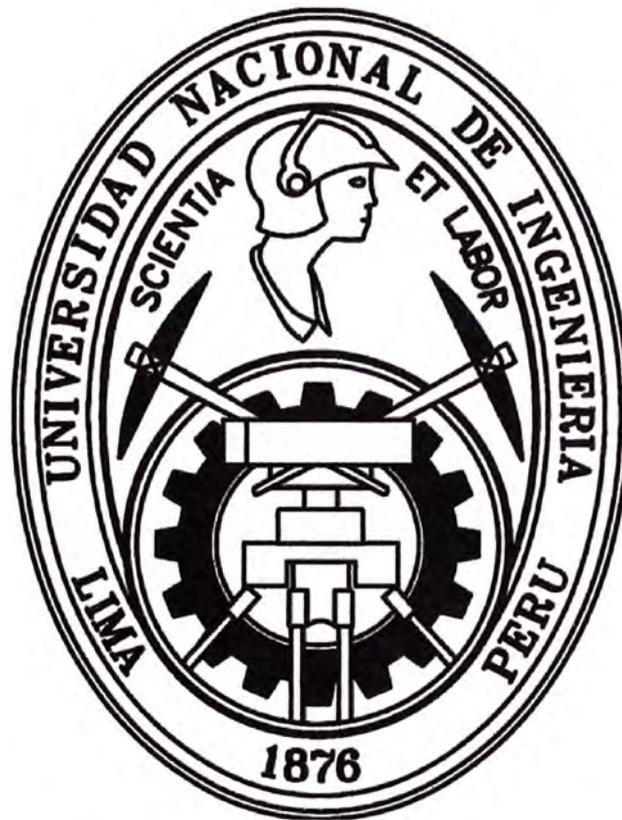


# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**CONMUTACIÓN ÓPTICA**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADO POR:**

**RONALD RAMÍREZ LUNA**

**PROMOCIÓN  
2003 - I**

**LIMA – PERÚ  
2008**

# CONMUTACIÓN ÓPTICA

*“A mi familia, que son la base de todos mis éxitos”*

## **SUMARIO**

En el presente informe se hace una revisión rápida de las tecnologías de Conmutación Óptica utilizadas para la implementación de redes ópticas de transmisión de datos.

Previamente a esta revisión se hace una mención de las tecnologías utilizadas en la implementación de este tipo de redes de transmisión de datos.

Se desarrolla también el concepto de redes ópticas de transmisión de datos basados en conmutación óptica de ráfagas.

Finalmente se hacen conclusiones respecto de los temas desarrollados en este informe.

## INDICE

	Pág.
<b>SUMARIO</b>	v
<b>INDICE</b>	vi
<b>PROLOGO</b>	1
<b>CAPITULO 1 – INTRODUCCIÓN</b>	3
1.1 Extensión de las redes de transmisión de datos	4
1.1.1 Redes de Área Local (LAN)	4
1.1.2 Redes de Área Metropolitana (MAN)	4
1.1.3 Redes de Área Extensa (WAN)	4
1.2 Topologías de redes de transmisión de datos	4
1.2.1 Redes de bus lineal	5
1.2.2 Redes en estrella	5
1.2.3 Redes en anillo	6
1.3 Conmutación del flujo de datos en una red de transmisión de datos	6
1.3.1 Conmutación por circuitos	7
1.3.2 Conmutación por paquetes	7
<b>CAPITULO 2 – EVOLUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE REDES ÓPTICAS DE TRANSMISIÓN DE DATOS</b>	8
2.1 Redes FDDI (Fiber Distributed Data Interface)	8
2.1.1 Características de la tecnología FDDI	8
2.2 ATM y SONET/SDH	12
2.2.1 Característica de la tecnología SONET/SDH y ATM	12
2.3 Multiplexación por División de Longitud de Onda	20
2.3.1 Características de la tecnología WDM	21

<b>2.4 Resumen</b>	31
<b>CAPITULO 3 – TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN ÓPTICA</b>	33
3.1 Optical Cross-Connect (OXC)	33
3.1.1 Interfaces de interconexión óptica para distancias cortas	34
• Short-Reach (SR)	35
• Very Short-Reach (VSR)	35
3.1.2 Arquitecturas de implementación de OXC	38
• OXC con núcleo eléctrico	38
• OXC con núcleo óptico y conversores O/E/O	39
• OXC con núcleo óptico directamente conectados a los transponders WDM	39
• OXC totalmente óptico	40
3.1.3 Elementos y tecnologías usadas en la implementación de un switch óptico	40
• Microelectromechanical Systems (MEMS)	41
• Acopladores y Splitters	43
• Interferómetro Mach-Zehnder	46
• Digital Optical Switching (DOS)	47
• Semiconductor Optical Amplifiers (SOA)	49
• Bubbles switch	52
3.2 Paradigmas de conmutación óptica.	54
3.2.1 Conmutación Óptica de Circuitos (OCS)	55
3.2.2 Conmutación Óptica de Paquetes (OPS)	56
3.2.3 Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS)	57
3.2.4 Conmutación Óptica por Etiquetas (OLS)	58
<b>CAPITULO 4 – REDES ÓPTICAS TRANSMISIÓN DE DATOS BASADAS EN CONMUTACIÓN ÓPTICA DE RÁFAGAS</b>	60
4.1 Concepto	60
4.2 Protocolos	63
• TAG (Tell and Go)	63
• IBT (In band terminator)	64
• RDF (Reserve a fixed duration)	64
4.3 Algoritmos de planificación	67

Horizon	69
LAUC-VF	69
LGVF	69
Min-SV	70
Min-EV	70
4.4 Resolución de contenciones	70
Desvío de ráfagas	71
Segmentación de ráfagas y desvío	71
4.5 Calidad de Servicio (QoS, Quality of Service)	73
<b>CONCLUSIONES</b>	79
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	80
<b>GLOSARIO DE SIGLAS</b>	83

## PROLOGO

El siguiente informe tiene como objetivo servir como una referencia rápida acerca de Conmutación Óptica. En este se mencionan técnicas de conmutación óptica utilizadas en la implementación de redes ópticas de transmisión de datos, haciendo previamente un recuento de las tecnologías utilizadas inicialmente en la implementación de este tipo de redes de transmisión de datos, y resaltando cómo las limitaciones de estas tecnologías, en extensión, capacidad de transmisión de datos y flexibilidad, requirió de que se busquen mejores opciones para que las futuras redes ópticas cuenten también con la capacidad de conmutación, para hacer más eficientemente el uso de sus elementos y capacidades de transmisión de datos. Se analiza la información de las opciones tecnológicas con las que se cuentan para la implementación de una red óptica de transmisión de datos bajo un esquema de conmutación óptica.

Para ello se ha dividido este informe en 4 capítulos y en una sección conteniendo conclusiones en base a los temas desarrollados en estos capítulos.

En el primer capítulo titulado **INTRODUCCIÓN**, se hace referencia a conceptos básicos de redes de transmisión de datos, que guardan relación con los conceptos a desarrollarse en los capítulos posteriores.

En el segundo capítulo titulado **EVOLUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE REDES ÓPTICAS DE TRANSMISIÓN DE DATOS**, se hace referencia, en un orden cronológico de aparición (ó creación), a las tecnologías más comúnmente usadas para implementar redes de transmisión de datos basadas en tecnología óptica, haciendo hincapié en sus principales características.

En el tercer capítulo titulado **TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN ÓPTICA**, se hace mención a elementos de la red óptica de transmisión de datos encargados de dicha función, así como de las opciones tecnológicas con las que se cuentan para la implementación de

dichos elementos. Se hace mención también a paradigmas relacionados con la conmutación del flujo de datos en redes ópticas de transmisión de datos.

En el capítulo cuarto titulado **REDES ÓPTICAS DE TRANSMISIÓN DE DATOS BASADAS EN CONMUTACIÓN ÓPTICA DE RÁFAGAS**, se presenta a este tipo de redes como una alternativa práctica para la implementación de redes ópticas de transmisión de datos desarrollando este concepto y mencionando sus características.

En **CONCLUSIONES**, se resaltan los puntos que a mi parecer tienen mayor relevancia en el desarrollo de las redes ópticas de transmisión de datos, así como en la implementación de las técnicas de conmutación óptica mencionadas durante el desarrollo del informe.

Este informe se basa en información obtenida en la revisión de textos y publicaciones en Internet escritos en referencia al tema. Se ha tratado de unificar la información obtenida con el fin de estructurar el contenido en una presentación final que permita su comprensión en una manera ordenada y dinámica. Estos textos y publicaciones están indicados en la **BIBLIOGRAFÍA** del presente informe.

Espero que este informe sirva a mis colegas y estudiantes como referencia y guía rápida sobre este tema de Conmutación Óptica cuando necesiten implementar un proyecto sobre el tema.

*Ronald Ramírez Luna*

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

Hoy en día se requieren de sistemas de transmisión de datos que nos permitan manejar un amplio flujo de datos entre sus elementos. También se requiere que esta tarea de transmisión de datos se realice sin generar retrasos que podrían afectar las aplicaciones que puedan estar haciendo uso de estos sistemas.

La implementación de redes ópticas de transmisión de datos basados en fibra óptica como medio de transmisión permite afrontar de una manera innovadora la solución a dichos retos, brindándonos un medio de transmisión con una amplia capacidad de transmisión de datos.

Esta ventaja brindada por el uso de redes ópticas de transmisión de datos puede complementarse con la implementación de técnicas de conmutación dentro de estas redes, permitiendo esto un uso más eficiente de los elementos de este tipo de redes de transmisión de datos. Más aún si logramos que estas técnicas de conmutación sean de naturaleza óptica. Esto último nos permite una mejora en la capacidad de conmutación (respecto a cuantos bits por segundo pueden conmutar), así como también en la reducción del tiempo de retraso en la transmisión de datos entre dos ó más terminales dentro de una red óptica de transmisión de datos. Esto nos permite un mejor uso de la capacidad de transmisión de datos de una red óptica.

A continuación un resumen de algunos conceptos básicos sobre redes de transmisión de datos que servirán de guía para poder entender los conceptos que veremos en los siguientes capítulos durante el desarrollo del presente informe.

## 1.1 Extensión de las redes de transmisión de datos

Las redes de transmisión de datos pueden clasificarse, de acuerdo a su extensión, de la siguiente manera:

- 1.1.1 **Redes de Área Local** (LAN, Local Area Networks) las cuales permiten la interconexión de los elementos dentro de una red de transmisión de datos ubicados en una oficina, en un edificio ó en un campus.
- 1.1.2 **Redes de Área Metropolitana** (MAN, Metropolitan Area Networks) las cuales permiten la interconexión de los elementos dentro de una red de transmisión de datos ubicados en una ciudad ó en una área metropolitana.
- 1.1.3 **Redes de Área Extensa** (WAN, Wide Área Networks) las cuales permiten la interconexión de los elementos dentro de una red de transmisión de datos ubicados en una área geográfica amplia, por ejemplo entre países ó continentes.

En el siguiente capítulo daremos una revisión de las tecnologías utilizadas en la implementación de redes ópticas LAN, que marcaron el inicio del uso de soluciones de transmisión basadas en fibra óptica como medio de transmisión, y de cómo fue evolucionando el concepto de redes ópticas mediante el uso de tecnologías que permiten implementar redes MAN/WAN, con gran capacidad de transmisión y conmutación de datos.

## 1.2 Topologías de redes de transmisión de datos

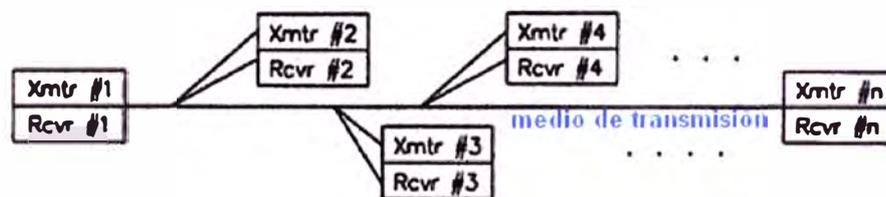
Las **topologías de redes de transmisión de datos** son distribuciones, a nivel físico ó lógico, de los elementos que forman parte de una red de transmisión de datos. Estas topologías nos permiten tener una idea de como se realiza la tarea de transmitir ó intercambiar datos entre los elementos de una red de transmisión de datos.

Son muchas las topologías de redes de transmisión de datos implementadas alrededor del mundo; dentro de estas, en forma general, se pueden distinguir de forma básica tres tipos: las redes de **bus lineal**, redes en **estrella** y las redes en **anillo**. Cabe recalcar que en el hecho práctico las topologías de redes de transmisión de datos reales son el resultado de una combinación de estas topologías básicas.

Los elementos que forman parte de una red de transmisión de datos se pueden clasificar en dos clases: Los **Terminales** (PC, servidores, routers, módems, switches, etc.), que son los elementos que generan una necesidad de información ó que la satisfacen; conforman la parte activa de una red de transmisión de datos. El **medio de transmisión** (cobre, fibra óptica, aire, etc.), que son los encargados de la interconexión entre los terminales y son el canal por donde fluye los datos entre estos; es la parte pasiva de una red de transmisión de datos.

*Nota:* En los siguientes gráficos se considera **Xmtr #n** y **Rcvr #n** como las interfaces de transmisión y recepción, respectivamente, del terminal **n** que forma parte de una red de transmisión de datos.

- 1.2.1 **Redes de bus lineal;** en esta topología de redes de transmisión de datos todos los terminales se conectan a un medio de transmisión común (un ejemplo es el uso de un cable coaxial para interconectar varias PCs; ver Fig. 1.1). A este medio de transmisión común se le denomina bus. Cada interfaz de transmisión/recepción de cada uno de los terminales cuenta con mecanismos que les permiten saber si es posible hacer uso del medio de transmisión para iniciar un flujo de datos hacia otro terminal.



**Fig. 1.1 Red de bus lineal (ref. (3))**

- 1.2.2 **Redes en estrella;** en esta topología todos los terminales se interconectan uno con los otros a través de un terminal central (denominado nodo), el cual se encarga de distribuir los datos entre los terminales. El medio de transmisión ya no es común a todos los terminales, existiendo un segmento de este medio entre el nodo y cada uno de los terminales. Es una configuración que permite agregar ó quitar fácilmente un terminal en una red de transmisión de datos. Tiene la desventaja que, al depender de un nodo, cualquier daño, parcial ó total, que sufriera este nodo es perjudicial para el funcionamiento de toda la red. (ver Fig. 1.2). Es la topología ideal para plantear un esquema de conmutación de flujos de datos.

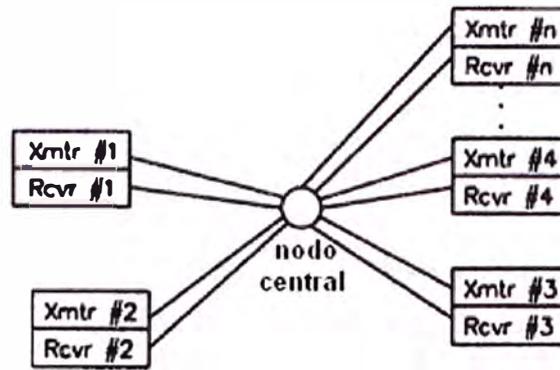


Fig. 1.2 Red en estrella (ref. (3))

- 1.2.3 **Redes en anillo**; en esta topología segmentos del medio de transmisión utilizado unen la interfaz de transmisión de un terminal con la interfaz de recepción de otro, así en forma sucesiva, hasta que se forme un anillo de comunicación. Una de sus desventajas radica en que si uno de los terminales sufre algún daño, toda la red queda fuera de servicio, hasta que este terminal sea reparado ó retirado del anillo. También presenta dificultades al momento de agregar ó quitar un terminal. (ver Fig. 1.3)

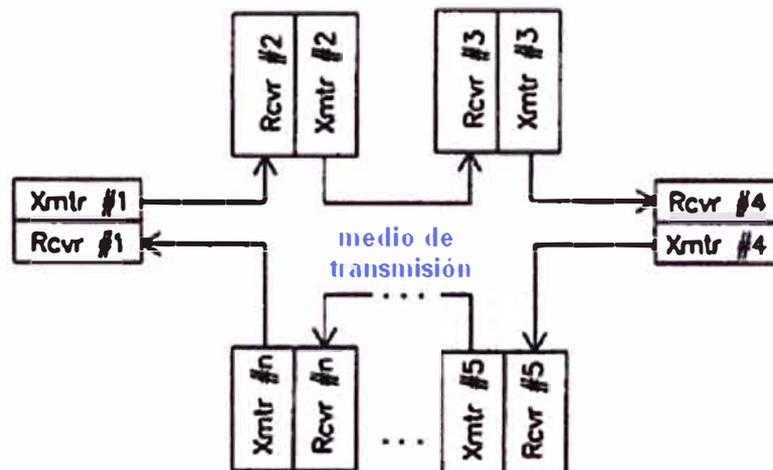


Fig. 1.3 Red de anillo (ref. (3))

### 1.3 Conmutación del flujo de datos en una red de transmisión de datos

**Conmutación**, dentro del concepto de redes de transmisión de datos, no es más que un proceso por el cual se van estableciendo rutas que seguirá un flujo de datos (específicamente de las señales físicas que representan a estas) entre dos ó más elementos dentro de una red de transmisión de datos. Las rutas se establecen de acuerdo a cambios en la interconexión entre los segmentos del o los medios de

transmisión utilizados, siguiendo un criterio de optimización del uso del medio de transmisión y del tiempo de retardo.

Las clases de conmutación de flujo de datos tradicionales son:

- 1.3.1 **Conmutación por circuitos**, en donde se establece una ruta única y exclusiva entre dos terminales. Los datos de direccionamiento solo se transmiten al inicio de la transmisión, una vez establecida la ruta, por esta solo fluyen los datos entre los dos terminales, hasta que se ponga fin al flujo de datos y se libere la ruta. Esto es algo análogo a un sistema de regadío.
- 1.3.2 **Conmutación por paquetes**, en donde el flujo de datos se hacen en unidades de transmisión llamados paquetes. Los datos se dividen en forma ordenada en paquetes para ser transmitidos. Se establece una ruta, no exclusiva (compartida por otros flujos de paquetes) entre los dos (ó más) terminales involucrados en un flujo de datos. Los datos de direccionamiento se transmiten en cada paquete. Los paquetes son recibidos y ordenados, y la información es extraída y ensamblada en el terminal de destino. Esto es algo análogo a un sistema de correos y encomiendas, usado para transportar un auto en piezas para ser ensamblado en otro lugar.

## **CAPITULO II**

### **EVOLUCION DE LAS TECNOLOGIAS DE REDES ÓPTICAS DE TRANSMISIÓN DE DATOS**

#### **2.1 Redes FDDI (Fiber Distributed Data Interface)**

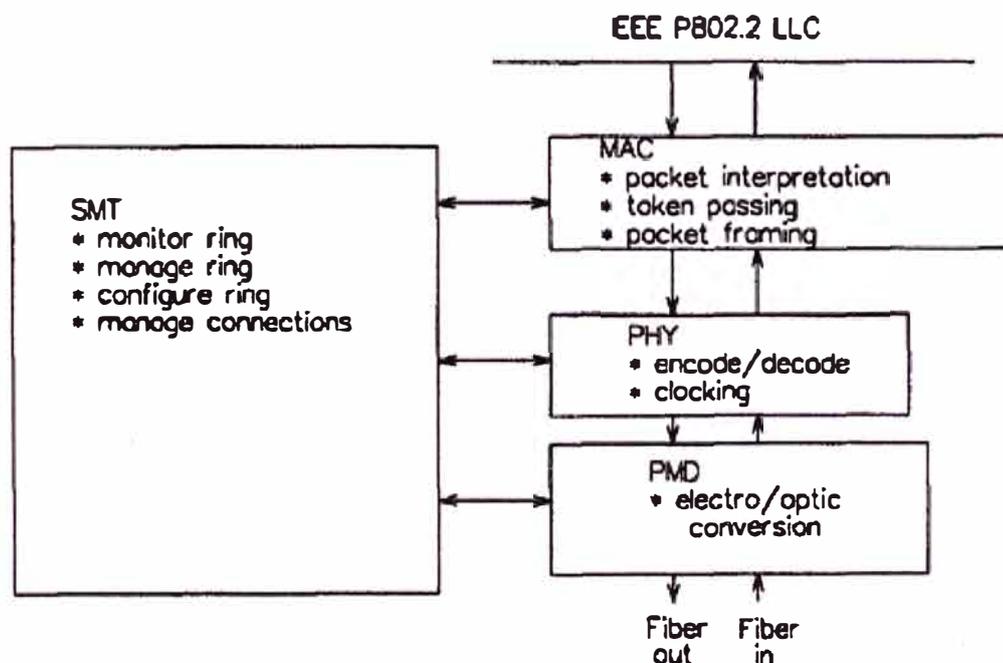
Esta tecnología esta orientada a la implementación de redes LAN, aunque tiene la capacidad de extender estas hasta 100Km. La velocidad de transmisión máxima es 100Mbps, haciendo uso de una señal portadora. Usa la topología de red en anillo, de lo que podemos deducir que un terminal se comunica solo con uno de sus vecinos haciendo uso de un segmento de fibra óptica dedicado a la transmisión de datos en un solo sentido entre estos terminales vecinos. Si lo comparamos frente a una opción de conmutación óptica de flujos de datos el FDDI tiene como debilidad su poca flexibilidad y su baja capacidad de transmisión de datos frente a un esquema de conmutación óptica. En esta primera tecnología el concepto de conmutación no fue considerado optando por un procedimiento de paso de testigo para reservar el uso del medio de transmisión. El concepto de testigo ó token lo desarrollaremos más adelante en este mismo sub-capítulo.

##### **2.1.1 Características de la tecnología FDDI**

El estándar FDDI (ANSI grupo de trabajo X3T9.5) surge ante la necesidad de lograr interconexiones de alta velocidad y performance entre terminales dentro de una LAN ó grupo de LANs.

Funcionalmente se encuentra ubicada en los niveles 1 y 2 de OSI, especificando las siguientes funciones: (ver Fig. 2.1)

- SMT (Station Management) Encargado de monitorear, administrar y configurar el anillo. Determina la conexión lógica entre los terminales y reconfigura automáticamente el anillo en caso de fallas.
- MAC (Media Access Control) Encargado de interpretar los paquetes, además del control del paso de testigo y de las tramas de datos. Es la interfaz que se comunica con los niveles usuarios superiores a través del nivel Standard LLC (Logical-Link-Control).
- PHY (Physical) Encargado de recuperar el reloj, así como de codificar y decodificar las señales que ingresan desde el nivel PMD.
- PMD (Physical Medium Dependent) Encargado de definir las características de las fuentes ópticas, detectores, cables, conectores, bypasses de previsión de falla y características físicas del hardware. Es el encargado de la conversión Opto-Eléctrico.



**Fig. 2.1 Bloques Funcionales de una red FDDI (ref. (3))**

El estándar se basa en una conexión del tipo anillo doble entre los usuarios.

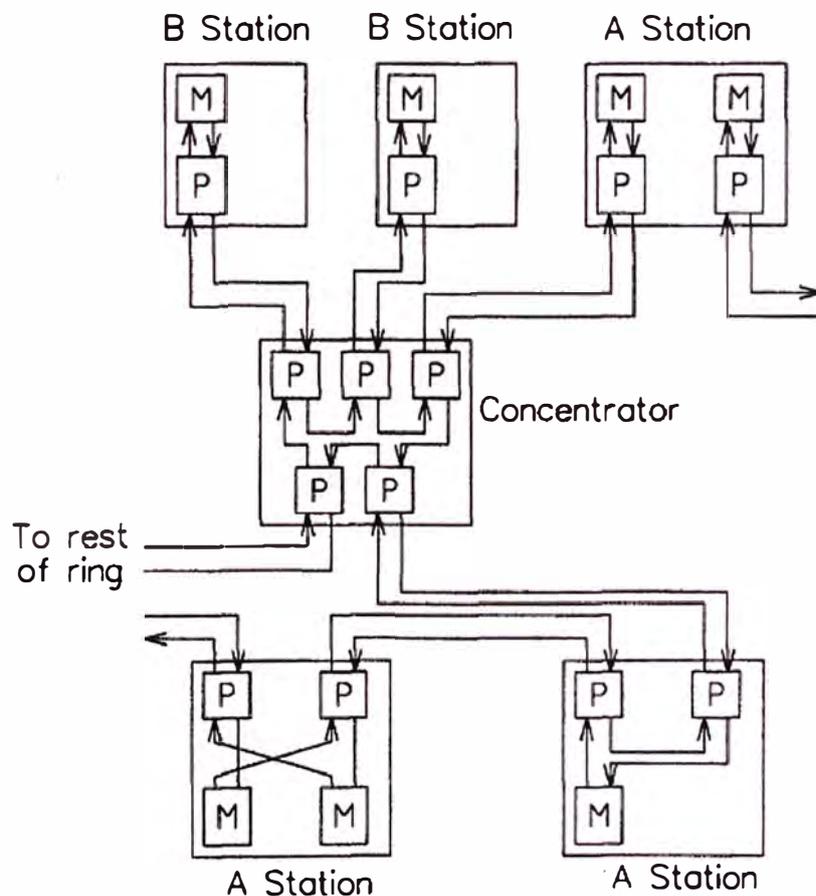
Algunas de sus características se mencionan a continuación:

- Velocidad de transmisión: 100Mbps
- Fuente óptica: 1300 nm (LED's)
- Número de usuarios : Hasta 500 usuarios con conexión de anillo doble
- Distancia máxima de transmisión entre usuarios con conexión de anillo doble :  
Hasta de 100km
- Tamaño de trama : menor ó igual a 4500 bytes

- Realiza transmisiones en forma síncrona y asíncrona
- Cuenta con esquemas de priorización de transmisión
- Cuenta con mecanismos de detección de errores

Existen tres tipos de estaciones definidos dentro del Standard FDDI: (ver Fig. 2.2)

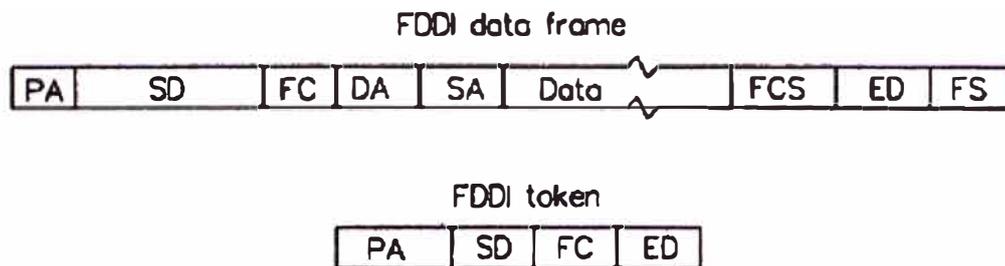
- Nodo Clase A** (dual-attachment station) cuenta con dos interfases físicas y dos interfaces MAC (Media Access Control) para poder desplegar la configuración de anillo doble (estas son llamadas "P"-physic y "M"-management). Es capaz de realizar un bypass en uno de sus interfaces para no interrumpir la transmisión de datos en caso se presente una avería en la otra interfase.
- Nodo Clase B** (single-attachment station) esta tipo de estación cuenta solo con una interfase "P" y una interfase "M" y es conectado a un concentrador el cual esta conectado al anillo. Gracias a esto cualquier falla que se presentara en esta estación, afectaría solo a esta, sin afectar la operación de la red en general.
- Concentrador**, permite a los nodos clase B unirse a través de una configuración del tipo estrella y luego esta combinación es agregada al anillo. También sirve como un puente para redes de menor capacidad de transmisión, las cuales se agregan al anillo a través del concentrador.



**Fig. 2.2 Tipos de estaciones definidas en el estándar FDDI (ref. (3))**

Existen dos entidades encargadas de llevar la información entre los usuarios: (ver Fig. 2.3)

- a) **Trama de datos** (FDDI Data Frame) que lleva los datos a transmitir, además de la información adicional concerniente a delimitadores, direccionamiento, mecanismos de detección de errores.
- b) **Testigo** (FDDI Token) que es usado para autorizar, al que tenga necesidad de transmitir y que lo posea, el derecho de transmisión.



**Fig. 2.3 Formatos de las tramas FDDI (ref. (3))**

La transmisión se realiza haciendo uso del mecanismo llamado paso de testigo (Token).

La forma de funcionamiento es en resumen el siguiente: El testigo es transmitido de usuario a usuario a través de todo el anillo. Este permanecerá rotando alrededor del anillo hasta que encuentre a un usuario que tenga necesidad de transmitir datos, el cual lo "tomará", lo sacará de circulación y lo reemplazará por las tramas de datos, las cuales viajarán a través del anillo hasta encontrar al usuario destino de la información. Una vez que todas las tramas de datos fueron recibidas por el usuario destino, este genera una trama de respuesta al usuario fuente dándole la conformidad de la recepción de los datos. Recibida la respuesta, el usuario fuente regenera el testigo para volverlo a transmitir dentro del anillo, repitiéndose todo el ciclo anterior.

En esta tecnología es necesario realizar una conversión opto-eléctrica de la señal transmitida para realizar el análisis de la información de la cabecera de trama y así poder realizar el direccionamiento de las tramas.

## 2.2 ATM y SONET/SDH

ATM es una tecnología de conmutación de celdas. Para ello hace uso de switches que se encargan de hacer este proceso de conmutación pero en un entorno eléctrico. La parte de transmisión óptica representada por la tecnología SONET/SDH solo es usada como medio de transporte extremo a extremo de alta capacidad (hasta 160Gbps). SONET trabaja bajo un esquema TDM. La combinación de ambos permite la implementación de redes WAN. La topología utilizada por SONET también es el de red en anillo. Frente a un esquema de conmutación óptica tienen las limitantes de la flexibilidad y del retraso que se genera al realizar la conversión óptica/eléctrica para realizar el procedimiento de conmutación.

### 2.2.1 Características de la tecnología SONET/SDH y ATM

El modo de transferencia asíncrona (**ATM**, Asynchronous Transfer Mode) y la red óptica síncrona (**SONET**, Synchronous Optical Network), juntas, nos permiten obtener un servicio portador de gran capacidad de transferencia tanto para voz como para datos, usando la misma red de información. SONET define el método para la transmisión de datos digitales a través de redes ópticas de alta velocidad, mientras que ATM define como organizar las entidades (tramas) que se usarán para la transmisión de los datos, así como de direccionar la información para que los usuarios puedan comunicarse, y a la vez proveer un mecanismo de detección de errores.

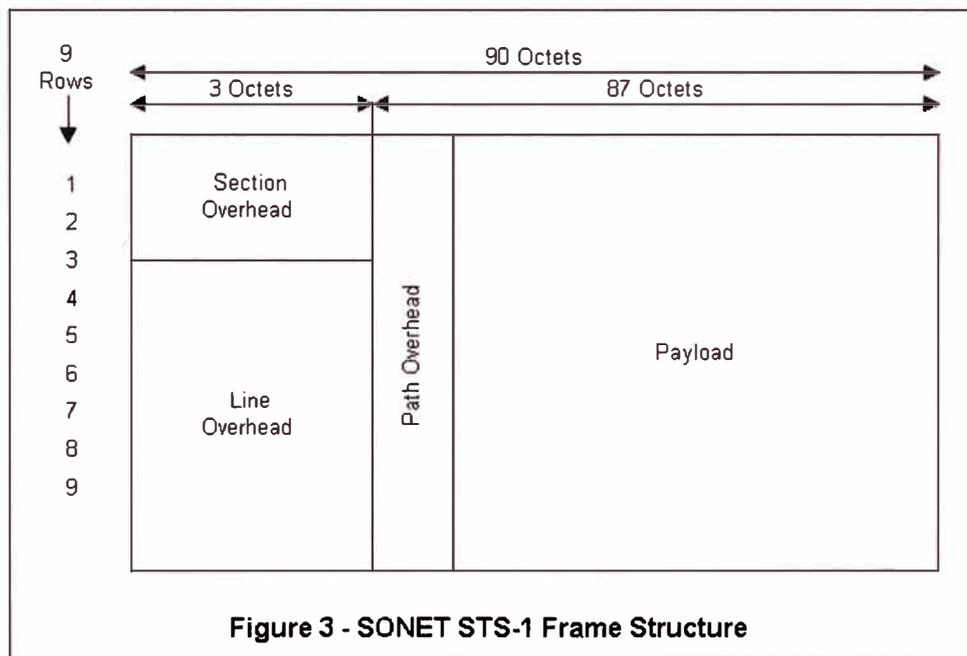
En resumen, si hacemos una comparación respecto al modelo OSI, SONET funcionalmente estaría ubicado en el nivel 1, y ATM funcionalmente estaría en el nivel 2 trabajando sobre SONET.

Esta combinación de tecnologías brinda un servicio a nivel de redes MAN/WAN.

- **SONET/SDH** : Brinda el mecanismo para la codificación y señalización, usados para la transferencia física de información de alta velocidad a través de redes ópticas, bajo un esquema de multiplexación por división de tiempo (TDM, Time Division Multiplexing).

- ❖ La multiplexación se hace tomando una interpolación de bytes (1 byte = 8 bits).
- ❖ Nació de la necesidad de unir las redes de cobre de las compañías telefónicas a las redes ópticas de alta velocidad.
- ❖ La longitud de onda de transmisión es de 1310 nm.
- ❖ Usa una topología del tipo anillo doble.

SONET define una tecnología para transportar muchas señales de diferentes capacidades (velocidades de transmisión), dentro de un ambiente plesiócrono (cada flujo de información cuenta con su propio reloj), a través de una jerarquía óptica síncrona y flexible. El primer paso en el proceso de la multiplexación de SONET implica la generación de las señales del nivel inferior de la estructura de multiplexación. En SONET la señal básica la conocemos como señal de nivel 1 o también STS-1 (Synchronous Transport Signal level 1). Está formada por un conjunto de 810 bytes distribuidos en 9 filas de 90 bytes (esta estructura se muestra en la Fig. 2.4). Este conjunto es transmitido cada 125 microsegundos, correspondientes a la velocidad del canal telefónico básico de 64 Kbps, por lo que la velocidad binaria de la señal STS-1 es 51,84 Mbps.



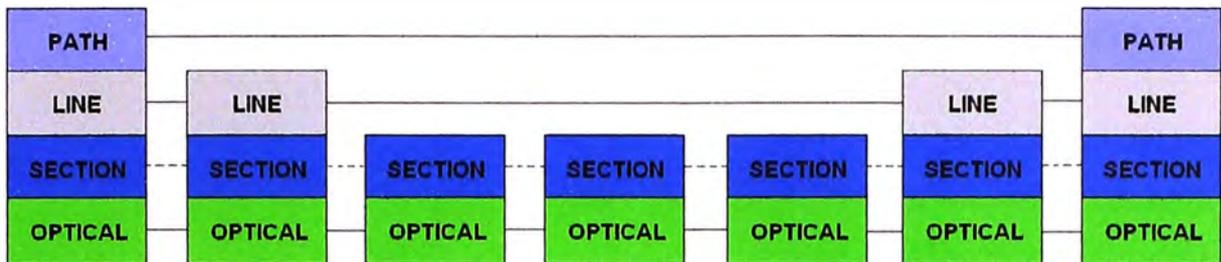
**Fig. 2.4 Estructura de trama de la señal STS-1**

SONET cuenta con los siguientes niveles de señalización: (ver Fig. 2.5)

- **Path**
- **Line**
- **Section**

- **Óptico**

Cada uno de los cuales cuenta con su propia señalización, y procedimientos de detección de errores.



**Fig. 2.5 Niveles de Señalización (ref. (41))**

El enlace SONT cuenta con los siguientes elementos:

- Elementos de la red SONT, de acuerdo a su funcionalidad: (ver Fig. 2.6)

#### **a.- Multiplexor Add/Drop (ADM)**

El multiplexor de extracción-inserción (ADM) permite extraer en un punto intermedio de una ruta parte del tráfico cursado y a su vez inyectar nuevo tráfico desde ese punto. En los puntos donde tengamos un ADM, solo aquellas señales que necesitemos serán descargadas o insertadas al flujo principal de datos. El resto de señales a las que no tenemos que acceder seguirá a través de la red.

Aunque estos elementos de red son compatibles con un nivel OC-N específico, puede haber diferencias en el futuro entre distintos fabricantes de dichos elementos. SONT no restringe la fabricación de estos elementos de red. Por ejemplo, un vendedor puede ofrecer un ADM con acceso únicamente a señales DS-1, mientras que otro puede ofrecer acceso simultáneo a señales DS-1 (1,544 Mbps) y DS-3 (44,736 Mbps).

#### **b.- Sistemas Ópticos de Línea**

##### **Regenerador**

En el pasado tuvo un uso muy difundido. Un regenerador es útil cuando la distancia que separa a dos multiplexores terminales es muy grande y la señal óptica que se recibe es muy baja. El reloj de transmisión es el que se obtiene del reloj recuperado de la señal de entrada. A su vez el regenerador reemplaza parte de la cabecera de la trama de la señal antes de volver a retransmitirla (Section overhead). El resto de la información de tráfico y el payload que se encuentra en la trama no se ve alterado.

## Fibra Óptica

Que es el medio de transmisión propiamente dicho. Se usan fibras del tipo monomodo (para tramos de larga distancia) y multimodo (para tramos de distancia media a corta), de acuerdo a la distancia a la que se va a transmitir.

## Amplificador

Tiene la misma función que un regenerador, pero no requiere de una conversión O/E/O, la tarea de amplificación se realiza sobre la señal original. Pueden ser de fibra dopada con Erblio, por ejemplo.

## c.- Multiplexor terminal

Es el elemento que actúa como un concentrador de las señales de baja velocidad de transmisión (pueden ser de n:1 ó 1:n, siendo estos últimos demultiplexores) y que realiza la transformación de la señal eléctrica en óptica y viceversa. Dos multiplexores terminales unidos por una fibra con o sin un regenerador intermedio conforman el más simple de los enlaces de SONET.

# Synchronous Optical Network (SONET)

## Multiplexación TDM síncrona

### • Elementos:

- Multiplexores n:1 y 1:n
- Convertidores y repetidores.
- Multiplexores ADM.

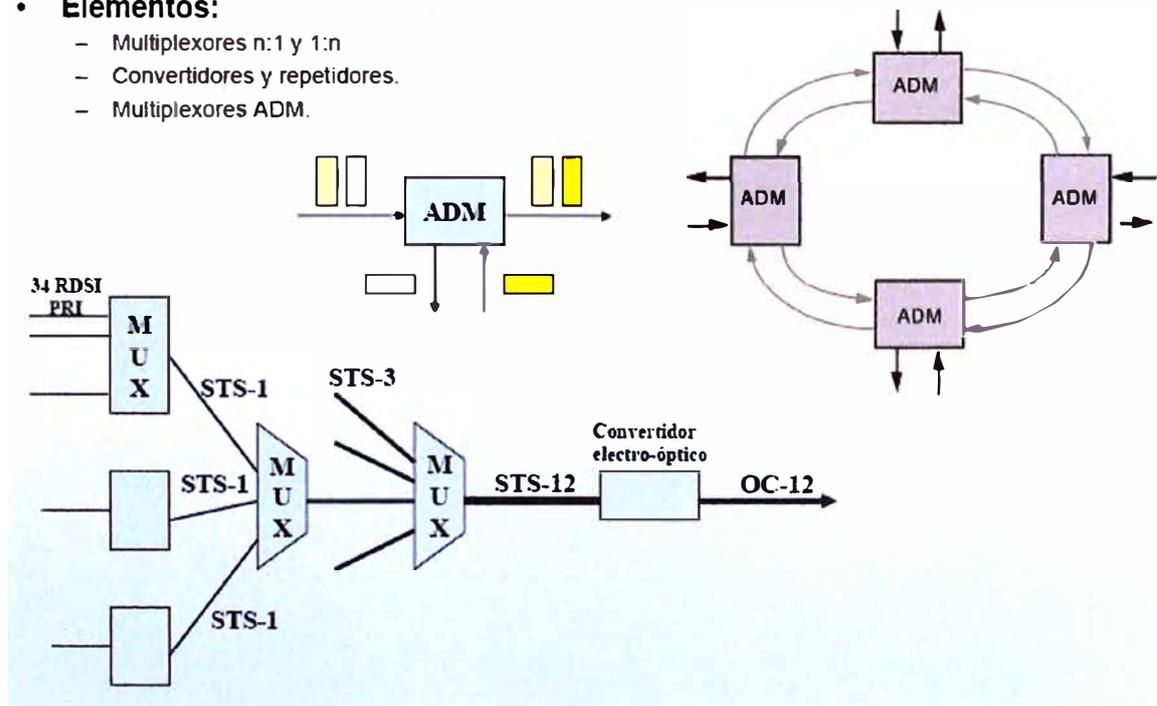
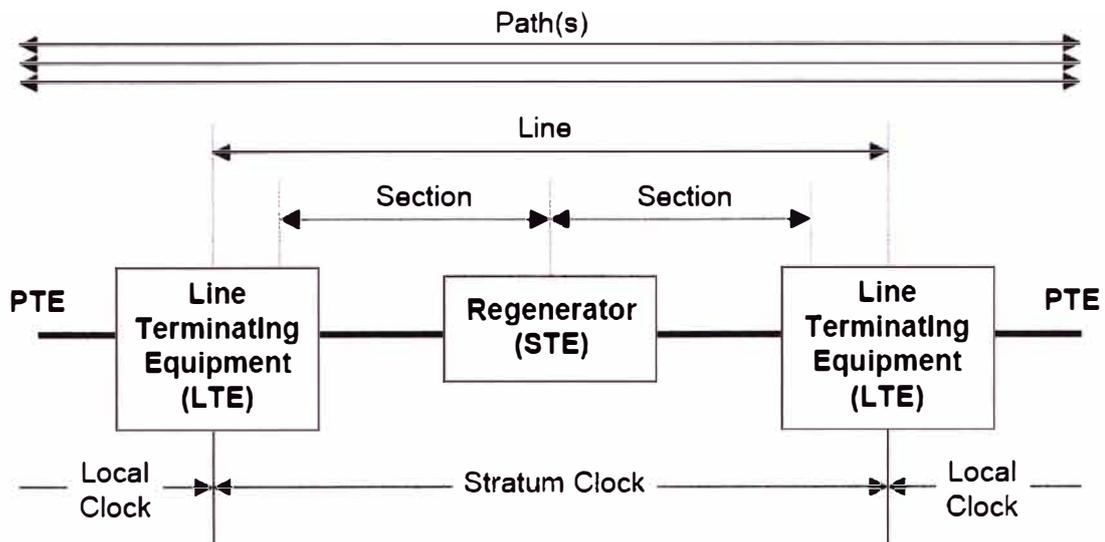


Fig. 2.6 Elementos de la red SONET de acuerdo a su funcionalidad

- Elementos de la red SONET, de acuerdo a la señalización que cursan: (ver Fig. 2.7)
- **STE** (Section Terminating Equipment)
  - **LTE** (Line Terminating Equipment)
  - **PTE** (Path Terminating Equipment)



**Fig. 2.7 Elementos de la red SONET de acuerdo a la señalización que cursan (ref. “WAN PHY DEFINITIONS”, ieee 802.3.ae Task Force)**

SONET es un estándar definido dentro de los Estados Unidos de América. Fuera de esta jurisdicción se le conoce como red de Jerarquía Digital Síncrona (SDH, Synchronous Digital Hierarchy).

Las señales de niveles más altos están formadas por la multiplexación de diversas señales de nivel 1 (STS-1), creando una familia de señales STS-N, donde la N indica el número de señales de nivel 1 que la componen. En la siguiente tabla (Tabla 2.1) se indican las denominaciones de las señales eléctricas y portadoras ópticas (**OC**, Optical Carrier), así como sus velocidades y los puntos de coincidencia con los de la Jerarquía Digital Síncrona.

**Tabla 2.1 Señales y velocidades binarias SONET**

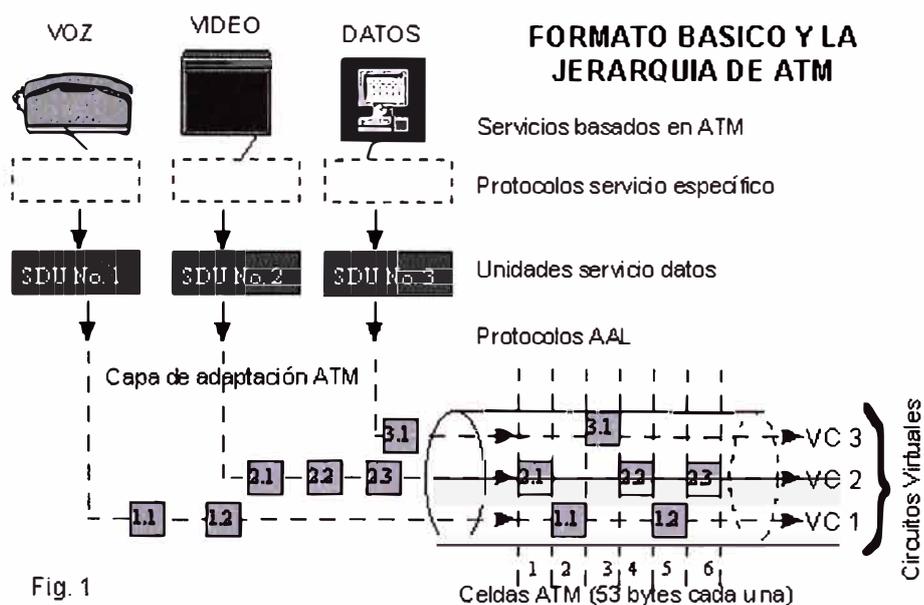
Señal eléctrica	Portadora óptica	Velocidad binaria (Mbps)	Equivalencia SDH
STS-1	OC-1	51,84	-
STS-3	OC-3	155,52	STM-1
STS-9	OC-9	466,56	-
STS-12	OC-12	622,08	STM-4
STS-18	OC-18	933,12	-
STS-24	OC-24	1244,16	-
STS-36	OC-36	1866,24	-
STS-48	OC-48	2488,32	STM-16
STS-96	OC-96	4976,64	-

STS-192	OC-192	9953,28	STM-64
STS-256	OC-256	13271,04	-
STS-384	OC-384	19906,56	-
STS-768	OC-786	39813,12	STM-256
STS-1536	OC-1536	79626,24	-
STS-3072	OC-3072	159252,48	-

- **ATM** : Esta técnica de conmutación de celdas permite la integración de redes LAN con redes WAN. La tecnología ATM trabaja bajo un esquema orientado a la conexión.

Tiene las siguientes características:

- ❖ La entidad de transmisión es la **celda**, la cual tiene un tamaño fijo de 53 bytes, donde 5 bytes están reservados para la cabecera de la celda y 48 bytes están destinados a transportar datos del usuario.
- ❖ Posee una performance de red escalable, la cual le permite manejar velocidades de transmisión desde 25Mbps hasta multi-gigabits por segundo (Gbps).
- ❖ Los tipos de conexiones que se pueden realizar son: punto a punto, multipunto ó multicast.
- ❖ Permite la transmisión de una mezcla de señales síncronas y asíncronas, a pesar de su naturaleza asíncrona, dentro de un mismo canal de transmisión (ver Fig. 2.8).

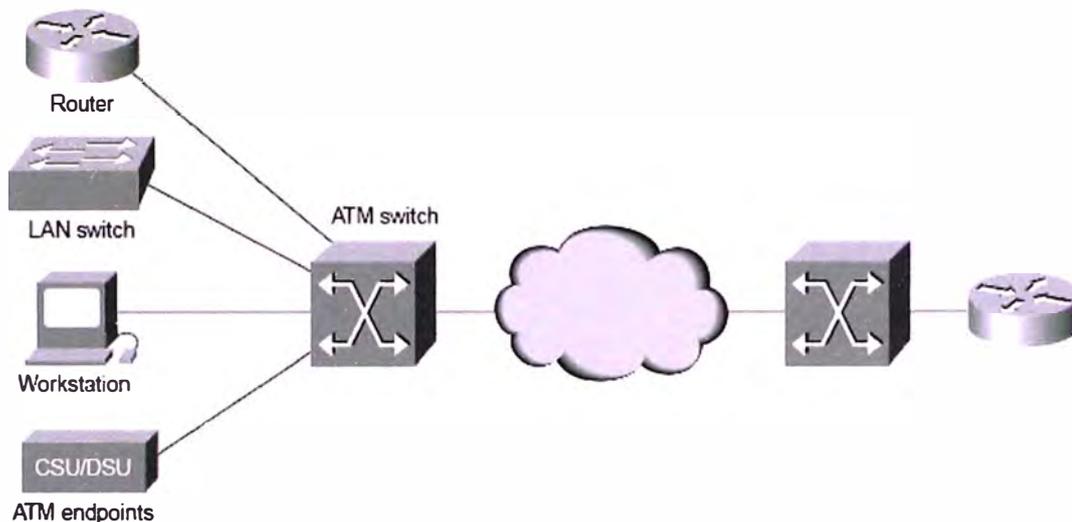


**Fig. 2.8 Formato básico y la jerarquía de ATM (ref. [www.monografias.com/trabajos/atm/atm.shtml](http://www.monografias.com/trabajos/atm/atm.shtml))**

Una red ATM esta conformada por dos tipos de dispositivos: (ver Fig. 2.9)

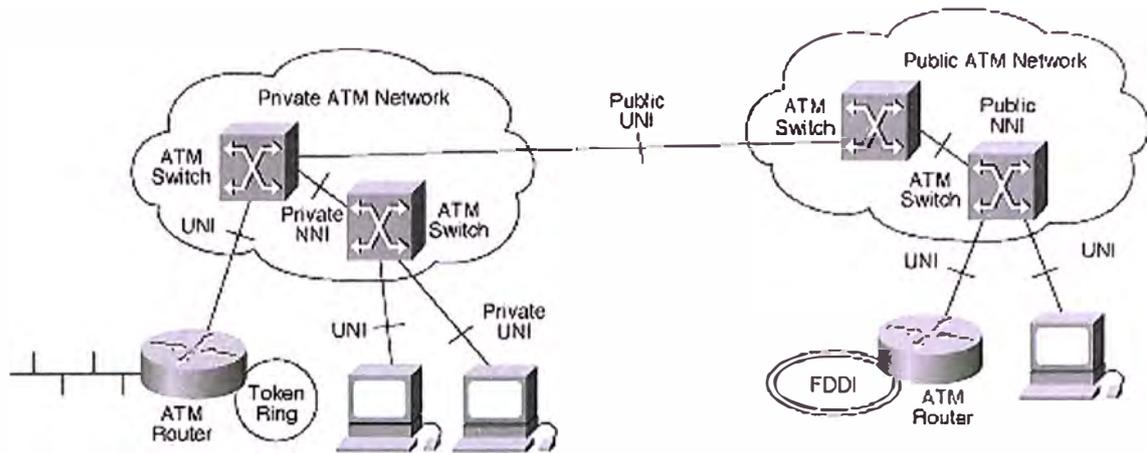
**ATM Switch**, que es el responsable de la transmisión de las celdas a través de la red ATM. Este recibe las celdas desde otro switch ó endpoint, analiza la información de la cabecera de la celda, la actualiza y la envía por la interfaz de salida adecuada hacia el siguiente switch ó endpoint.

**ATM Endpoint**, quien posee una tarjeta de interfaz **UNI-ATM**. Como ejemplos de endpoints tenemos a las computadoras personales, routers, DSUs (Digital Service Unit), switches LAN ó vide-codecs.

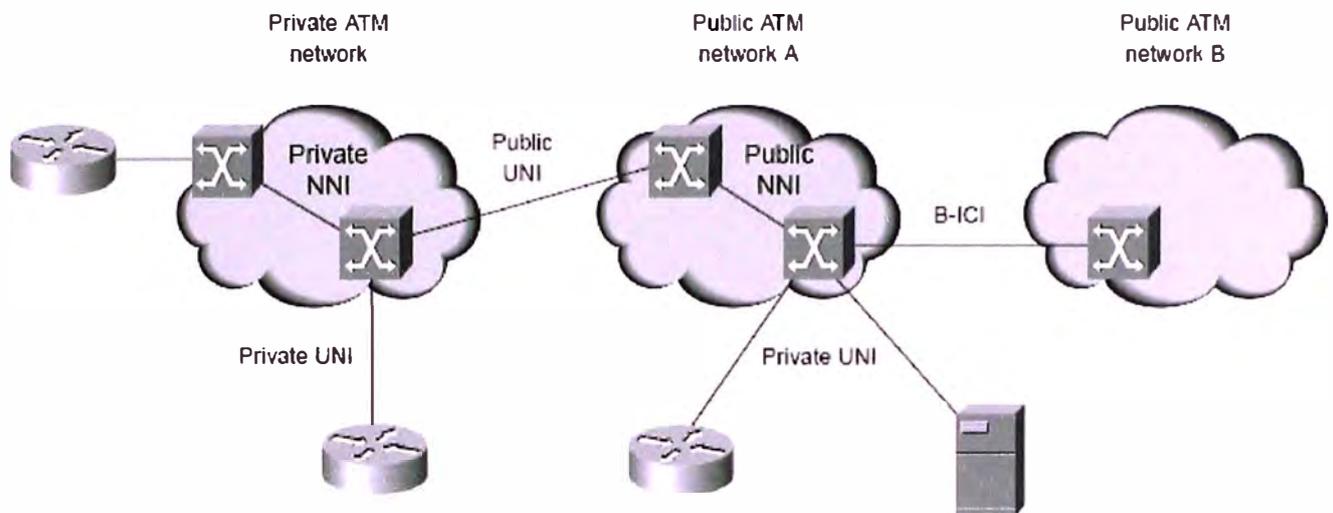


**Fig. 2.9 Topología básica de una red ATM**

Las Interfaces ATM son tres, UNI (User to Network Interface), NNI (Network to Network Interface) y B-ICI (Broadband InterCarrier Interface). En redes ATM privadas la comunicación entre los endpoints con los switches ATM se realiza a través de una interfaz UNI, mientras que la interfaz NNI es usado para la comunicación entre switches ATM de la red privada. En una red ATM pública la comunicación entre los endpoints y/o switches privados, con los switches públicos se realiza a través de una interfaz UNI, mientras que la comunicación entre switches ATM de una misma red pública se realiza a través de una interfaz NNI (ver Fig. 2.10-a). La comunicación entre switches ATM de distintas redes públicas se realiza a través una interfaz B-ICI (ver Fig. 2.10-b).



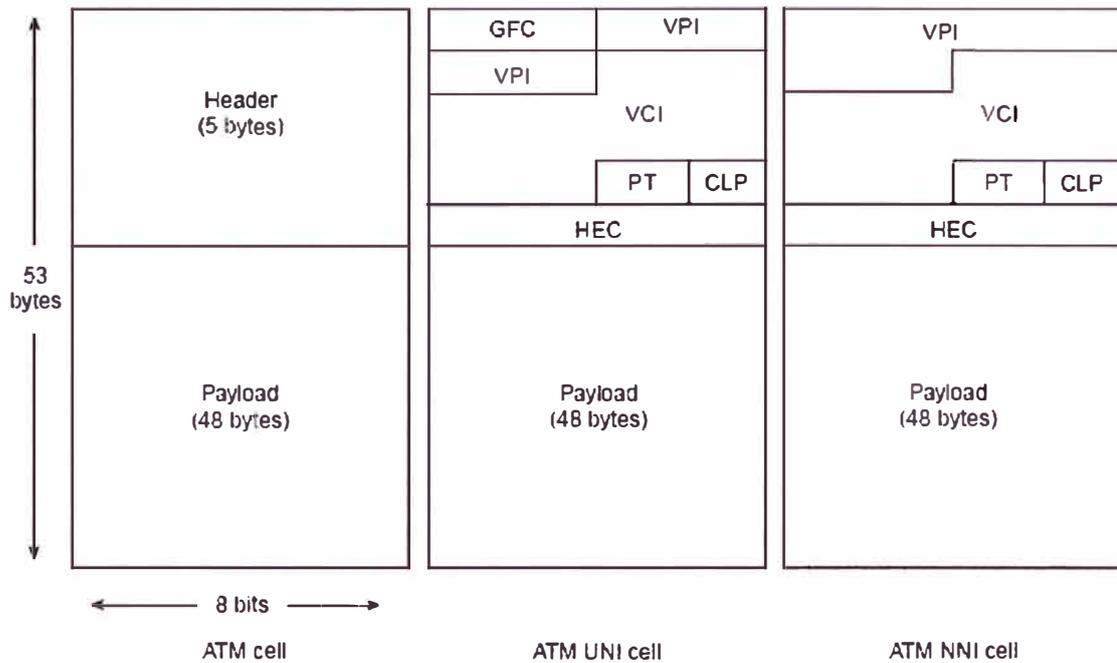
a) Comunicación entre una red privada y una red pública.



b) Comunicación entre redes privadas y redes públicas

**Fig. 2.10 Redes ATM y las interfaces ATM involucradas en la comunicación**

En el siguiente gráfico (Fig. 2.11) se puede observar la distribución de los bits en una la celda ATM, de acuerdo a la interfaz ATM que la genera:



**Fig. 2.11 Estructura de una celda ATM (de acuerdo a la interfaz utilizada)**

El encaminamiento de la información entre un usuario y otro se realiza a través de los campos VPI (Virtual Path Identifier) y VCI (Virtual Channel Identifier) de la cabecera.

Las celdas ATM están diseñadas para transmitirse a través de enlaces SONET/SDH de 155.42Mbps, 622.08 Mbps y 2.48832 Gbps.

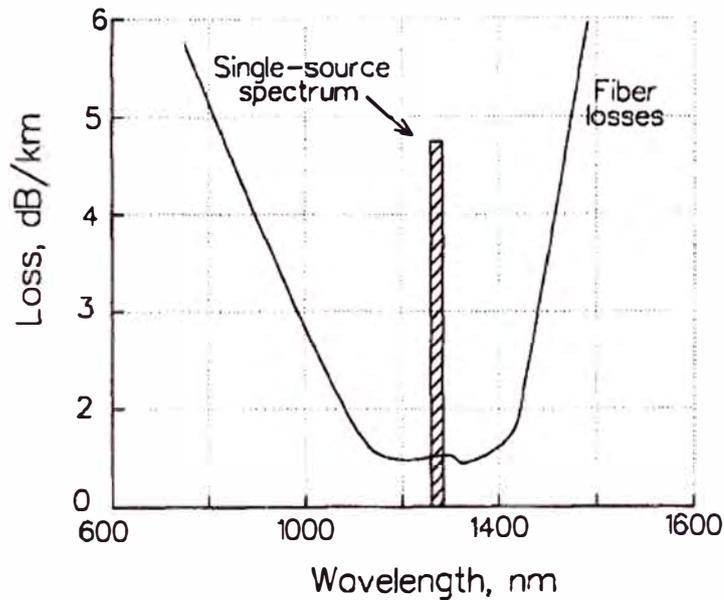
En el caso de ATM/SONET también es necesario realizar una conversión opto-eléctrica para realizar el direccionamiento de las tramas.

### 2.3 Multiplexación por División de Longitud de Onda

La multiplexación por división de longitud de onda (WDM) al igual que SONET es usada como una tecnología de transmisión de extremo a extremo de gran capacidad. También trabaja haciendo uso de una topología de red en anillo. Pero tiene la ventaja de poder ser implementada junto con un esquema de Conmutación Óptica; todo esto gracias a la técnica que usa para realizar su trabajo, el de multiplexar longitudes de onda (es decir multiplexar frecuencias) dentro de un mismo medio de transmisión. Esto permite usar técnicas de tratamiento de señales ópticas que nos permiten conmutar, extraer ó añadir los distintos componentes (señales portadoras con distintas longitudes de onda) de un flujo de datos que atraviesan un medio de transmisión específico.

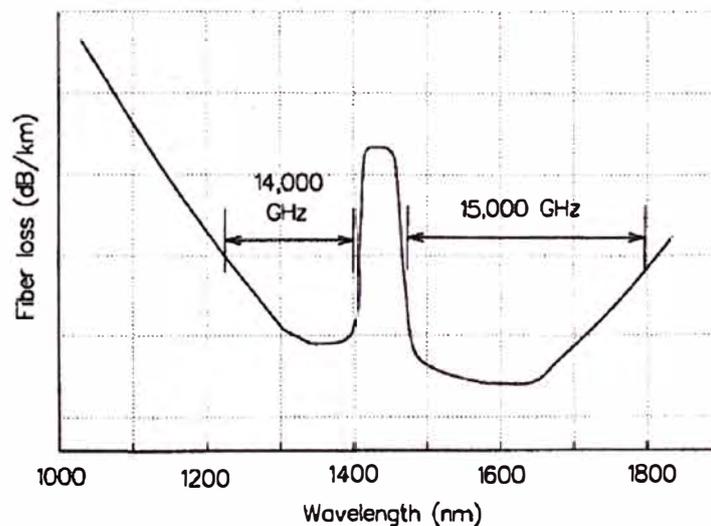
### 2.3.1 Características de la tecnología WDM

Todas las tecnologías de redes de transmisión de datos a través de medios ópticos revisadas se basan en el uso de una fibra óptica transportando una sola señal portadora con una determinada longitud de onda, desperdiciando así la alta capacidad de transmisión del canal óptico (fibra óptica), tal como se muestra en el siguiente gráfico (Fig. 2.12):



**Fig. 2.12 Ancho del espectro de la señal generada por una sola fuente dentro de una fibra multimodo (ref. (3))**

En el gráfico anterior se puede observar que las fibras ópticas poseen regiones de transmisión de bajas pérdidas, las cuales son usadas para el transporte de más de una señal óptica portadora dentro de un canal óptico.



**Fig. 2.13 Ventanas (regiones) de transmisión de bajo nivel de pérdidas dentro de una fibra monomodo no utilizadas en las comunicaciones ópticas clásicas (ref. (3))**

Observando el gráfico (Fig. 2.13), existe alrededor de 14000 GHz de ancho de banda con bajo nivel de pérdidas (alrededor de 0.4 dB/km) y dispersión de alrededor 4 ps/(km.nm) en la región de 1300 nm, y con un ancho de banda de 15000 GHz con bajo nivel de pérdidas (alrededor de 0.2 dB/km) y dispersión de alrededor 18 ps/(km.nm) en la región de 1550 nm, en una típica fibra monomodo.

Para enlaces con alta transferencia de datos, y que deben cubrir grandes distancias, las ventanas de 1250 a 1350 nm y de 1450 a 1600 nm nos permiten obtener una ventana de transmisión de aproximadamente 250 nm.

Para poder transmitir distintas señales portadoras con diferentes longitudes de ondas dentro de un canal óptico es necesario contar con la capacidad de controlar la generación de dichas señales. Esto es posible gracias a la existencia de dispositivos tales como los dispositivos emisores semiconductores (diodos LED y Láser, donde se logra variar la longitud de onda variando su composición química), ó haciendo uso de el espaciado de las rejillas dentro de los lasers del tipo DFB (Distributed-Feedback) y DBR (Distributed Bragg Reflector). Existen otras opciones de generación de señales con distintas longitudes de onda como los diodo lasers Fabry-Perot y los Frequency-Locked lasers.

También es necesario contar, en la parte receptora, con elementos que nos permitan separar ó detectar una señal con una longitud de onda específica. Estos pueden ser filtros de interferencia, filtros Fabry-Perot, Amplificadores sintonizados de semiconductor, rejillas Bragg, entre otros.

Esta técnica de multiplexar el canal óptico mediante longitudes de onda es conocida como *Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, Wavelength-Division Multiplexing)*.

En un inicio se logró separar por cerca de 10nm las señales portadoras. Hoy en día se tienen separaciones desde 1nm a menos. A esta nueva tendencia se la conoce como *WDM denso (DWDM, Dense WDM)* el cual permite la transferencia de más señales portadoras dentro de una canal óptico.

Esta tecnología permite, con una sola fibra óptica como medio de transmisión, transmitir desde 4 hasta 160 longitudes de onda (portadoras) simultáneamente (ver Fig. 2.14).

Cada longitud de onda puede transmitir cualquier señal en distinto formato (velocidad de transmisión, protocolo ó desde distinto origen). Esto le da a la tecnología WDM una característica denominada *transparencia*.

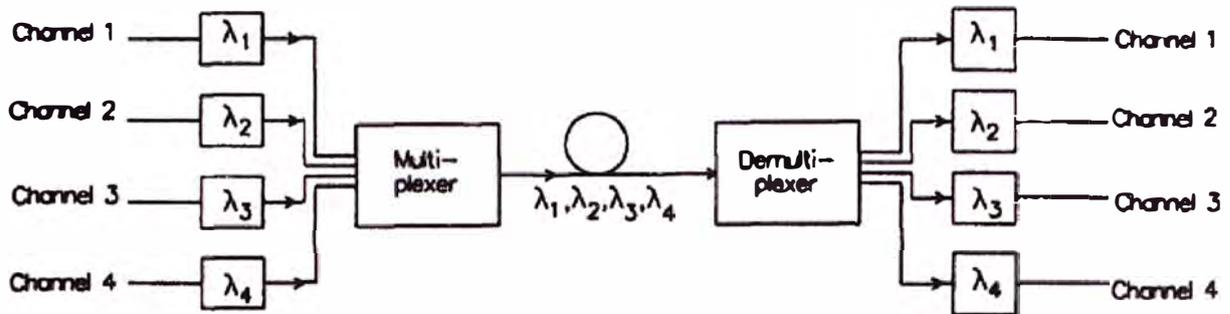


Fig. 2.14 Sistema de transmisión usando WDM (ref. (3))

Usando WDM también es posible contar con enlaces bidireccionales, donde se combinan elementos emisores y receptores en cada extremo del sistema (ver Fig. 2.15). En estos se hace uso de solo una fibra óptica (Single Fiber).

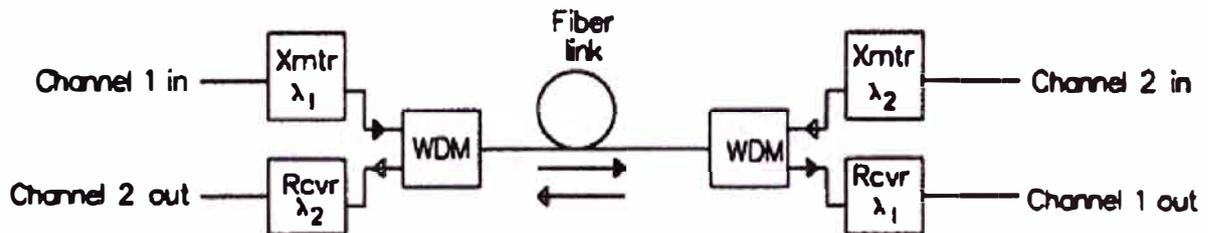
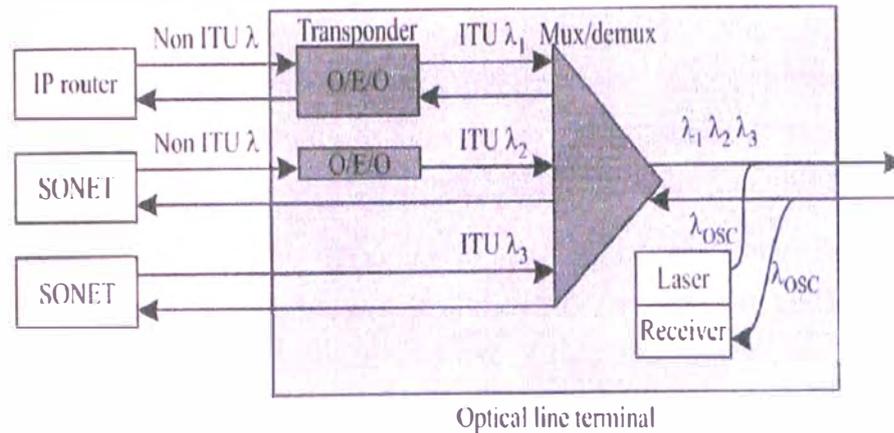


Fig. 2.15 Enlaces WDM bidireccionales (ref. (3))

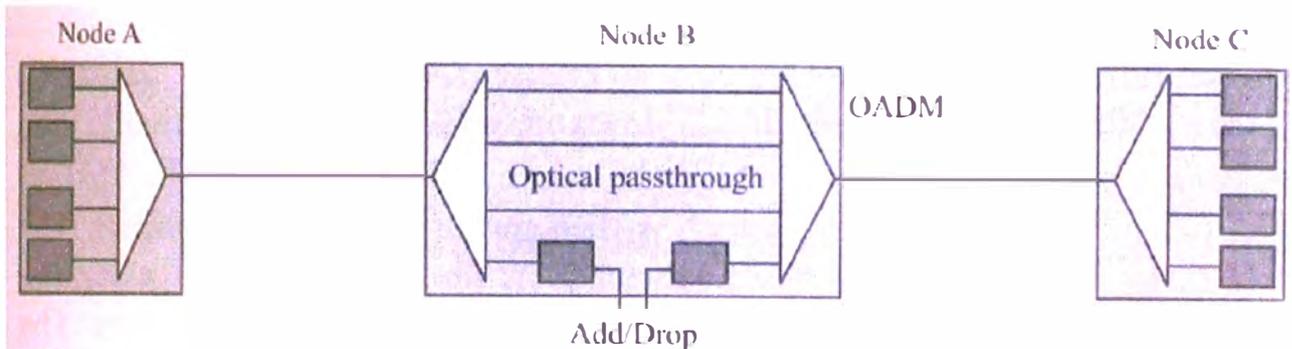
Entre los elementos de una red WDM podemos mencionar:

**OLT**, (Optical Line Terminal) es el elemento básico de la red WDM. Se localiza en ambos extremos de los enlaces punto a punto. Cuenta con 3 elementos básicos: Multiplexor/Demultiplexor, transponders (adaptadores de señal) y amplificadores ópticos. En los primeros años se les conocía también como acopladores. (ver Fig. 2.16)



**Fig. 2.16 OLT (ref. (37))**

**OADM**, (*Optical Add-Drop Multiplexer*) conocidos también como **WADM** (*Wavelength ADM*) que cumple una función similar a la de su semejante utilizado en la tecnología SONET (página 14), con la diferencia de trabajar con longitudes de onda. (ver Fig. 2.17)



**Fig. 2.17 OADM (ref. (37))**

**OXC**, (*Optical Cross-Connect*) Es un concepto cronológicamente nuevo. Tiene la función de conmutar los flujos de información de alta velocidad característicos de la tecnología de transmisión óptica. Con esta pequeña definición damos la primera introducción a la conmutación dentro de la red óptica propiamente dicha. Dejaremos un análisis más profundo de esta definición en el capítulo siguiente.

Existen dos esquemas utilizados para la implementación de sistemas WDM:

- **WDM de longitud de onda selectiva (Wavelength-Selective WDM)**: En donde cada señal, con longitud de onda específica, es combinada con el mínimo de pérdidas (idealmente se desearía no tener pérdidas) en el lado emisor (multiplexor). En el otro extremo, el demultiplexor separa cada longitud de onda en una ruta diferente hacia el receptor correspondiente. (ver Fig. 2.18)

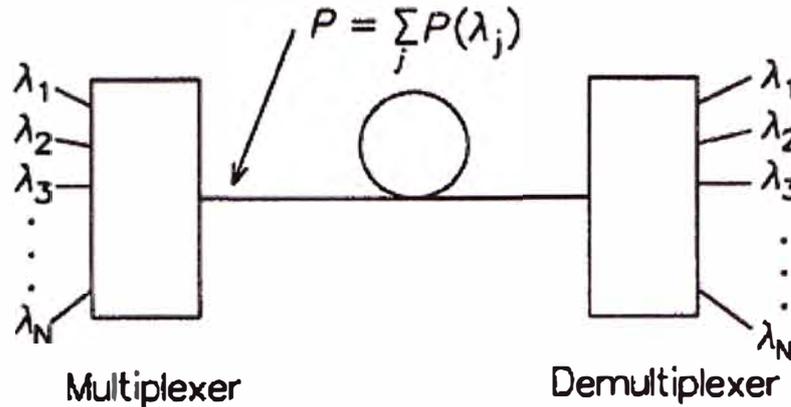


Fig.2.18 Wavelength-Selective WDM (ref. (3))

- **Difundir y seleccionar (Broadcast-and-Select)** : En estos sistemas se usan splitters y combinadores simples, traduciéndose esto en pérdidas (atenuación de la señal transmitida) notables en cada uno de los dispositivos. Las señales portadoras son combinadas en el lado emisor. Luego en el extremo receptor esta señal combinada es difundida a cada uno de los receptores, los cuales deben hacer uso de sus propios filtros para obtener la señal portadora deseada. (ver Fig. 2.19)

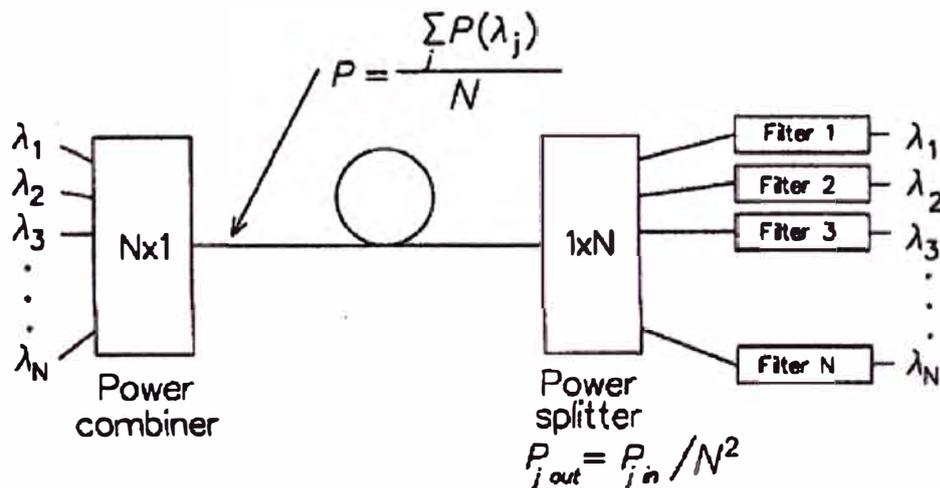
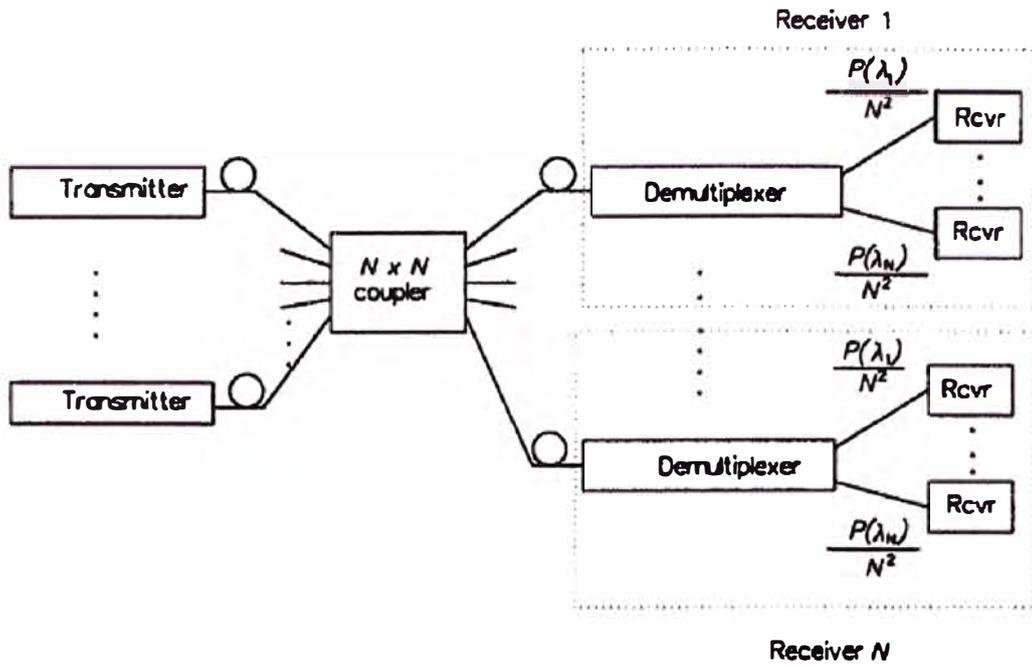


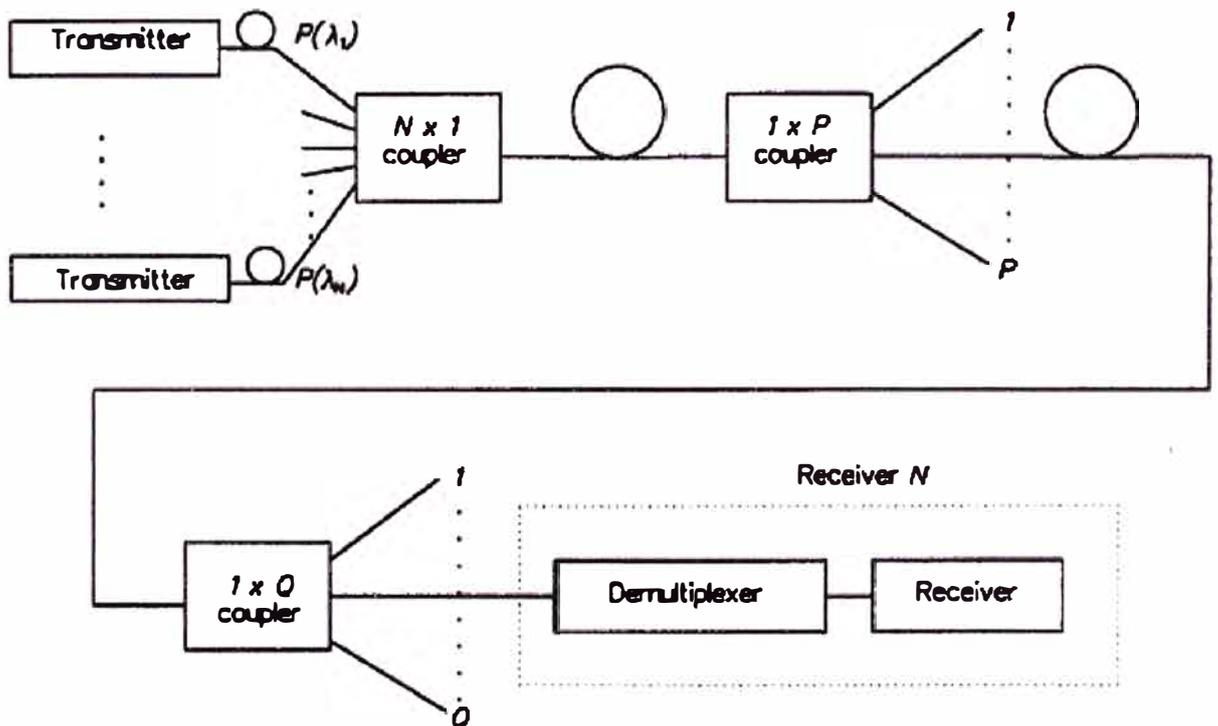
Fig. 2.19 Broadcast-and-Select (ref. (3))

Bajo estos esquemas es posible implementar distintas configuraciones de redes WDM que permiten una distribución a distintos puntos de la información:

**Redes Broadcast-and-Select**, también conocidas como redes de transmisión Broadband: (Ver Fig. 2.20-1,2)



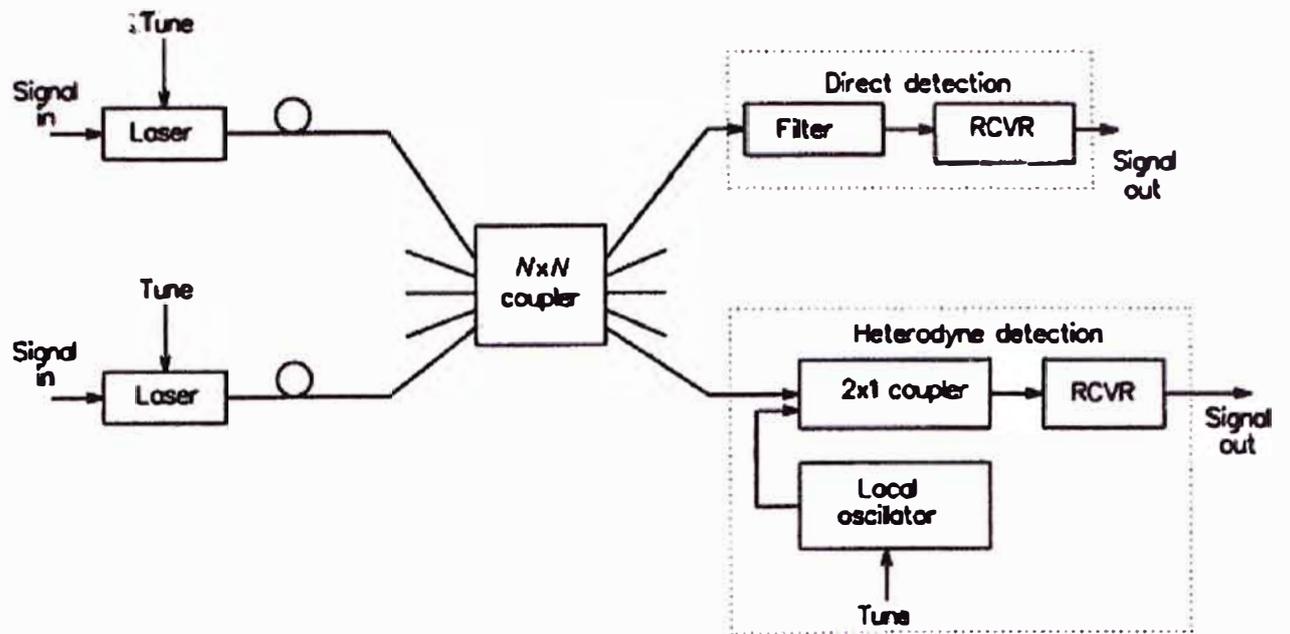
1) Configuración en estrella (ref. (3))



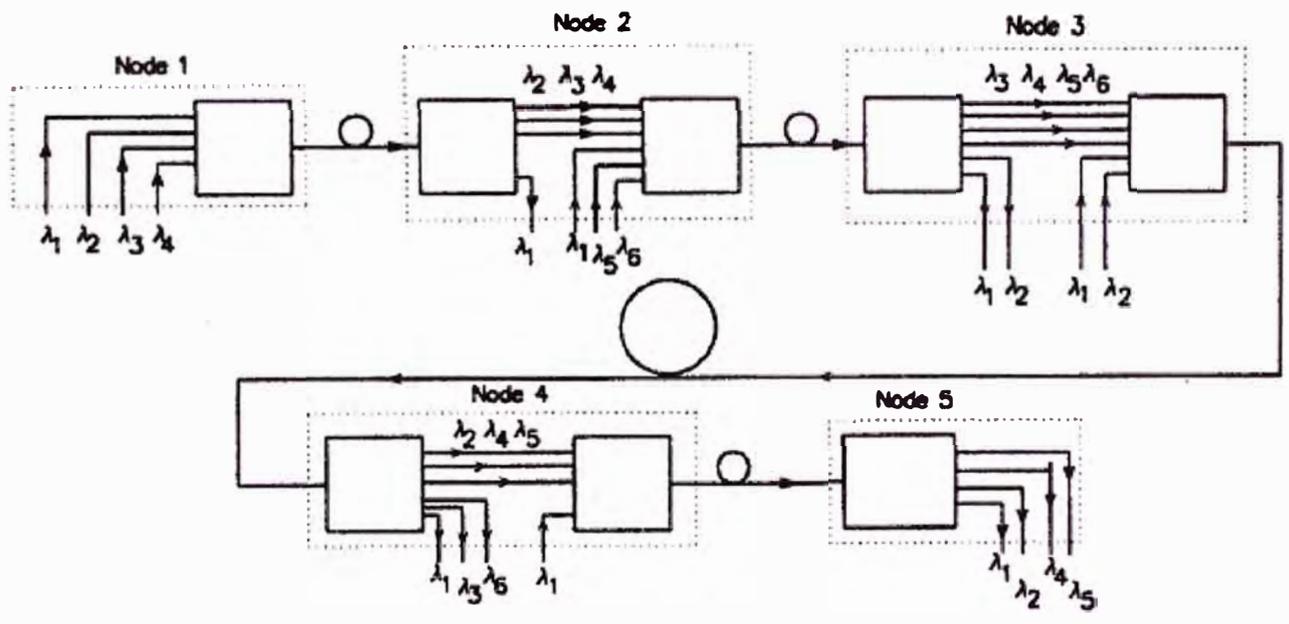
2) Configuración en árbol lineal (ref. (3))

Fig. 2.20 Topologías basadas en el esquema Broadcast-and-Select

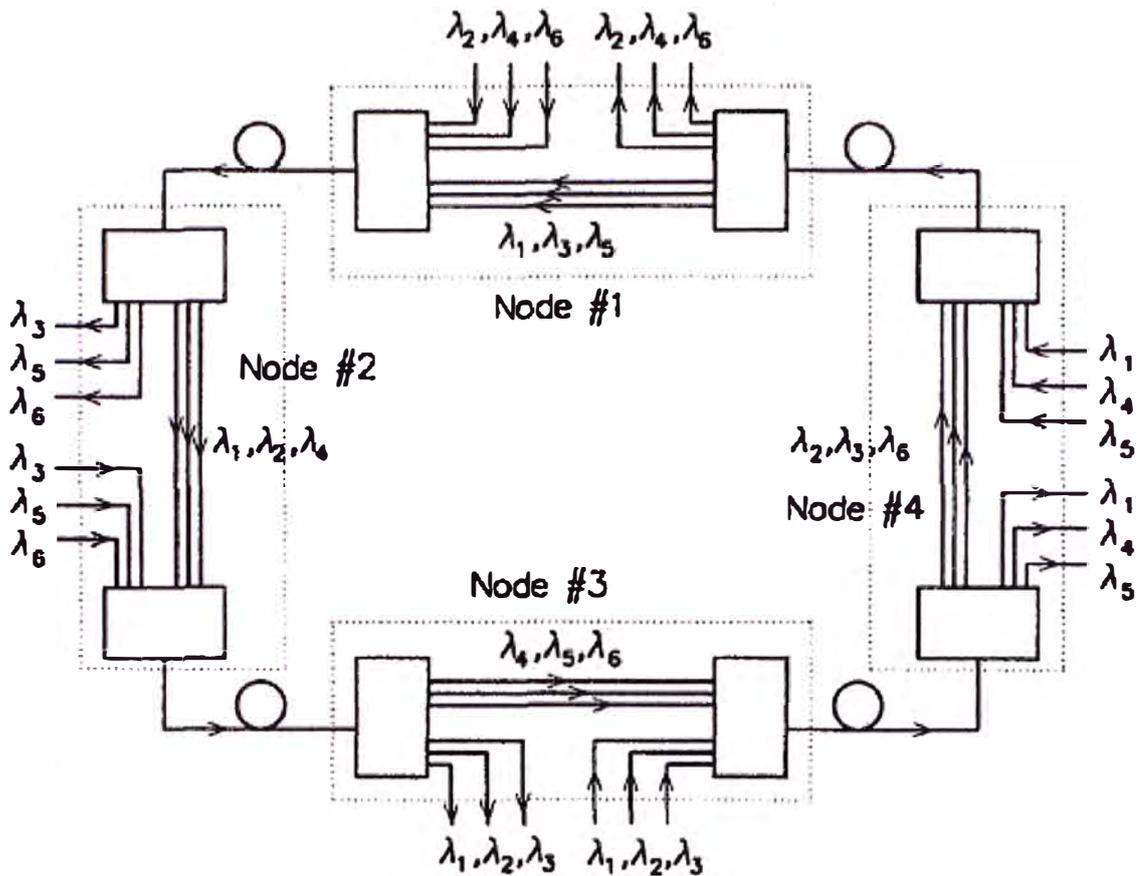
## Redes Wavelength-Selective WDM: (ver Fig. 2.21-1,2,3)



### 1) Configuración en estrella (ref. (3))



### 2) Configuración en árbol lineal (ref. (3))



### 3) Configuración en anillo (ref. (3))

Fig. 2.21 Topologías basadas en el esquema Wavelength-Selective

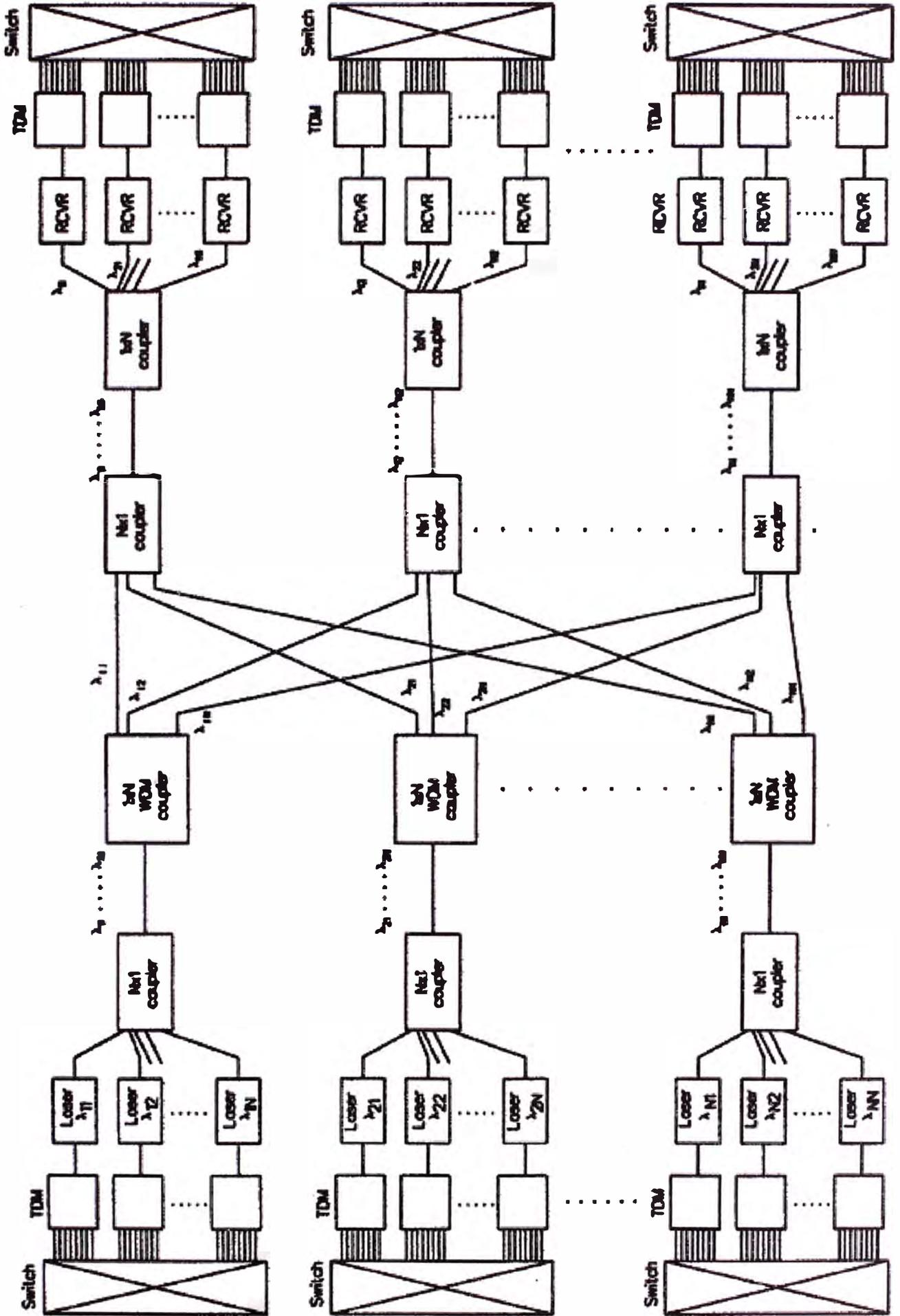
Gracias a esta técnica (WDM) se pueden lograr disposiciones de dispositivos que una ves implementadas se asemejan a una red óptica conmutada. Como último ejemplo analicemos el diagrama de la siguiente página (Fig. 2.22):

Se trata de una red pasiva de conmutación óptica, implementada solo con el uso de  $1 \times N$  y  $N \times 1$  acopladores. El receptor y transmisor se encuentran en realidad ubicados físicamente en el mismo nodo, pero por razones de lograr una mejor comprensión del esquema se los diagrama separadamente.

La conmutación se inicia mediante la elección de la longitud de onda apropiada en el transmisor del nodo fuente, para lograr llegar al receptor del nodo destino requerido para la transferencia de los datos.

Por ejemplo, para enviar datos desde el nodo 1 hacia el nodo 2, la información usa como señal de transmisión  $\lambda_{12}$ . El acoplador Nx1 en el nodo 1 combina esta longitud de onda con las otras longitudes de onda, que llevan información dirigida a otros nodos, y las envía hacia el hub (**OXC pasivo**). En el hub, el acoplador 1xN divide la señal bajo un esquema Wavelength – Selective y envía la señal  $\lambda_{12}$  hacia el acoplador Nx1 (dentro del hub) que combina toda la información enviada desde todos los nodos hacia el nodo 2. En el nodo 2 las longitudes de onda son separadas en el acoplador 1xN y es recibida simultáneamente.

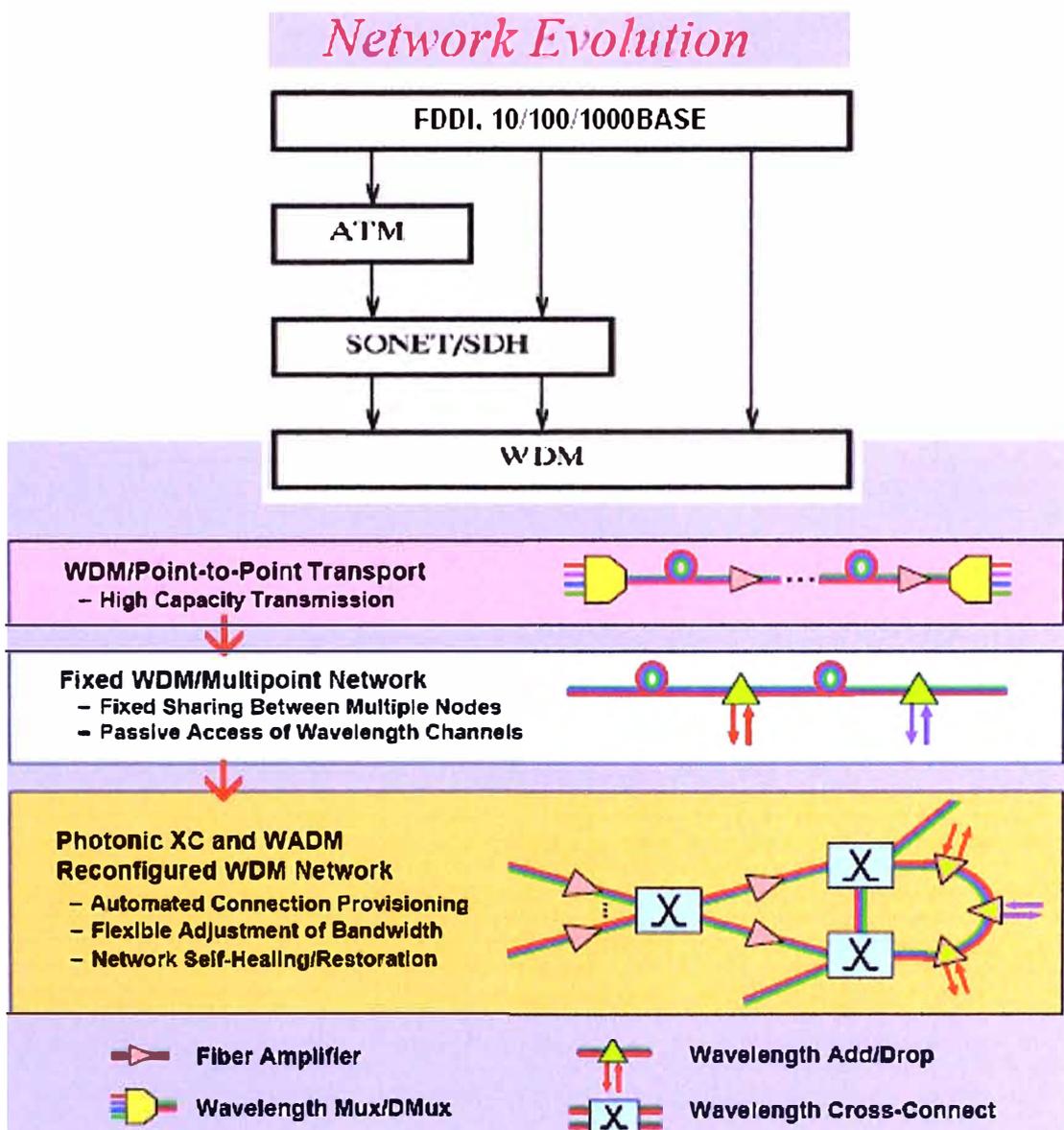
Funcionalmente WDM está ubicado en el nivel 1 de OSI, es decir es una tecnología solo de transporte. Los datos logran enrutarse gracias a que en la práctica WDM se combina con otras tecnologías que si cuentan con la capacidad de enrutar esta información. Esencialmente, al igual que como sucede con SONET y FDDI, es necesario realizar una conversión Óptica-Eléctrica-Óptica para el logro del objetivo de enrutamiento



## 2.4 Resumen

A lo largo del capítulo, hemos visto como ha ido evolucionando el concepto de redes ópticas. Esta evolución ha permitido la integración de las tecnologías con el fin de lograr un servicio más eficiente, seguro y sobre todo de gran capacidad. (ver Fig. 2.23)

Pero es con la aparición de la tecnología WDM que el concepto de conmutación óptica total empieza a dar sus primeros pasos.



**Fig. 2.23 Integración de las tecnologías ópticas de transmisión de datos y Evolución de la redes WDM**

Podemos ver en la Figura 2.23 como las tecnologías iniciales de implementación de redes ópticas de transmisión de datos se han ido integrando con el tiempo hasta llegar a un nivel de desarrollo representado por la tecnología WDM caracterizada por su gran capacidad de transmisión de datos, permitiendo transportar cualquiera de las anteriores tecnologías. También podemos ver como ha ido evolucionando la forma en que se intercambia el flujo de datos entre los elementos de una red WDM, evolucionando desde enlaces punto a punto, pasando por el uso dispositivos Add/Drop y en un concepto más moderno el uso de switches ópticos (OXC) de transmisión.

## CAPITULO III

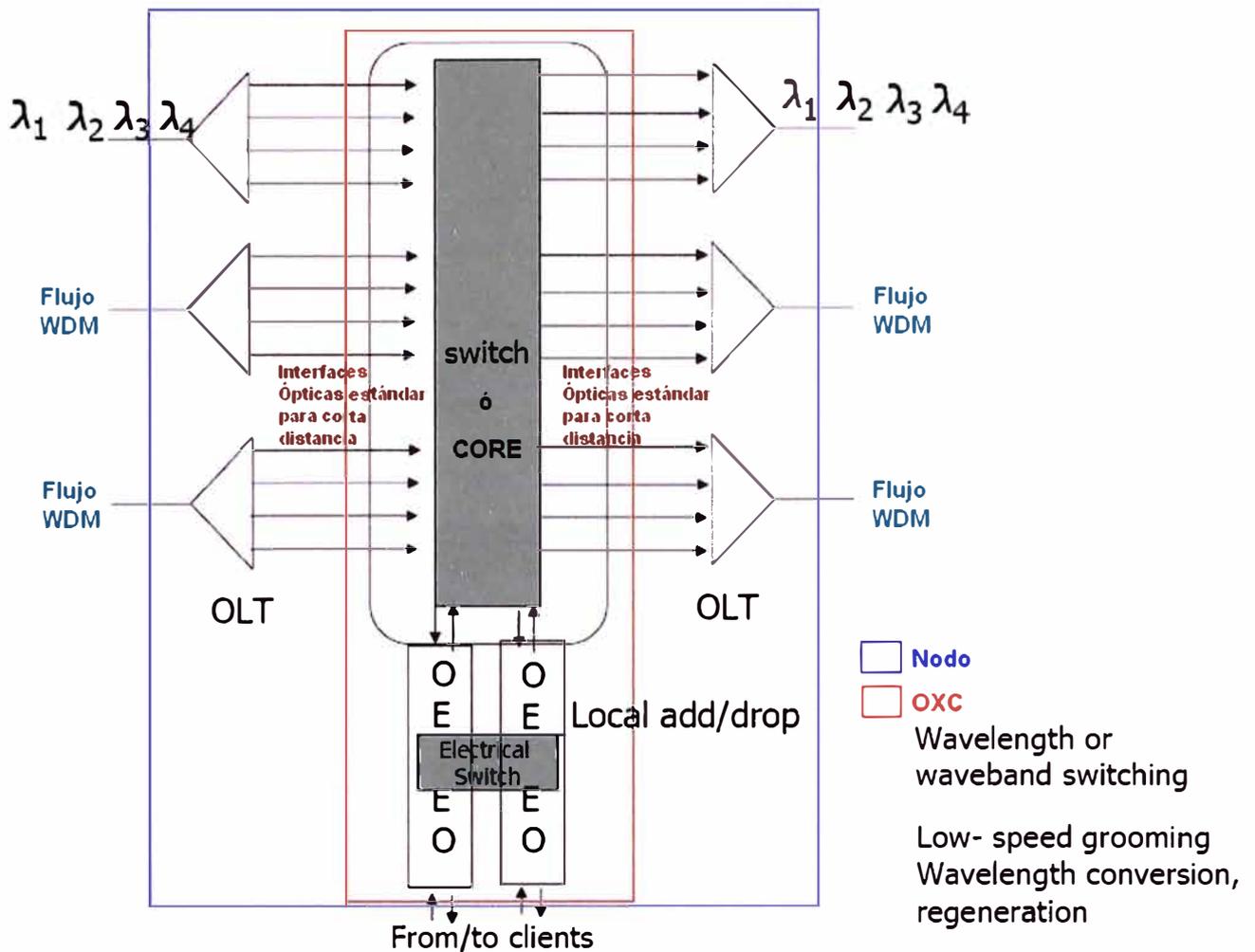
### TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN ÓPTICA

Cuando tocamos, en el último ejemplo del capítulo anterior el uso de una configuración de los elementos en el despliegue de una red de transmisión de datos basada en tecnología WDM que se asemejaba a una red óptica conmutada, se pudo observar que esta solución carecía de inteligencia, es decir se realizaba de forma pasiva, por medio de rutas predefinidas.

En este capítulo veremos cuales son las opciones que se nos presentan para poder hacer un uso más eficiente de los elementos y capacidades de transmisión de datos de las redes WDM, y de esa manera poder implementar estrategias de control del flujo de datos a través de estas, además de dar un vistazo a las alternativas tecnológicas con las que contamos para lograr una futura migración completa al uso de redes WDM conmutadas de naturaleza totalmente ópticas en su operación (all-optical).

#### 3.1 Optical Cross-Connect (OXC)

El **Optical Cross-Connect** (también conocido como **Wavelength Cross-Connect**) es la pieza fundamental en la implementación de redes de conmutación óptica. Es un dispositivo usado por proveedores de servicio portador. Va ubicado en los nodos de conmutación. Su función es el de conmutar los flujos de datos de alta velocidad de transmisión que ingresan por las distintas entradas (puertos) y son derivadas hacia la(s) salida(s) de acuerdo a un proceso de conmutación previo. Al final de este proceso la señal conmutada puede mantener ó cambiar su longitud de onda (cambio de señal portadora). En estos dispositivos también es posible extraer ó añadir (procedimiento Add/Drop, similar al que realiza un OADM) una ó mas señales de un longitud de onda determinada, brindando así servicio a los terminales suscritos al mismo nodo donde esta ubicado el OXC correspondiente. (ver Fig. 3.1)



**Fig.3.1 OXC**

En la figura 3.1 se puede ver un nodo de conmutación óptica, formado por OLTs de la tecnología WDM, los medios de interconexión entre estos OLTs y el OXC denominadas Interfaces ópticas para distancia cortas, el OXC con alguno de sus componentes (switches, conversores óptico/eléctrico).

### 3.1.1 Interfaces de interconexión óptica para distancias cortas

La interconexión entre el OXC y los OLT de una red de transmisión de datos WDM se realiza a través de interfaces ópticas para distancias cortas estándares. El uso de estas interfaces se justifica por el bajo costo de su fabricación e implementación, frente al uso de otras interfaces estándar (por ejemplo SONET/SDH). Algunas de estas interfaces se mencionan a continuación:

❖ **Short-Reach (SR)** ; entre las que podemos citar:

- **10GBase-SR**, con velocidades de transmisión de 10Gbps Full Duplex. Con distancias de trabajo desde 26m hasta 300m, sobre fibra multimodo, trabajando en la primera ventana de transmisión (850nm).
- **Fibre Channel**, con velocidades de transmisión de 4, 2 y 1 Gbps, Full Duplex con distancias de hasta 500m. Trabaja con fibras multimodo, transmitiendo en la primera ventana.
- **OTU**, Optical Transport Unit. Basados en la recomendación ITU-T G.709 "Network node interface for the Optical Transport Network (OTN)". En la siguiente tabla (Tabla 3.1) se puede observar las velocidades de transferencia de cada uno de los tipos de OTU:

**Tabla 3.1 Velocidades de transmisión de interfaces OTU-N (N=1,2,3)**

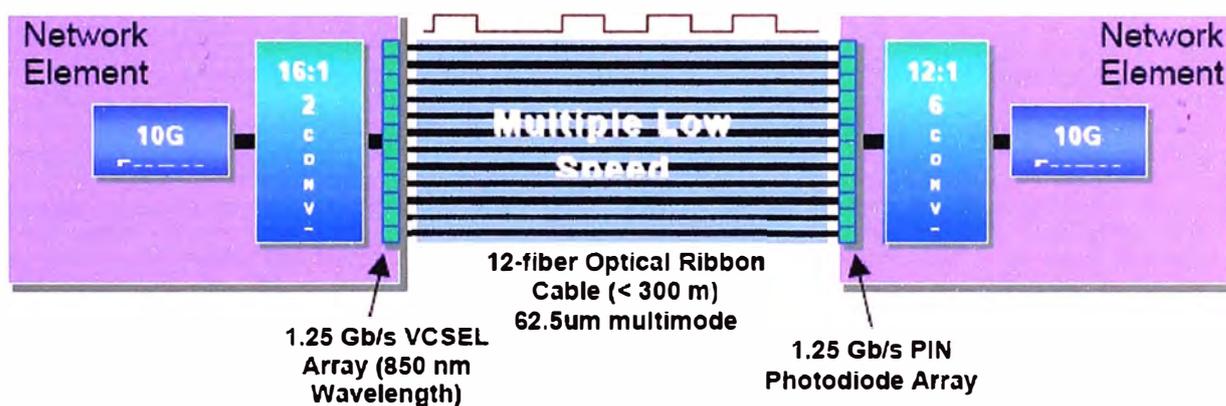
G.709 Interface	Line Rate	Corresponding SONET/SDH Rate	Line Rate
OTU-1	2.666 Gbps	OC-48/STM-16	2.488 Gbps
OTU-2	10.709 Gbps	OC-192/STM-64	9.953 Gbps
OTU-3	43.018 Gbps	OC-768/STM-256	39.813 Gbps

- ❖ **Very Short-Reach (VSR)**; definidas por la OIF (Optical Internetworking Forum). Están basadas en la interface OC-192/STM-64 (10Gbps) en velocidad y formato. Son interfaces para conexiones del tipo Intra-Office. Estas pueden usar un enlace en serie ó varios enlaces en paralelo para lograr la velocidad de trasmisión buscada. Existen 4 versiones de este tipo de interfaces cuyas características se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3.2)

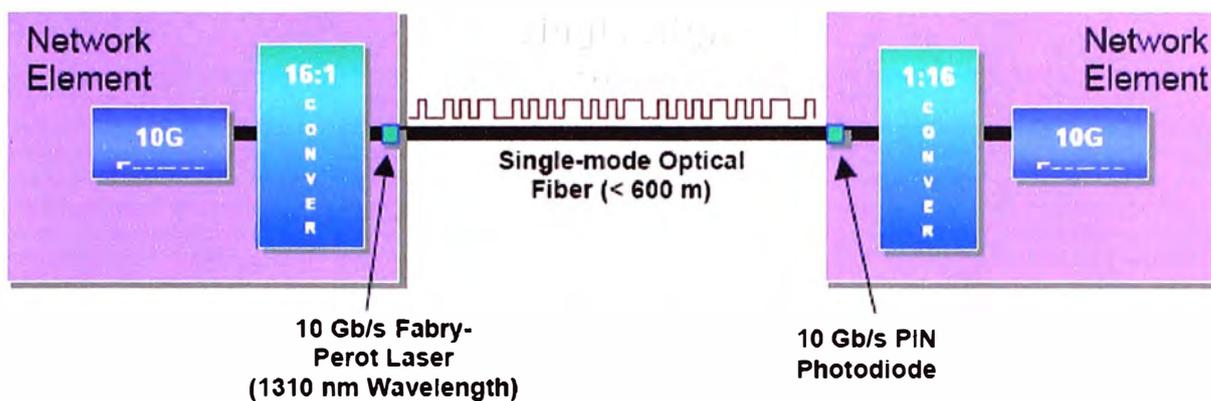
**Tabla 3.2 Ejemplo de estándares VSR OC-192 10 Gbps (OIF)**

Designation	Max Reach	Fiber Type	Number of fibers (Half-Duplex)	Data Rate	Laser Type	Wave length
VSR-1	300 m	MMF	12	1.25 gbps	VCSEL array	850 nm
VSR-2	600 m	SMF	1	10 Gbps	FP	1310 nm
VSR-3	300 m	MMF	4	2.5 Gbps	VCSEL array	850 nm
VSR-4	300 m	MMF	1	10 Gbps	VCSEL	850 nm

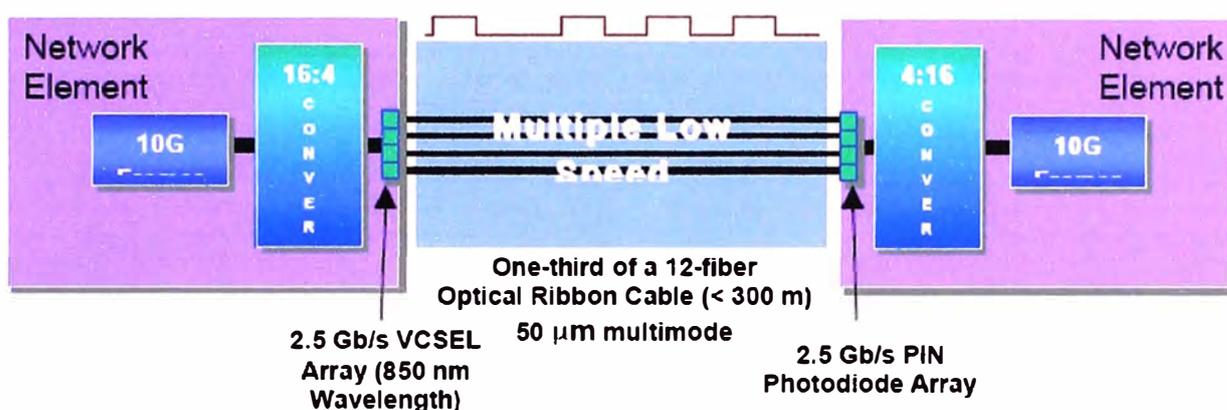
En los siguientes gráficos (Fig. 3.2, 3.3, 3.4, 3.5) se muestra la disposición de los elementos de cada tipo de interfaz VSR. En cada gráfico se asume el modo de transmisión Half Duplex, debiendo tener en cuenta que de requerir transmitir en modo Full Duplex se debe considerar el doble de fibras ópticas en cada caso:



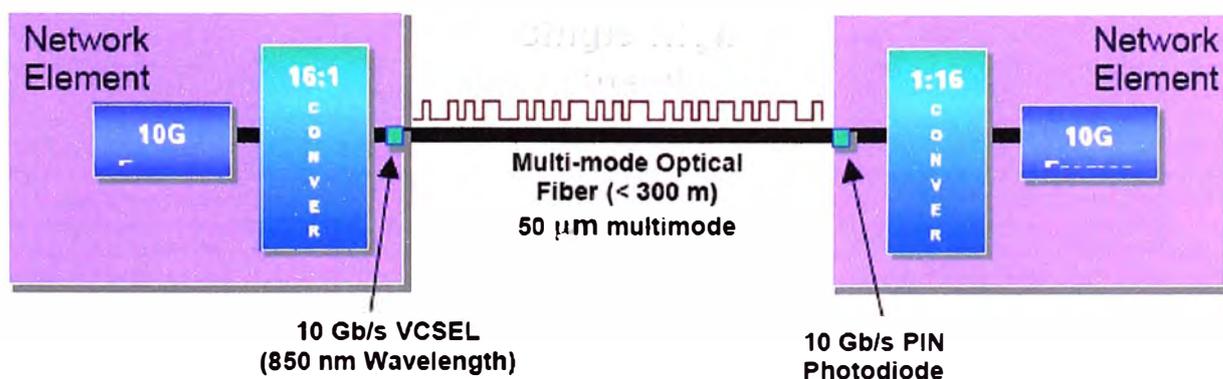
**Fig. 3.2 VSR-1; donde en paralelo, 12 fibras multimodo transportan cada una 1.25Gbps de información, 10 de estas fibras transportan los datos entre los dos elementos de red, otra fibra transporta información CRC (Control de Redundancia Cíclica) para la corrección de errores, y el 12<sup>vo</sup> transmite información de paridad de las 10 fibras que transportan los datos. (ref. (15))**



**Fig. 3.3 VSR-2;** donde una sola fibra monomodo en la segunda ventana de transmisión (1310nm) permite el intercambio de datos en un solo sentido entre dos elementos de la red. (ref. (15))



**Fig. 3.4 VSR-3;** donde en paralelo, 4 fibras multimodo transportan cada una 2.5Gbps de información, permitiendo el intercambio de datos entre los dos elementos de red. (ref. (15))

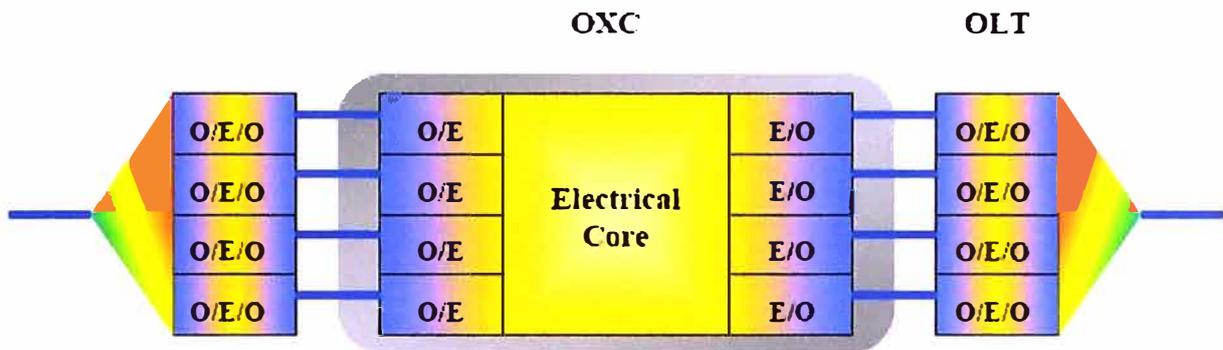


**Fig. 3.5 VSR-4;** donde una sola fibra multimodo en la primera ventana de transmisión (850nm) permite el intercambio de datos en un solo sentido entre dos elementos de la red. (ref. (15))

### 3.1.2 Arquitecturas de implementación de OXC

Existen distintas **arquitecturas** que nos permiten implementar un OXC. Estas son:

- **OXC con núcleo eléctrico**



**Fig. 3.6 OXC con núcleo eléctrico (ref. (35))**

Esta arquitectura se basa en la interconexión entre dos tecnologías, una de ellas la WDM y la otra el esquema ó técnica de conmutación óptica propiamente dicho. El switch es de naturaleza eléctrica. Es por esto que es necesario convertir todas las señales ópticas que llegan a los canales de entrada a un formato eléctrico, luego de que estas fueran demultiplexadas, para que así el **switch** eléctrico se encargue de conmutar adecuadamente las señales a los canales correspondientes de salida, para luego ser retornadas a su naturaleza óptica para ser nuevamente multiplexadas y finalmente transmitidas. (ver Fig. 3.6)

Entre las ventajas de este arquitectura se tiene el que las señales se pueden monitorear y regenerar; así como también se puede extraer y añadir con facilidad señales que vienen de los terminales suscritos al nodo donde se encuentra el OXC.

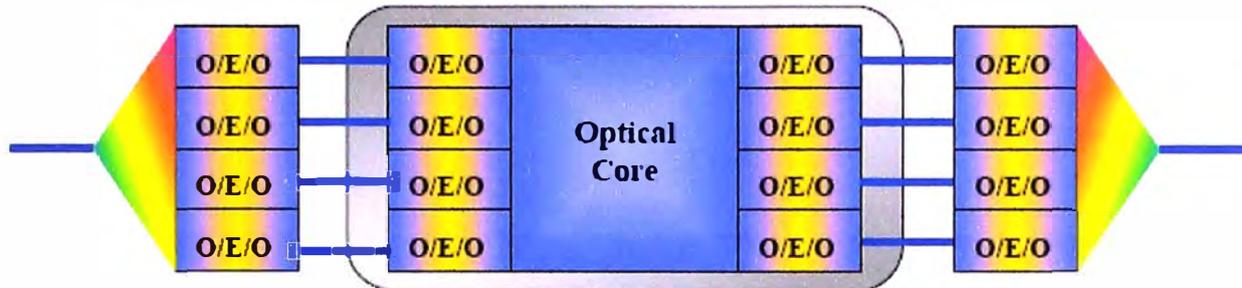
Entre sus desventajas se puede citar que al estar el switch compuesto por circuitos eléctricos, estos limitan el máximo ancho de banda de las señales a procesar.

También el costo monetario por puerto se incrementa con el aumento de la necesidad de incrementar la velocidad de transmisión en cada uno de estos puertos.

Se necesita también contar con puertos distintos por cada tipo interfaz (Ethernet, Sonet), los cuales convierten las señales de entrada en señales que puedan ser tratadas en el switch.

Un cross-connect implementado bajo esta arquitectura es conocido también como **O/E/O OXC** ó también como **OXC Opaco**.

- **OXC con núcleo óptico y conversores O/E/O**



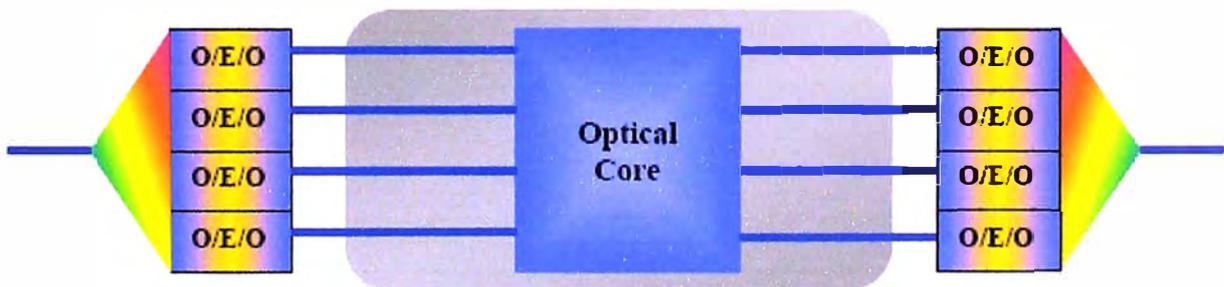
**Fig. 3.7 OXC con núcleo óptico y conversores O/E/O (ref. (36))**

En esta arquitectura el switch ya es óptico superando las desventajas de un switch eléctrico en cuanto a limitación de la velocidad de transmisión de los datos.

En esta arquitectura de implementación de un OXC para detectar las señales WDM son necesarios receptores ópticos y conversores O/E/O (interfaces SR ó VSR) antes de introducir las señales demultiplexadas en el switch. (ver Fig. 3.7)

Bajo esta arquitectura se tiene las mismas ventajas que las disponibles en la arquitectura *OXC de núcleo eléctrico*. Esto gracias a los conversores O/E/O en las entradas del switch óptico.

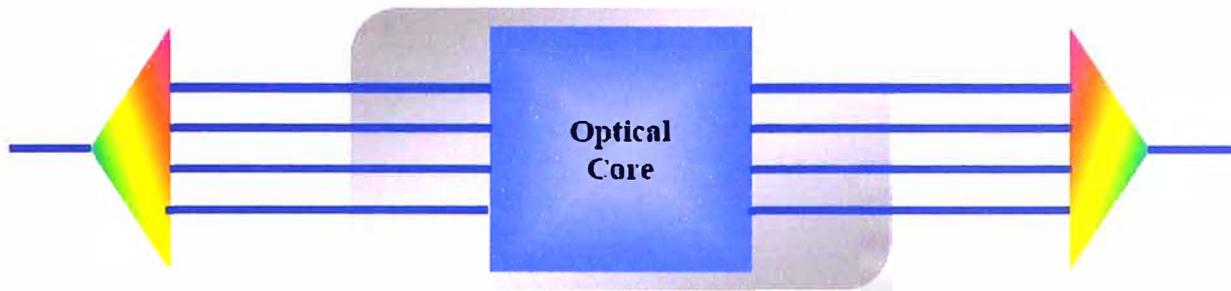
- **OXC con núcleo óptico directamente conectado a los transponders WDM**



**Fig. 3.8 OXC con núcleo óptico directamente conectado a los transponders WDM (ref. (36))**

En esta arquitectura las señales demultiplexadas van directamente al switch óptico desde los transponders WDM. Bajo esta arquitectura, y según la información disponible, no es posible extraer ni añadir señales al flujo de información, solo es posible realizar la conmutación de las señales desde y hacia los canales de entrada y salida respectivos. (ver Fig. 3.8)

- **OXC totalmente ópticos**



**Fig. 3.9 OXC totalmente ópticos (ref. (36))**

A los cross-connects implementados bajo esta arquitectura se le denomina también **OXC transparentes** ó **Photonic Cross-Connect (PXC)**. (ver Fig. 3.9)

Es la arquitectura ideal. Es la que se busca implementar en forma práctica. Para ello es necesario cumplir con tres requisitos:

1. "**Grooming**", que viene a ser el acondicionamiento de canales de baja velocidad, para introducir o extraer estos canales de baja velocidad (eléctricos) en un canal óptico de alta velocidad de transferencia.
2. Regeneración de la señal óptica.
3. Conversión de longitud de onda, para mejorar la eficiencia de utilización de estos canales en la red.

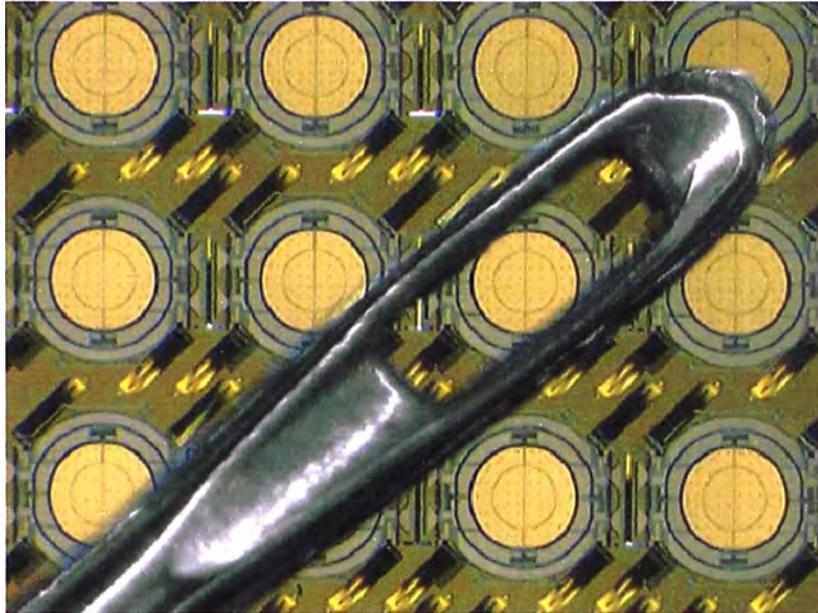
Los switches ópticos permiten la transmisión transparente de información, es decir cualquiera de sus puertos de entrada y salidas no les interesa el formato a transmitir, por ejemplo es igual si transmite 10Gbps desde una interfaz OC-192 ó desde una interface 10GBase-SR. Cosa que como mencionamos en el caso de los *O/E/O OXC* no sucede y donde se debe implementar un puerto específico para que trabaje con una interfaz específica, quitándole versatilidad y disponibilidad de puertos, traduciéndose esto en un costo de operatividad.

Además el costo de un puerto a una determinada velocidad de transmisión es el mismo ó muy similar a otro de una velocidad superior.

### 3.1.3 Elementos y tecnologías usadas en la implementación de un switch óptico

Todas las arquitecturas presentadas, a excepción de la primera, cuentan con un switch óptico. Entre las tecnologías y elementos utilizados para la implementación de estos switches podemos mencionar:

- **Microelectromechanical Systems (MEMS)**



**3.10 Arreglo de espejos usados en switches de tecnología MEMS (se puede ver la comparación de su tamaño con una aguja de coser) (ref. (45))**

Esta tecnología se basa en el uso de arreglos de micro-espejos. Cada espejo, fabricado de material semiconductor, tiene un diámetro de longitud comparable con el de un cabello humano (ver Fig. 3.10). Estos micro-espejos son montados en pivotes mecánicos que le brindan movilidad. Con estos arreglos se pueden lograr disposiciones en dos (2D MEMS, ver Fig. 3.11) ó tres dimensiones (3D MEMS, ver Fig. 3.12) que derivan en una mayor capacidad de canales de conmutación.

La forma de trabajo de esta tecnología se basa en la reflexión de la señal ó haz óptico proveniente de una fibra (que corresponde a un canal de entrada) de tal modo que con dicha reflexión (ó reflexiones sucesivas) logre cubrir una trayectoria hacia otra fibra (que corresponde a un canal de salida).

De lo anterior, para lograr una conmutación 2D-MEMS es necesario que la señal portadora solo sea desviada (reflejada) por un espejo antes de llegar al puerto salida de destino. En el caso de 3D-MEMS la señal portadora es desviada por lo menos hasta en dos ocasiones (y en dos direcciones distintas) por dos espejos distintos antes de llegar al puerto de salida de destino.

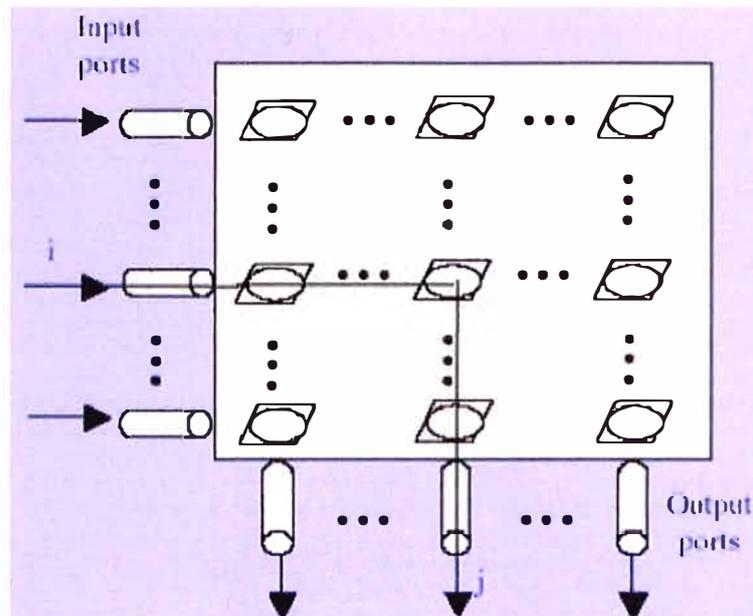


Fig. 3.11 En dos dimensiones (2D) (ref. (36))

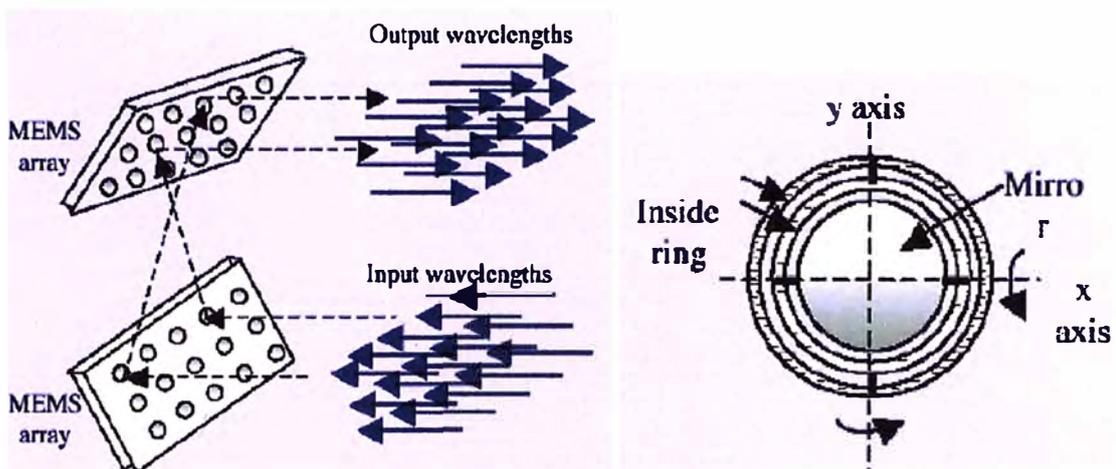


Fig. 3.12 En tres dimensiones (3D) (ref. (36))

El sistema de control de posicionamiento de los espejos es muy complejo y esta gobernado por un microprocesador externo, encargado de que este procedimiento sea preciso y rápido. A pesar de ello, al ser un procedimiento mecánico, la tecnología MEMS puede ser relativamente lentos (tiempos de respuesta del orden de los milisegundos) para usarse en redes Optical Burst Switching ó en Optical Packet Switching.

MEMS fue la tecnología usada para implementar el primer dispositivo de conmutación all-optic, denominado LambdaRouter de Lucent Technologies (Nov/1999).

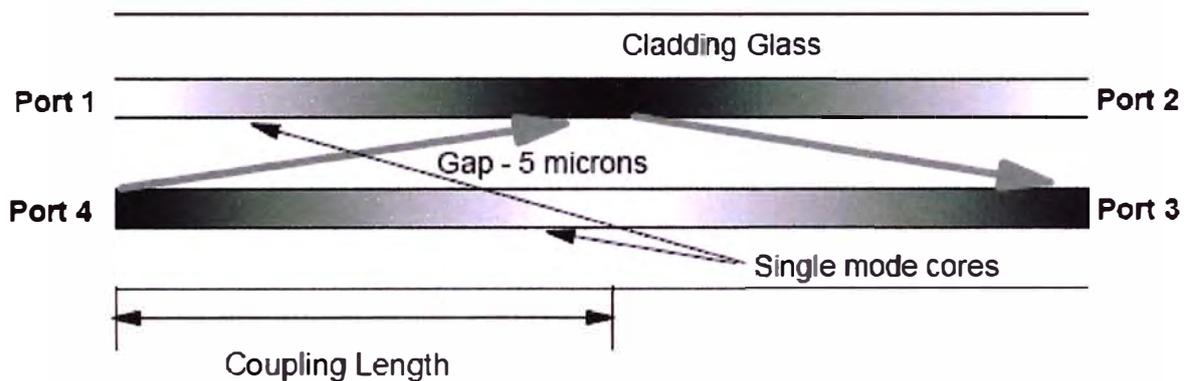
Cabe recalcar que es una tecnología enfocada solo en la conmutación espacial de una señal óptica.

- **Acopladores y Splitters**

En una red de transmisión óptica hay muchas situaciones donde es necesario combinar (función de un acoplador) y/o dividir (función de un splitter) muchas señales ópticas. Siendo esencial en este proceso mantener el nivel de pérdidas de potencia de la señal lo más bajo posible.

En el caso de redes WDM, esto es muy común, pudiendo encontrar acopladores (en forma comercial) en arreglos de 1x2, 2x2, 2x1, por citar algunos ejemplos.

Los acopladores utilizados en este entorno de redes ópticas están, en su mayoría, basados en un principio físico denominado acoplamiento resonante. Estos acopladores están formados por dos fibras monomodo, dispuestas de forma paralela y con sus núcleos muy cercanos (no llegándose a tocar) el uno del otro.



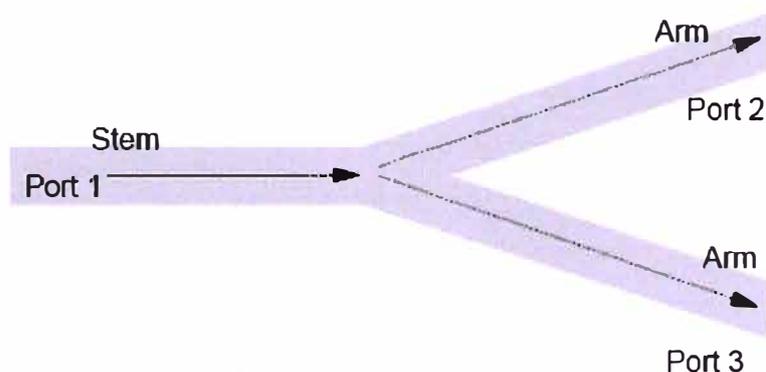
**Fig. 3.13 Principio de funcionamiento de un acoplador resonante (ref. (1))**

En la figura 3.13, se puede ver el funcionamiento de un acoplador resonante. En esta figura, una señal óptica monomodo ingresa por el puerto 4. Al viajar esta señal a través de la fibra en la parte inferior en la figura empieza a generar una señal resonante en la fibra de la parte superior de la figura. Esto es el producto de un fenómeno físico en el cual una señal óptica no viaja a través de la fibra óptica confinada solo a su núcleo, sino que un porcentaje de la energía de esta señal lo hace a través de la armadura. Entonces se empieza a dar una transferencia gradual de la potencia de la señal de la fibra inferior hacia la superior, hasta que esta transferencia es total. Pero esto no queda ahí, una vez que la fibra superior ha recibido toda la potencia de la señal, se empieza a producir el mismo efecto esta vez desde la fibra superior hacia la inferior. Esto se hace repetitivamente hasta que la propia atenuación de la fibra reduzca la potencia de la señal hasta niveles casi nulos, ó hasta que se limite la longitud de este arreglo. De acuerdo a la

longitud del arreglo se puede lograr transferir parte ó la totalidad de la potencia de señal de una fibra óptica. Esto se puede ver en la figura; si se tomara la longitud total de esta sección la señal saldría por el puerto 3; si se tomara la mitad de la longitud la señal saldría por el puerto 2; y si se tomara un cuarto de esta longitud se tendría la señal dividida en dos señales, cada una con potencia igual a la mitad de la original saliendo tanto por el puerto 2 como por el puerto 3 (este último caso es conocido como *acoplador 3dB*).

La señal generada tiene una desfase de  $180^\circ$  con respecto a la señal original.

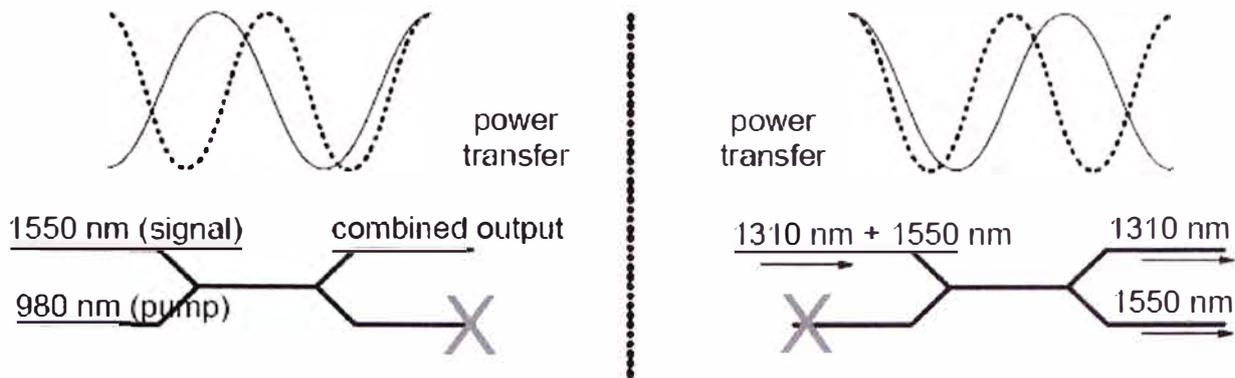
Existen también acopladores en "Y", usados como splitters de señal óptica (ver Fig. 3.14). Estos dividen la señal original en dos señales con iguales potencias (cada una con la mitad de la potencia de la señal original).



**Fig. 3.14 Acoplador en "Y" (ref. (1))**

También existen acopladores asimétricos y los denominados Taps. Estos permiten retirar solo un porcentaje menor de la señal original por uno de los puertos de salida y otro porcentaje mayor por otro de los puertos. Esto es usado para tomar muestras de una señal óptica y así poder monitorearla en línea. Un ejemplo es el denominado acoplador 99:1 ó 1% Tap.

Otro tipo de dispositivos son los acopladores y splitters selectivos de longitud de onda (Wavelength Selective). Cuyo funcionamiento se muestra en la siguiente figura 3.15:



**Fig. 3.15 Modo de trabajo de los acopladores (izquierda), y splitters (derecha) de dispositivos wavelength selective (ref. (1))**

Todos los acopladores tienen tres características principales:

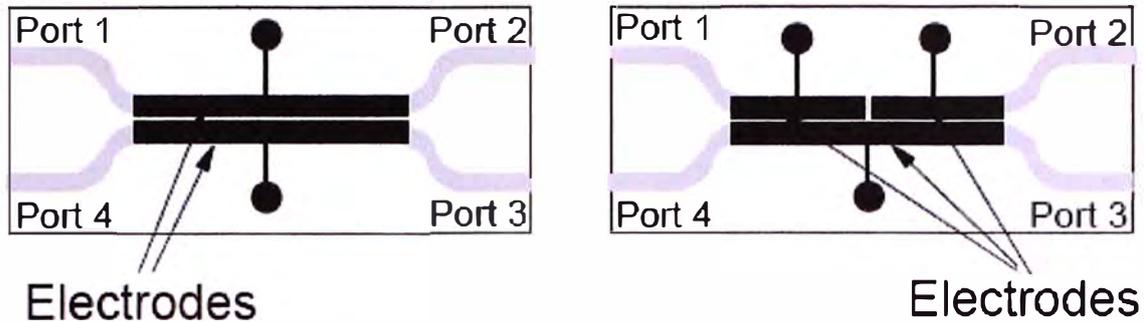
- ❖ Return Loss, que representan un porcentaje de la potencia de la señal que es reflejada hacia la fibra.
- ❖ Insertion Loss, que representa un porcentaje de la potencia de la señal que se disipa durante la inserción de la señal al dispositivo.
- ❖ Excess Loss, que representa la diferencia entre las pérdidas reales producidas en la práctica y las pérdidas calculadas teóricamente. Este valor puede ser positivo ó negativo.

En la mayoría de los acopladores antes citados se cumple el *Principio de Reciprocidad*. Este principio expresa que los acopladores trabajan en ambos sentidos. Es decir si insertamos una señal desde un puerto de salida, el efecto de acoplamiento resonante se observa en los dos puertos de entrada, tal como sucede cuando insertamos una señal desde un puerto de entrada, y el efecto de acoplamiento resonante se observa en los dos puertos de salida.

En el caso del acoplador en “Y”, si insertamos una señal desde el puerto de entrada, esta señal se divide equitativamente en los dos “brazos” del acoplador y por ende en cada uno de los puertos de salida. Pero si se inserta una señal por alguno de los puertos de salida entonces por el puerto de entrada se tendrá solo la mitad de la potencia de la señal insertada.

Estos dispositivos permiten implementar switches (conmutadores), mediante el uso de electrodos que actúan sobre las fibras ó guías paralelas y el uso de materiales electro-ópticos (ej. Litium Niobate) en la fabricación del dispositivo; estos materiales varían su

índice de refracción de acuerdo a la presencia de un campo eléctrico generado por los electrodos. (ver Fig. 3.16)



**Fig. 3.16 Switch basado en acoplador resonante. La presencia ó no de un voltaje de control entre los electrodos hace que la señal que ingrese ya sea por el puerto 1 ó el puerto 4, salga ó por el puerto 2 ó por el puerto 3 (ref. (1))**

También se puede utilizar estos dispositivos en conjunción con otros elementos para la implementación de switches (conmutadores) ópticos, conversores de longitud de onda, etc.

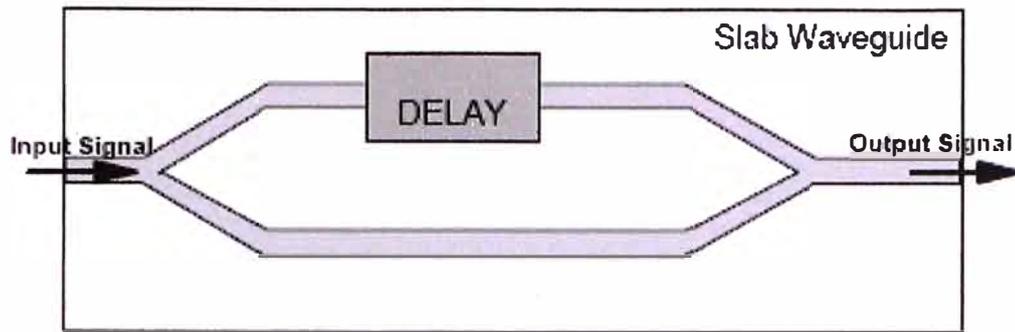
- **Interferómetro Mach-Zehnder**

Es un concepto ampliamente utilizado en el campo de tratamiento óptico de señales.

Es usado para implementar, ya sea solo ó en conjunción con otros elementos, moduladores de señal óptica, switches (conmutadores) ópticos, convertidores de longitud de onda, etc.

Este convierte cambios en la fase de una señal en cambios en la amplitud de la señal de salida, mediante el fenómeno físico de interferencia de ondas electromagnéticas (constructiva ó destructiva).

En el campo óptico estos se implementan con un splitter y un combinador conectados por dos guías de onda. En una de las guías de onda (sino en ambas) entre el splitter y el combinador, se tiene un elemento (delay) que por sus propiedades físicas puede producir un cambio en la fase de una (ó en ambas) de las señales de acuerdo a las condiciones de entorno. (ver Fig. 3.17)



**Fig. 3.17 Interferómetro Mach-Zehnder.** La señal de entrada es dividida en dos señales equivalentes en el acoplador Y; de acuerdo a las condiciones de operación en que se encuentra el elemento DELAY, la señal que lo atraviesa cambia de fase ó no, llegando al combinador junto con la señal de la otra guía, combinándose de forma constructiva ó destructiva. (ref. (1))

Para realizar el cambio de fase, el elemento utilizado puede ser de cualquiera de las siguientes naturalezas:

- ❖ *Electro-Ópticos y Magneto-Ópticos*; materiales como el cuarzo, litium niobate, calcite, etc. Los cuales cambian sus propiedades físicas (específicamente el índice de refracción) en presencia de campos eléctricos ó magnéticos externos.
- ❖ *Thermo-Opticos*; materiales que con el cambio de temperatura varían su índice de refracción.
- ❖ *Liquid-Crystal*, materiales orgánicos ubicados en celdas, los cuales al ser excitados por un voltaje controlado, varían sus propiedades ópticas al variar la orientación de las moléculas debido a la presencia del voltaje externo.

- **Digital Optical Switching (DOS)**

Denominamos así a los dispositivos que se caracterizan por conmutar un puerto de entrada a uno de dos ó varios puertos de salida.

**Basados en acoplador tipo Y**

Este dispositivo hace uso de un acoplador tipo "Y" fabricado con un material que puede ser electro-óptico, magneto-óptico, thermo-óptico, adicionando además electrodos a las guías correspondientes a cada brazo de salida. Al igual que en el caso de switch basado en un acoplador resonante, la presencia ó no de una señal de control (voltaje, campo magnético, termistor) entre los electrodos habilita al acoplador transmitir por uno u otro brazo de salida alternadamente. (ver Fig. 3.18)

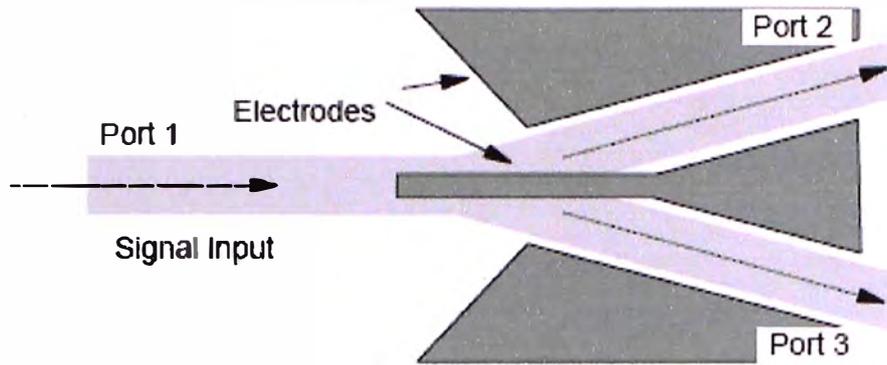


Fig. 3.18 DOS basado en acopador "Y" (ref. (1))

### Basados en celdas de control

Estas celdas pueden estar rellenas de cristal líquido, estas permiten la conmutación de la señal óptica por deflexión de la misma. Esta deflexión es producto del cambio del índice de refracción en el material de la celda de control por la presencia de un voltaje externo. Se pueden lograr arreglos de estas celdas y de guías de onda en una sola estructura (ej. Liquid-Crystal-in-Polymer switch, ver Fig. 3.19)

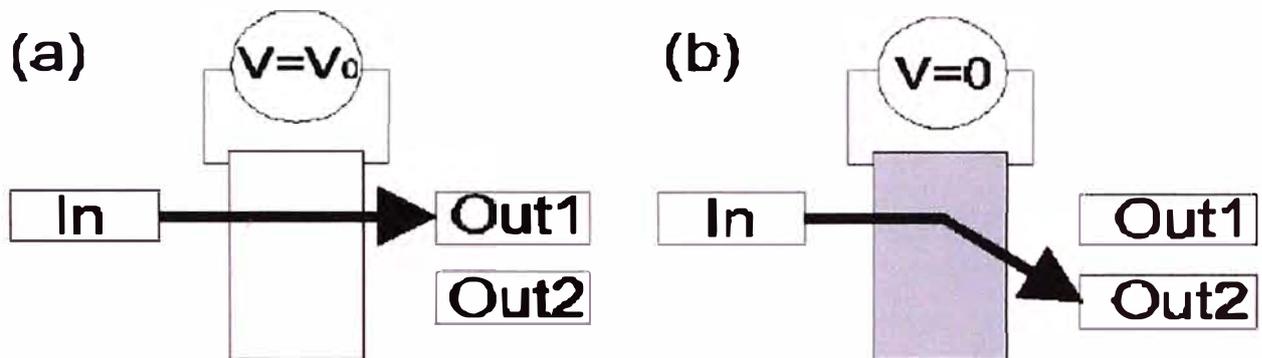
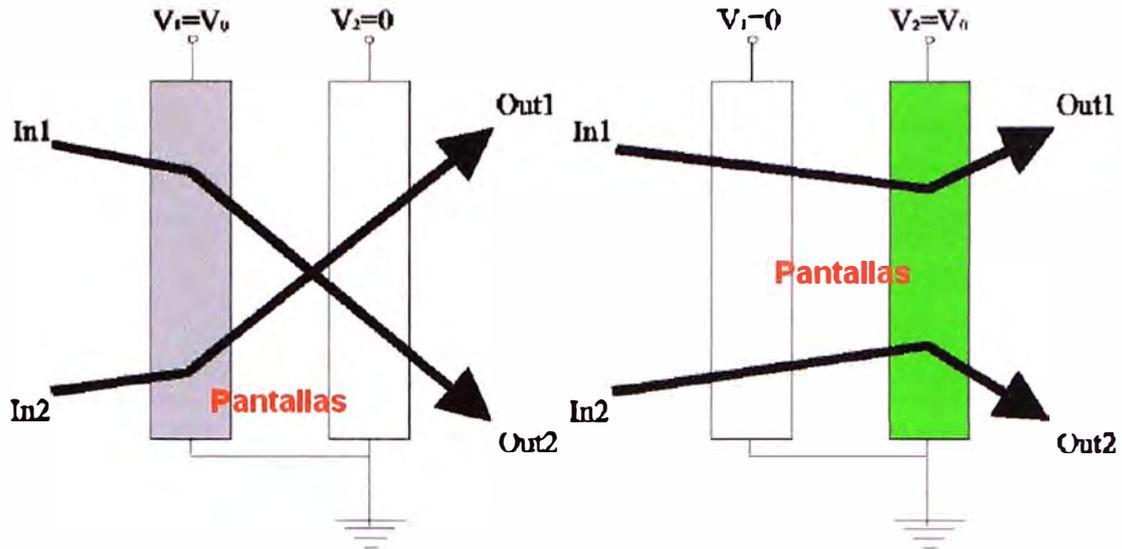


Fig. 3.19 DOS basado en celdas de control. (ej. Con uso de Liquid-Crystal-in-Polymer switch). La presencia del voltaje de control ( $V_0$ ) hace que las moléculas del material en las celdas de control cambien su orientación y esto modifica el índice de refracción de las celdas, produciéndose un cambio en la dirección de la señal portadora. (ref. (45))

Muy parecido a este último método de conmutación es el denominado **Electro-Holographic**, basado en la restauración, por la acción de voltajes de control, de hologramas predefinidos y almacenados en cristales (ó pantallas). (ver Fig. 3.20)



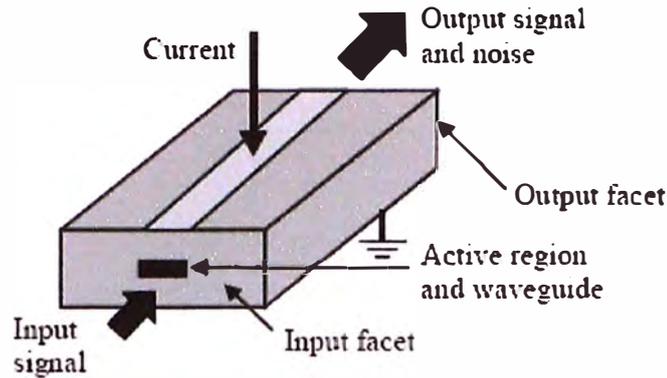
**Fig. 3.20 Switch basado en material electro-holographic. En este el voltaje de control ( $V_0$ ) hace que se restauren las imágenes almacenadas en las pantallas, modificando así el índice de refracción en cada una de estas dando como resultado un cambio en la dirección de la señal portadora, la cual sale del arreglo al puerto de salida destino. (ref. (45))**

- ***Semiconductor Optical Amplifiers (SOA)***

Actualmente es una de las mejores y más versátiles opciones para el procesamiento de señales en soluciones all-optical.

Entre sus ventajas se encuentran su velocidad de respuesta a cambios en su estado de funcionamiento (por su propia naturaleza óptica de trabajo), bajo consumo de energía (aproximadamente de 1W, comparado con las decenas de watts de consumo de sus equivalentes en el ámbito de procesamiento electrónico), pequeñas dimensiones (aproximadamente de  $2000 \times 500 \times 150 \mu\text{m}$ ,  $0.1 \text{mm}^3$ , por dispositivo), y bajo costo de fabricación.

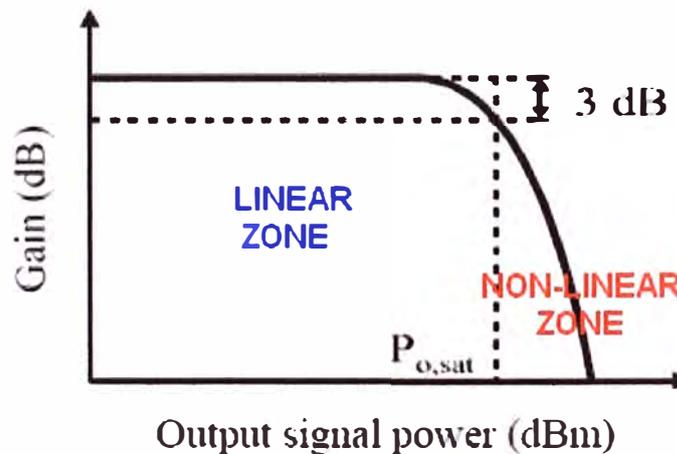
La estructura y modo de funcionamiento se asemejan al de un diodo laser Fabry-Perot. Es una unión de dos capas dopadas (P y N) de un material semiconductor (ej. Indium Phosphide) con una cavidad entre estas dos capas que actúa como guía de onda, se crea una zona denominada "activa", mediante una inversión de población en dicha zona por medio de bombardeo de electrones sobre esta mientras la unión P-N se encuentra polarizada en directa. (ver Fig. 3.21)



**Fig. 3.21 Estructura de un dispositivo SOA (ref. (9))**

La zona activa imparte ganancia a una señal de entrada (aproximadamente 30dB) mediante un proceso de emisión estimulada. La ganancia en la zona activa es controlada por una corriente externa. La señal de salida va acompañada de ruido interno.

La ganancia en los dispositivos SOA está influenciada por la potencia de la señal de entrada y el ruido interno por el proceso de amplificación. (ver Fig. 3.22)

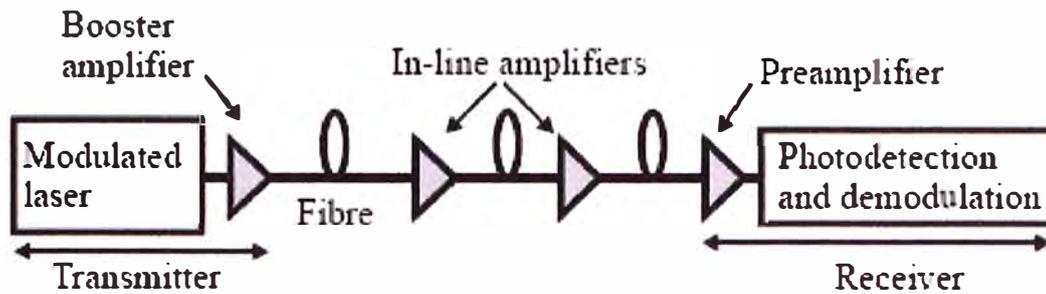


**Fig. 3.22 Distribución típica de la ganancia en un dispositivo SOA versus la potencia de la señal de salida. (ref. (9))**

Tiene dos modos de trabajo, el modo lineal y el no-lineal. Es en este último modo donde presenta las mayores opciones de procesamiento de señal.

En el modo lineal realiza las siguientes funciones: (ver Fig. 3.23)

- Booster amplificador
- In-line amplificador
- Pre-amplificador



**Fig. 3.23 Funciones de un dispositivo SOA en el modo lineal (ref. (9))**

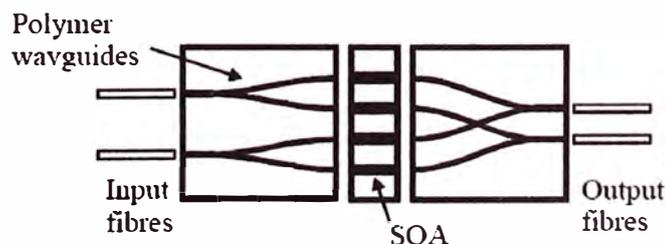
En el modo no lineal realiza las siguientes funciones:

- ❖ Conmutador óptico
- ❖ Convertidor de longitud de onda
- ❖ Puertas lógicas
- ❖ Add/Dropp multiplexor
- ❖ Modulador en ganancia y fase
- ❖ Filtro sintonizable
- ❖ Generador de pulsos
- ❖ Recuperador de sincronismo
- ❖ Compensador de dispersión
- ❖ Detector

Los mecanismos físicos más practicados con el uso de dispositivos SOA en su modo no lineal son:

- ❖ Cross-gain modulation (XGM)
- ❖ Cross-phase modulation (XPM)
- ❖ Self-phase modulation (SPM)
- ❖ Four-wave mixing (FWM)
- ❖ Nonlinear polarization rotation

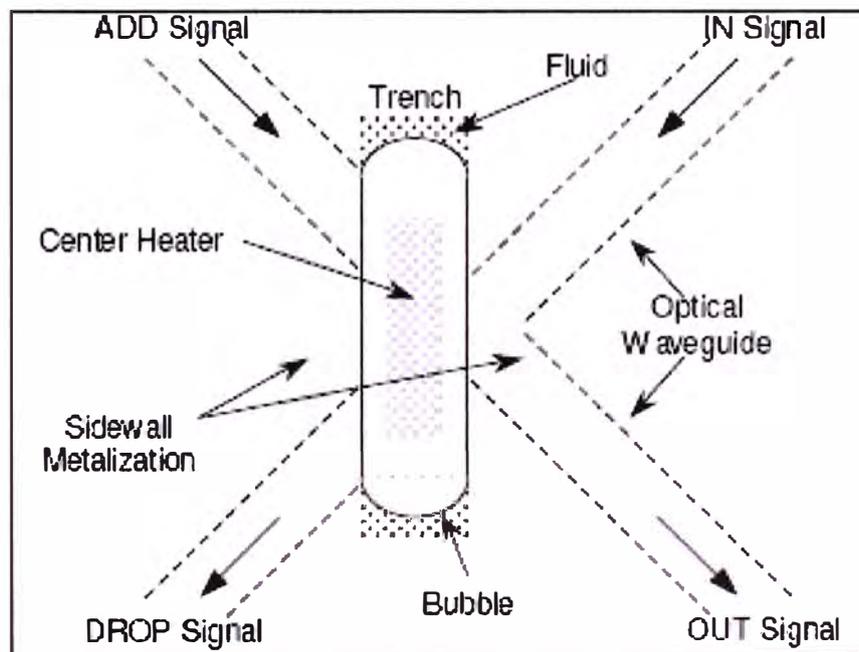
Un ejemplo del uso de esta tecnología se puede ver en un **switch SOA 2x2**. (ver Fig. 3.24)



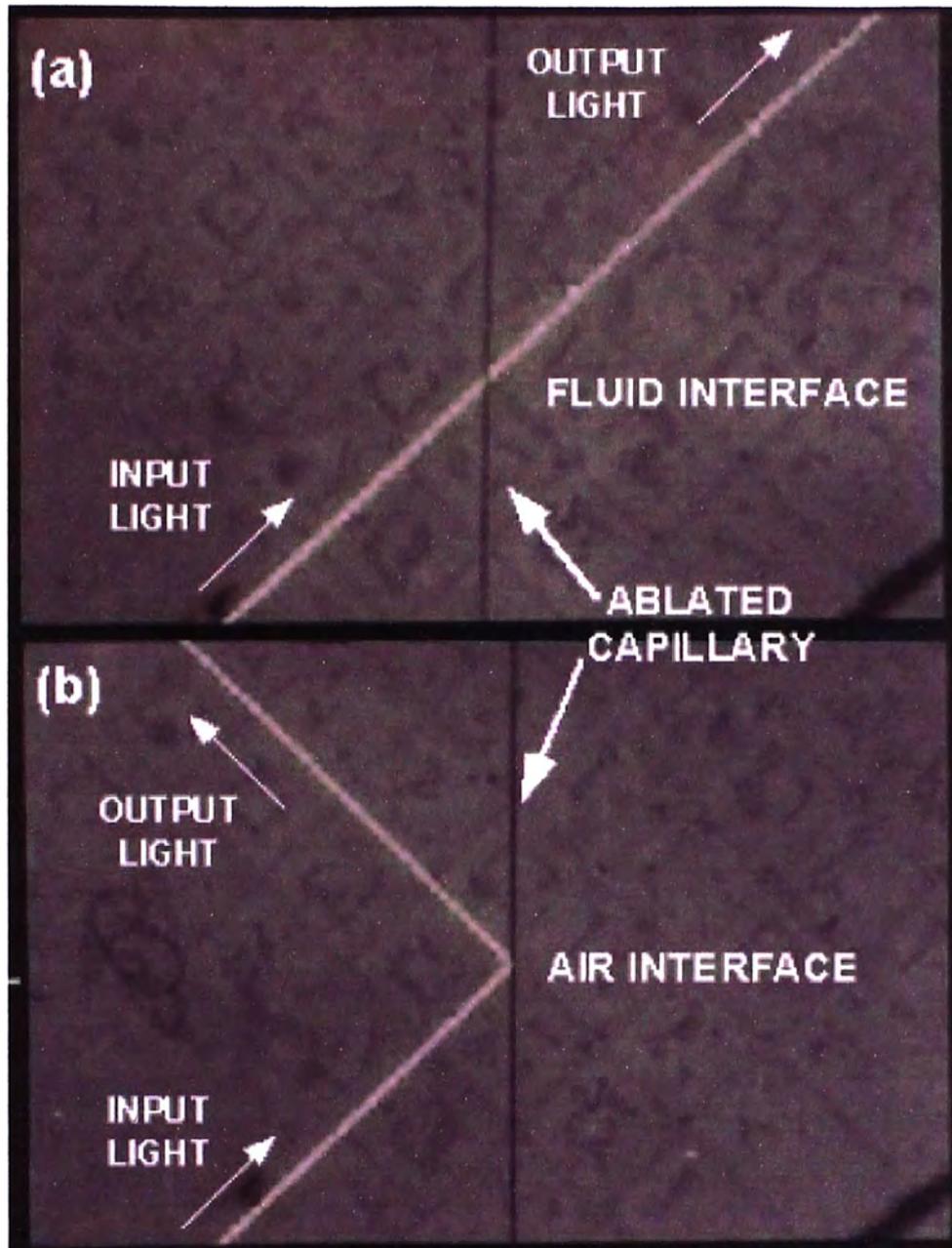
**Fig. 3.24 Switch SOA con arreglo 2x2 (ref. (9))**

- **Bubbles switch**

Esta tecnología ha sido propuesta por Agilent Tech. Inc. y se basa en el mismo principio utilizados por las impresoras de inyección de tinta. Este tipo de switch se compone de dos capas: una capa inferior de silica, por el cual las señales ópticas viajan, y una capa superior de silicio, conteniendo la tecnología de la inyección de tinta. En la capa inferior, dos series de guías de onda se intersecan formando un ángulo de alrededor de  $120^\circ$ . En cada cruce entre dos guías, un hueco minúsculo se completa de un líquido que tiene el mismo índice de refracción de la silica, esto para permitir la propagación de señales en condiciones normales (ver Fig. 3.25). Así, un rayo de luz viaja derecho a través de la guía, a menos que la guía sea interrumpida por una burbuja puesta en uno de los huecos en los cruces (ver Fig. 3.26-a,b). En este caso, la luz se desvía en una nueva guía que cruza la trayectoria de la anterior. Las burbujas se generan por medio de los electrodos minúsculos colocados en la capa superior de silicio, que calientan el líquido hasta que lo gasifican. Esta tecnología ofrece una buena escalabilidad: Agilent desarrollo los subsistemas 32X32 y 16X32, que se pueden conectar en una arquitectura gradual para escalar el número de puertos hasta de 512 por arreglo.



**Fig. 3.25 Vista desde un plano superior de un elemento de un Bubble switch (se puede ver las dos guías de onda y como se cruzan) (ref. (45))**



**Fig. 3.26 Trayectoria de un haz de luz a) cuando liquido esta en condiciones normales, b) cuando el líquido ha sido trasformado a su estado gaseoso (formación de burbujas) (ref. (45))**

En la siguiente tabla (Tabla 3.3) se hace una comparación de las características y rendimiento de algunas opciones de conmutación óptica:

**Tabla 3.3 Comparación entre las características de las distintas tecnologías de conmutación óptica utilizadas en la implementación de OXCs (ref. (45))**

	$\lambda$	IL	$\alpha_{xtalk}$	$P_{pol}$	$\tau_s$
<i>2x2 MEMS</i>	1290+ 1625 nm	1 dB	>50 dB		<1 ms
<i>1x2 liquid crystal</i>	1525+ 1575 nm	<1 dB	>40 dB	0.2 dB	4 ms
<i>1x2 liquid crystal in polymers</i>	III window				100 $\mu$ s
<i>2x2 electro- holographic</i>	1310+ 1550 nm		>30 dB		<30 ns
<i>2x2 SOA</i>	1525+ 1575 nm		25 dB <sup>(1)</sup>	<3 dB	<1 ns
<i>32x32 MEMS 2D array</i>	1290+ 1625 nm	5 dB	>50 dB	<0.2 dB	5 ms
<i>32x32 bubbles</i>	1270+ 1650 nm	<7.5 dB	>50 dB	<0.3 dB	<10 ms
<i>16x16 interf. thermo-optic</i>	1530+ 1570 nm	<3 dB	>38 dB <sup>(1)</sup>	<0.5 dB	<3 ms

Donde:

- ❖  $\lambda$ , rango de longitud de onda.
- ❖ IL, pérdidas de inserción.
- ❖  $\alpha_{xtalk}$ , atenuación cross-talk.
- ❖  $P_{pol}$ , pérdidas de polarización.
- ❖  $\tau_s$ , tiempo de conmutación.

### 3.2 Paradigmas de conmutación óptica:

Tecnológicamente, tres son las posibles opciones de conmutación disponibles para redes ópticas:

- 3.2.1 Conmutación óptica de circuitos (**OCS**, Optical Circuit Switched)
- 3.2.2 Conmutación óptica de paquetes (**OPS**, Optical Packet Switched)
- 3.2.3 Conmutación óptica de ráfagas (**OBS**, Optical Burst Switched)
- 3.2.4 Conmutación óptica por etiquetas (**OLS**, Optical Label Switched)

Describiremos a continuación las características de estas cuatro técnicas:

### 3.2.1 Conmutación Óptica de Circuitos (OCS)

En la técnica de conmutación de circuitos se establecerá un camino (uso de una determinada señal portadora con una determinada longitud de onda) entre la fuente (nodo emisor) y su destino (nodo receptor), por medio de nodos equipados con OXCs WDM. En cada nodo intermedio, el canal de salida (o puerto de salida) por el cual se encamina una señal entrante en un tiempo determinado, depende del canal de entrada (ver Fig. 3.27). De esta manera se formará un circuito. Para poder establecer el camino, primero el nodo emisor envía un paquete de control para hacer la reserva, luego espera la llegada de un mensaje de confirmación de disponibilidad y establecimiento del camino; una vez recibida la confirmación el nodo emisor inicia la transmisión de los datos.

Una de las mayores ventajas de la conmutación de circuitos es que no se necesitan buffers (o la conversión de datos O/E/O) en los nodos intermedios. Además de garantizar la calidad de servicio en la comunicación.

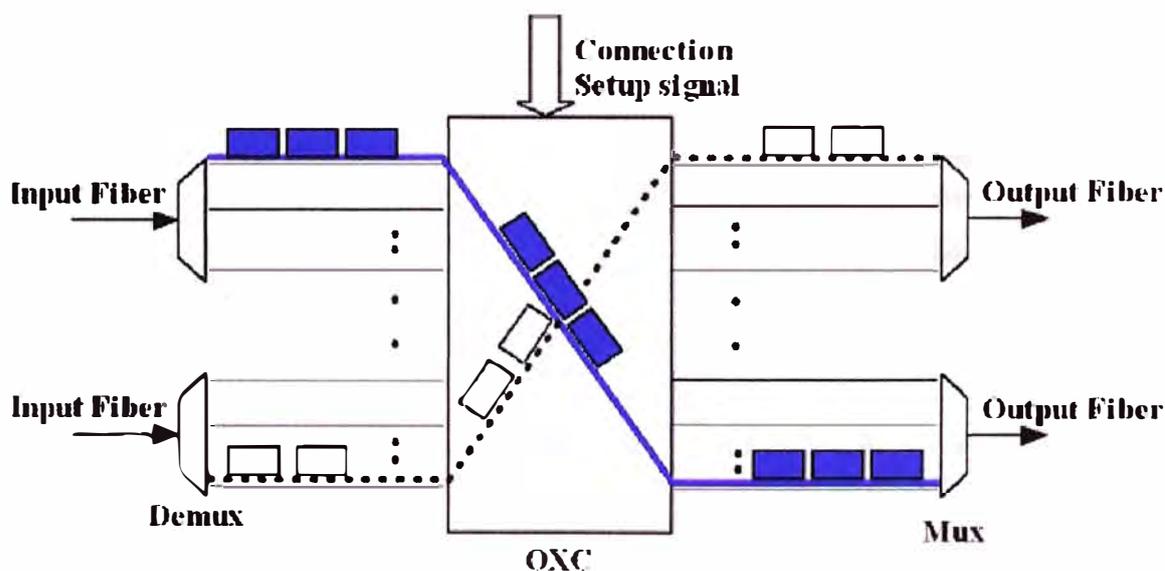


Fig. 3.27 OCS (ref. (26))

Sin embargo, una de las limitaciones de la conmutación óptica de circuitos es que un camino ó circuito utiliza una longitud de onda entera de cada enlace a lo largo de la trayectoria, durante un periodo indeterminado que culmina cuando el nodo emisor emite una señal de liberación del camino. Esto trae como resultado una baja (ineficiente) utilización del ancho de banda porque se producen flujos de tráfico a ráfagas, ya que no hay un tráfico constante y por tanto el enlace solo se utiliza en determinados momentos.

El tráfico de diferentes nodos emisores o para diferentes nodos receptores, no pueden utilizar un mismo camino. Además, como no hay suficientes canales (longitudes de onda) dentro de un enlace de fibra para establecer una conectividad completamente mallada (es decir, que todos los nodos estén conectados entre sí), la carga distribuida por la red será asimétrica debido a que la intensidad de tráfico por algunos caminos varía con el paso del tiempo. También hemos de tener en cuenta que los nodos sólo cuentan con la función de cross-conects, por tanto no tiene capacidad de encaminamiento ni de conmutación.

Otro factor muy importante es el tiempo que se toma en establecer un circuito y liberarlo posteriormente. Estas acciones pueden tardar una serie de milisegundos, que pueden ser comparables con el tiempo de transmisión de unos pocos megabytes de datos con una tasa de transmisión alta (por ejemplo 2,5 Gb/s).

### **3.2.2 Conmutación Óptica de Paquetes (OPS)**

Con la conmutación de paquetes óptica, los datos se envían junto con la cabecera (que contiene los datos de control) sin establecer un camino previo antes de la transmisión de la información. (ver Fig. 3.28)

Esto permite un uso eficiente del canal óptico, ya que distintos nodos emisores pueden transmitir a través de un determinado canal de transmisión a distintos nodos receptores, sin la necesidad de esperar a que este canal sea liberado previamente. Esto se traduce en un ahorro en el uso de longitudes de onda, lo cual no es el caso en sistema basados en OCS.

Como la información de control debe ser procesada en cada nodo para poder tomar una decisión de enrutamiento, cada paquete necesita ser almacenado en cada uno de estos nodos intermedios. Esto es conocido como mecanismo store-and-forward (almacena y envía) característico de la conmutación de paquetes. Debido a esto, se producen retrasos de tiempo debido al procesamiento de las cabeceras de los paquetes en cada nodo. La conmutación de paquetes requiere además una sincronización y un control muy complejo que acompaña a la sincronización.

Otro problema que se nos plantea en la conmutación de paquetes es el tamaño que ha de tener la carga útil, es decir los datos, para lograr un uso óptimo de los recursos de la red.

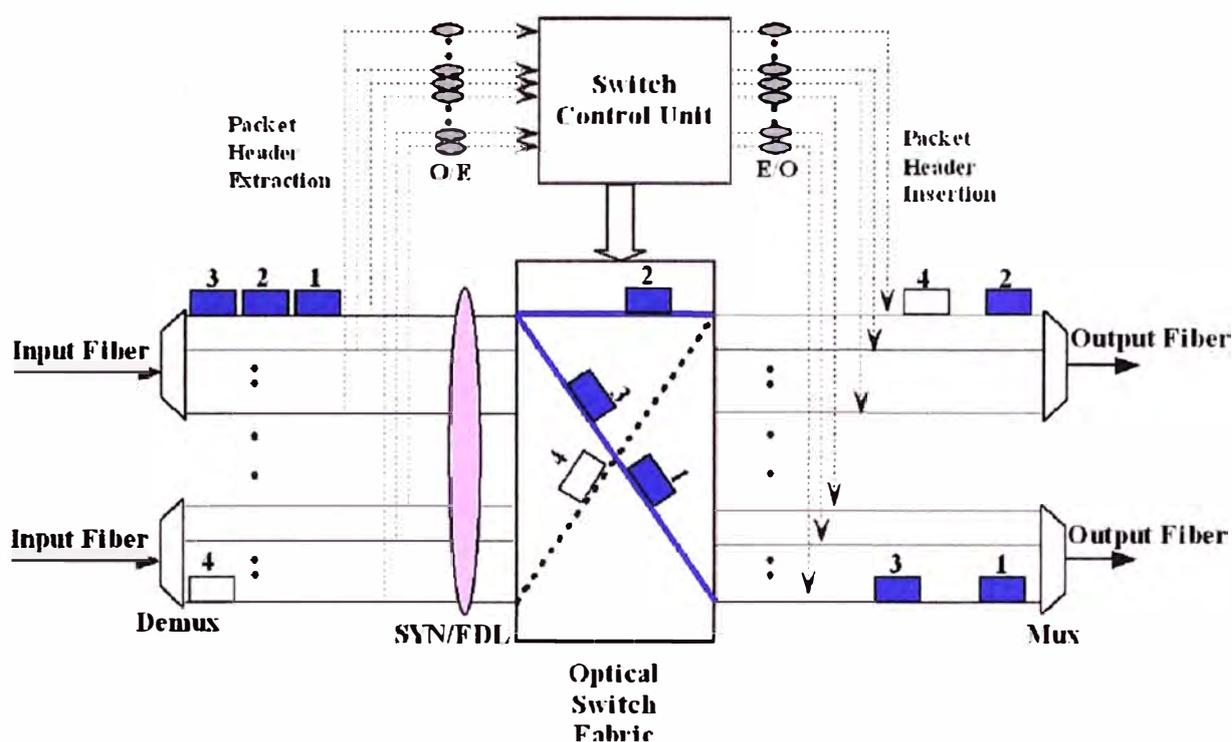


Fig. 3.28 OPS (ref. (26))

### 3.2.3 Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS)

La conmutación óptica de ráfagas combina lo mejor de la conmutación óptica de circuitos y lo mejor de la conmutación óptica de paquetes a la vez que evita sus defectos. OBS utiliza un protocolo de reserva de un solo camino, en el cual una ráfaga de datos sigue a su correspondiente paquete de control, sin que haga falta un reconocimiento del paquete de control para que avise que puede enviar los datos, como resultado obtendremos un retardo muy pequeño de extremo a extremo a diferencia de la conmutación de circuitos.

El paquete de control será procesado en cada uno de los nodos para establecer un camino óptico (configurando los conmutadores ópticos), pero la ráfaga correspondiente (compuesta de múltiples paquetes) pasará sólo por los conmutadores pre-configurados en los nodos intermedios a través de ese camino. (ver Fig. 3.29)

OBS también facilita la integración de IP sobre WDM.

En la red integrada, los paquetes de control se procesarán electrónicamente y las ráfagas de datos se transportarán en el medio óptico.

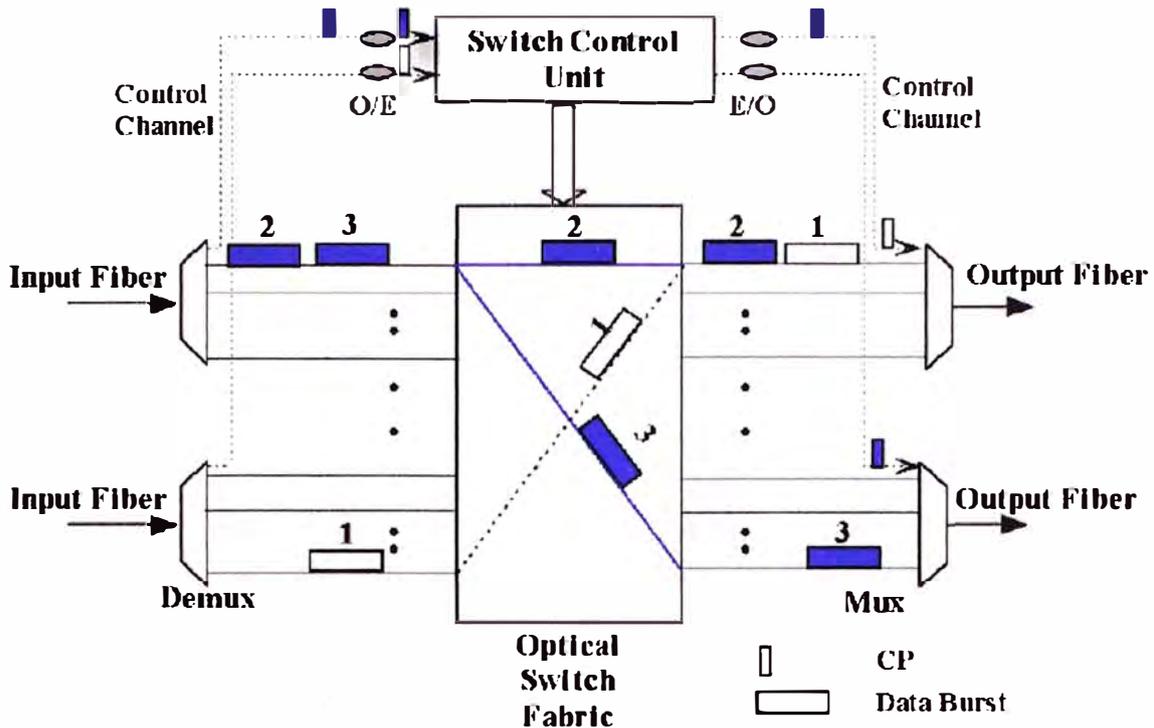


Fig. 3.29 OBS (ref. (26))

### 3.2.4 Conmutación Óptica por Etiquetas (OLS)

Es una variante de la conmutación óptica de paquetes. En este caso la información no va acompañada de una cabecera en el mismo canal de transmisión y la misma banda de transmisión como en OPS, sino que va acompañada de una etiqueta en el mismo canal de transmisión pero en otra banda de transmisión. Es decir utiliza distintos tipos de modulación para la información de la etiqueta (que contiene información del origen de los datos, el destino, prioridad y el tamaño del paquete de datos) y los datos. (ver Fig. 3.30)

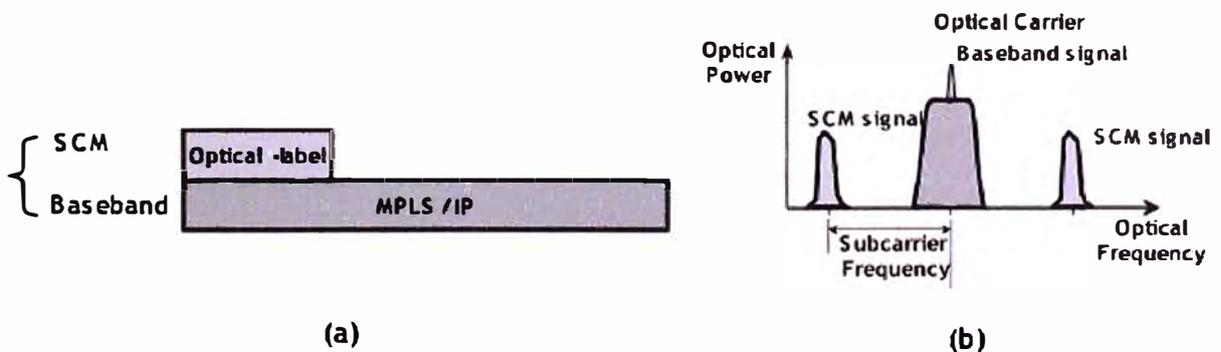


Fig. 3.30 a) La señal de control (Optical-Label, SCM signal) es transmitida al mismo tiempo que los datos (Optical carrier, Baseband signal), b) Pero utilizando una frecuencia distinta. (ref. (12))

Esto se traduce en una mejora en el control del tiempo de retraso aplicado a los paquetes de datos en los puertos de entrada de los nodos intermedios, durante el proceso de configuración del nodo para conmutar el paquete de datos. También se reduce el procesamiento debido a la sincronización entre la etiqueta y la trama de datos, que era un punto débil en la técnica OPS. (ver Fig. 3.31)

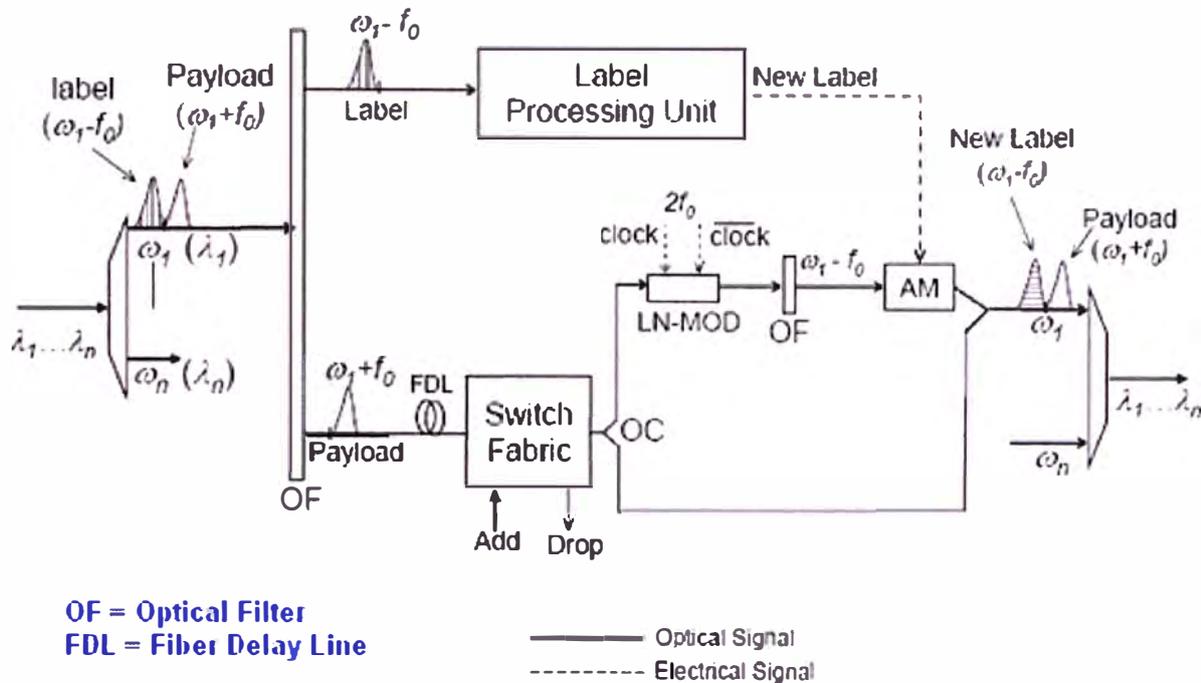


Fig. 3.31 OLS (ref. (12))

Finalizando este capítulo, a continuación se muestra una tabla (Tabla 3.4) comparativa entre las cuatro técnicas de conmutación mencionadas:

Tabla 3.4 Comparación entre los distintos paradigmas de conmutación (ref. (28))

Paradigma de Conmutación	Eficiencia del uso del ancho de banda	Retardo por configuración del nodo intermedio	Uso de buffer ópticos	Procesamiento/Sincronización de Cabecera	Adaptabilidad (manejo de pérdidas en la comunicación)
OCS	Bajo	Alto	No requerido	Bajo	Bajo
OPS	Alto	Bajo	Requerido	Alto	Alto
OBS	Alto	Bajo	No requerido	Bajo	Alto
OLS	Alto	Bajo	Requerido	Bajo	Alto

## CAPÍTULO IV

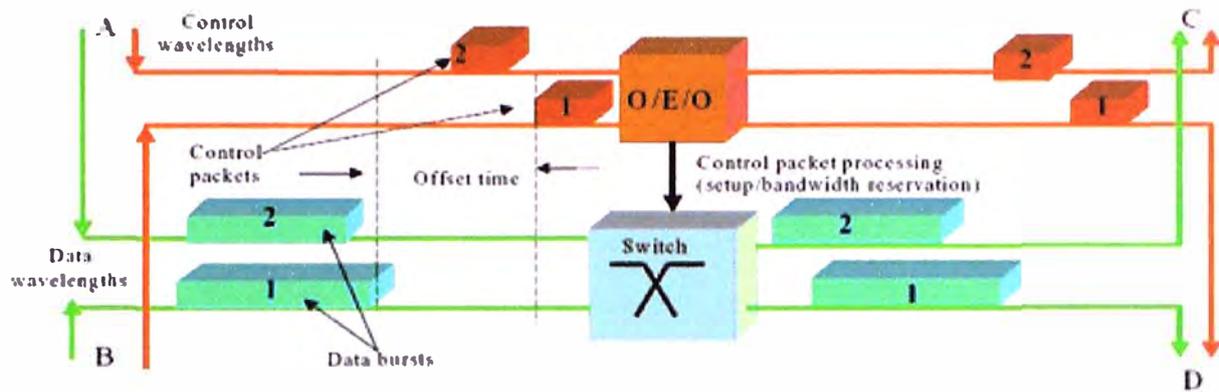
### REDES ÓPTICAS TRANSMISIÓN DE DATOS BASADAS EN CONMUTACIÓN ÓPTICA DE RÁFAGAS

En este capítulo se explicará el funcionamiento de las **redes ópticas de transmisión de datos basadas de conmutación óptica de ráfagas (OBS, Optical Burst Switching)** y los diferentes protocolos y algoritmos que se utilizan en la implementación de este tipo de redes. También se tendrá en cuenta los mecanismos de control de QoS que se pueden ofrecer en este tipo de redes.

#### 4.1 Concepto

El concepto de conmutación de ráfagas, que se empezó a conocer a principios de los años 80, tiene como objetivo ensamblar varios paquetes dentro de una misma ráfaga (burst).

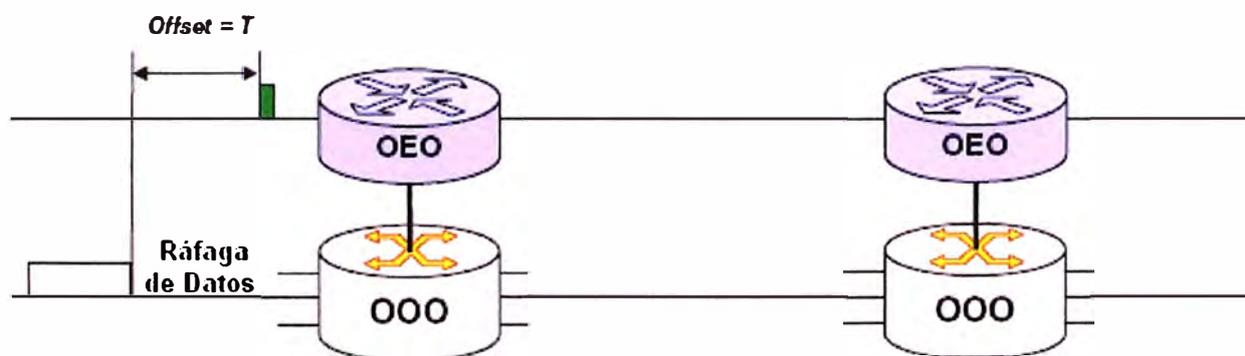
En una red OBS el plano (ó canal de transmisión) de control se halla separado del plano de datos. De este modo, los paquetes de control se envían por un canal diferente de los canales de datos. En los paquetes de control se encontrará información de la ráfaga de datos, como por ejemplo, el tamaño de la ráfaga, el tiempo de **offset** para pasar al siguiente nodo, la fuente, el destino, etc. En un canal de control se podrán transmitir varios paquetes de control, ya que éstos son muy pequeños en comparación con la ráfaga. (ver Fig. 4.1)



**Fig. 4.1 Nodo OBS (ref. (26))**

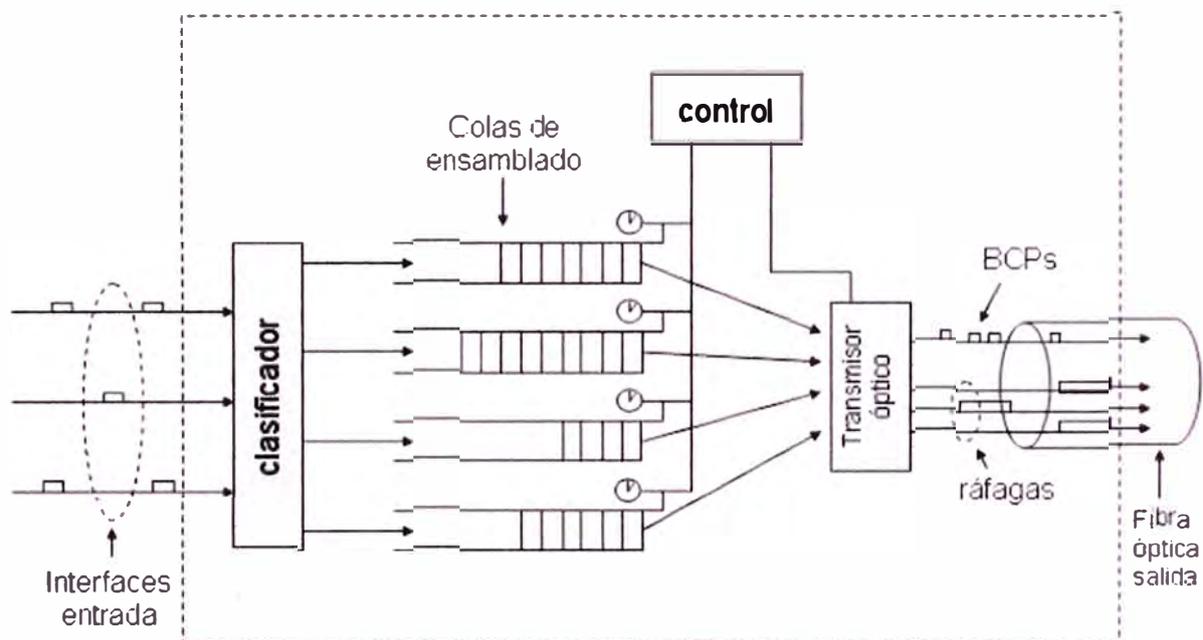
El paquete de control (o cabecera) se procesará en cada nodo intermedio de la red OBS mediante la utilización de un dispositivo electrónico. Esto hace necesario una conversión del tipo O/E/O (óptica-electrónica-óptica) de los datos de control para así poder configurar el ancho de banda necesario para la ráfaga de datos. (ver Fig. 4.1)

El **tiempo de offset** viene ser el intervalo de tiempo de separación entre el momento que se termina de enviar el paquete de control y el momento de inicio de la transmisión de la ráfaga de datos (ver Fig. 4.2). Hay que tener en cuenta además el tiempo de offset que hay entre que se empieza a procesar el paquete de control y cuando se envía su correspondiente ráfaga de datos. Este tiempo de offset se establece para compensar el tiempo que tarda en ser procesada la cabecera de control en cada uno de los nodos así como el tiempo que toma en configurarse el nodo para hacer efectiva el paso de la ráfaga.



**Fig. 4.2 Tiempo de offset (ref. (26))**

En una red OBS, puede haber varios tipos de clientes. Éstos, en el nodo de ingreso, ensamblarán sus datos en una ráfaga y la transmitirán a lo largo de la red hacia el receptor (ver Fig. 4.3). El receptor desensamblará la ráfaga en el nodo de salida y así podrá obtener los diferentes tipos de datos enviados por los diferentes clientes. Sólo se almacenará los datos electrónicamente, mientras se está haciendo el ensamblado/desensamblado, en el nodo de ingreso o en el nodo de salida. Dentro de la red OBS no se podrá almacenar información referente a los datos de los clientes. Si surgiera la necesidad de retardar datos dentro de la red OBS, se utilizarán fibras de retardo y/o tiempos de offset.



### Esquema simple formador ráfagas

**Fig. 4.3 (ref. (44))**

También hay que destacar que en una red OBS hay dos tipos de nodos los cuales tienen funciones totalmente diferentes: (ver Fig. 4.4)

- Los primeros son los nodos frontera (**edge nodes**), que tienen como finalidad el procesamiento electrónico de la información. Estos nodos multiplexan los paquetes de datos de los clientes para poder ensamblarlos en ráfagas y ser transmitidos por la red. Además, estos nodos tienen la función de enviar los paquetes de control por un canal diferente que las ráfagas de datos con un tiempo de offset entre ambos.

- Por otro lado se tienen los nodos intermedios de la red OBS, llamados **core nodes**, que proporcionan una rápida conmutación óptica mediante longitudes de onda o canales. Estos nodos no precisan de un buffer para almacenar la información ya que se transmite de manera transparente a nivel óptico.

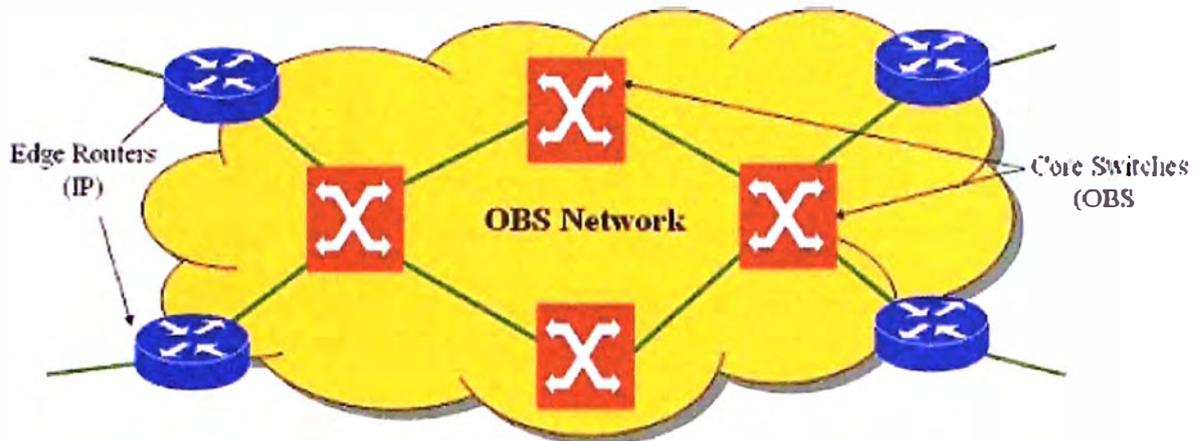


Fig. 4.4 Nodos de una red OBS (ref. (31))

## 4.2 Protocolos

Primero se describirán y compararan cuatro variantes de la conmutación de ráfagas, que son:

- **TAG** (Tell and go)
- **TAW** (Tell and wait)
- **IBT** (In band terminator)
- **RDF** (Reserve a fixed duration)

De estas cuatro variantes, las tres primeras han sido estudiadas para las redes electrónicas.

- **TAG :**

En esta variante, una fuente envía un paquete de control por el canal de control para reservar un ancho de banda a lo largo del camino para luego transmitir los datos. A diferencia de la conmutación de circuitos (**TAW**, Tell and wait), en la conmutación de ráfagas se pueden enviar los datos por el canal de datos sin esperar recibir el reconocimiento (ACK) del paquete de control enviado. Después de que los datos se envían, otra señal de control se enviará para liberar el ancho de banda reservado anteriormente.

- **IBT**

Cada ráfaga tiene una cabecera, como ocurre en la conmutación de paquetes. También tiene un delimitador especial para indicar el final de la ráfaga. Aunque la diferencia entre IBT y la conmutación de paquetes, respecto al ancho de banda, puede ser muy sutil, IBT utiliza virtual cut-through, en lugar de store-and-forward (almacenamiento y envío). En IBT, una fuente, y cualquier nodo intermedio, pueden transmitir el principio (no necesariamente la cabecera) de una ráfaga, antes que se reciba el final de la ráfaga anterior. Debido a esto, una ráfaga puede encontrar menor retardo y, además, los nodos necesitarán buffers más pequeños, excepto en el peor de los casos, en que la ráfaga entera ha de ser almacenada porque el ancho de banda de salida del nodo está ocupado.

- **RDF**

Sólo ha sido estudiado para redes ópticas. RDF es similar a TAG, en donde el paquete de control se envía primero para reservar el ancho de banda, y después los datos se enviarán pasado un tiempo de offset. La diferencia entre RDF y TAG, es que en RDF el ancho de banda se reserva durante un tiempo específico marcado por el paquete de control, ya que dentro del paquete de control está la longitud de la ráfaga.

Aunque OBS pueda basarse en cualquiera de las tres variantes mencionadas anteriormente, OBS basado en RDF es la más atractiva por diferentes motivos:

- ❖ Las fibras de retardo son costosas, y en RDF la utilización del ancho de banda es más eficiente que con las fibras de retardo.
- ❖ Con respecto al ancho de banda utilizado, al momento de liberarlo, en OBS basado en IBT, hemos de poder detectar el indicador que nos marca el fin de la ráfaga, y esto representa una gran dificultad a la hora de la implementación. Algo similar ocurre en OBS basado en TAG, la pérdida de la señal que nos indica la liberación del ancho de banda provoca un derroche del mismo, ya que habría una parte que no estaría siendo utilizada. Una posible alternativa a este problema es una fuente que periódicamente envíe una señal de refresco, si no llegamos a recibir esta señal de refresco después de un periodo de tiempo, el ancho de banda sería liberado. Pero esta solución no es la adecuada, ya que genera muchas señales de control, y puede provocar que se libere el ancho de banda de manera indeseada, puesto que se puede producir una pérdida de señales de refresco.

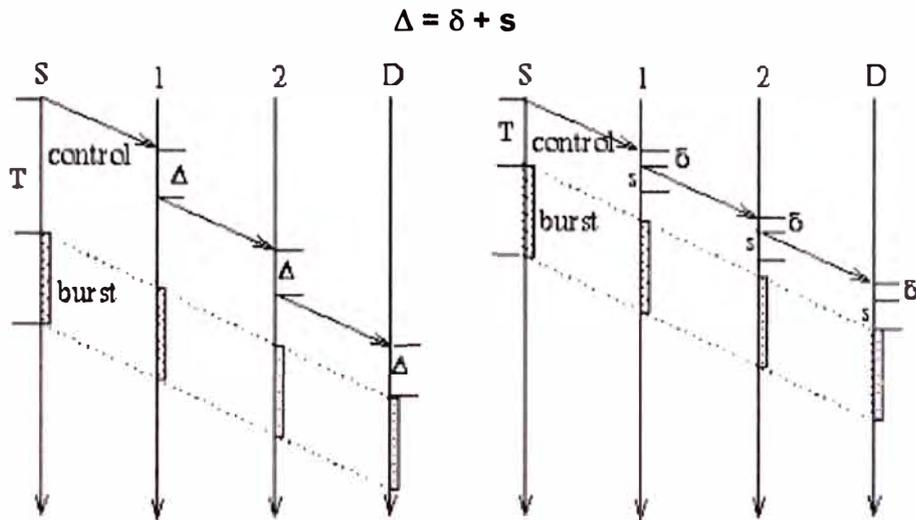
El protocolo utilizado para las redes OBS es el **JET (Just-Enough-Time)** y está basado en RDF. En comparación con otros protocolos, JET es el que presenta un mejor uso del ancho de banda a la hora de transmitir la ráfaga. El tiempo que permanecen reservados los recursos en un nodo es el tiempo que tarda en configurarse el nodo, más el tiempo que tarda en llegar y transmitirse la ráfaga al nodo, más el tiempo que tarda en desconfigurarse el nodo.

La idea básica del protocolo JET es que cuando se envía un paquete de control, por un canal de control, éste reserva el ancho de banda necesario durante un periodo de tiempo proporcional al tamaño de la ráfaga de datos correspondiente. El tiempo de llegada de la ráfaga está determinado por el valor de tiempo de offset establecido en el paquete de control y la suma del tiempo de proceso del paquete de control que se ha fijado en el nodo anterior para el nodo actual. Si la reserva tiene éxito, entonces el paquete de control ajusta el tiempo de offset para el siguiente nodo, y es enviado al siguiente nodo. Si no tiene éxito la reserva del ancho de banda, la ráfaga será bloqueada y será descartada si no existe una fibra de retardo (FDL).

JET realmente no reserva los recursos desde que el paquete de control llega al nodo hasta que pasa la ráfaga, sino que reserva los recursos de una forma óptima, desde que llega la ráfaga hasta que es conmutada.

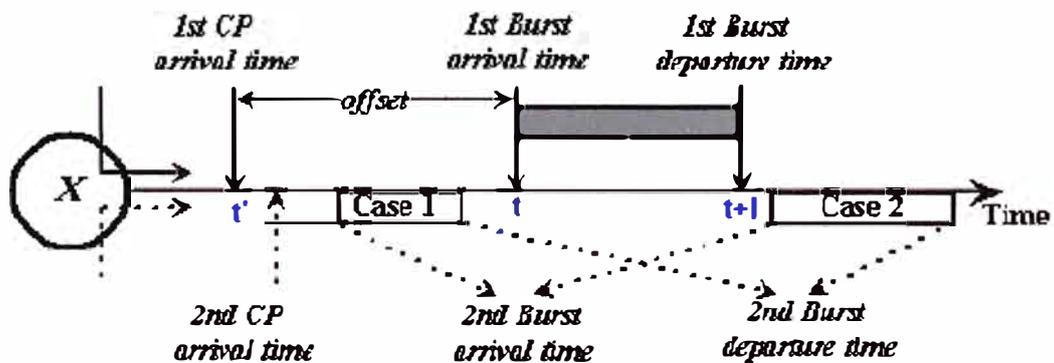
El retardo que sufre una trama que es enviada en OBS es menor que en OPS, debido a que en OPS el retardo es la suma de los tiempos que tardan en configurarse los nodos por los que atraviesan los paquetes, y en OBS en el mejor de los casos se ha de esperar a que se configure el primer nodo más la indicación de que tiene que configurarse al resto de nodos.

Por ejemplo, en la siguiente figura, una fuente envía una ráfaga después de un tiempo de offset igual a  $T$ . Como el tiempo de proceso del paquete de control es  $\delta$ , y tenemos 3 nodos, el retardo total de proceso para el paquete de control será de  $3\delta$ . Gracias a que la ráfaga es enviada después de un tiempo de offset  $T$ , no son necesarias las fibras de retardo en cada nodo intermedio para retardar la ráfaga mientras el paquete de control está siendo procesado.  $s$  es el tiempo que toma el switch para configurarse. (ver Fig. 4.5)



**Fig. 4.5 Protocolo JET (ref. (28))**

Una característica exclusiva del protocolo JET es la reserva retardada (DR, Delayed Reservation, ver Fig. 4.6), como se muestra en la siguiente figura, donde en ancho de banda de salida de un nodo  $i$  se reserva desde  $t$  el tiempo en el cual se espera que la ráfaga llegue, en lugar de  $t'$ , el tiempo en el cual el paquete de control es acabado de procesar (y la petición del ancho de banda está hecha). Además, el ancho de banda estará reservado hasta el tiempo de partida de la ráfaga  $t + l$ , donde  $l$  es el tamaño de la ráfaga esperado.



**Fig. 4.6 DR (ref. (28))**

Otro esquema de funcionamiento del protocolo JET es el siguiente: El ancho de banda reservado para la primera ráfaga, empieza a partir del tiempo de llegada de la ráfaga, en vez del tiempo de llegada del paquete de control. En cada nodo intermedio, el tiempo de offset se actualiza para compensar el tiempo real de procesamiento del paquete de control y/o el tiempo de configuración del conmutador.

Si consideramos un enrutamiento aleatorio sin rutas estáticas, el mínimo tiempo de offset para el camino primario podría no ser válido si la ráfaga se encamina por un camino aleatorio más largo. En este caso, se podría añadir un tiempo de offset extra.

Otro rasgo importante del protocolo JET, es que la información del tamaño de la ráfaga se encuentra también en el paquete de control. Esto hace posible que se haga una reserva del ancho de banda durante un tiempo determinado (closed-ended) y luego pasa a ser liberado (sólo para la duración de la ráfaga con una liberación del ancho de banda automática), en lugar de una reserva indefinida (la cual no deja libre el ancho de banda hasta que no detecta la señal de liberación). Esta reserva con liberación del ancho de banda, ayuda a los nodos intermedios a que tomen decisiones inteligentes, en los cuales es posible hacer la reserva de nuevas ráfagas para poder aumentar la utilización del ancho de banda. En la figura de arriba, la reserva para la segunda ráfaga, que llega en los casos 1 y 2, tiene éxito si y solo si el paquete de control de la segunda ráfaga llega antes que la segunda ráfaga. El nodo intermedio hace la reserva con liberación del ancho de banda para ambas ráfagas, la primera y la segunda.

Una ventaja del protocolo JET, es que puede utilizar cualquier FDL (Fiber Delay Line) disponible en un nodo intermedio. Utilizará las FDL para retrasar el bloqueo de una ráfaga antes de que el ancho de banda para ésta esté disponible.

### 4.3 Algoritmos de planificación

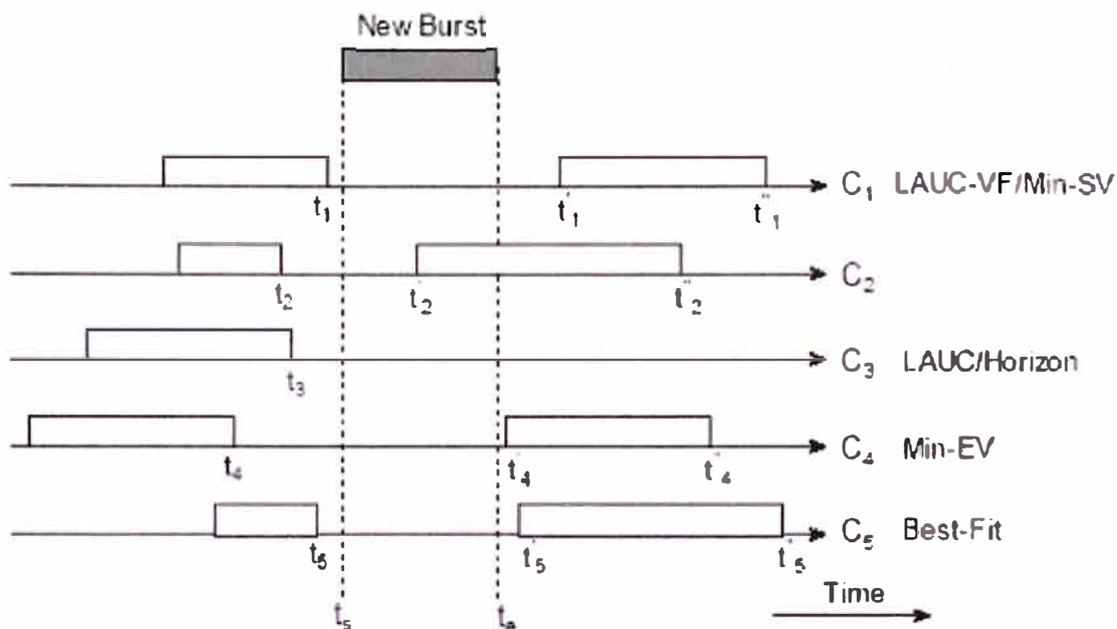
El protocolo de reserva del ancho de banda que se utiliza en redes **OBS** es el protocolo **JET** (Just Enough Time).

Como ya se ha comentado anteriormente, en el protocolo JET, un paquete de control se procesa electrónicamente y reserva un canal de salida (longitud de onda) durante un periodo de tiempo igual a la longitud de la ráfaga. Este periodo de tiempo empieza cuando llega la esperada ráfaga. Si la reserva tiene éxito, el paquete de control ajusta el tiempo de offset para el siguiente nodo, y es reenviado. Si la reserva no tiene éxito, la ráfaga es bloqueada y será descartada si no existe una fibra de retardo.

Dado que en OBS se utilizan protocolos de reserva del ancho de banda de un solo camino, es decir que no requiere de un ACK, como por ejemplo el protocolo JET, y que una ráfaga no puede ser almacenada en cualquier nodo intermedio debido a la falta de RAM óptica (una FDL sólo nos proporciona un retardo limitado y también una cierta capacidad de resolución de contenciones aunque no es una solución correcta), la pérdida de ráfagas es uno de los principales problemas que plantean las redes OBS.

A consecuencia de la alta tasa de pérdidas se diseñaron algoritmos de planificación para evitar las posibles colisiones de las ráfagas. A continuación se dará una visión general de algunos de los algoritmos existentes más conocidos, como por ejemplo: (ver Fig. 4.7)

- ❖ *Horizon*
- ❖ *LAUC-VF*
- ❖ *Min-SV*
- ❖ *Min-EV*



**Fig. 4.7 Algoritmos ó Mecanismos de planificación de reserva para la transmisión de una nueva ráfaga (ref. (26))**

En una red OBS, al recibir el paquete de control, un nodo intermedio ha de decidir rápidamente como tratar la ráfaga entrante. Qué canal (longitud de onda) debería ser reservado para la ráfaga, se decidirá mediante un algoritmo de planificación. Para explicar estos algoritmos de planificación se utilizará el protocolo JET para hacer la reserva del ancho de banda, y por tanto si una ráfaga B llega en un tiempo R y acaba en un tiempo F, JET reservará un canal sólo desde R hasta F. Si la ráfaga entrante se programa correctamente en un canal, entonces el paquete de control y la ráfaga de datos serán remitidos al siguiente nodo con el tiempo de offset modificado.

Hay dos factores que hacen que se planteen los algoritmos de planificación:

- ❖ Uno es que las ráfagas no pueden llegar una detrás de otra (es decir sin ningún intervalo de tiempo entre ellas), y por lo tanto en cada canal la información estará separada en fragmentos existiendo entre cada fragmento un intervalo de tiempo inactivo que se denominará "hueco" (llamados voids). Estos "huecos" podrían ser desaprovechados si utilizamos un algoritmo de programación ineficiente.

- ❖ Otro factor es que ráfagas diferentes puedan tener un tiempo de offset inicial distinto, y que el tiempo de offset de una ráfaga dada cambia a lo largo del camino. Estos dos factores hacen muy difícil a la programación de algoritmos poder determinar cual es el canal de salida correcto para una ráfaga entrante determinada.

### **Horizon**

El primer algoritmo de planificación que se diseñó fue el *Horizon*. En este algoritmo, un planificador sólo guarda el camino de un supuesto horizonte para cada canal, este horizonte es el tiempo después del cual no se ha hecho ninguna reserva para dicho canal. El planificador asignará a cada ráfaga de datos que llegue al canal el último horizonte establecido, cuyo valor será todavía menor que el tiempo de llegada de la ráfaga de datos.

El algoritmo Horizon es relativamente simple y tiene un funcionamiento razonablemente bueno en términos del tiempo que tarda en ejecutarse. Sin embargo, este algoritmo tiene una baja utilización del ancho de banda y una tasa de pérdidas alta. Esto se debe al hecho que el algoritmo de Horizon descarta simplemente todos los “huecos”.

### **LAUC-VF**

Después se propuso otro algoritmo llamado LAUC-VF (Latest Available Unused Channel with Void Filling). LAUC-VF mantiene un registro de todos los “huecos” (los intervalos cerrados), así como los horizontes que pueden ser considerados intervalos abiertos, es decir, que esté libre el canal; y asigna el intervalo al último tiempo de llegada que está todavía antes que el tiempo de llegada del paquete de control que arriba. Esto produce una mayor utilización del ancho de banda y una mejora de la tasa de pérdidas comparada con el algoritmo Horizon.

También se propusieron varios algoritmos eficientes para seleccionar los canales para las ráfagas entrantes de datos usando unos criterios diferentes.

### **LGVF**

En **LGVF** (Least Gap Void Filling) se almacena información acerca del último intervalo nulo mejorando el funcionamiento de LAUC-VF, especialmente para la programación del tiempo.

Hay mas algoritmos precisos que se están investigando, especialmente desde el punto de vista de la planificación del tiempo. En particular, se presentan dos algoritmos cuando

no se utilizan fibras de retardo. Estos son: Min-SV (Minimum Starting Void) y Min-EV (Minimum Ending Void).

### ***Min-SV***

***Min-SV*** es parecido a LAUC-VF pero prevé un tiempo de planificación comparable con el tiempo de Horizon y por tanto mucho mejor que LAUC-VF. Min-SV es un poco más eficiente que Min-EV pero se toma mas tiempo para programar un intervalo nulo para una ráfaga que acaba de llegar. Min-SV selecciona un intervalo de tiempo vacio, de entre los que se pueden elegir, para una ráfaga dada, minimizando el intervalo de tiempo entre el tiempo cuando empieza un "hueco" y el tiempo de llegada de una ráfaga.

### ***Min-EV***

***Min-EV*** minimiza el "hueco" entre el tiempo de llegada del último bit de la ráfaga y el tiempo del fin de espacio vacio.

Para ambos algoritmos la información de los espacios vacíos se guarda en un árbol de búsqueda binaria simétrico implementado con punteros.

Estos últimos algoritmos, Min-SV y Min-EV son mejores respecto a la tasa de perdida de ráfagas y el tiempo de programación.

## **4.4 Resolución de contenciones**

Una contención es una "colisión" de ráfagas que coinciden en un mismo canal (Longitud de onda).

Usando protocolos de reserva del ancho de banda en un solo sentido como JET, el nodo de ingreso envía las ráfagas sin la necesidad de estar esperando un reconocimiento o de tener una coordinación global de la red. Esto, sin embargo, requiere de un nodo OBS intermedio (core) para resolver posibles conflictos entre ráfagas. En una red sin buffers como es OBS, la resolución de contenciones entre ráfagas se puede resolver de tres maneras:

1. Desviando,
2. Segmentando
3. Dando prioridad a las ráfagas (QoS se verá en el siguiente apartado).

## Desvío de ráfagas

Cuando se produce una contención, la ráfaga se envía por un canal diferente de salida en lugar de enviarse por el predeterminado. Dado que la contención sólo puede ocurrir cuando las ráfagas compiten por un mismo canal (longitud de onda) y un mismo puerto de salida simultáneamente, la desviación puede ser practicada en el canal, en el dominio del tiempo y/o en el dominio del espacio.

- ❖ En el canal (o longitud de onda) una ráfaga colisionada o en conflicto se puede enviar por otro canal gracias a la conversión de canales o longitudes de onda.
- ❖ En el dominio del espacio una ráfaga en conflicto puede enviarse por un puerto de salida diferente y luego puede seguir una ruta alternativa para el destino.
- ❖ En el dominio del tiempo se utilizan fibras de retardo (FDL's). Una ráfaga en conflicto puede ser retardada un tiempo determinado.

Si una ráfaga en conflicto no puede ser desviada por la indisponibilidad de cualquier canal, debido a que no exista un puerto de salida o una fibra de retardo disponible, la pérdida de la ráfaga sería inevitable. Mejor dicho, una solución normal sería que se dejara perder la ráfaga entrante, pero puede ser que la ráfaga entrante tenga preferencia sobre la ráfaga existente. Esta preferencia estará marcada por una prioridad o por un determinado perfil de tráfico. También puede producirse una segmentación de la ráfaga entrante o de la existente en múltiples segmentos, y cada segmento luego puede ser desviado, perdido o priorizado. Esta aproximación se le llamará segmentación de ráfagas.

## Segmentación de ráfagas y desvío

La segmentación de ráfagas puede ser una solución para disminuir la probabilidad de pérdida en la conmutación de ráfagas ópticas durante la contención. Cuando ocurre una contención una ráfaga se divide en múltiples segmentos, y sólo esos paquetes de una ráfaga dada que se superponen con los segmentos de otra ráfaga serán los que se pierdan. La segmentación de ráfagas se usa principalmente para minimizar la pérdida de ráfagas prioritarias.

Hay dos maneras de segmentar una ráfaga cuando ocurre una contención. La primera manera es segmentar la cola de la ráfaga original, y la segunda manera es segmentar la cabecera de la ráfaga que contiene. Una ventaja significativa es que al segmentar la cola de las ráfagas en vez de la cabecera hay una mayor oportunidad de entrega de los



En la siguiente tabla (Tabla 4.1) se muestra un resumen de los diferentes esquemas de resolución de colisiones:

**Tabla 4.1 Comparación entre esquemas de resolución de contenciones (ref. (31))**

Contention resolution	Advantages	Disadvantages
Wavelength Conversion	Much lower burst loss	Inmature and expensive technology
FDL buffer	Conceptually simple; Mature technology	Bulky FDLs; Extra delay; More voids
Deflection routing	No extra hardware requirement	Out of order arrivals; Possible instability
Burst Segmentation	Finer contention resolution	Complicated control

Algunos de los anteriores esquemas de resolución de contenciones se pueden aplicar conjuntamente. Por ejemplo, en lugar de reenviar una ráfaga por una ruta alternativa (usando rutas de desvío), uno puede desviar una ráfaga por un camino predeterminado que devuelve la ráfaga al nodo que la desvió y luego reenviarla por la ruta original. Con esta aproximación se consigue que la red actúe como una especie de buffer, retardando la ráfaga.

Los esquemas de resolución de contenciones que se mencionan actúan de manera pasiva, es decir, que toman decisiones después de que haya ocurrido una contención.

Se pueden comparar las estadísticas de pérdidas de ráfagas que se realizan en diferentes canales cuando no existen prioridades y compararlas con las estadísticas que se toman cuando existen prioridades. El resultado es que, las ráfagas prioritarias asignadas a un canal prioritario, tendrán una tasa de pérdidas inferior.

#### **4.5 Calidad de Servicio (QoS, Quality of Service)**

Un objetivo de las redes OBS es poder ofrecer calidad de servicio (QoS). Dado que el protocolo IP garantiza un servicio best-effort, aparecerán una serie de problemas.

En algunas aplicaciones en tiempo real (videoconferencia, VoIP, etc...) requieren un nivel de QoS que no es necesario en aplicaciones que no son en tiempo real (e-mail y servicios Web, en general). Debido a esto surge la problemática de como dar un soporte básico de QoS en la capa WDM (como por ejemplo establecer una serie de prioridades).

Para que la capa WDM sea capaz de soportar una QoS básica, no sólo es necesario llevar un control de la red y la gestión de las señales relacionadas a dicha red, por ejemplo, la señalización, la protección y el restablecimiento de la capa WDM. Estas señales tienen una mayor prioridad respecto al tráfico ordinario. Existen unos esquemas de QoS, éstos están basados en la conmutación de paquetes, realizando un

almacenamiento intermedio y posteriormente una clasificación para lograr una diferenciación de servicios.

Pero como ya hemos mencionado anteriormente, no existen dispositivos de almacenamiento ópticos, la cual implica la dificultad de hacer dicha clasificación de los servicios.

A continuación se explicará como obtener una QoS en IP sobre WDM, teniendo en cuenta que en la capa WDM posibilita la circulación de una gran cantidad de tráfico a través de la red.

Para conseguir una QoS en la capa WDM se utilizarán esquemas basados en un tiempo extra de offset. Este tipo de esquemas sólo necesitan trabajar con niveles de prioridades. El ensamblado de la ráfaga se realiza en el borde de la red, concretamente en los nodos edge, donde múltiples paquetes IP son ensamblados dentro en una misma ráfaga basándose en dos parámetros: el destino y la QoS (puede ser basándose en la clase o en la prioridad). Así se conseguirá una gestión más simple y escalable de QoS en la capa WDM, mientras que en la capa IP es mucho más compleja por la necesidad de gran cantidad de buffers (entre otros recursos) para almacenar la información.

Hay dos tipos de congestión:

- ❖ El primero se produce cuando los recursos de la red son insuficientes para adecuar la carga ofrecida debido a un tráfico alto instantáneo.
- ❖ El segundo tipo de congestión se produce cuando los recursos de la red son ineficientemente utilizados debido a la distribución desequilibrada de tráfico.

La QoS basada en un tiempo extra de offset puede distribuir eficazmente el tráfico para solucionar el primer tipo de congestión. Cuando el tráfico es una mezcla de clases prioritarias, (estas clases van de 0 a  $(n - 1)$ ) el esquema basado en un tiempo de offset puede aislar diferentes clases, y como consecuencia las clases con una prioridad más alta obtendrán con más probabilidad el ancho de banda requerido, sin tener en cuenta la carga de las clases menos prioritarias. En otras palabras, el ancho de banda es asignado por un tiempo y se distribuye según una orden jerárquica, desde la clase prioritaria más alta, la clase  $(n - 1)$ , a la clase menos prioritaria, la clase 0. Así, aun cuando la congestión puede ir aumentando temporalmente, la clase prioritaria más alta tiene una probabilidad más baja de que la congestión le afecte. El segundo tipo de congestión puede ser el que se encarga de los algoritmos basados en restricciones de enrutamiento, que son el responsables de distribuir el tráfico equitativamente dentro de la red. El

esquema de QoS basado en un tiempo de offset es independiente de estos algoritmos, y por eso se puede ejecutar adecuadamente con cualquier algoritmo de enrutamiento.

### QoS basada en tiempos de offset

A continuación se comentará en qué consisten los esquemas de QoS basados en un tiempo de offset. En concreto, se explica cómo se pueden clasificar diferentes clases (o mediante la diferenciación de servicios) usando un tiempo de offset extra. Hay dos maneras de hacer esta clasificación en los conmutadores. Estas dos maneras son utilizando o no fibras de retardo (FDLs) en los conmutadores.

Se pueden distinguir dos maneras diferentes para reservar recursos (canales o longitudes de onda y FDLs): las colisiones entre clases causadas por las múltiples demandas formando parte de la misma clase, y las colisiones entre clases causadas por las múltiples demandas formando parte de diferentes clases. La explicación se centrará en cómo resolver colisiones entre clases usando un esquema de QoS basado en un tiempo de offset.

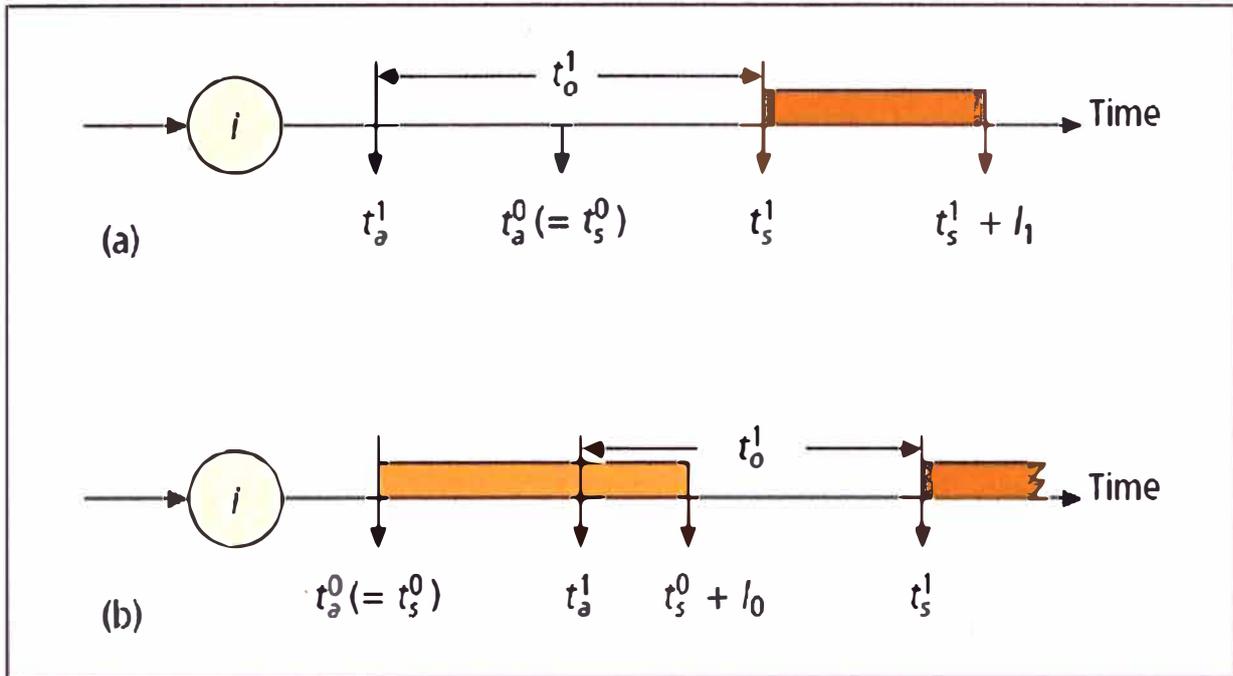
Para entender mejor esta explicación, se dará por supuesto que sólo hay dos clases de servicios, clase 0 y clase 1, donde la clase 1 tiene prioridad sobre la clase 0. Para darle a la clase 1 una mayor prioridad a la hora de reservar un recurso, en el esquema de QoS basado en un tiempo de offset hará falta un tiempo adicional de offset, llamado  $t_1$  o, para clasificar el tráfico de la clase 1.

Además, también se da por supuesto que el tiempo de offset base es insignificante comparado con el tiempo de offset adicional, por lo tanto nos referiremos al tiempo de offset adicional simplemente como tiempo de offset a partir de ahora. Finalmente, en los ejemplos posteriores se considerará que cada enlace solo tiene un canal de datos (en total en un enlace se tendrán dos canales, el de control y el de los datos).

#### Caso sin FDL's

(ver Fig. 4.9)

En este caso, en el que se proporciona una QoS sin FDL's,  $t_a^i$  y  $t_s^i$  son el tiempo de llegada y el tiempo en el que se empieza a servir una ráfaga de la clase  $i$  respectivamente, a la petición del recurso se le llamará  $req(i)$ , y  $l_i$  será el tamaño de la ráfaga, donde  $i$  se corresponde a las dos clases existentes,  $i = 0, 1$ .



**Fig. 4.9 QoS, caso sin presencia de FDLs (ref. (31))**

En la figura se muestra como al hacer una petición de canal por parte de la clase 1, se le asigna un tiempo de offset extra para obtener una prioridad mayor respecto a la clase 0. Se da por supuesto que no hay ninguna ráfaga en proceso mientras que llega la primera petición. Se considerarán dos situaciones donde son posibles las contenciones entre las dos clases de tráfico.

En la primera situación, caso (a), la petición de *req*(1), llega antes y reserva el canal usando DR (reserva retardada), y *req*(0) llega después. Se puede observar claramente que *req*(1) tendrá éxito, pero *req*(0) será bloqueada si  $t_a^0 < t_s^1$ , cuando  $t_a^0 + l_0 > t_s^1$  ó  $t_s^1 < t_a^0 < t_s^1 + l_1$ .

En el segundo caso (b), llega antes la petición *req*(0) y a continuación llega la petición *req*(1). Cuando  $t_a^1 < t_a^0 + l_0$  la petición *req*(1) podría ser bloqueada si no se le hubiera asignado ningún tiempo de offset (por ejemplo  $t_o^1 = 0$ ). Sin embargo, este bloqueo se podría evitar usando un tiempo de offset bastante grande como  $t_s^1 = t_a^1 + t_o^1 > t_a^0 + l_0$ .

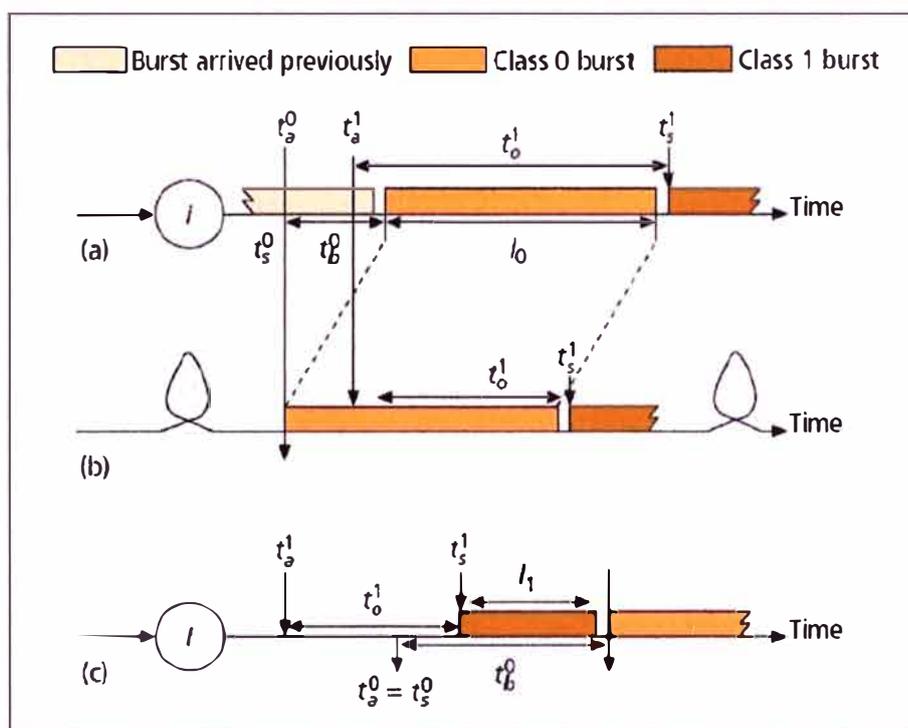
Dado que  $t_a^1$  solo puede estar ligeramente detrás de  $t_a^0$ ,  $t_o^1$  necesita ser mayor que el tamaño máximo de la ráfaga más grande de todas las ráfagas de la clase 0, de manera que *req*(1) se complete para evitar que sea bloqueada por *req*(0). Al aumentar el tiempo de offset, la probabilidad de bloqueo de la clase 1 irá en función de la carga ofrecida por

la clase 1 y es independiente de la carga ofrecida por la clase 0. Por otro lado, la probabilidad de bloqueo de la clase 0 va en función de la carga ofrecida por ambas clases.

#### Caso con FDL's

(ver Fig. 4.10)

Aunque los esquemas de QoS basados en un tiempo de offset no promueven el uso de fibras de retardo, la QoS puede verse significativamente mejorada con el uso limitado de FDL's para mejorar la contención entre múltiples ráfagas al querer reservar un ancho de banda. Para el caso con FDL's existe una variable que se le llamará  $B$  e indica el retardo máximo en una FDL (o la FDL más larga) que se puede tener. Así, en caso de bloqueo, una ráfaga puede ser retardada un tiempo máximo de  $B$  segundos.



**4.10 QoS caso con presencia de FDLs (ref. (31))**

En la figura, en la fila (a), se muestra el aislamiento de una clase en un conmutador en el que existen fibras de retardo donde puede ocurrir una colisión para la reserva del canal. Concretamente se asume que cuando llega  $req(0)$  en  $t_a^0 (=t_s^0)$ , el canal está ocupado por una ráfaga que ha llegado antes. Así, la ráfaga correspondiente a la petición  $req(0)$  ha de ser retardada (o bloqueada)  $t_b^0$  unidades. Si  $t_b^0 < B$ , la FDL será reservada para una ráfaga de clase 0 desde  $t_s^0$  a  $t_s^0 + l_0$ , como se muestra en la figura, fila (b) (la ráfaga

puede ser perdida si  $t_b^0$  excede de  $B$ ), y el canal se reservará desde  $t_s^0 + t_b^0$  a  $t_s^0 + t_b^0 + I_0$  como se muestra en la figura, fila (a). Ahora se da por supuesto que  $req(1)$  llega más tarde que  $t_a^1$  (donde  $t_a^1 > t_a^0$ ) y trata de reservar el canal para la correspondiente ráfaga de la clase 1.  $req(1)$  tendrá éxito en la reserva del canal si el tiempo de offset,  $t_o^1$ , es lo suficientemente grande como  $t_s^1 = t_a^1 + t_o^1 > t_a^0 + t_b^0 + I_0$ . Se observa que si hubiera llegado la petición  $req(1)$  antes  $req(0)$  como se muestra en la figura, fila (c), la petición  $req(1)$  tendrá éxito en la reserva del canal desde  $t_s^1$  hasta  $t_s^1 + I_1$  usando una reserva retardada, pero  $req(0)$  no tendrá éxito y por tanto se perdería. Esto muestra que la clase 1 puede ser aislada desde la clase 0 al reservar el canal por el tiempo de offset.

De manera similar, en la figura, fila (b), se muestra el aislamiento de clases en la reserva de FDL. Se asume que  $req(0)$  ha reservado la FDL como se ha comentado anteriormente, y además, porque  $t_o^1$  no es lo suficientemente grande,  $req(1)$  será bloqueada para la reserva del canal, y necesitará reservar una FDL para la correspondiente ráfaga de la clase 1, para que no se pierda.

En este caso,  $req(1)$  tendrá éxito en la reserva de la FDL si el tiempo de offset es todavía lo suficientemente grande para tener  $t_s^1 = t_a^1 + t_o^1 > t_a^0 + I_0$ . Esto es así porque el inicio de la ráfaga de la clase 1 podrá entrar en la FDL después que la cola de la ráfaga de clase 0 haya entrado. Por otro lado, si  $t_s^1 < t_a^0 + I_0$ ,  $req(1)$  no podrá tener éxito la ráfaga de la clase 1 y será descartada. Si  $req(1)$  llega antes, ésta podrá reservar la FDL, pero entonces  $req(0)$  será bloqueada y posteriormente perdida.

Lo explicado anteriormente implica que la clase 1 puede ser aislada de la clase 0, y puede reservar ambos recursos, el canal y la FDL, utilizando un tiempo de offset apropiado, lo cual da a la clase 1 una mayor prioridad respecto a la clase 0. Como consecuencia, se logra asignar todos los recursos a la clase 1 cuando esta lo necesita, por ejemplo cuando ocurre una congestión. Por otro lado, al tener una prioridad baja en la reserva de recursos, las ráfagas de la clase 0 tienen una alta probabilidad de bloqueo y pérdida.

## CONCLUSIONES

1. Gracias a las nuevas tecnologías de transmisión óptica de la información, la barrera de extensión geográfica en la implementación de este tipo de redes ha sido ampliamente superado (de conexiones LAN hacia conexiones WAN a través de servicio portador).
2. Se puede observar como se ha logrado optimizar el uso de la capacidad de transferencia de una fibra óptica mediante el uso de *WDM*, multiplicando su capacidad inicial de 100Mbps (FDDI), hasta 1.5Tbps (160 longitudes de onda como portadoras multiplexadas, con 10Gbps de capacidad de transferencia en cada una de estas portadoras)
3. Se puede observar cómo también se ha logrado “democratizar” el flujo de data a través de las redes de transferencia ópticas, siendo hoy posible transferir cualquier señal ó data, desde cualquier origen, en cualquier formato y de cualquier naturaleza (ej. síncrona ó asíncrona), y hacia cualquier destino.
4. La implementación de redes conmutadas puramente ópticas es ahora ya una realidad palpable, gracias a que la brecha tecnológica esta siendo superada con el uso de nuevas tecnologías en los elementos y materiales usados en la fabricación de switches (ó conmutadores) ópticos.
5. La implementación de estrategias de operación, planificación de uso del ancho de banda y de resolución de contenciones están haciendo posible en la práctica la versatilidad de la red óptica, optimizando el uso de recursos de la misma.

## BIBLIOGRAFÍA

### Libros:

- (1) Harry J. R. Dutton, "Understanding Optical Communications", IBM International Technical Support Organization, 1998.
- (2) Ashwin Gurnaste-Tony Antony, "DWDM Network Designs and Engineering Solutions", Cisco Press, 2002.
- (3) John Powers, "An introduction to fiber optic systems-2º edition", McGraw-Hill, 1986.
- (4) Casimer DeCusatis, "Handbook of Fiber Optic data communication-2º edition", Academic Press, 2002.

### Monografías:

- (5) Hengstler-Uebbing-McGuire, "Laser-Activated optical bubble switch element", Agilent Technologies, Inc., 2002.
- (6) Gallo-Booth-Schuetz-Furmanak, "Polymer Waveguide Components for switched WDM Cross-connects", Optical Crosslink, Inc.
- (7) Michael Connelly, "Semiconductor Optical Amplifiers and their applications", University of Limerick, Ireland.
- (8) Levy-Campbell-Groisman-Pang-Mookherjea, "Microfluidics for optical switching", Universidad de California, EEUU, 2005.
- (9) Alistair Poustie, "Semiconductor Optical Amplifiers Ligth Up All-Optical Signal Processing", CIP Ltd.
- (10) Simarjeet Singh, "Linear Regime Operation of Semiconductor Optical Amplifiers (SOA)", COVEGA
- (11) L. Lefèvre, "Storage Area Network (SAN)".
- (12) Arshad Chowdhury, "Optical Label Switching Technologies for Optical Packet switched Networks", Georgia Institute of Technology, 2006
- (13) Guylain Barlow, "A G.709 Optical Transport Network Tutorial", Innocor Ltd.
- (14) S. J. Ben Yoo, "Optical-label switching, MPLS, MPLambdaS, and GMPLS", University of California, USA, 2003.
- (15) Jugnu J. Ojha, "OIF Very Short Reach (VSR) Interface Implementation Agreements", Optical Internetworking Forum-Caspian Networks.
- (16) David Payne, "The All Optical Network-Why we need it- how and when get it", ITP, 2007
- (17) Rick Talbot, "The emerging Optical Network", CIENA Corporation.

- (18) Maarten Vissers, "Transport Ethernet Interfaces – 1.5Mbps to 10Tbps", Alcatel, 2006.
- (19) Bernstein-Rajagopalan-Spears, "OIF UNI 1.0 – Controlling Optical Networks", Optical Internetworking Forum.
- (20) Clemente-Ferraris, "Automatics Switched Optical Networks: functionality and architectural components", 2<sup>o</sup> WDM Hungarian Workshop, Budapest, 2001
- (21) Pedrotti-Dahlgren, "Survey of short-reach Optical Interconnect", University of California, 2005.
- (22) "Extreme Networks 10 Gigabit Ethernet Primer", Extreme Networks, 2003.
- (23) "Redes Ópticas-Tema 5: Control de Redes Ópticas", Universidad Politécnica de Valencia, 2004
- (24) Geary-Antonopoulos-O'Reilly, "Analysis of the potential benefits of OXC-based intelligent optical networks", Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers and Kluwer Academic Publishers, 2002.
- (25) Erick-Jan Bos, "SURFnet6, the hybrid optical and packet switching network in The Netherlands", Viola Workshop, Germany, 2005.
- (26) Chunming Qiao, "Optical Burst Switching (OBS) for IP/WDM Integration", University at Buffalo, 2004.
- (27) Harry Perros, "Optical Burst Switching: Current status, problems, new solutions", NC State University, USA, 2007
- (28) Chunming Qiao-Myungsik Yoo, "Optical Burst Switching (OBS) – A new paradigm for an Optical Internet", University at Buffalo.
- (29) Dan Stevenson, "Just in Time an OBS in a Nutshell", MCNC Research & Development Institute.
- (30) Aldwairi-Guled-Cassada-Pratt-Stevenson-Franzon, "Switch architecture for optical burst switching networks", NC State University, USA.
- (31) María Engracia Guillamón Bagán, "Diseño de protocolos sobre redes ópticas de conmutación de ráfagas", Universidad Politecnica de Catalunya, España, 2005.
- (32) Düser-de Miguel- Bayvel, "Timescale analysis for wavelength-routed optical burst-switched (WR-OBS) networks", Optical Society of America, 2002.
- (33) "Introductory Lecture on Photonic Networks", NUST Institute of Information Technology (NIIT).
- (34) "OADMs Architectures", NUST Institute of Information Technology (NIIT).
- (35) "OXCs", NUST Institute of Information Technology (NIIT).
- (36) "All optical OXCs configurations", NUST Institute of Information Technology (NIIT).
- (37) "WDM Network Elements", NUST Institute of Information Technology (NIIT).
- (38) "Reconfigurable OADMs", NUST Institute of Information Technology (NIIT).
- (39) Düser-Kozlovski-Killey-Bayvel, "Design trade-offs in optical burst switched networks with dynamic wavelength allocation", University College, UK.
- (40) Sirén-Hyytiä, "Delay line configurations in Optical burst switching with JET Protocol", 2002.
- (41) Peter Steenkiste, "Lecture 7 – Circuit-Switching Networks", Carnegie Mellon University, USA.
- (42) Pablo Basanta Val, "Conmutación Óptica", Universidad Carlos III, España.
- (43) Philip Bell, "WhitePaper 1160 - Fiber Selection Guide for Premises Networks", Corning, 2007

- (44) "Formación de rafagas para OBS", Universidad de Navarra, España
- (45) Roland Lenz, "Introduction to all optical switching technologies", 2003