

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA

ESTUDIO DE LA TECNOLOGÍA DE CONMUTACIÓN ÓPTICA POR
RÁFAGAS – OBS Y ANÁLISIS DE MIGRACIÓN DE REDES
ÓPTICAS PASIVAS A ESTA TECNOLOGÍA

Autor: Germán Jaramillo Andrade

Sangolquí – Ecuador
2011

Certificación

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado: “Estudio de la Tecnología de Conmutación Óptica por Ráfagas – OBS y Análisis de Migración de Redes Ópticas Pasivas a esta Tecnología” ha sido desarrollado en su totalidad, por el señor: Germán Ramón Jaramillo Andrade con CC: 171998792-5.

Ing. Flavio Pineda

DIRECTOR

Ing. Derlin Morocho

CODIRECTOR

Resumen

El presente trabajo se centra en lo que es la conmutación óptica por ráfagas (OBS por sus siglas en inglés). Este esquema de conmutación se perfila como la tecnología a ser adoptada a mediano plazo en redes de transporte completamente ópticas. El documento se divide en 4 capítulos. Empezamos por una breve introducción a las tecnologías de comunicación óptica, haciendo una corta reseña de la evolución de las redes ópticas a lo largo del tiempo; en el segundo capítulo se estudia concretamente lo que es OBS, sus características más importantes, así como demás aspectos a ser implementados en redes de este tipo. El tercer capítulo presenta una estrategia de migración a redes OBS; para finalizar con una sección dedicada a la comparación de OBS con la conmutación de paquetes y circuitos ópticos. El fin de este proyecto es de presentar un compilado de la teoría de OBS así como una estrategia de migración hacia esta tecnología, basándose en material de distintos autores. Esto nos permitirá entender su funcionamiento, ventajas y limitaciones, su importancia radica en que a nivel de redes de transporte, serán las tecnologías de comunicación ópticas las que dominen el panorama general.

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico a mis padres, gracias a su esfuerzo y dedicación he podido llegar tan lejos superando todos los obstáculos que he encontrado en el camino. Y a todas las personas que como yo lleguen a sentir una verdadera pasión por el conocimiento.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por sobre todas las cosas, a mis padres por la infinita ayuda y enseñanzas, a la Ing. Soledad Jiménez por su guía y a todas las personas que de una u otra forma me han permitido realizar este trabajo con éxito.

Prólogo

La tendencia de crecimiento constante en las comunicaciones genera la necesidad de desarrollar tecnologías que se mantengan a la par con dicho crecimiento. La evolución de procesadores, cada vez más veloces, terminales y servicios multimedia: televisión digital, video bajo demanda, juego en línea; aplicaciones y servicios informáticos cada vez más complejos, el crecimiento de la Internet, son algunos de los factores que han creado la necesidad de contar con redes que suministren mayor ancho de banda al usuario, a nivel de acceso, transporte e inter-red.

La gran capacidad de transporte de una conexión de fibra óptica se ve limitada por el procesamiento electrónico, cuya velocidad es menor a la velocidad de transferencia por un hilo de fibra. Para su procesamiento, una señal óptica debe ser primero convertida al dominio electrónico, para luego poder ser controlada, manejada (extraer información de: origen, destino, calidad de servicio, etc.) y transferida a través de una red. Este proceso añade latencia a la comunicación y desperdicia el gran ancho de banda que puede proveer el medio óptico, de ahí que la investigación y desarrollo de redes completamente ópticas ha sido un campo de interés desde ya hace algunos años. Dentro del campo de las comunicaciones ópticas, se ha planteado la tecnología de conmutación óptica por ráfagas en respuesta a estas necesidades inminentes.

El presente proyecto tiene como meta el estudio de la tecnología de conmutación óptica por ráfagas – OBS, abordando una breve introducción a las comunicaciones ópticas y la conmutación óptica en sí. Se analizarán los principios, técnicas y protocolos que permiten el funcionamiento de OBS. Se estudiará la estructura de una red óptica conmutada por ráfagas a fin de establecer los requerimientos de las redes actuales para migrar a esta arquitectura de red.

Al finalizar el proyecto se tendrá una descripción de la arquitectura de una red óptica conmutada por ráfagas – OBS y los requerimientos para la migración de una red óptica actual a una red óptica completamente activa que emplea OBS como técnica de conmutación.

CONTENIDOS

Capítulo 1 – Introducción a las comunicaciones ópticas

1.1. Introducción.....	2
1.2. Evolución de las Redes Ópticas.....	5
1.2.1. Enlaces Ópticos punto a punto	6
1.2.2. Redes SONET/SDH.....	6
1.2.3. Multiplexación usada en redes ópticas	7
1.2.4. Redes Ópticas Activas.....	10
1.3. El Dominio Óptico.....	16
1.3.1. El Medio de Transmisión.....	17
1.3.2. Granularidad	20
1.4. Conmutación Óptica	21
1.4.1. Conmutadores Ópticos	22
1.4.2. Conmutación Óptica: Circuitos, Paquetes y Ráfagas	23

Capítulo 2 – Conmutación óptica por ráfagas OBS

2.1. Principios de la Conmutación Óptica por Ráfagas	33
2.2. Arquitectura de Red.....	35
2.2.1. Enrutadores de Borde	36
2.2.2. Enrutadores de Núcleo	38
2.2.3. Arquitectura de Nodo	39
2.3. Arquitectura por Capas en OBS	45
2.3.1. Capa Física.....	46
2.3.2. Capa de Enlace de Datos	46
2.4. Establecimiento de la Ruta.....	47
2.5. Ensamblaje de la Ráfaga	49
2.5.1. Algoritmos de Ensamblaje	50
2.6. Offset.....	52
2.7. Paquete de Control.....	53
2.8. Programación de la Ráfaga.....	54
2.8.1. Algoritmos sin relleno de vacíos	56
2.8.2. Algoritmos con relleno de vacíos	57

2.9.	Mecanismos de Contención	59
2.9.1.	Líneas de Retardo	59
2.9.2.	Segmentación de la Ráfaga.....	60
2.9.3.	Desviación por Enrutamiento	62
2.10.	Protocolos de Señalización	63
2.10.1.	Tell and Wait (TAW)	63
2.10.2.	Tell and Go (TAG)	64
2.10.3.	Just in Time (JIT).....	65
2.10.4.	Just Enough Time (JET)	65
2.11.	Calidad de Servicio.....	67

Capítulo 3 – OBS y otras redes ópticas

3.1.	Tecnologías de Comunicaciones Ópticas Actuales.....	70
3.1.1.	SDH/SONET	70
3.1.2.	Multiplexación por División de Longitud de Onda – WDM	74
3.1.3.	Enrutamiento por Longitud de Onda y Conmutación Óptica de Circuitos 76	
3.2.	Dispositivos Ópticos Adicionales.....	78
3.2.1.	Amplificadores	78
3.2.2.	Láseres Sintonizables.....	79
3.2.3.	Convertidores de Longitud de Onda	80
3.2.4.	Multiplexores/Demultiplexores	81
3.2.5.	Regeneradores	82
3.3.	Adaptabilidad de redes OBS a otras redes ópticas	82
3.3.1.	Estrategia de Migración a redes OBS.....	83
3.4.	Redes Metropolitanas y OBS	87

Capítulo 4 – Análisis de las tecnologías de conmutación completamente ópticas

4.1.	Comparación entre conmutación óptica de circuitos, ráfagas y paquetes..	92
4.2.	Conmutación en el dominio óptico contra la conmutación en el dominio electrónico.....	96
4.3.	Limitaciones en la actualidad de los dispositivos ópticos	97
4.4.	Requisitos para migrar a una red conmutada por ráfagas.....	100

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones	102
Recomendaciones	104

Anexos

Anexo A1 - Artículo: Optical Burst Switching (Obs) – A New Paradigm For An Optical Internet	¡Error! Marcador no definido.
Anexo A2 - Artículo: Optical Burst Switching (Obs): A New Area In Optical Networking Research	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO A3 - Artículo: Burst Segmentation An Approach For Reducing Packet Loss In Optical Burst Switched Networks	¡Error! Marcador no definido.
Anexo A4 - Artículo: A Hibryd Optical Network Architecture Consisting Of Optical Cross Conects And Optical Burst Switches	¡Error! Marcador no definido.
Anexo A5 - Artículo: Wavelength vs. Burst vs. Packet Switching: Comparison Of Optical Network Models	¡Error! Marcador no definido.

Índice de Figuras

Capítulo 1 – Introducción a las comunicaciones ópticas

Fig. 1.1. Sistema de multiplexación por división de longitud de onda.	9
Fig. 1.2. Multiplexor Óptico Add/Drop.....	12
Fig. 1.3. Conmutador Óptico de Conexión Cruzada selectivo en longitud de onda	14
Fig. 1.4. Enrutamiento por longitud de onda.	15
Fig. 1.5. Ventanas de Transmisión.....	18
Fig. 1.6. Diseño de topología lógica usando enrutamiento por longitud de onda.	24
Fig. 1.7. Diagrama básico de un nodo OPS.	26
Fig. 1.8. Almacenamiento a la salida del conmutador.	28
Fig. 1.9. Almacenamiento a la entrada del conmutador.	28
Fig. 1.10. Almacenamiento con configuración en lazo.	29
Fig. 1.11. Formato de un paquete óptico.....	30

Capítulo 2 – Conmutación óptica por ráfagas OBS

Fig. 2.1. Arquitectura de un enrutador de borde de ingreso.	37
Fig. 2.2. Arquitectura de un enrutador de núcleo.	38
Fig. 2.3. Arreglo de deflectores	41
Fig. 2.4. Prisma electro-óptico.....	42
Fig. 2.5. Conmutador Espacial Broadcast and Select con compuertas SOA	45
Fig. 2.6. Evolución temporal del proceso de ensamble usando el algoritmo FRR	52
Fig. 2.7. Funcionamiento del algoritmo HORIZON.	56
Fig. 2. 8. Funcionamiento del algoritmo LAUC-VF.	58
Fig. 2.9. Segmentación de la ráfaga contendiente.	62
Fig. 2.10. Funcionamiento Básico de JET	66
Fig. 2.11. Variación del tiempo de offset	67

Capítulo 3 – OBS y otras redes ópticas

Fig. 3.1. Topología en anillos en redes SDH/SONET.....	73
Fig. 3.2. Interconexión de anillos SDH por medio de un DXC, para cobertura de áreas metropolitanas.....	73
Fig. 3.3. Anillo SDH haciendo uso de multiplexores WDM.....	75
Fig. 3.4. Encaminamiento fijo por longitud de onda.....	76
Fig. 3.5. Red original construida con OXC's en su núcleo.	84
Fig. 3.6. Arquitectura Híbrida.....	85
Fig. 3.7. Multiplexación de varias ráfagas en el dominio temporal, desde el conmutador OBS A con destino al conmutador OBS B.....	86
Fig. 3.8. Adición de un único conmutador OBS.....	87

Índice de Tablas

Capítulo 1 – Introducción a las comunicaciones ópticas

Tabla 1.1. Granularidad Óptica	20
Tabla 1.2. Granularidad de Conmutación Óptica	21
Tabla 1.3. Tecnologías de conmutación Óptica en el Espacio	22

Capítulo 2 – Conmutación óptica por ráfagas OBS

Tabla 2.1. Propiedades del Niobato de Litio.....	40
Tabla 2.2. Funciones realizadas en el plano de datos	47

Capítulo 3 – OBS y otras redes ópticas

Tabla 3.1. Velocidades de transferencia SONET/SDH	71
---------------------------------------------------------	----

Capítulo 4 – Análisis de las tecnologías de conmutación completamente ópticas

Tabla 4.1. Comparación de las distintas técnicas de conmutación óptica.....	94
-----------------------------------------------------------------------------	----

Glosario

3R – Re-Amplification Re-Shaping Re-Synchronization

ADM – Add/Drop Multiplexer

DXC – Digital Cross Connect

EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier

FDL – Fiber Delay Line

FRR – Forward Resource Reservation

GMPLS – Generalized Multiprotocol Label Switching

JET – Just Enough Time

LAUC-VF – Latest Available Unused Channel with Void Filling

OADM – Optical Add/Drop Multiplexer

OBS – Optical Burst Switching

OCS – Optical Circuit Switching

OEO – Optical Electrical Optical conversion

OPS – Optical Packet Switching

OXC – Optical Cross Connect

PDU – Protocol Data Unit

ROADM – Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer

SDH – Synchronous Digital Hierarchy

SOA – Semiconductor Optical Amplifier

SONET – Synchronous Optical Network

WDM – Wavelength Division Multiplex

WR – Wavelength Routing

WRON – Wavelength Routed Optical Network

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS

1.1. Introducción

Desde sus inicios la humanidad comenzó a transitar un camino de descubrimiento, de expansionismo, un camino donde cada vez los límites y las fronteras son más pequeños, a nivel científico, tecnológico, social, económico, político, geográfico; obviamente esta continua evolución trae consigo necesidades en diversos campos. Una de las necesidades más antiguas del hombre desde que empezó a desarrollar su intelecto es la de comunicarse, de comunicar sus ideas, su historia, sus conocimientos o el simple hecho de comunicarse como parte de una interacción social. Hoy en día somos testigos de la importancia de mantener comunicadas cada una de las partes que conforman nuestra sociedad y no solo a nosotros como individuos, tan importante es este factor que ahora bien pasa desapercibido el hecho de que en cuestión de segundos podamos tener a nuestro alcance un sinfín de información.

El 21 de noviembre de 1969 se transmite el primer mensaje a través de la red ARPANET entre las universidades de UCLA y Stanford, para diciembre del mismo año todos los puntos de comunicación contemplados en el diseño original estaban listos. De ahí en adelante diversas instituciones y centros de investigación (en América del Norte y Europa) se irían conectando a esta red con el paso de los años, marcando un hito en la historia de las telecomunicaciones: el nacimiento de una red a nivel global conmutada por paquetes, la misma que daría paso al nacimiento de la Internet. Una de las partes de esta red y de toda red de comunicaciones hoy en día es la conmutación tanto física como lógica, este proyecto se centra específicamente en la conmutación lógica sobre redes ópticas activas incluyendo información necesaria sobre conmutación física.

La fibra óptica desde su introducción al mercado ha sido un excelente medio de transmisión debido a tres características, ahora ya muy conocidas: una baja atenuación, lo cual permite alcanzar una mayor distancia de enlace – comparada con otros medios de transmisión –, inmunidad a interferencia electromagnética y

un potencial gran ancho de banda. Estas características han hecho que ya desde mediados de la década de 1980 se hayan tendido gran cantidad de enlaces de fibra óptica, permitiendo comunicar a todo el planeta con enlaces intercontinentales (cables submarinos). Gracias a los avances en la fabricación de fibra óptica se ha logrado obtener un medio con mejores características de transmisión, una menor atenuación e incrementando la capacidad de ancho de banda que puede transportar un hilo, en la actualidad se han llegado a alcanzar velocidades de transferencia en el orden de las decenas de Terabits por segundo. Por otra parte las distintas técnicas de multiplexación: en el tiempo, espacio y longitud de onda; permiten incrementar los datos inyectados a un hilo de fibra óptica por unidad de tiempo, aprovechando más eficientemente el ancho de banda efectivo del medio óptico; en particular la multiplexación por longitud de onda (WDM) incrementa considerablemente las prestaciones de transporte en redes ópticas. Estos factores hacen que el medio óptico sea el ideal y hoy en día el único medio a ser desplegado en redes de transporte y en enlaces entre redes.

La década de 1990 marca el inicio de un fenómeno que obligaría a la comunidad científica y tecnológica a revolucionar el mundo de las telecomunicaciones: un crecimiento exponencial en la cantidad de información que se transmite a través de las redes de comunicación, producto de la comercialización de computadores personales; cada vez más económicos, con mejor desempeño, capaces de suministrar y demandar mayor cantidad de información en menos tiempo y la aparición de aplicaciones más complejas para dichos ordenadores; producto de esto, el crecimiento de la Internet; de las redes de telefonía fija; la aparición de redes de telefonía celular, que hoy en día brindan múltiples servicios; la demanda de servicios de voz, datos y video (bajo demanda y televisión); terminales multimedia capaces de ofrecer varios servicios al usuario y de manejar múltiples aplicaciones; juego en línea, televisión digital, video y audio de alta definición. Toda esta evolución tecnológica (desde el punto de vista del consumidor o usuario final) ha exigido también una evolución no solo a nivel de acceso, sino también de la red que transporta toda esta información y es justamente a nivel de transporte donde se necesita suministrar la mayor capacidad de ancho de banda. Es así que el medio óptico ha presentado ser la

respuesta ante esta necesidad de ancho de banda, pero aún con la gran capacidad de información que puede transportar un hilo de fibra y la inclusión de sistemas WDM (Wavelength Division Multiplex), todavía existe un limitante que impide aprovechar completamente el virtual ancho de banda ilimitado que puede proveer el medio óptico: los procesadores electrónicos, cuya velocidad de procesamiento es notablemente menor que la velocidad que alcanza la transmisión de datos por un hilo de fibra óptica.

La información que cursa por una red óptica en forma de luz es sometida a dos procesos necesarios para el manejo y control de los datos necesarios en toda red de comunicación, el primero es la conversión de la luz a señales eléctricas cuando la información ingresa a un nodo o conversión óptica-eléctrica, la cual abreviaremos como conversión OE de aquí en adelante y el segundo es el retorno de la información en forma de señales eléctricas a luz cuando la información sale del nodo o conversión eléctrica-óptica, abreviada simplemente como conversión EO, muchas veces también se hace referencia a todo el proceso y simplemente hablaremos de conversión óptica-eléctrica-eléctrica o conversión OEO. Este proceso es necesario ya que en la actualidad no contamos con elementos ópticos equivalentes a las memorias y procesadores electrónicos, en consecuencia los datos deben ser sometidos a estas conversiones a fin de extraer información de enrutamiento, calidad de servicio y toda la información necesaria para su transmisión. Pero la conversión al medio electrónico convierte al conmutador en un cuello de botella, ya que, como mencioné antes, la velocidad un procesador electrónico no equipara la velocidad a la que se transmite por un hilo de fibra óptica, producto de esto la latencia sobre la red aumenta y parte del ancho de banda del medio óptico es desperdiciado; por otro lado también las interfaces responsables de la conversión OEO tienen un costo elevado en comparación con los otros elementos de una red óptica y de hecho representan un buen porcentaje del costo de despliegue de redes ópticas. Estos dos factores han despertado gran interés en el desarrollo de tecnologías que permitan el transporte de los datos sin necesidad de convertirlos al dominio electrónico.

Hoy por hoy, contamos ya con elementos como son el amplificador dopado de erbio, los mismos sistemas WDM, láseres sintonizables, entre otros; capaces de proveer parte de la infraestructura necesaria para desplegar redes ópticas donde la información no deje este dominio. Ahora este proyecto se centra en la parte de la conmutación lógica de red, para nosotros es familiar los términos de conmutación de paquetes y circuitos, a esto es a lo que llamamos conmutación lógica y la conmutación óptica por ráfagas es un nuevo paradigma de conmutación óptica que promete ser la solución para las necesidades de comunicación actuales y a futuro. Analizaremos así la evolución de las redes ópticas, a fin de entender a donde puede ser capaz de llegar el medio óptico; el dominio óptico, ya que existe la necesidad de entender a la óptica más allá del simple hilo de “vidrio” que transmite luz y a la conmutación óptica en sí, haciendo una breve descripción de las características y estado de la tecnología de los distintos modelos de conmutación, así como también lo que es la conmutación a nivel físico. Así en el segundo capítulo podremos empezar con el estudio de la conmutación óptica por ráfagas.

1.2. Evolución de las Redes Ópticas

Desde que se empezó a utilizar fibras ópticas como medio de transmisión en redes de comunicaciones y poco a poco la fibra óptica ha ido reemplazando a los enlaces de cobre. De ahí que en el campo de la investigación óptica ha habido gran actividad desde el principio, motivado por el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan incrementar la eficiencia de la transmisión de datos por fibra óptica y a esto sumado el desarrollo y mejoras en la fabricación de dispositivos ópticos. Así haremos un recuento de la tecnología óptica usada en las comunicaciones a lo largo del tiempo, con el objetivo de tener un punto de vista claro de sus tendencias en el futuro.

1.2.1. Enlaces Ópticos punto a punto

Un enlace óptico punto a punto se define como un enlace de fibra óptica que comunica dos nodos, sin que exista ningún dispositivo electrónico entre estos. Este fue el inicio de las comunicaciones ópticas y este tipo de enlaces fueron los primeros desplegados en la década de los ochenta haciendo uso de la fibra óptica. Estos enlaces bien pueden ser agrupados para formar configuraciones físicas de estrella o anillo. A cada extremo del enlace irán unidades de conversión OE si se tratase del punto de ingreso al nodo o unidades EO en el punto de egreso. Estas unidades de conversión, comúnmente conocidas como convertidores de medios, bien pueden tener una interfaz exclusiva para transmisión y otra para recepción empleando dos hilos para la comunicación. O bien usar una ventana de transmisión óptica para la transmisión y otra ventana para la recepción.

El concepto de esta forma de comunicación es bastante simple, teniendo solo dos elementos ópticos: el medio de transmisión y el convertidor de medios. El resto de elementos pueden ser comunes a cualquier red conmutada.

1.2.2. Redes SONET/SDH

Tanto SONET como SDH se plantearon como un sistema de estandarización para todos los modelos de comunicaciones existentes sobre fibra óptica o de alta capacidad. Es la ITU quien desarrolla dichos estándares, recogidos en las normas G.707 y su extensión G.708 para SDH y T1.105 para SONET. Estos sistemas de comunicación síncrona están basados en una estructura TDM con una duración de trama de 125 μ s., tiempo heredado de la trama de los canales tributarios definidos en telefonía y PDH, en base al ancho de banda necesario para las comunicaciones de voz de la época de 64 Kbps. Aún hoy en día estos modelos

son usados ampliamente alrededor del mundo y sirven de base para tecnologías de transporte como ATM y MPLS.

Normalmente este tipo de redes se las configura en forma de anillo o enlaces simples, en cada uno de los nodos se hará una conversión OEO exceptuando los nodos terminales. Aquí reconocemos la inclusión de otros elementos a la arquitectura de la red, como son:

Multiplexores Add/Drop.- Permiten insertar o extraer señales de diferentes velocidades. Añaden señales de un ancho de banda menor al flujo de la red SONET/SDH de fibra óptica y extraen o remueven otras del flujo principal, enviándolas hacia otros destinos por canales de menor ancho de banda.

Sistemas Digitales de Conexión Cruzada.- Cumplen una función similar al multiplexor add/drop, extraen, incluyen o conmutan flujos de datos TDM en un canal de capacidad o velocidad mayor. Eso permite que este pueda trabajar con canales SONET/SDH individuales.

Y aunque estos elementos no son completamente ópticos darán lugar al desarrollo y diseño de sus equivalentes ópticos mas adelante.

1.2.3. Multiplexación usada en redes ópticas

El empleo de multiplexores en cualquier red permite incrementar la cantidad de información que transita por un enlace, haciendo más eficiente esta red aprovechando el ancho de banda que ofrece el medio de transmisión. En una red óptica tenemos tres esquemas generales de multiplexación: multiplexación por división de tiempo - *time division multiplex* TDM, multiplexación por división de espacio - *space division multiplex* SDM y multiplexación por división de longitud de onda - *wavelength division multiplex* WDM.

Multiplexación por división de tiempo.- Un claro ejemplo de este tipo de multiplexación lo encontramos en las redes SDH/SONET. TDM asigna a cada canal de comunicación un espacio de tiempo para su transmisión, estas ranuras de tiempo son enviadas una a continuación de la otra sobre un enlace y para su demultiplexación es necesario definir tiempos de duración de tramas que ayudan a establecer el inicio y fin de las mismas, así como bits de cabecera y en algunos casos de cola para el mismo propósito. El uso de información de cabecera en este caso representa un limitante para TDM ya que necesariamente se necesita una conversión OEO a fin de extraer esta información, además de que cada canal necesita transmitir a una misma velocidad.

Multiplexación por división de espacio.- Este concepto es bastante simple, los canales de comunicación se separan físicamente empleando varios cables agrupados en forma paralela, en otras palabras es una transmisión de información paralela. Llevando este concepto a redes ópticas la información puede ser manejada a nivel óptico haciendo uso de conmutadores completamente ópticos, pero su desventaja es clara ya que se necesita desplegar un mayor número de cables de fibra óptica y se hace uso de un mayor número de interfaces en el conmutador.

Multiplexación por división de longitud de onda.- Cuando hablamos de WDM, estamos hablando de un modelo análogo a la multiplexación por división de frecuencia. La magnitud de longitud de onda (λ) es inversamente proporcional a la frecuencia de la misma. Entonces en WDM a cada canal le corresponde una longitud de onda distinta ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_i$) así como en FDM a cada canal le corresponde una frecuencia de portadora diferente. El multiplexor recibe cada canal a determinada longitud de onda λ_i ; los combina y los transmite por un solo hilo de fibra óptica, el espectro del canal óptico resultante contendrá todas las longitudes de onda λ_i . Luego el demultiplexor separa o divide el canal en base a la misma información de longitud de onda, como se muestra en la figura 1.1. La información se mantiene dentro del dominio óptico ya que solo se necesita

discernir entre una longitud de onda de otra, siendo esta una característica física de la luz que puede ser evaluada sin necesidad de realizar una conversión OEO.

Por otro lado la transmisión de múltiples canales con distintos anchos de banda sobre un solo hilo, aprovechan eficientemente el ancho de banda que provee el medio óptico; podemos decir que la multiplexación por longitud de onda ha logrado por primera vez explotar todo el potencial que pueden ofrecer los enlaces de fibra óptica en cuanto a ancho de banda se refiere. Es así que las tecnologías WDM han sido desplegadas a gran escala en la actualidad, debido a las ventajas antes expuestas. Las soluciones de conmutación óptica, incluyen en sus diseños multiplexores WDM, con el propósito de alcanzar una estructura modular, además que esta técnica de multiplexación es la única que se ajusta a la arquitectura de una red completamente óptica de modo eficiente, escalable y efectivo en costo.

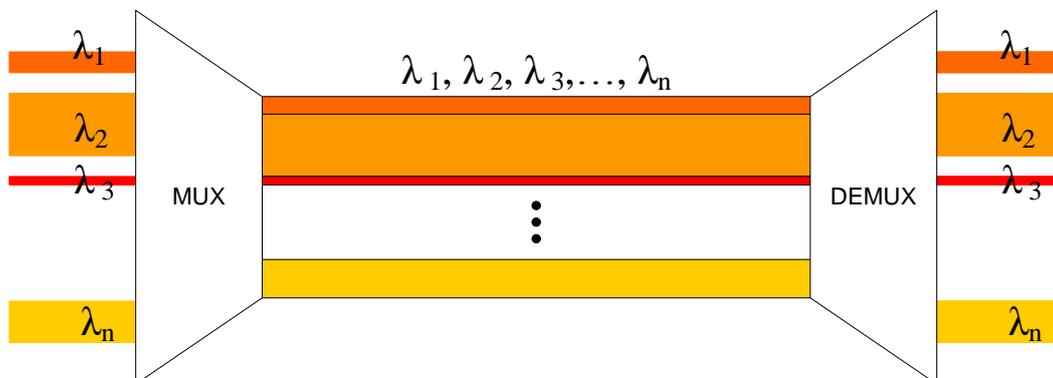


Fig. 1.1. Sistema de multiplexación por división de longitud de onda.

En redes que usan WDM, el transporte y multiplexación son enteramente ópticos, pero las funciones de control y conmutación aún son realizadas por equipos electrónicos y obviamente aún se necesita de conversiones OEO; por consiguiente aún en redes con este tipo de tecnología se genera un cuello de botella en los nodos de conmutación.

1.2.4. Redes Ópticas Activas

El concepto de una red óptica activa es sencillo: es una red, a través de la cual la información viaja de extremo a extremo sin llevar a cabo ninguna conversión OEO. Hemos visto que la evolución de las distintas tecnologías ópticas nos permiten hoy por hoy, transmitir y multiplexar la información manteniéndola completamente óptica. Por lo tanto para construir una red óptica activa, se necesita contar con conmutadores ópticos. En la actualidad la investigación y desarrollo de estos dispositivos ha recibido gran interés, por las grandes ventajas que se obtiene al transmitir datos en el dominio óptico:

- Redes efectivas en costo, como ya habíamos mencionado las interfaces responsables de las conversiones OEO representan un gran porcentaje del costo de despliegue de redes ópticas.
- Se podrá explotar el ancho de banda de la fibra óptica, en una proporción nunca antes vista.
- Una transmisión de datos completamente óptica representa un menor consumo de energía de los equipos.
- Se podrá hacer una transferencia transparente¹ de la información, independientemente de tasas de transmisión, de protocolos y técnicas de modulación. Ya que todos los datos se transmiten, multiplexan, conmutan y controlan en el dominio óptico.
- La transparencia trae consigo otras ventajas, como la modularidad. En un sistema modular no se necesita hacer cambios a gran escala a fin de adaptarlo a otras tecnologías, solo se necesitan cambiar elementos específicos del sistema pertenecientes a un módulo en particular. En una red completamente

¹ Transparencia: Una red completamente óptica se dice que es transparente, ya que al operar exclusivamente dentro del dominio óptico, no necesita información de protocolos o formatos, por lo que los datos pueden ser comunicados a través de la red sin ser sometidos a procesamiento y procesos de extracción/empaquetamiento.

óptica podemos reconocer módulos independientes como: transporte, amplificación, multiplexación conmutación entre otros.

Podemos clasificar a las redes ópticas activas dentro de dos grupos: el primero, donde solamente el control y decisiones de conmutación son hechas por elementos electrónicos; mientras que la carga útil de los datos se mantiene enteramente óptica; son redes con cierto grado de transparencia dependiendo del trato que se le dé a la información de control. Y el segundo donde la totalidad de la información nunca deja el dominio óptico. En ambos tipos de redes se emplea conmutación óptica; la primera en particular describe la base de lo que es la conmutación óptica por ráfagas.

En la actualidad es realizable la construcción de redes ópticas activas, basadas en conmutación óptica de circuitos; haciendo uso de WDM y enrutamiento por longitud de onda; conmutadores ópticos de conexión cruzada y multiplexores ópticos Add/Drop.

Multiplexores Ópticos Add/Drop (Optical Add/Drop Multiplexer – OADM)

Como su equivalente electrónico, este dispositivo extrae o incluye canales de información. Este equipo trabaja a nivel de longitud de onda haciendo uso de WDM. Es así que la estructura principal del un OADM se compone de un multiplexor, un demultiplexor y un sistema que incluya o extraiga longitudes de onda específicas, tal como se muestra en la figura 1.2.

Las longitudes de onda que pasan por el multiplexor permanecen en el dominio óptico. Las longitudes de onda que son extraídas pueden ser dirigidas hacia otra red óptica o pueden ser sometidas a un proceso de conversión OE a fin de extraer información de protocolos de capas superiores, almacenarla o

cualquier otro proceso dentro del nodo. Por otra parte se incluye longitudes de onda desde otras redes ópticas o mediante un proceso de conversión EO; como resultado la misma longitud de onda ahora lleva otros datos. Al final un multiplexor, combina todas las señales y las envía por un solo hilo de fibra óptica.

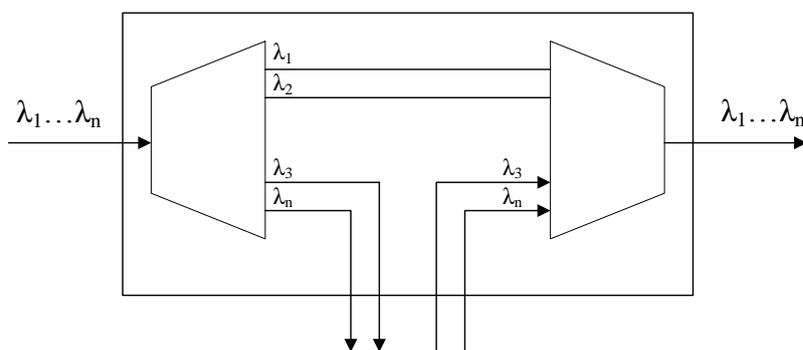


Fig. 1.2. Multiplexor Óptico Add/Drop.

A esta estructura se puede añadir un conmutador óptico con el fin de proveer un diseño más flexible. Este es un tipo especial de OADM conocido como OADM reconfigurable (ROADM).

Cabe destacar que un OADM maneja una sola línea de entrada/salida y, como veremos adelante, maneja un número limitado de longitudes de onda en comparación a un OXC.

Conmutadores Ópticos de Conexión Cruzada (Optical Cross Connect – OXC)

Un conmutador óptico de conexión cruzada es un equipo pensado para manejar grandes anchos de banda, su función es la de conmutar circuitos de luz; son capaces de redirigir el tráfico hacia otras redes y brindar manejo a nivel de longitud de onda. Estos equipos pueden ser usados para comunicar anillos metropolitanos SONET/SDH o anillos WDM.

Un conmutador cruzado puede implementar en su estructura un conmutador electrónico, con puertos de entrada que realicen una conversión OE y puertos de salida que efectúen una conversión EO, se obviaría el análisis de estos equipos, ya que nuestro interés se centra en tecnologías completamente ópticas.

Podemos clasificar a un OXC, en base a su capacidad de conmutación, en tres tipos [1]:

- 1) *Fiber Cross-Connect (FXC)*.- Este conmutador toma un puerto de entrada de fibra óptica y lo conmuta a un puerto de salida, conmutando así todas las longitudes de onda de ese canal. Dada su simplicidad, esta clase de OXC es fácil y económico de implementar.
- 2) *Wavelength Band Cross-Connect (WBXC)*.- Un conmutador de este tipo toma bandas de longitudes de onda para su conmutación. Las longitudes de onda adyacentes se agrupan en bandas tomando en cuenta la ruta del circuito a conmutar. Interfaces especiales son necesarias para realizar el proceso de agrupación en bandas de longitud de onda. Al trabajar a nivel de longitud de onda un WBXC es más flexible que un FXB, pero también más costoso.
- 3) *Wavelength Selective Cross-Connect (WSXC)*.- Este conmuta longitudes de onda independientes, desde cualquier puerto de salida hacia cualquier puerto de entrada; haciendo uso de conmutadores ópticos espaciales. i líneas de entrada llegan a i demultiplexores; cada demultiplexor divide las señales en j longitudes de onda, longitudes de onda equivalentes son conmutadas ($\lambda_{11} \equiv \lambda_{21} \dots \equiv \lambda_{i1}$), para al final ser combinadas en i multiplexores por i líneas de salida, tal como se muestra en la figura 1.3.

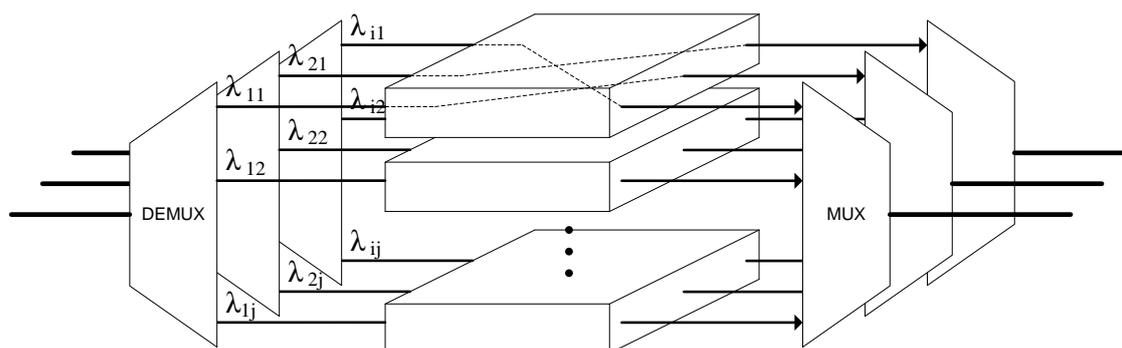


Fig. 1.3. Conmutador Óptico de Conexión Cruzada selectivo en longitud de onda [1].

En otras palabras la información contenida en la longitud de onda 1 del canal 2, λ_{21} ; puede ser conmutada al canal 1 en la misma longitud de onda, λ_{11} ; luego multiplexada y enviada. Este conmutador ofrece una mayor flexibilidad al conmutar longitudes de onda individuales, pero su implementación es más costosa y compleja que la de un FXC y un WBXC.

- 4) *Wavelength Interchanging Cross-Connect (WICX)*.- El diseño de este conmutador añade la función al WSXC de convertir longitudes de onda. Esto le da aún mayor flexibilidad, pero implica que este conmutador sea el más costoso y complicado de diseñar de los cuatro.

Cabe destacar que aunque los equipos que trabajan en la granularidad de banda de longitud de onda pueden parecer inferiores en términos de flexibilidad, la conmutación a este nivel resulta prometedora ya que con la llegada de los sistemas DWDM, donde cientos de longitudes de onda son multiplexadas; trabajar con bandas de longitudes de onda resulta en un menor número de puertos de entrada/salida de los equipos y también el ahorro de multiplexores/demultiplexores. También existe gran interés en la fabricación de OXC's que trabajen en múltiples granularidades con el fin de ahorrar en costos, al tener múltiples equipos trabajando en una granularidad específica.

Enrutamiento por Longitud de Onda (Wavelength Routing – WR)

En el enrutamiento por longitud de onda (WR) la conmutación y/o enrutamiento es hecha en base a la información de longitud de onda, estableciéndose caminos de luz (*Lightpaths*). Un *lightpath* se define como un circuito óptico entre dos nodos, el mismo puede dar más de un salto y es susceptible a ser conmutado. WR habilita el reuso de longitudes de onda en la red, varios *lightpaths* pueden usar una misma longitud de onda siempre y cuando no compartan el mismo enlace físico, figura 1.4. WR también añade transparencia a la red, ya que a nivel de longitud de onda no se necesita información de formatos o protocolos (IP, ATM)

Los tres tipos de OXC's expuestos previamente pueden ser usados para implementar una red WR, añadiendo distintos grados de flexibilidad a la misma y OADM's para comunicar redes ópticas de gran capacidad a la red WR. Usando FXC's, la red WR sería estática y usando WSXC's o WIXC's tendríamos una red WR reconfigurable.

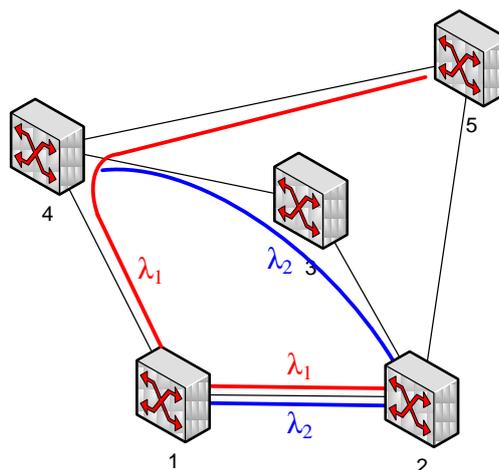


Fig. 1.4. Enrutamiento por longitud de onda.

1.3. El Dominio Óptico

La óptica es una de las ciencias más antiguas que existen, la óptica se define como una parte de la física que estudia las leyes y los fenómenos de la luz [2]. También estudia los cuerpos luminosos y fuentes de luz.

Desde el estudio de la reflexión de la luz en espejos en la antigua Grecia hasta las aplicaciones actuales, que comprenden una amplia gama de tecnologías, que van desde la transmisión de información, dispositivos optoelectrónicos hasta el procesamiento digital de imágenes y fotografía; la óptica ha recorrido un gran camino. Cuando se inició a incluir la fibra óptica como medio de transmisión de datos, la ciencia óptica era ligada muchas veces a la electrónica. Gracias al gran interés que ha dado la comunidad científica a la investigación y desarrollo de tecnologías ópticas, debido a las ventajas del medio óptico ampliamente discutidas en este capítulo; hoy en día estamos a las puertas de una revolución tecnológica; y así como el estudio de la electricidad dio paso al desarrollo de la electrónica, definida como el dominio, manejo y control del electrón; la óptica tiene la misma tendencia y la investigación en este campo busca llegar hasta el nivel fotónico con la promesa de crear por ejemplo procesadores mucho más poderosos, más veloces y más eficientes en consumo de potencia.

Ahora estamos en capacidad de entender el alcance del término “dominio óptico”, enmarcándonos dentro de los contenidos del proyecto, muchas veces haremos referencia a este término o compararemos el mismo con el dominio electrónico. Por tanto definiremos al dominio óptico, a la luz en sí y a todo espacio donde esta puede ser propagada y viajar libremente; como este concepto es llevado al campo de las comunicaciones, el modelo de dominio óptico podrá ser tan general como el medio de transmisión, fibra óptica y específico hasta un nivel de longitud de onda; ya que el estado de la tecnología hoy por hoy permite trabajar con la luz hasta este nivel. Dentro del dominio óptico, en términos de

ingeniería; cuando se habla de equipos y/o medios de transmisión y su funcionamiento, normalmente en la literatura se definen tres dimensiones: el tiempo, el espacio y la longitud de onda.

1.3.1. El Medio de Transmisión

Es de conocimiento popular las características que hacen de la fibra óptica el medio de transmisión preferido para enlaces de larga distancia y gran capacidad de ancho de banda; es así que la fibra ha reemplazado al cobre casi en totalidad en redes metropolitanas. Además debido a la tendencia al alza en el precio de los metales, que hace que la fibra óptica sea más económica, también es más eficiente en cuanto a consumo de energía se refiere. Definiremos algunos términos relacionados con el medio óptico:

Ventanas de Transmisión.- Se define así a una banda del espectro óptico en donde ciertas características físicas como la atenuación y la dispersión, hacen de esta porción óptima para la transmisión de la luz por un hilo de fibra óptica.

Rayleigh Scattering – Dispersión Rayleigh.- Esta clase de dispersión de las ondas de luz y en general de cualquier tipo de radiación electromagnética ocurre con mayor frecuencia en medios gaseosos, pero también en medios sólidos y líquidos, en donde las moléculas o átomos que componen dicho medio son de similar o menor longitud que la longitud de onda de la onda irradiada, cuando las partículas son de dimensiones mayores el espectro de la onda simplemente no se separa y es dispersado en todas sus longitudes de onda; este es el caso de la luz, y de aquí la razón de porque el cielo es de color azul (moléculas de nitrógeno y oxígeno) pero las nubes tienen un característico color blanco (moléculas de vapor de agua).

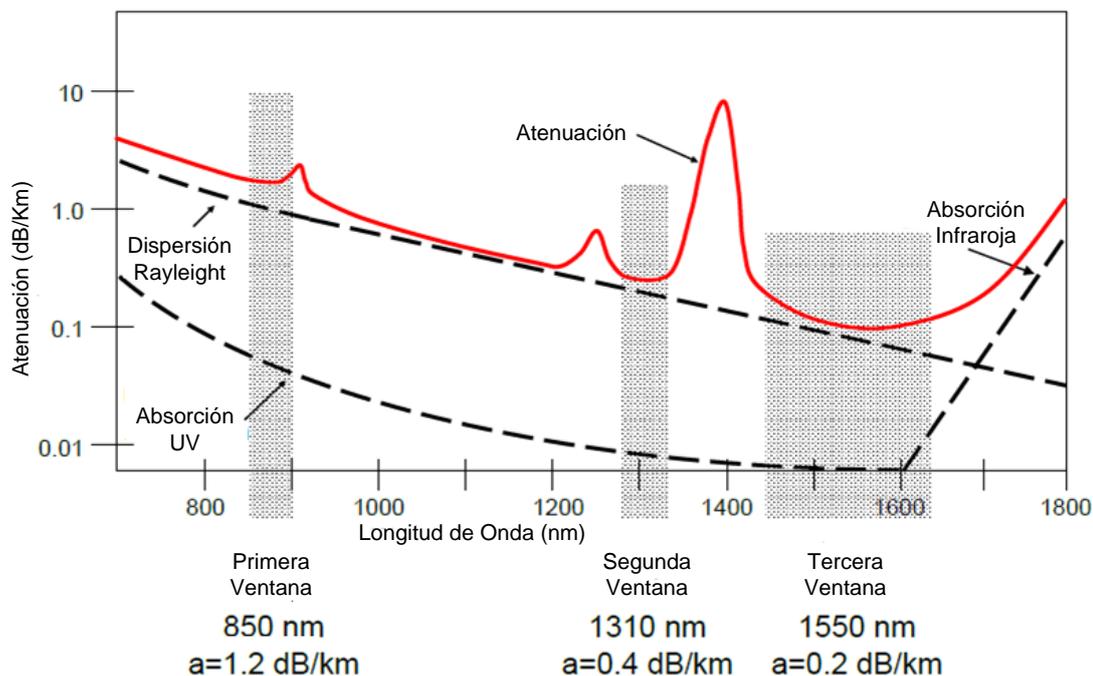


Fig. 1.5. Ventanas de Transmisión [3].

Cabe señalar que la luz no es absorbida solo dispersada y enviada en otra dirección, así mismo la dispersión es uniforme y acumulativa, mientras más lejos viaje la luz a través de un material es más probable que ocurra dispersión.

En fibra óptica la mayor medida de atenuación en longitudes de onda cortas se debe a la dispersión Rayleigh (cerca del 96%), la cual incrementa a medida que la longitud de onda decrece.

Para un sólido transparente la pérdida por dispersión en decibelios por kilómetro está dada por:

$$Scattering = A\lambda^{-4} \quad (1.1.)$$

Donde A es una constante dependiente del material.

Absorción.- La absorción se produce cuando el haz de luz es absorbido en parte por distintos materiales residuales, a saber, el agua e iones metálicos, en el núcleo de la fibra, así como en el revestimiento. Aunque a nivel de absorción de fibras de vidrio tiende a aumentar entre longitudes de 700 y 1550 nanómetros (nm), casi cualquier tipo de fibra en cualquier longitud tendrá la luz absorbida por algunas de las trazas de impurezas que inevitablemente aparecen en todas las fibras. A medida que la señal de luz viaja a través de la fibra, cada impureza absorbe algo de luz, lo que debilita la señal, por lo que fibras más largas son más propensas a la atenuación debido a la absorción.

Absorción ultravioleta. La absorción ultravioleta es provocada por electrones de valencia en el material de silicio del cual se fabrican las fibras. La luz ioniza a los electrones de valencia en conducción. La ionización es equivalente a la pérdida total del campo de luz y, en consecuencia, contribuye a las pérdidas de transmisión de la fibra.

Absorción infrarroja. La absorción infrarroja es un resultado de fotones de luz que son absorbidos por los átomos de las moléculas, en el núcleo de vidrio. Los fotones absorbidos se convierten a vibraciones mecánicas aleatorias típicas de calentamiento.

Diafonía.- La diafonía (*crosstalk*) entre dos canales se define cuando una de las señales presente en uno de los canales interfiere a la otra, esto reduce la relación señal-a-ruido lo que resulta en un tasa de bits errados más alta (BER). En el medio óptico reconocemos dos tipos de diafonía:

1. *Diafonía Intercanal.*- Causada por señales que viajan en distintas longitudes de onda. Como medida preventiva se debe tener en cuenta el espacio entre longitudes de onda que viajan por un mismo hilo de fibra óptica al momento

de multiplexarlos. La diafonía intercanal se puede eliminar haciendo uso de filtros de banda estrecha.

2. *Diafonía Intracanal*.- Causada por señales que viajan en la misma longitud de onda en conductores distintos (guías de onda o fibras), este fenómeno es frecuente en el interior de los equipos de conmutación donde los distintos canales han sido demultiplexados y se transmiten a través de la estructura del conmutador de un puerto a otro. Este tipo de diafonía es de considerable preocupación ya que no puede ser eliminada haciendo uso de filtros.

1.3.2. Granularidad

La granularidad de un sistema, se refiere a la división del mismo en partes más pequeñas o simples, con el fin de analizar, estudiar u observar dicho sistema a un nivel o granularidad específica [4]. El concepto de *tamaño del grano* se aplica a las partes del sistema, por ejemplo si a un kilómetro lo dividimos en metros y milímetros, el metro tendrá una granularidad *gruesa* en comparación al milímetro que tiene una granularidad más *fina*. Muchos autores hacen uso extendido de este término en su literatura, para la descripción de los sistemas ópticos; de ahí la importancia de entender significado.

A nivel óptico encontramos granularidades descritas en la tabla 1.1, desde la más gruesa al inicio de la tabla, hasta la más fina [5].

Tabla 1.1. Granularidad Óptica

Fibra Óptica
Banda de longitud de onda
Longitud de Onda
Sub-longitudes de onda
Fotones

De manera similar se definen granularidades para el proceso de conmutación óptica como se detalla en la tabla 1.2. [5]

Tabla 1.2. Granularidad de Conmutación Óptica

Fibra Óptica
Banda de longitud de onda
Longitud de Onda
Sub-longitudes de onda
Circuitos ópticos
Ráfagas ópticas
Paquetes ópticos

1.4. Conmutación Óptica

Hasta aquí hemos analizado la evolución de las redes ópticas y de algunos de los dispositivos en funcionamiento en la actualidad, algunas funciones en estas redes son efectuadas en el dominio electrónico, lo que, como ya se ha señalado representa un limitante y no aprovecha las ventajas que puede brindar el medio óptico. La conmutación se puede definir como el proceso de direccionamiento y entrega de la información a través de una red, haciendo un uso eficiente de los recursos; a nivel electrónico este proceso supone el mayor retardo introducido en una red, debido muchas veces al procesamiento necesario para el envío de la información y al tráfico de la red. Es así que ha surgido gran interés en llevar este proceso al dominio óptico esperando obtener una comunicación transparente y alcanzar un diseño de red completamente óptico, con todas las ventajas que esto implica.

A nivel de conmutación debemos reconocer dos procesos: la conmutación en sí, llevada a cabo por equipos que básicamente lo que hacen es dirigir un flujo de datos de un puerto de entrada a un puerto de salida. A este proceso lo definiremos como conmutación física. Y la conmutación lógica, que rige la forma

en que la información viaja a través de la red (circuitos, paquetes), estableciendo la forma en que trabajarán los dispositivos de red.

1.4.1. Conmutadores Ópticos

El mayor progreso en el desarrollo y fabricación de conmutadores completamente ópticos se ha logrado en arquitecturas basadas en conmutación en el espacio, esto es dispositivos con puertos de entrada, puertos de salida, guías de onda y/o fibras para la transmisión de la luz y un mecanismo de conmutación que permita cambiar la estructura del dispositivo. El mecanismo de conmutación se caracteriza por componerse materiales que ante la acción de una fuerza física externa este último cambia sus propiedades ópticas, en muchos casos el índice de refracción del material. Así estas tecnologías de conmutación pueden ser clasificadas en base al efecto físico que ocasiona cambios en el material, acorde a la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Tecnologías de conmutación Óptica en el Espacio	
Efecto	Descripción
Electro-óptico	La aplicación de un campo eléctrico externo produce un cambio lineal en el índice de refracción.
Acústico-óptico	Una onda acústica causa el cambio en el índice de refracción.
Termo-óptico	Cambios en la temperatura del material modifican la magnitud del índice de refracción
Opto-mecánico	Dispositivos microscópicos logran la conmutación del haz de luz en base a funcionamiento mecánico.
Basado en amplificación óptica	Ejerciendo control electrónico sobre un amplificador óptico se logra crear una compuerta con la cual se puede controlar y guiar un haz de luz

En el siguiente capítulo nos enfocaremos en tecnologías basadas en el efecto electro-óptico y en amplificación óptica; y describiremos con mayor detalle

los conmutadores electro-ópticos de niobato de litio y los conmutadores basados en amplificadores ópticos de semiconductores (SOA por sus siglas en inglés). Estas dos tecnologías son de interés para nuestro estudio por dos razones: primero ambas han recibido gran atención y se han investigado en mayor grado que otras tecnologías, gracias principalmente a los avances en la fabricación de los materiales necesarios para la construcción de los conmutadores. Y segundo porque de los equipos basados en ambas tecnologías se espera una respuesta rápida, en cuanto a tiempos de conmutación se refiere; característica deseable para la implementación en modelos de conmutación de ráfagas y paquetes ópticos.

1.4.2. Conmutación Óptica: Circuitos, Paquetes y Ráfagas

El concepto de la conmutación de circuitos y conmutación de paquetes; es, en su nivel más básico, el mismo para redes completamente ópticas. Es así que abordaremos los aspectos más importantes de la conmutación de circuitos y paquetes para dar paso al tratado exclusivo de la conmutación óptica de ráfagas en el siguiente capítulo.

Conmutación Óptica de Circuitos

En la conmutación óptica de circuitos (OCS por sus siglas en inglés), un circuito óptico se establece levantando un camino de luz o *lightpath*, en una longitud de onda determinada, entre dos nodos. El enrutamiento por longitud de onda descrito previamente es considerado como un modelo de conmutación óptica de circuitos.

Las redes ópticas conmutadas por circuitos son sometidas a un proceso muy cuidadoso de diseño, tratando de usar el menor número de longitudes de onda posible para lograr el nivel de conectividad deseado.

Los criterios a ser considerados para el diseño de una red conmutada por circuitos, haciendo uso de WR; son: el diseño de la topología lógica, dado el tráfico de la red; se diseña una topología que haga uso eficiente de longitudes de onda tomando en cuenta costo, flexibilidad, rendimiento, etc.; estos parámetros dependen tanto de la tecnología de conmutación que se desee incluir en el diseño como del establecimiento de los *caminos de luz* en sí. Y la asignación de enrutamiento y longitudes de onda, que se hace en base a la topología física y los *caminos de luz* establecidos, determinando la mejor ruta de cada *camino de luz* para minimizar el uso de longitud de onda.

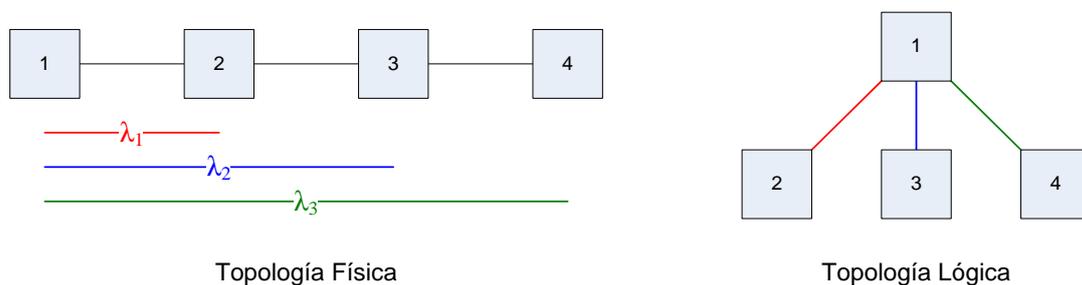


Fig. 1.6. Diseño de topología lógica usando enrutamiento por longitud de onda.

Inicialmente habíamos establecido que en una red WR se puede hacer uso de varios tipos de OXC's, dependiendo de cuál se implemente; OCS permitirá conmutar información en las granularidades de fibra óptica, longitud de onda o sub-longitudes de onda.

Comparada con otras tecnologías de conmutación, la conmutación óptica de circuitos es sencilla en su diseño e implementación, pero carente de flexibilidad lo que hace que estas redes sean más adecuadas para transportar grandes

volúmenes de datos. También con las tecnologías de equipamiento óptico actuales es posible construir una red conmutada por circuitos con total transparencia y a un relativo bajo costo.

Sin embargo la conmutación óptica de circuitos hereda las mismas limitaciones de su análogo electrónico, ya que el establecimiento de canales de comunicación dedicados impide un uso eficiente del ancho de banda disponible y no es posible hacer uso de modelos de multiplexación estadística, por lo que ante tráfico que exhibe tendencias aleatorias o intermitentes, como el tráfico de Internet; la conmutación de circuitos representa una solución ineficiente que hace mal uso de los recursos.

Conmutación Óptica de Paquetes

La conmutación de paquetes supone una asignación dinámica de los recursos, en donde el tráfico de varias fuentes puede compartir un enlace en un momento determinado, en un esquema de conmutación no orientado a conexión; agrupando los datos en paquetes a los cuales se adjunta información de control como: dirección de origen, dirección de destino, calidad de servicio, etc. Permitiendo conmutar en la granularidad del paquete, se puede hacer multiplexación estadística en la red, ideal para tráfico generado de forma intermitente, haciendo uso eficiente de los recursos. Este esquema de conmutación necesita que los nodos de comunicación tengan cierta capacidad de almacenamiento, necesaria mientras se realizan funciones de establecimiento de ruta; a nivel óptico esto plantea un problema debido a la falta de un dispositivo equivalente a las memorias electrónicas. Aun así se han planteado varias arquitecturas en respuesta a estas deficiencias y se espera que la conmutación de paquetes ópticos (OPS) sea el futuro de las redes de comunicaciones, lo que hace OPS es prácticamente imitar la conmutación de paquetes electrónica, teniendo en cuenta las limitaciones de las tecnologías ópticas de hoy en día.

En la figura 1.7. tenemos el esquema básico de un nodo OPS, las interfaces de entrada cumplen funciones necesarias para la conmutación de los paquetes como sincronización y establecimiento de inicio y fin de la cabecera y la carga útil (delineación); para luego enviar el contenido del paquete al conmutador y la cabecera a la unidad de control, mediante una conversión OE. La interfaz de salida realiza funciones de re-amplificación, re-formación y re-sincronización antes de multiplexar cada paquete para su envío, además de que añade una nueva cabecera actualizada. El conmutador óptico es la parte más importante del nodo, el mismo debe caracterizarse por altos tiempos de respuesta necesarios para intercambiar los paquetes a la velocidad demandada por la red. Solo tecnologías de conmutación como las electro-ópticas (EO) basadas en cristales de niobato de litio y de amplificadores ópticos con semiconductores (SOA) han sido consideradas para la implementación de OPS.

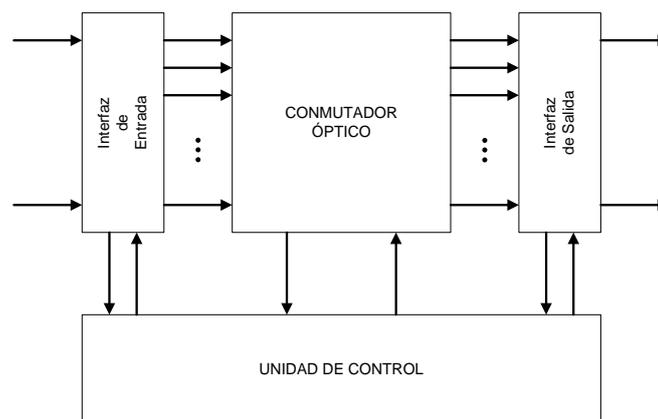


Fig. 1.7. Diagrama básico de un nodo OPS [5].

La unidad de control mantiene información como tablas de conmutación, topología de la red y almacenamiento. Esta unidad es la encargada de reconfigurar la estructura del conmutador cuando sea necesario y dada la complejidad y la cantidad de procesamiento involucrado en un corto período de tiempo se ha propuesto como alternativa inmediata delegar las funciones de la unidad de control a la electrónica. Es necesario aclarar que la unidad de control procesa exclusivamente la información contenida en el encabezado de cada paquete, mientras la carga útil permanece enteramente en el dominio óptico. A

este acercamiento se le conoce como conmutación óptica de etiquetas (OLS) y es considerado como una forma de conmutación óptica de paquetes. Pero aunque el control sea llevado a cabo por la electrónica, aun así hay que lidiar con el problema de pérdidas de paquetes debido a por ejemplo insuficiencia de recursos en un instante específico o el tráfico de la red; en un dispositivo electrónico este problema no presenta mayor inconveniente, ya que simplemente se almacenan los paquetes en una memoria electrónica hasta que los recursos necesarios estén disponibles.

Resolución de Contención.- Dentro del conmutador también se puede suscitar el caso en que dos o más paquetes tengan como destino un mismo puerto de salida al mismo tiempo, lo que ocasionaría errores de transmisión y pérdida de la información. Ante este evento la *contención* busca manejar el tráfico de paquetes de tal forma que no más de un paquete se dirija a un mismo puerto de salida al mismo tiempo. Las *resoluciones de contención* plantean técnicas en el tiempo (almacenamiento), longitud de onda (conversión de longitud de onda) y en el espacio (desviación por enrutamiento) para dar solución a este problema dentro de la estructura de conmutación OPS.

Almacenamiento.- El concepto de esta técnica es el mismo que en un equipo electrónico: almacenar temporalmente los paquetes que tienen el mismo puerto de salida hasta que esté disponible. Los *buffers* pueden ser colocados en los puertos de salida del conmutador, en los puertos de entrada o en una configuración en lazo.

Cuando los *buffers* se colocan en los puertos de salida, simplemente se almacenan en estos los paquetes que tienen como destino el mismo puerto y si un paquete encuentra un *buffer* lleno el mismo es descartado. Existe la alternativa de que los puertos de salida compartan un solo espacio de memoria, esta configuración es empleada comúnmente en los equipos electrónicos con el uso de memorias de acceso aleatorio; con esto se minimizan las pérdidas de paquetes ya

que el espacio de memoria no se limita a los paquetes de un puerto en particular, sino a todos los paquetes que ingresan al conmutador.

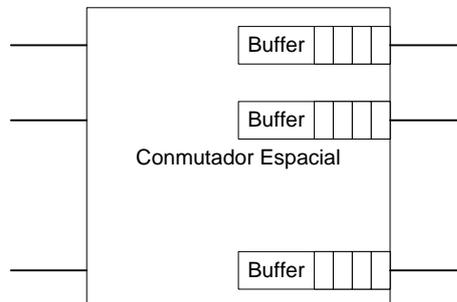


Fig. 1.8. Almacenamiento a la salida del conmutador [5].

Los *buffers* en un puerto de entrada operan igual que un *buffer* a la salida del conmutador, pero esta configuración tiene la desventaja que si un paquete ubicado al inicio de la cola no es liberado por falta de recursos retrasará a otros paquetes con destinados a otros puertos disponibles, a este evento se lo conoce como *head-of-line* (HOL). Esto hace que el almacenamiento a la entrada sea poco eficiente, aumente el retardo y pérdidas de paquetes.

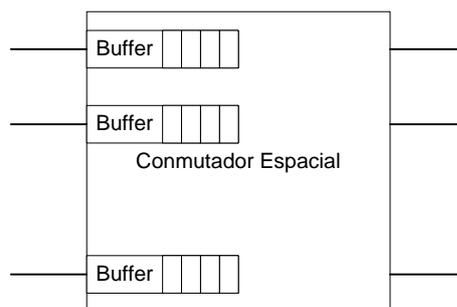


Fig. 1.9. Almacenamiento a la entrada del conmutador [5].

La configuración en lazo hace uso de puertos de entrada y salida del conmutador para formar lazos sobre los cuales se conmutan paquetes que han sido contenidos para que permanezcan en tránsito hasta la liberación del puerto necesario. No hace falta señalar que hacer uso de puertos adicionales del conmutador resulta poco eficiente y costoso, además que los paquetes en tránsito

tienen que pasar por el lazo y nuevamente por el conmutador y son expuestos a una mayor atenuación.

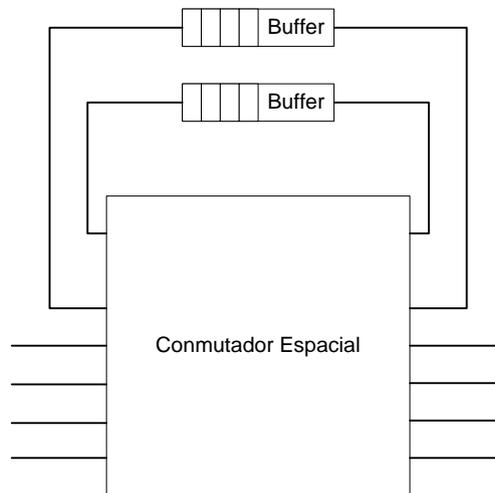


Fig. 1.10. Almacenamiento con configuración en lazo [5].

Conversión de longitud de onda.- Cuando dos o más paquetes en la misma longitud de onda se dirigen hacia el mismo puerto de salida, se aplica una conversión de longitud de onda sobre uno de ellos. Dado que este método no usa líneas de retardo, resulta más eficiente en comparación al almacenamiento óptico; también las arquitecturas propuestas son más sencillas de implementar.

Desviación por enrutamiento.- Cuando se da la contención de dos paquetes en un puerto de salida específico, se cambia el destino de uno de los paquetes hacia otro puerto. Esto resulta en que el paquete se dirija a otro nodo que no estaba previsto en la ruta del mismo. Este método implica un aumento en la latencia y el tráfico de la red. Esta resolución de contención también es aplicada en la conmutación óptica de ráfagas.

Formato del Paquete Óptico

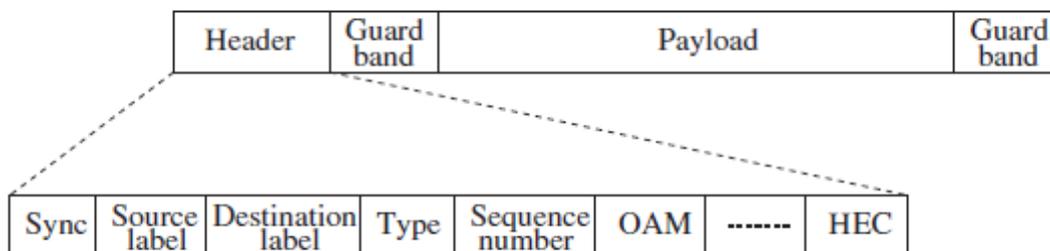


Fig. 1.11. Formato de un paquete óptico [5].

La información de cabecera, mantiene la característica de ser lo más compacta posible, para ayudar con el procesamiento de la misma.

Sync: bits de sincronismo y delineación.

Source Label: Etiqueta de dirección de origen.

Destination Label: Etiqueta de dirección de destino

Type: Tipo y prioridad del paquete y la carga útil.

Sequence Number: usado para reordenar los paquetes antes de su entrega final.

OAM: Funciones de operación, administración y mantenimiento.

HEC: Control de errores de cabecera.

Las bandas de guarda tienen el propósito de ayudar con el sincronismo al momento de arribo de los paquetes al nodo y su posterior desensamblaje, debido a que no se puede establecer un control tan preciso como se lo hace en un equipo electrónico.

Conmutación Óptica de Ráfagas

Debido a la baja flexibilidad y poca eficiencia que supone un esquema de conmutación de circuitos; y la falta de la tecnología necesaria para construir un nodo completamente funcional de conmutación óptica de paquetes; se ha planteado un nuevo paradigma de conmutación óptica: la conmutación óptica por ráfagas – optical burst switching OBS – que se lo puede considerar como un modelo híbrido entre la conmutación de circuitos y paquetes. El desarrollo de esta tecnología ha recibido gran interés en los últimos años, en parte por los grandes avances en cuanto a dispositivos ópticos se refiere, pero limitados todavía a nivel de procesamiento y almacenamiento. El siguiente capítulo cubre con detalle la teoría de OBS, conceptos básicos, funcionamiento, arquitecturas, entre otros; y nos llevará a entender las ventajas que puede ofrecer a mediano y corto plazo, como tecnología de conmutación.

CAPÍTULO 2

CONMUTACIÓN ÓPTICA POR RÁFAGAS – OBS

2.1. Principios de la Conmutación Óptica por Ráfagas

La conmutación óptica de ráfagas, OBS por sus siglas en inglés (Optical Burst Switching) es una nueva propuesta de conmutación que busca combinar lo mejor de la conmutación de circuitos y la conmutación de paquetes, tratando de evadir sus limitaciones [6]. La mayor motivación para el desarrollo de esta tecnología nace del hecho de que un gran porcentaje del tráfico que cursa por una red de comunicaciones se presenta en forma de ráfagas, esto es: conexiones cuya duración es relativamente corta si la comparamos con el tiempo que lleva establecer dicha conexión; además de que en algunos casos se demanda un gran ancho de banda y alta calidad de servicio por parte de esta conexión. Este patrón de tráfico es producido por protocolos de capas superiores como IP y por las características innatas de las diferentes aplicaciones de usuario final. Si a esto se suma el éxito de las tecnologías WDM, usadas comúnmente para enlazar dos puntos en una red; nace un interés y una necesidad de desarrollar una tecnología que permita que estas redes WDM, donde la conmutación todavía se realiza en el dominio electrónico, que como ya se señaló genera un cuello de botella a nivel de ancho de banda; puedan llevar este tráfico intermitente de una forma efectiva y eficiente.

El esquema de conmutación bajo demanda establece que una red se adapte al patrón de tráfico actual de esa red; bajo este esquema tenemos las ya conocidas conmutaciones de circuitos y paquetes. Por un lado la conmutación óptica de circuitos usando enrutamiento por longitud de onda, establece comunicación entre dos puntos de red (no necesariamente consecutivos) levantando un canal óptico o *lightpath*, al cual se le asigna una longitud de onda; el canal permanece abierto mientras dure la comunicación y los recursos asignados no pueden ser reclamados por ningún otro usuario (ancho de banda, puertos, longitud de onda). Este escenario puede resultar atractivo para una conexión que demande gran ancho de banda por un período de tiempo, pero para el caso de tráfico en forma de ráfagas representa un desperdicio de recursos de red; además que la alta transparencia de la red, aunque deseable en algunos

casos, también representa pérdida del control sobre los datos, dificultando funciones por ejemplo de monitoreo o recuperación. Vale la pena añadir que a nivel tecnológico la conmutación óptica de circuitos tiene un estado bastante maduro en comparación a otras tecnologías de conmutación.

Por otro lado la conmutación óptica o fotónica de paquetes/celdas, donde los datos contenidos en paquetes se enrutan a lo largo de la red en base a la información de destino contenida en una cabecera presente en cada paquete (que es procesada ópticamente o electrónicamente luego de una conversión O/E) y una tabla de enrutamiento propia de cada nodo; se ajusta a la perfección al tráfico de ráfagas y permite un alto grado de multiplexación estadística, además que existe control de la información facilitando funciones de diferenciación de servicio. Pero a nivel óptico, la tecnología propone varios desafíos, aún por alcanzarse: almacenamiento óptico, la conmutación de paquetes implica capacidad de almacenamiento en cada nodo y la tecnología de memorias ópticas se encuentra en un estado poco desarrollado en la actualidad; lógica óptica, operaciones lógicas elementales son en extremo complejas de realizar en el dominio óptico con la tecnología disponible y dificultad en la implementación de métodos de contención de forma eficiente y efectiva.

Es así que se ha presentado como una solución emergente un nuevo modelo de conmutación: la conmutación de ráfagas, desarrollado especialmente para soportar tráfico intermitente (ráfagas); combinando lo mejor de la conmutación de circuitos y paquetes, teniendo en cuenta sus respectivas limitaciones. Ya desde el año 1999 el desarrollo de esta tecnología ha recibido gran interés por parte de la comunidad internacional una de las primeras investigaciones en esta área [6], define las bases para la implementación de esta tecnología y sirvió como punto de partida para muchos trabajos posteriores que abordan problemas específicos en OBS.

Funcionamiento General de OBS

En OBS se agrupan dos o más paquetes con un mismo destino, esto se lleva a cabo en un nodo, al cual nos referiremos de ahora en adelante como nodo de frontera o de borde; para formar la llamada ráfaga. Por cada ráfaga se genera un paquete de control, que contiene información para la reserva de recursos y configuración de las estructuras de conmutación. Primero se envía el paquete de control en un canal independiente (una longitud de onda distinta a la que se usará para transmitir la ráfaga); la ráfaga es enviada luego de transcurrido un intervalo de tiempo denominado *offset*. Esta es una característica exclusiva de OBS. El tiempo de *offset* es necesario para permitir que el paquete de control termine de reservar los recursos en cada nodo que participará del proceso de transmisión de la ráfaga y configurar la estructura de los conmutadores. Una vez expirado el tiempo de *offset* es enviada la ráfaga, la cual pasará de forma transparente, de extremo a extremo. Suponiendo que el paquete de control haya tenido éxito en la reserva de recursos. Durante el tiempo de creación del paquete de control y el tiempo de *offset*, la ráfaga permanece almacenada en el dominio electrónico en el nodo de borde.

2.2. Arquitectura de Red

La estructura de una red óptica conmutada por ráfagas, se compone de dos elementos fundamentales: nodos de borde y nodos de núcleo, cada uno con funciones específicas. La diferencia trascendental entre un nodo de núcleo y uno de borde es que contienen equipos de enrutamiento de núcleo y de borde respectivamente, los cuales se diferencian claramente en cuanto a funcionalidad y estructura. Adicionalmente los nodos de borde se subdividen en nodos de ingreso y nodos de egreso, es en los nodos de ingreso donde se inicia la transmisión y se ensambla las ráfagas; en los nodos de egreso se termina la comunicación y las ráfagas son desensambladas.

2.2.1. Enrutadores de Borde

Sirven como puntos de agregación de tráfico; y de tránsito, entre la red OBS y otras redes basadas en otras tecnologías que trabajan en capas superiores. En otras palabras funcionan como interfaz para la red OBS con otras redes. Sus principales funciones comprenden:

- Clasificación de los paquetes.
- Almacenamiento.
- Ensamble de las ráfagas.

La estructura del enrutador se compone de tres elementos fundamentales: un módulo de enrutamiento, una unidad ensambladora de ráfagas y una unidad de temporización/programación. El módulo de enrutamiento convierte las direcciones de capas superiores en direcciones de red OBS. En base a la dirección OBS de destino se dirigen los paquetes hacia una unidad de ensamble, esta construirá ráfagas con paquetes que tienen el mismo nodo de egreso como destino, estas unidades cuentan con un *buffer* independiente para cada clase de tráfico. Luego el temporizador programa las ráfagas para su transmisión por medio de un algoritmo. También es función del enrutador de egreso la creación del paquete de control y de determinar el tiempo de *offset*.

Las secciones 2.5.1 y 2.9.2 abordan el tema de segmentación de la ráfaga, entre otros aspectos esta técnica se usa como método de contención y de diferenciación de servicio ubicando paquetes de alta prioridad en los primeros segmentos de la ráfaga. En la arquitectura presentada previamente se ensamblan ráfagas que contienen paquetes con requerimientos de calidad de servicio similares; si se usase una técnica de segmentación de ráfagas, cada *buffer* dentro de los ensambladores dejaría de ser usado para una clase de tráfico en particular y el ensamblaje sería ejecutado conforme a un algoritmo especial. Dado que cada

unidad de ensamble clasifica los paquetes basándose en la información de cabecera, la inclusión o no de una técnica de segmentación no implica cambios en el *hardware* del equipo, los cambios serían regulados a nivel de *software* solamente.

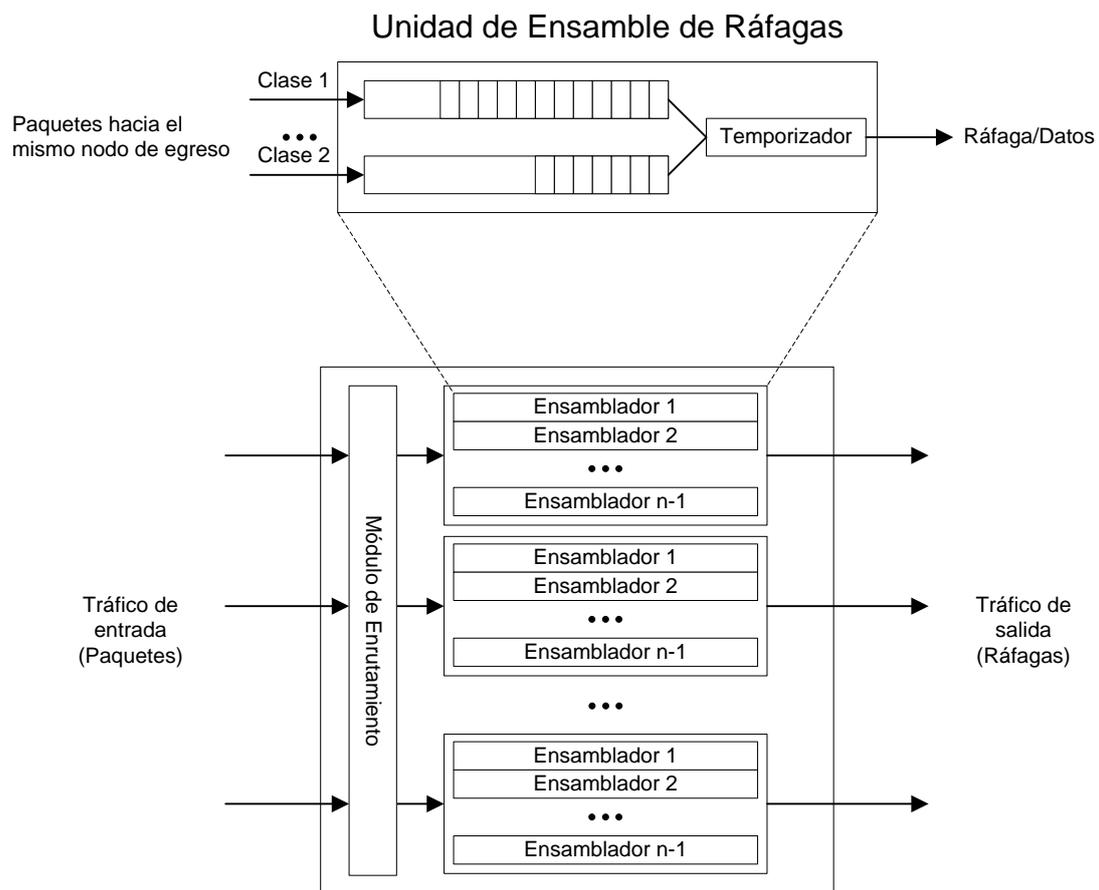


Fig. 2.1. Arquitectura de un enrutador de borde de ingreso [11].

La estructura de un enrutador de egreso es similar a la parte de ingreso de un enrutador de núcleo, primero se demultiplexa cada enlace, luego cada canal de datos pasa a una unidad de desensamble de ráfagas y los paquetes de control a unidad de procesamiento. La ráfaga es convertida al dominio electrónico, los paquetes son separados con la ayuda de la información contenida en el paquete de control y cabecera; y se conmutan hacia sus destinos de capa superior.

2.2.2. Enrutadores de Núcleo

Un enrutador de núcleo se compone de dos estructuras: una unidad de control y una estructura de conmutación. En la figura 2.2 se muestra la arquitectura básica de un enrutador de núcleo: cada enlace entrante es demultiplexado, los canales de control son dirigidos hacia la unidad de control y los canales de datos hacia la estructura de conmutación. Los canales de control son sometidos a un proceso de conversión OE e ingresan en una unidad de procesamiento y programación de datos, la cual en base a la información del paquete recibido configura la estructura de conmutación y asigna longitudes de onda. Luego la información del paquete de control es actualizada, el paquete pasa por un proceso de regeneración y vuelve al dominio óptico por medio de una conversión EO.

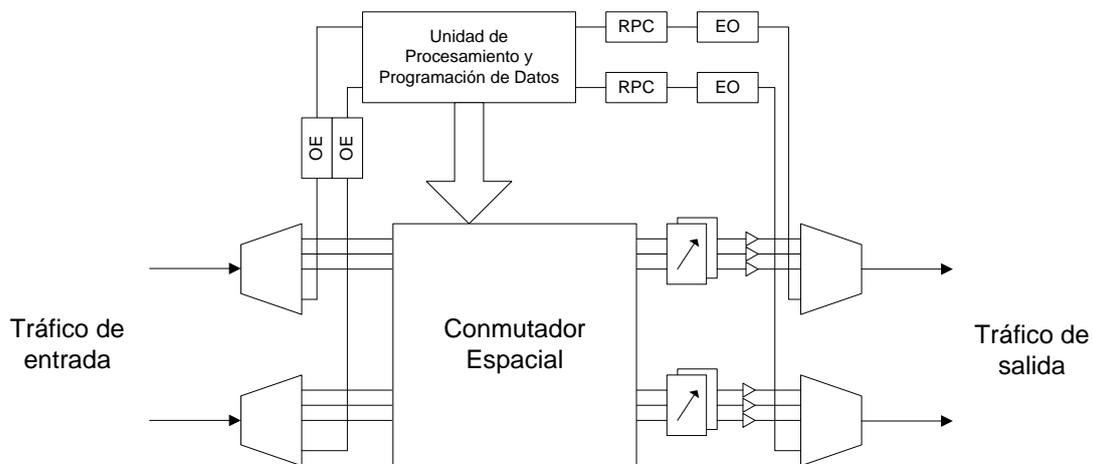


Fig. 2.2. Arquitectura de un enrutador de núcleo [11].

Previo al arribo de la ráfaga la estructura de conmutación ya ha sido configurada, por lo tanto la ráfaga pasa a través del enrutador (*cut-through*). Los puertos de salida del conmutador pueden incluir convertidores de longitud de onda, para ser usados por la unidad de control como parte del proceso de asignación de longitudes de onda o como un mecanismo de contención. También

se incluyen amplificadores ópticos. Para finalizar, a la salida los canales se vuelven a multiplexar.

La estructura de un enrutador de núcleo puede incluir una unidad de contención basada en líneas de retardo de fibra. La cual, como se tratará en la sección 2.9.1, tiene la función de contener a las ráfagas que no cuentan con recursos suficientes para su transmisión, a fin de reducir las pérdidas de datos en la red.

2.2.3. Arquitectura de Nodo

Un nodo OBS incluye distintos tipos de equipos en su estructura, dependiendo de las funciones que se desee que este punto desempeñe. Así por ejemplo un nodo de borde estará constituido tanto de enrutadores de ingreso como de egreso; un nodo de núcleo también puede añadir funciones de adición/remoción de tráfico (*add/drop*) si es que se necesitase que este punto sirviera de interfaz con otra red implementada sobre otra plataforma tecnológica.

Un elemento fundamental en toda red óptica es la estructura de conmutación óptica, su función es la de dirigir los paquetes/ráfagas que ingresan por uno de los puertos de entrada hacia un puerto de salida específico. En la sección 1.4.1 se enumeran algunas tecnologías de conmutación óptica; de todos estos conmutadores espaciales, las tecnologías de niobato de litio y las basadas en SOA's han sido consideradas para la implementación de OBS. Una de las razones es que los procesos de fabricación tanto de los cristales ferromagnéticos de niobato de litio, como de los amplificadores ópticos de semiconductores; se han desarrollado notablemente en los últimos años, permitiendo la producción en masa de dichos componentes y la reducción de su costo. Además en los conmutadores que emplean estas tecnologías los tiempos de conmutación son lo suficientemente bajos como para que sean usados en una red óptica conmutada

por ráfagas o paquetes; esto significa también que el uso de estos conmutadores permitiría contar con una estructura de red adaptable y modular, ya que ambas tecnologías pueden ser usadas para conmutar ráfagas o paquetes.

A continuación se describen los dos tipos de estructuras de conmutación.

Conmutador Electro-Óptico de Niobato de Litio

El efecto electro-óptico establece que ciertos materiales son susceptibles a cambios en sus propiedades ópticas, bajo la influencia de una fuerza física externa, en este caso un campo eléctrico. Estos cambios pueden involucrar tanto a la absorción del material como al índice de refracción.

Fórmula Molecular	LiNiO ₃
Masa Molar	147.846 g/mol
Apariencia	Sólido sin color
Densidad	4.65 g/cm ³
Índice de refracción	2.007
Punto de fusión	1150-1250 °C

El niobato de litio es un cristal con características ferroeléctricas que exhibe dipolos eléctricos en su estructura molecular, inclusive sin la necesidad de aplicar un campo eléctrico. El cristal se forma en sustratos grandes, presenta una pequeña constante dieléctrica y bajo consumo de potencia. Lo que sucede a nivel atómico en la estructura del cristal cuando se aplica el campo es un desplazamiento de electrones y de la estructura del cristal en sí, lo que resulta en un cambio del índice de refracción del material, que varía de forma lineal y proporcional en función de la magnitud del campo eléctrico aplicado. A este efecto

se lo conoce como el *efecto Pockels*. De los materiales basados en este efecto se espera una respuesta rápida, característica que hereda el conmutador.

El proceso de fabricación de estos cristales es similar al de un circuito integrado, lo que permite una producción en masa.

Temperatura Curie.- A esta temperatura desaparece el dipolo eléctrico. Factor importantísimo a ser tomado en cuenta en el proceso de fabricación del cristal. Para el niobato de litio esta temperatura fluctúa entre 1120 y 1210 °C

El mecanismo de refracción es construido en base a deflectores, con control de fase; el deflector cambia el ángulo de refracción de la luz usando una señal eléctrica analógica, esto se logra incluyendo prismas electro-ópticos en la estructura del deflector.

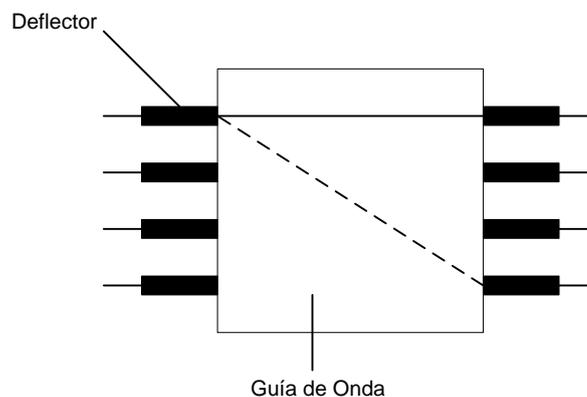


Fig. 2.3. Arreglo de deflectores

Para la realización del prisma electro-óptico, primero se usa una lente para colimar¹ el haz de luz, el haz de rayos paralelos pasa a una guía de onda que lo dirige hacia la faz inclinada del prisma. Se colocan electrodos en la superficie de

¹ Colimar: Obtener un haz de rayos paralelos a partir de un foco luminoso

la guía de onda prismática y aplicando un voltaje se genera un campo eléctrico que cambia el índice de refracción del prisma, según el efecto Pockels.

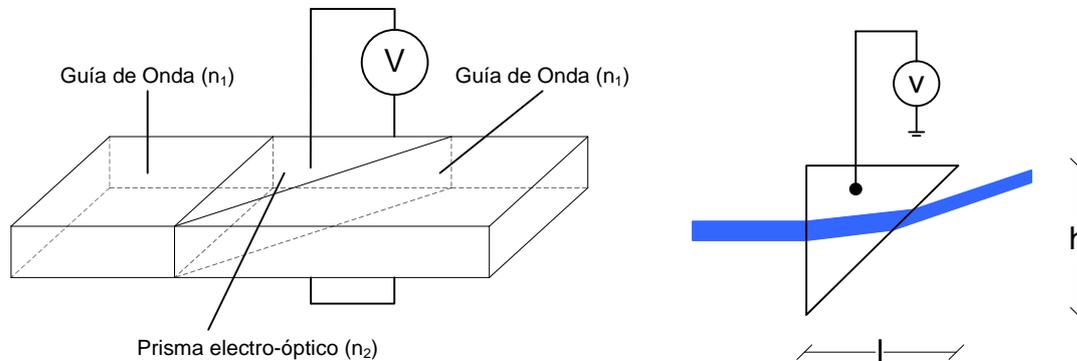


Fig. 2.4. Prisma electro-óptico

De acuerdo a la ley de Snell el haz de luz es refractado con un ángulo de refracción Θ dado por:

$$\Theta = \Delta n l (nh); \quad 2.1.$$

Donde Δn es la variación del índice de refracción ($\Delta n = n - n_0$); n_0 es la magnitud del índice de refracción sin la presencia del campo eléctrico; l largo del prisma y h alto del prisma. Para el diseño del prisma se debe considerar que la separación entre los electrodos sea suficiente para generar el campo eléctrico necesario a un voltaje razonable. Por otro lado se pueden usar arreglos de primas para alcanzar una mayor variación en el ángulo de refracción.

Guías de Onda.- Una guía de onda que opera a frecuencias vistas en el medio óptico, normalmente está hecha de un material dieléctrico de alta permitividad y en consecuencia un alto índice de refracción; y rodeada de un material de baja permitividad. Así guía la luz por reflexión interna total. El ejemplo más común de estos elementos es la fibra óptica. En los conmutadores electro-ópticos, su

función es la de transportar la luz hasta la entrada de un deflector y recogerla a la salida para bien llevarla a otro deflector o a la salida del conmutador.

Las tecnologías electro-ópticas han recibido gran interés desde ya hace algún tiempo y se espera se sigan desarrollando en el futuro, con la construcción de conmutadores más robustos capaces de manejar un número mayor de puertos. Como se señaló previamente en esta sección, el cristal de niobato de litio tiene una rápida respuesta a la acción del campo eléctrico aplicado sobre él; por esta razón los conmutadores construidos a partir de este material pueden ser usados en sistemas de conmutación de paquetes y ráfagas ópticas.

Conmutadores Ópticos basados en SOA's.

Los SOA's (por sus siglas en inglés: Semiconductor Optical Amplifier), son elementos ópticos de amplio uso en conmutación, conversión de longitud de onda, regeneración de señal, recuperación de reloj, etc. En consecuencia se ha desarrollado una gran industria de manufacturación de estos componentes, mejorando sus características de fabricación y reduciendo su precio. Un SOA usa un material semiconductor como medio de ganancia, donde la luz incidente es amplificada por emisión espontánea.

La estructura de un SOA se compone de dos superficies antirreflejantes que envuelven una guía de onda fabricada con material semiconductor (normalmente InGaAsP/InP), que es energizado por una corriente eléctrica interna. La luz es agrupada por una de las facetas antirreflejantes y dirigida hacia la guía de onda. La juntura p-n o más frecuentemente p-i-n, recombina electrones y huecos emitiendo energía en forma de fotones, que son recogidos por el haz de luz incidente causando su amplificación, al otro extremo la faceta restante apareja el rayo de luz y lo inyecta en una fibra óptica. Un SOA normalmente opera entre 1.3 y 1.5 μm y ofrece una ganancia de hasta 30 dB [7].

Aplicación en tecnologías de conmutación.- La tecnología de los SOA's se aplica en diseños de conmutación espacial. Básicamente estos dispositivos usan al SOA como una compuerta, encendiendo o apagando la alimentación de corriente eléctrica hacia el semiconductor. Así se utilizan arreglos de SOA's para construir distintos tipos de arquitecturas; y se han obtenido velocidades de conmutación de varias decenas de Gigabits por segundo (tiempos de respuesta menores a 1 ns.) en equipos basados en esta tecnología.

Conmutadores Espaciales basados en SOA's.- Usando SOA's en arquitecturas espaciales como *Broadcast and Select* se puede alcanzar altas velocidades de conmutación, desplegando arreglos de SOA's junto con divisores ópticos afinados en las diferentes longitudes de onda sobre las cuales trabaja el conmutador. El principio de funcionamiento basado en esta arquitectura es bastante simple: apagando varios SOA's se puede dirigir la información contenida en un haz de luz a cualquier puerto de salida que se especifique. La estructura de conmutación $n \times n$ de la figura 2.5. usa a la entrada divisores de $1 \times n$ que envían el canal a arreglos de compuertas de SOA's de $1 \times n$.

Selectores de longitud de onda.- Aplicando principios similares al del conmutador basado en una arquitectura *broadcast and select*, se pueden construir selectores de longitud de onda con SOA's. Haciendo uso de un demultiplexor a la entrada un conjunto de compuertas SOA se utiliza para seleccionar una o varias longitudes de onda que serán multiplexadas a la salida.

En la actualidad el reto de diseño y fabricación se centra en la obtención de paquetes de SOA's más compactos y avanzados, que presenten menores pérdidas de inserción. Ya con las ventajas antes expuestas de una alta velocidad de conmutación y un relativo bajo precio de fabricación, los dispositivos basados en esta tecnología han atraído gran interés en investigación y desarrollo para aplicación en equipos de conmutación [1].

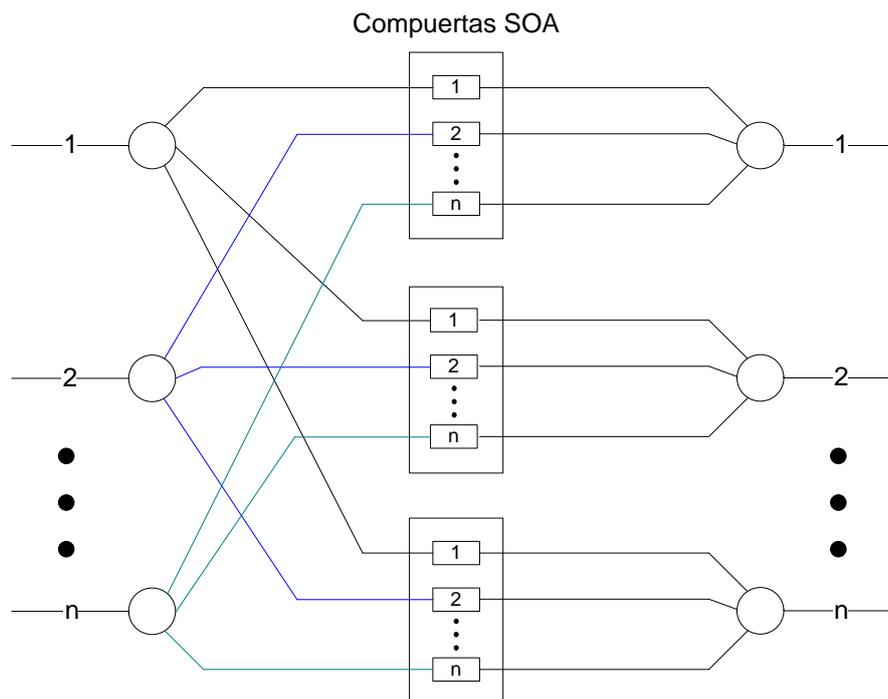


Fig. 2.5. Conmutador Espacial Broadcast and Select con compuertas SOA [1].

2.3. Arquitectura por Capas en OBS

Dado que OBS introduce algunas funciones exclusivas en el diseño de red, es necesario definir las, en un esquema modular por capas. Tomando como referencia el modelo OSI, es en la capa de enlace de datos donde se albergarán las especificaciones de OBS; ya que tratándose de una tecnología de transporte y tomando en cuenta su modo de funcionamiento es imperativo que las funciones de control y en sí el procesamiento se mantenga en el nivel más simple posible. También es necesaria la definición de ciertas funciones a nivel físico para la interacción de esta capa con la de enlace de datos.

Además se busca lograr una completa interacción con protocolos y capas superiores, en especial con IP; debido en gran medida al crecimiento generalizado de esta clase de tráfico.

2.3.1. Capa Física

A nivel físico se necesita de funciones de temporización entre ráfagas y paquetes de control, tanto en los nodos de borde como en los nodos de núcleo. Por otro lado los nodos de núcleo necesitan implementar funciones de contención de las ráfagas recibidas.

Además se especificarán interfaces entre equipos OBS, códigos de línea, tasas de transmisión. Los paquetes de control pueden tener una tasa de transmisión menor que las ráfagas, otorgando mayor tiempo para el procesamiento de estos; además que el plano de control sería más estable y menos propenso a bloqueos y pérdidas de paquetes de control.

2.3.2. Capa de Enlace de Datos

A la capa de enlace de datos se ha planteado dividirla, para la asignación de funciones, en un plano de datos y un plano de control [8]. Esto basado en los principios de funcionamiento de OBS, donde todas las funciones se ejecutan de forma independiente, gracias a que la información necesaria es contenida en un paquete de control y señalizada fuera de banda. También debemos diferenciar funciones específicas para los nodos de borde y núcleo. Otra función importante de esta capa es la del control de acceso al medio, el cual se hace tomando en cuenta las características de la capa óptica (física).

En el plano de datos la mayor carga de funciones se encuentra en los nodos de borde, ya que la unidad básica, que es la ráfaga atraviesa de forma transparente los nodos de núcleo. Así en la tabla 2.2 se definen las funciones necesarias en el plano de datos:

Tabla 2.2. Funciones realizadas en el plano de datos	
Nodos de Borde	Encapsulamiento de paquetes/celdas en ráfagas.
	Separación de la ráfaga en PDU's de capas superiores.
	Reconocimiento de características como dirección de destino y requerimientos de calidad de servicio.
	Traducción de direcciones de capas superiores (IP) en direcciones OBS.
	Asignación de tiempo de Offset.
	Señalización.
Nodos de Núcleo	Reserva de recursos.
	Configuración de las estructuras de conmutación.
	Resolución de contenciones.
	Diferenciación de servicio.
	Señalización.

Dado que el paquete de control es convertido al dominio electrónico para su procesamiento, es necesario que toda la información que se incluya en este se mantenga lo más simple posible, para ayudar a disminuir el procesamiento en los nodos de núcleo. Son funciones del plano de control, tanto en los nodos de núcleo como de borde: temporización, resolución de contenciones, control de *offset*, señalización enrutamiento y asignación de longitud de onda.

Más adelante en las siguientes secciones se analizarán cada una de estas funciones y para el caso del plano de control veremos que algunas de ellas difieren cuando son realizadas en un nodo de núcleo o de borde.

2.4. Establecimiento de la Ruta

Una red OBS puede realizar el encaminamiento de los datos de dos formas: mediante el intercambio de tablas de enrutamiento y haciendo uso de protocolos de enrutamiento basados en GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching).

El enrutamiento fijo (intercambio de información de topología de red) puede realizarse de forma similar en una red OBS a como es hecho en redes conmutadas en el dominio electrónico. Existen dos alternativas posibles a ser implementadas: haciendo uso de algoritmos de *camino-más-corto* (*shortest-path*), pero el uso de este tipo de algoritmos acarrea el problema de que algunos enlaces se mantendrían subutilizados, dada la preferencia del algoritmo por ciertas rutas en particular. Otra opción es que la ruta sea calculada en su totalidad por los nodos de borde, la información de la ruta se contiene entonces en el paquete de control y es recogida por cada nodo; la desventaja de este método es el alto procesamiento que implica, ya que añade información en cada paquete de control.

El protocolo GMPLS, en proceso de estandarización, es una evolución de MPLS. Diseñado con el objetivo de la integración de las diversas tecnologías de transporte a redes ópticas opacas y completamente ópticas. MPLS fue diseñado para trabajar sobre redes conmutadas por paquetes; pero dado que las redes ópticas acarrearán diversos tipos de tráfico, sea: ATM, IP, Frame Relay, etc. y además que la conmutación en estas redes se hace, o puede hacerse en diferentes granularidades: conmutación de fibra, longitudes de onda, bandas de longitudes de onda, circuitos, ráfagas paquetes; y además que por una fibra multiplexada en longitud de onda y conmutada en el espacio, transitan datos que previamente fueron multiplexados y conmutados en el tiempo; es natural que el protocolo MPLS tenga que ser “generalizado” para brindar un plano de control eficiente, sencillo y fácil de administrar; que permita la integración de redes ópticas con otras redes [5][9].

GMPLS extiende las funciones de MPLS, uno de los cambios más relevantes es en cuanto a las etiquetas y los LSP (Label Switched Path). Las etiquetas en GMPLS son de longitud variable y contienen la información de conmutación, sea que especifiquen una longitud de onda o para el caso de OBS una ráfaga, o incluso heredar la misma etiqueta MPLS de una red ATM con información de VCI/VPI. En cuanto a un LSP, dado que por una fibra se

transmiten datos a diferentes velocidades y multiplexados en longitudes en onda; es necesario que para establecer un LSP en una red óptica se requiera de información acerca del tipo de codificación del LSP, el tipo de conmutación que se va a usar y el ancho de banda que requiere el LSP. De esta forma ahora denominamos a estas etiquetas: *etiquetas generalizadas*; y a los LSP's: G-LSP (Generalized LSP).

GMPLS se ajusta perfectamente a las necesidades de una red OBS, dada su estructura modular. Además de que proveería un plano de control eficiente y de fácil administración, sin mencionar el hecho de la integración de OBS a otras redes.

2.5. Ensamblaje de la Ráfaga

En una red OBS, las ráfagas son ensambladas en los nodos de borde para su envío. Los paquetes que conformarán la ráfaga son clasificados de acuerdo a su dirección OBS de destino y requerimientos de calidad de servicio. Los paquetes que ingresan a un nodo son almacenados en el dominio electrónico durante el proceso de ensamblaje, una vez formada la ráfaga esta es almacenada, también en memorias electrónicas mientras está a la espera de que se venza el tiempo de *offset* y sea transmitida.

Existen criterios adicionales a ser tomados en cuenta para la creación de ráfagas, como por ejemplo el tamaño. Estos son implementados en algoritmos para el ensamble de ráfagas, existen dos parámetros fundamentales para el diseño de algoritmos de ensamble: el tiempo que demora construir una ráfaga y el tamaño de esta.

2.5.1. Algoritmos de Ensamblaje

Las dos clases fundamentales de algoritmos para el ensamble de ráfagas, los basados en el tiempo y los basados en tamaño, basan su funcionamiento imponiendo estos parámetros como límites; al vencerse el límite, finaliza el proceso de construcción de la ráfaga y esta se encuentra lista para su envío.

Los algoritmos basados en el tiempo, realizan el proceso de ensamble durante un intervalo fijo de tiempo (T), durante el cual se incluyen paquetes a la ráfaga. Vencido este tiempo T , se da por finalizado el proceso y la ráfaga puede ser transmitida (se envía el paquete de control y luego de vencido el tiempo de *offset* se envía la ráfaga).

Los algoritmos basados en tamaño ensamblan una ráfaga de tamaño fijo L , una vez que la ráfaga ha alcanzado ese tamaño es enviada.

Estos algoritmos, que trabajan solo en base a un parámetro, no se ajustan a todas las condiciones de tráfico que pueden presentarse. Tomemos el caso cuando el tráfico de paquetes hacia un nodo de borde es bajo: un algoritmo basado en tiempo es ideal ya que alcanzado el límite impuesto por T , la ráfaga es enviada; pero un algoritmo basado en tamaño puede dejar pasar demasiado tiempo hasta alcanzar el límite L , aumentando la latencia de la red. El caso inverso plantea un problema similar: bajo condiciones de tráfico alto, un algoritmo basado en tamaño enviaría la ráfaga una vez alcanzado el límite L , pero un algoritmo basado en tiempo puede esperar demasiado, haciendo que se construyan ráfagas excesivamente grandes, aumentando el uso de recursos, la probabilidad de bloqueo y de pérdida de ráfagas.

Es así que se ha planteado un tercer tipo de algoritmos híbridos, los cuales fijan límites de tiempo y tamaño, vencido cualquiera de los dos la ráfaga es enviada.

Se ha propuesto el uso de algoritmos con estructuras más avanzadas, como el algoritmo *forward resource reservation* (FRR) [10] el cual se basa en la ejecución de dos funciones: predicción del tamaño de la ráfaga y preenvío de los paquetes de control. Su funcionamiento se describe a continuación en varias etapas:

1. Se inicia el ensamblaje de una nueva ráfaga en t_0 y se predice su tamaño en base a la información de ráfagas anteriores.
2. Se inicia la creación del paquete de control en t_0 y se incluye la predicción del tamaño de la ráfaga, el paquete de control es enviado en t_1 , sin esperar a que se termine con la construcción de la ráfaga.
3. Cuando se termina de ensamblar la ráfaga se compara el tamaño real con el tamaño predicho.
4. Si el tamaño predicho es menor o igual al tamaño real se envía la ráfaga vencido el tiempo de *offset*.
5. Si el tamaño predicho es mayor al tamaño real se asume que no se reservaron los recursos necesarios y se retransmite el paquete de control en t_2 , actualizado con la información real de la ráfaga. Luego la ráfaga se transmite vencido el tiempo de *offset*, el retardo total para la transmisión de la ráfaga en este caso sería el tiempo de *offset* mas el tiempo de creación del paquete de control; o sea el retardo normal.

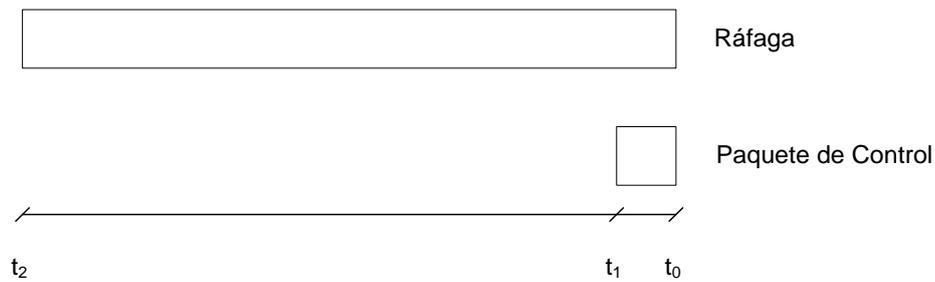


Fig. 2.6. Evolución temporal del proceso de ensamblaje usando el algoritmo FRR.

FRR permite la superposición del proceso de ensamblaje y la conformación del paquete de control reduciendo la latencia de la red a expensas de un incremento del costo computacional en los procesadores de los nodos de borde.

Una aproximación basada en algoritmos híbridos plantea que el ensamblaje de la ráfaga sea hecho en segmentos, para que al usarse en conjunto con un mecanismo de contención que contempla la segmentación de la ráfaga se provea de una técnica de diferenciación de servicio.

Como se tratará en la sección 2.9.2 en la segmentación de la ráfaga se puede descartar los últimos segmentos de esta (*tail dropping*). Es así que el algoritmo de ensamblaje ubica paquetes de alta prioridad en los primeros segmentos, que son menos propensos a ser descartados; y paquetes de baja prioridad en los últimos segmentos de la ráfaga.

2.6. Offset

Una de las características más sobresalientes de OBS es su sistema de señalización fuera de banda. El paquete de control no solo se encuentra separado de los datos en el dominio del espacio sino también en el dominio del tiempo. Este intervalo de tiempo que separa el paquete de control de los datos contenidos en una ráfaga, de forma premeditada, es denominado tiempo de *offset*. Este espacio

sirve para dar suficiente tiempo hasta que el paquete de control sea procesado en todos los nodos intermedios y reserve los recursos necesarios para la transmisión de la ráfaga.

De forma ideal el tiempo de *offset* equivale al retardo de transferencia más el retardo de procesamiento en cada nodo de núcleo, puede ser determinado en los nodos de borde previo conocimiento de la ruta que tomará determinada ráfaga. Pero existe la probabilidad de que una ráfaga tenga que ser contenida (ver sección 2.9) agregando cierto tiempo de retardo o inclusive nuevos saltos en la ruta; es por eso que los nodos de núcleo tienen la tarea de actualizar la información de tiempo de *offset*.

Una correcta determinación del tiempo de *offset* es crítica para mantener eficiencia en cuanto a la cantidad de tráfico que cursa por la red. Ya que una tendencia a tiempos de *offset* pequeños incrementa el tráfico de ráfagas, lo que puede resultar en una tasa de pérdida de ráfagas mayor. Por otro lado tiempos de *offset* demasiado altos traen como consecuencia que se desperdicie recursos de red, en particular ancho de banda.

2.7. Paquete de Control

El paquete de control contiene toda la información necesaria para el establecimiento de una conexión en una red OBS. Es importante que el tamaño del paquete de control se mantenga lo más pequeño posible a fin de reducir el retardo de procesamiento en la red. Dos campos fundamentales que debe tener este paquete son el tiempo de *offset* y el tamaño de la ráfaga. Estos dos parámetros son indispensables para que los nodos de núcleo hagan reserva de recursos, sea que se use o no un algoritmo de programación, el cual también trabaja en base a esta información. El último parámetro indispensable que debe

contener un paquete de control es una dirección de destino hacia uno de los nodos de borde.

Dado que OBS todavía no cuenta con un estándar y esta tecnología incluye muchas características en su funcionamiento, características que todavía se encuentran en proceso de evaluación y simulación; no es viable establecer un formato determinado para el paquete de control a estas alturas. Sin embargo la idea general es tratar de que muchas de las funciones necesarias para la implementación de OBS, se basen en los dos parámetros básicos: el tiempo de offset y el tamaño de la ráfaga; con esto se alcanzaría el objetivo de mantener el tamaño del paquete de control lo más pequeño posible.

2.8. Programación de la Ráfaga

El establecimiento de un programa u horario de tráfico en una red OBS, implica que cada nodo debe tener conocimiento acerca de los tiempos de llegada de las ráfagas en cada canal (longitud de onda); a fin de disponer de los recursos que dichas ráfagas necesitan de una forma eficiente. Un algoritmo de programación es invocado cada vez que un nuevo paquete de control llega a un nodo de núcleo; en base a la información de tiempo de llegada (basada en el tiempo de *offset*) y el tamaño de la ráfaga, se reservan los recursos que se necesitarán desde el momento que la ráfaga llega al nodo y durante la duración de la misma. Una vez que se ha programado una ráfaga, se actualiza la información del paquete de control: el tiempo de offset y nueva longitud de onda, si es que se incurre en una conversión.

Es necesario aclarar que un algoritmo de programación como tal, es usado únicamente en redes OBS con capacidad de conversión de longitud de onda. En una red sin esta característica, simplemente se usaría un algoritmo de señalización como JET como único mecanismo de reserva de recursos.

Un algoritmo de programación debe ser rápido, ya que debe procesar la información antes de la llegada de la ráfaga; debe ser eficiente e intentar reservar recursos solo durante el tiempo necesario para hacer mejor uso de la capacidad del canal; y debe ser simple, ya que un nodo procesa millones de peticiones por segundo.

La eficiencia de un algoritmo en particular puede ser medida en base a la tasa de pérdida de ráfagas y la utilización del canal. Por otro lado la utilización del canal puede ser cuantificada en base a la magnitud de cada vacío; un vacío se define como el espacio temporal que existe entre las ráfagas en una misma longitud de onda. Para tener un estimado de la velocidad a la que deberá trabajar un algoritmo, supongamos que contamos con un conmutador de n puertos de entrada, sobre cada uno de ellos son multiplexadas m longitudes de onda; entonces el algoritmo deberá manejar $n \times m$ peticiones por unidad de tiempo. Donde la unidad de tiempo se considera como el tiempo mínimo de duración de una ráfaga [11].

Para un conmutador con 10 puertos de entrada, sobre los cuales están multiplexadas 100 longitudes de onda en cada uno y suponiendo que la duración mínima de una ráfaga en esa red es de 1ms. El algoritmo debería ser capaz de manejar un millón de peticiones por segundo para una red de esas características.

A los algoritmos de programación se los clasifica en base a su funcionamiento en dos grupos: sin relleno de vacíos y con relleno de vacíos. Los algoritmos sin relleno de vacíos son más simples en estructura y por lo tanto más veloces, pero generan una mayor tasa de pérdida de ráfagas y una mayor utilización de canal. Los algoritmos con relleno de vacíos son más eficientes en términos de utilización de canal y presentan menores pérdidas, pero su estructura exhibe mayor complejidad lo que se deriva en menor número de peticiones por segundo atendidas.

2.8.1. Algoritmos sin relleno de vacíos

Estos algoritmos no guardan información sobre los vacíos en cada canal. El algoritmo sin relleno de vacíos más representativo es HORIZON [11]. HORIZON mantiene un solo valor para cada canal de datos llamado *horizonte*, el mismo se define como el último instante en el cual cada canal estará en uso. En otras palabras, es el instante en que se termina de transmitir la última ráfaga en cada canal. HORIZON escoge el canal con el horizonte más pequeño para programar una nueva ráfaga; es decir escoge el canal que se libera lo más tarde posible con respecto al instante en que llegará la nueva ráfaga, minimizando así el intervalo de vacío.

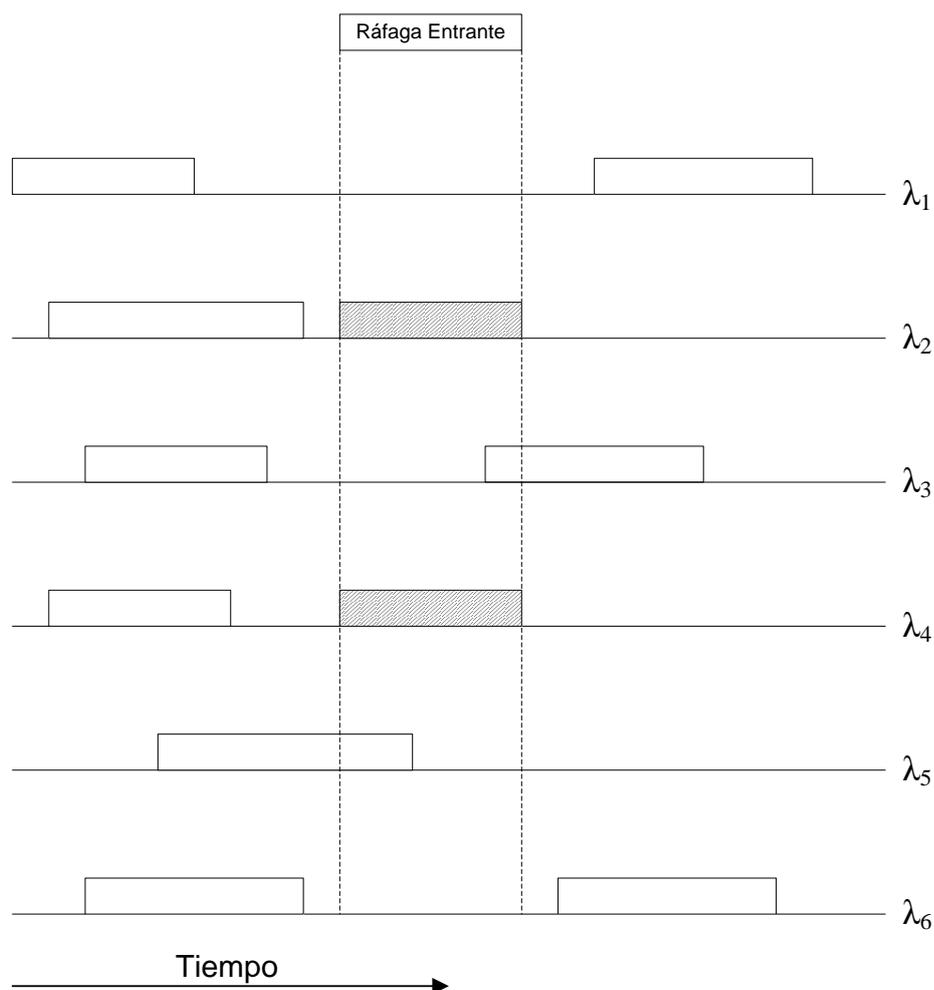


Fig. 2.7. Funcionamiento del algoritmo HORIZON [11].

Como se puede observar en la figura 2.7., la ráfaga entrante solo puede ser programada en las longitudes de onda 2 y 4. Usando HORIZON se escoge el canal 2 que presenta el horizonte más pequeño.

HORIZON funciona mejor en una red con tendencia a presentar tiempos de *offset* pequeños en comparación a la duración de las ráfagas, ya que en este tipo de redes los vacíos son mínimos.

2.8.2. Algoritmos con relleno de vacíos

Este tipo de algoritmos necesitan mantener información de los vacíos generados, la cual proviene de los paquetes de control y son estimados en base a la diferencia del tiempo de llegada de una ráfaga más su duración, más el retardo introducido por un mecanismo de contención (sólo si es que la ráfaga es contenida) menos el tiempo de llegada de la siguiente ráfaga.

El algoritmo LAUC-VF [12] (Latest Available Unused Channel with Void Filling), escoge el canal donde a raíz de un relleno el vacío es minimizado. Este algoritmo también basa su funcionamiento midiendo la magnitud del horizonte, pero si solo usara esta información podría escoger canales libres sobre un vacío porque estos podrían tener un horizonte más pequeño.

Para el caso expuesto en la figura 2.8., se escogería el canal 2 por tener el horizonte más pequeño, pero este canal se encuentra libre sin programación lo que implica un desperdicio, ya que se está generando un nuevo vacío. Para corregir este comportamiento se implementa una disposición la cual dicta que se debe buscar primero en canales programados, si no existe un canal programado disponible se empieza a buscar en canales libres. Implementada esta regla para

el ejemplo anterior, esta vez de entre los dos canales posibles: 1 y 6, se escogería el canal 6.

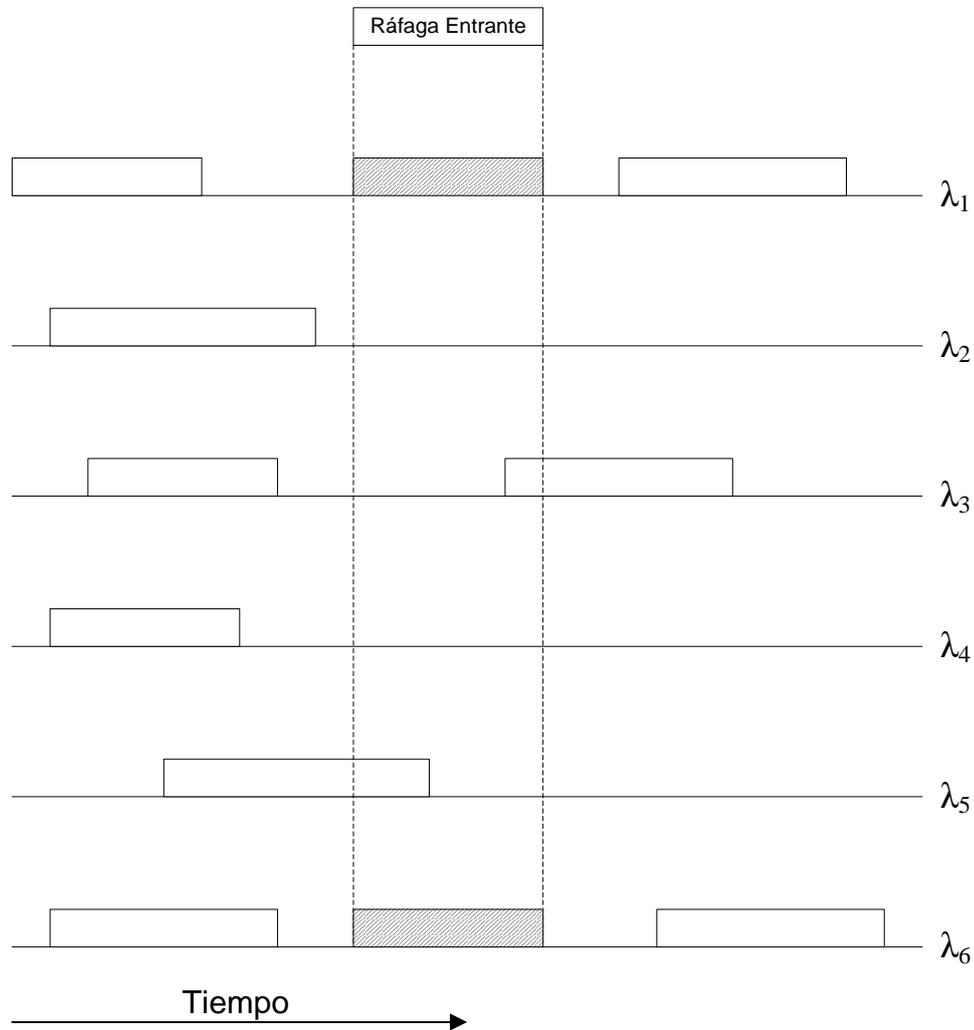


Fig. 2. 8. Funcionamiento del algoritmo LAUC-VF [11].

También existe una variación de LAUC-VF, que intenta minimizar el vacío ajustando una nueva ráfaga en un canal donde la suma tanto del horizonte, como del vacío generado entre el final de la nueva ráfaga y el inicio de la siguiente ráfaga programada resulta mínimo en comparación a otros canales.

Obviamente esta variación implica un mayor número de operaciones aritméticas lo que eleva el costo computacional del algoritmo reduciendo su velocidad.

2.9. Mecanismos de Contención

Como se señaló en la sección anterior la contención es necesaria cuando, en este caso una ráfaga, no dispone de los recursos necesarios para su transmisión; estos recursos bien pueden ser un puerto del conmutador o una longitud de onda. Cuando este es el caso, entra en acción un mecanismo o resolución de contención, cuyo trabajo es el de alguna forma evitar que la ráfaga sea desechada o se pierda por falta de recursos. En OBS las resoluciones de contención propuestas hasta la fecha incluyen: estructuras de líneas de retardo, segmentación de la ráfaga y desviación por enrutamiento.

2.9.1. Líneas de Retardo

Las líneas de retardo de fibra FLD (*Fiber Delay Line*), son elementos ópticos usados para agregar distancia en la trayectoria de un haz de luz, para agregar un retardo controlado sobre el flujo de datos; ya sea por medio de segmentos de fibra óptica o propagando la luz en el espacio usando elementos como colimadores y/o espejos. En caso de necesitar contención de una ráfaga, las líneas de retardo consiguen proveer más tiempo para encontrar disponibilidad de recursos en un nodo.

Esta resolución de contención en OBS reconoce dos fases: la fase de reserva de recursos y la fase de retardo. Si durante la fase de reserva de recursos de una ráfaga, los mismos no se encuentran disponibles, se pasa a la fase de

retardo; donde la ráfaga es enviada a una línea de retardo en el nodo, si no hay una línea de retardo disponible la ráfaga es desechada.

Este método es considerado como una forma primitiva de almacenamiento óptico. A diferencia del almacenamiento electrónico, donde los datos pueden ser guardados por un intervalo de tiempo arbitrario de haber el espacio de memoria suficiente, las líneas de retardo brindan un período de tiempo fijo y limitado de “almacenamiento”. Si vencido este intervalo de tiempo, los recursos necesarios para la transmisión de la ráfaga no están disponibles, la misma es desechada. Este parámetro juega un papel importante en el diseño del conjunto de líneas de retardo a ser implementadas en un nodo OBS; teniendo esto en cuenta esta resolución de contención disminuye las pérdidas de ráfagas en función de la longitud de las líneas de retardo.

En el nodo se implementa un arreglo de líneas de retardo conmutadas SDL (*Switched Delay Lines*), para agregar eficiencia al sistema en términos de recursos (puertos y longitudes de onda necesarias) y materiales.

2.9.2. Segmentación de la Ráfaga

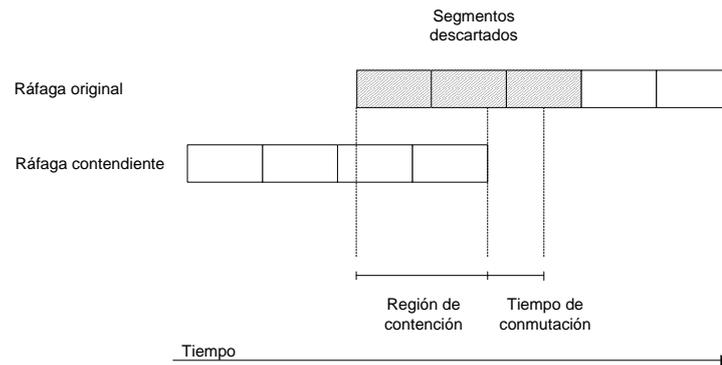
Cuando se hace uso de líneas de retardo y la contención fracasa, toda una ráfaga es descartada. Para disminuir la probabilidad de pérdida de datos en una red OBS se ha propuesto dividir a las ráfagas en segmentos, con el propósito que cuando dos ráfagas contienden por un puerto, solo los segmentos que se superponen en el tiempo sean descartados [13].

Un segmento esta compuesto por uno o varios PDU's de protocolos de capas superiores como paquetes IP o celdas ATM. Un problema con este método de contención, radica en la capacidad de los nodos de núcleo para identificar los

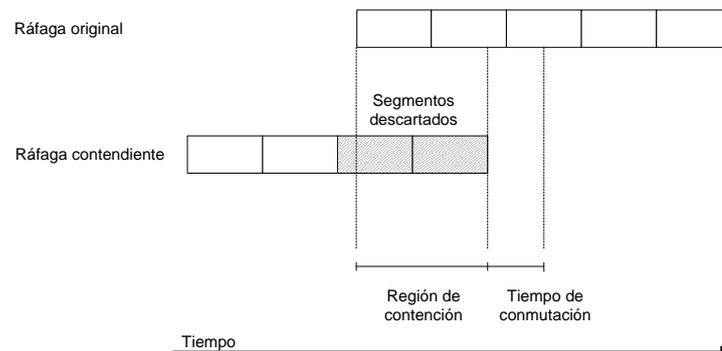
límites de cada segmento. Por un lado identificar los segmentos implica también pérdida de transparencia en la red OBS, ya que los nodos de núcleo tendrían que tener la capacidad de examinar el contenido de la ráfaga; significando esto también un incremento en el nivel de procesamiento del nodo. En cambio al mantener la transparencia de la red, se podría incurrir en particiones de los segmentos, lo que obliga a contar con mecanismos de comprobación de longitud de segmentos. Ya que perder la transparencia de la red, resulta en un total desperdicio a todo nivel, se ha resuelto que sean los nodos de borde los encargados de definir los límites y procesar los segmentos en el dominio electrónico, con la adición de una cabecera que entre otras funciones, permita establecer si un segmento es recibido completo.

Así en los nodos de núcleo, los segmentos descartados pueden definirse como los que se encuentren dentro de una llamada *región de contención* más el tiempo de conmutación. Si el tiempo de conmutación es considerable para pasar a conmutar la ráfaga de contención luego de haber conmutado la ráfaga original, el mismo debe ser tomado en cuenta para determinar los segmentos a ser descartados.

Se han desarrollado dos propuestas sobre cuales segmentos de las ráfagas contendientes deben ser descartados. Se denomina ráfaga original, a la ráfaga que ha arribado primero al puerto y ráfaga contendiente, a la ráfaga que arriba después y entra a la contienda de recursos. La primera propuesta, llamada *tail-dropping* establece que sean los últimos segmentos de la ráfaga original los que sean descartados. Un segundo esquema, denominado *head-dropping*, en cambio descarta los primeros segmentos de la ráfaga contendiente. Al descartar los últimos segmentos de una ráfaga se tiene la ventaja que existe mayor probabilidad de no alterar el orden esperado de recepción de los segmentos en el nodo de borde de destino de la red OBS.



(a)



(b)

Fig. 2.9. Segmentación de la ráfaga (a) *tail-dropping* de la ráfaga original (b) *head-dropping* de la ráfaga contendiente [13].

2.9.3. Desviación por Enrutamiento

En un nodo OBS cuando varias ráfagas contienen por un mismo puerto al mismo tiempo, se plantea la posibilidad de redirigir una de ellas a otro puerto, cambiando así su destino pero evitando que esta ráfaga sea desechada. A este concepto se lo define como desviación por enrutamiento y está diseñado para redes donde los nodos no poseen capacidad de almacenamiento alguna, contrario al concepto de *store and forward* comúnmente usado en conmutadores electrónicos, que disponen de gran cantidad de memoria. Obviamente este proceso agrega saltos a la ruta de una ráfaga y dado que la decisión de desviación es tomada de forma local por el nodo OBS, puede resultar que al siguiente salto la ráfaga necesite ser contenida nuevamente o las nuevas rutas

pueden significar una baja considerable en el rendimiento general de la red. Teniendo en cuenta esto se propone el protocolo CLDR [14] (*Contention-based Limited Deflection Routing*), donde los nodos OBS periódicamente intercambian información sobre estado de los recursos, tráfico, disponibilidad de longitud de onda, tasa de contención de ráfagas, etc. Esta información es detallada en una tabla de desviación por enrutamiento (tabla DR) y almacenada en una base de información de desviación por enrutamiento (DRIB) que es enviada y actualizada en paquetes de control especiales, que no están asociados individualmente a una ráfaga, estos paquetes están encargados de funciones de operación, administración y mantenimiento (OAM).

2.10. Protocolos de Señalización

El concepto de transmisión de ráfagas fue introducido ya desde principios de la década de 1990, para redes ATM. En ATM se reconocen dos protocolos de reservación de recursos para la transmisión de datos por medio de ráfagas: *tell-and-wait* y *tell-and-go*.

2.10.1. Tell and Wait (TAW)

En TAW, se envía un mensaje de petición que intentará reservar los recursos necesarios a lo largo de toda la ruta de la ráfaga, en cada nodo intermedio (ancho de banda y puertos). Si la reserva de recursos extremo-a-extremo resulta exitosa, se envía un mensaje de confirmación (ACK) desde el destino hacia el origen para proceder de inmediato con el envío de la ráfaga; caso contrario se envía un mensaje de error, para dar lugar a un proceso de retransmisión de la ráfaga pasado un tiempo de espera. En el caso de OBS el proceso de retransmisión de datos, es otorgado a protocolos de capas superiores, como TCP.

TAW es un esquema de señalización de dos vías, el mismo se tiene ventajas como simplificación de mecanismos de contención (para el caso de OBS) y una reducida carga de procesamiento. Pero por otro lado hace uso ineficiente de los recursos, ya que los mismos se asignan inmediatamente después del arribo del mensaje de petición. Hasta el instante en que se transmite la ráfaga el tráfico es nulo sobre los recursos reservados.

2.10.2. Tell and Go (TAG)

Tell-and-Go, presenta un esquema de señalización de una vía, la ráfaga es enviada sin hacer ningún tipo de reserva anticipada y se transmite inmediatamente después del mensaje de petición; tampoco se envía confirmaciones sobre el estado de los recursos. En los nodos intermedios la ráfaga es retrasada, dando tiempo suficiente para el procesamiento de la información de control y reserva de recursos. Si la reservación no es posible, la ráfaga es descartada y se puede o no iniciar un proceso de retransmisión, o relegar esta función a capas superiores. En una red óptica el retardo necesario debido al tiempo de procesamiento se logra incluyendo líneas de retardo de fibra en los puertos de entrada del conmutador.

TAG en comparación, hace uso eficiente de los recursos, ya que los mismos se reservan una vez que la ráfaga ha arribado al nodo. Esto sacrificando en tiempo de procesamiento, ya que los nodos necesitan información acerca de temporización y tamaño de la ráfaga, para hacer una reservación adecuada.

Tanto el concepto de TAW como de TAG, ha sido llevado a OBS donde tenemos dos mecanismos de señalización: *just-in-time* (JIT) y *just-enough-time* (JET) basados en TAW y TAG respectivamente.

2.10.3. Just in Time (JIT)

JIT, es considerado una variante de TAW. La estructura de conmutación en cada nodo es configurada en cuanto se recibe el paquete de control. Al igual que en TAW, esto representa una sobre utilización de los recursos, ya que los mismos se encuentran reservados antes de que la ráfaga arribe al nodo, este tiempo prolongado de reserva aumenta la probabilidad de bloqueo y en consecuencia un incremento en la probabilidad de pérdida de ráfagas.

2.10.4. Just Enough Time (JET)

JET es el protocolo de señalización de mayor consideración para su implementación en OBS. Basado en TAG, en JET se hace uso de la información del tiempo de *offset*, para configurar los conmutadores en cada nodo, solo momentos antes del arribo de la ráfaga. Este esquema de reserva se denomina *reservación atrasada*. Así mismo se puede hacer uso de la información contenida en el paquete de control sobre el tamaño de la ráfaga, a fin de liberar los recursos apenas esta haya dejado el nodo por cualquier puerto de salida, a esta característica se la conoce como *reservación cerrada* [6].

El funcionamiento básico de JET, se describe a continuación:

1. En el nodo de borde se conforma la ráfaga y su respectivo paquete de control, en el cual se incluye la información del tiempo de *offset* previamente determinado y tamaño de la ráfaga.
2. Cuando el paquete de control alcanza el primer nodo de núcleo, se extrae toda la información necesaria y además la información del tiempo de *offset* y tamaño de la ráfaga. Establecido el tiempo de *offset* el nodo ahora

conoce en que instante arribará la ráfaga, de tal forma que la reserva de recursos y configuración de la estructura del conmutador se haga un instante antes de la llegada de la misma.

3. En caso de que la reservación haya sido exitosa, el tiempo de *offset* debe ser actualizado y disminuido de tal forma que cuando el paquete de control llegue al siguiente nodo de núcleo, se haya tomado en cuenta el tiempo de procesamiento en el primer nodo de núcleo. Luego se repite el paso 2.
4. En caso de que no existan recursos en un nodo de núcleo y se necesite llamar a una resolución de contención en este, el tiempo de *offset* es actualizado y aumenta en base a la contención, luego el paquete de control con la información actualizada se dirige al siguiente nodo y se repite el paso 2.
5. En caso de que no existieran recursos necesarios, ni mecanismos de contención disponibles, la ráfaga será descartada en ese nodo y se interrumpe el proceso de señalización, de tal forma que en los nodos posteriores no se reserva recurso alguno.
6. Los recursos son liberados luego de que la ráfaga ha dejado el nodo, este instante se determina tomando en cuenta la información de duración de la ráfaga (reservación cerrada). Esto permite que se pueda programar el arribo de otras ráfagas al nodo.

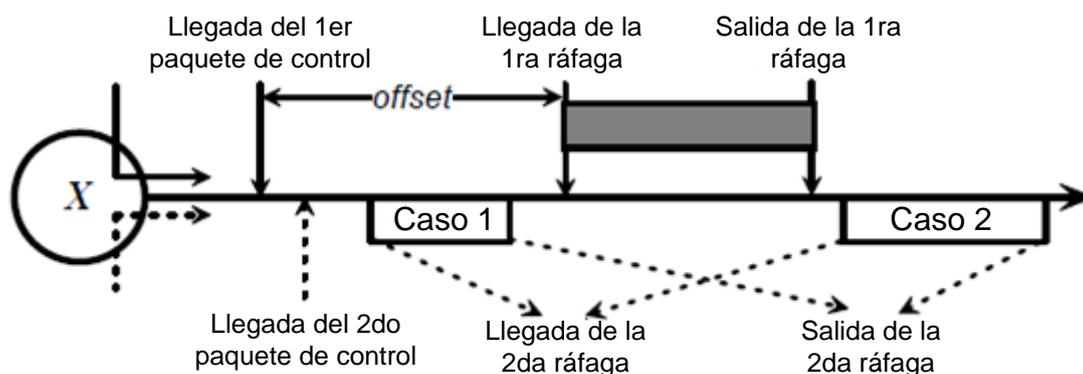


Fig. 2.10. Funcionamiento Básico de JET [6].

El modo de operación de JET, presenta mayor eficiencia en cuanto a uso de recursos y resulta en una tasa reducida de pérdida de ráfagas en comparación con JIT. Pero implica un mayor tiempo de procesamiento del paquete de control, debido a los cálculos que se deben hacer en cuanto al tiempo de *offset* y tamaño de la ráfaga.

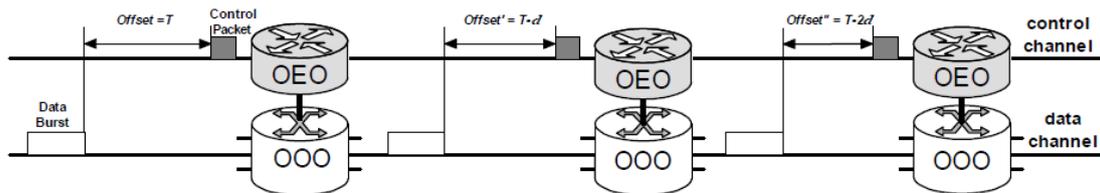


Fig. 2.11. Variación del tiempo de offset [6].

2.11. Calidad de Servicio

Las funciones de diferenciación de servicio en una red OBS pueden ser relegadas a los nodos de borde o a los nodos de núcleo. En los nodos de borde se ha planteado la inclusión de un sistema que añade un tiempo de *offset* adicional proporcional a la prioridad de la clase de tráfico, a datos de alta prioridad se les asigna un *offset* mayor; así este *offset* incrementado reduce la tasa de pérdida de ráfagas de alta de prioridad, pero obviamente introduce un retardo mayor. Además de que ráfagas con tráfico de baja prioridad pero de gran tamaño sufrirían de altas pérdidas en la red lo que representa así mismo un alto porcentaje de paquetes de capas superiores perdidos. Otra técnica llamada prevención de longitud de onda [15] ha sido planteada como técnica de diferenciación de servicio: cuando no es posible programar una ráfaga de alta prioridad, en lugar de desecharla de inmediato se hace una solicitud de reprogramación de la misma. Dado que las ráfagas esperan almacenadas en el dominio electrónico en los nodos de borde, es posible implementar una aproximación de este tipo.

Dado que el procesamiento en los nodos de núcleo es limitado, la diferenciación de servicio se hace mediante mecanismos de contención y una reserva de recursos con tendencia a favorecer las clases de tráfico de alta prioridad. La segmentación de la ráfaga es uno de los ejemplos más claros de cómo se puede usar una técnica de contención para lograr calidad de servicio. El uso de líneas de retardo puede ser usado en conjunto con cualquier otra técnica de contención para improvisar aún más el rendimiento de la red [5].

CAPÍTULO 3

OBS Y OTRAS REDES ÓPTICAS

3.1. Tecnologías de Comunicaciones Ópticas Actuales

El objetivo de esta sección es centrar nuestra atención en las topologías y elementos de las redes ópticas desplegadas en la actualidad, para así poder determinar a qué cambios están sujetas estas redes si las mismas son consideradas para una migración a la tecnología OBS.

3.1.1. SDH/SONET

SDH/SONET nacen como estándares de comunicaciones ópticas debido no solo a la necesidad de interconexión de distintos modelos de comunicaciones entre fabricantes (ver sección 1.2.2.), pudiendo acomodar los tributarios de 1.544 Mbps en América del Norte y de 2.048 Mbps en Europa; sino también a la recurrente necesidad de contar con un mayor ancho de banda.

A diferencia de PDH, que es un sistema cuasi-síncrono, en donde los canales tributarios con tasas de transmisiones más bajas son multiplexados en tributarios de orden superior y se usan técnicas de relleno para demultiplexar los canales sin requerir un reloj que regente toda la red; SDH/SONET son sistemas síncronos, donde los canales tributarios base son mapeados en contenedores virtuales permitiendo así que mantengan sus características originales y usando punteros sobre cabeceras que son agregadas a los contenedores se consigue administrar las señales originales.

Tabla 3.1. Velocidades de transferencia SONET/SDH			
SONET		SDH	Velocidad Binaria (Mbps)
Señal eléctrica	Portadora óptica		
STS-1	OC-1	STM-0	51.84
STS-3	OC-3	STM-1	155.52
STS-9	OC-9	-	466.56
STS-12	OC-12	STM-4	622.08
STS-18	OC-18	-	933.12
STS-24	OC-24	-	1244.16
STS-36	OC-36	-	1866.24
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32
STS-96	OC-96	-	4976.64
STS-192	OC-192	STM-64	9953.28
STS-256	OC-256	-	13271.04
STS-384	OC-384	-	19906.56
STS-768	OC-768	STM-256	39813.12
STS-1536	OC-1536	-	79626.24
STS-3072	OC-3072	-	159252.48

Elementos en una red SDH/SONET

Toda red SDH/SONET estará conformada por cuatro elementos: multiplexores terminales, regeneradores, multiplexores de adición y remoción de tráfico (ADM) y conmutadores de conexión cruzada (DXC).

Los **multiplexores terminales** se utilizan para terminar o iniciar señales SDH, multiplexando canales síncronos o plesiócronicos para formar una señal STM-N. Por lo general estos equipos trabajan a velocidades de un STM-4 o superiores. De forma similar terminan una señal STM-N demultiplexando todos los canales tributarios que esta incluya en su contenedor.

Las funciones de un **regenerador** son regenerar la señal de reloj y amplificar la potencia de la señal de información, necesarias debido a la atenuación y distorsión del medio.

Sabemos que tanto un **ADM** y un **DXC** son usados como puntos de conmutación (ver sección 1.2.2). Un DXC es un equipo de mayor capacidad, “que permite la interconexión sin bloqueo de señales a un nivel igual o inferior, entre cualquiera de sus puertos de entrada y de salida” [16]. Esto en otras palabras quiere decir que el DXC trabaja a nivel del contenedor virtual y sin la necesidad de demultiplexar todo un canal para la inclusión o extracción de señales intermedias.

Topologías en Redes SDH/SONET

La topología más difundida en redes SDH, es una topología de anillo; donde cada nodo se integra usando dos o cuatro hilos de fibra. En cada punto de la red encontraremos un ADM, lo que significa que todos los nodos pueden servir como puntos de integración de tráfico; alcanzándose así una gran flexibilidad y escalabilidad (Fig. 3.1). A nivel metropolitano es común encontrar desplegados varios anillos a lo largo del área de cobertura, los cuales estarán integrados por un DXC (Fig. 3.2).

Dependiendo de los ADM's instalados, se puede levantar un segundo anillo (no todos los ADM's de distintos fabricantes soportan esta característica), la función de este anillo redundante es la de proveer un camino alternativo en caso de cortes. El tráfico sobre el anillo principal circula en sentido horario y el tráfico en el anillo redundante en sentido anti horario; de tal forma que en los nodos adyacentes al corte se crea un bucle lógico, permitiendo así mantener la comunicación en la red.

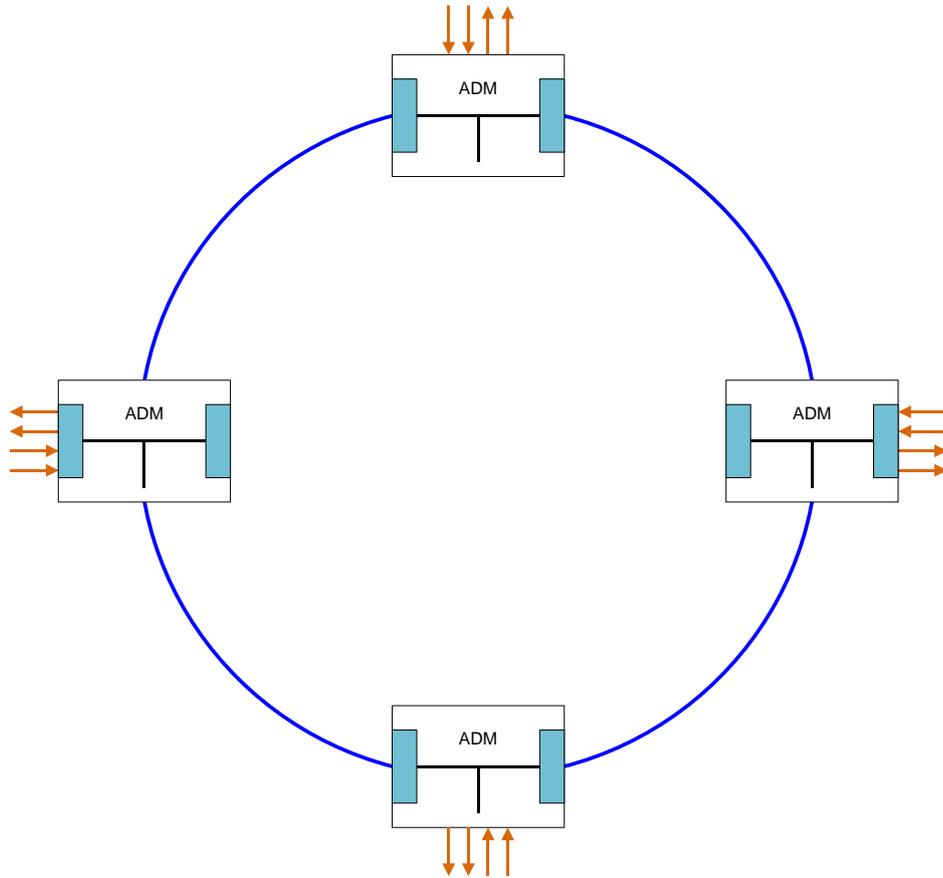


Fig. 3.1. Topología en anillos en redes SDH/SONET.

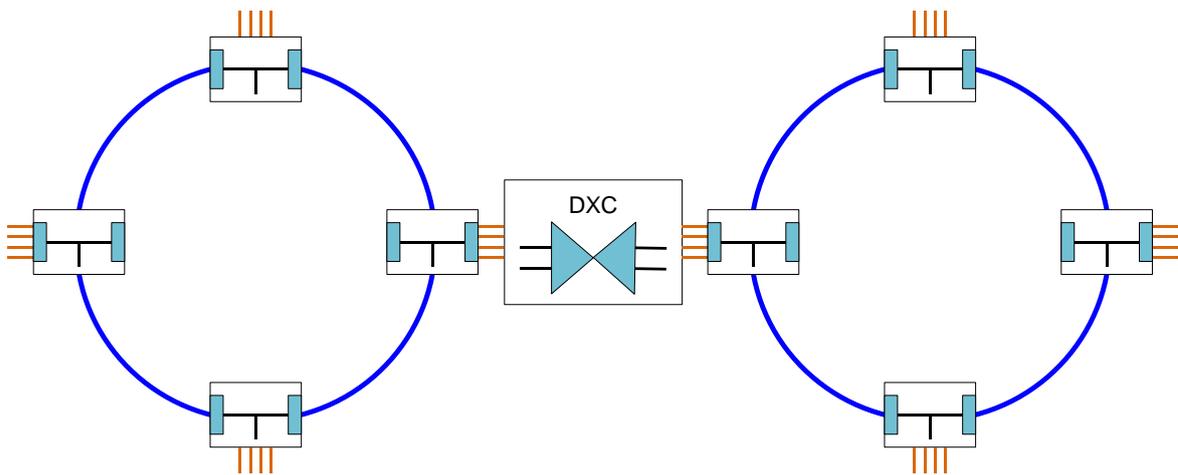


Fig. 3.2. Interconexión de anillos SDH por medio de un DXC, para cobertura de áreas metropolitanas.

En redes SDH también se pueden encontrar enlaces punto a punto, formados por dos multiplexores terminales. Esta configuración es desplegada por lo general cuando es necesaria la interconexión de dos redes por medio de un enlace que tendrá que transportar una gran cantidad de tráfico. Otras configuraciones en SDH incluyen también redes punto-multipunto y en estrella.

3.1.2. Multiplexación por División de Longitud de Onda – WDM

Un sistema WDM permite combinar varios haces de luz de diferente color (distintas longitudes de onda) para ser transmitidos por un solo hilo de fibra óptica, esto no solo multiplica la capacidad de ancho de banda de un sistema de comunicaciones óptico sino que también posibilita la transmisión y recepción de información por un solo hilo de fibra. De forma análoga a un sistema multiplexado en frecuencia, se usa la información de longitud de onda de cada portadora óptica para demultiplexar cada canal.

Con la evolución de las distintas tecnologías de comunicación y la creciente demanda de ancho de banda WDM se mostró como una solución eficiente ante estas necesidades, hoy en día es normal asumir que en general cualquier red óptica usa un sistema de multiplexación por longitud de onda en algún punto.

Esta tecnología representa el siguiente paso en la evolución de redes SDH. Un multiplexor WDM recibe la información de cada canal en una longitud de onda en particular luego por medio de convertidores de longitud de onda cada canal es pasado a las distintas longitudes del sistema WDM (sea WDM, DWDM o CWDM) y luego multiplexados.

Topologías en redes que usan WDM

En cuanto a arquitecturas de red se refiere, la adición de un sistema WDM sobre una red SDH, implica que se heredará la misma topología física de dicha red. Cada nodo de la red ahora tiene la capacidad de manejar mucho más ancho de banda por lo que ahora cada uno albergará más de un ADM (dependiendo de la necesidad de ancho de banda de las redes de acceso).

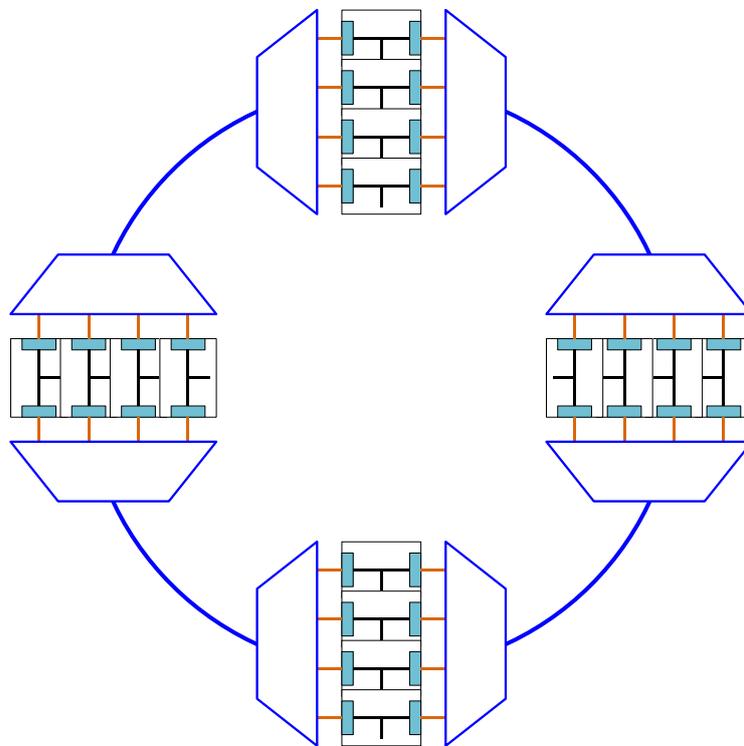


Fig. 3.3. Anillo SDH haciendo uso de multiplexores WDM [3].

Sobre esta topología se ha diseñado redes con encaminamiento fijo por longitud de onda, donde longitudes de onda son enrutadas directamente sin la necesidad de un ADM, reduciendo así el número de ADM's necesarios por nodo pero transportando la misma cantidad de tráfico.

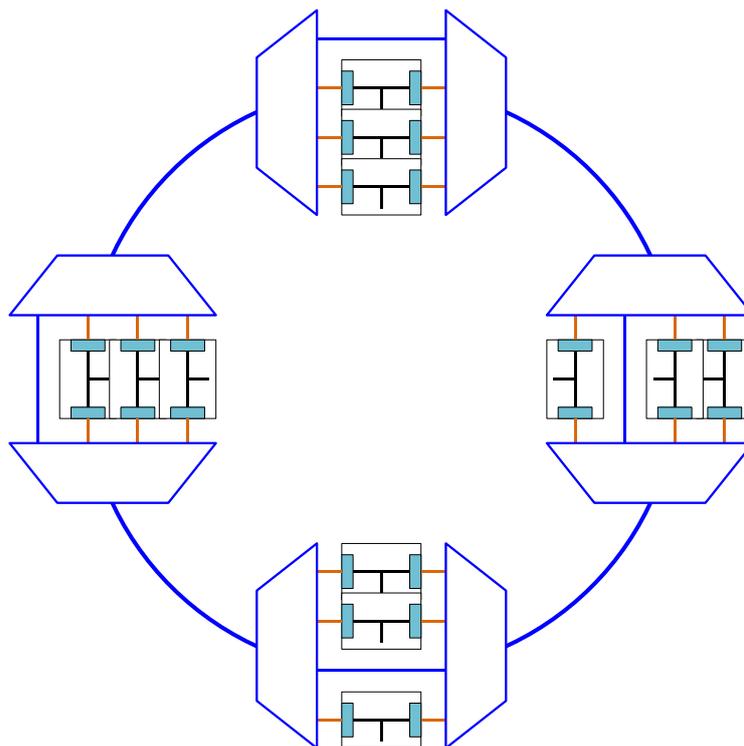


Fig. 3.4. Encaminamiento fijo por longitud de onda [3].

3.1.3. Enrutamiento por Longitud de Onda y Conmutación Óptica de Circuitos

El siguiente hito que marca la evolución de las tecnologías de transporte óptico y redes ópticas, posterior a WDM; es la inclusión de equipos de conmutación ópticos: los conmutadores ópticos de conexión cruzada (OXC) y los multiplexores ópticos de adición/remoción (OADM). Gracias a la inclusión de estos dispositivos nace el llamado enrutamiento por longitud de onda, que no es otra cosa que una conmutación de circuitos ópticos. Este tipo de redes no presenta una gran flexibilidad en cuanto a conmutación se refiere, los circuitos o caminos de luz levantados requieren un tiempo de iniciación y finalización considerable; por lo que la mayoría de circuitos funcionales de este tipo de redes trabajan o se mantienen durante largos períodos de tiempo o de forma indefinida.

Topologías en redes conmutadas por circuitos Ópticos

Es natural que como para el caso de WDM la topología física existente en anillo se haya mantenido y en cada nodo de la red los ADM's hayan sido reemplazados por el nuevo equipamiento óptico. Dada las características de diseño de una red enrutada por longitud de onda, sobre esta topología física en anillo se pueden elaborar topologías lógicas en malla para funcionar sobre esta red. Esto también trajo cierto interés en el desarrollo y construcción de redes ópticas con topologías físicas en malla, dado que estas presentan un mayor grado de flexibilidad.

La inclusión de estos equipos significa que estamos un paso más cerca de tener a nuestro alcance redes completamente ópticas, por lo menos en cuanto a transporte y conmutación se refiere, aunque el plano de control todavía se mantenga en el dominio electrónico. Hoy en día algunas empresas a nivel mundial ya dirigen sus expectativas hacia la siguiente generación de equipamiento óptico: los multiplexores ópticos de adición/remoción reconfigurables (ROADM). La inclusión de estos equipos en la red de transporte significará un gran aumento en la capacidad de conmutación de la misma, aumentando su capacidad en términos de ancho de banda y flexibilidad. La fabricación de ROADMs cada vez más flexibles ya representa un desafío para las compañías que los producen a medida que la demanda del sector de las comunicaciones incrementa, esto como producto del siempre incesante crecimiento en la demanda de ancho de banda de forma generalizada en todos los sectores [17].

3.2. Dispositivos Ópticos Adicionales

3.2.1. Amplificadores

Los amplificadores ópticos son dispositivos que amplifican una señal de luz sin necesidad de una conversión OEO. El funcionamiento de todo amplificador óptico se basa en el principio de emisión espontánea: si un flujo de fotones interactúa con un grupo de átomos en estado excitado (átomos cuyos electrones han sido llevados a un nivel de energía superior) se producirá una emisión controlada de fotones, amplificando el flujo inicial. Un átomo puede absorber energía proveniente de distintas fuentes: como un flujo de fotones, una corriente eléctrica o una colisión con otro átomo; cualquiera de estos eventos puede llevar al átomo a un nivel de energía superior. El átomo no permanece mucho tiempo en este estado y cuando regresa a su estado normal emite energía en forma de fotones. Además si el átomo es excitado haciendo uso de un flujo de fotones, como por ejemplo si se usa una fuente de luz láser; los fotones emitidos tienen la característica de estar en la misma longitud de onda que los fotones que se usaron para llevar al átomo al estado excitado. Entonces un amplificador óptico estará compuesto de un elemento activo, que es el medio que contiene los átomos que emitirán fotones por emisión espontánea y un sistema de bombeo que es el que aporta con energía para llevar a los átomos del elemento activo a un estado excitado [18].

Los amplificadores ópticos más populares para uso en transmisión de datos son los amplificadores de fibra dopada de erbio, EDFA por sus siglas en inglés. El elemento activo consiste en un segmento de hilo de fibra óptica dopada con erbio y el sistema de bombeo que es una fuente de luz láser [19].

La inclusión de estos dispositivos en enlaces de fibra óptica significó no solo el aumento en el alcance de cada enlace, sino también un descenso en los costos

de construcción de un enlace de fibra óptica. Ya que un amplificador óptico resulta más económico que amplificar la señal en el dominio electrónico, haciendo uso de elementos de conversión OEO.

3.2.2. Láseres Sintonizables

Un láser sintonizable, a diferencia de un láser común que emite un haz de luz en una longitud de onda específica; puede ser configurado para operar sobre una banda de longitud de onda (emite haces de luz en diferentes longitudes de onda).

El desarrollo de esta tecnología se debe en gran parte a la difusión a nivel comercial de los sistemas WDM. Supongamos que poseemos un multiplexor WDM, con una capacidad para multiplexar 128 canales, el mismo utiliza 128 longitudes de onda distintas; lo que significa que este equipo en particular tiene en su estructura 128 fuentes de luz láser diferentes. Es obvio asumir que esta pieza de equipamiento estará funcionando las 24 horas del día y que cuando alguno de los láseres deje de funcionar el mismo deberá ser reemplazado lo más rápido posible, ya que cada segundo sin comunicación representa una cuantiosa pérdida de dinero. Esto obliga a tener en reserva 128 láseres de repuesto o 256 si se desea ser aún más precavidos, lo cual implica una inversión considerable en repuestos y además del espacio que estos ocupan para su almacenamiento [5][20].

Expuesto lo anterior, ahora es clara la razón por la cual la idea de tener un láser capaz de ser configurado para trabajar en distintas longitudes de onda resulta atractiva. En el futuro estos componentes prometen ser una pieza clave en la construcción de redes ópticas y no solo como parte del equipamiento WDM. Se espera que la tecnología madure hasta un punto en que el tiempo de cambio en la operación de una longitud de onda a otra sean tan pequeño que se podría

construir conmutadores ópticos a partir de láseres sintonizables y estos serían capaces de conmutar en la granularidad de un paquete.

3.2.3. Convertidores de Longitud de Onda

La función de un convertidor de longitud de onda es la de tomar una señal a una longitud de onda determinada a la entrada del dispositivo y “pasar” la información de la señal original a otra, con una longitud de onda distinta. Para cumplir con este fin existen varias tecnologías las cuales revisaremos brevemente a continuación [21]:

Dispositivos Opto-electrónicos.- En estos la señal entrante con una longitud de onda λ_i es convertida al dominio electrónico, regenerada, convertida al dominio óptico y transmitida por un láser a una diferente longitud de onda λ_n .

Bloqueo Óptico.- Se hace uso de un dispositivo óptico cuyas características cambian en función de la intensidad de la señal a la entrada del mismo. Este cambio puede ser transferido a otra señal con una longitud de onda diferente; esta señal contendrá la información de la señal original. El dispositivo comúnmente usado en esta técnica es un SOA, basándose en el efecto no-lineal del mismo; esta técnica se conoce como modulación de ganancia cruzada (Cross Gain Modulation – XGM).

Técnicas Interferométricas.- El mismo cambio de fase que crea distorsión de pulsos en XGM puede ser usado para convertir longitudes de onda. A medida que la densidad de la portadora en el amplificador varía con la señal de entrada, produce un cambio en el índice de refracción, lo que modula la señal de portadora, esta técnica es denominada modulación de fase cruzada (XPM). Esta

modulación de fase puede ser convertida en modulación de intensidad usando un interferómetro.

Combinación de Ondas.- Esta técnica está basada en el fenómeno de *combinación de cuatro longitudes de onda*, el cual establece que al combinar tres ondas con frecuencias f_1 , f_2 , f_3 , se genera una cuarta onda con frecuencia $f_4=f_1+f_2-f_3$. A la salida se usa un SOA para amplificar la señal ya que la onda resultante presenta una significativa atenuación de potencia, además a continuación se necesitará filtrar el resto de longitudes de onda presentes en la señal.

La importancia de estos componentes es clara ya que elevan significativamente la flexibilidad de la red. Y como se trató en el capítulo 2 algunas de las características de OBS asumen que los nodos cuentan con capacidad de conversión de longitud de onda.

3.2.4. Multiplexores/Demultiplexores

La función de un multiplexor es la de combinar varias señales a la entrada del dispositivo en una sola señal a la salida del mismo. Estas señales combinadas van a estar compartiendo el medio de transmisión (fibra óptica, cobre, aire) ya sea en el dominio temporal, frecuencia, espacio. En cuanto a comunicaciones ópticas se refiere, la técnica que ha ganado mayor popularidad es la multiplexación por división de longitud de onda, análoga a lo que es la multiplexación en frecuencia (ver sección 1.2.3). Esto debido a las características inherentes al medio de transmisión (alta capacidad espectral, baja atenuación, etc.).

A lo largo de este documento hemos mencionado las ventajas que acarrea la introducción de WDM a nivel comercial en redes ópticas. Hoy en día la importancia del equipamiento WDM va más allá del incremento en la eficiencia

sobre el uso del ancho de banda disponible. Podemos decir que casi la totalidad de tecnologías de comunicación óptica incluyen sistemas WDM en sus estructuras. OBS en sus arquitecturas de nodos incluye multiplexores/demultiplexores WDM (ver sección 2.2). Así mismo las estructuras de conmutación ópticas existentes y propuestas hasta la fecha son construidas/diseñadas con conmutadores espaciales, los cuales manejan múltiples longitudes de onda; obviamente estas longitudes de onda van a ser multiplexadas haciendo uso de algún tipo de equipamiento WDM.

3.2.5. Regeneradores

Una señal al ser transmitida sobre un enlace sufre degradaciones, las cuales aumentan a medida que aumenta la distancia del enlace, la velocidad de transmisión o en número de canales. La función de un regenerador es la de compensar estas degradaciones; el primer proceso que forma parte de regeneración de una señal óptica es el de amplificación o re-amplificación ya que la señal puede haber sido previamente amplificada en algún punto por un dispositivo exclusivo para este fin, luego tenemos los procesos de re-formación y re-sincronización (3R) [21][22].

Dado que se espera que las tecnologías de comunicación óptica superen a cualquier otra en términos de velocidad y alcance, los regenerados se convierten en elementos claves para la construcción de redes ópticas.

3.3. Adaptabilidad de redes OBS a otras redes ópticas

Enfocándonos desde un punto de vista comercial, uno de los intereses de un portador de servicios de comunicaciones al migrar de una tecnología a otra es el de hacerlo de forma gradual; a razón de que el cambio de una tecnología a otra

supondrá siempre una inversión de capital considerable. Por otro lado si consideramos las redes de transporte expuestas en la primera sección de este capítulo, es obvio pensar que una red que realiza la conmutación en el dominio electrónico está expuesta a cambios de mayor magnitud que una red conmutada por circuitos ópticos, y que incluye en su estructura equipos ópticos como: OADM's, OXC's y ROADM's. Sabemos que estas redes tienen la característica de ser *transparentes* en su núcleo y la conmutación es hecha en la granularidad de una longitud de onda; cada longitud de onda pasa a ser un circuito óptico o *camino de luz* y estos circuitos comunican un par de dispositivos de borde, por ejemplo un par de ruteadores IP. Por lo que, por cada par de dispositivos de borde que se necesite comunicar se necesitará una longitud de onda. Ahora estas redes conmutadas por circuitos ópticos y enrutadas por longitud de onda representan la vanguardia en cuanto a comunicación óptica se refiere; la tendencia a corto plazo es la inclusión de ROADM's y OXC's obedeciendo las necesidades locales de cada mercado. A nivel tecnológico; los equipos que contengan en su estructura conmutadores ópticos espaciales, serán cada vez más veloces (tiempos de conmutación más bajos) y su fabricación supondrá menores costes. Todos estos factores terminarán con la implementación de OBS ya a nivel comercial. Pero: ¿cómo hacer una migración gradual de una red construida con OXC's y/o ROADM's a una red OBS completamente funcional?

3.3.1. Estrategia de Migración a redes OBS

En [23], se plantea una estrategia para migrar gradualmente desde una red compuesta exclusivamente por OXC's a una red OBS. Una red como la de la Fig. 3.5, formada por OXC's a nivel de transporte y ruteadores de borde que sirven como interfaz con una red de acceso u otra red de transporte, es elegida como candidata para hacer una migración progresiva a la tecnología OBS. La arquitectura híbrida expuesta en [23] propone cambiar los OXC's enlazados a los ruteadores de borde, por conmutadores OBS. Dado que para el resto de los OXC's que componen la red, el tráfico que cursa a través de ellos es transparente; este cambio no conlleva a otras modificaciones salvo una

reasignación de longitudes de onda, ya que la adición de los conmutadores OBS supone una optimización en cuanto al uso de ancho de banda se refiere y por lo tanto se necesitarán menos longitudes de onda para comunicar a todos los puntos de la red.

La red original sufre dos cambios significativos en su estructura:

1. Los OXC's que se comunican con los ruteadores de borde son reemplazados por conmutadores OBS.
2. En los ruteadores de borde se agregan módulos que permitan la comunicación con los conmutadores OBS.

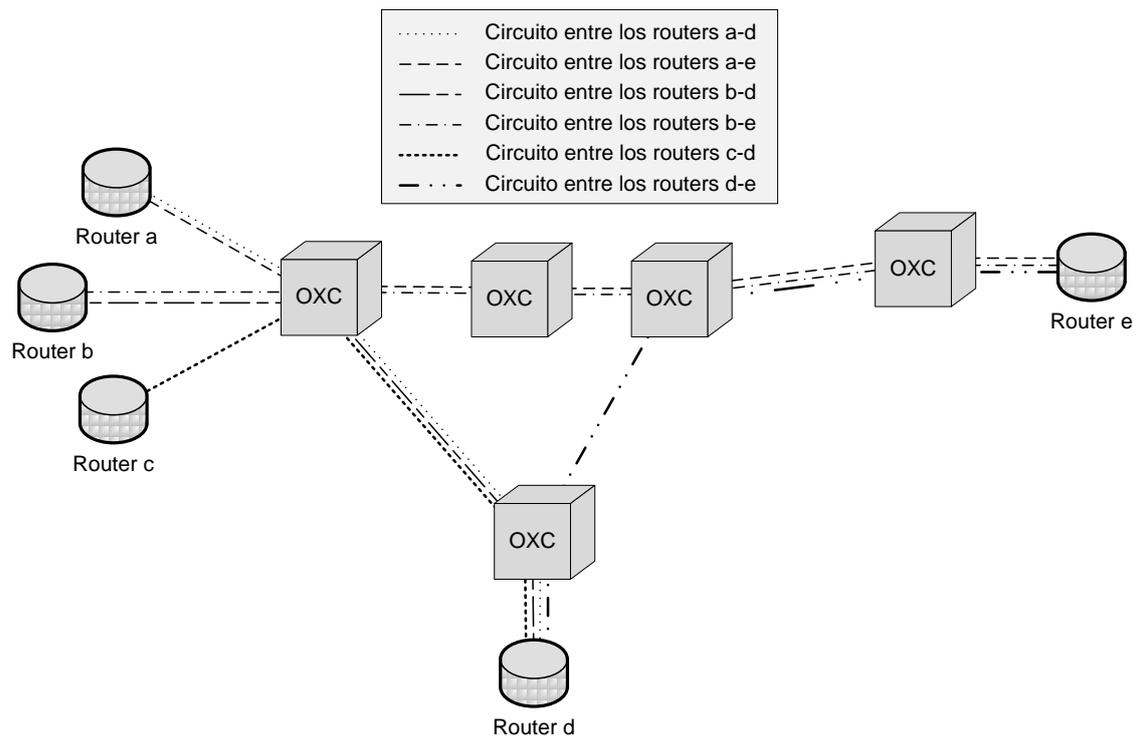


Fig. 3.5. Red original construida con OXC's en su núcleo [23].

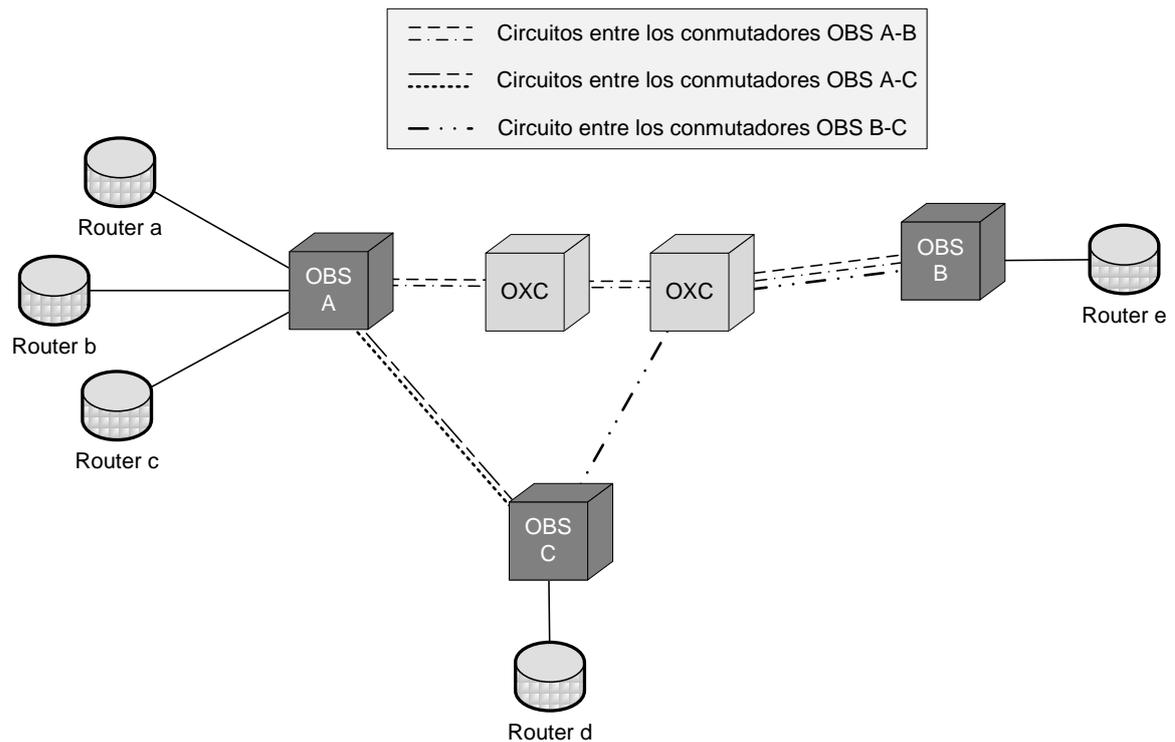


Fig. 3.6. Arquitectura Híbrida [23].

Básicamente los módulos agregados a los ruteadores de borde van a cumplir las mismas funciones que un nodo OBS de borde: ensamble y desensamble de ráfagas; y creación de paquetes de control (ver capítulo 2). Los conmutadores OBS tendrán la estructura de un conmutador OBS de núcleo y cumplirán todas sus funciones (ver capítulo 2).

El cambio de los OXC's por conmutadores OBS significa que para manejar la misma cantidad de tráfico que la red original se necesitarán menos longitudes de onda; ya que ahora por una misma longitud de onda se pueden conmutar y transmitir ráfagas desde, por ejemplo: el ruteador a hacia el ruteador e, de el ruteador b hacia el ruteador e, del ruteador c al ruteador e (figura Fig. 3.7.).

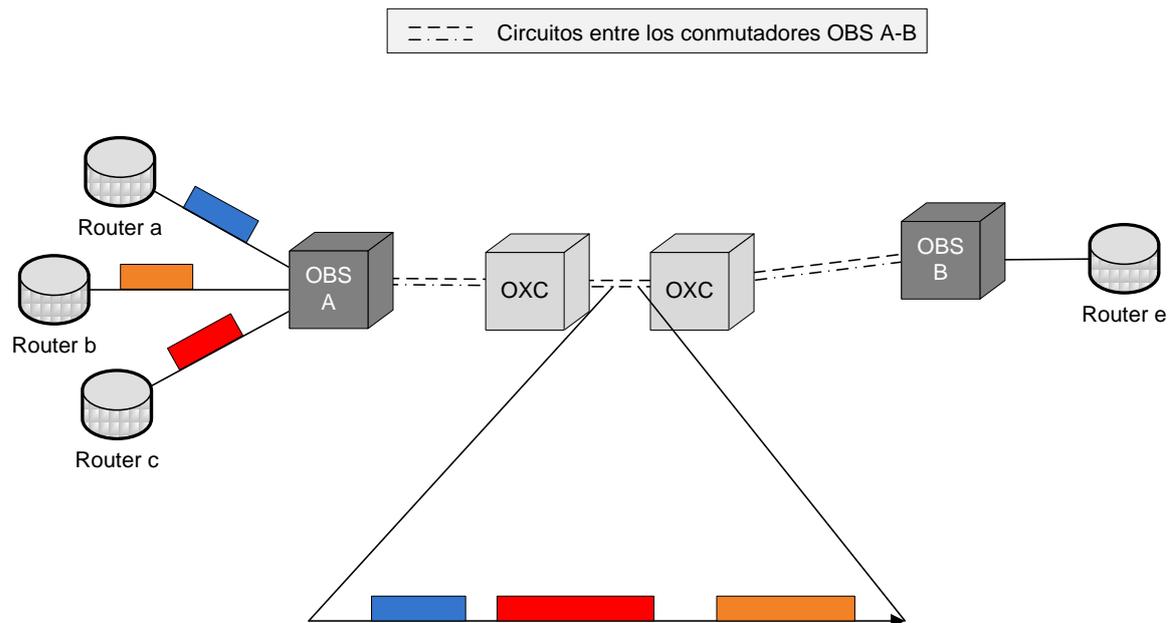


Fig. 3.7. Multiplexación de varias ráfagas en el dominio temporal, desde el conmutador OBS A con destino al conmutador OBS B.

Más longitudes de onda pueden habilitarse entre los conmutadores OBS A y B, si las necesidades de ancho de banda de la red se incrementan. Lo mismo se aplica para la comunicación entre los conmutadores OBS A y C, y C y B.

Dada la transparencia inherente a una red óptica el cambio de los OXC's a conmutadores OBS puede hacerse de uno a la vez (figura Fig. 3.8.). En teoría en la red original, construida exclusivamente con OXC's, un solo conmutador OBS podría manejar la comunicación entre los ruteadores a, b y c con el ruteador d y el ruteador e; y para la comunicación entre los ruteadores d y e se mantiene el circuito original. Se puede pensar que la adición de un solo conmutador OBS como un primer paso de una estrategia de migración signifique un alza en la probabilidad de bloqueo y una alta tasa de pérdida de ráfagas; pero esto puede ser controlado haciendo uso de varias longitudes de onda. El número de longitudes de onda necesarias no será mayor al número de longitudes de onda que utilizaba la red original, debido al hecho de que ahora se conmuta en la

granularidad de una ráfaga y estas ráfagas están multiplexadas en el tiempo, sobre una longitud de onda.

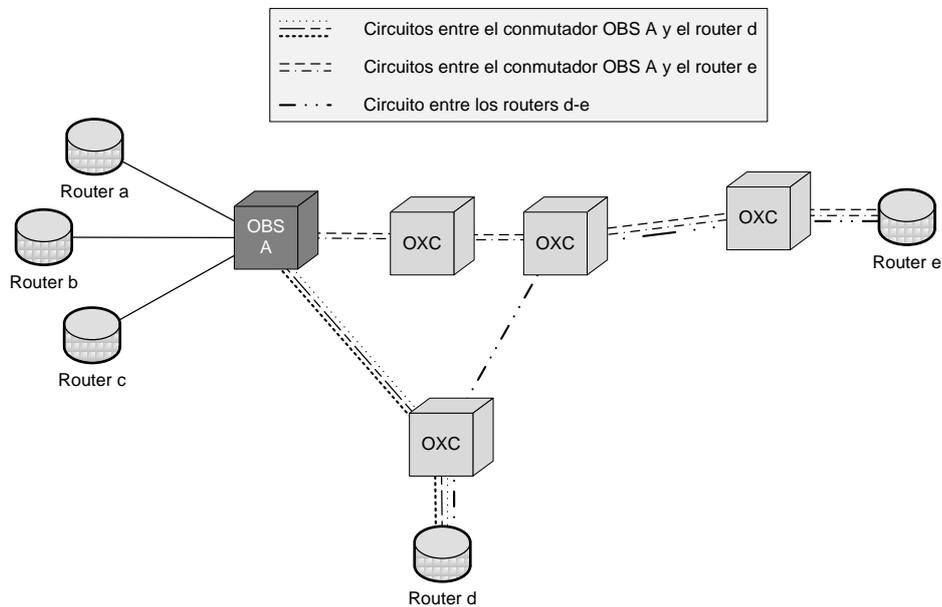


Fig. 3.8. Adición de un único conmutador OBS.

3.4. Redes Metropolitanas y OBS

En la primera parte de este capítulo hablamos de las diferentes topologías desplegadas para la construcción de redes ópticas, siendo la más utilizada la topología en anillo. A nivel metropolitano en una red óptica se despliegan varios anillos de borde de relativa baja capacidad de ancho de banda y estos se comunican por un anillo central o de núcleo de mayor capacidad [5]. En tecnologías como WDM o WRON se pueden levantar topologías lógicas en anillo o en malla sobre los anillos físicos. OBS es una tecnología de transporte concebida para ser usada a nivel metropolitano por lo que sus características de diseño han sido elaboradas de tal forma que se adapten a las topologías existentes, ya que obviamente no se puede esperar que una empresa de servicios de portadora haga cambios drásticos como dar de baja la totalidad de su infraestructura de planta externa para migrar a OBS. Estos cambios como vimos

en la sección anterior se los planea hacer a nivel de equipamiento de nodo exclusivamente. Por otro lado el plano de control que se espera implementar estará basado en GMPLS; ya hoy en día los equipos ROADM están basando su plano de control en pre-estándares de GMPLS por lo que la integración a mediano plazo de las siguientes generaciones de comunicación óptica con OBS puede ser posible.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS DE CONMUTACIÓN COMPLETAMENTE ÓPTICAS

4.1. Comparación entre conmutación óptica de circuitos, ráfagas y paquetes

Hasta ahora hemos hablado de las características más relevantes de los diferentes esquemas de conmutación óptica propuestos hasta la fecha: conmutación de circuitos, ráfagas y paquetes. Tanto la conmutación óptica de circuitos y paquetes funcionan básicamente de la misma forma que los modelos de conmutación de circuitos y paquetes usados durante años. Y por otro lado la conmutación óptica de ráfagas puede verse como una combinación de los modelos antes mencionados.

En la actualidad contamos con redes ópticas conmutadas por circuitos. Esto gracias a que la implementación de este tipo de redes es relativamente sencilla. Por un lado en los conmutadores usados en este tipo de redes se manejan grandes tiempos de conmutación lo que simplifica su estructura; además la implementación del plano de control en este tipo de redes también resulta relativamente sencilla, dada la baja flexibilidad inherente a este modelo y que características como calidad de servicio son implementadas en capas superiores.

La conmutación óptica de paquetes es un esquema mucho más flexible al operar en una granularidad de conmutación menor; pero su implementación es así mismo, más compleja. Una característica de las redes conmutadas por paquetes es que en cada nodo se necesita almacenar la carga útil del paquete mientras se procesa la información de cabecera; y en la actualidad simplemente no existe una forma eficiente de almacenar la información en el dominio óptico durante el tiempo suficiente. Otro problema radica en la complejidad del plano de control así como la implementación de protocolos de señalización, calidad de servicio, sincronización, etc. No existen dispositivos ópticos que realicen las operaciones lógicas necesarias para cumplir con estas funciones. En la sección 1.4.2. se menciona que las funciones de control pueden ser delegadas a unidades electrónicas, pero aún así estas deberán ser lo suficientemente rápidas como

para mantenerse a la par del tráfico de paquetes de la red de transporte. Es por esto que la conmutación óptica de paquetes se espera llegue a ser una realidad a largo plazo.

Como ya sabemos, la conmutación óptica de ráfagas es considerada como la fusión de las mejores características de la conmutación de circuitos y paquetes. Relegando las funciones de control a la electrónica se evitan las limitaciones de los dispositivos ópticos; y el hecho que se trabaje en una granularidad superior a la de los paquetes aumenta el tiempo de conmutación necesario para conmutar cada unidad de información, lo que facilita la implementación de las estructuras de conmutación. Es así que la conmutación óptica de ráfagas se espera sea la solución para las necesidades de ancho de banda de las redes de transporte a mediano plazo y la siguiente generación de comunicaciones ópticas.

En [24] se resume una comparación de los tres esquemas de conmutación, presentada en la tabla 4.1.:

Tabla 4.1. Comparación de las distintas técnicas de conmutación óptica [24].				
Aspecto	Característica	Tipo de Red		
		OCS	OBS	OPS
General	Granularidad de conmutación	Circuitos	Ráfagas (multiplexación estadística)	Paquetes (multiplexación estadística)
	Señalización	Fuera de banda	Fuera de banda	Dentro de banda
Capa Física (Requerimientos de Hardware)	Tiempo de conmutación	En el orden de varios milisegundos	Entre un milisegundo y microsegundos	Entre un microsegundo y nanosegundos
	Complejidad de la unidad de control	Baja	Alta	Muy Alta
	Complejidad del Hardware	Media	Alta	Muy Alta
Complejidad computacional	Complejidad de los algoritmos en los nodos de control	Muy Baja	Muy Alta	
	Complejidad en la administración del enrutamiento	Problema de asignación de rutas y longitudes de onda	Mayor complejidad en algoritmos de enrutamiento con funciones de calidad de servicio, ingeniería de tráfico, etc.	
Desempeño con el tráfico de Internet	Utilización de la red	Baja	Alta	Muy Alta
	Rendimiento de la red, retardo	Probabilidad de bloqueo de una conexión. Muy bajo retardo	La probabilidad de pérdida de ráfagas hace necesaria la implementación de técnicas de contención. Se introduce retardo por el tiempo de ensamble de la ráfaga	Necesidad de FDL's para reducir las pérdidas de paquetes. Bajo retardo gracias a una alta velocidad de conmutación.
	Capacidad de conmutación de paquetes	Limitada	Muy Alta	Muy Alta (Limitada solamente por la capacidad de la unidad de control)
	Rendimiento de TCP	Muy Alto	Se degrada a medida que incrementan las pérdidas de ráfagas. Necesaria la implementación de técnicas para transmitir TCP sobre OBS	Se degrada a medida que incrementan las pérdidas de ráfagas
Flexibilidad	Formato de la información, tasas de transmisión	Media (formato y tasa de transferencia fijas por circuito)	Alta (se necesita agregación de datos, paquete de control)	Muy Alta (transparencia a nivel del paquete)

Aspecto	Característica	Tipo de Red		
		OCS	OBS	OPS
Flexibilidad	Escalabilidad en la granularidad, etiquetado MPLS	Granularidad muy baja. Baja escalabilidad limitada	Alta granularidad y alta escalabilidad	
Calidad de servicio	Dificultad en las garantías de calidad	Muy baja - definida en el modo de conmutación del circuito	Mecanismos de calidad de servicio: prioridad acorde a la clase de ráfagas/paquetes, reservación de recursos, algoritmos de enrutamiento para QoS, etc.	
	Complejidad del Hardware y del plano de control	Simple	Hardware: FDL's, mecanismos de contención. Alta complejidad computacional	Hardware: FDL's, mecanismos de contención. Alta complejidad computacional
Plano de Control	Implementación	GMPLS	GMPLS	Sin definirse
	Cabecera de señalización	Pequeña	Pequeña/Mediana	Grande
	Adaptación (tráfico y fallas)	Se necesita reconfigurar la red	No se necesita reconfigurar la red debido a la multiplexación estadística del tráfico. Necesaria la implementación de algoritmos que balanceen la carga de tráfico.	
Manejo de la Ruta	Duración de la conexión en un nodo	Muy larga	Duración de la ráfaga (dependiendo de la forma en que se reserven los recursos)	Duración del paquete
	Camino de la conexión	Caminos de luz físicos	LSP's ópticos lógicos	
	Garantías de la transferencia de la información (cuando no ha habido fallas)	Ancho de banda garantizado	Variable	
	Complejidad	Problema de asignación de rutas y longitudes de onda	Enrutamiento sobre LSP's ópticos	
	Ingeniería de tráfico	Simple	Compleja	
	Protección y restauración (nivel de protección)	Fibra, circuitos ópticos	Sin definir	
Internetworking Legacy Networks	Complejidad en la operación de los nodos de borde (agregación, adaptación)	Falta de agregación. Adaptación solo a nivel de la capa física	Problemas de ensamblaje de ráfagas, agregación de tráfico	Problemas de ensamblaje de los paquetes, ordenamiento de los paquetes

4.2. Conmutación en el dominio óptico contra la conmutación en el dominio electrónico

Sabemos que la conmutación óptica permitirá alcanzar el objetivo de construir redes completamente ópticas. En base a la información expuesta en secciones anteriores entendemos los beneficios de contar con redes completamente ópticas, el desarrollo de las distintas técnicas de conmutación en el dominio óptico permitirá la construcción de este tipo de redes, cada vez más eficientes.

Un conmutador óptico exhibe ciertas ventajas en cuanto a funcionamiento y estructura, frente a un equipo de conmutación electrónico; ventajas inherentes al medio de transmisión en sí. Sabemos bien que la información transmitida por un hilo de fibra óptica puede viajar una mayor distancia a mayor velocidad que en un cable de cobre; la transmisión de datos por el medio óptico es más eficiente en cuanto a consumo de potencia se refiere. Estas características son heredadas por las estructuras de conmutación ópticas. Por otro lado en cuanto a dispositivos de procesamiento y almacenamiento se refiere; los elementos electrónicos tienen un mayor grado de madurez tecnológica, es por esto que en principio se planea mantener las funciones de control en el dominio electrónico. En cuanto al aspecto económico, es cierto que se espera que un conmutador óptico sea un equipo costoso; sin embargo lo mismo se aplica para cualquier tecnología de nueva generación y no olvidemos que la materia prima usada en la fabricación de equipamiento óptico es abundante en la naturaleza; en contraste por lo general en el mercado el precio de los metales tiende al alza, por el hecho de ser recursos limitados.

Las estructuras de conmutación óptica se basan exclusivamente en arquitecturas espaciales, a diferencia de las estructuras electrónicas con distintas clases de arquitecturas; esta diferencia no implica una ventaja tecnológica sino simplemente diferentes modos de funcionamiento. Pero dado que no se dispone

de memorias ópticas esto complica el diseño de los conmutadores. El tiempo de conmutación es un factor importantísimo a ser considerado en la construcción de conmutadores. En los equipos electrónicos este tiempo está en el orden de los picosegundos; tecnologías como la conmutación usando elementos ferroeléctricos o los SOA's prometen ofrecer tiempos de conmutación lo suficientemente bajos como para conmutar en la granularidad de paquetes.

Para finalizar debemos tener en cuenta que tanto la conmutación en el dominio óptico como en el electrónico tienen sus puntos fuertes y limitaciones; e inclusive a largo plazo habrán puntos de un red donde probablemente la conmutación y otras funciones permanezcan en el dominio electrónico y otras áreas donde la red será completamente óptica.

4.3. Limitaciones en la actualidad de los dispositivos ópticos

En esta sección recopilaremos la información expuesta en capítulos anteriores sobre las limitaciones de los dispositivos ópticos y de la tecnología óptica en general. Ya que son estas mismas limitaciones las que en parte fomentan el desarrollo de la tecnología de conmutación óptica de ráfagas, como un modelo de conmutación óptica que delega ciertas funciones a la electrónica.

Almacenamiento.- La capacidad de almacenar la información durante un período de tiempo es una característica importante en toda red. Esta capacidad determina en parte el tiempo que se tiene para procesar información de control e influye sobre el retardo y las pérdidas de unidades de datos en la red. Hoy por hoy lo más cercano a un dispositivo de almacenamiento óptico son las líneas de retardo de fibra. Estas retardan la llegada de la información al hacerla simplemente transitar una mayor distancia, el tiempo de retardo puede ser considerado como el tiempo que la información puede ser almacenada. Pero esta técnica involucra algunas desventajas: atenuación, al hacer que la información viaje mayores

distancias y también el retardo introducido por el mismo factor; es una estructura poco eficiente ya que se necesitan grandes longitudes de fibra para obtener un retardo en el orden de los microsegundos.

Procesamiento.- En todo sistema el volumen de información procesado por unidad de tiempo constituye una variable importante a ser considerada dentro del mismo. Dentro de este parámetro no solo entran en juego los dispositivos de procesamiento en sí, sino también todos los algoritmos usados para cumplir con las distintas funciones necesarias para la operación del sistema. En un sistema de transporte de datos se cuenta con procesadores lo suficientemente rápidos para cumplir con las demandas del protocolo que se desee implementar tratando siempre de mantener cada algoritmo simple en su programación a fin de reducir el costo de procesamiento sin sacrificar la confiabilidad del sistema de transporte. Para el caso de tecnologías de conmutación óptica, incluida OBS, el costo de procesamiento es simplemente demasiado alto como para pensar en implementar una unidad de control completamente óptica; la tecnología de lógica óptica existente hoy en día no satisface las necesidades de procesamiento de una red de transporte actual. Pero como sabemos OBS en su diseño evade este problema confiando el control de la red a dispositivos electrónicos, de un grado de madurez tecnológica superior a cualquier tecnología óptica.

Dispositivos ópticos.- En cuanto a equipamiento óptico se refiere ahora sabemos que la tecnología está a solo unos pasos de poder hacer realizable la construcción de una red OBS. Tenemos a nuestra disposición estructuras de conmutación que a corto plazo serán lo suficientemente veloces como para conmutar en la granularidad de una ráfaga. Contamos con un grado de madurez altísimo en cuanto a multiplexación óptica se refiere. En cuanto a técnicas de contención, imprescindibles en un modelo de conmutación que no contempla el almacenamiento de los datos, la opción de conversión de longitud de onda es la más atractiva y eficiente; que de momento no puede ser implementada debido a que estos dispositivos no tienen un tiempo de respuesta lo suficientemente bajo, pero a corto plazo encontraremos ya en el mercado convertidores de longitud de

onda lo suficientemente rápidos. Otros dispositivos ópticos como lo son regeneradores están a la par con las necesidades de transporte de hoy en día. Para finalizar los distintos algoritmos propuestos hasta la fecha para realizar las funciones necesarias en OBS se encuentran ya en etapas de evaluación por lo que podríamos pensar en el desarrollo de un estándar ya en los próximos años.

Costo.- Sin importar que tan atractiva pueda resultar cierta solución tecnológica, no significa nada si para su introducción es necesaria una inversión alta que tal vez sea recuperada en un período de tiempo muy largo y que no se ajuste a las necesidades de las diferentes compañías que se dedican al transporte de datos, porque al final del día lo que cuenta para una compañía es si puede o no hacer dinero explotando los recursos que tiene a su disposición. Para que una tecnología como OBS y de hecho cualquier tipo de tecnología donde sea que se quiera aplicarla debe ser atractiva económicamente. En nuestro caso para que esto sea posible primero se necesita reducir costos de equipamiento, conforme se vaya desarrollando una producción cada vez más masiva de los distintos componentes el costo de los equipos irá reduciéndose proporcionalmente. Luego se necesita de un plano de control eficiente que permita reducir los costos de operación de la red OBS. Solo así se podrá introducir exitosamente esta tecnología.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente podríamos esperar que la tecnología de conmutación óptica de ráfagas vea la luz a mediano plazo, conforme las necesidades de las compañías de transporte se incrementen y empiecen a considerar la necesidad de llevar esta tecnología a nivel comercial. A medida que distintas empresas empiecen a invertir en la construcción de equipos y el desarrollo de los estándares necesarios, no solo se estará dando un incentivo sino también se impondrá cierta presión sobre el fabricante y las entidades reguladoras para agilizar el proceso.

4.4. Requisitos para migrar a una red conmutada por ráfagas

En la sección 3.3 hablamos de una estrategia de migración gradual a una red OBS, la misma considera originalmente una red compuesta por OXC's en su núcleo. Esto debido a que una red que tiene cierta capacidad de conmutación óptica no estará sujeta a muchos cambios en su estructura, debido en parte a la transparencia con que opera la misma. Por otro lado una red en que la conmutación sea hecha en el dominio electrónico no podría ser cambiada de forma gradual, lo que hace que la migración sea prácticamente imposible bajo condiciones de trabajo normales en donde la operación no puede ser ininterrumpida.

Hasta este punto diremos que un requisito es que la red original tenga alguna capacidad de conmutación óptica sea que esta use OXC's o ROADMs en su núcleo; por otro lado dado que estas redes operan ya a velocidades de transferencia altas, tienen ya contemplado en su diseño el problema de regeneración de la señal. La adición de estos dispositivos es necesaria dados los parámetros de funcionamiento de la red, pero no supone mayor problema desde el punto de vista del operador ya que estos sistemas vienen incluidos dentro del hardware de los conmutadores y/o multiplexores.

Por último la integración del plano de control entre las redes ópticas de la actualidad se espera se haga por medio del protocolo GMPLS para la migración a redes conmutadas por ráfagas. Para finalizar entonces concluiremos en esta sección que para hacer una migración gradual hacia la tecnología de conmutación óptica de ráfagas es un requerimiento que la red original tenga capacidad de conmutación óptica y transparencia; el adecuado tratamiento de la señal bajo los parámetros de funcionamiento impuestos y un plano de control compatible. Recordemos que una migración gradual es deseable desde el punto de vista del operador ya que es la forma más eficiente de reemplazar hardware ya que las interrupciones sobre la operación de la red se mantienen mínimas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El paradigma de conmutación óptica de ráfagas es tecnológicamente viable, ya que su operación relega las funciones de control al plano electrónico y trabaja bajo un esquema en donde no se necesita que los nodos almacenen la información. Por lo tanto la carencia de memorias y procesadores ópticos deja de ser un problema, haciendo realizable la implementación de OBS.
- La transparencia inherente a una red completamente óptica (como es el caso de OBS) implica que los datos son transferidos independientemente del formato, protocolo y tasa de transmisión, lo cual conlleva ventajas como una reducción en el retardo de procesamiento, simplificación en la interfaz con otras redes que operan sobre otras tecnologías, reducción en los costos de operación y mantenimiento de la red. Pero por otro lado una completa transparencia también significa que los datos transportados no pueden ser monitoreados, por lo que la operación del plano de control en este tipo de redes es crítica en comparación a otras tecnologías.
- Un nodo OBS no dispone de unidades de almacenamiento, pero si de un sistema de contención. Sin la inclusión de un sistema de contención se tendría un porcentaje de pérdida de ráfagas demasiado alto, considerando que siempre existe la posibilidad que una ráfaga no disponga de los recursos necesarios para su transmisión en cualquiera de los nodos de núcleo que componen una red OBS.
- La inclusión de líneas de retardo puede ser hecha de forma modular. Es decir el equipamiento OBS puede diseñarse de tal forma que contemple la inclusión de líneas de retardo en los nodos de núcleo como un módulo o unidad individual. Por lo tanto se tiene cierta flexibilidad al momento de decidir el retardo que se desea agregar por nodo, esto es importante ya que el tiempo de retardo necesario va a variar de nodo a nodo, en

función del tráfico de red y la topología de esta. Además que método de líneas de retardo es adaptable a cualquier otro método de contención y la posibilidad de elegir arbitrariamente el tiempo total de retardo aumenta esta adaptabilidad.

- Dentro de los distintos métodos de contención mencionados, la conversión de longitud de onda es una alternativa atractiva. Debido a su concepto sencillo: el de enviar una ráfaga que no tiene disponibles recursos para su transmisión por una longitud de onda diferente que se encuentre libre en ese momento; en consecuencia no se agrega retardo alguno a las ráfagas. Este método puede ser combinado con cualquiera de los métodos de contención estudiados para lograr reducir aún más la probabilidad de pérdida de ráfagas.
- La implementación de JET como protocolo de señalización supone una mejor utilización de ancho de banda en comparación a otras alternativas. El esquema de reservación atrasada y reservación cerrada hacen un uso más eficiente de los recursos reservándolos solo momentos antes del arribo de la ráfaga y liberándolos solo momentos después que esta ha salido del nodo.
- La diferenciación de servicio se logra haciendo uso de los recursos existentes dentro de la red OBS, esto facilita la implementación de mecanismos de contención y también reduce el costo computacional de esta. Ejemplo de esto es el mecanismo de segmentación de la ráfaga o la técnica de prevención de longitud de onda.
- A nivel de transporte, sin lugar a dudas, las tecnologías de comunicación ópticas dominarán el panorama general. Ya que las redes ópticas poseen claras ventajas frente a otros medios de comunicación en la actualidad; el transporte óptico de la información es la clave para satisfacer las necesidades de ancho de banda a largo plazo.

- Incluso con una introducción a largo plazo de OPS, el esquema de conmutación de ráfagas se puede mantener en redes con una alta carga de tráfico, dado su bajo retardo de procesamiento y al hecho que las ráfagas pasan a través de la red sin ser almacenadas en nodos intermedios.
- La clave para una exitosa migración a una red OBS consiste en un plan que pueda ser llevado a cabo de forma gradual, por lo tanto una correcta integración entre OBS y cualquier tecnología de transporte óptico es esencial para alcanzar este objetivo. Sabiendo que en la actualidad tecnologías ópticas de vanguardia son: OCS con una arquitectura basada en OXC's y OCS con arquitecturas basadas en ROADM's. La migración puede hacerse en el primer caso dada la transparencia inherente a una red compuesta por OXC's, lo que permite la adición de conmutadores OBS y en el segundo caso el protocolo GMPLS o similares serán la clave para la estandarización e interoperabilidad entre tecnologías de conmutación automáticas.

Recomendaciones

- Se debe evaluar la inclusión de conceptos básicos y avanzados sobre comunicaciones ópticas dentro de programa de estudios para la especialidad de telecomunicaciones, ya que como he señalado las redes de transporte de próxima generación estarán constituidas en su gran mayoría por tecnologías de comunicación ópticas (tecnologías completamente ópticas).
- Sobre el punto anterior cabe recalcar que siempre se debe obedecer las necesidades a nivel nacional. No tiene sentido preparar profesionales con conocimientos sobre tecnologías inexistentes en el país. Pero sí siempre dotar de los conocimientos fundamentales para que el individuo

pueda desenvolverse cómodamente ante la inminente comercialización de tecnologías como OBS.

- Futuros proyectos de titulación pueden orientarse en expandir cualquiera de los temas abordados en este trabajo, como: señalización, calidad de servicio, contención, diseño de algoritmos, evaluaciones de desempeño; solo por nombrar algunos. La simulación ahora es una opción viable y atractiva para evaluar los distintos mecanismos que operan sobre una red óptica conmutada por ráfagas.
- Siempre es recomendable que el salto de una tecnología a otra sea hecho de forma gradual, por una simple razón: una red de comunicaciones debe operar todo el tiempo evitando cortes innecesarios; caso contrario la entidad que lucra de dicha red va a tener pérdidas económicas. Dentro del panorama nacional muchas compañías se encuentran en el punto de cambio de tecnologías de transporte electrónicas a tecnologías ópticas. Este cambio debería contemplar la modernización del mismo hacia tecnologías de conmutación completamente ópticas, siempre teniendo en cuenta que la migración debe ser hecha de forma gradual.
- El resto de entidades que cuentan ya con infraestructuras ópticas, deben considerar cual será su siguiente salto de generación. Evaluando en función de la capacidad actual de transporte de la red y la capacidad necesaria a futuro. En la totalidad de los casos a nivel nacional las redes de vanguardia no son completamente ópticas e incluyen en sus estructuras ADM's y/o DXC's, por lo que se recomienda que el siguiente escalamiento tecnológico se oriente hacia una red conmutada por circuitos ópticos.

Referencias Bibliográficas

- [1] El-Bawab Tarek, *Optical Switching*, primera edición, Springer Science+Media Inc., New York 2006.
- [2] Varios autores, *Diccionario Enciclopédico Salvat*, tomo 20, primera edición, Salvat Editores, Barcelona 1986.
- [3] Networks Group - Politecnico di Torino, http://www.telematica.polito.it/mellia/corsi/07-08/reti_ottiche_master/, 27/03/2010.
- [4] Wikipedia la enciclopedia libre, <http://en.wikipedia.org/wiki/Granularity>, 07/04/2010.
- [5] Maier Martin, *Optical Switching Networks*, primera edición, Cambridge University Press, New York 2008.
- [6] Qiao Chunming, Yoo Myungsik, "Optical Burst Switching (OBS) – A New Paradigm for an Optical Internet", *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, número 1, págs. 69-84, 1999.
- [7] Dr. Paschotta , Rüdiger, Laser Diodes, http://www.rp-photonics.com/laser_diodes.html, 11/04/2010.
- [8] Farahmand Farid, Vokkarane Vinod M., Jue Jason P., Rodrigues Joel J.P.C., Freire Mário M., "Optical burst switching network: A multi-layered approach", *Journal of High Speed Networks*, vol. 16 número 2, págs. 105-122, 2007.
- [9] Millán Tejedor, Ramón Jesús, Integración de redes ópticas e IP con GMPLS, <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/gmpls.php>, 1/06/2010.
- [10] Liu Jingxuan, Ansari Nirwan, Ott Teunis J., "FRR for Latency Reduction and QoS Provisioning in OBS Networks". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21 número 7, págs. 1210-1219, 2003.
- [11] Papadimitrov Georgios I., Papazoylu Chrisoula, Pomportis Andreas S., *Optical Switching*, primera edición, Wiley Interscience, Malden 2007.
- [12] Xiong Yijun, Vandenhoute Marc, Cankaya Hakki, "Control Architecture in Optical Burst-Switched WDM Networks", *IEEE Journal on Selected Areas In Communications*, vol. 18 número 10, págs. 1838-1851, 2000.
- [13] Vokkarane Vinod M., Jue Jason P., "Burst Segmentation: An Approach for Reducing Packet Loss in Optical Burst-Switched Networks", *SPIE/KLUWER OPTICAL NETWORKS*, vol.4 número 6, págs. 1-8, Diciembre del 2003.

-
- [14] Lee SuKyoung, Sriram Kotikalapudi, Kim HyunSook, Song JooSeok, "Contention-Based Limited Deflection Routing Protocol in Optical Burst-Switched Networks", *IEEE Journal on Selected Areas In Communications*, vol. 23 número 8, págs. 1596-1611, Agosto del 2005.
- [15] Phuritatkul Jumpot, Ji Yusheng, Zhang Yongbing, "Blocking Probability of a Preemption-Based Bandwidth-Allocation Scheme for Service Differentiation in OBS Networks", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 24 número 8, págs. 2986–2993, Agosto del 2006.
- [16] Millán, Ramón, La tecnología líder del transporte óptico: SDH, http://www.ramonmillan.com/tutoriales/sdh_parte1.php, http://www.ramonmillan.com/tutoriales/sdh_parte2.php, 14/07/2010.
- [17] UBM Techweb, Light Reading, Verizon: Give Us More Flexible ROADMs for 100G, http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=192186, 28/07/2010.
- [18] Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, AMPLIFICADORES Y OSCILADORES ÓPTICOS, http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/105/htm/sec_6.htm 18/08/2010.
- [19] Wikipedia la Enciclopedia libre, Amplificador óptico, http://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_%C3%B3ptico, 18/08/2010.
- [20] UBM Techweb, Light Reading, Optical networking – Tunable Lasers Revisited, http://www.lightreading.com/document.asp?doc_id=26332, 6/9/2010.
- [21] Ramaswami Rajiv, Sivarajan Kumar N., Sasaki Galen H., *Optical Networks: A practical perspective*, tercera edición, Morgan Kaufmann Publishers, Burlington-Massachusetts 2010.
- [22] Ramos Pascual, Francisco, Regeneradores Ópticos 3R(III), <http://www.conectronica.com/Redes-Opticas/Regeneradores-%C3%B3pticos-3R-y-III.html>, 22/9/2010.
- [23] Chou Chun Tung, Safaei Farzad, Boustead Paul, Ouveysi Iradj, "A hybrid optical network architecture consisting of optical cross connects and optical burst switches", *Proceedings 12th International Conference on Computer Communications and Networks*, págs. 53-58, Octubre del 2003.
- [24] Klinkowski M., Careglio D., Solé-Pareta J., "Wavelength vs. Burst vs. Packet Switching: comparison of optical network models", *Proceedings of e-Photon/ONe Winter School workshop*, Aveiro, Portugal, Febrero del 2005.