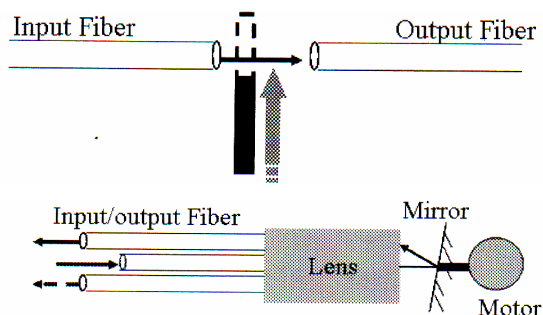


Fig. 1 - 14 Ejemplos de configuraciones con movimiento de componentes ópticos. ^[1]

En la **Fig. 1 - 14**, también se aprecia la actuación de un motor girando un espejo que permitirá desviar la luz entrante por una fibra hacia otra (con la ayuda de lentes de tipo GRIN⁹), llevando a cabo de esta manera el proceso de conmutación.

Existen también los conmutadores que usan la técnica conocida como reflexión interna total, en donde el elemento óptico utilizado es un prisma y una placa de conmutación (*Switch Plate*), esta última es un cristal con una superficie oscura, que se usa para reflejar el haz entrante proveniente de una fibra óptica a través de lentes de tipo GRIN, ver **Fig. 1 - 15**.

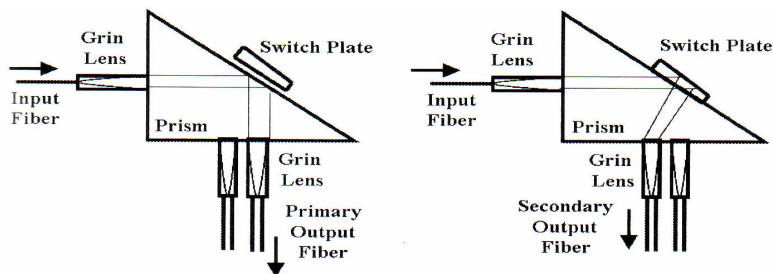


Fig. 1 - 15 Principio de operación de un conmutador usando reflexión interna total. ^[1]

⁹ *Gradient Index Lens*: Es un lente cuyo índice refractivo varía continuamente como una función de coordenadas espaciales en el medio. De acuerdo a esta variación pueden ser utilizados para: 1) Aumentar la potencia óptica de un haz valiéndose de dicha variación (Axial) ó 2) Corregir las deficiencias de un lente (Radial).

1.2.1.4.2 Conmutación Opto – Mecánica (OM) basada en MEMS (Sistemas Micro Electro Mecánicos)

Los conmutadores Opto – Mecánicos (OM) convencionales, que usan espejos móviles y obturadores¹⁰, son una buena vía de conmutación de luz que presenta bajas pérdidas; sin embargo, el tamaño, el costo, la velocidad y confiabilidad asociada con las partes mecánicas que usan limita su uso práctico.

Debido a su estructura, se pueden encontrar dos tipos bien definidos de conmutadores opto - mecánicos (OM): uno que usa estructuras reflectivas o refractivas para controlar la dirección de propagación o la intensidad del haz de luz, ver **Fig. 1 - 16**, y otra que permite, mediante difracción¹¹, controlar la fase de la luz, ver **Fig. 1 - 17**.

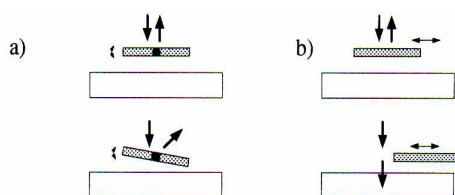


Fig. 1 - 16 (a) Conmutación óptica utilizando la rotación de un espejo para cambiar la trayectoria de la luz, (b) utilizando un espejo con trayectoria lineal.^[1]

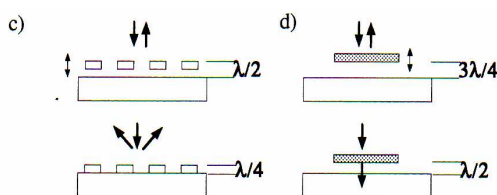


Fig. 1 - 17 (c) Difracción sintonizable, (d) dispositivo para difracción de película delgada.^[1]

Básicamente, los sistemas micro electro mecánicos (MEMS), funcionan con la ayuda de micromáquinas, las mismas que utilizan efectos electroestáticos¹² para

¹⁰ Dispositivo para controlar la cantidad de luz que llega a un elemento fotosensible.

¹¹ Desviación del rayo luminoso al rozar el borde de un cuerpo.

¹² Distribución de cargas estáticas en un cuerpo cargado

realizar la denominada “actuación”, para este caso es simplemente realizar el movimiento de las microestructuras (microactuadores) presentes en las micromáquinas de una posición a otra, ver **Fig. 1 - 18**.

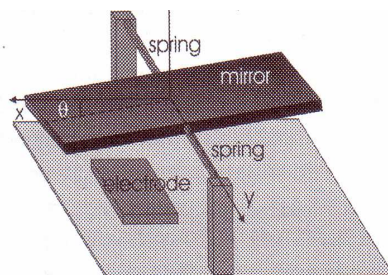


Fig. 1 - 18 Estructura de un actuador electrostático con espejo inclinado. ^[1]

Existen varios factores que justifican la utilización de la electrostática en las micromáquinas. De entre los factores mas destacados se puede decir que, los materiales, procesos y técnicas disponibles, para la implementación de micro actuadores electrostáticos, pueden ser realizadas con tecnologías de manufactura para microelectrónica, es decir, la implementación se puede llevar a cabo con técnicas ya conocidas, otro factor importante considera que los micro actuadores electrostáticos, generalmente no experimentan la histéresis asociada con las propiedades del material, como es común en materiales magnéticos y piezoeléctricos, y finalmente un factor determinante es que son dispositivos que disipan baja potencia y cuyo campo electrostático puede ser blindado con materiales convencionales, tales como, el poli silicón dopado o cualquier metal.

Los actuadores electrostáticos usan la fuerza generada entre dos o más conductores a potenciales diferentes, dichas fuerzas generan capacitancias que dependen de la posición. El tiempo de carga y descarga eléctrica en dichas capacitancias cambia según la fuerza aplicada. Los actuadores electrostáticos son usados para mover un elemento de una posición a otra y mantenerla por un periodo prolongado.

1.2.1.5 Conmutación Óptica con Amplificador Óptico de Semiconductor (SOA, *Semiconductor Optical Amplifier*)

Para comprender la forma en que un SOA realiza el proceso de conmutación en el campo óptico, a continuación se analiza primero su funcionamiento básico y los tipos de SOA's que existen.

Un SOA está constituido por una capa de material semiconductor puro alojada en medio de dos capas, una de material tipo p y otra de tipo n. A través de un primer acoplamiento (*input facet*) de la fibra óptica con el amplificador, el haz de luz incidente pasa por la región activa (la cual se forma con la presencia de corriente eléctrica) para luego, mediante otro acoplamiento (*output facet*), ser dirigido hacia otra fibra óptica, ver **Fig. 1 - 19**.

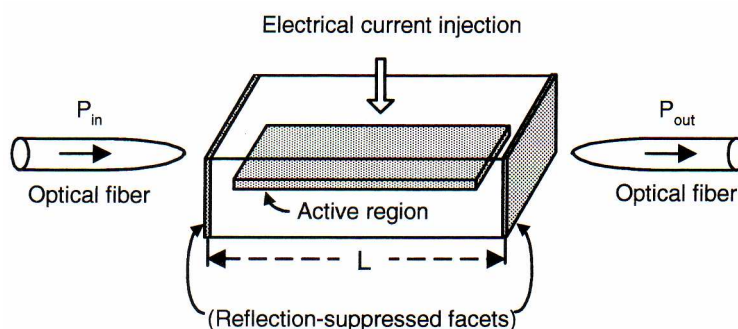


Fig. 1 - 19 Estructura de un SOA. ^[1]

Se pueden encontrar dos tipos de SOA's: Fabry-Perot (*FP*) y de onda viajera (*Travel Wave, TW*).

La diferencia entre un amplificador FP y un TW, radica básicamente en que el primero tiene una reflectividad considerable en los acopladores (*input, output facets*), la misma que permite una reflexión hacia la región activa, mientras que, en un amplificador TW existe una reflectividad insignificante en los acopladores, lo que conlleva a que la luz incidente sea amplificada sin reflexión.

Los arreglos de SOA's son usados como compuertas que actúan mediante la manipulación de la corriente eléctrica. Como se puede apreciar en la **Fig. 1 - 20**, cada una de las N entradas es conectada a un *Splitter* de forma que la señal proveniente de dichas entradas llegue a cada uno de los arreglos de compuertas SOA, aquí se lleva a cabo una decisión de multiplexación permitiendo o no, el paso de las señales ópticas hacia las diferentes salidas las cuales guardan semejanza con la estructura antes mencionada para las entradas.

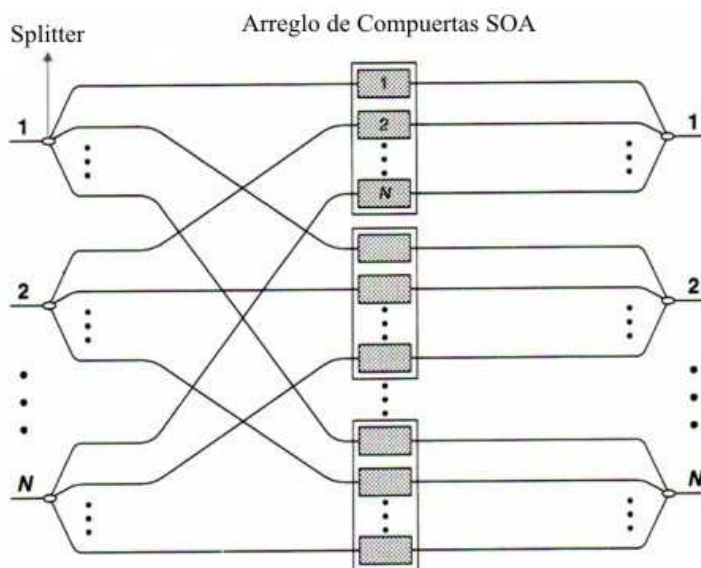


Fig. 1 - 20 Arreglo de SOA's para conmutación. [1]

Además de lo antes mencionado los SOA pueden utilizarse para seleccionar longitudes de onda, es decir, permiten llevar a cabo el proceso de filtraje de longitudes de onda ver **Fig. 1 - 21**.

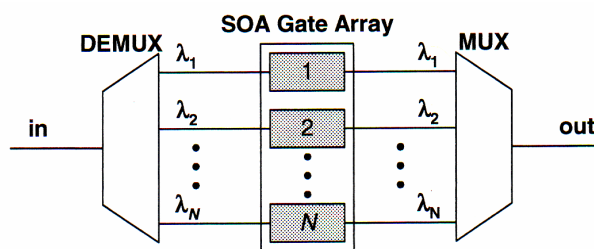


Fig. 1 - 21 Arreglo de SOA's para selección de longitud de onda. [1]

1.2.2 ELEMENTOS DE LA RED ÓPTICA WDM (WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING)

Existen elementos básicos en una red óptica WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) que permiten realizar la transmisión WDM, la conmutación; y, el manejo y control de la red óptica, estos elementos son:

Terminal de Línea Óptico (OLT, *Optical Line Terminal*), Multiplexor para Inserción/Extracción Óptica (OADM, *Optical Add/Drop Multiplexer*) y los Crosconectores Ópticos (OXC, *Optical Cross Connects*).

1.2.2.1 Terminal de Línea Óptico (OLT)

Los OLT's, ver **Fig. 1 - 22**, se utilizan actualmente en los sistemas de transmisión punto a punto WDM.

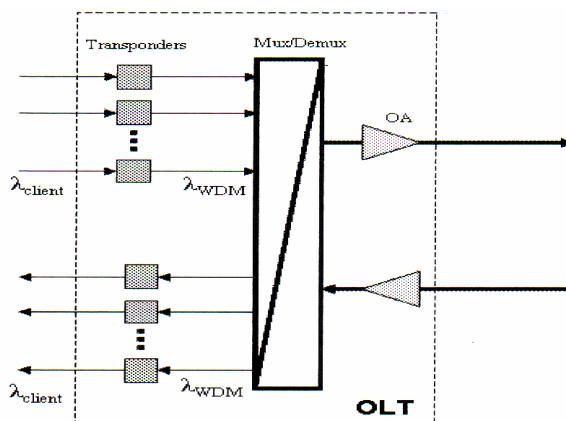


Fig. 1 - 22 Equipo terminal de línea óptico (OLT). ^[1]

Dichos terminales permiten separar varias longitudes de onda y convertirlas al dominio Electrónico para ser analizadas y de esta manera determinar si han llegado a su destino o si necesitan nuevamente regresar al campo Óptico utilizando otro OLT, el mismo que permitirá llevar a cabo la conversión al medio óptico, la multiplexación y el envío sobre otro enlace de fibra, ver **Fig. 1 - 23**.

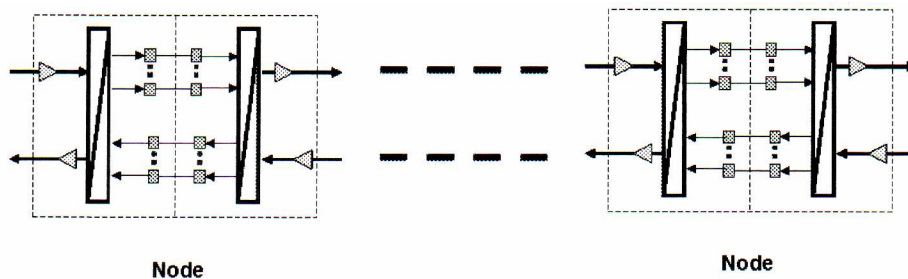


Fig. 1 - 23 OLT's en un enlace de transmisión WDM punto a punto entre dos Nodos. ^[1]

Un OLT se constituye básicamente de Conversores de longitud de onda (*Transponders*), Multiplexores/Demultiplexores (MUX/DEMUX) y Amplificadores Ópticos¹³ (OA). Los MUX/DEMUX, se encargan de multiplexar un cierto número de longitudes de onda sobre una fibra óptica para la transmisión, el uso de los MUX/DEMUX es muy ventajoso debido a que introducen pérdidas bajas y rechazan ruido de emisión espontánea amplificada (*ASE, Amplified Spontaneous Emission*).

En una red óptica, los OLT's proveen la interfaz entre los enlaces de transmisión WDM y también entre los OXC's/OADM's, ver Fig. 1 - 24.

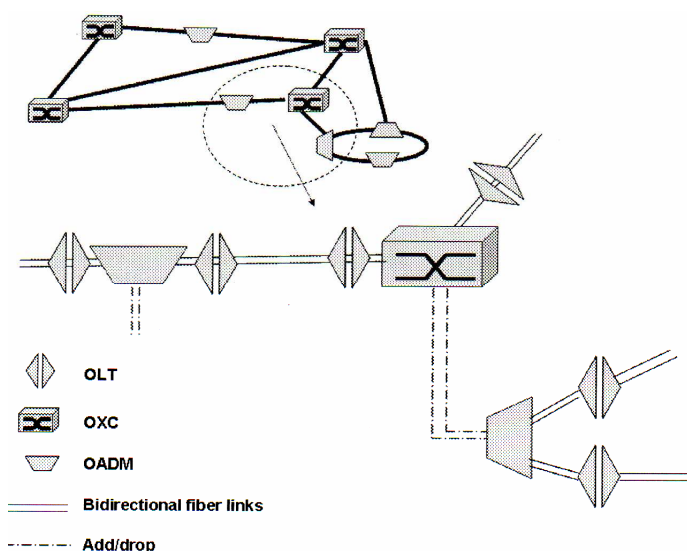


Fig. 1 - 24 Ejemplo de una topología de red con OLT's. ^[1]

¹³ Un OA permite obtener un aumento de potencia óptica en las trayectorias de luz.

1.2.2.2 OXC (*Optical Cross Connect*)

Los Crosconectores Ópticos son elementos avanzados de red óptica que están en capacidad de conmutar trayectorias de luz, adicionar y retirar tráfico; y, configurar topologías de red óptica.

Se utilizan particularmente en topologías de tipo malla y en la interconexión de varios anillos en redes de *Core* y *Metro*.

1.2.2.2.1 Clasificación de los OXC's (*Optical Cross Connects*)

Se pueden considerar 4 tipos de OXC's, los mismos que se analizan a continuación:

1) Crosconectores Ópticos de Fibra (*FXC, Fiber Cross-Connect*): Son Crosconectores Ópticos que conmutan todas las longitudes de onda (λ) de un puerto de fibra entrante a uno saliente, ver **Fig. 1 - 25**, es decir todas las longitudes de onda presentes en una fibra óptica son conmutadas al mismo tiempo, se le considera como un "Patch panel de fibra automatizado", comparado a los 3 tipos restantes, es el menos complejo, caro y flexible.

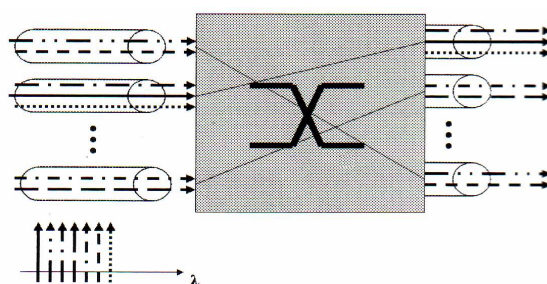


Fig. 1 - 25 Principio de operación de un FXC. ^[1]

2) Crosconectores Ópticos de Banda de Longitud de Onda (*WBXC, Wavelength-Band Cross-Connect*): Son Crosconectores Ópticos que basan su funcionamiento en la conmutación de "bandas", que no son nada más que varias longitudes de

onda que han sido agrupadas considerando su adyacencia en el espectro de transmisión, ver **Fig. 1 - 26**.

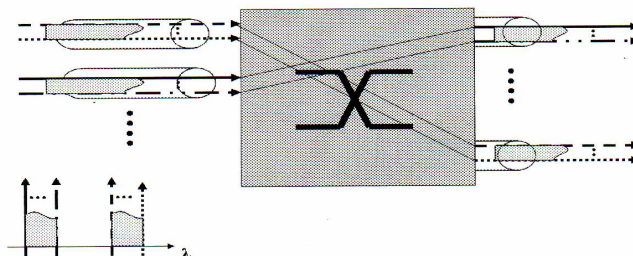


Fig. 1 - 26 Principio de operación de un WBXC. ^[1]

Son más caros y complejos, pero que tienen más flexibilidad que los FXC's, para este caso se requieren estructuras especiales en los puertos de entrada y salida que permitan filtrar las longitudes de onda de tal manera que se pueda llevar a cabo la agrupación antes mencionada.

3) **Crosconectores Ópticos de Longitud de Onda Selectiva (WSXC, Wavelength Selective Cross-Connect)**: Son Crosconectores Ópticos que basan su funcionamiento en la conmutación simultánea de las longitudes de onda en cada canal. Es decir permite que una longitud de onda presente en una fibra óptica pueda ser conmutada hacia otra diferente sin necesidad de afectar al resto de longitudes de onda que no abandonan dicha fibra, ver **Fig. 1 - 27**.

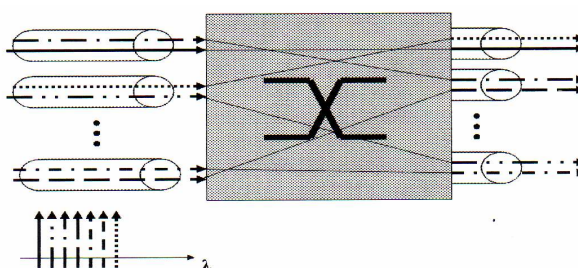


Fig. 1 - 27 Principio de Operación de un WSXC. ^[1]

4) **Crosconectores Ópticos para intercambio de longitud de Onda (WIXC, Wavelength Interchanging Cross-Connect)**: Son Crosconectores Ópticos que

tienen el mismo principio de conmutación que los WSXC, pero que además, están en capacidad de realizar conversión de longitud de onda, ver **Fig. 1 - 28**.

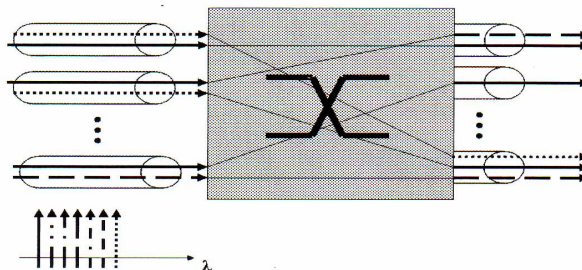


Fig. 1 - 28 Principio de Operación de un WIXC. ^[1]

1.2.2.2 Arquitecturas de los Crosconectores Ópticos (OXC, Optical Cross-Connect)

Existen tres partes fundamentales que conforman un OXC:

- 1) Puertos de entrada y salida: Son los puntos de enlace con elementos de red óptica o con los puertos de los clientes.
- 2) Malla de conmutación: Es el núcleo del OXC, está formado por dispositivos de conmutación interconectados entre si; dependiendo de dicha interconexión, se tendrá una arquitectura de malla independiente de la longitud de onda, ver **Fig. 1 - 29**, es decir que no dependerá de una longitud de onda en particular, o dependiente de la longitud de onda, ver **Fig. 1 - 30**.

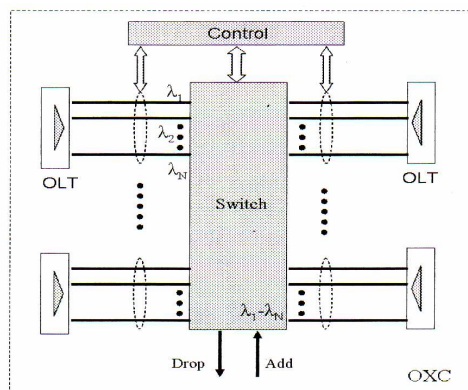


Fig. 1 - 29 OXC con una arquitectura de malla independiente de la longitud de onda. ^[1]

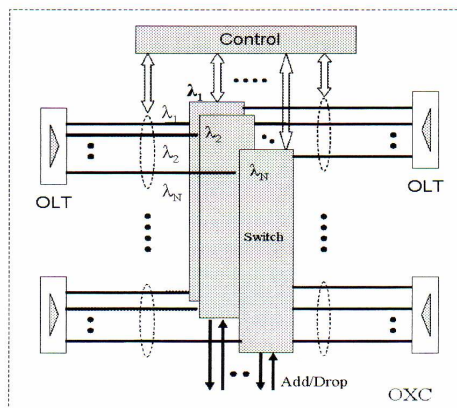


Fig. 1 - 30 Arquitectura de un OXC dependiente de la longitud de onda. [1]

Finalmente, la unidad de control, permite contar con un mecanismo de control de extremo a extremo para preparar o descartar una trayectoria de luz, además de esto, la unidad de control permite configurar la malla de conmutación considerando la información que se obtiene al establecer una cierta trayectoria de luz.

1.2.2.3 Multiplexor para Inserción/Extracción Óptica (*OADM, Optical Add/Drop Multiplexer*)

Los OADM's son elementos de red mas simples que los OXC's, si bien es cierto realizan tareas de administración de longitudes de onda, pero no lo hacen en la misma medida que los OXC's. Es decir mientras que los OXC's manejan varias líneas de transmisión WDM y tienen gran número de puertos bidireccionales, un OADM maneja solamente una línea y tiene un puerto bidireccional.

Los OADM's son usados para la inserción o el retiro de ciertos canales de longitud de onda en un nodo y se pueden clasificar como fijo o estático, ver **Fig. 1 - 31**, y los de tipo reconfigurable o dinámico, ver **Fig. 1 - 32**.

Los primeros se manejan con configuraciones estáticas add/drop, mientras que los reconfigurables seleccionan arbitrariamente las longitudes de onda sin requerir

de ninguna intervención manual en ellos, dicha reconfiguración se puede llevar a cabo usando conmutadores ópticos.

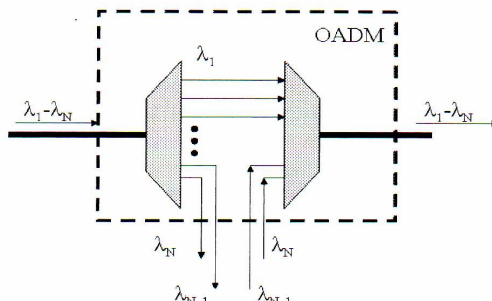


Fig. 1 - 31 OADM de tipo fijo o estático. [1]

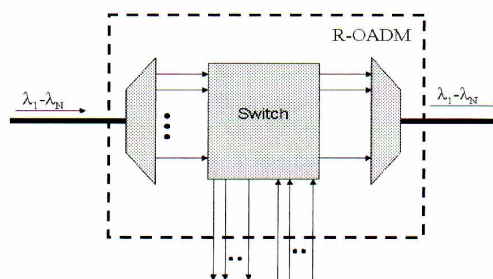


Fig. 1 - 32 OADM de tipo reconfigurable o dinámico. [1]

1.3 CONMUTACIÓN DE PAQUETES ÓPTICA (OPS) [1], [10], [12]

En la Conmutación de Paquetes Óptica (OPS), las decisiones de conmutación y enrutamiento se llevan a cabo analizando la información de cabecera que contienen los paquetes, esta información de enrutamiento configura electrónicamente las mallas de conmutación, que además, estarán administrados localmente por las tablas de enrutamiento. Idealmente dicho proceso se lleva a cabo en un ambiente enteramente óptico, pero debido a las limitaciones tecnológicas existentes, OPS realiza el control electrónicamente, al menos en parte, es decir que por ejemplo, el procesamiento de la cabecera y la sincronización son llevados a cabo en el campo electrónico.

Un nodo OPS, ver **Fig. 1 - 33**, típicamente está compuesto de tres partes principales: interfaces de entrada y salida, unidad de conmutación y unidad de control.

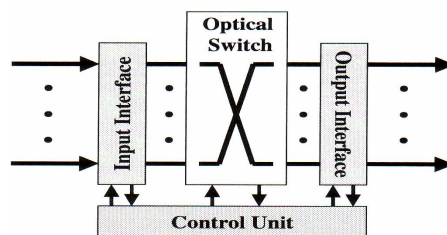


Fig. 1 - 33 Diagrama de un nodo OPS. ^[1]

Las interfaces de entrada y salida, se localizan en las terminaciones de las líneas de transmisión en donde los paquetes son preparados para ser conmutados. Dichas interfaces también realizan funciones de capa física, como por ejemplo: sincronización y delineación de paquete. Además de lo antes mencionado, las interfaces alojan *buffers* ópticos¹⁴ y conversores de longitud de onda.

La unidad de conmutación, es la parte que se encarga del proceso de conmutación, debido a esto, debe ser capaz de realizar una conmutación rápida de datos, para ello se consideran tecnologías de muy alta velocidad de conmutación, tales como la conmutación Electro – óptica (*EO*) usando Niobato de Litio o la que basa su funcionamiento en el uso de SOA's.

La unidad de control, es la parte inteligente del nodo, ésta configura la malla de conmutación y se encarga de la resolución de disputas (*Contention*) entre los paquetes. Además se encarga de analizar la información relacionada a la topología de la red, tablas de envío, planificación y *buffering*. Debido a que esta unidad requiere de una alta capacidad de procesamiento de información, la cual no puede ser llevada a cabo en el campo óptico, se utilizan técnicas que involucran procesamiento electrónico, ya que las funciones de control pueden implementarse con facilidad en el campo electrónico. Cabe destacar que la unidad de control, sólo procesa el encabezado del paquete y no su carga útil (*Payload*), por lo tanto es posible transmitir el encabezado a una velocidad inferior e independiente a la del *Payload* para facilitar su procesamiento, es decir, el uso de la electrónica en la unidad de control, no se convierte en una limitante al momento

¹⁴ Dispositivos que permiten implementar un cierto retardo de tiempo en las señales ópticas, ver sección 1.3.1

de establecer velocidades de transmisión para los datos de carga útil. Las funciones que envuelve el proceso de enrutamiento del paquete incluyen:

- Identificación de la etiqueta/dirección para determinar el destino.
- Actualización del encabezado o el cambio de etiqueta para lograr que el paquete alcance al próximo nodo.
- Sincronización del bit o paquete para el proceso de conmutación.
- Actualización de las tablas de enrutamiento, como referencia para las decisiones de enrutamiento.
- Resolución de las “Disputas”, principalmente por medio de *buffering* o la conversión de longitud de onda.
- Detección de la señal para evaluar su calidad.
- Regeneración de la señal.
- Conmutación óptica para direccionar los paquetes a los puertos de salida apropiados.

1.3.1 TÉCNICAS DE RESOLUCIÓN DE DISPUTAS

Las disputas suceden cuando paquetes entrantes provenientes de diferentes fuentes son destinados a un mismo puerto de salida al mismo tiempo. Los *routers* convencionales resuelven este problema utilizando *buffering* de paquetes y administrando sus flujos de datos de tal forma que estrictamente un solo paquete sea enviado hacia el puerto de salida seleccionado.

Para entender de una mejor manera la resolución de disputas de paquetes, se analiza las diversas soluciones en tres dominios diferentes, en tiempo, en longitud de onda y en el espacio.

1.3.1.1 Dominio del tiempo – Buffering Óptico

Un método factible para manejar flujos de paquetes ópticos, es el uso de Líneas de Retardo de Fibra (*FDL, Fiber Delay Line*) o también conocidas como Líneas de Retardo Óptico (*ODL, Optical Delay Line*) ciertas unidades de retardo

programable pueden ser construidas usando conmutadores y FDL's en cascada, ver **Fig. 1 - 34**.

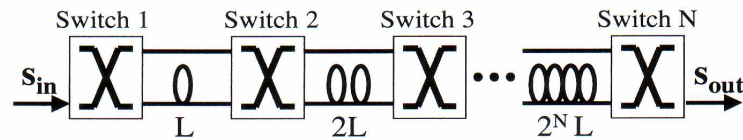


Fig. 1 - 34 Línea de retardo programable. [1]

Cabe destacar que estos sistemas son de tipo FIFO (El primero que entra, es el primero que sale) ya que cuando una señal óptica entra en una FDL, no será accesible hasta que salga, y ya que este retardo afectará no solo al primer paquete que viaje por una ruta, sino a todos los que siguen su misma ruta, esto conlleva a la degradación del desempeño del nodo de conmutación.

Un paquete que no puede ser conmutado, debido a una disputa de paquetes, puede ser enviado nuevamente a un puerto de entrada mediante una FDL que conecte puertos de entrada y salida de un mismo conmutador, para ser retrasado hasta que el puerto, al que el paquete ha sido designado, esté disponible; de lo contrario, el paquete seguirá recirculando por el lazo FDL. Dicho proceso no puede repetirse indefinidamente ya que la atenuación presente en la fibra en cada circulación reducirá la potencia óptica de la señal, ver **Fig. 1 - 35**.

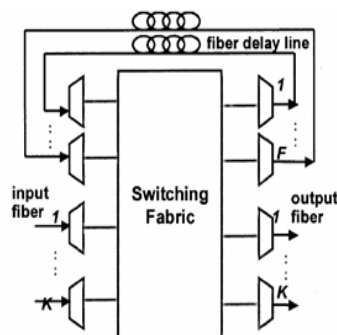


Fig. 1 - 35 Lazo de retardo de fibra. [10]

En la **Fig. 1 - 35** se puede apreciar una malla de conmutación que tiene conectado dos puertos de salida con dos puertos de entrada a través de dos

FDL's, el objetivo básicamente es destinar la información que ha entrado en disputa en un cierto puerto de salida (K) hacia un puerto que tenga conectado una FDL (F), retardándola un cierto tiempo para que después de éste, nuevamente ingrese a la malla de conmutación para una vez mas intentar encaminarse por el puerto de salida en el que anteriormente existió disputa.

1.3.1.2 Dominio de la Longitud de Onda – Conversión de Longitud de Onda

La conversión de longitud de onda, es talvez la técnica más eficiente de resolución de disputa de paquetes de las tres que se van a analizar en este estudio. Si es que la disputa de paquetes está en diferentes longitudes de onda, la conversión de longitud de onda no es requerida, pero, si dos o más paquetes tienen la misma longitud de onda y están dirigidos al mismo puerto de salida al mismo tiempo, entonces, una conversión de longitud de onda puede resolver la disputa. En la **Fig. 1 - 36**, se puede apreciar una malla de conmutación que tiene conectado dos puertos de salida (Utilizando conversores de longitud de onda y multiplexores) con dos puertos de entrada a través de dos enlaces de fibra, el objetivo básicamente es destinar la información que ha entrado en disputa en un cierto puerto de salida (K) hacia un puerto que tenga un conversor de longitud de onda (F), una vez llevado a cabo la conversión de longitud de onda, la información es redirigida a la malla de conmutación y destinada al mismo puerto, pero al tener una longitud de onda diferente ya no existe disputa y puede ser enviado.

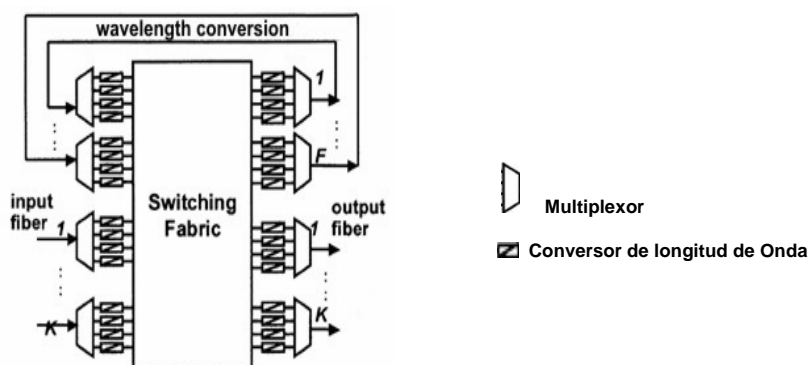


Fig. 1 - 36 Resolución de disputa de paquetes utilizando conversión de longitud de onda. [12]

1.3.1.3 Dominio Espacial – Enrutamiento Desviado

En este tipo de técnica, un paquete que entra en disputa es redirigido a otro puerto para alcanzar su destino mediante rutas alternativas, ver **Fig. 1 - 37**.

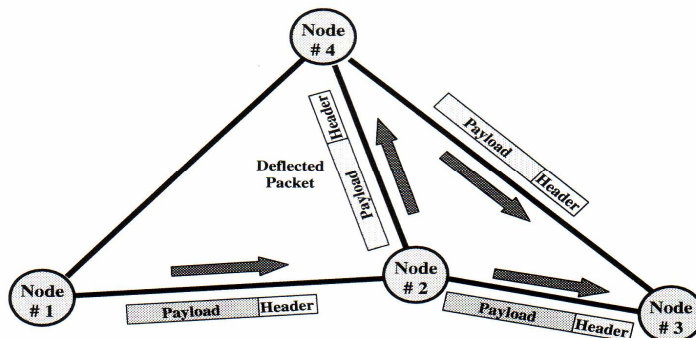


Fig. 1 - 37 Ejemplo de rutas alternativas en un enrutamiento desviado. ^[1]

Como resultado de este proceso, los paquetes pueden tomar diversas rutas y llegar a su destino en desorden y necesitan ser reorganizados, por lo tanto, el enrutamiento desviado necesita de protocolos sofisticados y de algoritmos de control para asegurarse de que los paquetes no se pierdan en la red.

1.4 CONMUTACIÓN DE RÁFAGAS ÓPTICA (OBS) ^[1]

Al analizar detenidamente a OPS, se puede apreciar falencias tales como:

- Intervalos de tiempo inflexibles en FDL (al actuar como buffers),
- Requiere el uso de unidades de procesamiento complejas; y,
- Requiere el uso de conmutadores ópticos con velocidades de conmutación muy altas.

La conmutación de ráfagas óptica (OBS), se presenta como la solución a las falencias mencionadas anteriormente de OPS, ver **Fig. 1 - 38**, manteniendo un enfoque en la reducción del tiempo de toma de decisiones de conmutación y de procesamiento de señales, ver **Fig. 1 - 39**.

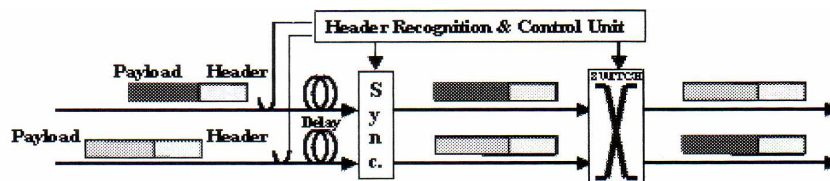


Fig. 1 - 38 Principio de funcionamiento de OPS. [1]

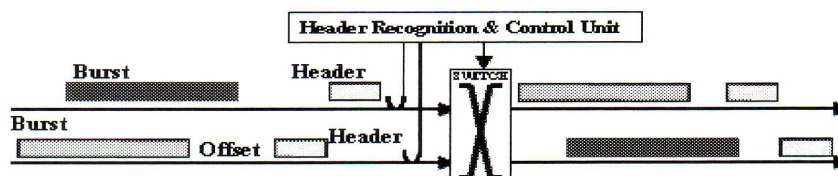


Fig. 1 - 39 Principio de funcionamiento de OBS. [1]

En la conmutación OBS existe una parte de control (Encabezado) que no necesariamente puede viajar en el mismo canal en el que se encuentra los datos, sino que puede hacerlo en canales separados.

1.4.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE OBS [1]

En una red OBS, los paquetes son ensamblados en unidades de datos de gran tamaño, cada una de las cuales es llamada Ráfaga de Datos (*DB, Data Burst*). Para cada ráfaga, se crea una Ráfaga de Encabezamiento de Paquete (*BHP, Burst Header Packet*) para propósitos de control. El ensamblaje de la DB y la generación de la BHP toma lugar en los nodos de *core* OBS; los diferentes paquetes pueden ser agrupados de acuerdo a destinos comunes, medidas de calidad de servicio y criterios de ensamblaje. Las DB y BHP pueden ser enrutadas en diferentes canales de longitud de onda a través de los nodos de *core* OBS, con el propósito de tener independencia tanto para la parte de control como para la de datos, ya que solamente la parte de control será transferida al dominio óptico. La ráfaga es enviada desde el nodo de Borde sobre un canal de datos al nodo siguiente, mientras que, su BHP es enviada sobre un canal de control al mismo nodo. Para cada grupo de canales de datos, se asigna uno o más canales de control. Dependiendo del protocolo usado, la BHP puede ser transmitida delante de la ráfaga introduciendo un tiempo de *offset*, teniendo en cuenta el

procesamiento para la BHP en los nodos subsecuentes. Mientras que las DB's son conmutadas ópticamente y permanecen en el dominio óptico, las BHP's son convertidas al dominio electrónico en cada nodo para su procesamiento. Estas BHP's son convertidas nuevamente al dominio óptico antes de su transmisión al siguiente nodo. Una BHP contiene toda la información necesaria para configurar la malla de conmutación óptica y además de esto reserva recursos para la DB entrante. A la salida de la red, un nodo de borde OBS extrae la información de la ráfaga y la envía al *router* de destino fuera de la red OBS.

1.4.2 PROTOCOLOS DE TRANSMISIÓN ^[1]

La variación entre el tiempo de transmisión que existe entre BHP y DB, es el principal punto de diferenciación entre los esquemas de transmisión DB/BHP en OBS, a continuación se analiza brevemente tres de estos esquemas.

1.4.2.1 Tell-and-Wait (TAW)

En este esquema, el nodo de borde envía la BHP primero para solicitar los recursos necesarios para la transmisión de la DB. De existir la predisposición de los nodos para transmitir la ráfaga, se establece un circuito virtual y se puede llevar a cabo la transmisión. El inconveniente de esta técnica es el tiempo que toma la transmisión, incluyendo el retardo asociado a los acuses de recibo entregados por los nodos a lo largo de la ruta, y que no existe transmisión a menos de que la red esté lista para ello. No se necesita de buffering óptico.

1.4.2.2 Tell-and-Go (TAG)

En esta técnica, se envía la ráfaga inmediatamente después de que la BHP ha sido enviada, se trata de evitar un desperdicio de tiempo, pero de existir un nodo en la ruta que no pueda realizar la transmisión de la ráfaga, entonces dicha ráfaga es dada de baja o sometida a un proceso de buffering.

1.4.2.3 Just-Enough-Time (JET)

Este esquema es similar a TAG, con la diferencia fundamental de que existe un tiempo de offset que se da después de que se envía la BHP, dicho tiempo se calcula para que sea más grande que el tiempo que se tarda en llevar a cabo el procesamiento de control en todos los nodos de la ruta. Además de lo anteriormente mencionado, JET introduce el concepto de Reservación Retrasada (*DR, Delayed Reservation*), que permite reservar recursos desde el momento en que la ráfaga llega al nodo, esto se realiza para no desperdiciar el tiempo que se tarda en procesar la BHP.

1.5 TÉCNICAS DE ETIQUETAMIENTO ÓPTICO ^{[4], [17]}

En esta sección se revisa el estado del arte en el campo de las técnicas de etiquetamiento óptico de paquetes, se analizarán brevemente 5 técnicas de etiquetamiento, y en cada caso se revisan características tales como: formato de modulación y asignación espectral.

Las técnicas de etiquetamiento óptico son clasificadas en base a la asignación espectral de la etiqueta (en banda, fuera de banda y con respecto a la banda de los datos de carga útil) y de la tecnología usada para procesar la etiqueta (electrónica, óptica, o una mezcla entre las dos), ver **Fig. 1 - 40**.

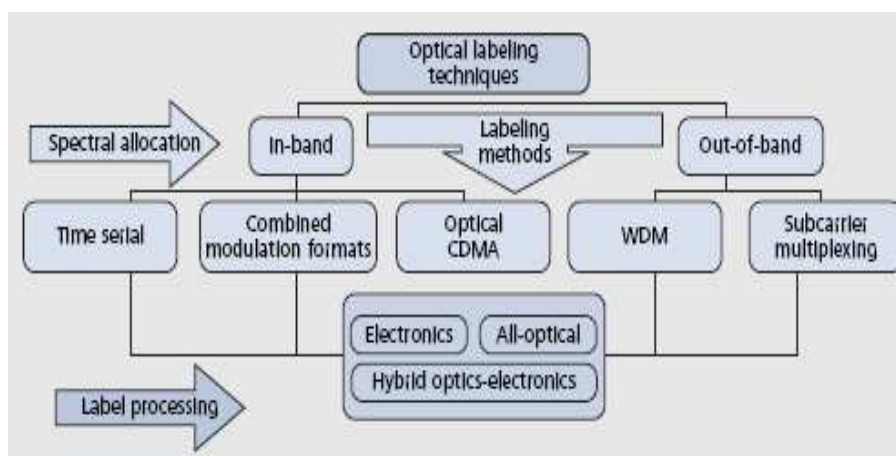


Fig. 1 - 40 Técnicas de etiquetamiento óptico. ^[17]

1.5.1 ETIQUETAMIENTO DE TIEMPO SERIAL

En este esquema de etiquetamiento, la etiqueta es insertada delante de la carga útil en el dominio del tiempo, y está separada de la carga útil con una banda de guarda, ver **Fig. 1 - 41**, que busca evitar un solapamiento entre la etiqueta y la carga útil en tiempo; y, facilitar el proceso de extracción. Cabe destacar que tanto la carga útil como la etiqueta viajan en la misma portadora de longitud de onda.

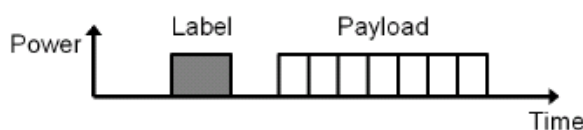


Fig. 1 - 41 Transmisión de tiempo-serial de la etiqueta y la carga útil en un único canal de longitud de onda. ^[4]

Existe además una sub clasificación dentro de este tipo de etiquetamiento óptico, el etiquetamiento de tiempo-serial sincrónico y el asincrónico. El primero considera que la velocidad de transmisión de la etiqueta es la misma que tiene la carga útil; mientras que el etiquetamiento de tiempo-serial asincrónico, considera que la velocidad de transmisión de la etiqueta es, preferiblemente, mucho más baja que la velocidad de transmisión de la carga útil.

La información de la etiqueta suele leerse, cambiarse y reinsertarse mediante conversión Óptica-Electrónica-Óptica. Cabe destacar que tanto para la extracción como para la inserción de la nueva etiqueta, e inclusive para la resolución de disputas, debe existir un proceso de sincronización muy preciso, lo cual repercute en un alto grado de complejidad.

1.5.2 ETIQUETAMIENTO WDM (*WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING*)

El etiquetamiento WDM, aborda la posibilidad de colocar la información de etiquetamiento perteneciente a varios canales de datos WDM en una única longitud de onda, ver **Fig. 1 - 42**.

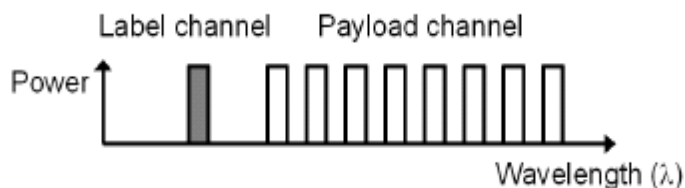


Fig. 1 - 42 Un único canal WDM para llevar las etiquetas de todos los *payload*. [4]

Esta opción de etiquetamiento da la ventaja de tener separados en longitud de onda al plano de control y al de datos, facilitando los procesos de extracción, detección y procesamiento de la etiqueta. Este método permite reducir significativamente la cantidad de conversores Opto-Electrónicos de alta velocidad, ya que solamente la etiqueta debe pasar por una conversión Óptica-Electrónica, los datos de *payload* no, dichos datos son retardados hasta que la etiqueta sea procesada electrónicamente y trasladada de nuevo al dominio óptico.

Para poder llevar a cabo adecuadamente este proceso, se debe tener la certeza de que la etiqueta alcanzará al nodo con suficiente anterioridad a la llegada de los paquetes de datos. Esto con el propósito de configurar a los conmutadores para que agrupen Longitudes de Onda disponibles para la transmisión de paquetes de datos.

1.5.3 ETIQUETAMIENTO OCDM (*OPTICAL CODE DIVISION MULTIPLEXING*)

Este tipo de etiquetamiento hace uso de la Multiplexación por División de Código Óptico (*OCDM, Optical Code Division Multiplexing*), ver **Fig. 1 - 43**, aquí la información de etiqueta es adherida con un código específico a la carga útil mediante el proceso de *Scrambling*¹⁵.

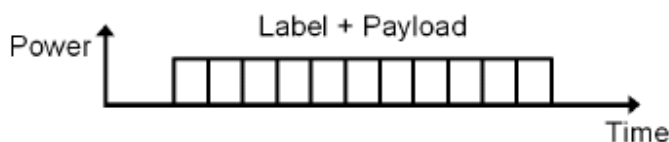


Fig. 1 - 43 Esquema de paquetes OCDM. [4]

¹⁵ Con el proceso de *Scrambling* se busca evitar la aparición de largas secuencias de ceros en la transmisión, las cuales generan problemas con la recuperación de la señal de reloj.

Si una longitud de onda soporta N códigos OCDM, un banco de N auto correlacionadores ópticos por longitud de onda es requerido para cada canal con el propósito de decodificar cada posible etiqueta.

1.5.4 ETIQUETAMIENTO SCM (*SUB-CARRIER MULTIPLEXING*)

En el etiquetamiento usando multiplexación de Sub portadora (*SCM, Sub-Carrier Multiplexing*), la información de la etiqueta se lleva en una frecuencia de sub portadora junto con la carga útil, la misma que viaja en una frecuencia portadora.

La etiqueta se modula, debido a esto, aparecen dos bandas laterales sub portadoras alrededor de la portadora óptica, ver **Fig. 1 - 44**. Los canales de longitud de onda necesitan estar separados con al menos una medida igual al doble de la frecuencia portadora, todo esto con el propósito de evitar interferencia ya que existe doble banda lateral, de lo contrario las sub portadoras se interferirían entre si y la lectura de la etiqueta sería errónea.

La etiqueta SCM puede leerse de dos formas: detectando directamente en forma óptica la portadora y la subportadora; y, luego transformando dicha señal a banda base, o colocando un filtro pasa banda, para detectar solamente la información de sub portadora. La detección puede llevarse a cabo con la ayuda de un único fotodiodo.

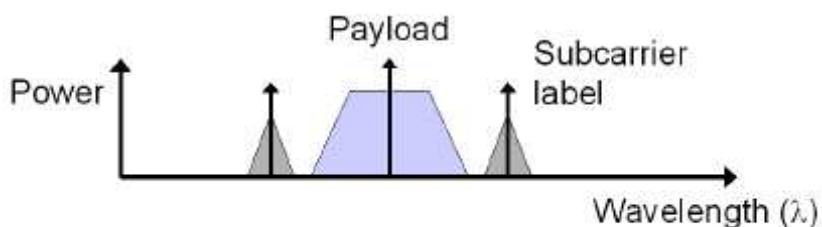


Fig. 1 - 44 Etiquetamiento de sub portadora en un canal de múltiples longitudes de onda. ^[4]

Para borrar la etiqueta antigua y colocar una nueva, se puede hacer uso de una Rejilla Bragg de Fibra (*FBG, Fiber Bragg Grating*) para suprimir la sub portadora, y de esta manera no alterar la información de carga útil.

Las desventajas más significativas de este tipo de etiquetamiento son: la disminución de la sub portadora debido a dispersión¹⁶ en la fibra; y, el hecho que se requiere de una frecuencia muy elevada para la sub portadora cuando se tienen altas velocidades de transmisión de la carga útil.

1.5.5 ETIQUETAMIENTO ORTOGONAL

El etiquetamiento ortogonal, transporta dos conjuntos de información: la etiqueta y la carga útil, para conseguir esto la etiqueta se modula con un formato ortogonal a la carga útil, por lo tanto se visualizan dos espacios dimensionales en una portadora óptica, uno es la intensidad y el otro es la fase o la frecuencia, ver **Fig. 1 - 45**.

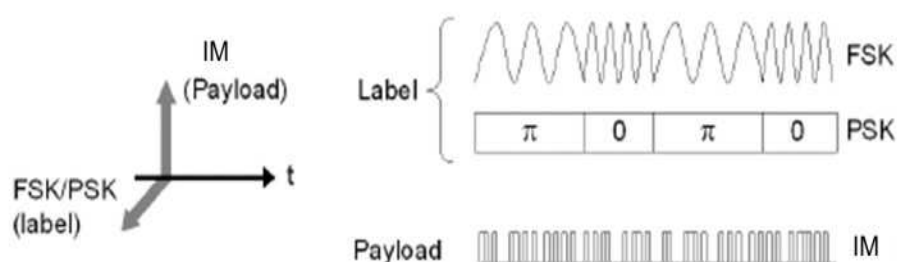


Fig. 1 - 45 Descripción esquemática de una modulación ortogonal. ^[4]

La etiqueta antigua se borra usando un conversor de longitud de onda controlado por intensidad, en donde solo la información de carga útil modulada en intensidad (IM) es transpuesta a un nuevo canal, y no la información de etiqueta. La inserción de la nueva etiqueta se realiza en FSK mediante el uso de un láser sintonizable y en PSK Diferencial mediante un modulador de fase.

La principal desventaja que enfrenta una modulación ortogonal FSK/IM, es la diafonía, que se produce por diafonía introducida: en la generación de la señal, en la conversión de longitud de onda y debido a la dispersión en la fibra.

¹⁶ **Tipos de Dispersión: Dispersión Cromática (De material y Guía de Onda) y Dispersión Modal. Ver Anexos.**

ARQUITECTURA EN REDES

ÓPTICAS HÍBRIDAS

[1], [2], [5], [6], [7], [8], [9]

El concepto “*Híbrido*”, en el área de las redes ópticas, hace referencia a la combinación de dos o más tecnologías de red al mismo tiempo, dichas tecnologías, en el presente estudio, se refieren a la conmutación de paquetes, ráfagas y longitudes de onda.

El objetivo que persiguen las arquitecturas ópticas híbridas, es principalmente, mejorar el diseño de una red en una forma global, aprovechando las ventajas que ofrece cada tecnología individualmente. A continuación, se analiza primero la arquitectura en una red óptica, después se revisa la arquitectura en una red óptica híbrida y finalmente los tipos de redes ópticas híbridas existentes.

2.1 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS ^{[1], [5]}

2.1.1 ARQUITECTURA DE LA RED ÓPTICA

El networking óptico en la actualidad propone mover los conversores de medio hacia el borde y tratar de realizar la mayor cantidad de procesos en el dominio óptico, tales redes han empezado a utilizarse, principalmente con la forma de anillos DWDM¹⁷ (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) con Multiplexores para Inserción/Extracción Óptica (*OADM, Optical Add/Drop Multiplexer*), para muchos esto no es nada más que la introducción de redes de tipo malla usando crosconectores ópticos (*OXC's, Optical Cross Connects*) interconectados por sistemas de línea DWDM. Inicialmente en las entradas y salidas de los sistemas de línea DWDM se efectuará la conversión Óptica-Electrónica-Óptica, dicha conversión a largo plazo podría eventualmente ser eliminada con los avances

¹⁷ Se considera DWDM a los sistemas ópticos que conducen señales espaciadas menos de 100 GHz o 1.6 nm. en la cercanía de los 1550 nm.

tecnológicos de procesamiento en el campo óptico, es decir consiguiendo una transparencia extremo a extremo.

De acuerdo a la ITU-T Rec. G.872 (02/99) (*Architecture of Optical Transport Networks*), la red de transporte óptico, puede ser descrita como una serie de capas de red, ver **Fig. 2 - 1**. A continuación se definen las tres capas de red que integran esta arquitectura óptica:

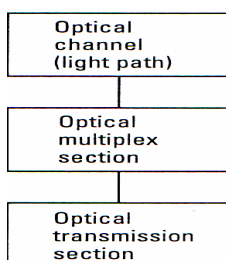


Fig. 2 - 1 Capa Óptica ^[2]

- Una capa de red denominada Canal Óptico (*OCh, Optical Channel*), provee conectividad extremo a extremo, incluyendo cross-connection, de canales ópticos para comunicar transparentemente la información digital de clientes con formato variable.
- Una capa de red denominada Sección de Multiplexación Óptica (*OMS, Optical Multiplex Section*), provee funcionalidad para el transporte de múltiples longitudes de onda. Un OMS de orden n puede soportar más de n canales ópticos.
- Una capa de red denominada Sección de Transmisión Óptica (*OTS, Optical Transmission Section*), provee funcionalidad para transmisión de señales ópticas en una fibra óptica.

2.1.2 EL CONCEPTO DE RED ÓPTICA HÍBRIDA

Ya que al transformar las señales del dominio óptico al electrónico se introduce retardos de tiempo en el procesamiento de los datos que circulan por la red

óptica, y el aparecimiento de los denominados “Cuellos de Botella”, se tiene la necesidad de evitar dicha conversión de medio, para lo cual se empleó en un inicio el concepto de los croscnectores ópticos (OXC), en el que las señales se procesan ópticamente, y no es necesario el uso de una transformación opto-electrónica, pero debido a la naturaleza estática de las trayectorias de luz y a que el tráfico IP es de tipo ráfaga, el uso que tienen las redes ópticas conformadas enteramente por OXC's, es bajo.

Pensando en lo anteriormente mencionado, se analizaron diversas soluciones, una de las cuales fue la utilización de Conmutadores de Ráfaga Óptica (OBS's, *Optical Burst Switches*), una característica importante de OBS (*Optical Burst Switching*) es la separación de los campos de control y de datos, un paquete de control es enviado delante de una ráfaga óptica, en un canal de control separado para reservar el canal. Debido a esto, no es necesario el uso de buffers ópticos; si el número de ráfagas que llegan es superior al número de canales ópticos disponibles, las ráfagas en exceso serán descartadas, por lo tanto una métrica importante para el desempeño de OBS será la probabilidad de bloqueo de ráfaga.

Si bien es cierto, las diversas ventajas que brinda el uso de OBS en las redes ópticas son muy buenas, también se debe recordar que el costo que implica una posible migración de OXC a OBS es muy alto, debido a esto; se llegó a la conclusión de que el uso de ambas tecnologías, permitía obtener un buen equilibrio entre costo y beneficio, aquí es en donde aparece el concepto de red óptica híbrida. En la actualidad se pueden combinar varias tecnologías como por ejemplo: WDM, DWDM, etc; y diversos tipos de topologías, como por ejemplo: topologías de tipo anillo, de malla, etc.

2.1.3 ARQUITECTURA DE LA RED ÓPTICA HÍBRIDA

Para tener una mejor perspectiva del concepto de red óptica híbrida, a continuación se describe una arquitectura basada en OXC's, y luego se presenta una arquitectura óptica híbrida compuesta por OXC's y OBS's.

2.1.3.1 Arquitectura de una red basada en Crosconectores Ópticos (*OXC's, Optical Cross Connects*)

Este tipo de arquitectura está conforma por routers IP, nodos de borde OXC's y nodos de *core* OXC's, ver **Fig. 2 - 2**. Un canal óptico extremo a extremo, o trayectoria de luz, se prepara entre un par de *routers* IP para que exista intercambio de tráfico entre ellos. Las trayectorias de luz se conmutan en el dominio óptico con la ayuda de los OXC's. Es conveniente señalar que inclusive si un *router* (por ejemplo "el *router* b" línea punteada y línea entrecortada) está enviando tráfico a dos *routers* (por ejemplo "los *routers* e y d"), que están ligados a un mismo OXC, es necesario utilizar dos trayectorias de luz diferentes, por ejemplo en la **Fig. 2 - 2**, a pesar de que los *routers* a, b y c, están conectados directamente al mismo OXC, es necesario utilizar tres diferentes trayectorias de luz para transportar el tráfico desde los *routers* a, b y c, hasta el *router* d.

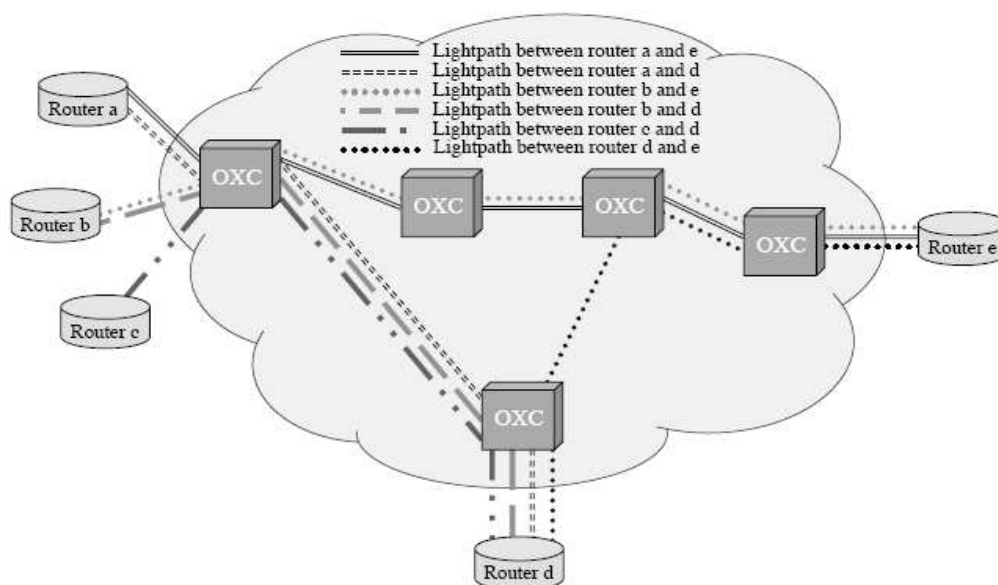


Fig. 2 - 2 Arquitectura de red óptica basada en OXC's. [5]

Se debe destacar que múltiples trayectorias de luz pueden ser preparadas entre un par de routers IP, si existe una demanda de tráfico que lo amerite. Dichas trayectorias de luz suelen ser establecidas manualmente y son estáticas.

2.1.3.2 Arquitectura de una red basada en OXC's y OBS's (Arquitectura Híbrida)

A continuación se presenta una Arquitectura de red basada en OXC's y OBS's, a la que se denomina arquitectura de red óptica híbrida, ver **Fig. 2 - 3**, dicha arquitectura se compone de *routers* IP, OBS's en la red de borde y OXC's en la red de *core*.

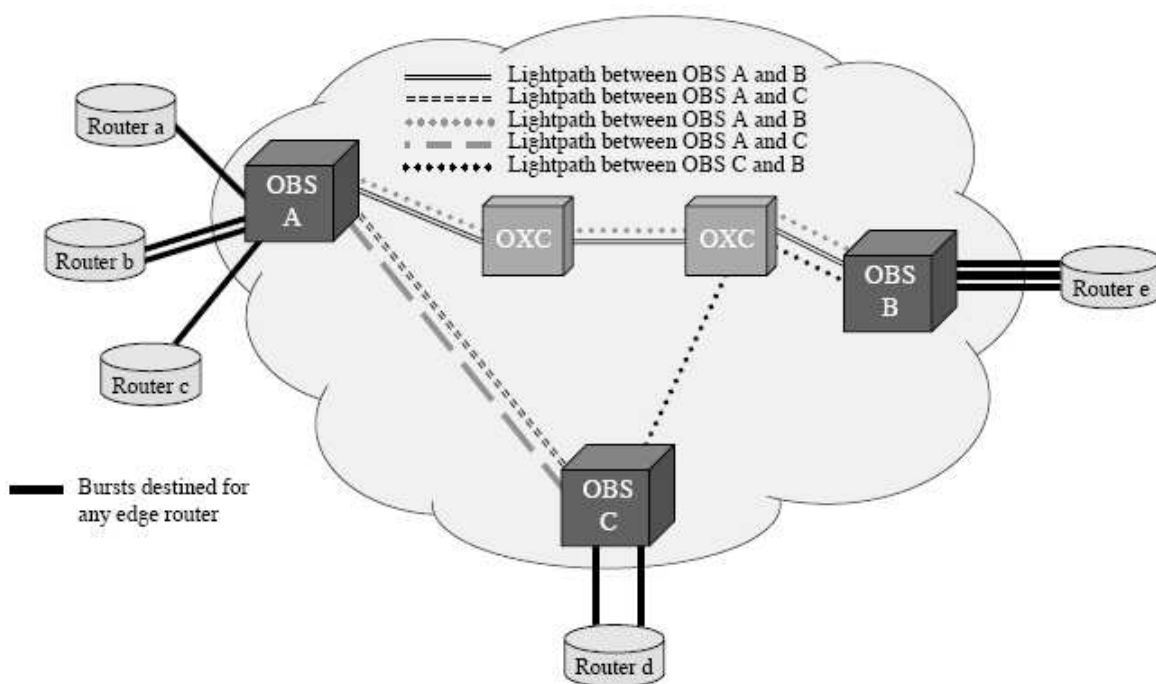


Fig. 2 - 3 Arquitectura Óptica Híbrida. ^[5]

Como se puede apreciar en la **Fig. 2 - 3**, cada longitud de onda entre un *router* IP y un OBS de borde, puede llevar tráfico destinado a uno o más *routers* IP, ésta es una diferencia fundamental respecto a las redes basadas enteramente en OXC. Nótese que la cantidad de longitudes de onda requeridas entre un *router* IP y un conmutador de ráfagas ópticas, depende de la cantidad de tráfico a ser conducido, dicha cantidad no será mayor a la utilizada en una arquitectura basada en OXC's.

Se debe mencionar también que en una arquitectura híbrida, las trayectorias de luz son establecidas entre una pareja de conmutadores de ráfaga óptica, para conducir tráfico entre ellos; a diferencia de una arquitectura basada en OXC's, en

la cual se establece una trayectoria de luz entre una pareja de *routers* IP exclusivamente para conducir tráfico entre ellos.

La cantidad de longitudes de onda que se necesitan para conducir tráfico en una red óptica híbrida, se determina de la siguiente forma: si se usan r trayectorias de luz para conducir tráfico entre una pareja de conmutadores de ráfaga óptica (nótese que r es también la cantidad de fuentes de tráfico entre dicha pareja), y si la utilización de estas trayectorias de luz es baja, los conmutadores de ráfaga óptica pueden multiplexar el mismo tráfico en m ($< r$) trayectorias de luz entre una pareja de conmutadores de ráfaga óptica, ver **Fig. 2 - 4**.

Por lo anteriormente mencionado, la arquitectura híbrida puede mejorar la utilización de longitudes de onda en la red de *core*, lo que permitiría, en pocas palabras, manejar más tráfico sin la necesidad de alterar los recursos de red existentes.

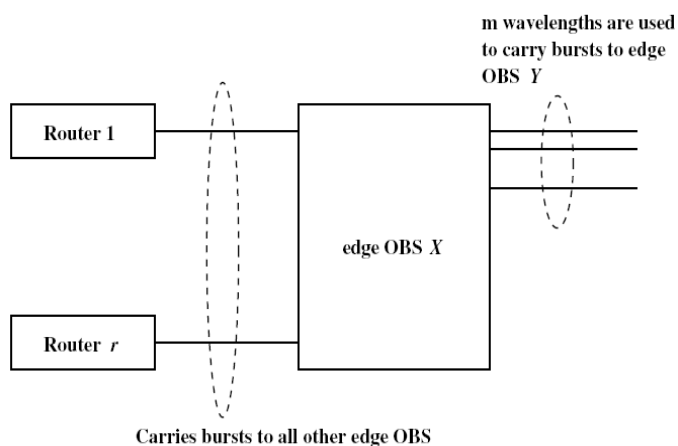


Fig. 2 - 4 Asignación de longitudes de onda en un OBS de borde. ^[5]

El nodo de borde mostrado en la **Fig. 2 - 4**, está conectado a los puertos de varios *routers*, los cuales son las fuentes de tráfico (ráfagas ópticas). Dichos puertos se conforman de una unidad de conversión electrónica-óptica y de un buffer electrónico. La conversión electrónica-óptica se realiza en base al principio "*First-come-first-serve*", esto significa que mientras se está llevando a cabo la

conversión electrónica-óptica, existe un grupo de paquetes que está esperando por dicha conversión, estos paquetes forman una cola mientras esperan.

Uno de los factores importantes que se consideran en la conversión mencionada anteriormente, es el tiempo de arribo de una ráfaga óptica, el cual se define como el tiempo en el cual una ráfaga está lista para encolarse, en lugar del tiempo en el que la conversión da inicio (Estos tiempos son idénticos si no existe ninguna ráfaga esperando en la cola de conversión) de no ser así, la diferencia entre estos dos tiempos es el retardo de encolamiento experimentado por la ráfaga. En la **Fig. 2 - 5**, se aprecian dos ráfagas arribando a la interfaz electro-óptica; la ráfaga 1, llega cuando no existe ninguna ráfaga esperando para ser procesada en la unidad de conversión, por lo que no se experimenta retardo por encolamiento, mientras que, la ráfaga 2 llega cuando la unidad de conversión está ocupada, la conversión de la ráfaga 2 comenzará, cuando la conversión de la ráfaga 1 haya finalizado.

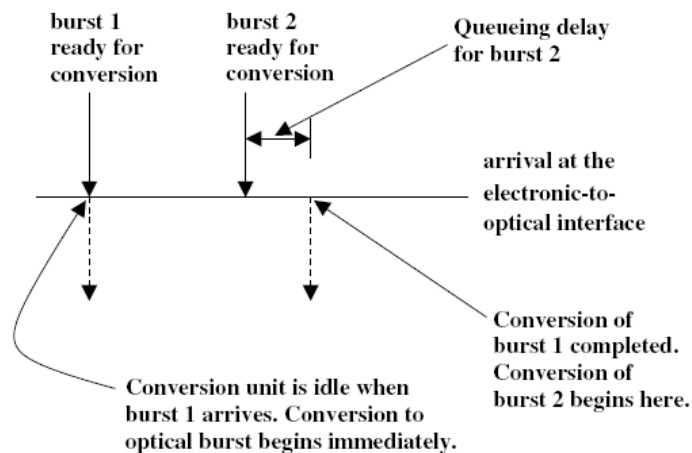


Fig. 2 - 5 Arribo de ráfagas a una unidad de conversión. [5]

3. Para poder apreciar la probabilidad de bloqueo en relación al número de longitudes de onda, la **Fig. 2 - 6** muestra los factores mencionados anteriormente, en una arquitectura híbrida de una red basada en OXC's y OBS's, dicho gráfico responde a la **Ecuación 2 - 1** [4].

$$\text{Probabilidad de Bloqueo de ráfagas} = \left(1 - \frac{m}{r}\right) \sum_{h=m}^r C_h^r \tilde{\rho}^h (1 - \tilde{\rho})^{r-h} \quad \text{Ecuación 2 - 1}$$

siendo: $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ y $\tilde{\rho} = \frac{p\lambda}{\mu}$

r : Número de puertos de router

m : Número de longitudes de onda

$\frac{1}{\mu}$: Tiempo promedio de servicio

$\frac{1}{\lambda}$: Tiempo promedio entre llegadas

p : Probabilidad de ráfaga

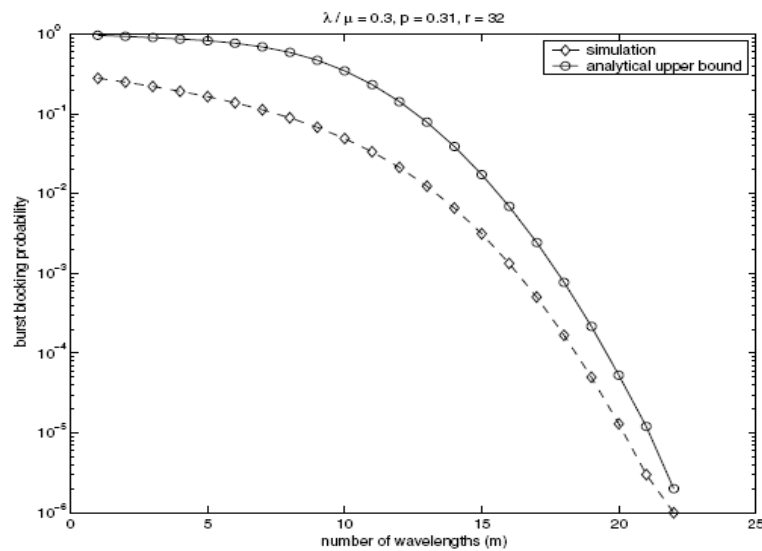


Fig. 2 - 6 Probabilidad de bloqueo en relación al número de longitudes de onda. [5]

2.2 TIPOS DE REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS [6]

Considerando el grado de interacción e integración de las tecnologías de red, se puede dividir a las redes ópticas híbridas en tres clases: Cliente-servidor, Paralelas e Integradas.

2.2.1 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS CLIENTE-SERVIDOR

En este tipo de arquitectura se emplea una jerarquía de capas de red ópticas usando diferentes tecnologías de red. Se consideran dos capas adyacentes de

red, de estas, la inferior actúa como una capa servidor (*server layer*) cuyo propósito es establecer una topología virtual para la capa superior llamada cliente (*client-layer*). El uso de dicha topología virtual se debe a los posibles escenarios de migración y particularmente a la reducción de tráfico transitado en el nodo de la capa cliente. Se debe denotar que dichas topologías virtuales deben ser diseñadas cuidadosamente, ya que al momento de utilizarlas los enlaces manejan menos tráfico por enlace y por lo tanto se obtiene una baja utilización de los recursos de red (utilización de enlaces, ancho de banda, etc.).

Este estudio se enfoca en arquitecturas cuya capa cliente sea una red OBS u OPS, y la capa servidor sea una red para conmutación de longitud de onda WDM, **Fig. 2 - 7.**

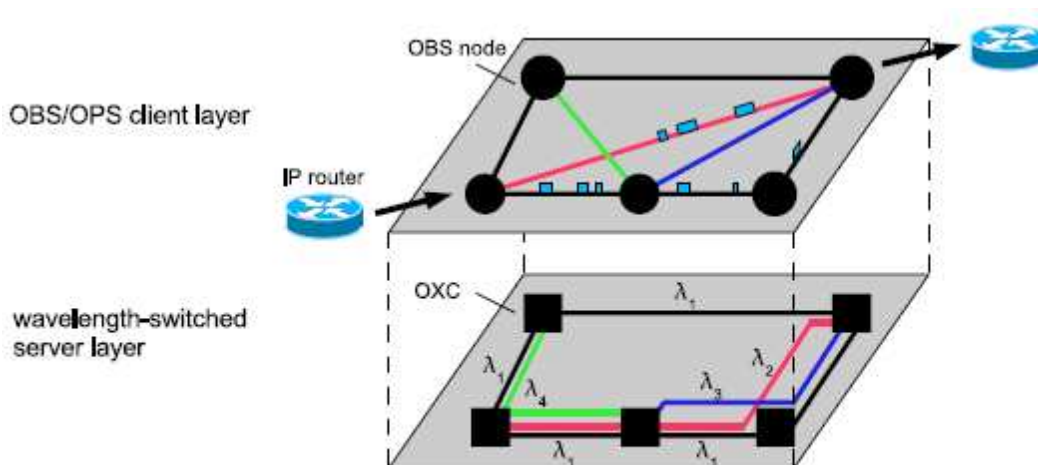


Fig. 2 - 7 Red Óptica Híbrida Cliente – Servidor. [6]

Los nodos OPS y OBS fundamentalmente agregan tráfico al nodo de borde de la red de Core; estos nodos son interconectados a través de dicha red, mediante trayectorias de luz directas en la red de longitud de onda conmutada. Los paquetes, o las ráfagas ópticas son conmutados en los nodos de la capa cliente y fluyen transparentemente en trayectorias de luz a través de los nodos que usan conmutación de longitud de onda WDM de la capa servidor.

Ya que OBS y OPS requieren de una infraestructura con capacidad de transmisión en modalidad de ráfaga y a menudo aplican esquemas de modulación

ortogonal, como por ejemplo FSK (para información de control), de forma similar la infraestructura para la transmisión de longitud de onda conmutada, debe estar en capacidad de transmitir en modalidad de ráfaga y ser transparente a los esquemas de modulación utilizados en la capa cliente.

Las redes de capa Cliente y Servidor, pueden estar bajo el control de más de un operador, en este caso el operador de capa Cliente arrienda los servicios de longitud de onda para organizar los enlaces de topología virtual. El control de la red es libre y la información, en el caso de existir varios operadores, puede hallarse en tres formas: separada, con alto grado de compartimiento y completamente compartida. Un ejemplo de este tipo de red, es OBTN (*Optical Burst Transport Network*).

2.2.2 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS PARALELAS

En este tipo de redes ópticas, ver **Fig. 2 - 8**, se instalan en paralelo dos o más capas de red óptica ofreciendo diferentes servicios de transporte, y un nodo de borde inteligente las emplea individualmente, o combinándolas para que cumplan óptimamente con los requisitos del cliente.

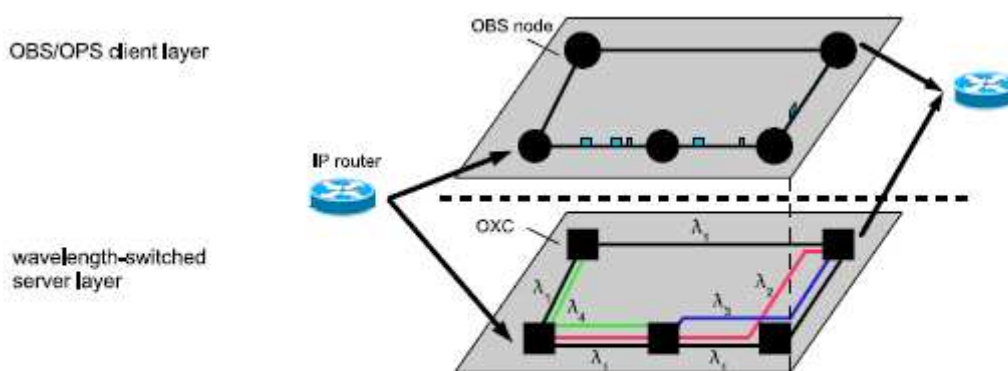


Fig. 2 - 8 Red Óptica Híbrida Paralela. ^[6]

En esta topología, existe un nodo de borde que selecciona el servicio de transporte desde las dos redes. Aquí el tráfico IP puede ser transportado en ráfagas ópticas o como flujos continuos de *bytes* dentro de una trayectoria de luz.

Los nodos de borde discriminan el uso de las diferentes capas, o la combinación de las mismas, atendiendo a necesidades explícitas del usuario, tales como: ancho de banda, QoS, etc.

Los recursos para transmisión y conmutación pueden ser dedicados o compartidos entre las diferentes tecnologías de red; en ambos casos, la asignación de los recursos de red para la tecnología respectiva pueden ser estáticos o dinámicos.

En general, el compartimiento de recursos mejora la utilización de los mismos, esto con el propósito de que los equipos para conmutación y transmisión satisfagan los requerimientos de las tecnologías más exigentes. Por ejemplo, un conmutador integrado para OBS híbrido y longitud de onda conmutada, requiere tecnologías muy rápidas de conmutación, controles lógicos más sofisticados y transceivers en modalidad de ráfaga de OBS, pero a cambio, todos los servicios de longitud de onda conmutada pueden ser implementados con menor complejidad y con una tecnología de mejor costo-eficiencia. En consecuencia, el diseño de una arquitectura híbrida debe balancear factores tales como: eficiencia y complejidad de realización.

Un ejemplo de este tipo de arquitecturas, es el proyecto denominado CHEETAH; en éste, un cliente de alta capacidad tiene dos puertos Ethernet y escoge entre un circuito conmutado primario (por ejemplo SDH), y un servicio de transporte secundario basado en TCP/IP, el cual es usado si el primario es bloqueado.

2.2.3 REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS INTEGRADAS

En esta clase de arquitectura, dos o más tecnologías de red se integran completamente, esto significa que todas las tecnologías de red comparten el mismo ancho de banda en la misma red y simultáneamente, en el caso de una posible combinación de longitud de onda conmutada y conmutación de paquete o ráfaga, esto significa que el tráfico es transportado en longitudes de onda conmutada o en modalidad de ráfagas conmutadas.

Cada nodo en la red, puede usar un segmento de longitud de onda (dado como parte de una trayectoria de longitud de onda predeterminada) y enviar tráfico (conmutado por longitud de onda) por éste, o por otra parte, ignorar la trayectoria de longitud de onda establecida y tener a un nodo vecino que procese el tráfico, inclusive si en el régimen de longitud de onda conmutada, dicho nodo no debiera haber procesado este tráfico. Además de lo mencionado anteriormente, cada nodo incluye un dispositivo para conmutación de longitud de onda y de paquete.

Los nodos en la red, transmitirán paquetes sobre una trayectoria de luz extremo a extremo, ver **Fig. 2 - 9**, ya que éstos remueven la necesidad de procesamiento intermedio debido a los demás nodos subsecuentes; sin embargo en caso de congestión, éstos pueden cambiar a modalidad de paquete conmutado, además, la elección entre las dos modalidades puede ser llevada a cabo considerando la calidad de Servicio QoS, por ejemplo: conmutación de longitud de onda, debido a tráfico de alta prioridad.

Actualmente existen dos propuestas que caen en esta categoría, OpMiGua y ORION (*Overspill Routing in Optical Networks*), en ambas arquitecturas cada nodo debe ser capaz de detectar el modo o modalidad actual de operación de cada paquete, e insertar y remover paquetes sin perturbar el tráfico existente en la longitud de onda.

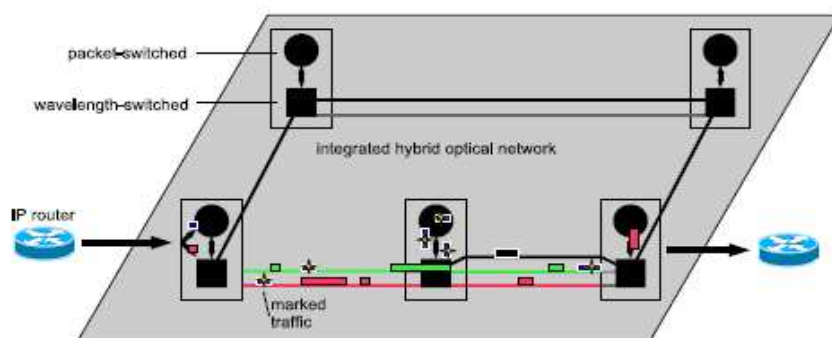


Fig. 2 - 9 Red Óptica Híbrida Integrada. [6]

Las arquitecturas ópticas híbridas, que combinan dos o más tecnologías de red al mismo tiempo, permiten optimizar el diseño de la red óptica en forma general.

Cabe destacar que, a pesar de que en los recientes años se han propuesto algunas arquitecturas ópticas híbridas, este tema todavía presenta un amplio campo de investigación que debería ser minuciosamente revisado.

De manera general se puede hacer un breve análisis acerca de las tres arquitecturas estudiadas anteriormente, para ello se puede apreciar la **Tabla 2 - 1**, en la que se analiza factores tales como: los requerimientos de recursos, la complejidad tecnológica y la complejidad de control que envuelve el uso de cada una de las redes ópticas híbridas estudiadas.

	Definición	Requerimiento de Recursos	Complejidad Tecnológica	Complejidad en el control
Ciente-Servidor	La capa Cliente ofrece una topología virtual de trayectorias de luz para la capa Cliente OBS/OPS			
Paralela	Los nodos de borde ofrecen diferentes tecnologías de red - las longitudes de onda son usadas por una tecnología a la vez			
Integrada	Los nodos de borde ofrecen diferentes tecnologías de red - las longitudes de onda son usadas por todas las tecnologías a la vez			

Tabla 2 - 1 Redes ópticas híbridas y sus características fundamentales. [6]

2.3 EJEMPLOS DE REDES ÓPTICAS HÍBRIDAS [6], [7], [8], [9]

2.3.1 OBTN (*OPTICAL BURST TRANSPORT NETWORK*)

OBTN (*Optical Burst Transport Network*), es el ejemplo de una red óptica híbrida cliente-servidor, a continuación se analiza el concepto de OBTN y la arquitectura del nodo OBTN.

2.3.1.1 El concepto de OBTN (*Optical Burst Transport Network*)

OBTN combina topología virtual densa¹⁸ y enrutamiento alternativo restringido con estrategias efectivas de resolución de disputas, con el propósito de reducir el

¹⁸ Completamente mallada.

número de puertos para conmutación de ráfagas en los nodos con conmutación, pero manteniendo una alta eficiencia de la red.

En contraste con arquitecturas híbridas en donde la partición de recursos de red es completa y el tráfico se clasifica para ser transportado por ráfaga o longitud de onda, OBTN integra diversos tipos de recursos, por ejemplo circuitos y longitudes de onda, esto minimiza el tráfico transitado en los nodos intermedios y reduce el tamaño del nodo.

OBTN aplica una topología virtual densa, en la cual los nodos son conectados mediante trayectorias de luz directas, evitando ópticamente los nodos intermedios. El patrón de interconexión es definido por la demanda de tráfico o por criterios de operación.

Una topología virtual comprende el uso de una Red Óptica de Conmutación Automática (*ASON, Automatically Switched Optical Network*) utilizando GMPLS (Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo Generalizado), a éste tipo de arreglos se les denomina Rejillas de Longitud de Onda (*Lambda Grids*).

Para el caso de disputas en la trayectoria de luz se recurre al uso de enrutamiento alternativo; y, la asignación de una pequeña de capacidad para sobreflujo en cada enlace previsto para ser usado como ruta alternativa, ver **Fig. 2 - 10**.

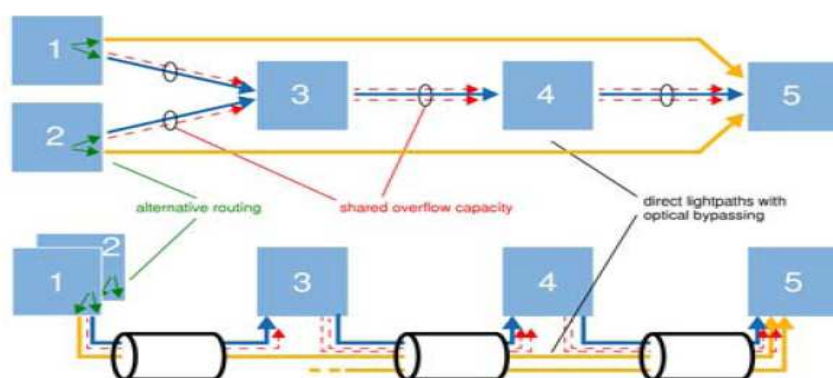


Fig. 2 - 10 Red OBTN con 5 nodos, en la cual las trayectorias de luz directas (continuas) son preparadas para asumir la demanda de tráfico y la capacidad de sobreflujo compartido (entrecortadas) es asignada para rutas alternativas (1-5, 2-5). ^[6]

2.3.1.2 Arquitectura del Nodo OBTN (*Optical Burst Transport Network*)

En la topología de red virtual de OBTN, los nodos son interconectados por trayectorias de luz extremo a extremo en una topología virtual densa con el propósito de conducir la mayor cantidad de tráfico. A estas trayectorias de luz se les denomina *Enlaces de Circuito*. Además de los *Enlaces de Circuito*, ciertas trayectorias de luz son asignadas a los enlaces de la topología original de OBS para ser usadas por las ráfagas en el caso de disputas en los enlaces de circuitos, a éstas se les denomina *Enlaces de Ráfaga*.

La **Fig. 2 - 11** ilustra una topología virtual OBTN, la mayoría de parejas de nodos están conectados por enlaces de circuitos (Líneas continuas), mientras que otros nodos están conectados mediante enlaces de circuitos y ráfagas (Líneas entrecortadas) en cuyo caso ambos recursos pueden ser administrados en conjunto o por separado.

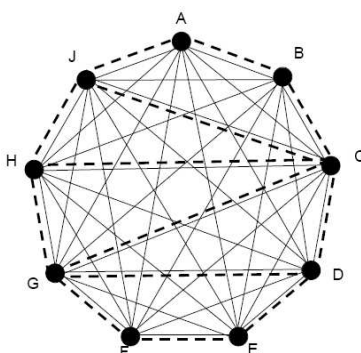


Fig. 2 - 11 Topología virtual OBTN. ^[7]

En la **Fig. 2 - 12** se muestra un nodo OBTN, el cual conmuta ráfagas provenientes de una red Metro. Con el propósito de obtener una alta eficiencia de recursos de red, se usa dos de las técnicas para resolución de disputas mencionadas en el Capítulo 1 del presente estudio: La conversión de longitud de onda y el uso de *buffers* FDL (Línea de Retardo de Fibra). Los FDL's junto a los conversores de longitud de onda, pueden drásticamente disminuir la probabilidad de pérdida de ráfaga.

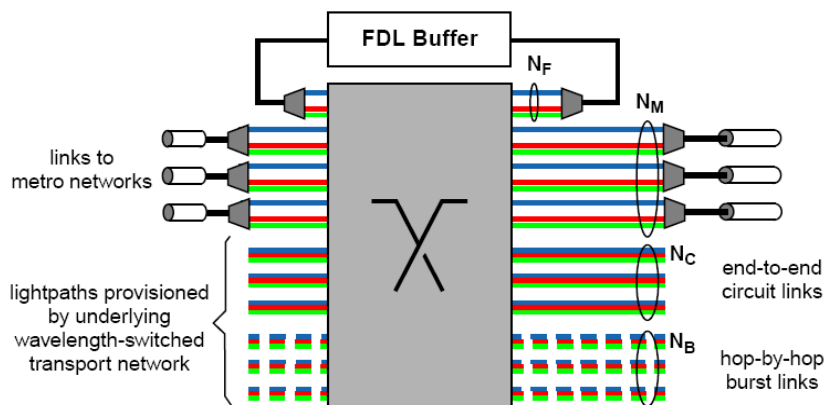


Fig. 2 - 12 Arquitectura del Nodo OBPN. [7], en donde:

N_M : Puertos que se conectan a los nodos de las redes metro.

N_C : Puertos que son requeridos para los enlaces extremo a extremo.

N_B : Puertos para los enlaces de ráfaga "Nodo a Nodo"

N_F : Puertos con buffers

Para tener una apreciación mas clara de las ventajas y limitaciones de OBPN, en la **Fig. 2 - 13** se cuantifica el dimensionamiento del nodo (Cantidad de puertos para conmutación de ráfagas) y los recursos de red (Longitudes de Onda disponibles) para OBS (*Optical Burst Switching*), OBPN (*Optical Burst Transport Network*) y BoCS (*Burst-over-Circuit-Switching*), teniendo en el primero una capacidad total para compartir sobreflujo b en una red, en el segundo y tercero se comparte en cierta medida; y, en el último no se comparte (capacidad dedicada para cada enlace), por lo tanto para éste último, se necesita más longitudes de onda que puertos para conmutar ráfagas.

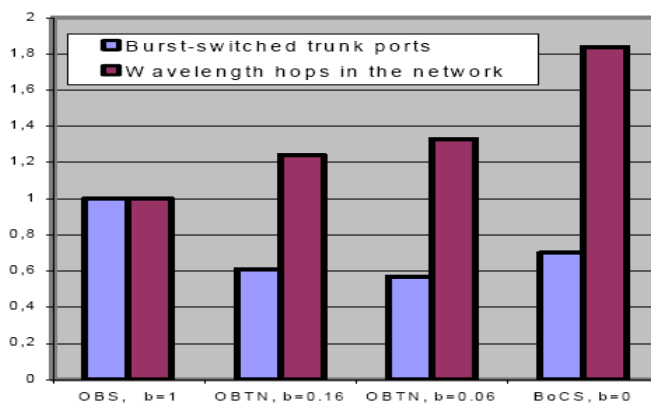


Fig. 2 - 13 Dimensionamiento del nodo OBS, OBPN y BoCS. [6]

2.3.2 CHEETAH (ARQUITECTURA DE TRANSPORTE EXTREMO A EXTREMO DE ALTA VELOCIDAD POR CIRCUITO CONMUTADO)

CHEETA (Arquitectura de Transporte Extremo a Extremo de Alta Velocidad por Circuito Conmutado), es el ejemplo de una red óptica híbrida paralela, a continuación se analiza el concepto de CHETTA y el establecimiento del circuito CHEETA.

2.3.2.1 El concepto de CHEETAH

En esta configuración existen hosts equipados con dos tarjetas de interfaz de red *Ethernet* (NIC). En estos hosts, las NIC's secundarias son directamente conectadas a los puertos *Ethernet* de los MSPP's (Plataforma de abastecimiento de multiservicios). Dichos MSPP's son sistemas que tienen la capacidad de transformar las tramas *Ethernet* a sus señales equivalentes en *Ethernet* sobre SONET (*EoS*). Los MSPP's a su vez, son conectados a una red conmutada de circuito SONET, en la cual los conmutadores están equipados con GMPLS (Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo Generalizado) para soportar ancho de banda compartido dinámicamente. Dicha asignación se debe al propósito original de CHEETAH, que es el de proveer una solución de *networking* para transmisión de datos de alta velocidad extremo a extremo para *hosts* terminales.

Para que los protocolos GMPLS presten una solución completa, para el plano de control, se combinan protocolos de administración de enlace LMP, protocolos de enrutamiento OSPF - ET (*Open Shortest Path First – Traffic Engineering*) y protocolos de señalización RSVP – TE (*Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering*), los cuales fueron diseñados para reducir el mantenimiento manual requerido para la operación normal de la red, debido a esto, dichos protocolos son factores críticos para la implementación de redes orientadas a conexión de gran escala.

2.3.2.2 Establecimiento del circuito CHEETAH

Un circuito extremo a extremo en una red CHEETAH, consiste de señales *Ethernet* entre hosts de una LAN (*Red de Área Local*) y sus equivalentes en los circuitos EoS en el área extendida, cabe mencionar que la MSPP se comporta como un convertidor de medio, que cambia los datos de un puerto ethernet a sus equivalentes en los puertos SONET y viceversa.

Para poder apreciar de una mejor manera el concepto de CHEETAH, se puede revisar un ejemplo sencillo, ver **Fig. 2 - 14**, un host (por ejemplo un computador) ejecuta un protocolo de señalización RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering*) para preparar los circuitos de CHEETAH. Estos circuitos son establecidos dinámicamente entre hosts terminales con mensajes de señalización RSVP-TE que se procesan en cada conmutador de la red uno a continuación de otro; una vez establecidos, los circuitos son usados por un corto periodo de tiempo, y luego son liberados de forma similar a como fueron establecidos, por lo tanto se puede decir que los recursos de red pueden usarse nuevamente para cualquier sesión iniciada.

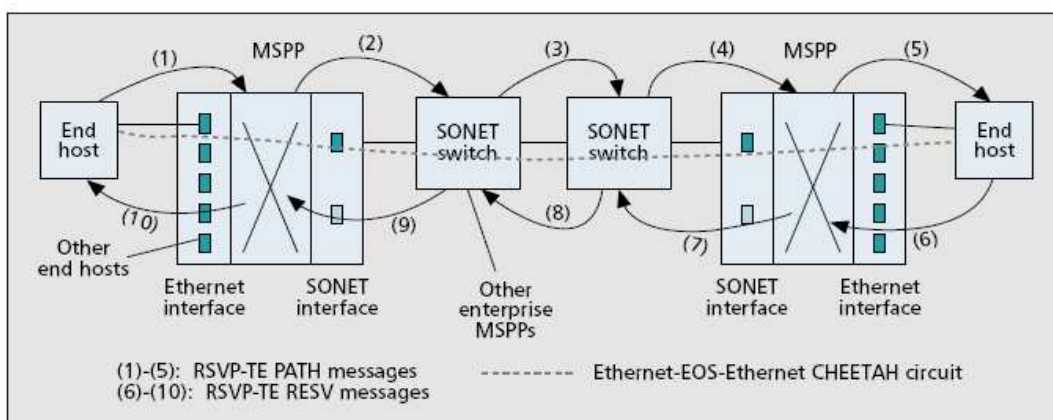


Fig. 2 - 14 Establecimiento de un circuito CHEETAH. [8]

CHEETAH fue diseñado para ser un servicio añadido de conectividad a Internet, ver **Fig. 2 - 15**, es decir, un *host* terminal puede estar conectado a un circuito CHEETAH y simultáneamente estar comunicándose con otro *host* usando TCP/IP con su NIC primaria, o puede darse que la comunicación entre *hosts* terminales

CHEETAH suceda a través de una ruta de Internet conmutada por paquete o por un circuito dedicado CHEETAH extremo a extremo.

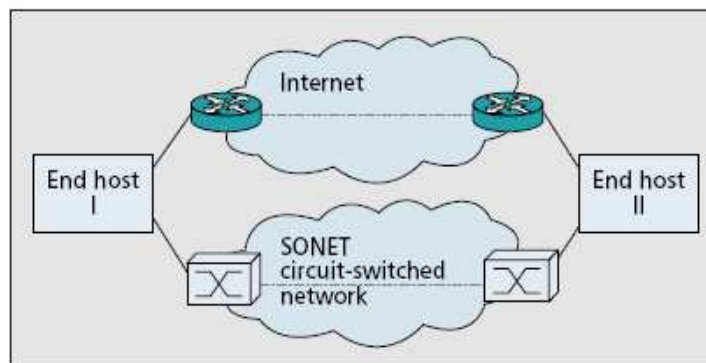


Fig. 2 - 15 CHEETAH como un servicio añadido para Internet. [8]

2.3.3 ORION (*OVERSPILL ROUTING IN OPTICAL NETWORKS*)

ORION (*Overspill Routing in Optical Networks*) es el ejemplo de una red óptica híbrida integrada, a continuación se analiza el concepto de ORION, la arquitectura del nodo ORION y dos casos de estudio para este tipo de arquitectura.

2.3.3.1 El concepto de ORION (*Overspill Routing in Optical Networks*)

La idea básica de ORION es empezar desde una red WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) conmutada por longitud de onda, ver **Fig. 2 - 16**, en ésta, una trayectoria de luz normalmente pasa transparentemente a través de un nodo, es decir, los nodos no pueden acceder a la información que contiene una longitud de onda. Por ejemplo en la figura **Fig. 2 - 16**, se puede dar que el nodo D no tenga acceso a los paquetes IP viajando en la longitud de onda λ_1 , de hecho, se puede analizar solo la información presente en una longitud de onda que empieza o termina en un nodo. Al Revisar las conexiones descritas en la **Fig. 2 - 16**, A-a-b-c-d-D (λ_2), B-b-c-d-e-E (λ_3) y A-a-b-c-d-e-E (λ_1), se puede apreciar que existe un problema con la conmutación de longitudes de onda. Cuando la capacidad de la trayectoria de luz AD (λ_2), está totalmente usada, se presenta una sobrecarga temporal, podría considerarse que la longitud de onda λ_1 se puede utilizar para

conducir el tráfico excedente en λ_2 , pero esto no puede darse ya que λ_1 está dedicada para la conexión entre AE. Al analizar más detenidamente la opción anterior, se puede asumir que la trayectoria de luz AE (λ_1), está llevando poco tráfico, lo cual es perfectamente posible y de hecho se podría decir también que en ciertos momentos λ_1 está vacía, así mientras la conexión AD tiene una capacidad escasa, AE la tiene en abundancia.

Mientras las redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) no pueden resolver instantáneamente el tipo de situación mencionado anteriormente, ORION habilita a la red para usar la capacidad de λ_1 (que normalmente está dedicada para la conexión AE) para la conexión AD, a través de la conmutación de la denominada modalidad “*Overspill*”, la cual hace que la red opere como una red WDM punto a punto. Ahora se puede decir que, los paquetes que pertenecen a la conexión AD son insertados en λ_1 (la cual normalmente es dedicada para la conexión AE), a este proceso se le denomina “*overspilling*” de aquí el nombre de *Overspill Routing in Optical Networks (ORION)*. A los paquetes que fueron insertados en una longitud de onda diferente mediante el proceso mencionado anteriormente se les llama *overspill packets*, mientras que a los paquetes que no han cambiado de trayectoria de luz se los denomina *lightpath packets*. Cuando los paquetes de la conexión AD son insertados en λ_1 , el nodo b debe estar en capacidad de detectarlos y rescatarlos de la longitud de onda para luego decidir si son enviados otra vez en modalidad *overspill* en λ_3 o si son enviados en λ_1 .

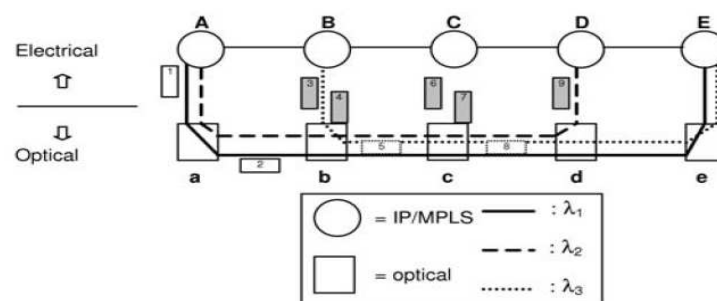


Fig. 2 - 16 Ejemplo de una red conmutada por longitud de onda para demostrar la funcionalidad de ORION. (Letras mayúsculas denotan a los *routers* IP/MPLS, letras minúsculas denotan OXC's).
[9]

2.3.3.2 Arquitectura del Nodo ORION (*Overspill Routing in Optical Networks*)

ORION emplea marcadores para cambiar instantáneamente de modalidad de longitud de onda conmutada a modalidad de paquete conmutado en una misma longitud de onda.

En estas redes dicho marcador se implementa mediante una señal FSK de baja velocidad de transmisión que acompaña a la carga útil (*Payload*) la cual se encuentra modulada en intensidad. La modalidad de paquete conmutado es llamada “*overspill*”, mientras que la modalidad de longitud de onda conmutada es llamada “normal”.

En la **Fig. 2 - 17** se puede apreciar un OXC (1) al cual arriban 4 longitudes de onda, de las cuales dos (λ_2 y λ_3) son dirigidas al router IP (2), mientras que las restantes (λ_1 y λ_4) pasan por éste transparentemente (3). Para detectar el marcador, parte de la potencia de las longitudes de onda se desvían hacia (4) y se procesan en (5). Si en el procesamiento se indica que se tiene un paquete *overspill*, entonces un conmutador óptico (6), conmuta las longitudes de onda hacia el router IP. Las longitudes de onda descartadas son combinadas (7) para ahorrar tarjetas de interfaz. De igual manera los conmutadores no necesitan ser instalados en todas las longitudes de onda, un subconjunto es suficiente.

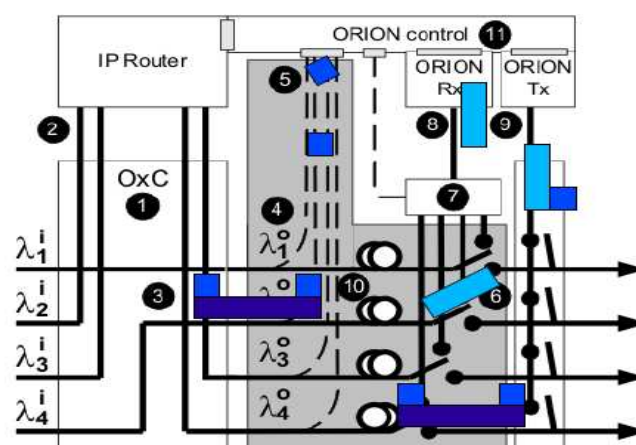


Fig. 2 - 17 Ejemplo de un nodo ORION. [6]

Después de que la posición del conmutador es fijada, el paquete overspill puede ser recibido a través de un receptor de banda ancha (8). El bloque de control electrónico de ORION (11), realiza la decisión de enviar el paquete vía modalidad normal en una trayectoria de luz o nuevamente en modalidad overspill.

Para compensar el tiempo necesitado para lectura, detección y conmutación, existen las líneas de retardo (10), éstas también permiten la detección de periodos inactivos en las longitudes de onda, con el propósito de insertar paquetes en modalidad overspill. Si se excede el tiempo de retardo estimado en la línea se asume que existe una longitud de onda disponible.

2.3.3.3 Casos de Estudio de ORION (*Overspill Routing in Optical Networks*)

Los dos casos que se presentan a continuación fueron analizados en [9], se evalúan dos tipos de redes usando cuatro tipos de tecnologías diferentes, el análisis de estas tecnologías se da principalmente con el motivo de comparar el desempeño de una misma red cuando opera con tecnologías actuales y cuando lo hace con la tecnología ORION. Las tecnologías a usarse son las siguientes:

- WDM punto a punto (P2P WDM): Hace referencia a OPS (*Optical Packet Switching*) u OBS (*Optical Burst Switching*), en este tipo de tecnología la información contenida en una longitud de onda debe obligatoriamente ser procesada en un *router*, para poder ser enrutada, ver **Fig. 2 - 18**.

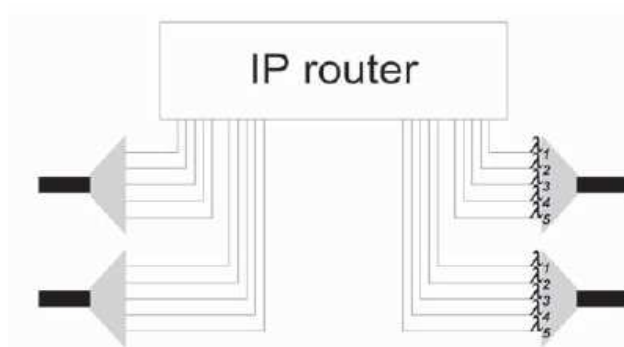


Fig. 2 - 18 WDM punto a punto. [9]

- Longitud de Onda Conmutada WDM (WS): Es utilizada con el propósito de reducir la cantidad de conversiones de medio Óptica-Electrónica-óptica. En éste tipo de tecnología, existen longitudes de onda que atraviesan transparentemente un nodo sin necesidad de ser procesadas por un *router*, esto se consigue con el uso de OXC's, ver **Fig. 2 - 19**.

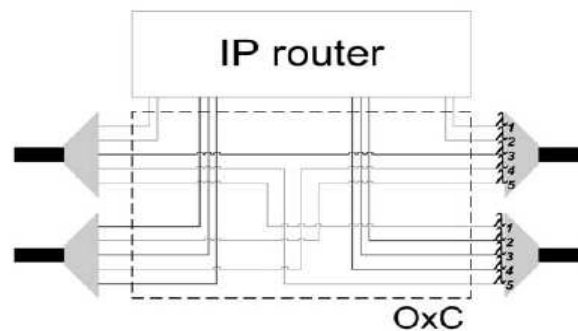


Fig. 2 - 19 Longitud de onda conmutada WDM. ^[9]

- Combined: Con el propósito de comparar a ORION con otra arquitectura híbrida, se evalúa una red de longitud de onda conmutada WDM combinada con una red paralela punto a punto WDM. El tráfico entrante al borde de la red usa longitud de onda conmutada WDM si una longitud de onda tiene capacidad suficiente para hacerlo, de lo contrario el tráfico es enviado sobre la red punto a punto WDM. Un ejemplo de red híbrida que use éste tipo de concepto es CHEETAH.

La primera red, denominada *Manhattan Street*, presenta una topología en forma de reja (4 x 4) de 16 nodos, ver **Fig. 2 - 20**.

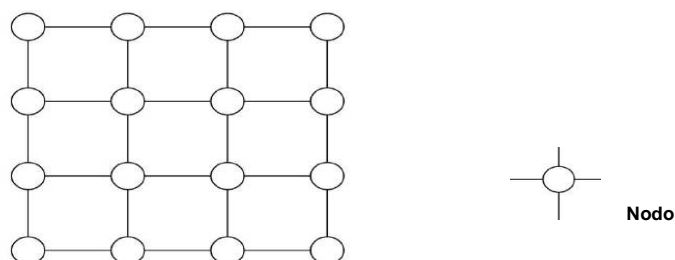


Fig. 2 - 20 Red *Manhattan Street*. ^[9]

La **Fig. 2 - 21**, muestra para los cuatro tipos de tecnologías antes mencionadas, el promedio de la cantidad de tráfico en un *router* IP (Barras izquierdas) y el promedio de la cantidad de longitudes de onda (Barras derechas – 10 Gbps por longitud de onda) en cada enlace.

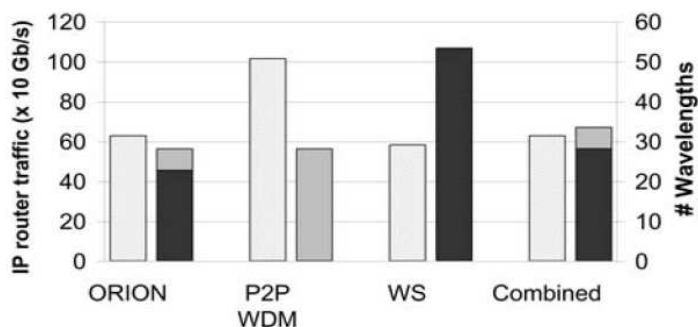


Fig. 2 - 21 Primer Caso de dimensionamiento. [9]

Nótese que para el caso de ORION y *Combined*, las barras derechas se componen de dos partes. Para *Combined* los dos componentes (Gris-Negro) indican cuántas longitudes de onda para cada tipo red (Longitud de onda conmutada WDM y WDM punto a punto) son utilizadas respectivamente, en cambio que para ORION, la interpretación es ligeramente diferente, la fracción indica la cantidad de longitudes de onda que transportan tráfico de tipo *overspill* (Gris) y las que trabajan en modo normal (Negro), el total es la cantidad de longitudes de onda requeridas en la red.

Al analizar el promedio de carga del *router* IP, se aprecia que para el caso de WDM punto a punto (P2P WDM), la cantidad a manejarse es mucho mayor que para los demás, y que para los casos de longitud de onda conmutada WDM (WS), y las tecnologías ORION y *Combined* se tienen valores muy parecidos de tráfico. Además se puede apreciar que para ORION, se tiene una pequeña cantidad de tráfico de tipo *Overspill* y que en esta tecnología se debe conmutar una cantidad de paquetes (Tráfico atravesando el *router* IP) un poco mayor que para el caso de longitud de onda conmutada.

De igual manera, para apreciar el impacto del uso de ORION en comparación a otras tecnologías, se propone otro ejemplo de dimensionamiento, en este ejemplo

se usa una red con una geografía extensa, ver **Fig. 2 - 22**, para analizar una predicción de la demanda de tráfico para el año 2008 en el proyecto *Pan-European Network IST-LION*, que es una red Europea hipotética.



Fig. 2 - 22 Red Europea. [9]

Para cada uno de los cuatro tipos de tecnologías, mencionadas anteriormente, en la **Fig. 2 - 23**, se analiza el promedio de la cantidad de tráfico en un *router* IP (Barras izquierdas) y el promedio de la cantidad de longitudes de onda (Barras derechas – 10 Gbps por longitud de onda) que se instala en cada enlace.

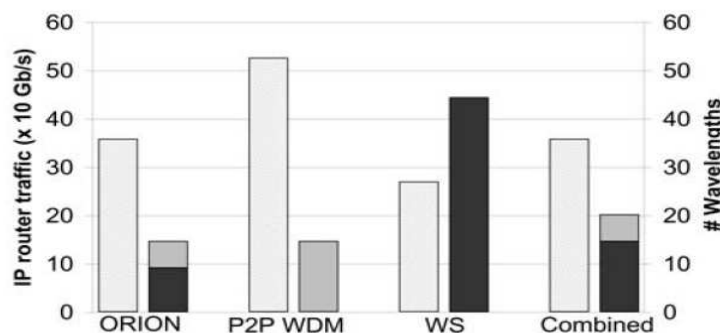


Fig. 2 - 23 Segundo caso de dimensionamiento. [9]

Para este caso la composición de las barras de ORION y *Combined* tiene el mismo significado que el de la **Fig. 2 - 23**; y, se aprecian resultados similares a los obtenidos en el primer caso de dimensionamiento.

Para tener una idea mejor acerca de la implementación en la realidad del sistema ORION, se recurre al uso del factor α , el cual indica la importancia relativa al costo que se tiene con la cantidad de tráfico que un nodo necesita conmutar y la cantidad de longitudes de onda que se necesitan para la red, ver **Ecuación 2 - 2** ^[9].

$$\text{Costo} = \alpha * \frac{\text{Carga del router IP}}{\text{Carga del router IP con longitud de onda conmutada}} + (1 - \alpha) * \frac{\text{Cantidad de longitudes de onda usadas}}{\text{Cantidad de longitudes de onda con WDM punto a punto}} \quad \text{Ecuación 2 - 2}$$

Si el factor α es igual a cero, el costo predominante en la red se dará por la cantidad de longitudes de onda que se necesitan para la misma, y cuando el valor de α sea igual a 1, se tendrá que el costo predominante se dará por la cantidad de tráfico manejado por los *routers* IP. Una vez más se analizan las cuatro tecnologías antes mencionadas: WDM punto a punto, Longitud de onda conmutada, ORION y *Combined*, ver **Fig. 2 - 24**.

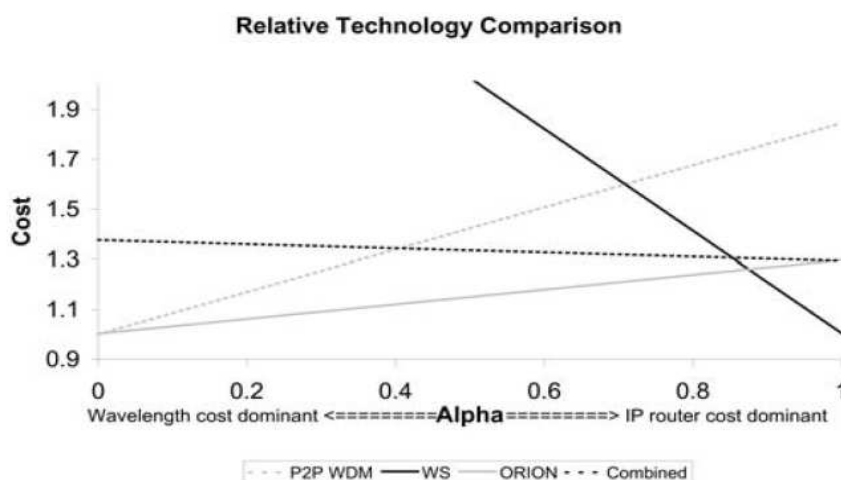


Fig. 2 - 24 Comparación de Tecnologías dependiendo del costo relativo. ^[9]

La principal ventaja de ORION radica en combinar efectivamente WDM punto a punto y WDM con longitud de onda conmutada, dicha combinación resulta en una arquitectura muy flexible, capaz de usar un mínimo ancho de banda mientras mantiene una cantidad de tráfico relativamente baja circulando por el *router* IP.

2.3.3.4 Elección de la Red Ópticas Híbrida para FSK/IM (*Frequency Shift Keying/Intensity Modulation*)

Después de analizar cuidadosamente las diferentes arquitecturas híbridas a lo largo de este capítulo, se puede apreciar que las Redes Ópticas Híbridas Integradas presentan todas las disponibilidades para adoptar un esquema de etiquetamiento FSK/IM, ya que dicha técnica de etiquetamiento permite en este tipo de red óptica híbrida distinguir cual de los dos modos: longitud de onda conmutada o paquete conmutado, es el que usará la red para procesar la información.

En el cuarto capítulo del presente estudio se podrá apreciar de mejor manera la actuación del etiquetamiento FSK/IM sobre una red óptica híbrida integrada cuando se analice formalmente dicho esquema en el proyecto IST-STOLAS y sobre la red ORION.

CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS ÓPTICA (OLS)

[1], [4], [10], [11], [12], [13]

La conmutación de etiquetas óptica propone una solución óptima para disminuir la cantidad de conversiones de medio para los datos que se transportan en una red óptica, además de esto permite obtener calidad de servicio (QoS) y otros beneficios que se detallarán mejor a lo largo de éste capítulo. A continuación se redactan los conceptos claves que permitirán comprender la conmutación de etiquetas óptica y establecerán las bases para asimilar los conceptos de la técnica de etiquetamiento FSK/IM (*Frequency Shift Keying/Intensity Modulation*) para conmutación óptica, que se mencionarán en el capítulo 4.

3.1 EL CONCEPTO DE CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS ÓPTICA (OLS) [4], [10], [11], [13]

La Conmutación de Etiquetas Óptica (OLS), trata de combinar lo mejor de OCS y de OPS; y, evitar al máximo sus limitaciones. La **Fig. 3 - 1** muestra la evolución de las redes de conmutación óptica y el campo de integración que busca OLS.

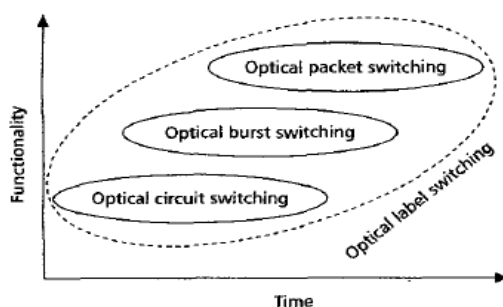


Fig. 3 - 1 Campo de integración de OLS. ^[10]

En una red OLS, las ráfagas de datos son creadas en el nodo de ingreso agrupando paquetes, ver **Fig. 3 - 2**. Dichas agrupaciones se forman tomando en

cuenta factores tales como el destino y la calidad de servicio. Una vez que la ráfaga es creada, una etiqueta de longitud corta y fija es asignada a ésta.

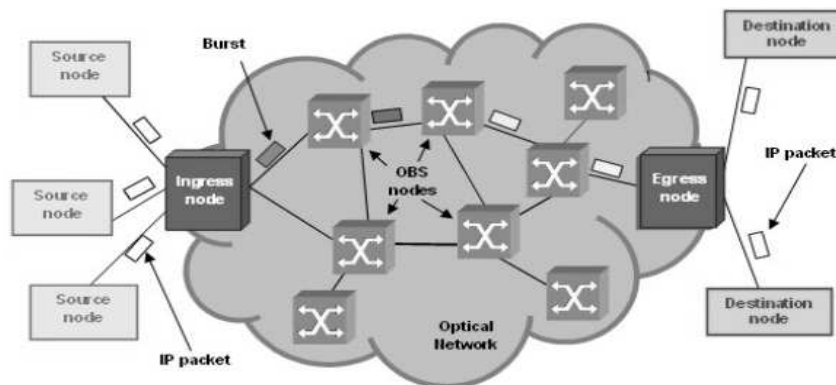


Fig. 3 - 2 Ejemplo de una red conmutada por etiqueta óptica. ^[4]

Al terminar el proceso antes mencionado se tiene una carga útil de datos y un paquete de control que contiene, dependiendo del esquema de etiquetamiento, la etiqueta u otra información de control, a continuación, en el nodo de *core* un Enrutador para Conmutación de Etiquetas Óptica (*OLSR*¹⁹, *Optical Label Switching Router*) toma la decisión de envío en base a la etiqueta para enrutar la ráfaga a través de la red hasta llegar al nodo de salida.

Se debe poner énfasis en que la información de carga útil (*Payload*) no abandonará el dominio óptico, y que solamente la información de control lo hará. Al procesar de forma electrónica solamente la información de control se evitan los denominados “cuellos de botella” en el campo electrónico.

OLS provee una mejor utilización del ancho de banda ya que permite combinar estadísticamente diversos flujos de ráfagas en una sola longitud de onda, dichos flujos de otra manera utilizarían varias longitudes de onda para poder viajar a través de la red óptica. Además de lo anteriormente mencionado, los requerimientos de sincronización son menos exigentes que en OPS, para realizar una comparación entre OCS, OPS y OLS, se puede hacer un análisis general recurriendo a la **Tabla 3 - 1**.

¹⁹ En la actualidad los *routers* ópticos están en etapa de investigación y desarrollo es decir no están disponibles comercialmente.

Tipo de Conmutación Óptica	Utilización del ancho de banda	Latencia (Incluyendo establecimiento)	Dificultad de implementación	Adaptabilidad (al tráfico y a fallas)
OCS	Baja	Baja	Baja	Baja
OPS	Alta	Baja	Alta	Alta
OLS	Alta	Baja	Media	alta

Tabla 3 - 1 Comparación entre OCS, OPS y OLS. [4]

En esencia el propósito de OLS es brindar una solución para el transporte de datos de alta capacidad para la próxima generación de Internet, ver **Fig. 3 - 3**, dichas redes estarían compuestas a su vez por redes de *core* OLS y de borde OLS.

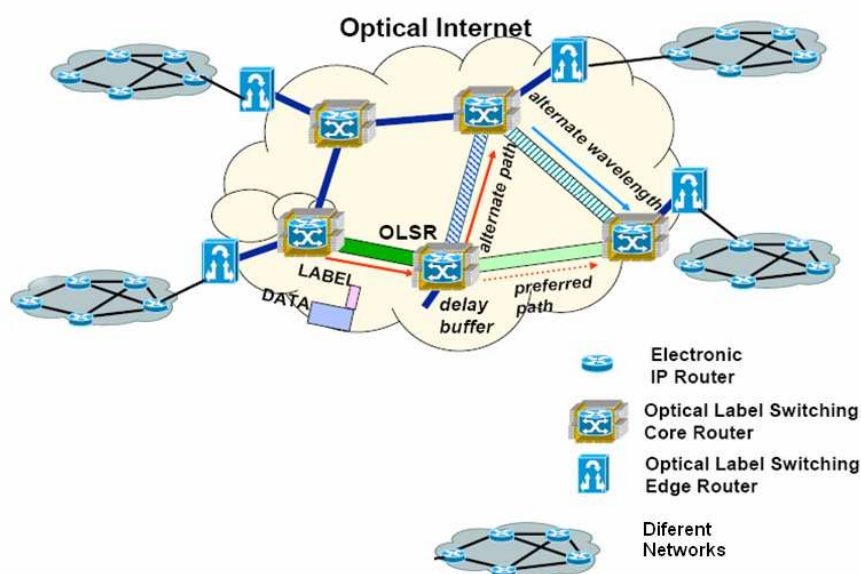


Fig. 3 - 3 Red conmutada por etiqueta óptica. [13]

Las redes de *core* OLS son la interfaz entre las redes de borde OLS, y éstas a su vez, son la interfaz con las redes periféricas, es decir las redes de borde OLS, permiten a las diversas redes de clientes conectarse con la red de Internet de próxima generación. Cabe destacar que las redes de clientes (redes de acceso), que se conectan a la red de conmutación de etiquetas óptica, pueden ser por ejemplo: SONET, ATM, IP, 3G *Wireless*, etc, ver **Fig. 3 - 4**.

El nodo de *core* se encarga de leer la etiqueta, reemplazarla y dirigir la carga útil hacia otro nodo de *core*, repitiendo este proceso, hasta que finalmente llegue a otro nodo de borde que esté conectado a una red cliente. Cabe destacar que existen diversos métodos de etiquetamiento óptico como se pudo apreciar en el Capítulo 1, en la **Fig. 3 - 4** se puede apreciar uno de ellos SCM (*Optical Subcarrier Multiplexing*), en el cuál los datos de carga útil y la etiqueta viajan en el mismo canal de longitud de onda, pero viajan en frecuencias separadas, esto facilita el procesamiento de la etiqueta mediante filtrado, y conlleva a que la carga útil pase transparentemente por un OLSR y sea enviada a su destino; de esta forma, el envío de paquetes llega a ser independiente del formato de los datos de carga útil, de la velocidad de transmisión y de los protocolos.

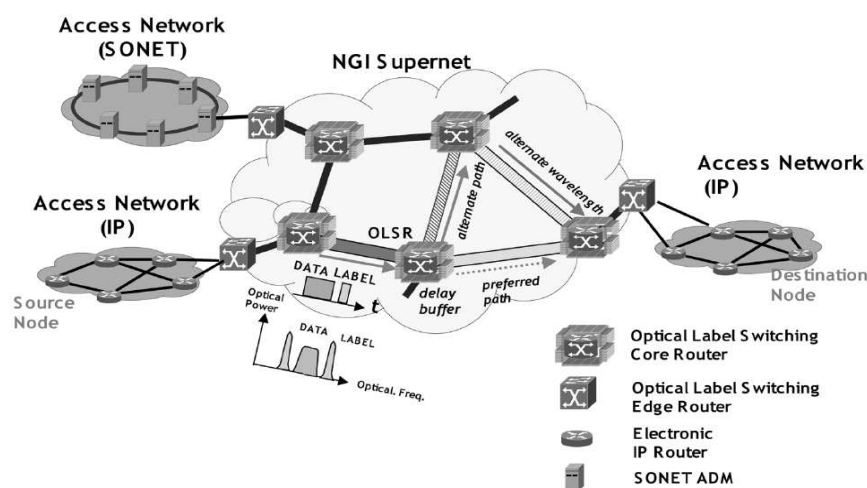


Fig. 3 - 4 Ejemplo de redes clientes conectadas a una red OLS. ^[11]

Como se recordará, OLS ha aparecido como una forma efectiva de introducir redes OPS que interactúen con OBS y OCS; hay que tomar en cuenta que en la actualidad, la investigación en el campo de OPS se ha centrado en la implementación de envío sincrónico de paquetes de longitud fija, lo que conlleva a la implementación de sincronizadores altamente complejos. En los sistemas que operan con envío sincrónico de paquetes de longitud fija, para cada longitud de onda en cada fibra entrante, hay una etapa de sincronización de paquete óptico que está conformada por Líneas de Retardo de Fibra (*FDL, Fiber Delay Line*)

voluminosas y conmutadores ópticos de tipo paquete multietapa, lo que en pocas palabras implica la construcción de arquitecturas complicadas.

Tomando en consideración los factores antes mencionados con respecto al envío sincrónico de paquetes de longitud fija, han aparecido nuevos esquemas que simplifican la arquitectura de hardware óptico, mediante el uso de otros esquemas de sincronización, uno de ellos es el que se toma en consideración en [9], la conmutación de paquetes de longitud variable asincrónica²⁰.

3.2 ENRUTADOR PARA CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS ÓPTICA (*OLSR, OPTICAL LABEL SWITCHING ROUTER*)

[1], [4], [10], [12], [13]

El eje fundamental con el que una red OLS trabaja son los Optical Label Switching Routers (*OLSR's*), ver **Fig. 3 - 5**. Estos dispositivos revisan la etiqueta óptica, toman una decisión de envío (dicha decisión se realiza en base a sus "Tablas de envío") y realizan los pasos necesarios para configurar su "Malla de conmutación".

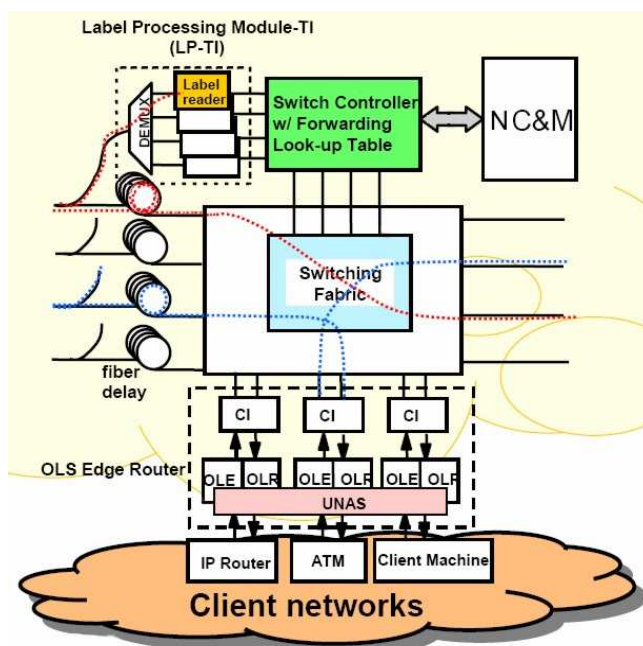


Fig. 3 - 5 Arquitectura de un Optical Label Switching Router. [13]

²⁰ Velocidad variable.

Un Enrutador Para Conmutación De Etiquetas Óptica (*OLSR, Optical Label Switching Router*) puede ser un nodo de borde en cuyo caso se le denominará un *Optical Label Switching Edge Router*, o un nodo de core que será un *Optical Label Switching Core Router*. Para ambos casos la arquitectura del *router* deberá obedecer a ciertos lineamientos que le permitan llevar a cabo su función de la forma más eficiente pero en esencia tendrán el mismo principio de funcionamiento.

3.2.1 ARQUITECTURA DEL ENRUTADOR PARA CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS ÓPTICA (*OLSR, OPTICAL LABEL SWITCHING ROUTER*)

Una red OLS de alto desempeño está formada por *routers* de *core* OLS de alta capacidad y *routers* de borde OLS.

3.2.1.1 Arquitectura del *Optical Label Switching Edge Router*

El *router* de borde, ver **Fig. 3 - 6**, provee la interfaz para las redes clientes a través de un Sistema de Acceso de Red Universal (*UNAS, Universal Network Access System*) y una NC&M (*Network Control and Management*).

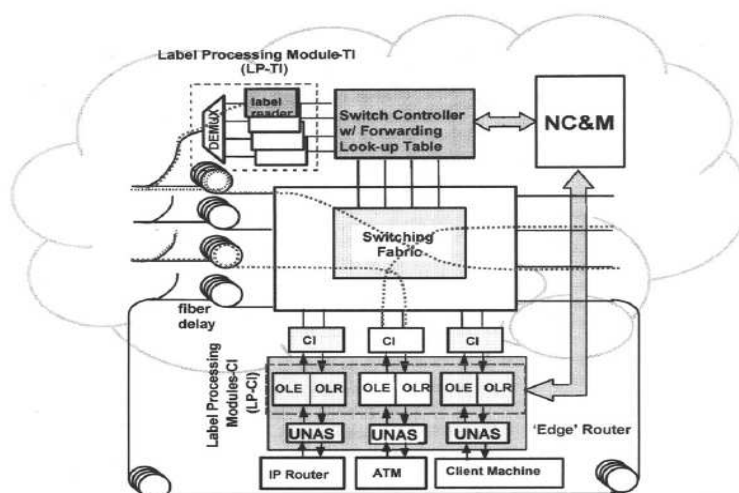


Fig. 3 - 6 Optical Label Switching Edge Router.

UNAS, ver **Fig. 3 - 7**, es un sistema que establece la información que conformará la etiqueta óptica en base a la información, de por ejemplo, las cabeceras de los

paquetes IP y de las celdas ATM; mientras que, la NC&M monitorea el tráfico en la red de conmutación de etiquetas óptica y las actualizaciones de la tabla de enrutamiento, todo con el propósito de optimizar el desempeño de dicha red, ya que en el caso de existir una falla, la NC&M modifica la tabla de enrutamiento para evitar que el tráfico circulante en la red atravesase nodos o enlaces defectuosos.

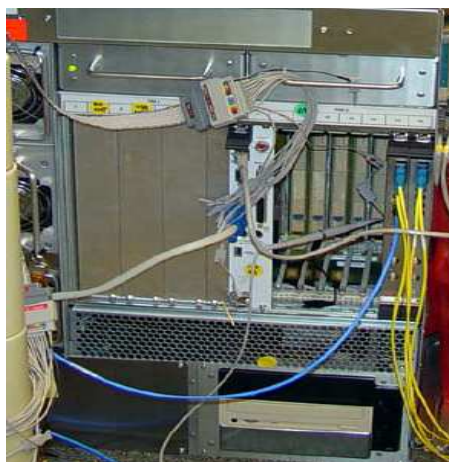


Fig. 3 - 7 UNAS (*Universal Network Access System*). ^[13]

Además de lo mencionado anteriormente, UNAS con la ayuda de NC&M provee conectividad con los *routers* de *core* a través de los interfaces de los CI's (*Client Interfaces*), es decir dichos interfaces permiten recibir o enviar la información (en el campo óptico) para luego mediante los módulos de procesamiento de etiqueta para las interfaces clientes (*LP-CI, Label Processing-Client Interfaces*), ver **Fig. 3 - 8**, llevar a cabo el proceso de generación o retiro de una etiqueta.

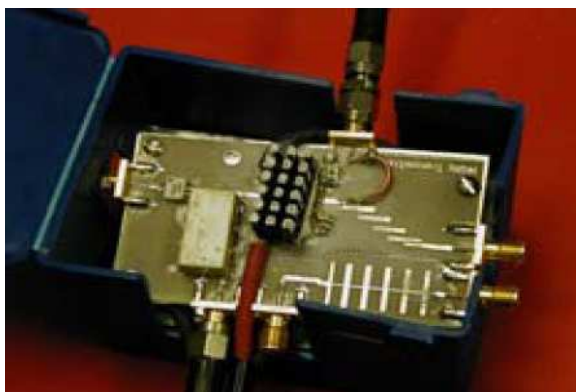


Fig. 3 - 8 Módulo de procesamiento de etiqueta (*LP-C*) ^[13]

Cabe destacar que los LP-CI, están conformados por Codificadores de Etiqueta Óptica (*OLE's, Optical Label Encoders*) y por Eliminadores de Etiqueta Óptica (*OLR's, Optical Label Remover*), para la generación o retiro de la etiqueta óptica respectivamente.

En la parte de ingreso de la red de conmutación de etiquetas óptica, el nodo de borde cambia el formato de los datos entrantes del cliente, a un formato requerido por la red OLS, y después codifica una etiqueta óptica apropiada que acompañe a los datos de carga útil mediante un OLE. En la parte de egreso de la red, el nodo de borde recibe un paquete óptico desde la red de *core* y lo convierte nuevamente al formato requerido por la red del cliente, en este punto, el OLR remueve la etiqueta óptica de dichos paquetes, para que éstos salgan de la red.

3.2.1.2 Arquitectura del *Optical Label Switching Core Router*

El *router* de *core* está conformado por un módulo de procesamiento de etiqueta para las interfaces de transporte (*LP-TI, Label Processing-Transport Interfaces*), para detección de la etiqueta, ver **Fig. 3 - 9**; una malla de conmutación, y un controlador de conmutación, ver **Fig. 3 - 10**, que actúa basándose en una tabla de envío.

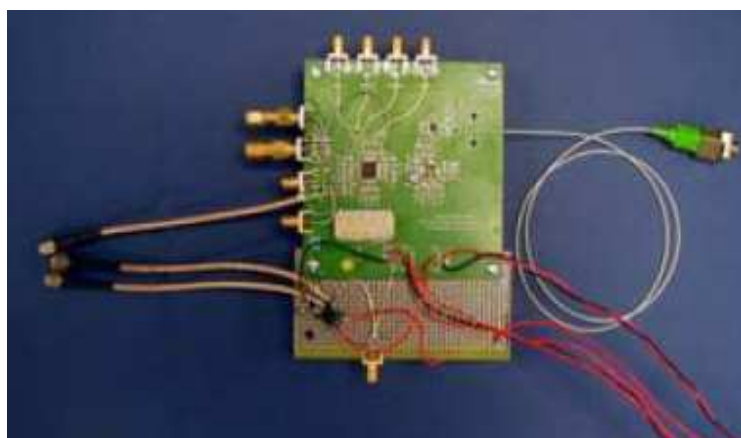


Fig. 3 - 9 Módulo de procesamiento de etiqueta (LP-TI). ^[13]

El *router* de *core* detecta a un paquete llegando asincrónicamente y extrae la etiqueta óptica adherida a los paquetes con la ayuda de los LP-TI. La decisión de

envío principalmente se basa en el análisis de la “Tabla de envío”, y en la asignación tanto del puerto de salida como de la longitud de onda. Basado en las instrucciones provenientes del controlador de conmutación, la malla de fibra llevará a cabo la conmutación.



Fig. 3 - 10 Controlador de conmutación. ^[13]

Mientras se lleva a cabo la detección de la etiqueta óptica, la decisión de envío y el proceso de conmutación; la línea de retardo de fibra, puesta en los puertos de entrada, retarda los datos de carga útil, es decir el *router* divide al plano de datos y al de control. Cabe destacar que en la actualidad las líneas de retardo de fibra constituyen el método más práctico para conseguir una cantidad limitada de retardo de tiempo.

3.2.1.2.1 El Controlador de Conmutación

La **Fig. 3 - 11** muestra la arquitectura de un controlador de conmutación, éste se conforma por un módulo de procesamiento de etiqueta, “Marcadores” y “Árbitros”.

Los Marcadores están constituidos por flip-flops, contadores y registros, los mismos que en conjunto informan al Árbitro acerca de la disponibilidad de alguna longitud de onda en algún puerto de salida en un instante dado. Por otra parte el Árbitro es el dispositivo que acepta las solicitudes para envío de paquete provenientes de los módulos de procesamiento de etiqueta, solo si en el Marcador se indica que hay una longitud de onda disponible en algún puerto de salida.

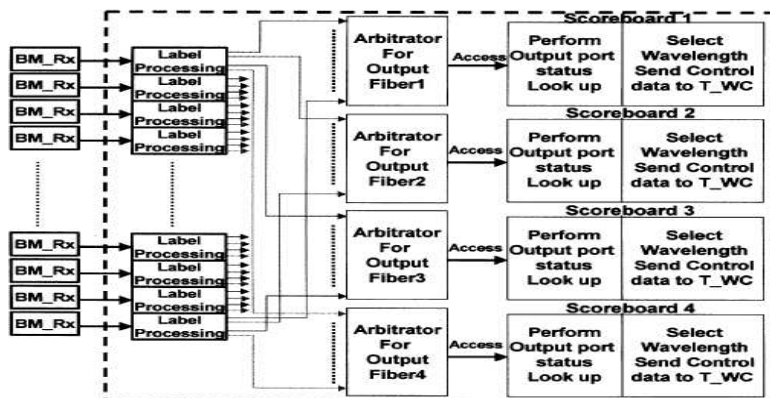


Fig. 3 - 11 Arquitectura de un controlador de conmutación. [12]

El módulo de procesamiento de etiqueta recibe a las etiquetas recobradas de cada LP-TI, revisa las tablas de envío y determina la fibra de salida; al alcanzar el último paso el Árbitro realiza una solicitud de envío.

Se debe mencionar que el “Arbitraje” obedece a una secuencia de pasos:

1. El Árbitro acepta la petición, si existe una longitud de onda disponible en el Marcador.
2. Los solicitantes revisan los registros de estado del Marcador, y finalmente,
3. El Marcador selecciona la longitud de onda de salida y envía las señales de control a un Conversor de Longitud de Onda Sintonizable ($T\lambda WC$, *Tunable Wavelength Converter*) adecuado.

Si el árbitro niega una petición proveniente de los módulos de procesamiento de etiqueta, se recurre al siguiente árbitro basándose en algún esquema de resolución de disputas, y luego se encamina el paquete en el dominio del tiempo o en el dominio óptico.

3.2.1.2.2 Malla de Conmutación Óptica

El *router* de *core* está conformado por diversos dispositivos que permiten realizar el proceso de conmutación, el mas importante es la malla de conmutación, dicha componente está conformada por: un Enrutador de tipo Enrejado con arreglos de

guía de onda (AWGR, *Arrayed Waveguide Grating Router*), un arreglo $T\lambda$ WC's y un arreglo de Conversores de Longitud de Onda Fija ($F\lambda$ WC, *Fixed Wavelength Converters*), ver **Fig. 3 - 12**.

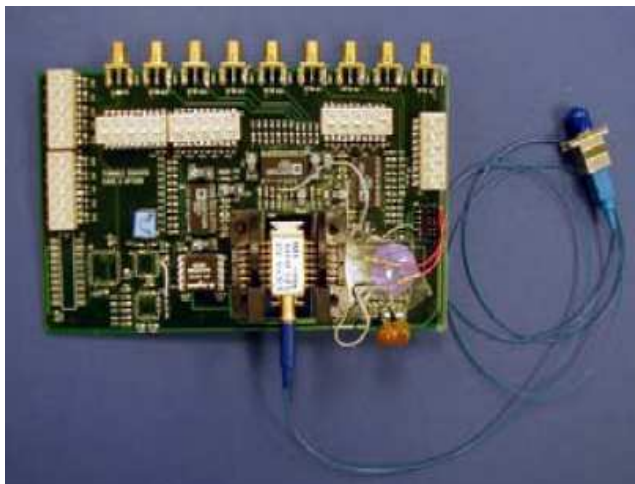


Fig. 3 - 12 Conversores de Longitud de Onda Fija $T\lambda$ WC's [13]

Los AWGR's, ver **Fig. 3 - 13**, permiten enviar los paquetes entrantes a los puertos de salida deseados mediante la selección de una longitud de onda apropiada tanto a la entrada como a la salida.

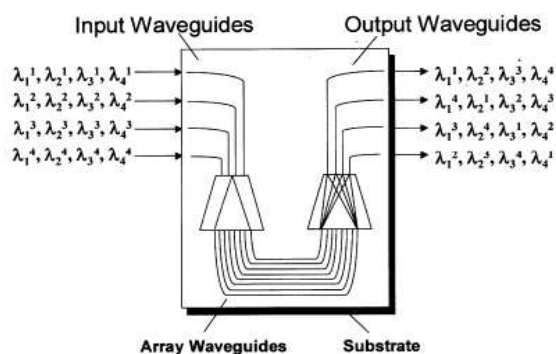


Fig. 3 - 13 Funcionamiento de un AWGR. [12]

En la **Fig. 3 - 13**, se puede apreciar como la información que arriba al puerto 1 de entrada del AWGR, inicialmente es insertada en 4 longitudes de onda cualquiera ($\lambda_1^1, \lambda_2^1, \lambda_3^1$ y λ_4^1) dichas longitudes de onda luego son dirigidas a cada uno de los

cuatro puertos de salida del mismo, dependiendo de cual sea el destino que quieran alcanzar, es decir se ha llevado a cabo un proceso de conmutación.

Para evitar un solapamiento de señales en una fibra a la salida de la malla de conmutación (AWGR), la etapa de F λ WC's convierte la longitud de onda obtenida de los T λ WC's a una longitud de onda conveniente para el envío sobre la fibra, ver **Fig. 3 - 14**.

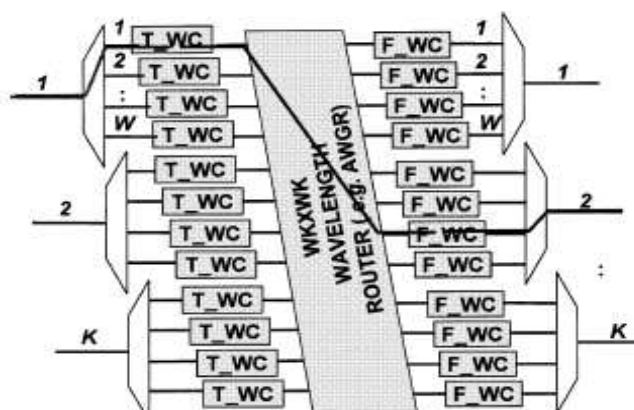


Fig. 3 - 14 Estructura de una malla de conmutación. [12]

Esta malla de conmutación basada en AWGR, provee la capacidad de enrutar cualquier longitud de onda entrante de cualquier puerto de entrada, a cualquier longitud de onda de salida en cualquier puerto de salida.

En esta arquitectura las dimensiones del AWGR están dadas por la **Ecuación 3 - 1**.

$$\text{Dimensiones del AWGR} = (W \times K) \times (W \times K) \quad \text{Ecuación 3 - 1}$$

En donde: W : El número de longitudes de onda de un puerto de fibra

K : El número de puertos de fibra

En la **Fig. 3 - 13**, se puede apreciar a un AWGR de dimensiones 4 x 4. En la actualidad existen AWGR de 128 x 128 y se encuentran en desarrollo AWGR de 256 x 256.

Cabe destacar que además de la función antes mencionada para $F\lambda WC$, en estos dispositivos existe un módulo de regeneración de etiqueta, esto debido a la degradación que sufre la señal y a otros factores tales como dispersión y no linealidad de la fibra. Una red OLS requiere de regeneración 2R o 3R, la primera implica re-amplificación y re-formado de las señales, mientras que la segunda hace referencia, además de las dos antes mencionadas, a la re-sincronización de las señales.

3.2.1.2.3 Intercambio de Etiquetas Óptica

El proceso de intercambio de etiquetas, provee flexibilidad y escalabilidad en la red OLS, este proceso implica la extracción de una etiqueta antigua y la inserción de una nueva. La decodificación de la etiqueta, es decir identificar cuál parte del espectro óptico pertenece a la etiqueta y cuál pertenece a los datos de carga útil, se realiza por medio del esquema de codificación basado en multiplexación de Sub portadora (*SCM, Sub-Carrier Multiplexing*), ver **Fig. 3 - 4** y **Fig. 1 - 44**, dicho esquema permite separar a la etiqueta y a los datos de carga útil en el dominio óptico, mediante el proceso de filtrado utilizando el concepto de Rejilla Bragg de Fibra (*FBG, Fiber Bragg Grating*), mediante éste se analizan solamente los datos de la etiqueta óptica mientras que la información de carga útil es reflejada.

3.2.2 RESOLUCIÓN DE DISPUTAS

Cuando dos o más paquetes quieren ocupar la misma longitud de onda a la salida del nodo, tienen además la misma ruta y todo esto ocurre al mismo tiempo, el OLSR enviará los paquetes, que entraron en disputa, a una longitud de onda alterna mediante *buffering*, o por una ruta alterna. Esta técnica de resolución de disputas en longitud de onda, tiempo y espacio, es un factor clave para la implementación de *routers* ópticos que no se limitan al uso exclusivo de *buffering* como ocurre en los *routers* electrónicos. Además de lo anteriormente mencionado, esta técnica de resolución de disputas brinda una solución efectiva para soportar paquetes de longitud variable llegando asincrónicamente al nodo.

En la **Fig. 3 - 15**, se puede apreciar un método de resolución de disputas²¹. En dicho método se hace uso de conversores de longitud de onda y líneas de retardo de fibra (FDL), actuando en conjunto con la malla de conmutación.

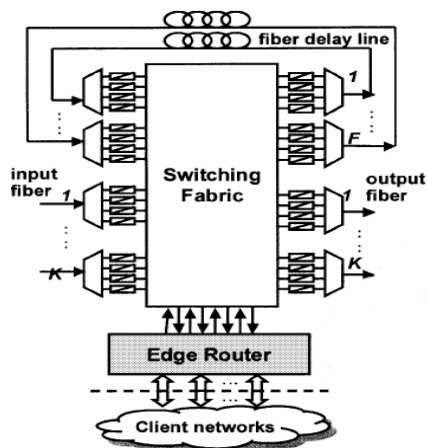


Fig. 3 - 15 Arquitectura del nodo para resolución de disputas. ^[12]

Cuando la disputa ocurre en un puerto de fibra de salida específico, el *router* óptico intentará resolver la disputa, en primera instancia, buscando una longitud de onda disponible para ese puerto de salida específico, la conversión de longitud de onda no provoca latencia del paquete, *jitter* o problemas de reordenamiento de paquete, ya que solo se pasa de una longitud de onda que ha entrado en disputa a una que no lo este; y que por tanto, pueda enrutarse por el mismo puerto. Éste es el método de resolución de disputas más utilizado en las redes OLS.

De no existir una longitud de onda libre, el *router* enviará el paquete a una FDL disponible para realizar un *buffering* temporal, este tipo de resolución de disputas no es conveniente ya que solamente se pueden implementar físicamente un número limitado de *buffers* FDL, y en el caso de existir varias disputas; y, que los paquetes no tengan ningún *buffer* para enrutarse, éstos empezarán a perderse.

Un paquete que ha entrado en disputa es dirigido a una FDL, colocada a la salida de la malla de conmutación, recorre en su totalidad la línea de retardo y regresa a un puerto de entrada. Adicionalmente, el *router* puede combinar la resolución de

²¹ Revisar la sección 1. 3.1.1

disputas en el dominio temporal con una de conversión de longitud de onda, al realizar el proceso anteriormente señalado un paquete, que ha entrado en disputa, regresará a la malla de conmutación con una longitud de onda diferente a la que tenía inicialmente al salir del mismo para que existan mayores posibilidades de enrutarse por un puerto de salida.

Cabe destacar que si ningún método de resolución de disputas tiene éxito, el paquete será descartado, y que a si mismo, para evitar que un paquete circule indefinidamente por las FDL's y por los nodos vecinos, las redes OLS adoptan un mecanismo llamado Tiempo de Vida Óptico (*OTTL, Optical-Time-To-Live*), el cual toma en cuenta el deterioro de la señal, inducido por los dispositivos ópticos, que un paquete sufre cuando no abandona el campo óptico, evitando por lo tanto que un paquete circule indefinidamente por la red OLS ocupando innecesariamente el ancho de banda de dicha red. Cuando el OTTL de un paquete expira, el paquete es descartado.

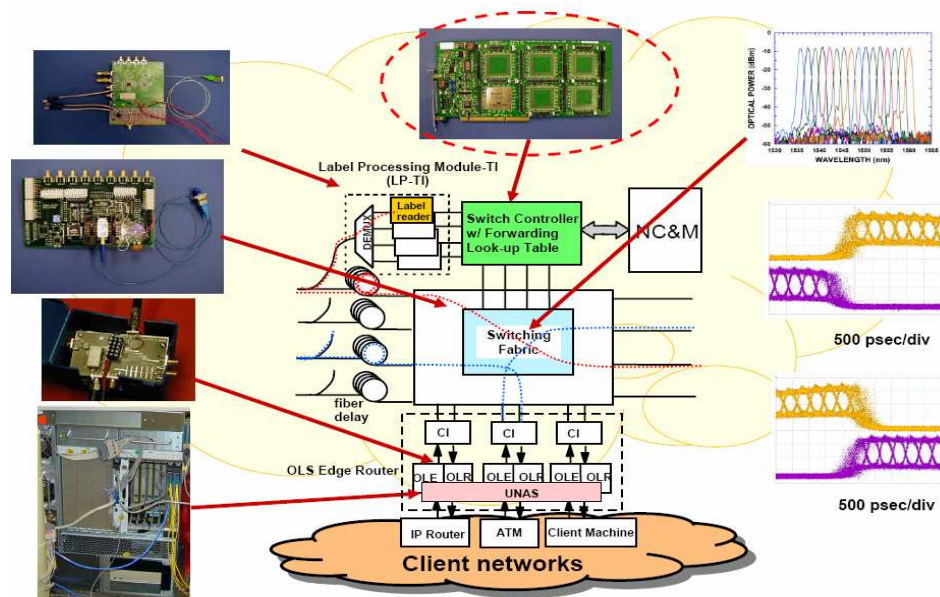


Fig. 3 - 16 OLSR (Optical Label Switching Router). [13]

Finalmente en la **Fig. 3 - 16**, se muestra a un OLSR, sus diversos componentes y diagramas del ojo²² tomados de un osciloscopio, en donde se puede apreciar la conmutación de una señal óptica de un puerto a otro (4 al 8 y viceversa).

²² El diagrama del ojo es una técnica experimental que permite analizar la cantidad promedio de interferencia en un canal de comunicaciones.

3.3 INTEROPERABILIDAD CON MPLS, MPLS Y GMPLS ^{[10], [12]}

En 1997, IETF (*Internet Engineering Task Force*) comenzó a desarrollar el concepto de MPLS, este concepto de conmutación por etiqueta afortunadamente coincide con el fundamento de OLS (*Optical Label Switching*) e implica una compatibilidad entre ambos, aprovechando al máximo los avances realizados en MPLS (*Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo*) y GMPLS (*Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo Generalizado*) en el plano de control.

3.3.1 CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS PARA MULTIPROTOCOLO (*MPLS, MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING*)

En 1997, se realizaron importantes progresos en la simplificación de protocolos y en la implementación de capacidad de enrutamiento e ingeniería de tráfico en las redes de datos, se analizaron las similitudes que existían entre las tecnologías existentes y se concluyó que uno de los factores más influyentes era la técnica de “Intercambio de etiqueta” para envío de datos (por ejemplo en redes ATM) y que en su gran mayoría dichas técnicas buscaban mantenerse en el campo IP (*Internet Protocol*), ver **Fig. 3 - 17**, es decir utilizaban direcciones IP y protocolos estándar para enrutamiento en Internet, como por ejemplo: OSPF (*Open Shortest Path First*) y BGP (*Border Gateway Protocol*).

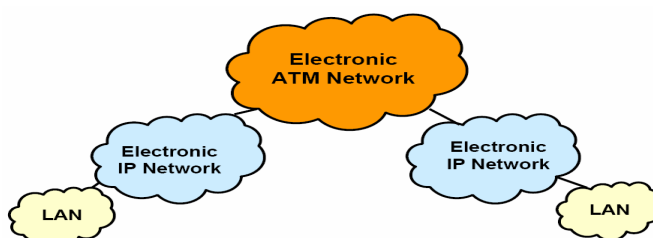


Fig. 3 - 17 IP en una red ATM. ^[13]

El término “Conmutación de etiquetas”, en sus inicios, era el pseudónimo utilizado para tecnologías como: “Conmutación IP” de Ipsilon, “*Tag Switching*” de Cisco y “*ARIS, Aggregate Route-based IP Switching*” de IBM. En éstas, una etiqueta era un identificador de longitud fija y de tamaño corto, utilizada para enviar paquetes,

que era reemplazada cada vez que un paquete atravesaba un dispositivo de conmutación de etiquetas, denominado “*LSR, Label Switching Router*”, que tenía la capacidad de ejecutar protocolos de control IP para determinar a dónde enviar los paquetes.

Como se mencionó anteriormente, en 1997 el IETF oficialmente estableció un estándar en esta área, MPLS (*Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo*), con éste, se resolvía el problema de escalamiento de IP/ATM, implementando en cada conmutador ATM un IGP (*Interior Gateway Protocol*) para considerar retardo de propagación, ancho de banda, confiabilidad, carga, etc; y, adicionando la capacidad de desempeñar ingeniería de tráfico para que los diferentes tipos de datos sean tratados de acuerdo a ciertas prioridades como son: latencia, probabilidad de pérdida de paquetes, *jitter*, etc.

Con MPLS se establece una conexión virtual entre dos puntos pertenecientes a una red de conmutación de paquetes, ver **Fig. 3 - 18**, la misma que permite el flujo de tráfico basado en paquetes.

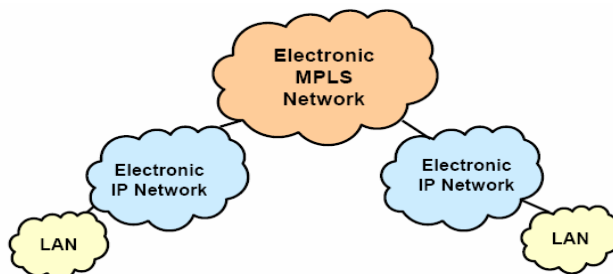


Fig. 3 - 18 Red IP con backbone MPLS. ^[13]

MPLS puede usar además Rutas Conmutadas por Etiqueta (*LSP, Label Switched Paths*) de forma similar a las redes orientadas a conexión, manteniendo la misma eficiencia que en la red de conmutación de paquetes.

Otros beneficios de MPLS son: aplicaciones de Redes Privadas Virtuales (*VPN, Virtual Private Network*), re-enrutamiento rápido basado en protección de circuitos, multicast y mejoramiento de QoS.

Como se ha mencionado a lo largo del capítulo, un paquete que entra a una red OLS adquiere una etiqueta óptica que le permite viajar por los nodos de core hasta encontrar un nodo de borde que le señale su destino en una red cliente, ver **Fig. 3 - 19**.

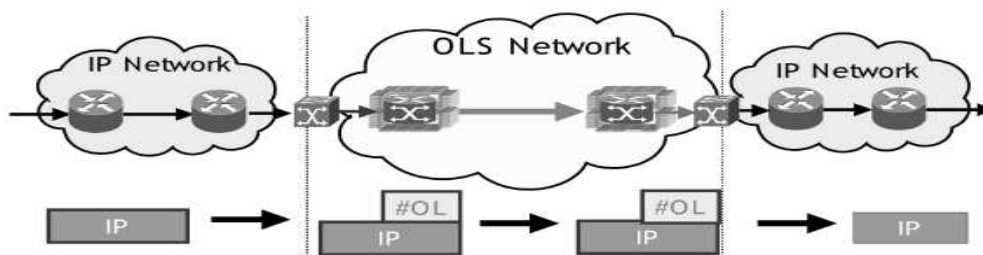


Fig. 3 - 19 Interoperabilidad de redes IP con una red OLS. ^[11]

La interoperabilidad de una red OLS para el caso de MPLS es muy simple, solamente el contenido de la etiqueta MPLS (*EL, Electronic Label*) es trasladado y recalculado en una etiqueta óptica, para que pueda viajar por la red OLS hasta encontrar su destino, ver **Fig. 3 - 20**.

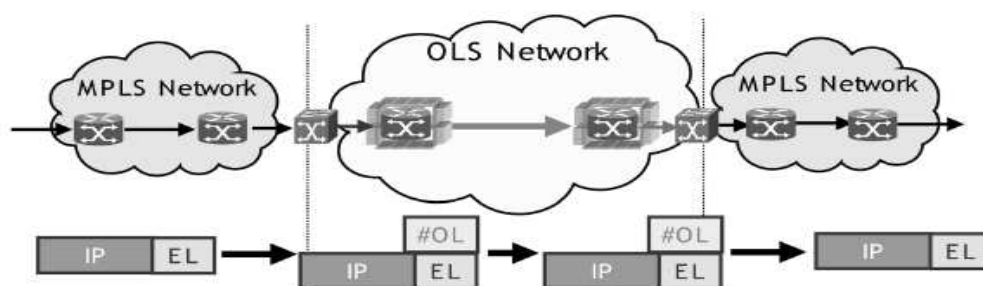


Fig. 3 - 20 Interoperabilidad de redes MPLS con una red OLS. ^[11]

3.3.2 CONMUTACIÓN DE LONGITUDES DE ONDA PARA MULTIPROTOCOLO ($MP\lambda S$, MULTIPROTOCOL LAMBDA SWITCHING)

En 1999 se presenta $MP\lambda S$, ver **Fig. 3 - 21**, tecnología que fue diseñada para adoptar la ingeniería de tráfico de MPLS, y para desempeñarse como el plano de control para OXC's (*Optical Cross Connects*). El objetivo de $MP\lambda S$ es el de facilitar la provisión y reconfiguración de trayectorias de luz en los OXC.

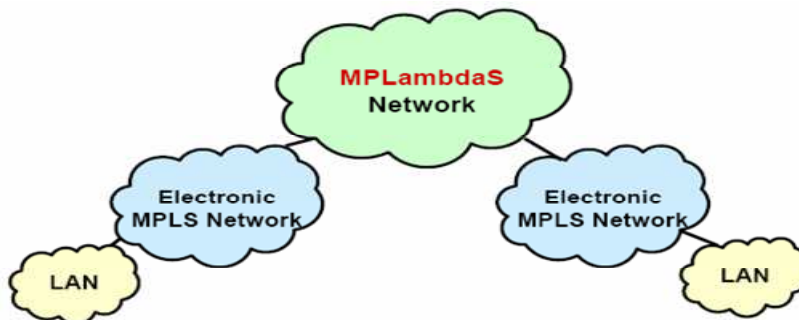


Fig. 3 - 21 Red MPLS con backbone MPLambdaS. ^[13]

El plano de control OXC usa extensiones IGP para distribuir la información de estado en la red OLS; información que puede ser por ejemplo el estado de la topología de la red. Se puede mencionar que $MP\lambda S$ utiliza los siguientes componentes del plano de control de ingeniería de tráfico perteneciente a MPLS:

- Descubrimiento de recursos
- Diseminación de la información de estado
- Selección de la ruta, y
- Administración de la ruta.

En $MP\lambda S$ se asume que los OXC y los elementos de la red están en la capacidad de reconfigurar ópticamente los circuitos de la red. Cabe destacar que la reconfiguración es la habilidad que tiene una red para aprovisionar trayectorias de luz y topologías automáticamente, y además de alterar dichos factores en respuesta al cambio de tráfico, demanda de ancho de banda y necesidades de mantenimiento.

El concepto mencionado anteriormente difiere del que se maneja en OLS, en donde se asume que los OLSR (*Optical Label Switching Router*) están en capacidad de conmutar paquetes, circuitos y ráfagas directamente en el campo óptico.

Cabe destacar que $MP\lambda S$ fue exitoso en combinar MPLS con WDM, pero no tuvo el mismo resultado al integrar la conectividad de datos y la óptica, ya que $MP\lambda S$

mantiene una relación “Maestro-Eslavo” entre MPLS y OXC mientras que OLS busca una integración entre la conectividad de datos y la óptica, por medio de las etiquetas ópticas. Otra diferencia clave entre MP λ S y OLS, es que MP λ S efectúa una conversión de longitud de onda, solo si, los OXC efectúan un intercambio de longitud de onda.

En la **Fig. 3 - 22**, se muestra la interoperabilidad de una red de conmutación de circuitos, en este caso MP λ S con una red OLS, en donde el identificador de circuito (*CID*, *Circuit Identifier*), es trasladado y recalculado en una etiqueta óptica.

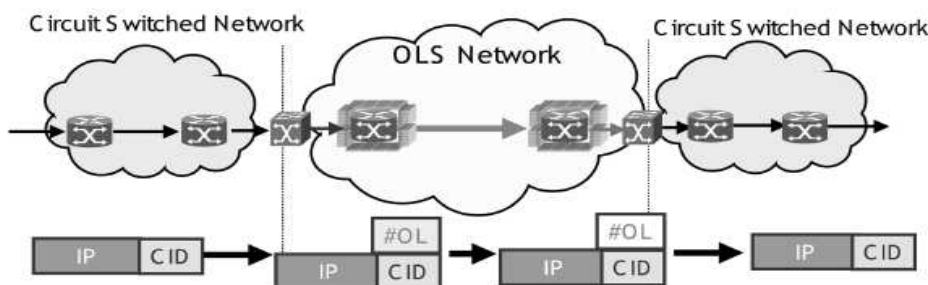


Fig. 3 - 22 Interoperabilidad de una red de conmutación de circuitos (por ejemplo MP λ S) con una red OLS. ^[11]

3.3.3 CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS PARA MULTIPROTOCOLO GENERALIZADO (GMPLS, *GENERALIZED MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING*)

Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo Generalizado (*GMPLS*, *Generalized Multiprotocol Label Switching*) es una tecnología de plano de control que soporta a más de conmutación de paquetes, conmutación en el dominio del tiempo, espacio y longitud de onda.

Cabe destacar que GMPLS abre las puertas para permitir la interoperabilidad de las redes OLS con nuevas tecnologías emergentes, a esto se le denomina extensiones de GMPLS, para entender de mejor manera este concepto, la **Fig. 3 - 23**, ilustra la evolución proyectada desde las tecnologías actuales, hacia las

posibles redes ópticas incorporando conmutación por etiqueta óptica y GMPLS con una extensión (*GMPLS II*), es decir la interoperabilidad entre la redes de conmutación de etiquetas óptica, MPLS y $MP\lambda S$, ver **Fig. 3 - 24**.

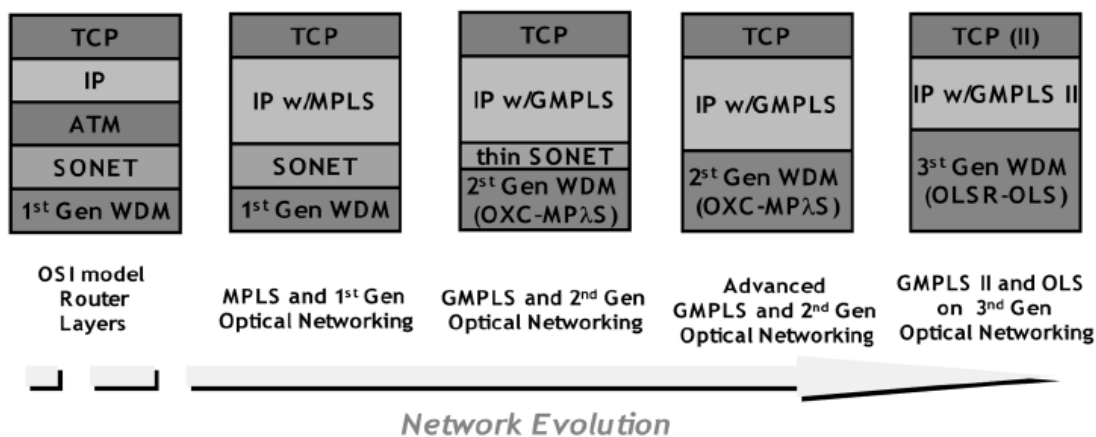


Fig. 3 - 23 Evolución proyectada hacia la conmutación por etiqueta óptica. ^[11]

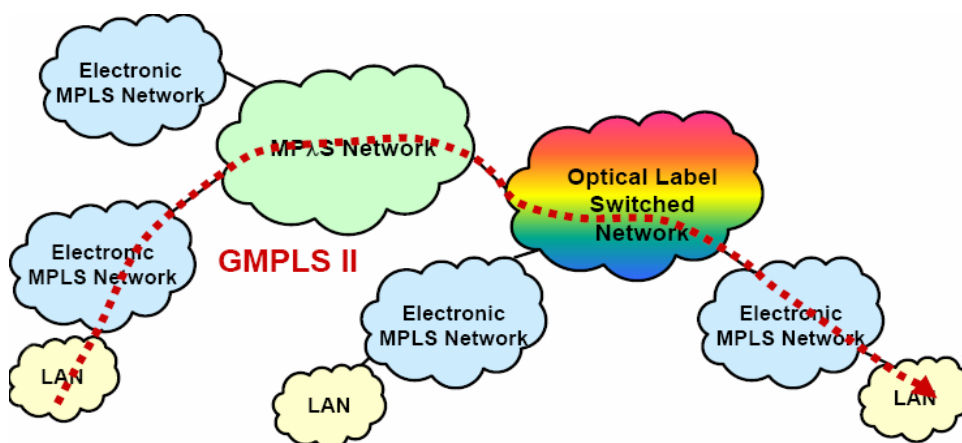


Fig. 3 - 24 Evolución hacia la conmutación por etiqueta óptica. ^[13]

GMPLS a más de separar los planos de control y de datos lógicamente, los separa físicamente; por ejemplo un paquete conmutado en una Trayectoria Conmutada por Etiqueta 1 (LSP_1 , *Label Switched Path 1*) puede estar anidado en una LSP_2 (a través de TDM, Multiplexación por División de Tiempo), que a su vez puede estar anidada en una en una LSP_3 (a través de Conmutación de Longitud de Onda). GMPLS permite señalización a través de los dominios de IP, MPLS y $MP\lambda S$.

3.4 FORMATO DE ETIQUETAMIENTO ÓPTICO Y ESQUEMA DE DIRECCIONAMIENTO ^{[11], [13]}

La etiqueta óptica puede usar el método de codificación basado en multiplexación de Sub portadora (*SCM, Sub-Carrier Multiplexing*), para conseguir la codificación de la etiqueta en el dominio óptico. En la **Fig. 3 - 25** se muestra a la etiqueta óptica y a los datos de carga útil, en los dominios del tiempo y la frecuencia.

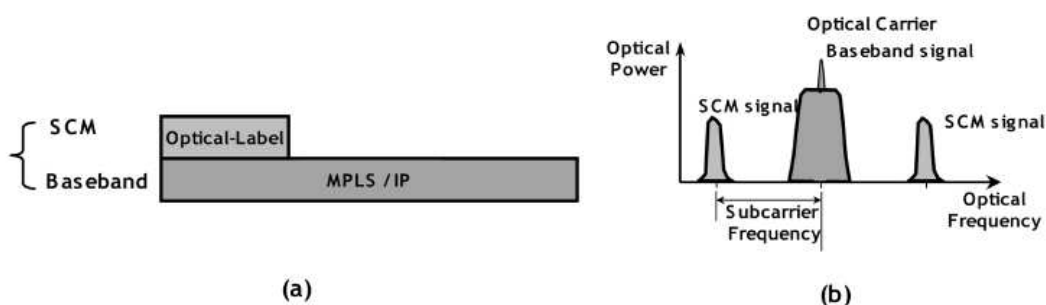


Fig. 3 - 25 Etiqueta óptica usando el método SCM, (a) en el dominio del tiempo y (b) en el dominio de la frecuencia. ^[11]

El uso de SCM radica en la facilidad que dicha técnica de etiquetamiento da para poder extraer, borrar, detectar e insertar una etiqueta.

Para tener una mejor comprensión del uso del etiquetamiento y direccionamiento en una red OLS, se puede comparar a los parámetros pertenecientes a direccionamiento y etiquetamiento; como por ejemplo: dirección de origen, dirección de destino, etc., de una red OLS, con los componentes de una red de correos. Se puede decir entonces que se tiene una red de correos que posee varias oficinas postales representando cada código postal; la etiqueta óptica, adherida al paquete, contendrá dos códigos postales el de origen y el de destino, codificados como una dirección abreviada; el direccionamiento es jerárquico y cuando el paquete alcance el código postal de destino, la jerarquía más baja se encarga de seleccionar la subred de destino. Para fines de direccionamiento y operación, en los límites de estas redes es necesario utilizar una etiqueta adecuada (esto se entenderá mejor al revisar la clasificación de las etiquetas ópticas, en la siguiente página).

Los códigos postales corresponden a los módulos de procesamiento de etiqueta para las interfaces clientes (*LP-CI, Label Processing-Client Interfaces*), o a los módulos de procesamiento de etiqueta para las interfaces de transporte (*LP-TI, Label Processing-Transport Interfaces*), éstos trabajan como una oficina de correos, en donde se relaciona a cada paquete (sobre) con una clase de envío (código postal) y con una prioridad de envío.

El tráfico de jerarquía más baja es manejado, por ejemplo, por una red MPLS, mientras que el tráfico de jerarquía más alta es manejado por la red OLS, se debe mencionar que, la administración de la red es jerárquica y está dentro del mismo código postal de manera que es transparente para la red OLS.

Cualquier cambio de dirección es realizado por el administrador de correos, papel desempeñado por la NC&M (*Network Control and Management*) cuya función es la de proveer el servicio de circuito conmutado. En el caso de que un remitente omita el código postal del sobre, el paquete puede ser regresado o enviado a una oficina de correos especial que realice funciones tales como: DNS (*Domain Name Server*), en donde el nombre de la ciudad será buscado para encontrar el código postal. El código postal, basado en conexión jerárquica, permite una mínima complejidad con respecto al proceso de envío y elimina la necesidad del uso de protocolos de distribución de etiqueta, así como del intercambio de etiqueta.

El enrutamiento es orientado a destino, y la mejor ruta se actualiza continuamente monitoreando la condición de la red, una gran cantidad de tráfico en la red se verá beneficiado de este esquema de direccionamiento al que se le denomina "*Etiqueta Óptica de Clase A*".

La etiqueta óptica de clase A, ver **Fig. 3 - 26**, es una etiqueta óptica orientada a destino y se usa predominantemente para realizar conmutación de paquetes, pero puede ser usada para realizar conmutación de ráfagas. Esta etiqueta contiene los siguientes campos: dirección de destino (10 bits), dirección de origen (10 bits), prioridad (3 bits), duración del datagrama (8 bits), bits experimentales (3 bits), QoS (3 bits), ToS (3 bits) y OTTL (3 bits); es decir, incluyendo los dos primeros

bits denominados “Bits de Clasificación”, la etiqueta óptica de clase A tiene una longitud de 45 bits. Cabe destacar que la etiqueta óptica de clase A, es de tipo determinística, debido a esto, no necesita realizar el proceso de intercambio de etiqueta.

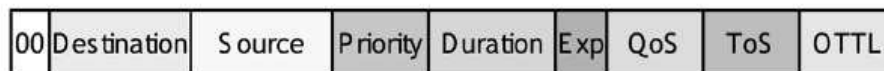


Fig. 3 - 26 Estructura de una etiqueta óptica de clase A. ^[11]

Existen además de la etiqueta óptica de clase A, tres clases más de etiquetas ópticas; la clase B, clase C, y clase D.

La etiqueta óptica de clase B, ver **Fig. 3 - 27**, presenta una gran similitud con la etiqueta de clase A, la única diferencia entre las dos radica en que los tres bits que se usaban en la clase A para experimentación (Exp), en la clase B se usan para realizar conmutación de paquetes o ráfagas.

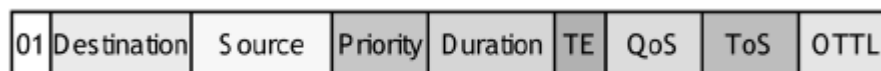


Fig. 3 - 27 Estructura de una etiqueta óptica de clase B. ^[11]

La etiqueta óptica de clase C, ver **Fig. 3 - 28**, no guarda relación con el etiquetamiento óptico con base en el envío orientado a destino, en vez de esto, usa las Trayectorias Conmutadas por Etiqueta (*LSP, Label Switching Paths*) establecidas a través del protocolo de reserva de recurso e ingeniería de tráfico (*RSVP_TE, Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering*), se usa fundamentalmente para realizar conmutación de ráfagas con calidad de servicio (QoS) garantizada, pero también puede ser usada para realizar conmutación de paquetes.

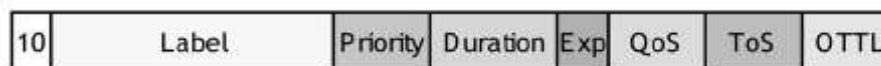


Fig. 3 - 28 Estructura de una etiqueta óptica de clase C. ^[11]

Finalmente, la etiqueta óptica de clase D, ver **Fig. 3 - 29**, se orienta a la conmutación de circuitos, en ésta los OLSR's (*Optical Label Switching Routers*) detienen su función de conmutación paquete – por – paquete o ráfaga – por – ráfaga, y prefieren implementar el circuito establecido por los NC&M (*Network Control and Management*).

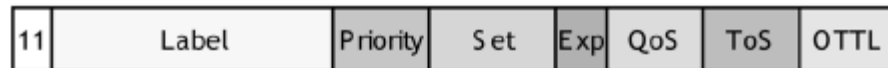


Fig. 3 - 29 Estructura de una etiqueta óptica de clase D. ^[11]

Como se ha venido mencionando, en las cuatro clases anteriores de etiquetas ópticas existen campos que desempeñan ciertas funciones especiales, a continuación se menciona brevemente el uso que tiene cada uno de ellos:

- Bits de CoS: Permiten obtener un cierto grado de prioridad basándose en la diferenciación de paquetes en el momento en que dichos paquetes son enviados, cabe destacar que esto es relativo y no ofrece calidad.
- Bits de QoS: Permiten garantizar parámetros de QoS.
- Bits de ToS: Especifican el tipo de aplicaciones, tales como *real-time* o *soft-realtime*; por ejemplo: paquetes de telefonía IP pueden tener una baja prioridad CoS y permitir una alta pérdida de paquetes (QoS), pero requerirán *real-time* ToS.
- Bits de SET: Se da solamente en el caso de circuito conmutado, estos bits permiten administrar adicionalmente la señalización (Establecimiento y liberación) que comúnmente es manejada por la NC&M.

Cabe destacar que existe un tipo de señalización denominado *out-of-band* que permite a los *routers* de la red estar continuamente comunicados, dicha señalización no solamente permite un control de flujo, sino también detección

rápida de congestión o fallas. En la **Fig. 3 - 30** se ilustra un flujo de paquetes siendo transportado y la correspondiente señalización *out-of-band*.

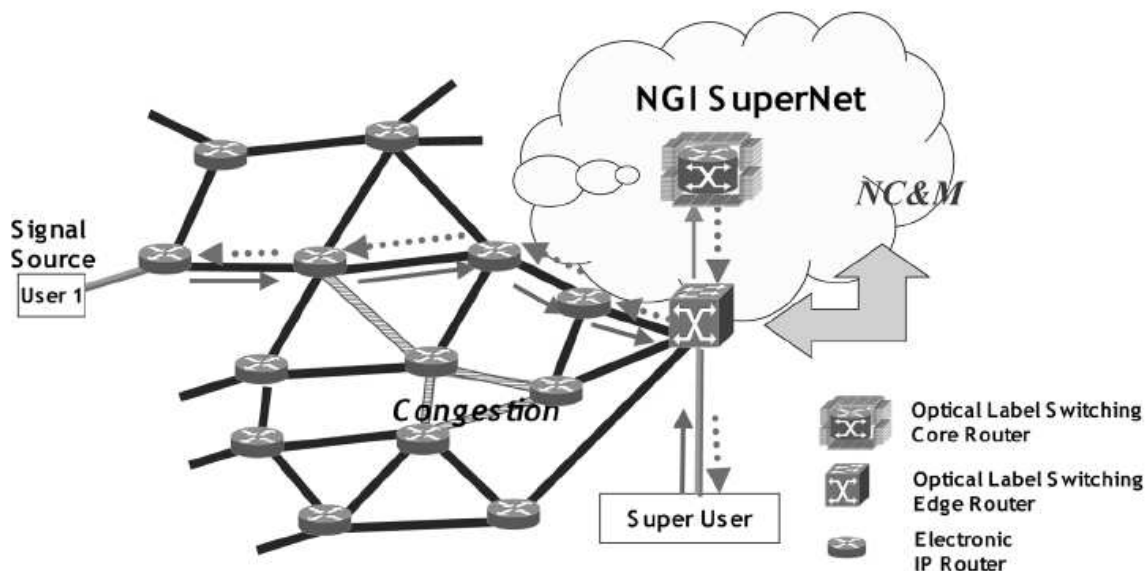


Fig. 3 - 30 Señalización denominada *out-of-band* para comunicación entre routers, las líneas continuas representan a un flujo de paquetes transportados en la red y las líneas entrecortadas representan la señalización *out-of-band*.^[11]

3.5 CASO DE ESTUDIO PARA OLS^{[1], [2], [4], [12], [13], [14], [15], [16]}

A continuación se expone los resultados experimentales, obtenidos en [12], de un OLSR (*Optical Label Switching Router*) operando como un *Optical Label Switching Edge Router* y como un *Optical Label Switching Core Router*, emulando una red OLS.

3.5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS USADOS PARA EL CASO DE ESTUDIO

El sistema prototipo del OLSR está conformado por un Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (*EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier*) que se basa en un *router* óptico que desempeña el control de conmutación, un módulo de intercambio de etiqueta óptica y una malla de conmutación óptica. A continuación

se describen brevemente los componentes pertenecientes a cada uno de los dispositivos del OLSR:

- El *router* controlador óptico: Está conformado por una tabla de envío, un marcador y un árbitro, en este último se incorporan los algoritmos de envío y de resolución de disputas.
- El módulo de intercambio de etiqueta óptica: Está conformado por una Rejilla Bragg de Fibra (*FBG, Fiber Bragg Grating*) que permite realizar el proceso de extracción de la etiqueta óptica SCM (*Subcarrier Multiplexing*) y un modulador óptico para realizar el proceso de inserción de la etiqueta óptica.
- La malla de conmutación: se compone de Conversores de Longitud de Onda Sintonizable (*T λ WC, Tunable Wavelength Converter*), láseres de tipo FBG y láseres de tipo Reflector de Rejilla de Prueba Bragg (*SG-DBR, Sampled Grating Distributed Bragg Reflector*), un Enrutador de tipo Enrejado con arreglos de guía de onda (*AWGR, Arrayed Waveguide Grating Router*) y un arreglo de Conversores de Longitud de Onda Fija (*F λ WC, Fixed Wavelength Converters*) de dimensiones 8x8.

El uso de los láseres mencionados en el párrafo anterior se explicará en detalle en el capítulo 4 del presente proyecto de titulación, pero se puede mencionar, que por ejemplo, para el caso del láser de tipo Reflector de Rejilla de Prueba Bragg SG-DBR (*Sampled Grating Distributed Bragg Reflector*), su uso se debe a que puede conmutar canales presentes en la banda C y cumplir con espaciamientos en el orden de los 50 GHz.

El *router* de borde se compone de un Sistema de Acceso de Red Universal (*UNAS, Universal Network Access System*) y módulos de procesamiento de etiqueta para las interfaces clientes (*LP-CI, Label Processing-Client Interfaces*), dichos módulos de procesamiento están conformados por transmisores de

subportadora para codificar nuevas etiquetas al ingreso al *router* y por receptores para detectar los datos de carga útil.

3.5.2 RESOLUCIÓN DE DISPUTAS EN EL DOMINIO DE LONGITUD DE ONDA, TIEMPO Y ESPACIO

Para el primer experimento en el que se aborda la resolución de disputas en el dominio de longitud de onda, tiempo y espacio, se usa un sistema de enrutamiento de paquete óptico, ver **Fig. 3 - 31**.

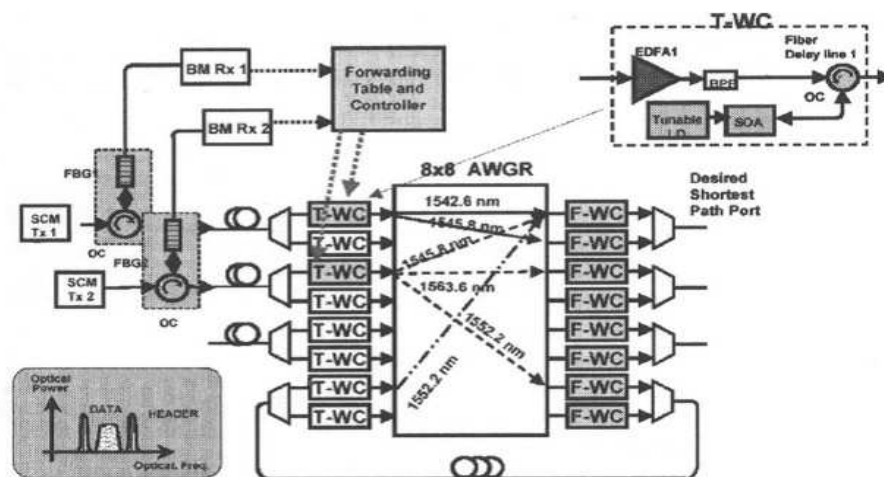


Fig. 3 - 31 Sistema de enrutamiento de paquete óptico. [12]

El sistema que se puede apreciar en la **Fig. 3 - 31**, usa un algoritmo de resolución de disputas, que opera de la siguiente forma:

1. Se busca una longitud de onda alterna en el mismo puerto de salida.
2. Si no existe ninguna longitud de onda disponible, se busca una longitud de onda disponible en el buffer local, es decir usa una Línea de Retardo de Fibra (FDL).
3. Si todas las longitudes de onda, en todas las FDL's están ocupadas, desvía el paquete a un puerto de salida secundario.

Se debe recordar que el marcador ubicado en el controlador de conmutación, llevará cuenta de todas las operaciones realizadas en el *router* óptico.

Se puede citar la siguiente condición: Si un paquete P_1 proveniente de la longitud de onda de entrada λ_{-1} del puerto_1 $(1,1)_{in}$, y otro paquete P_2 proveniente de la longitud de onda de entrada λ_{-1} del puerto_2 $(2,1)_{in}$, del OLSR (*Optical Label Switching Router*) buscan alcanzar el mismo destino D, se tiene una condición de disputa de paquetes en una longitud de onda y puerto de salida $(1,1)_{out}$. En la **Fig. 3 - 32**, se aprecia el BER (*Bit Error Rate*), para el sistema mencionado anteriormente con un esquema de resolución de disputas de conversión de longitud de onda, es decir, los dos paquetes cambian de longitud de onda; y, se enrutan por el puerto de salida indicado inicialmente.

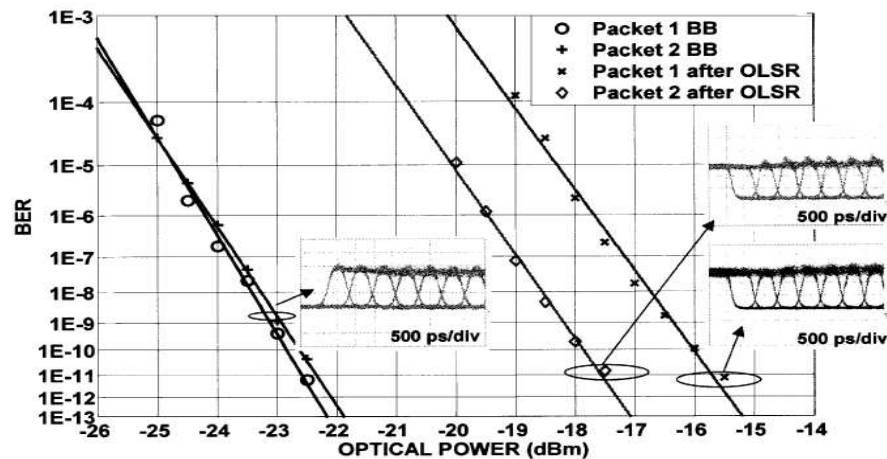


Fig. 3 - 32 BER (*Bit Error Rate*), analizado en un ambiente de disputa de paquetes, en los recuadros se aprecia el diagrama del ojo para las 2 señales. ^[12]

En la **Fig. 3 - 32** se aprecia una aparente pérdida de potencia de alrededor de 5 dB (En promedio) para el caso del paquete 2, esto se debe a la conversión de longitud de onda que se efectúa para fines de resolución de disputas entre paquetes.

3.5.3 COMUNICACIÓN ENTRE ROUTERS DE BORDE Y DE CORE

El segundo experimento emula a dos clientes IP comunicándose vía *routers* de borde y *routers* de core. En la **Fig. 3 - 33** se aprecia el esquema de una red, en la

que se tiene a un cliente IP enviando tres paquetes P1, P2 y P3, con tres destinos diferentes.

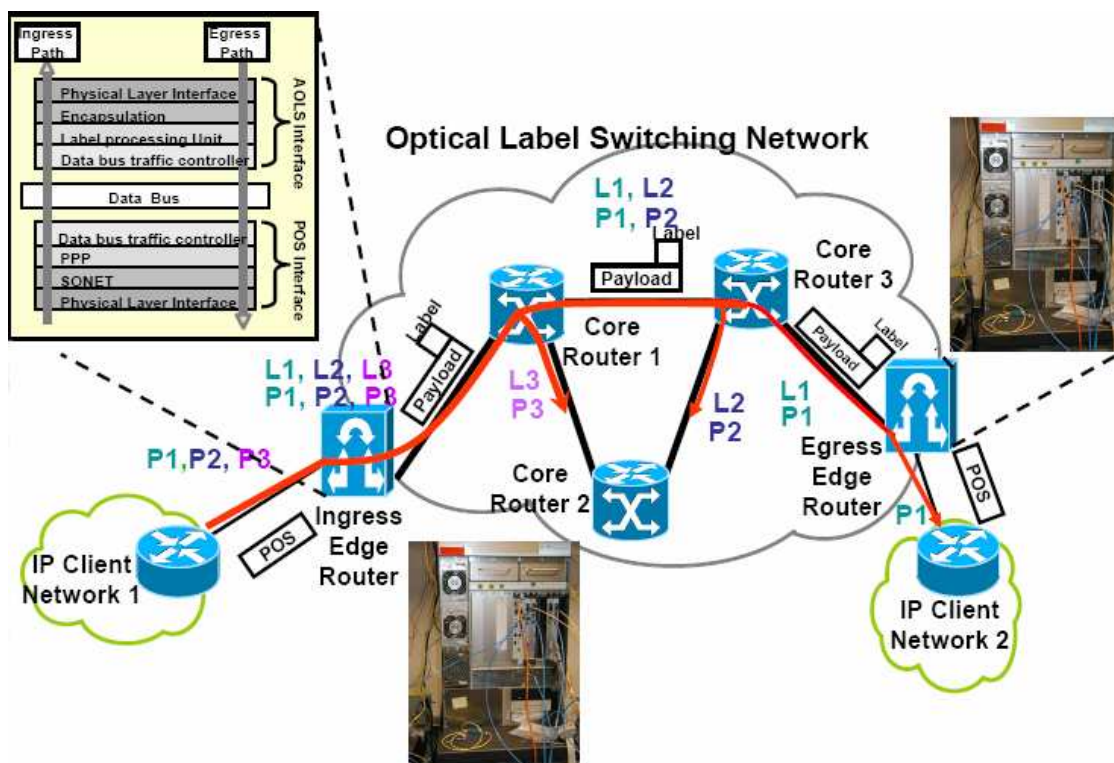


Fig. 3 - 33 Esquema de una red emulando a dos clientes IP que se comunican a través de *routers* de borde y de *core*. ^[13]

El *router* de borde, al ingreso de la red, coloca una etiqueta apropiada a cada paquete (L1 para P1, L2 para P2 y L3 para P3), los *routers* de *core* envían a los paquetes basándose en la información que contiene la etiqueta que posee cada uno, y finalmente el *router* de borde, colocado a la salida de la red, recibe uno de los paquetes (P1) y lo envía al cliente IP de destino.

La **Fig. 3 - 34** muestra un arreglo experimental para realizar el proceso de conmutación óptica con un UNAS (*Universal Network Access System*). El UNAS del *router* de borde, al ingreso de la red, recibe el tráfico de un cliente IP, lo procesa y envía los datos tanto de carga útil como de contenido de la etiqueta al LP-CI (*Módulo de Procesamiento de Etiqueta*). Dos etapas de conmutación toman lugar en el AWGR (*Arrayed Waveguide Grating Router*) del *router* óptico, el paquete P1 con la etiqueta L1 es conmutado y descartado (Longitud de onda de

1546 nm. puerto 6 al 2), para emular el paso de un paquete a una red cliente, mientras que los paquetes P2 y P3 pasan a otra etapa de conmutación (Longitud de onda de 1552 nm. puerto 6 al 6), emulando el paso de paquetes que siguen buscando su destino, aquí el paquete P2 es descartado (Longitud de onda de 1542 nm. puerto 5 al 1) y el paquete P3 pasa nuevamente a otra etapa de conmutación (Longitud de onda de 1546 nm. puerto 5 al 3) y es recibido por el LP-CI, los UNAS y finalmente al cliente IP de destino.

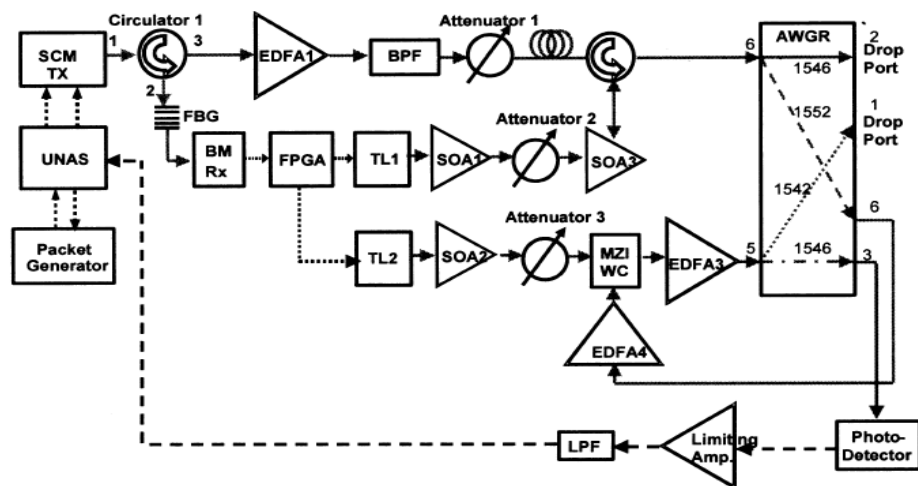


Fig. 3 - 34 Arreglo experimental para realizar el proceso de conmutación óptica. [12]

El arreglo experimental se conforma por: Transmisores para Multiplexación de Sub Portadora (*SCM Tx, Subcarrier Multiplexing Transmitter*); Filtros Pasa Banda (*BPF, Band Pass Filter*), Receptores en Modo Ráfaga (*BM Rx, Burst Mode Receiver*), un Enrutador de tipo Enrejado con arreglos de guía de onda (*AWGR, Arrayed Waveguide Grating Router*), Amplificadores Semiconductores Ópticos (*SOA, Semiconductor Optical Amplifier*), Rejillas Bragg de Fibra (*FBG, Fiber Bragg Grating*), Conversores de Longitud de Onda de tipo Interferómetro Mach-Zehnder (*MZI WC, Mach-Zehnder Interferometer Wavelength Converter*), Filtros Pasa Bajos (*LPF, Low Pass Filter*), Arreglos de Compuertas de Campo Programables (*FPGA, Field Programmable Gate Array*) y Amplificadores de Fibra Dopada con Erblio (*EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier*).

La mayoría de dispositivos mencionados en el párrafo anterior han sido ya revisados tanto en este capítulo como en el capítulo 1, excepto por el Conversor de Longitud de Onda de tipo Interferómetro Mach-Zehnder (*MZI WC, Mach-Zehnder Interferometer Wavelength Converter*) y el Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (*EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier*), dispositivos que se analizan a continuación:

- MZI WC: Un dispositivo Mach-Zehnder fundamentalmente cambia la fase de una señal óptica, mientras que un interferómetro añade o minimiza el efecto de interferencia²³ con el cambio de fase en una señal óptica.

Un MZI divide la luz en dos guías de onda desacopladas, este dispositivo posee una sección de ajuste de fase en una de las guías de onda y un acoplador que actúa como un dispositivo de combinación, ver **Fig. 3 - 35**. La sección de ajuste de fase, de una de las dos señales divididas, es ajustada para dar interferencia con la ayuda de la otra señal, a la salida de este dispositivo la señal óptica es enrutada a la guía de onda "Cross" o a la guía de onda "Bar" dependiendo del cambio de fase.

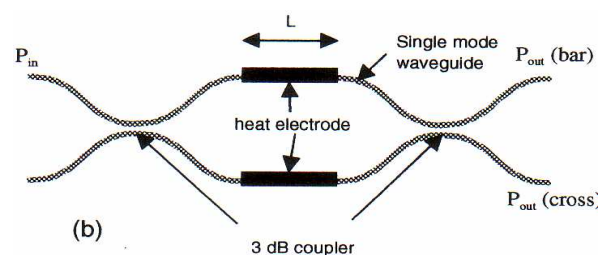


Fig. 3 - 35 Mach-Zehnder Interferometer. [1]

Con este tipo de dispositivos, la conversión de longitud de onda se realiza sin excesivas pérdidas de potencia, sin dependencia de la longitud de onda y con un costo relativamente bajo. En combinación con los SOA's los MZI's proveen cambios de fase grandes para pequeñas variaciones de potencia o dependiendo del caso, una alta ganancia, ver **Fig. 3 - 36**.

²³ Revisar sección 1.2.1.1

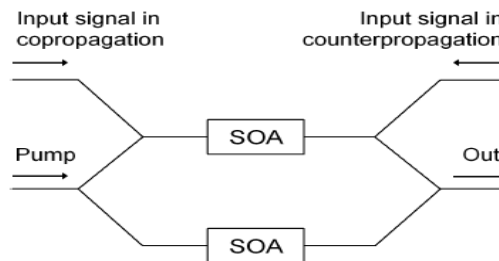


Fig. 3 - 36 Estructura de un convertidor de longitud de onda SOA-MZI. [4]

- EDFA²⁴ (*Erbium Doped Fiber Amplifier*): Un EDFA es un dispositivo que actúa en base a la tecnología denominada “fibra activa”, en ésta se implementa un tramo de fibra óptica dopada con Erblio (en donde se produce la amplificación de la energía lumínica), y una fuente de luz externa (diodo láser), gracias a la presencia de estos elementos se logra obtener una señal óptica de salida con mayor potencia lumínica e idénticos valores de longitud de onda y fase que la señal óptica presente en la entrada del EDFA. Un EDFA puede ser usado como un amplificador de potencia (En el caso de estar conectado en un transmisor); o, como un preamplificador (En el caso de estar conectado en un receptor) que incrementa la sensibilidad mediante la amplificación de las señales recibidas débiles.

Un EDFA es un dispositivo que brinda varios beneficios de operación tales como: independencia de polarización, no introducción de crosstalk al amplificar señales WDM, etc. En la **Fig. 3 - 37** se puede apreciar un ejemplo del uso de EDFA's; en este caso dos etapas EDFA son utilizadas para obtener alto desempeño de amplificación óptica y bajo ruido.

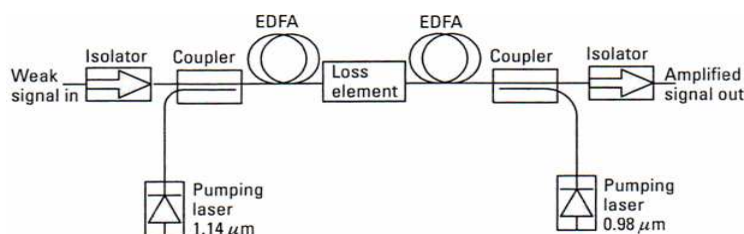


Fig. 3 - 37 Ejemplo de dos etapas EDFA para obtener alto desempeño de amplificación óptica y bajo ruido. [2]

²⁴ Ver anexos.

3.5.4 FORMACIÓN DE PAQUETES EN EL ROUTER DE BORDE

Un estudio presentado en [12], da a conocer que la mayoría del tráfico de Internet es por naturaleza “*Bursty*”, y que la longitud de los paquetes IP presenta picos de aproximadamente 40, 576 y 1500 bytes. Para ajustar un tráfico tan diverso en una red OLS, los routers de borde realizan la función de “Reformado” (*Reshape*) que permitirá manejar de una manera uniforme al tráfico en la red OLS.

La función de reformado no es nada más que un mecanismo de agregación de paquete que consigue el ajuste de tráfico de una forma simple pero efectiva. Se configura al router de borde para que ensamble paquetes ópticos de tipo “Jumbo²⁵”, ver **Fig. 3 - 38**, para lo cual, dichos paquetes deben tener atributos comunes, como por ejemplo, el mismo destino de salida.

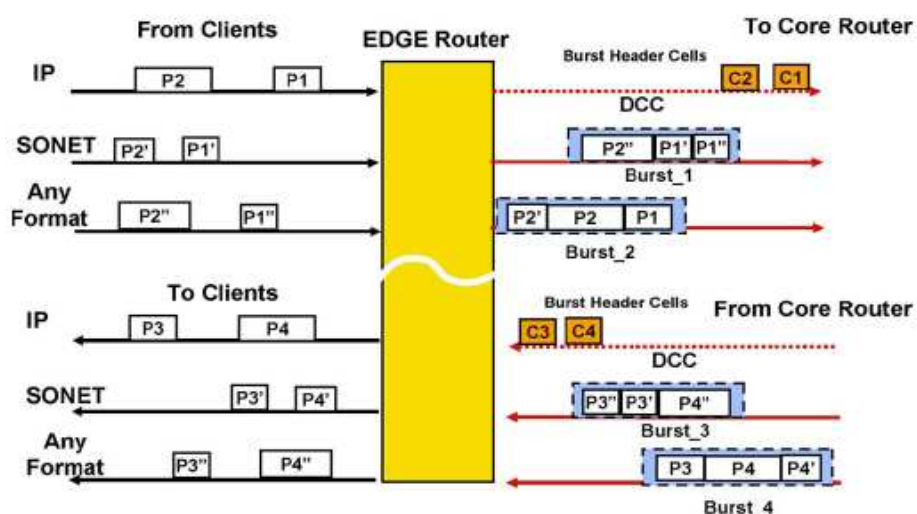


Fig. 3 - 38 Ensamblaje de paquetes ópticos Jumbo, con paquetes con atributos comunes. [15]

En la **Fig. 3 - 39**, se muestra a un router de borde clasificando, en una cola apropiada, a los paquetes provenientes de un cliente. Se puede mencionar que la longitud en bytes de un paquete óptico de tipo Jumbo tiene un límite, y éste se da con el parámetro denominado Máximo Tamaño de Carga Útil (*MPS, Maximum Payload Size*). Cuando la longitud de los paquetes, que ocupen un buffer de una cola ensambladora, alcance el MPS, el router creará el paquete óptico y lo enviará

²⁵ Por tener un propósito similar al Boeing 747 más conocido como “Jumbo”

por el puerto de salida apropiado y usando una longitud de onda disponible con su respectiva etiqueta óptica.

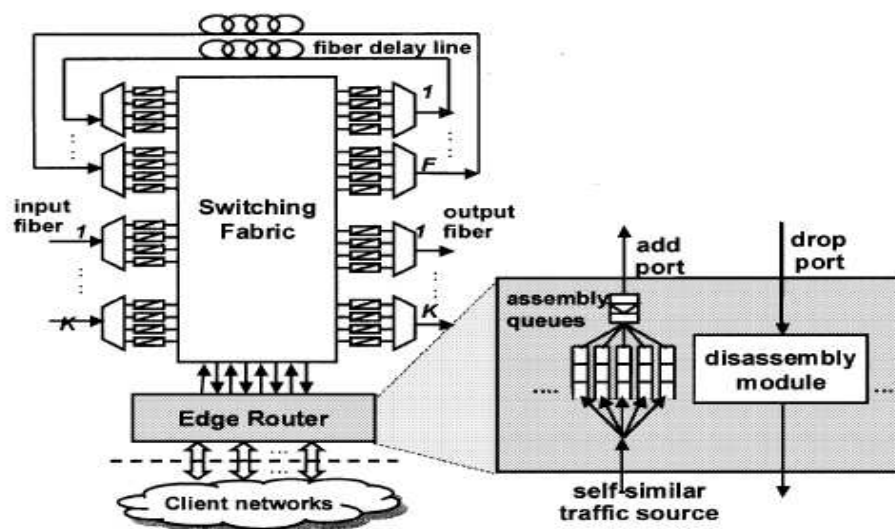


Fig. 3 - 39 Clasificación de los paquetes y conformación de un paquete óptico de tipo Jumbo. ^[12]

Para evitar retardos excesivos en el encolamiento, el *router* de borde adopta un mecanismo denominado “Periodo de Interrupción”, es decir, después de que el periodo de interrupción se alcance el *router* generará automáticamente un paquete óptico aunque el valor de MPS no se haya alcanzado.

Cabe destacar que este mecanismo de creación de paquetes ópticos de tipo Jumbo, presenta un retardo de procesamiento muy leve en comparación a los sistemas que no usan este mecanismo y beneficiosamente reduce la tasa de pérdida de paquetes.

En la **Fig. 3 - 40**, se pueden apreciar 4 curvas comparativas, 3 con diferentes valores de MPS, las cuales utilizan el mecanismo de reformado, y una que no utiliza reformado “no shaper”. Las 4 curvas comparan la tasa de pérdida de paquetes (*PLR, Packet Loss Rate*) en función de la Carga del transmisor o Cantidad de tráfico manejado (*TL, Transmitter Load*). Se puede apreciar que para una red OLS, en todos los casos en los que se implementa el mecanismo de creación de paquetes Jumbo (independientemente del MPS que se tenga), se obtiene una menor PLR que para el caso de una red que no usa dicho mecanismo de reformado “No shaper”.

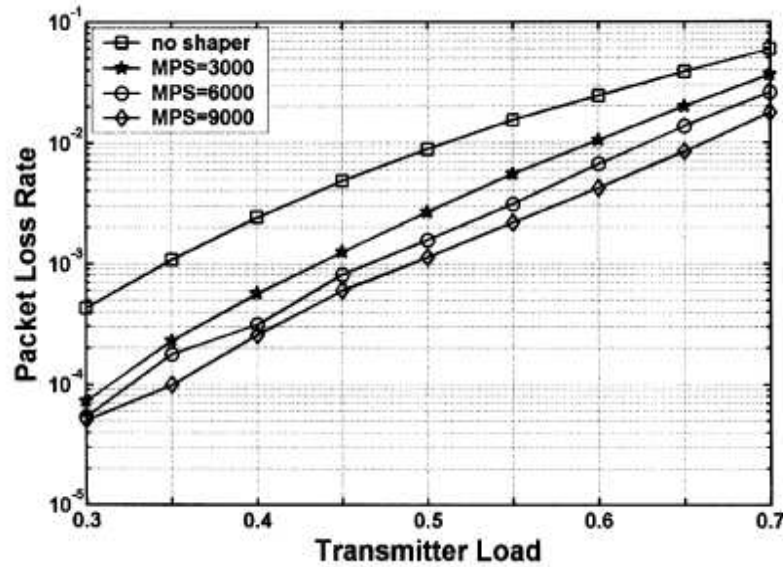


Fig. 3 - 40 Análisis de la tasa de pérdida de paquetes (PLR) para una red OLS usando el mecanismo de reformado (MPS=3000, 6000 y 9000) y sin el mecanismo de reformado “No shaper”. [12]

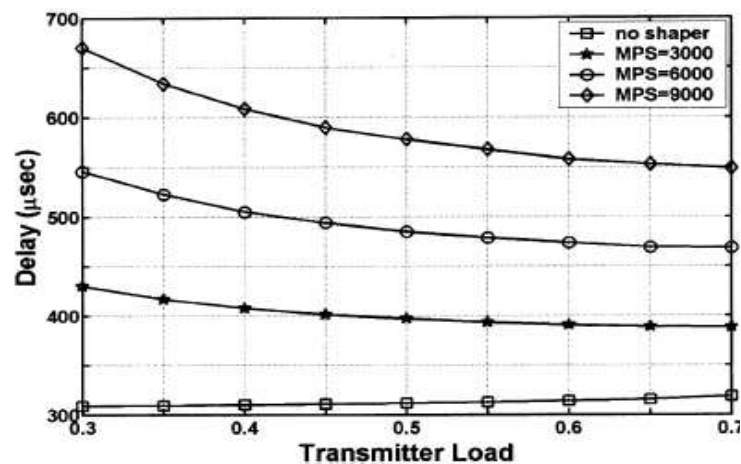


Fig. 3 - 41 Análisis de retardo para una red OLS usando el mecanismo de reformado (MPS=3000, 6000 y 9000) y sin el mecanismo de reformado “No shaper”. [12]

En la **Fig. 3 - 41**, se puede apreciar que el mayor retardo obtenido (MPS=9000) al utilizar reformado de paquetes está en alrededor de 350 μ seg. más que el valor obtenido para una red que no implemente el mecanismo de creación de paquetes Jumbo “No shaper”.

En la **Fig. 3 - 42**, se aprecia que los valores de *jitter* se reducen conforme se incrementa la cantidad de tráfico ha ser manejado.

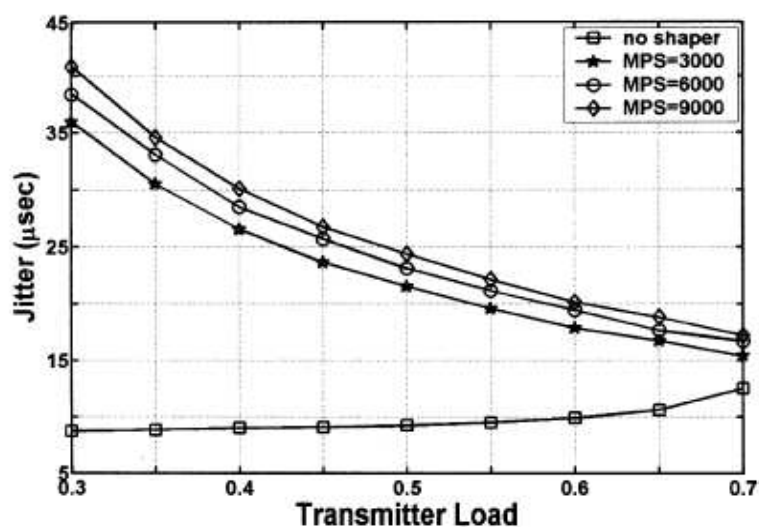


Fig. 3 - 42 Análisis de *Jitter* para una red OLS usando el mecanismo de reformado (MPS=3000, 6000 y 9000) y sin el mecanismo de reformado "No shaper". [12]

3.5.5 PRIMER CAMPO DE PRUEBA PARA CONMUTACIÓN DE ETIQUETAS ÓPTICA (FIRST FIELD TRIAL OF OPTICAL LABEL SWITCHING)

En la Fig. 3 - 43 se aprecia a la red que une al Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL, *Lawrence Livermore National Lab*) con los Laboratorios de Tecnología Avanzada Sprint (ATL, *Sprint Advanced Technology Laboratories*) a través de la Red Óptica Nacional Transparente (NTON, *National Transparent Optical Network*) de los Estados Unidos de Norte América [16].



Fig. 3 - 43 First Field Trial of Optical Label Switching. [13]

Dicha red abarca una extensa área de la bahía de San Francisco y permitió establecer por primera vez un campo de prueba para experimentar el funcionamiento de una red de Conmutación de Etiquetas Óptica (*OLS, Optical Label Switching*) en una distancia aproximada de 477 Km.

En la **Fig. 3 - 44**, se muestra las formas de onda obtenidas en diferentes puntos de dicho campo de pruebas. Cabe destacar que la señal viaja del nodo fuente ubicado en ATL (*Source Node*) a LLNL, a través de NTON y regresa nuevamente a ATL.

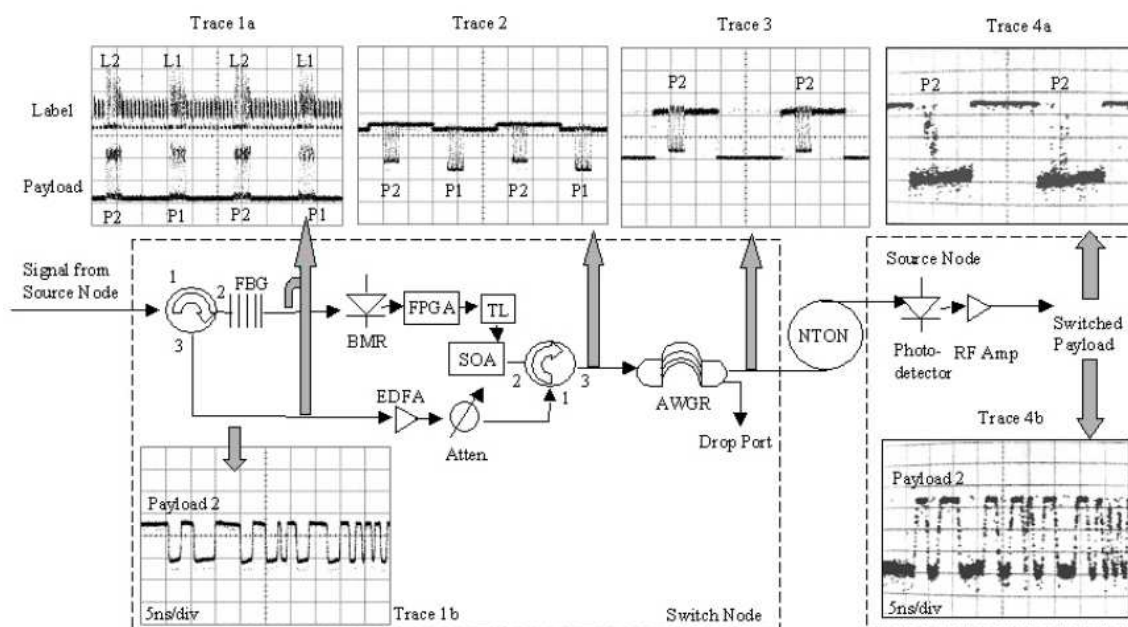


Fig. 3 - 44 Señal viajando desde ATL a través de NTON. [16]

En la **Fig. 3 - 44** se aprecian las formas de onda de dos etiquetas ópticas (L1, L2) y de dos cargas útiles (P1, P2), en Trace 1a se aprecia a las etiquetas y las cargas útiles extraídas de una FBG (*Fiber Bragg Grating*). En Trace 1b se muestran los bits de carga útil (P2). En Trace 2 se muestra la carga útil conmutada después del SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*). Cabe destacar que la diferencia de nivel de potencia que se aprecia entre P1 y P2, se debe a que la conmutación de longitud de onda se lleva a cabo mediante láseres sintonizables los mismos que emiten una longitud de onda con una cierta potencia. Se puede mencionar también que dichos láseres emiten una longitud de onda de acuerdo a

la respuesta del FPGA (*Field Programmable Gate Array*) que lleva a cabo el análisis de las etiquetas ópticas. En Trace 3 se aprecia solamente a P2 ya que P1 fue descartado (Simulando que ha sido conmutado a otro nodo), y finalmente en Trace 4a y Trace 4b se puede apreciar la carga útil 2 (P2) (invertida debido a la ganancia de modulación del SOA) regresando al nodo de origen sin verse afectada, esto se puede comprobar analizando la forma de onda obtenida en Trace 1b.

Este experimento estableció por primera vez una prueba real de una red operando con Conmutación de Etiquetas Óptica (OLS) en un área extensa de aproximadamente 476 Km. con resultados aceptables en la recepción de los datos de carga útil.

EL MÉTODO DE ETIQUETAMIENTO

FSK/IM

[3], [4], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [24], [25]

El método de etiquetamiento FSK/IM (*Frequency Shift Keying/Intensity Modulation*), es un método de codificación de datos que no es relativamente nuevo, se conoce desde hace mucho tiempo ya que es inherente a la generación del haz luminoso mediante los láseres, ver sección 4.1.2. En el presente capítulo se analizará más a fondo el etiquetamiento FSK/IM haciendo alusión a la generación de dicha señal y a las partes constituyentes de un nodo operando con FSK/IM.

4.1 LA SEÑAL FSK/IM (*FREQUENCY SHIFT KEYING/INTENSITY MODULATION*) [3], [21], [22], [24], [25]

La técnica de etiquetamiento FSK/IM, permite alcanzar altas velocidades de transmisión de la carga útil sin llevar a cabo cambios drásticos en la etapa de etiquetamiento, es decir, aunque la carga útil tenga una velocidad de transmisión alta, la velocidad de la etiqueta será lo suficientemente baja para que los dispositivos, de la etapa de etiquetamiento, puedan extraer y procesar la etiqueta óptica sin ningún problema.

En la técnica de etiquetamiento FSK/IM, los datos de carga útil son transmitidos con modulación de intensidad (*IM, Intensity Modulation*) y los datos de la etiqueta son transportados en la misma portadora óptica mediante modulación de frecuencia (*FSK, Frequency Shift Keying*). La modulación de frecuencia (Etiqueta óptica) y la modulación de intensidad (Carga útil) se encuentran en planos diferentes, ver **Fig. 4 - 1**.

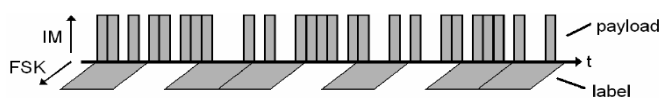


Fig. 4 - 1 Esquema de etiquetamiento FSK/IM [4]

4.1.1 Modulación de Frecuencia (FSK, FREQUENCY SHIFT KEYING)

Una modulación de frecuencia (FSK), ver **Fig. 4 - 2**, es un tipo de modulación digital en el que se varía la frecuencia de la portadora acorde con los datos a transmitirse. FSK es de fácil implementación pero de baja eficiencia en medios de cobre debido a su excesivo consumo de ancho de banda. Por motivos de generación de la señal IM, como se verá con más claridad en la sección 4.1.2, se establece que la señal moduladora es una señal binaria que varía entre dos valores discretos de voltaje, es decir es una modulación de dos estados.

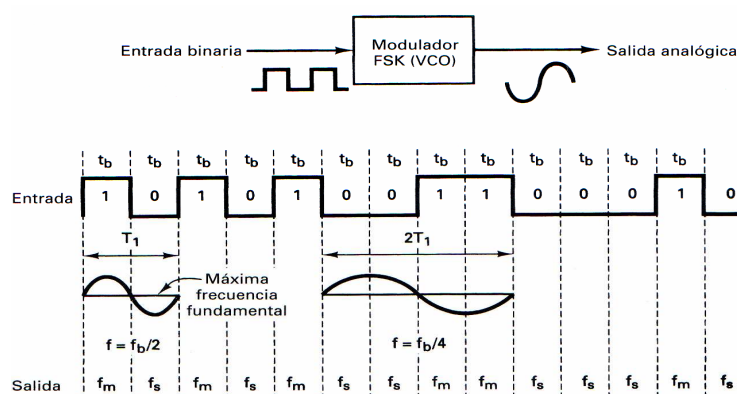


Fig. 4 - 2 Modulación de frecuencia (FSK). Tiempo de bit t_b ; frecuencia de marca f_m ; frecuencia de espacio f_s ^[3]

La expresión general de una señal modulada FSK se define por la **Ecuación 4 - 1**.

$$v_{FSK}(t) = V_c \cos\{2\pi [f_c + v_m(t)\Delta f] t\} \quad \text{Ecuación 4 - 1}$$

- En donde:
- $v_{FSK}(t) =$ Forma de onda binaria FSK
 - $V_c =$ Amplitud de la portadora
 - $f_c =$ Frecuencia de la portadora (Hz), sin modular
 - $\Delta f =$ Desviación de frecuencia pico (Hz)
 - $v_m(t) =$ Señal moduladora de entrada binaria polar NRZ²⁶

²⁶ Condición de la señal en banda base, se tienen solamente 2 valores: 1 o 0 lógico, por ejemplo, V(+) o V(-) respectivamente.

En este tipo de modulación, los valores en frecuencia para los datos 1 lógico (Frecuencia marca; f_m) y 0 lógico (Frecuencia espacio; f_s) se asignan separándose de la frecuencia portadora de la siguiente manera:

$$f_m = f_c - \Delta f \quad \text{y} \quad f_s = f_c + \Delta f$$

Siendo $\Delta f = \frac{|f_m - f_s|}{2}$ la desviación de frecuencia pico, ver **Fig. 4 - 3**.

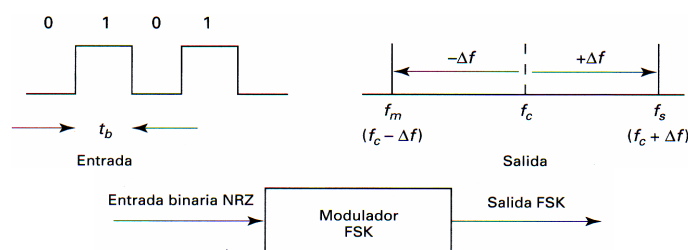


Fig. 4 - 3 Desviación de frecuencia en FSK. [3]

Ya que una modulación de frecuencia (*FSK*) es una modulación no lineal, el ancho de banda se define, por ejemplo, mediante la regla de Carlson, ver **Ecuación 4 - 3**.

$$AB_{FSK} = \Delta f_{pp} \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad \text{Ecuación 4 - 3}$$

En donde: AB_{FSK} = Ancho de Banda para FSK
 Δf_{pp} = Desviación de frecuencia pico – pico
 β = Índice de modulación, $\beta = \Delta f_{pp} * T_b$
 T_b = Tiempo de Bit

Cabe destacar que el espectro de FSK no conserva la forma del espectro de la modulante, excepto si se da la condición $\beta \ll \frac{\pi}{2}$, en cuyo caso se estará hablando de Banda Estrecha.

4.1.2 MODULACIÓN DE INTENSIDAD (*IM, INTENSISTY MODULATION*)

La modulación de intensidad (IM) es una forma de modulación en la cual se varía la potencia óptica de salida de una fuente de acuerdo a una señal modulante, es decir la información en banda base.

Existen dos formas de modulación de intensidad, a continuación se menciona brevemente el concepto de cada una de éstas y se menciona cual de ellas es la que se implementa en el etiquetamiento FSK/IM.

a) Modulación de Intensidad Directa (D-IM): En este caso la potencia óptica que entrega la fuente de luz varía directamente con la señal de datos, es decir, la luz generada en los láseres es modulada directamente por la simple variación de la corriente del diodo de acuerdo con la señal de datos, ver **Fig. 4 - 4**.

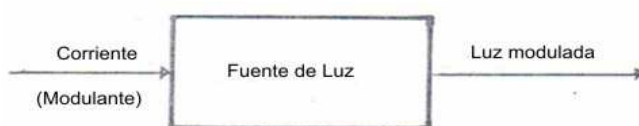


Fig. 4 - 4 Modulación de Intensidad por la señal en banda base. [24]

b) Modulación de Intensidad Indirecta o Externa (I-IM): En este caso el modulador es externo a la fuente de luz. Así la fuente de luz genera una portadora óptica de intensidad constante que pasa luego por un dispositivo externo (modulador) al que también ingresa la señal eléctrica (modulante) que modulará en frecuencia a la portadora óptica, ver **Fig. 4 - 5**.

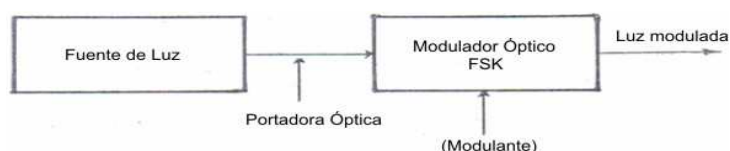


Fig. 4 - 5 Modulación de Intensidad por subportadora modulada por la señal. [24]

Cabe destacar que en la señal obtenida mediante Modulación de Intensidad Indirecta se tiene otro campo totalmente independiente al de la intensidad (IM), y

por lo tanto se tiene una vía adicional para enviar datos. Este es el principio que rige el etiquetamiento FSK/IM.

4.1.3 CONSECUENCIAS DEL USO DE UNA SEÑAL FSK/IM PARA ETIQUETAMIENTO ÓPTICO

Al considerar un esquema FSK/IM se pueden apreciar ventajas, tales como:

- *Administración de las longitudes de Onda:* Tanto la carga como la etiqueta viajan en la misma longitud de onda, lo cual facilita la operación de los nodos de enrutamiento.
- *Sincronización:* Ya que la etiqueta y la carga útil se encuentran en diferentes planos, para FSK/IM solamente se requiere una sincronización a nivel de paquete.
- *Posicionamiento de la etiqueta:* La etiqueta puede estar localizada en cualquier sitio sin importar la posición de la carga útil, lo cual facilita el proceso de borrado y re inserción de la misma ya que no se necesita identificar un campo en el cual obligatoriamente deba ir la etiqueta. Como se apreciará más adelante en éste capítulo, la etiqueta será localizada mediante filtraje ya que tendrá una frecuencia diferente a la de la carga útil.
- *No variación del Ancho de banda:* El etiquetamiento FSK/IM no conlleva a un incremento en el ancho de banda del canal.

Lamentablemente al considerar un esquema de etiquetamiento FSK/IM, también se deben tomar en cuenta ciertos problemas tales como:

- *Diafonía de la etiqueta hacia la carga útil:* Se produce por diafonía introducida en la generación de la señal, en la conversión de longitud de onda y debido a la dispersión en la fibra.

- *Relación de extinción*²⁷: Debe existir una relación de extinción de la señal modulada en intensidad (*IM*) relativamente baja, lo cual implica una limitación en la escalabilidad del sistema.

4.2 GENERACIÓN Y DETECCIÓN DE LA ETIQUETA ^{[4],[20]}

4.2.1 GENERACIÓN DE LA ETIQUETA

Existen varias propuestas que permiten la generación de la etiqueta FSK/IM, de entre las más importantes se puede nombrar a las siguientes:

- Láser de Realimentación Distribuida usando un Modulador de Electro Absorción (*DFB-EAM, Distributed Feedback Laser Electro Absorption Modulator*): En esta técnica de generación de FSK, un láser de realimentación Distribuida (*DFB, Distributed Feedback*) es alimentado con una corriente modulada, dicho proceso tiene como resultado la modulación de la luz, emitida por el láser, tanto en intensidad (IM) como en frecuencia (FSK)²⁸. Para evitar la variación de la intensidad en la salida del láser, la misma información con la que se modula la corriente se ingresa al Modulador de Electro Absorción (*EAM, Electro Absorption Modulator*). Del conjunto DFB-EAM se obtiene una señal modulada en frecuencia (FSK) con una amplitud constante y otra con una modulación de intensidad lumínica.

A pesar de que los dispositivos mencionados anteriormente existen comercialmente, la sincronización que existe tanto en el DFB como en el EAM debe ser muy precisa para que no exista una interferencia debido a una IM (Intensity Modulation) residual.

- Modulador de Banda Lateral Única Óptica (*OSSBM, Optical Single Sideband Modulator*): Otra alternativa para la generación de la señal FSK, es la que se obtiene por el uso de un modulador óptico SSB, dicho modulador está

²⁷ Se denomina relación de extinción a la relación de potencia para los niveles de 0 lógico y 1 lógico.

²⁸ Ver sección 4.1.2

conformado por estructuras MZ (*Mach Zehnder*) las mismas que al desempeñarse como generadores de FSK implican un alto grado de complejidad y de costo en su implementación. En éste esquema básicamente la longitud de onda de la luz depende de la frecuencia de una señal y de la alimentación de voltaje (controlada electrónicamente) que se de al modulador.

- Láser Sintonizable de tipo reflector de muestreo con acoplamiento de rejilla (*GCSR, Grating assisted Coupler Sampled Reflector*): En este esquema se aplica una corriente modulada en la secciones de: Fase, acoplamiento y ganancia del láser. Dicha corriente permitirá en las secciones de acoplamiento y ganancia, sintonizar una longitud de onda deseada de entre varios canales, mientras que la cantidad de corriente aplicada a la sección de fase del láser afectará en mayor o menor medida a la desviación de la señal FSK generada.

4.2.2 DETECCIÓN DE LA ETIQUETA

En la sección del receptor, la carga útil (IM) se detecta con la ayuda de un fotodiodo, mientras que para la etiqueta (FSK), se utiliza un discriminador FSK para reconocer las frecuencias de marca y espacio; y, un conversor de modulación FSK a ASK²⁹ (*Amplitude Shift keying*), que permite pasar de frecuencia a amplitud, logrando de esta manera decodificar las frecuencias asociadas a 0L y 1L. En la **Fig. 4 – 6**, se aprecia un arreglo experimental que permite la generación y detección de etiqueta óptica. Dicho arreglo se usa para llevar a cabo pruebas de filtraje durante la generación de la señal FSK/IM. Se puede apreciar la etapa del transmisor (Bloques FSK e IM para la generación de la señal FSK/IM) conformada por un láser, una sección de conversión de longitud de onda (*Wavelength converter*) para emular el procedimiento de borrado y escritura de una etiqueta, conformada por Interferómetros Mach Zhender; y, la sección del receptor (Rx) conformada por un fotodiodo y un filtro pasa bajos Bessel de tercer orden. El DUT es un filtro adicional que permite reducir la influencia de la modulación de frecuencia (FSK) sobre la modulación de

²⁹ ASK es una modulación que trabaja directamente con la amplitud de las señales, mientras que IM implica una variación en la potencia óptica de las mismas.

intensidad (IM), ya que dicha influencia puede producir la pérdida de independencia entre los dos formatos de modulación FSK e IM. En el arreglo se habla de un filtro pasa banda (*BPF, Band Pass Filter*) Gaussiano sintonizable.

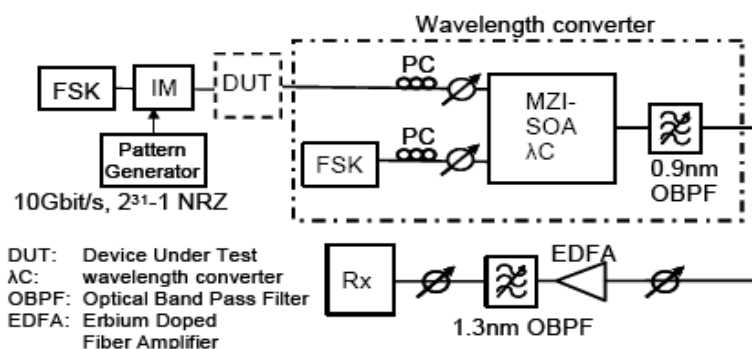


Fig. 4 - 6 Arreglo para pruebas de filtrado óptico para una señal FSK/IM. [20]

4.3 ARQUITECTURA DE LOS NODOS DE LA RED [4], [18]

Para llevar a cabo la conmutación por etiqueta óptica utilizando el etiquetamiento FSK/IM, es necesario comprender que los elementos tales como AWG (*Arrayed Waveguide Grating*), EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), filtros de frecuencia y otros elementos ópticos, que componen las diferentes etapas en un nodo de conmutación, deben ser compatibles con el formato de FSK/IM, es decir, todos los dispositivos antes mencionados deben estar en capacidad de codificar, generar, detectar y decodificar tanto la señal FSK (Datos de la etiqueta) como la IM (Datos de carga útil).

4.3.1 ESTRUCTURA DEL NODO DE BORDE

Como se ha venido mencionando a lo largo de este proyecto de titulación, existen dos clases de nodos que se podrán apreciar con claridad en una red conmutada por etiqueta óptica, los nodos de borde y de core, ver **Fig. 4 - 7**. En el nodo de borde se lleva a cabo tareas de conversión electro-óptica, elección de longitudes de onda, generación de etiquetas, modulación de la información, entre otras.

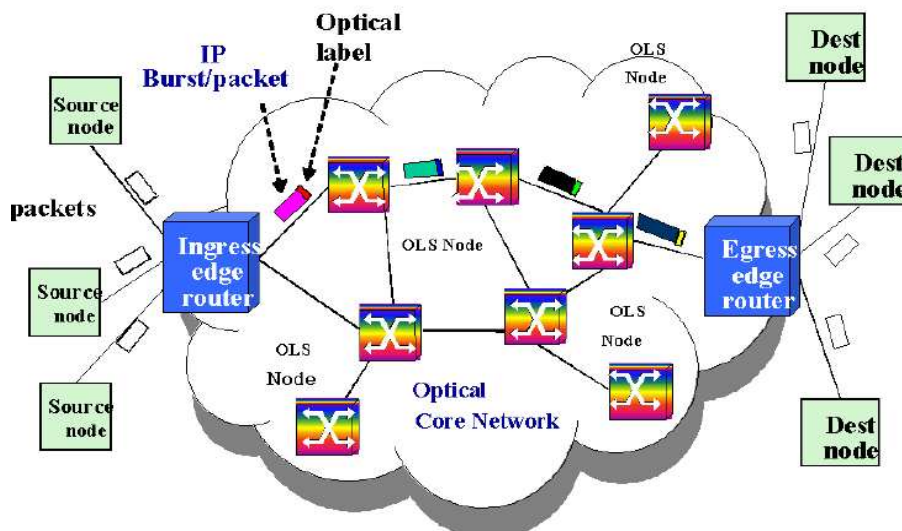


Fig. 4 - 7 Red conmutada por etiqueta óptica con nodos de borde y de core. [18]

La información de enrutamiento es enviada a una etapa electrónica que procesa estos datos, ver Fig. 4 - 8, dicha información modula al láser para obtener la señal modulada en frecuencia (*FSK*), es decir la etiqueta. Cabe destacar que en el láser también se lleva a cabo un proceso de sintonización para obtener la longitud de onda λ_i requerida para el transporte óptico de los datos.

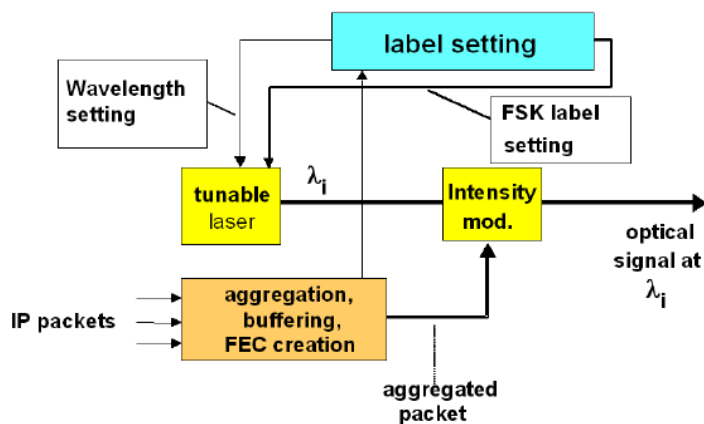


Fig. 4 - 8 estructura del nodos de borde FSK/IM [4]

La información de carga útil es transportada en la misma portadora óptica mediante modulación de intensidad (*IM*), de manera que a la salida del circuito se tiene una señal óptica con una longitud de onda λ_i y con un formato de modulación FSK/IM .

4.3.2 ESTRUCTURA DEL NODO DE CORE

En este nodo se lleva a cabo un proceso de conversión opto-electrónico solamente para la etiqueta óptica, dicha señal es detectada en el campo óptico y es procesada electrónicamente en un circuito. Una vez llevado a cabo el proceso de conversión, el nodo realiza las siguientes actividades:

- Se analiza la información contenida en la etiqueta.
- Se revisa una tabla de enrutamiento para tomar una decisión de envío y generar una nueva etiqueta.
- A continuación, se genera una nueva etiqueta mediante el uso del Láser Sintonizable de tipo reflector de muestreo con acoplamiento de rejilla *GCSR* (*Grating assisted Coupler Sampled Reflector*). Dicho láser se sintoniza a una nueva longitud de onda, mediante la aplicación de corriente en diferentes secciones del mismo.

Se debe recordar que los datos de carga útil no son convertidos al campo electrónico y que solamente son introducidos en una sección de retardo mientras se procesa la etiqueta, ver **Fig. 4 - 9**.

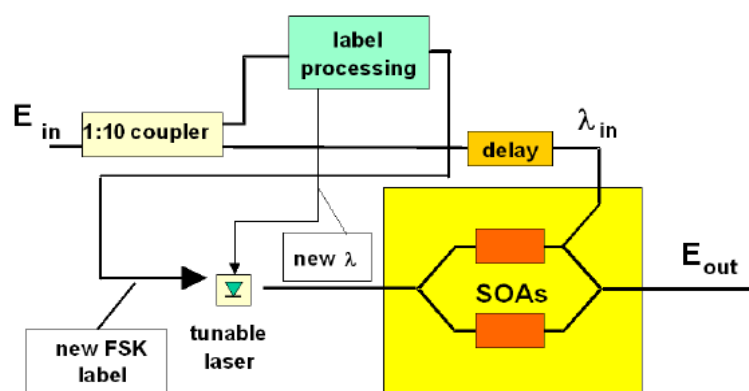


Fig. 4 - 9 Estructura del nodo de core FSK/IM ^[4]

Después de que se ha obtenido un retardo adecuado, la carga útil se traslada a una nueva longitud de onda a través de un conversor de longitud de onda de tipo SOA-MZI (*Semiconductor Optical Amplifier- Mach Zehnder Interferometer*). Cabe destacar que el proceso de cambio de longitud de onda garantiza que la antigua etiqueta FSK será borrada totalmente, ya que el mecanismo de los SOA-MZI es manejado solamente por la intensidad de la señal entrante.

4.4 CASO DE ESTUDIO DE FSK/IM ^{[4], [17], [19]}

Para tener una noción más clara acerca del funcionamiento del esquema de etiquetamiento FSK/IM, a continuación se analiza el proyecto Tecnologías de Conmutación para Señales Ópticas Etiquetadas (*STOLAS, Switching Technologies for Optical Labeled Signals*) llevado a cabo por la Sociedad de Tecnologías de la Información (*IST, Information Society Technologies*) de la Comisión Europea (*European Commission*) ^[17].

4.4.1 ESQUEMA DE ETIQUETAMIENTO FSK/IM EN EL PROYECTO IST-STOLAS

Para el proyecto IST-STOLAS se utilizó el sistema que responde al esquema de la **Fig. 4 - 10**.

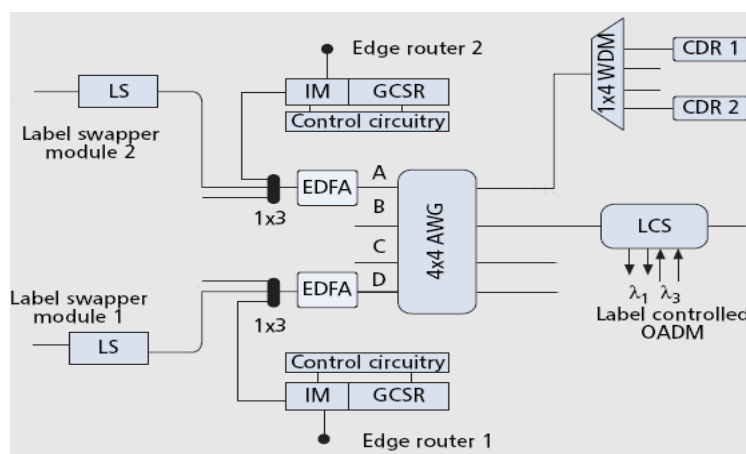


Fig. 4 - 10 Arreglo experimental para FSK/IM ^[17]

En este esquema se puede apreciar al *router* de borde (*Edge Router*), al sistema para intercambio de etiqueta (*Label Swapper Module*), un OADM (Multiplexor Óptico Add/Drop) controlado por etiqueta óptica capaz de soportar señales etiquetadas con FSK/IM, moduladores de intensidad (IM), láseres GCSR (*Grating assisted Coupler Sampled Reflector*), EDFA's (*Erbium Doped Fiber Amplifiers*), LCS (*Label Controlled Switch*) y unidades para CDR's (*Clock and Data Recovery*). Para este caso la velocidad de transmisión de la carga útil, modulada en intensidad (IM), es de 10 Gbps mientras que la etiqueta, modulada en frecuencia (FSK) está trabajando a 50 Mbps.

El sistema para cambio de etiqueta se compone de un conversor de longitud de onda MZI-SOA (*Mach Zehnder Interferometer-Semiconductor Optical Amplifier*) y de un láser sintonizable.

La circuitería de control, así como, la generación y procesamiento de etiquetas, y la selección de la longitud de onda se implementan mediante el uso de FPGA (*Field Programmable Gate Array*). En la circuitería de control existe también un receptor de etiqueta (Discriminador FSK) y un detector de inicio de la carga útil, éste último no es nada más que un sistema que indica que se ha detectado ya la señal IM, es decir la carga útil, por lo tanto se espera que la señal FSK (Etiqueta Óptica) llegue al nodo, se debe tener en cuenta que mientras se realiza el proceso de conversión electrónica óptica, de la etiqueta, la información de *payload* será introducida en un etapa de retardo, hasta que se procese una nueva etiqueta. La información de inicio de carga útil se usa para sincronizar el proceso de colocación de la nueva etiqueta FSK, de ésta manera se garantiza que la etiqueta no se coloque en la portadora óptica antes de que señal modulada en intensidad esté presente en ella.

Para el proyecto de IST-STOLAS fueron implementados cuatro longitudes de onda, 1556.75, 1557.36, 1558.98 y 1560.61 nm., ver **Fig. 4 - 11**. La etiqueta (operando a 50 Mbps) fue modulada en frecuencia (FSK) con desviación de frecuencia de 20 GHz para cada uno de los cuatro canales.

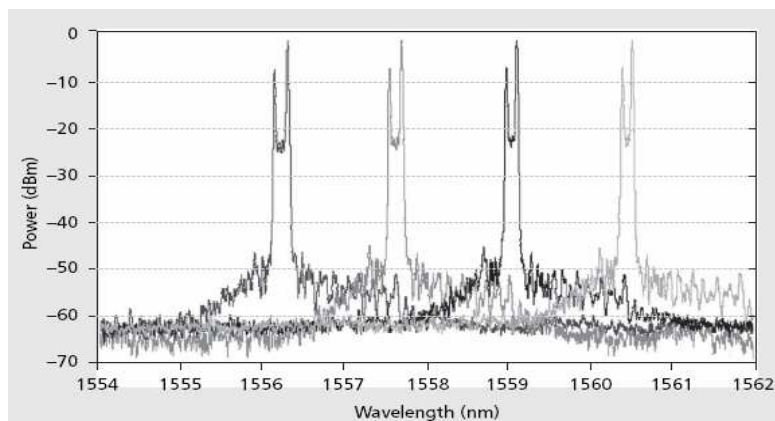


Fig. 4 - 11 Espectro óptico para 1556.75, 1557.36, 1558.98 y 1560.61 nm. ^[17]

El circuito mostrado en la **Fig. 4 - 10**, fue configurado adecuadamente para obtener dos etapas de intercambio de etiquetas [17], ver **Fig. 4 - 12**, dicho esquema es útil para llevar a cabo mediciones de parámetros fundamentales tales como:

- a) Relación de extinción, y
- b) BER (Bit Error Rate).

Los cuales permitirán la correcta operación del etiquetamiento FSK/IM (*Frequency Shift Keying/Intensity Modulation*).

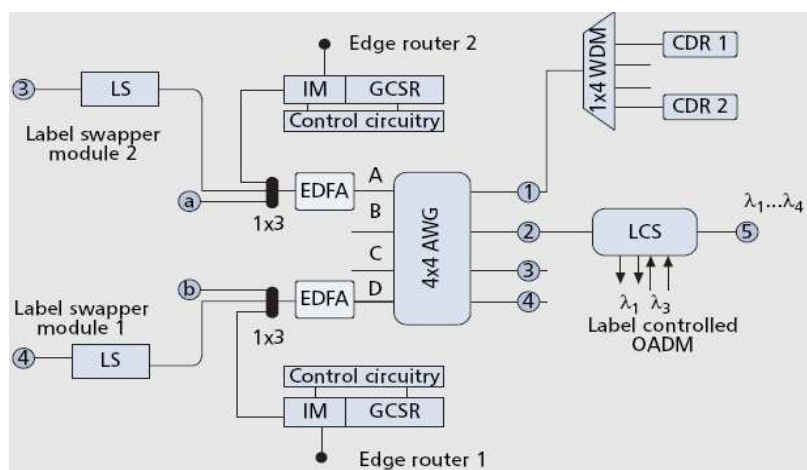


Fig. 4 - 12 Circuito con dos etapas de intercambio de etiquetas. ^[17]

Una ráfaga óptica generada por el router de borde 1 (con etiquetamiento FSK/IM) entra al AWG (*Arrayed Waveguide Grating*) por el puerto D, aquí es conmutada

hacia el módulo de intercambio de etiqueta 1, en donde se llevan a cabo los siguientes procesos:

1. Se desecha la antigua etiqueta,
2. se inserta una nueva, y
3. se lleva a cabo una conversión de longitud de onda.

La señal que se obtiene del módulo intercambiador de etiqueta 1, es dirigida hacia el puerto 3 del AWG, en donde se lleva a cabo una decisión de conmutación, la misma que permitirá alcanzar al módulo de intercambio de etiqueta 2, cabe destacar que en el segundo intercambiador de etiqueta se efectuarán las mismas operaciones descritas anteriormente para el módulo intercambiador de etiqueta 1. Llevado a cabo el proceso anterior la señal se dirige hacia el receptor mediante el puerto 1 del AWG.

En el escenario presentado con anterioridad se consideraron 2 valores de relación de extinción 7 y 12 dB, con los que se obtienen los siguientes resultados, ver **Fig. 4 - 13**.

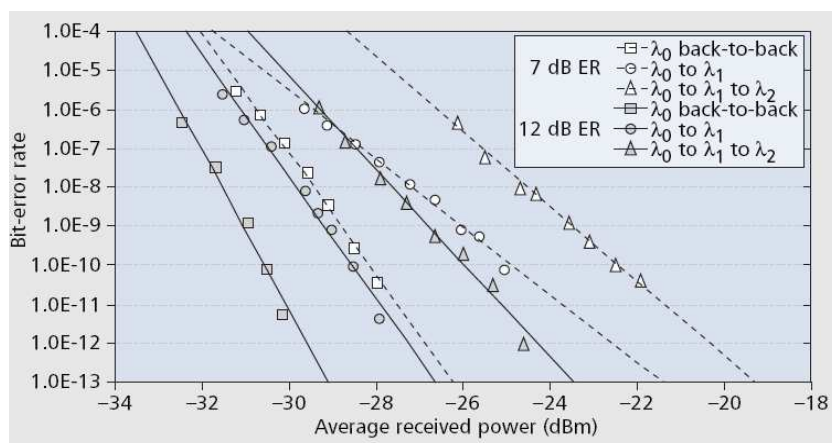


Fig. 4 - 13 BER obtenido con 2 valores de relación de extinción ^[17]

Se puede apreciar que después del primer intercambio de etiqueta se obtiene una pérdida de potencia de alrededor 2.7 dB para una relación de extinción de 7 dB, y una pérdida de potencia de potencia de alrededor de 2 dB para una relación de extinción de 12 dB. Una vez realizado el segundo intercambio de etiqueta, se

puede apreciar que los valores de pérdida de potencia obtenidos para el primer intercambio se incrementan en una medida cercana al doble. La degradación de potencia tiene su fundamento en la baja velocidad de operación de los conversores de longitud de onda MZI-SOA (*Mach Zehnder Interferometer-Semiconductor Optical Amplifier*) que se usaron en el proyecto IST-STOLAS, ver la **Fig. 4 - 14**.

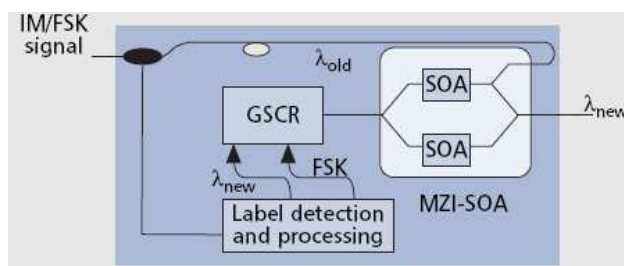


Fig. 4 - 14 Módulo para intercambio de etiqueta con MZI-SOA ^[17]

4.4.2 RED ORION (*OVESPILL ROUTING IN OPTICAL NETWORKS*)

El método de etiquetamiento FSK/IM (*Frequency Shift Keying/Intensity Modulation*) puede aplicarse a la red óptica híbrida integrada ORION (*Ovespill Routing in Optical Networks*) que permite obtener los beneficios tanto de conmutación de paquetes como de longitud de onda, ya que es capaz de operar como una red de longitud de onda conmutada o como una de paquete conmutado. Cabe destacar que el mecanismo antes mencionado será la motivación que permitirá la implementación de FSK/IM, ya que dicha técnica de etiquetamiento permitirá distinguir cual de los dos modos es el que usará la red para procesar la información.

En la **Fig. 4 - 15**, se puede apreciar a cuatro nodos pertenecientes a una red ORION simplificada. Cada nodo está conformado por un *router* (operando en modo paquete/ráfaga) y un Crossconector Óptico (*OXC, Optical Cross Connect*) que permite el enrutamiento de las longitudes de onda, entre ellos se establecen tres trayectorias de luz A – C (λ_1) (LSP 1), A – D (λ_0) (LSP 2) y B – C (λ_0).

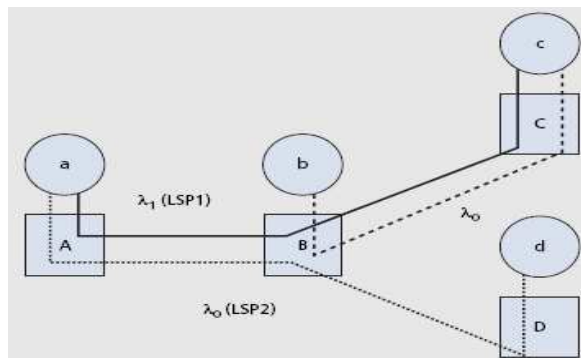


Fig. 4 - 15 Red ORION simplificada [17]

A continuación considerando lo mencionado en el párrafo anterior y asumiendo que todas las trayectorias de luz tienen una capacidad de 10 Gbps, se pueden analizar los siguientes escenarios:

- Con un tráfico menor o igual a 10 Gbps, se tendrá que el tráfico que sale de **a** con destino a **c**, pasará por **b** de una manera transparente, ya que cada nodo posee además de un router, un OXC (*Optical Cross Connect*) que permitirá realizar dicho proceso.
- Con un tráfico mayor a 10 Gbps, se tendrá que el tráfico que sale de **a** con destino a **c**, pasará por **b** y aquí se dividirá de tal manera que λ_1 lleve 10 Gbps, para los cuales tiene dimensionada su capacidad, y que la cantidad restante que en un sistema normal resultaría en pérdida ya que no puede ser conducida por λ_1 , sea acomodada en λ_0 .

Básicamente se puede concluir que la estructura de los nodos pertenecientes a la red óptica híbrida integrada ORION (*Overspill Routing in Optical Networks*) permite la implementación de la técnica de etiquetamiento FSK/IM (*Frequency Shift Keying/Intensity Modulation*) tanto en generación como en detección.

4.5 TENDENCIAS FUTURAS EN EL ETIQUETAMIENTO ÓPTICO [4]

Existen varios tipos de técnicas de etiquetamiento para llevar a cabo la conmutación óptica, pero básicamente los estudios y aplicaciones actuales

proyectan a tres tipos específicos como los métodos que en el futuro permitirán un avance sustancial en el campo de la transmisión de datos de alta capacidad, y éstos son:

- El etiquetamiento óptico FSK/IM (*Frequency Shift Keying/Intensity Modulation*),
- El etiquetamiento óptico DPSK/SCM (*Differential-Phase Shift Keying/Subcarrier Multiplexing*), y
- El etiquetamiento de tiempo serial (*Time-Serial Labeling*)

Los dos primeros constituyen técnicas de etiquetamiento de tipo ortogonal, ver **Fig. 1 - 45**, mientras que el tercero es una técnica que guarda concordancia con los métodos clásicos de cabecera de paquetes, ver **Fig. 1 - 41**.

La técnica FSK/IM se ha venido discutiendo a lo largo el presente capítulo, por lo que a continuación se mencionará el principio de operación del etiquetamiento DPSK/SCM y *Time-Serial Labeling*.

4.5.1 EL ETIQUETAMIENTO ÓPTICO UTILIZANDO MODULACIÓN DE FASE DIFERENCIAL/MULTIPLEXACIÓN DE SUB PORTADORA (*DPSK/SCM, DIFFERENTIAL-PHASE SHIFT KEYING/ SUBCARRIER MULTIPLEXING*)

Básicamente la elección de un esquema de modulación DPSK, para transportar la información de carga útil, se basa en la robustez que presenta dicho esquema frente a las no linealidades pertenecientes a la fibra óptica. Cabe destacar que a parte de la evidente semejanza con FSK/IM por la independencia que guarda la carga útil con respecto a la etiqueta, existe también la semejanza en el procesamiento de la etiqueta, ya que éste se lleva a cabo electrónicamente.

Al considerar un esquema de modulación DPSK, se debe tener en cuenta que la fase cambiará cuando el bit a transmitirse sea un cero lógico y se mantendrá al

transmitir un uno lógico. Considerando lo anteriormente mencionado, se puede decir que existen ciertas discontinuidades en el espectro de frecuencias, es decir espacios sin ocupar, que pueden ser utilizados para transmitir otro tipo de información, en este punto es en donde entra el uso de subportadoras (*subcarriers*), obteniéndose una mejor utilización del espectro y permitiendo a la carga útil y a la etiqueta compartir el ancho de banda que antes estaba destinado solo para la carga útil.

Como se mencionó en el párrafo anterior, ya que DPSK/SCM y FSK/IM procesan la etiqueta de similar forma, es decir electrónicamente, las estructura de los nodos de borde, ver **Fig. 4 - 16**, y de core, ver **Fig. 4 - 17**, serán parecidas.

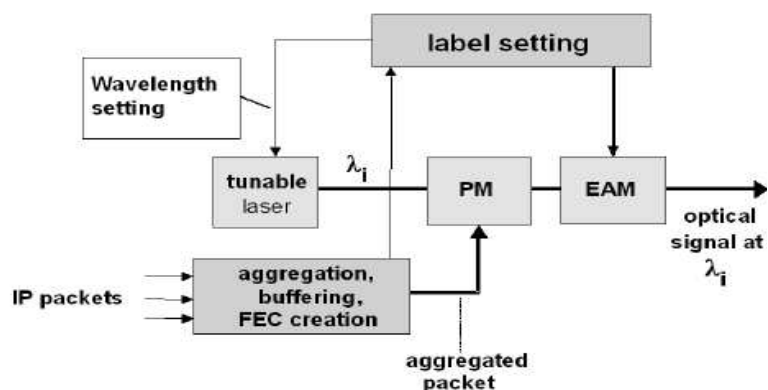


Fig. 4 - 16 Nodo de borde DPSK/SCM. Láser sintonizable GCSR, modulador de fase (*PM, Phase Modulator*), EAM (*Electro Absorption Modulator*) ^[4]

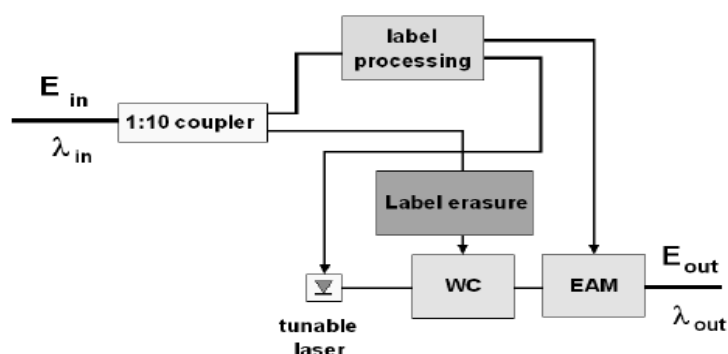


Fig. 4 - 17 Nodo de borde DPSK/SCM ^[4]

Se puede mencionar que experimentalmente se han obtenido ciertos valores como en el caso de FSK/IM, para velocidades de transmisión en los cuales el

método de etiquetamiento DPSK/SCM trabaja con un adecuado rendimiento y con pérdidas de potencia menores a 1 dB, dichos valores fluctúan alrededor de 10 Gbps para la carga útil y 156 Mbps para la etiqueta. Cabe destacar que realizando aproximaciones matemáticas y simulaciones se ha llegado a la conclusión de que la frecuencia de subportadora es igual, en magnitud, a la mitad del valor de la velocidad de transmisión de la carga útil, es decir en relación a los datos descritos con anterioridad es igual a 5 GHz.

4.5.2 ETIQUETAMIENTO DE TIEMPO SERIAL

Un enfoque inicial, de este método de etiquetamiento, se dio en el primer capítulo del presente proyecto de titulación. El etiquetamiento de tiempo serial se basa en el tratamiento totalmente óptico (*all-optical*) de las señales tanto de carga útil como de etiquetamiento, ver **Fig. 1 - 41**.

Para llevar a cabo la realización de este método de etiquetamiento un enfoque denominado AOLS (*All-Optical Label Swapping*), ver **Fig. 4 - 18**, ha sido propuesto para resolver las diferencias existentes entre la capacidad de transmisión y la capacidad de enrutamiento de paquetes. En esencia dicho enfoque independiza la relación que típicamente existe entre la capacidad de enrutar paquetes o ráfagas con respecto a factores tales como:

- Velocidad de transmisión,
- Formato del paquete, y
- Longitud del paquete

Facilitando de esta manera la escalabilidad y la flexibilidad de la red.

Cabe destacar que este último método de etiquetamiento es en esencia muy complicado de realizar, y tanto las simulaciones como las pruebas realizadas hasta el momento, muestran que la tecnología que actualmente permite el procesamiento de señales en el campo óptico, todavía carece de velocidades adecuadas de procesamiento y componentes estables para el tratamiento de

dichas señales, pero considerando los avances tecnológicos que se producen y la velocidad con que aparecen, este tipo de etiquetamiento podría a corto plazo situarse como uno de los más accesibles ya que guarda semejanza con los métodos de transmisión de datos existentes en el campo electrónico.

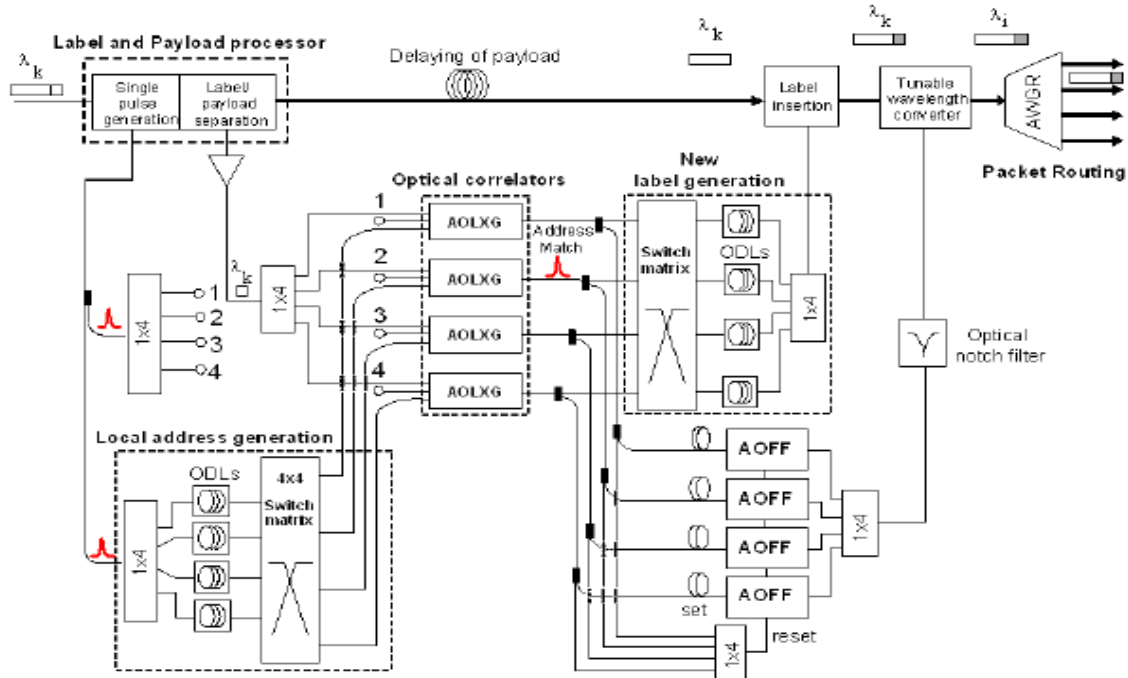


Fig. 4 - 18 Unidad para intercambio de etiqueta. Línea de retardo óptico, ODL; AWGR (*Arrayed Waveguide Router*); Flip flor óptico (*AOFF, All-Optical Flip-Flop*), compuerta lógica XOR óptica (*AOLXG, All-optical logical XOR gate*) y Conversor de longitud de onda sintonizable (TWC) [4]

Se puede mencionar también que en el esquema de etiquetamiento de tiempo serial, se establecen bandas de guarda τ que buscan evitar un solapamiento entre la etiqueta y la carga útil (τ_v) o entre etiquetas diferentes (τ_{in}, τ_{out}), y además facilitar el proceso de separación de las dos señales, ver **Fig. 4 - 19**.

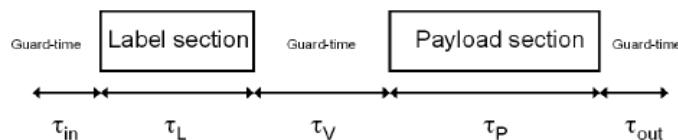


Fig. 4 - 19 Forma de la trama en el etiquetamiento de tiempo serial [4]

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del presente proyecto de titulación se pueden destacar las siguientes conclusiones y recomendaciones:

5.1 CONCLUSIONES

- En la actualidad existen diversos mecanismos tanto físicos (Dispositivos ópticos) como lógicos (Protocolos para conmutación) que permiten manipular las señales ópticas sin necesidad de realizar una conversión óptica-electrónica, es decir sin la obligación de abandonar el dominio óptico.
- En una red conmutada por etiqueta óptica (OLS) tanto los nodos de Borde como los de Core, tienen la capacidad de transformar la información desde el campo electrónico al óptico y viceversa.
- Una red que trabaja con MPLS (Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo) puede interoperar sin ninguna dificultad con una red conmutada por etiqueta óptica (OLS) ya que en esencia manejan el mismo principio el cual es el uso de etiquetas para llevar a cabo la conmutación.
- En los nodos de Core de una red conmutada por etiqueta óptica (OLS), solamente la etiqueta pasa de un medio óptico a uno electrónico y viceversa para su análisis, mientras que el *payload* se mantiene en el campo óptico al introducirse en una Línea de Retardo de Fibra (FDL).
- FSK/IM, es una técnica de etiquetamiento muy sencilla de implementar ya que está presente en cualquier sistema de transmisión de datos por fibra, debido a que dichos sistemas usan la Modulación de Intensidad por subportadora modulada por la señal, la cual describe el principio de operación de FSK/IM.

- El etiquetamiento FSK/IM, es una técnica de etiquetamiento óptico que independiza al plano que contiene a la etiqueta (Modulación de frecuencia, FSK) y al que contiene la carga útil (modulación de Intensidad, IM), ya que en el primero se habla estrictamente de frecuencia y en el segundo se habla de variación de la intensidad del haz lumínico, es decir la variación directa de la potencia óptica.
- Para escribir la etiqueta FSK/IM se hace uso de diversos medios, de entre ellos el más común a usarse es el Láser Sintonizable de tipo reflector de muestreo con acoplamiento de rejilla (*GCSR, Grating assisted Coupler Sampled Reflector*).
- En esencia lo que se quiere conseguir con el proceso de discriminación en la etapa de detección FSK/IM es reconocer las frecuencias de FSK, y con el proceso de conversión se busca decodificar las frecuencias asociadas a 0L y 1L, pasando de frecuencia (FSK) a amplitud (ASK) para así poder leer la etiqueta.
- Básicamente el presente proyecto de titulación se ha enfocado en analizar el caso en el cual solamente la información que permite realizar el proceso de enrutamiento y conmutación, es decir la etiqueta óptica, necesita sufrir una conversión de un medio óptico a uno electrónico, ya que la información de carga útil en ningún momento abandona el dominio óptico.
- El presente estudio señala los avances mas recientes en el campo de la conmutación óptica, en éste, se ha llevado a cabo un análisis minucioso de los diferentes dispositivos físicos (routers de core, de borde) que permiten llevar a cabo procesos tales como: generación y detección de señales ópticas, conmutación de señales ópticas (longitudes de onda), resolución de contención, etc.; y de la lógica que permite su implementación: estructura y formación de los paquetes, ráfagas y etiquetas ópticas; y protocolos de conmutación (MPLS (*Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo*), $MP\lambda S$ (*Conmutación de Longitudes de Onda para*

Multiprotocolo) y GMPLS (Conmutación de Etiquetas para Multiprotocolo Generalizado).

- Por último cabe destacar que el presente estudio permite tener una base bibliográfica de consulta para los nuevos proyectos que busquen adentrarse en el campo de la conmutación por etiqueta óptica.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para escoger un método de etiquetamiento óptico, se deben tener claras cuales son las necesidades de una red de conmutación de etiquetas ópticas, ya que si se escoge un método poco accesible, de gran complejidad, o poco escalable, y se opta por un cambio de técnica de etiquetamiento, se requerirá un total cambio estructura, ya que para cada método de etiquetamiento, cada nodo en la red usa dispositivos que son exclusivos para el método de etiquetamiento que se esté usando.
- En la actualidad el estudio de la transmisión de datos en el campo óptico se convierte en una necesidad que no solamente consiste en abordar el tema de las comunicaciones ópticas bajo un enfoque meramente orientado al estudio de la fibra óptica y las diferentes técnicas que se despliegan sobre ella, si no que más allá, necesita ampliar su visión al campo investigativo para resolver los principales limitantes que impiden explotar su gran capacidad, los dispositivos de interconexión.
- La conmutación por etiqueta óptica es un campo que todavía está en investigación y justamente este proyecto persigue dicho objetivo, debido a esto, se vuelve mandatorio ahondar en este campo llevando a cabo nuevos estudios, pero antes se debe tener una cultura que permita a los profesionales del área poseer un conocimiento adecuado que les permita no solamente ser meros espectadores de este escenario sino ser sus actores principales, el presente proyecto de titulación apunta a esa meta.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Tarek S. El-bawab, OPTICAL SWITCHING, Springer Publisher. 1era Edición 2006
- [2] Byeong Gi Lee, Woojune Kim, INTEGRATED BROADBAND NETWORKS (TCP/IP, ATM, SDH/SONET, and WDM / OPTICS), Artech House Publisher. Boston, Inc. 1era Edición 2002
- [3] Wayne Tomasi, SISTEMAS DE COMUNICACIONES ELECTRÓNICAS, Prentice Hall, 4ta. Edición 2003
- [4] Label-Controlled Optical Switching Nodes, Technische Universiteit Eindhoven, 2006.
alexandria.tue.nl/extra2/200612077.pdf
- [5] Chou, C.T.; Safaei, F.; Boustead, P.; Ouveysi, I., "A hybrid optical network architecture consisting of optical cross connects and optical burst switches", Computer Communications and Networks, 2003. ICCCN 2003. Proceedings. The 12th International Conference, Issue , 20-22 Oct. 2003 Page(s): 53 – 58
<http://ieeexplore.ieee.org> , <http://ro.uow.edu.au/infopapers/64>
- [6] Christoph M. Gauger, Erik Van Breusegem, Paul J. Kühn, Mario Pickavet, Piet Demeester., "Hybrid Optical Network Architectures: Bringing Packets and Circuits Together", IEEE Communications, vol. 44, No 8, pp. 36-42, Aug. 2006.
- [7] C. M. Gauger, B. Mukherjee, "Optical burst transport network (OBTN) - a novel architecture for efficient transport of optical burst data over lambda grids", In IEEE High Performance Switching and Routing, Hong Kong, May 2005.
- [8] X. Zheng, M. Veeraraghavan, N. S. V. Rao, Q. Wu, M. Zhu, "CHEETAH: Circuit switched high-speed end-to-end transport architecture testbed", IEEE Communications Magazine, Optical Communications Supplement, 3(3), 2005.

- [9] Erik Van Breusegem, Jan Cheyins, Davy De Winter, Didier Colle, Mario Pickavet, Filip De Turck, and Piet Demeester, "Overspill Routing In Optical Networks: A True Hybrid Optical Network Design", IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 24, no. 4, april 2006
- [10] Fei Xue; Ben Yoo, "High-capacity multiservice optical label switching for the next-generation Internet", IEEE Communications, vol. 42, pp. S16 - S22, May 2004.
- [11] S. J. B. Yoo, "Optical label switching, MPLS, MPLambdaS, and GMPLS", Optical Network Magazine., pp. 17-31, Jun 2003.
- [12] S. J. Ben Yoo, Fei Xue, Zhong Pan, Jing Cao, Minyong Jeon, and Venkatesh Akella, "High-Performance Optical-Label Switching Packet Routers and Smart Edge Routers for the Next-Generation Internet", IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 21, no. 7, september 2003
- [13] S. J. Ben Yoo, "Prospects and Challenges in Optical Packet, Burst, and Circuit Switching Networks", University of California, Campus Davis, Photonic Systems and Technologies
<http://sierra.ece.ucdavis.edu>, <http://citris.ucdavis.edu>
- [14] F. Smyth; E. Connolly; A.K. Mishra; A.D. Ellis; D. Cotter; A. Kaszubowska; L.P. Barry, "Effects of Crosstalk in WDM Optical Label Switching Networks Due to Wavelength Switching of a Tunable Laser"; Photonics Technology Letters, IEEE, Volume 18, Issue 20, Oct. 2006 Page(s):2177 - 2179
- [15] Yoo, S. J. B., "Optical Packet and Burst Switching Technologies for the Future Photonic Internet" Journal of Lightwave Technology, Volume 24, Issue 12, Dec. 2006 Page(s):4468 – 4492
http://www.ifi.uio.no/infpri/Presentasjoner/stud_optikk_09.02.07.ppt

[16] V.J. Hernandez, Z. Pan, J. Cao, V. K. Tsui, Y. Bansal, S. K. H. Fong, Y. Zhang, M.Y. Jeon, S. J. B. Yoo, B. Bodtker, S. Bond, W. J. Lennon, H. Higashi, B. Lyles, R. McDonald. "First Field Trial of Optical Label-Based Switching and Packet Drop on a 477km NTON/Sprint Link"

<http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/244389.pdf>

[17] I. Tafur, E. Van Breusegem, T. Koonen, J.J. Olmos, J. Van Berkel, J. Jennen, C. Peucheret, E. Zouganeli. "Optical Label Switched Networks: Laboratory Trial and Network Emulator in the IST-STOLAS Project", IEEE Communications, vol. 44, No 8, pp. 43-51, Aug. 2006.

[18] J. J. Vegas Olmos, I. Tafur Monroy, A. M. J. Koonen. "High bit-rate combined FSK/IM modulated optical signal generation by using GCSR tunable laser sources", Optics Express, Vol. 11, No. 23, pp. 31-40, Nov. 2003.

[19] E.J.M. Verdurmen, Y. Liu, A.M.J. Koonen, H. de Waardt, I. Tafur Monroy "Chirp Properties Of Soa-Based Wavelength Converters for FSK/IM Combined Modulation Format" COBRA Research Institute, Eindhoven University of Technology. 2006. Proc. ECOC 2003, paper TU4.4.5.

[20] J.P.A. van Berkel, J.J. Vegas Olmos, I. Tafur Monroy, A.M.J. Koonen, "Influence of Non-optimal Filtering on FSK/IM Modulated Signals". COBRA Research Institute, Faculty of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands. Proc. ECOC 2005, paper Th3.4.5.

[21] Intensity Modulation.

http://en.wikipedia.org/wiki/Intensity_modulation

[22] Intensity modulation.

http://www.sapiensman.com/ESDictionary/ITechnical_vocabulary_Spanish

[23] Lithium niobate

http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_niobate

[24] Dr. Eligius Vancek, "Sistemas de Comunicaciones a través de fibras ópticas". IEEE - Universidad Santiago de Chile.

[25] José Martín Sanz, "COMUNICACIONES ÓPTICAS". Editorial Paraninfo S.A., 1996.

Anexo A

Lithium niobate

Lithium niobate (LiNbO_3) is a compound of niobium, lithium, and oxygen. It is a colorless solid that is insoluble in water. Its melting point is $1257\text{ }^\circ\text{C}$ and its density is 4.65 g/cm^3 . Its CAS number is [12031-63-9].

Lithium niobate crystals have a trigonal crystal system and belongs to the $3m$ (C_{3v}) crystallographic point group. Its crystal structure lacks inversion symmetry and displays ferroelectricity, the Pockels effect, the piezoelectric effect, photoelasticity, and nonlinear optical polarizability.

Lithium niobate has negative uniaxial birefringence which depends slightly on the stoichiometry of the crystal and on temperature. It is transparent for wavelengths between 350 and 5200 nanometers, and has a bandgap of around 4 eV.

It can be doped by magnesium oxide, which increases its resistance to optical damage (also known as photorefractive damage) when doped above the optical damage threshold. Other available dopants are Fe, Zn, Hf, Cu, Gd, Er, Y, Mn and B, creating optical sources that can be modulated by traveling-wave waveguide modulators.

Single monocrystals of lithium niobate can be grown using the Czochralski process. They are used in laser frequency doubling, nonlinear optics, Pockels cells, optical parametric oscillators, Q-switching devices for lasers, other acousto-optic devices, optical switches for gigahertz frequencies, etc. It is an excellent material for manufacture of optical waveguides.

Lithium niobate is used extensively in the telecoms market, eg. in the mobile telephones and optical modulators. It is the material of choice for the manufacture of surface acoustic wave devices.

For some uses it can be replaced by lithium tantalate, LiTaO_3 .

Periodically poled lithium niobate (PPLN) is a domain-engineered lithium niobate crystal, used mainly for achieving quasi-phase-matching in nonlinear optics. The ferroelectric domains point alternatively to the $+c$ and the $-c$ direction, with a period of typically between 5 and 35 μm . The shorter periods of this range are used for second harmonic generation, while the longer ones for optical parametric oscillation. Periodic poling can be achieved by electrical poling with periodically structured electrode. Controlled heating of the crystal can be used to fine-tune phase matching in the medium due to a slight variation of the dispersion with temperature.

Periodic poling uses the largest value of lithium niobate's nonlinear tensor, $d_{33} = 27\text{ pm/V}$. Quasi-phase matching gives maximum efficiencies that are $2/\pi$ (64%) of the full d_{33} , about 17 pm/V

Other materials used for periodic poling are wide band gap inorganic crystals like KTP (resulting in periodically poled KTP, PPKTP), lithium tantalate, and some organic materials.

Sellmeier equations

The Sellmeier equations for the extraordinary index are used to find the poling period and approximate temperature for quasi-phase matching. Jundt^[1] gives valid from 20-250 degrees Celsius for wavelengths from 0.4 micrometer to 5 micrometers. Deng^[2], with measurements at longer wavelengths, gives the following valid for $T = 25$ to 180 degrees Celsius, for wavelengths between 2.8 and 4.8 micrometers. In these equations λ is in micrometers and where T is in degrees Celsius.

References

1. Dieter H. Jundt (1997). "Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction n_e in congruent lithium niobate". *Optics Letters* 22.
2. LH Deng et al. (2006). "Improvement to Sellmeier equation for periodically poled LiNbO_3 crystal using mid-infrared difference-frequency generation". *Optics Communications* 268.

Anexo B

Attenuation in Fiber Optics

By Ashley Hagans and Kyle Paulson

Dr. Kasra Daneshvar
Optical Engineering
Summer Ventures in Science and Mathematics
University of North Carolina at Charlotte
July 13, 2001

Abstract

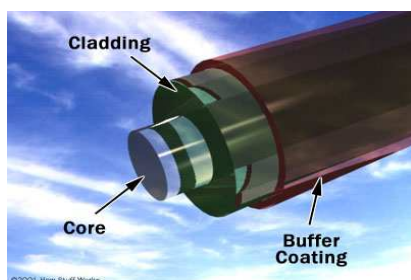
Fiber optic transmission and communication are technologies that are constantly growing and becoming more modernized and increasingly being used in the modern day industries. However, dispersion, absorption, and scattering are the three properties of optical fibers that cause attenuation, or a marked decrease in transmitted power, and therefore, have limited progress in areas of high-speed transmission and signal efficiency over long distances. Dispersion occurs when the light traveling down a fiber optic cable “spreads out,” becomes longer in wavelength and eventually dissipates. Two other major mechanisms of attenuation in optical fibers are absorption and scattering. However, new advances are continually being made to combat these losses and improve the reliability of fibers.

Attenuation, a reduction in the transmitted power (Hecht, August 2000), has long been a problem for the fiber optics community. The increase in data loss over the length of a fiber has somewhat hindered widespread use of fiber as a means of communication. However, researchers have established three main sources of this loss: absorption, scattering, and, though it is not commonly studied in this category, dispersion.

Absorption

Absorption occurs when the light beam is partially absorbed by lingering materials, namely water and metal ions, within the core of the fiber as well as in the cladding (see Figure 1). Though absorption in standard glass fibers tends to increase between the critical lengths of 700 and 1550 nanometers (nm) (Hecht, August 2000), almost any type of fiber at any length will have light absorbed by some of the traces of impurities that inevitably appear in all fibers. As the light signal travels through the fiber, each impurity absorbs some of the light, weakening the signal; therefore, longer fibers are more prone to attenuation due to absorption than shorter ones.

Figure 1



Lingering materials within the core and the cladding

help to cause absorption.

Image retrieved on July 9, 2001 from http://www.howstuffworks.com/fiber_optic1.htm

Scattering

Scattering, another significant aspect of attenuation, occurs when atoms or other particles within the fiber spread the light. This process differs with absorption in that, for the most part, foreign particles on the fiber are not absorbing the light, but the light signal bounces off the particle rather than the fiber's wall and spreads the signal in another direction (Single-Mode, 2000).

For glass fibers, the foremost type of scattering is Rayleigh scattering, which somewhat contrasts with the accepted definition of scattering. With this process, atoms or other particles within the fiber fleetingly absorb the light signal and instantly re-emit the light in another direction. In this way, Rayleigh scattering appears very much like absorption, but it absorbs and re-directs the light so quickly that it is considered scattering (Hecht, August 2000).

Both scattering and absorption are cumulative, in that they keep building up. Light is absorbed and scattered continuously, so the signal at the end of the fiber is almost never exactly the same signal as it was at the beginning. However, for the most part, the signal loss is minimal and does not greatly hinder the communication.

Three Types of Dispersion

Material Dispersion

Dispersion in optical fibers can be categorized into three main types. The first is material dispersion, also known as chromatic dispersion. This type of intramodal dispersion results from the fact that the refractive index of the fiber medium varies as a function of wavelength (Keiser, 1983). Since neither the light source nor the fiber optic cable is 100 percent pure, the pulse being transmitted becomes less and less precise as the light's wavelengths are separated over long distances (Thoughts, 2000). The exact same effect occurs when a glass prism disperses light into a spectrum.

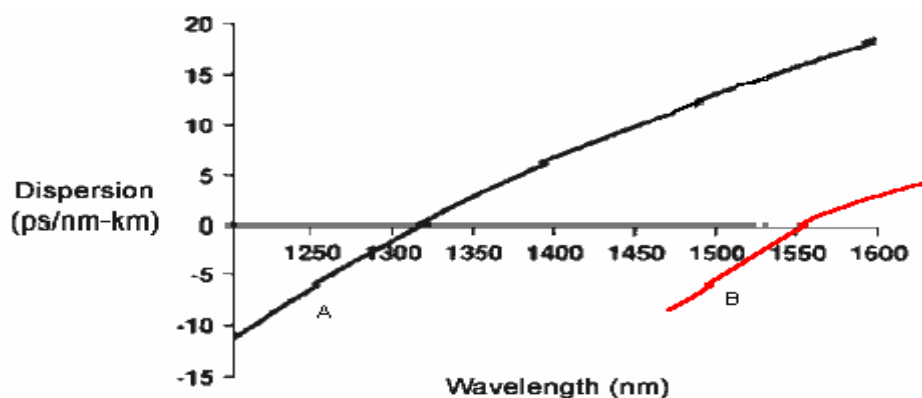
Wave-guide Dispersion

Wave-guide dispersion, another type, is very similar to material dispersion in that they both cause signals of different wavelengths and frequencies to

separate from the light pulse (Keiser, 1983). However, wave-guide dispersion depends on the shape, design, and chemical composition of the fiber core. Only 80 percent of the power from a light source is confined to the core in a standard single-mode fiber, while the other 20 percent actually propagates through the inner layer of the cladding. This 20 percent travels at a faster velocity because the refractive index of the cladding is lower than that of the core (Keiser, 1983). Consequently, signals of differing frequencies and wavelengths are dispersed and the pulse becomes indistinguishable (Lerner, 1997). An increase in the wave-guide dispersion in an optical fiber can be used in order to counterbalance material dispersion and shift the wavelength of zero chromatic dispersion to 1550 nanometers. Engineers used this concept to develop zero-dispersion-shifted fibers designed to have larger wave-guide dispersion (see Figure 2). Developers doped the core with erbium in order to increase the difference between the refractive indices of the cladding and the core, thus enlarging wave-guide dispersion (Lerner, 1997).

Figure 2

Typical Dispersion vs. Wavelength Curves



Adapted from http://www.iec.org/tutorials/fiber_optic/topic06.html

Fiber optic dispersion varies as a function of wavelength. The zero dispersion wavelength for a standard single-mode fiber (A) is approximately 1310 nm, while a zero-dispersion-shifted fiber's (B) wavelength at zero dispersion is 1550 nm.

Modal Dispersion

The third and final significant type of dispersion is related to the fact that a pulse of light transmitted through a fiber optic cable is composed of several modes, or rays, of light instead of only one single beam; therefore, it is called modal dispersion (Thoughts, 2000). Since the rays of the light pulse are not perfectly focused together into one beam, each mode of light travels a different path, some short and some long. As a result, the modes will not be received at the same time, and the signal will be distorted or even lost over long distances (Thoughts, 2000).

Solitons, or stable waves, could quite possibly be the ultimate solution to dispersion, but this phenomenon is still being carefully studied and tested (Lerner, 1997). However, other dispersion compensation devices are in commercial use today. For example, erbium-doped fibers, as discussed earlier, and wavelength-division multiplexing (WDM) effectively shift most systems to 1550 nanometer at zero dispersion (Hecht, July 2000). Although high-performance WDM systems have been developed from novel fiber designs, the dispersion slope and the mode-field diameter of the fiber are still producing complications. New fiber designs, such as reduced-slope fibers, have low dispersion over a very wide range because the slope of dispersion is less than $0.05 \text{ ps/nm}^2\text{-km}$, which is significantly lower than standard fibers (Hecht, July 2000). New concepts and designs are continually being developed to reduce dispersion in optical fibers.

Conclusion

In conclusion, attenuation greatly affects the world of fiber optics technology. Although it is widely accepted that attenuation, which is measured in decibels, occurs as a function of wavelength, researchers are still exploring new ways to decrease loss in fibers. Higher transmission speed and efficient long distance communication are the key qualities that have to be obtained in order for fiber optics to lead our world into the future.

References

Hecht, J. (2000, August). Absorption and scattering determine fiber attenuation. Laser Focus World. 111-18.

Hecht, J. (2000, July). Dispersion control boosts high-speed transmission. Laser Focus World. 107-13.

Kashima, N. (1993). Optical Transmission for the Subscriber Loop. Norwood: Artech House.

Keiser, G. (1983). Optical Fiber Communications. New York: McGraw-Hill.

Lerner, E.J. (1997). Optical fibers carry information of the age. Laser Focus World, 33(3), 101-6. Retrieved June 26, 2001 from EBSCO database (MasterFile Premier) on the World Wide Web: <http://www.ebsco.com>

Single-Mode Fiber Performance Characteristics. (2000). The International Engineering Consortium. Retrieved July 9, 2001, from the World Wide Web: http://www.iec.org/tutorials/fiber_optic/topic06.html

Thoughts About Fiber Optics. (2000). Optimized Engineering Corporation. Retrieved June 30, 2001, from the World Wide Web: <http://www.optimized.com/COMPENDI/L1-fiber.htm>

Anexo C

EDFA

Este tipo de regenerador se basa en el empleo de la tecnología de la fibra activa, que se implementa mediante la inclusión de un tramo de fibra óptica dopada con Erblio en donde se produce la conversión de la energía lumínica, aportada por una fuente a diodo láser externa, en energía lumínica de las mismas características que la señal óptica de entrada. Se logra obtener, así, una señal óptica de salida con mayor potencia lumínica e idénticos valores de longitud de onda y fase que la señal óptica presente en la entrada.

La utilización de las fibras ópticas dopadas con Erblio en los regeneradores ópticos, se basa en la propiedad que presentan los iones de Erblio de absorber los fotones bombeados por la fuente láser externa, lo que provoca la elevación de la banda de energía de sus electrones con respecto al nivel que los mismos presentarían cuando la fuente láser se encuentra en estado de reposo.

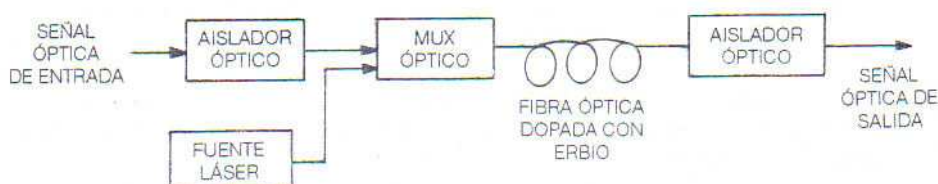
Desde este nuevo nivel, los electrones descienden a un nuevo estado que recibe la denominación de metaestable.

Una vez llegados a este punto, la incidencia de un fotón de señal en el tramo de fibra óptica dopada con Erblio obliga a un electrón, en estado metaestable, a retornar a su nivel de reposo, liberando su energía en forma de un fotón estimulado de idéntica longitud de onda y fase que el fotón de señal incidente.

La repetición de este proceso de forma sucesiva a lo largo del tramo de fibra óptica dopada con Erblio, provoca la amplificación óptica de la señal incidente en el mismo.

Los amplificadores ópticos de fibra dopada con Erblio, son elementos ópticos activos unidireccionales que realizan la amplificación de la señal óptica presente en su entrada de forma directa y sin los pasos intermedios de las conversiones opto-eléctrica y electro-óptica.

La figura 10.7 representa el diagrama de bloques característico de un amplificador óptico realizado de acuerdo con la tecnología de la fibra activa.



La señal óptica de entrada incide en un aislador óptico que permite únicamente propagarse al haz lumínico en el sentido de propagación y que lo guía hacia uno de los dos puertos de entrada del multiplexor óptico.

En el puerto de entrada restante del multiplexor óptico se inserta el haz lumínico bombeado por una fuente de luz a diodo láser.

En el haz lumínico presente en el puerto de salida del multiplexor óptico se encuentran acopladas de forma simultánea la señal óptica de entrada y el pulso lumínico bombeado por el diodo láser.

Seguidamente, el pulso lumínico multiplexado en longitud de onda se inserta en el tramo de fibra óptica dopada con Erblio, donde se produce la amplificación óptica de la señal, con lo que se logra obtener en el puerto de salida una señal con mayor potencia óptica que la de entrada e idénticos valores de longitud de onda y fase que ésta

El último paso consiste en obligar a la señal óptica de entrada, amplificada ópticamente, a incidir en un nuevo aislador óptico que, de nuevo, permite únicamente propagarse al haz lumínico en el sentido de propagación estipulado, encontrándose, en este punto, la señal óptica amplificada ópticamente en el puerto de salida del amplificador óptico

En el caso de los amplificadores ópticos comerciales basados en esta técnica (fabricados por la firma PIRELLI CABLE CORPORATION), para enlaces en los que se utilizan fibras ópticas monomodo, conforme la recomendación G-653 del C.C.I.T.T., con valores de longitud de onda comprendidos desde 1.530 nm hasta 1.560 nm, el valor de la longitud de onda de trabajo del diodo láser está prefijada en 980 nm.

Los valores habituales de las secciones de regeneración que se alcanzan con estos equipos son del orden de 110 km, en redes ópticas implementadas con fibras ópticas monomodo optimizadas para trabajar a una longitud de onda de 1.550 nm, en las que el valor de atenuación característica que las mismas presentan es del orden de 0,23 dB.

José Martín Sanz, "COMUNICACIONES ÓPTICAS". Editorial Paraninfo S.A., 1996.