

# Topologías de redes de fibra óptica y gestión de fallos

Josep Maria Fàbrega  
Simó Graells

PID\_00206967



# Índice

<b>1. Redes en anillo y estrella. Direccionamiento y WDM.</b>	
<b>Gestión de fallos</b> .....	5
1.1. Redes en bus y en estrella .....	5
1.1.1. Topología en bus .....	5
1.1.2. Topología en estrella .....	6
1.2. Redes en anillo .....	7
1.3. La capa óptica y la topología virtual .....	11
1.4. Nodos de red .....	12
1.5. Gestión de fallos .....	14
1.5.1. Gestión de fallos en redes punto a punto .....	14
1.5.2. Gestión de fallos en redes genéricas .....	15
1.5.3. Gestión de fallos en redes en anillo .....	17
1.6. Ejemplos de asignación de longitudes de onda en redes en anillo .....	20
1.6.1. Ejemplo I .....	20
1.6.2. Ejemplo II .....	23
<b>2. Topologías de fibra hasta el hogar (FTTH)</b> .....	25
2.1. Punto a punto .....	27
2.2. Punto a multipunto: redes ópticas pasivas .....	29
2.2.1. Estándares desplegados: gigabit PON y gigabit Ethernet PON .....	30
2.2.2. Estándares en despliegue: 10G-EPON y XG-PON .....	32
<b>Bibliografía</b> .....	37



# 1. Redes en anillo y estrella. Direccionamiento y WDM. Gestión de fallos

## 1.1. Redes en bus y en estrella

En este apartado, estudiaremos las redes *broadcast and select*. Este tipo de red envía la señal recibida de cada nodo hacia todos los nodos, por lo que no hay ninguna función de direccionamiento. Las dos topologías que se utilizan en la construcción de las redes *broadcast and select* son la topología en bus y la topología en estrella.

### 1.1.1. Topología en bus

La topología en bus se estructura en un conjunto de nodos que están conectados entre sí mediante un bus, tal y como indica la figura siguiente:

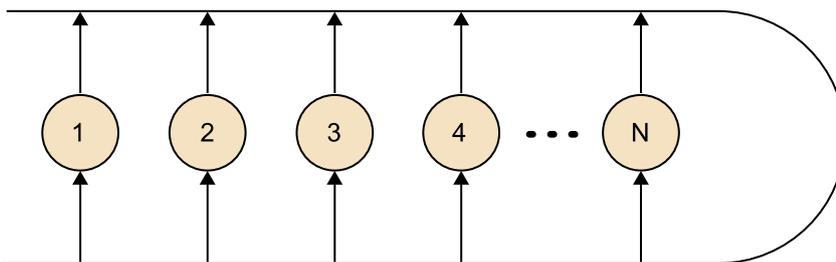


Figura 1. Esquema de una topología en bus cerrado

Los elementos que interconectan cada nodo con el bus son los acopladores, y pueden tener las configuraciones siguientes.

- Si conecta el transmisor del nodo con el bus, tendrá la configuración:

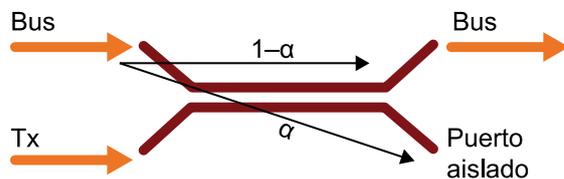


Figura 2. Acoplador de interconexión transmisor-bus

- Si conecta el bus con el receptor del nodo, tendrá la configuración:

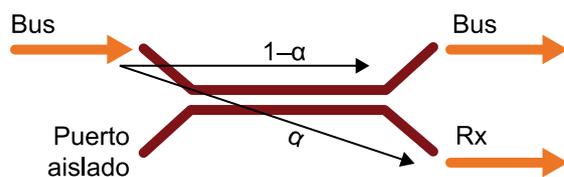


Figura 3. Acoplador de interconexión bus-receptor

En los dos casos,  $\alpha$  es la razón de acoplamiento.

Suponiendo que todos los acopladores son idénticos, es importante encontrar la razón de acoplamiento óptima que minimiza las pérdidas en el peor caso.

El peor caso desde el punto de vista de pérdidas se produce cuando se transmite del nodo 1 al nodo 2. En este caso, las pérdidas son:

$$L_{m\acute{a}x} = \alpha^2(1 - \alpha)^{2n-3} \gamma^{2n-1} \quad (1)$$

Si derivamos la ecuación anterior respecto de la razón de acoplamiento y la igualamos a cero, encontraremos la razón de acoplamiento óptima que minimiza las pérdidas en el peor caso.

$$\frac{dL_{m\acute{a}x}}{d\alpha} = 2\alpha(1 - \alpha)^{2n-3} \gamma^{2n-1} + (-1)\alpha^2(2n - 3)(1 - \alpha)^{2n-4} \gamma^{2n-1} = 0 \quad (2)$$

$$2 - 2\alpha - 2\alpha n + 3\alpha = 0 \quad (3)$$

$$2 - 2\alpha n + \alpha = 0 \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2}{2n - 1} \quad (5)$$

**Lectura de la fórmula (1)**

$\alpha^2$ : pérdidas debidas a la entrada al bus desde el nodo 1 y la salida del bus hacia el nodo 2.  
 $(1 - \alpha)^{2n-3}$ : pérdidas debidas a los acopladores que nos encontramos al avanzar por el bus.  
 $\gamma^{2n-1}$ : pérdidas en exceso.

**1.1.2. Topología en estrella**

En la topología en estrella, disponemos de un conjunto de nodos conectados entre sí mediante un acoplador en estrella, tal y como indica la figura:

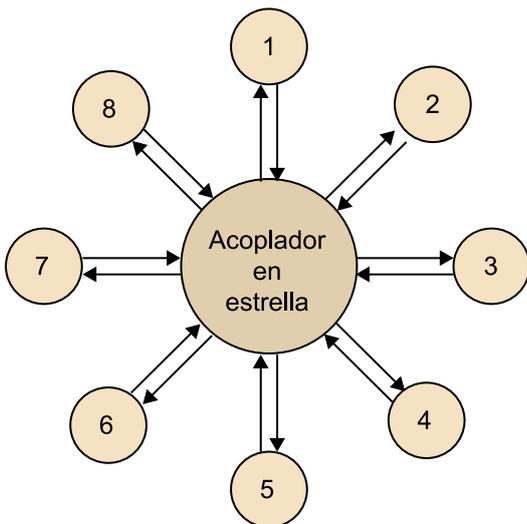


Figura 4. Esquema de una red en estrella

El acoplador en estrella se puede construir a partir de acopladores 2x2 de 3 dB.

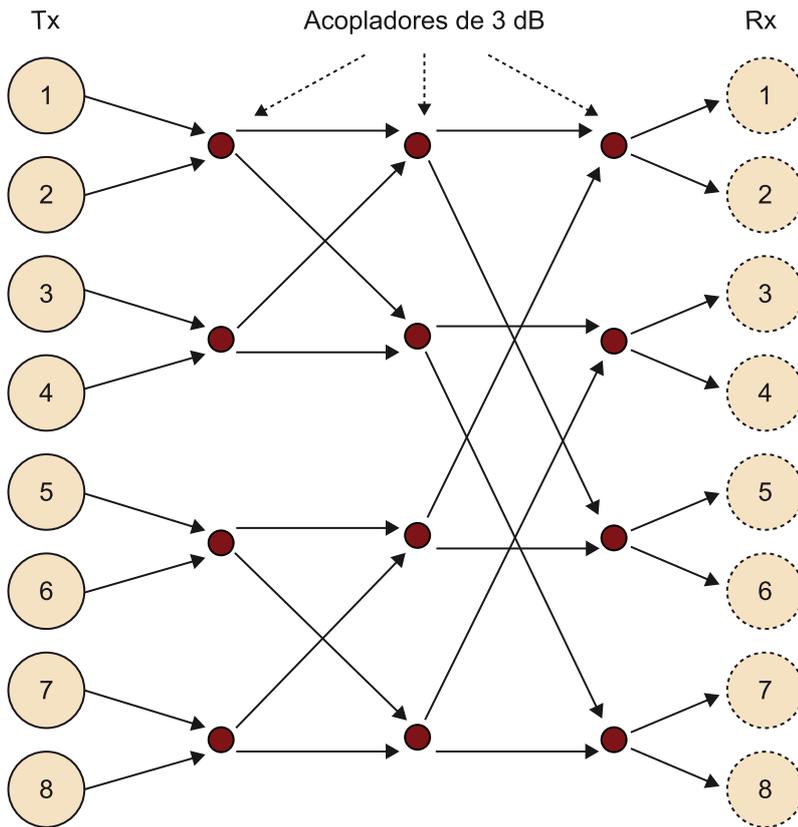


Figura 5. Esquema interno de un acoplador en estrella

La señal pasará siempre por un número fijo de acopladores, que corresponde a  $\log_2 n$  (donde  $n$  es el número de nodos). Establecemos  $\alpha = \frac{1}{2}$ , de modo que todas las salidas reciban la misma fracción  $\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{\log_2 n}$  de potencia de cada entrada.

## 1.2. Redes en anillo

La topología en anillo es una de las más utilizadas en las redes de comunicaciones ópticas. En esta topología, habitualmente se utiliza WDM de segunda generación, lo que proporciona una funcionalidad más compleja que las redes de *broadcast and select*. Básicamente, se lleva a cabo direccionamiento y conmutación de las portadoras en función de su longitud de onda.

El diseño de una red en anillo WDM consistirá en hacer una asignación de longitudes de onda que sea óptima. Para hacer esta asignación, partiremos de la tabla que indica cuál es la demanda de tráfico entre nodos.

Veremos el proceso de diseño resolviendo un ejemplo de diseño de una red en anillo de cuatro nodos (A,B, C y D), así como la asignación de longitudes de onda.

Supongamos un patrón de tráfico como el siguiente:

### Referencia bibliográfica

R. Ramaswami; K. N. Sivarajan; G. H. Sasaki (2008). *Optical Networks: A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann.

Tabla 1. Demanda de tráfico

	A	B	C	D
A	-	1	2	1
B	1	-	2	1
C	2	2	-	2
D	1	1	2	-

Los valores de tráfico especificados en la tabla son valores de tráfico normalizados a la capacidad de una portadora.

Observemos que esta matriz de tráfico es propia de un tráfico simétrico, es decir, que el tráfico entre dos nodos es el mismo entre el primero y el segundo que entre el segundo y el primero.

Esto hace que el diseño se simplifique, puesto que solo hay que resolver el tráfico por una parte de la matriz, es decir, por la mitad de los enlaces. Este diseño es independiente del sentido en el que irá la portadora dentro del anillo (horario o antihorario). Una portadora que siga el sentido horario para enlazar dos nodos tendrá otra portadora asociada que irá en sentido contrario y a la misma longitud de onda, puesto que, para esta tabla de tráfico, los enlaces son bidireccionales y con un tráfico simétrico.

A partir de la tabla con la demanda de tráfico, rellenamos una tabla con cada uno de los enlaces, el tráfico del enlace y la asignación de longitudes de onda.

Tabla 2. Asignación de longitudes de onda

Enlace	Tráfico	Portadoras	Saltos	Tráfico red
AB	1	$\lambda_1$	1	1
BC	2	$\lambda_1\lambda_2$	1	2
CD	2	$\lambda_1\lambda_2$	1	2
AD	1	$\lambda_1$	1	1
BD	1	$\lambda_2$	2	2
AC	2	$\lambda_3$	2	4

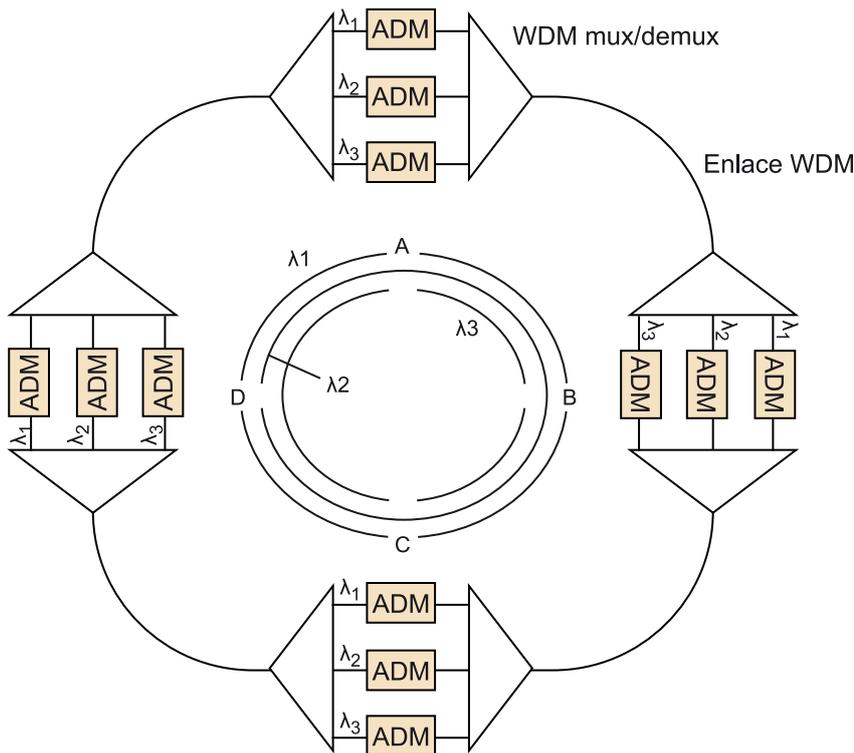


Figura 6. Esquema de la red en anillo

Tres longitudes de onda son suficientes para soportar el patrón de tráfico propuesto (sin considerar ningún requerimiento de protección). Observemos la tabla de asignación de longitud de onda. Añadimos información de los saltos entre nodos que haremos en cada enlace y la columna del tráfico que aporta el enlace al conjunto de la red (multiplicamos el tráfico por el número de saltos). Sumando los elementos de la columna del tráfico que se aporta en la red ( $1 + 2 + 2 + 1 + 2 + 4 = 12$ ), y dividiendo por el número de tramos de fibra que tiene el anillo, obtenemos el número de longitudes de onda ( $12/4 = 3$ ).

Cada nodo requiere tres ADM, pero no se utilizan todos; en algunos nodos, el tráfico de determinadas longitudes de onda pasará sin ser modificado. Por ejemplo, en el caso del nodo A todo el tráfico de longitud de onda  $\lambda_2$  pasará sin ser alterado.

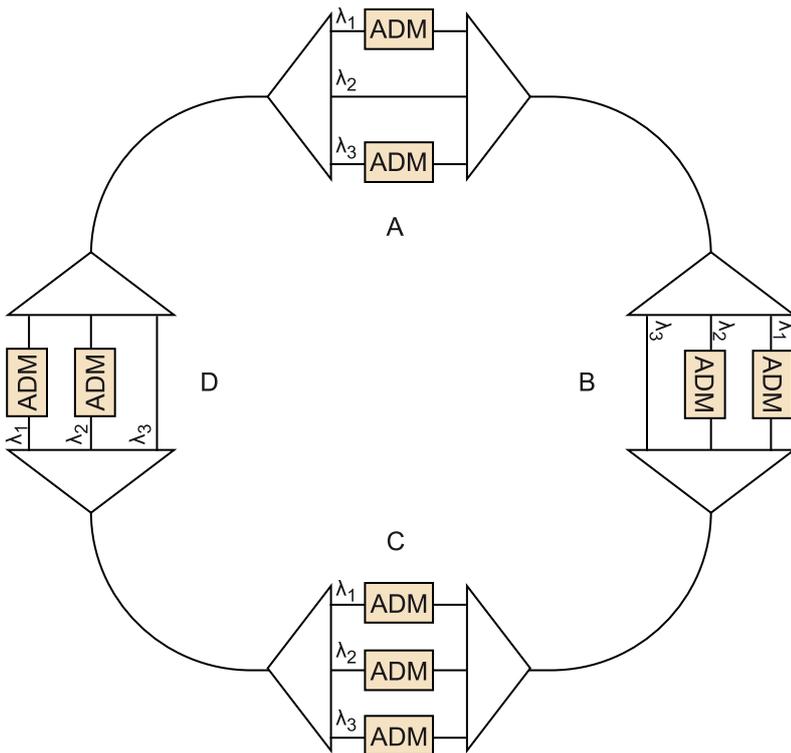


Figura 7. Esquema de la red en anillo sin los ADM innecesarios

Desde el punto de vista de la capa de enlace de la torre OSI, las tres portadoras se sustituyen por enlaces físicos que interconectan los ADM. Esta topología se conoce como topología virtual de una red.

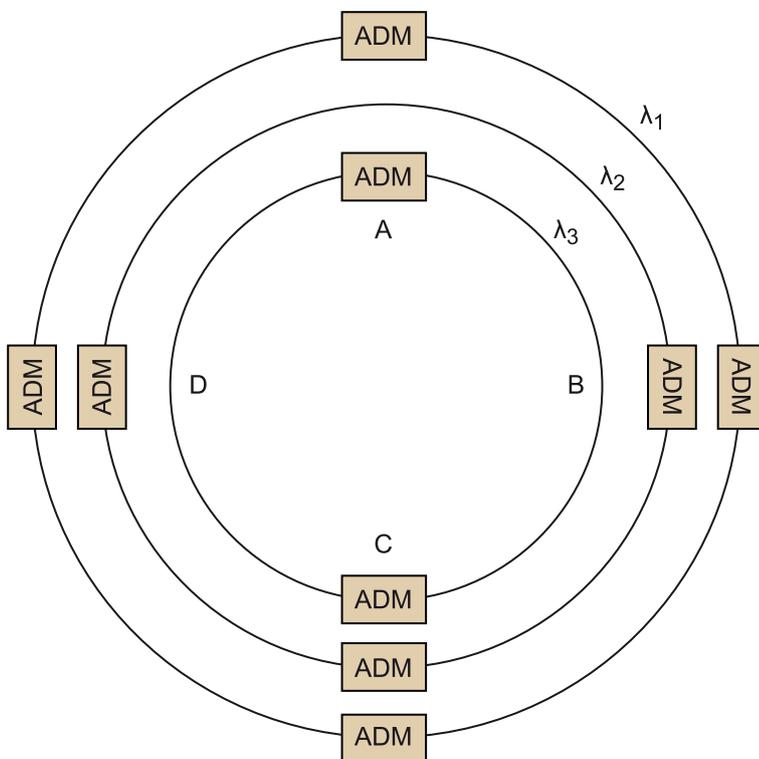


Figura 8. Topología virtual de la red en anillo

### 1.3. La capa óptica y la topología virtual

La topología de una red por direccionamiento de longitud de onda es un conjunto de nodos WXC (*wavelength crossconnect*) unidos entre sí con enlaces de fibra óptica, de modo que forman una malla arbitraria. La red provee *lightpaths* entre pares de nodos de red.

Cada *lightpath* tiene asignada una longitud de onda y constituye un enlace entre nodos. Por lo tanto, se puede separar entre la topología física que está determinada por unos enlaces de fibra óptica entre nodos (capa física) y la topología virtual (capa óptica) que está determinada por unos enlaces formados por los *lightpaths* entre nodos.

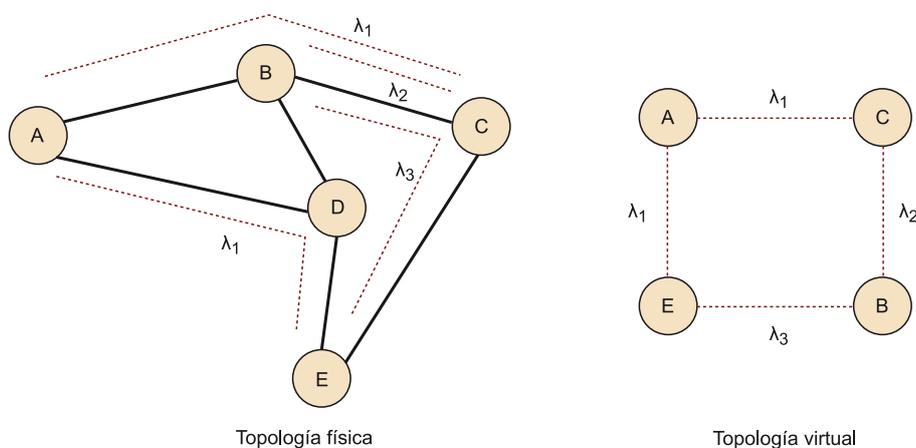


Figura 9. Ejemplo de topología física y de topología virtual de una misma red

Las principales características de una topología virtual son las siguientes.

- **Transparencia:** los nodos están formados de manera mayoritaria por componentes ópticos. Al trabajar en dominio óptico, no tienen dependencia con la modulación o la velocidad empleada en el *lightpath*.
- **Reutilización de longitudes de onda:** estas se pueden reutilizar en otras partes de la red. El número de *lightpaths* puede ser mucho mayor que las longitudes de onda del sistema WDM.
- **Fiabilidad:** es posible configurar la red de modo que en caso de fallo, los *lightpaths* sean reencaminados por rutas alternativas. Además, muchos componentes ópticos utilizados ya son de por sí componentes con una alta fiabilidad.
- **Topología virtual:** es el esquema que consiste en los nodos de red y los *lightpaths* que se establecen entre sí.
- **Conmutación de circuitos:** los *lightpaths* pueden ser establecidos y destruidos según demanda.

#### Nota

Un *lightpath* es una conexión de gran ancho de banda que soporta velocidades de gigabits por segundo.

## 1.4. Nodos de red

El elemento principal de un nodo de una red es el *WXC* (*wavelength crossconnect*). Este elemento permite configurar la ruta de los *lightpaths*. Su diagrama de bloques es el siguiente:

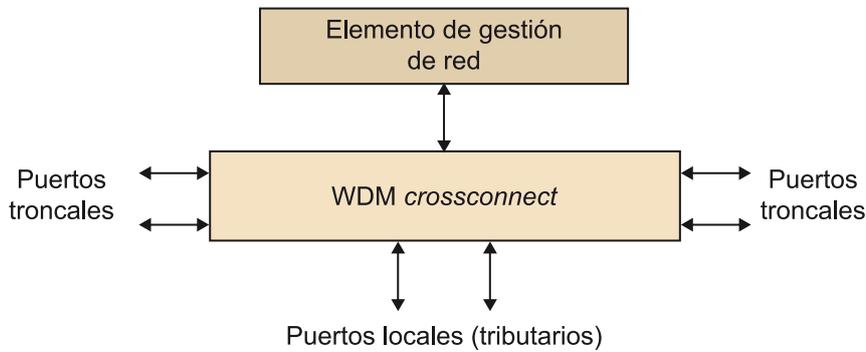


Figura 10. Diagrama de bloques de un nodo de red

Los elementos de WXC son los siguientes.

- **Puertos troncales:** puertos que conectan los nodos con los otros nodos de la red.
- **Puertos locales:** conectan el *crossconnect* a la fuente o al destino de tráfico. Los *lightpaths* empiezan y acaban en los puertos locales, que pueden ser ópticos o eléctricos.
- **Elemento de gestión de red:** parte que se encarga de controlar y gestionar el funcionamiento del nodo y la interconexión entre nodos o red.

Los componentes ópticos que se utilizan para implementar estos nodos son:

- Multiplexores y demultiplexores.
- Conmutadores.
- Convertidores de longitud de onda.

La imagen siguiente nos muestra el esquema de un *crossconnect* óptico (OXC) sin conversión de longitud de onda. La implementación se lleva a cabo mediante multiplexores, demultiplexores y conmutadores.

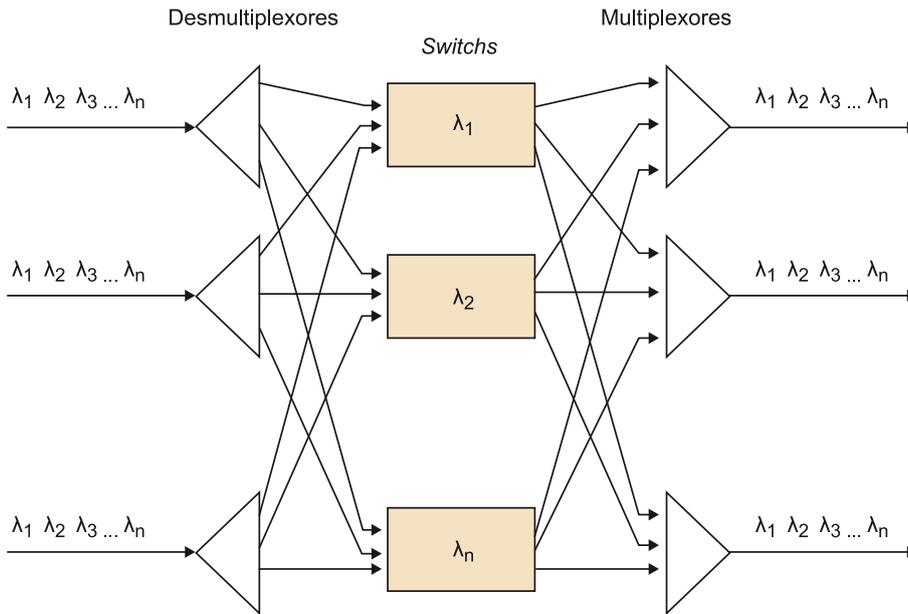


Figura 11. Crossconnect óptico (OXC) sin conversión de longitud de onda

El esquema del mismo dispositivo óptico pero con capacidad de conversión de longitud de onda –es decir, un WXC– es el siguiente:

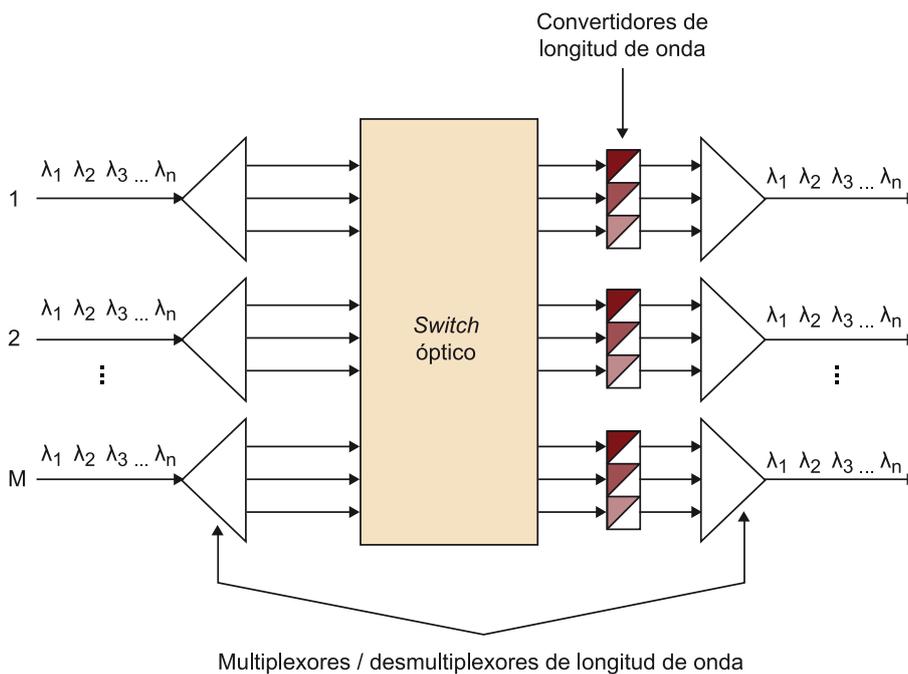


Figura 12. Crossconnect con capacidad para conversión de longitud de onda

En los WXC electrónicos es más fácil la conversión de longitud de onda, puesto que solo hay que convertir la información eléctrica en óptica mediante un láser a la longitud de onda que nos interese. En la figura siguiente, encontramos el esquema de un WXC electrónico.

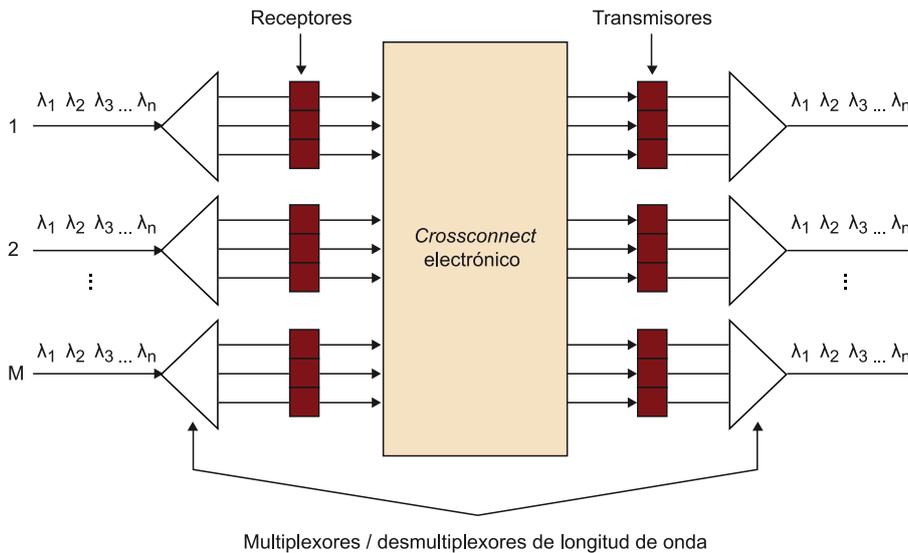


Figura 13. Crossconnect electrónico

Hay que tener en cuenta que en redes y enlaces de alta velocidad, los *crossconnects* deben ser ópticos.

## 1.5. Gestión de fallos

### 1.5.1. Gestión de fallos en redes punto a punto

En este apartado, estudiaremos las estrategias de protección frente a fallos de las redes punto a punto. Estas estrategias son las siguientes.

- **Protección 1+1:** el sistema de protección 1+1 implementa el enlace mediante dos fibras. A la salida del transmisor, se sitúa un divisor de potencia para enviar la información de manera simultánea por las dos fibras. En el receptor, se sitúa un conmutador que elige una de las dos fibras. En caso de que la fibra de trabajo sufra un fallo, el receptor conmuta hacia la fibra de protección.

Hay que notar que el sistema es rápido, puesto que el receptor no ha de informar al emisor del fallo. El principal problema de este sistema es que tenemos 3 dB de pérdidas en el divisor del emisor.

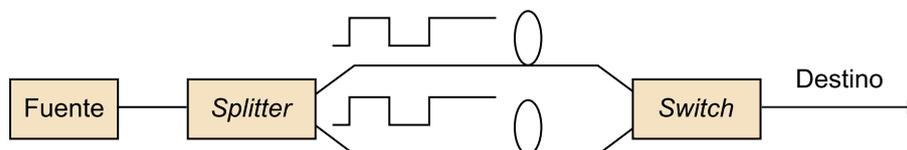


Figura 14. Esquema de protección 1+1

- **Protección 1:1:** el sistema de protección 1:1 implementa el enlace con una fibra de protección y una fibra de trabajo. A la salida del transmisor, se sitúa un conmutador que selecciona la fibra de trabajo en operación normal. En el receptor, se sitúa un conmutador que elige la fibra de trabajo. En caso de que la fibra de trabajo sufra un fallo, el receptor conmuta hacia la fibra de protección. Cuando esto ocurre, el receptor tiene que avisar al

#### Nota

La protección 1:1 permite utilizar la fibra de protección para enviar información de baja prioridad si el sistema funciona correctamente.

emisor para que también conmute hacia la fibra de trabajo. Esto se hace mediante el protocolo APS (*automatic protection switching*). Este sistema no es tan rápido como el 1+1, pero aprovechamos mejor la potencia de la fuente al no tener un divisor en el emisor.



Figura 15. Esquema de protección 1:1

- **Protección 1:N:** el sistema 1:N es muy similar al sistema 1:1. El funcionamiento es exactamente el mismo, con la excepción de que utilizamos una fibra de protección para varias fibras de trabajo.

**Nota**  
El sistema 1:N reduce costes de fibra frente al sistema 1:1, pero solo puede restaurar la información de una sola fibra.

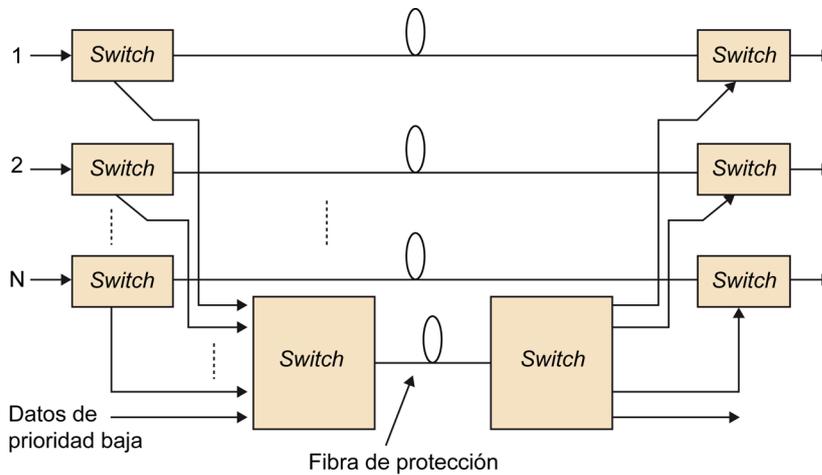


Figura 16. Esquema de protección 1:N

### 1.5.2. Gestión de fallos en redes genéricas

En este apartado, veremos las estrategias de protección ante fallos de las redes genéricas.

En el ejemplo siguiente, en operación normal la red une los nodos A y C siguiendo el camino ABC.

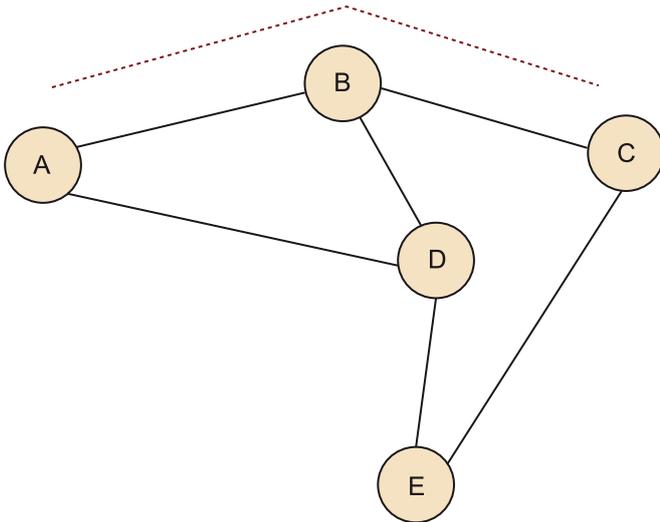


Figura 17. Esquema de red mallada con comunicación entre nodos A y C

En una red genérica (supongamos una red mallada con varios nodos), podemos implementar las protecciones siguientes.

- **Path switching:** en caso de fallo de algún enlace, tenemos que buscar un nuevo enlace o una ruta alternativa. En este tipo de protección, el nodo origen de la información busca la ruta alternativa para enviar el tráfico hacia el nodo destino.

Hay que notar que si falla uno de los enlaces de la red, todos los nodos tienen que saber que el enlace ha fallado, puesto que cualquier nodo puede transmitir información. Por lo tanto, en caso de fallo hay que notificarlo al resto de los nodos.

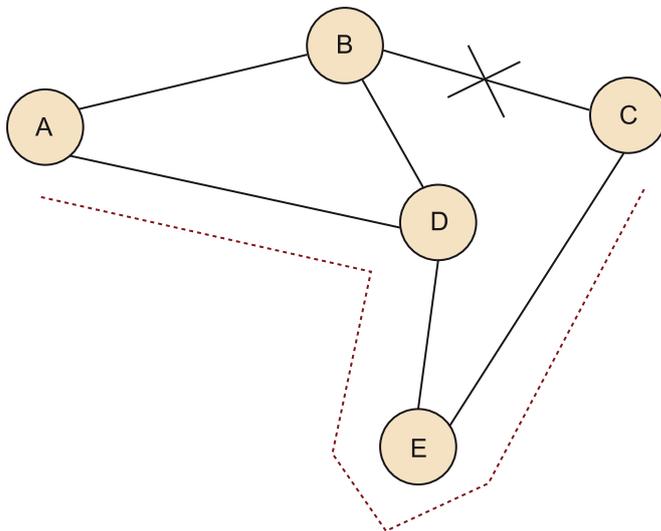
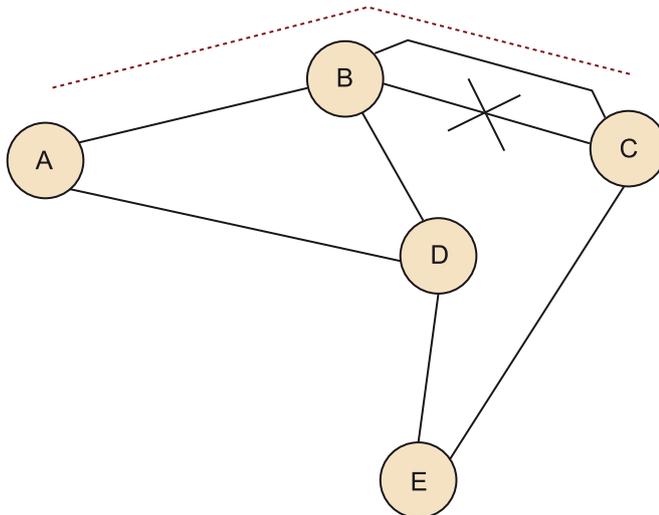
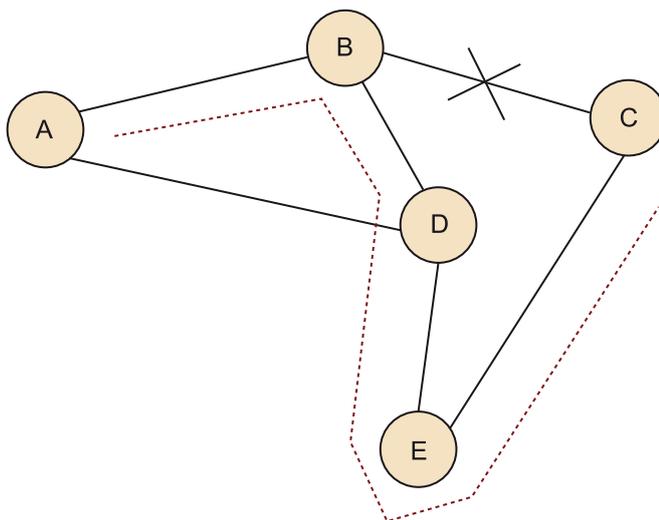


Figura 18. Esquema de red mallada con *path switching*

- **Line switching:** a diferencia de la protección *path switching*, los nodos extremos al fallo son los encargados de restaurar la ruta. Podemos encontrar dos tipos de protección *line switching*.
  - **Span protection:** el tráfico se direcciona por una fibra de protección que tenga el enlace (podéis ver protecciones en enlaces punto a punto).

Figura 19. Esquema de red mallada con *span protection*

- **Path protection:** el tráfico se direcciona por un camino alternativo hasta llegar al otro nodo extremo al fallo, y de aquí continúa hasta el nodo destino.

Figura 20. Esquema de red mallada con *path protection*

### 1.5.3. Gestión de fallos en redes en anillo

Las redes en anillo son las redes más utilizadas en comunicaciones ópticas. En este tipo de redes, tenemos diferentes estrategias de protección según si el anillo es unidireccional o bidireccional. Las más conocidas son las siguientes.

- **UPSR (*unidirectional path switching ring*):** se trata de un anillo con dos fibras. Una fibra transmite la información en sentido horario, y la otra lo hace en sentido antihorario. El receptor recibe la información por las dos fibras y elige aquella mediante la cual la información le llega con más potencia.

#### Nota

El funcionamiento del UPSR es similar al 1+1 que se utiliza en enlaces punto a punto.

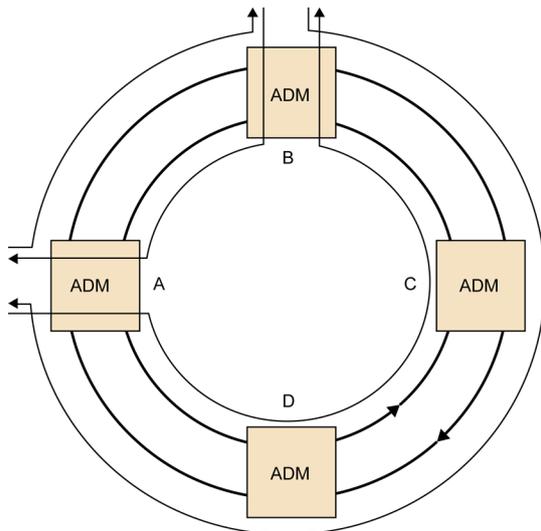


Figura 21. Esquema de red en anillo UPSR

- **BLSR/4 (bidirectional line switching ring / 4 fibers)**: se utilizan cuatro fibras para unir los nodos del anillo. Dos fibras están destinadas a trabajo (una para cada sentido, puesto que el enlace es bidireccional), y las otras dos, a protección (también una para cada sentido).

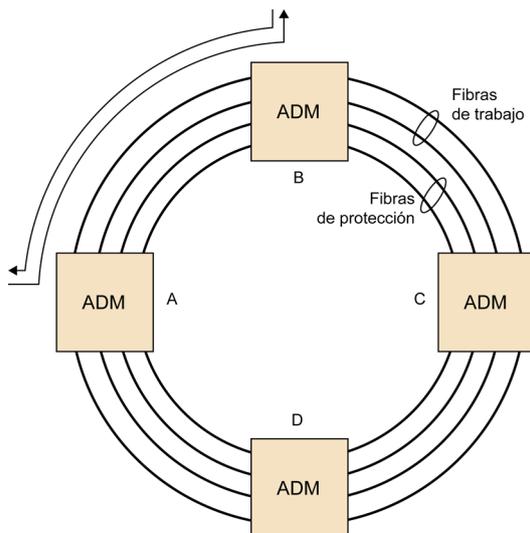


Figura 22. Esquema de red en anillo BLSR/4

En este sistema, basado en *line switching*, se pueden utilizar dos tipos de protecciones.

- **Span protection**: si se rompe una o las dos fibras de trabajo, se hace pasar la información por las fibras de protección.

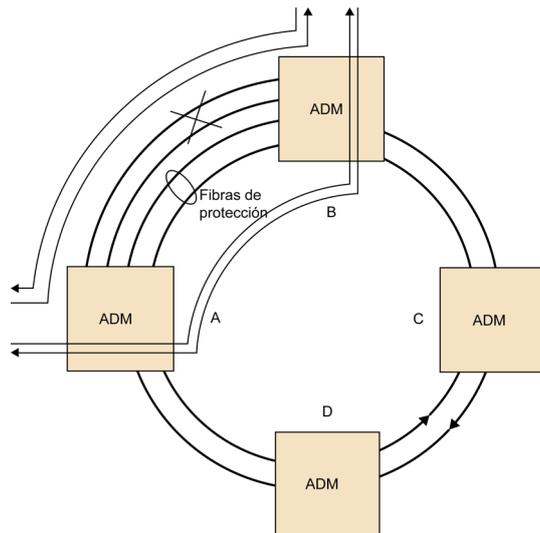


Figura 23. Esquema de red en anillo BLSR/4 con *span protection*

- **Line protection:** si se rompen las fibras de trabajo y las fibras de protección, se restaura el anillo mediante las fibras de protección del resto del anillo.

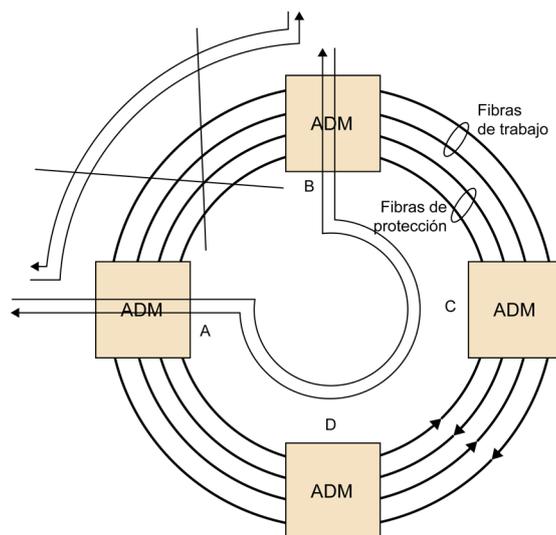


Figura 24. Esquema de red en anillo BLSR/4 con *line protection*

- **BLSR/2 (bidirectional line switching ring / 2 fibers):** se utilizan dos fibras para unir los nodos del anillo. Las dos fibras están destinadas a trabajo (una para cada sentido, puesto que el enlace es bidireccional) y también a protección. Lógicamente, si las dos fibras son de trabajo y de protección, se tiene que dimensionar su capacidad para que pueda direccionar el tráfico en caso de fallo. Por este motivo, cada fibra se dimensiona el doble de la capacidad del enlace.

En caso de fallo, esta configuración solo permite *line protection*. Si falla un enlace, se restaura el anillo mediante las dos fibras del resto del anillo.

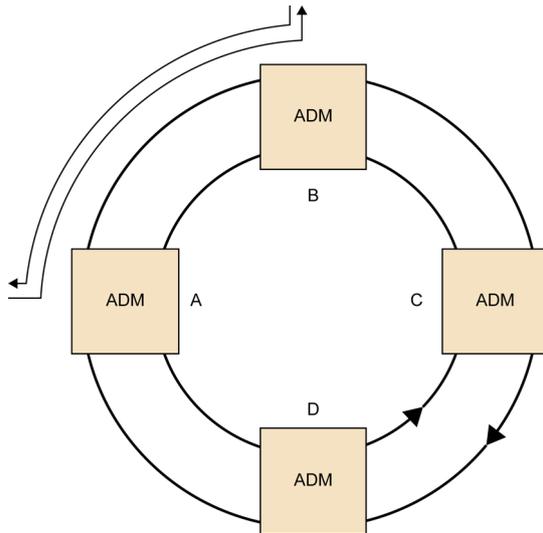


Figura 25. Esquema de red en anillo BLSR/2.

## 1.6. Ejemplos de asignación de longitudes de onda en redes en anillo

### 1.6.1. Ejemplo I

Disponemos de una estructura de red de fibra óptica en anillo con cuatro nodos que implementa un sistema de protección BLSR/4. La tabla de tráfico de datos normalizada es la siguiente:

Tabla 3. Demanda de tráfico

	A	B	C	D
A	-	1	2	1
B	1	-	2	1
C	2	1	-	2
D	2	1	2	-

Haced una asignación óptima de longitudes de onda entre nodos. ¿Es factible eliminar *add drop multiplexers* (ADM) dentro de los nodos? ¿Cuáles eliminaríais?

Si nos fijamos en la matriz de tráfico veremos que se trata de tráfico bidireccional, pero no es totalmente simétrico. Por ejemplo, observamos que el tráfico del nodo C al nodo B es de 1 y, en cambio, el tráfico del nodo B al nodo C vale 2. Esto mismo también sucede en el enlace del nodo D al nodo A, y del nodo A al nodo D.

No podremos resolver el problema solo para una parte de la matriz, sino para la matriz entera. Además, al no ser un tráfico simétrico, haremos una asignación de longitudes de onda por el anillo en sentido horario y otra por el sentido antihorario.

**1) Asignación de longitudes de onda por el anillo con sentido horario**

La tabla de asignación de longitudes de onda es la siguiente:

Tabla 4. Asignación de longitudes de onda en sentido horario

Enlace	Tráfico	Portadoras
AB	1	$\lambda_1$
BC	2	$\lambda_1\lambda_2$
CD	2	$\lambda_1\lambda_2$
DA	2	$\lambda_1\lambda_2$
AC	1	$\lambda_3$
CA	1	$\lambda_3$
DB	1	$\lambda_4$

A continuación, podemos ver el esquema de red para el anillo con sentido horario.

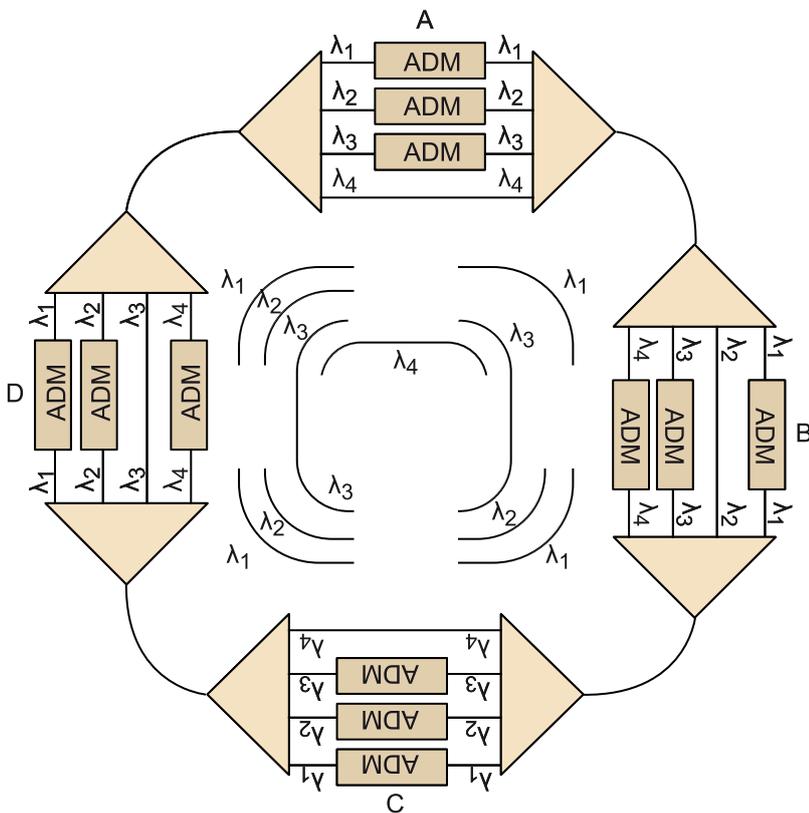


Figura 26. Esquema de la red en anillo (sentido horario)

Observemos el esquema propuesto: en los nodos A y C no añadiremos ni extraeremos información de  $\lambda_4$ , y en los nodos B y D no añadiremos ni quitaremos información de  $\lambda_3$ . Por lo tanto, en cada nodo se puede eliminar un *add drop multiplexer*.

## 2) Asignación de longitudes de onda por el anillo con sentido antihorario

La tabla de asignación de longitudes de onda es la siguiente:

Tabla 5. Asignación de longitudes de onda en sentido antihorario

Enlace	Tráfico	Portadoras
BA	1	$\lambda_1$
CB	1	$\lambda_1$
DC	2	$\lambda_1\lambda_2$
AD	1	$\lambda_1$
BB	1	$\lambda_2$
AC	1	$\lambda_3$
CA	1	$\lambda_3$

A continuación, podemos ver el esquema de red para el anillo con sentido antihorario.

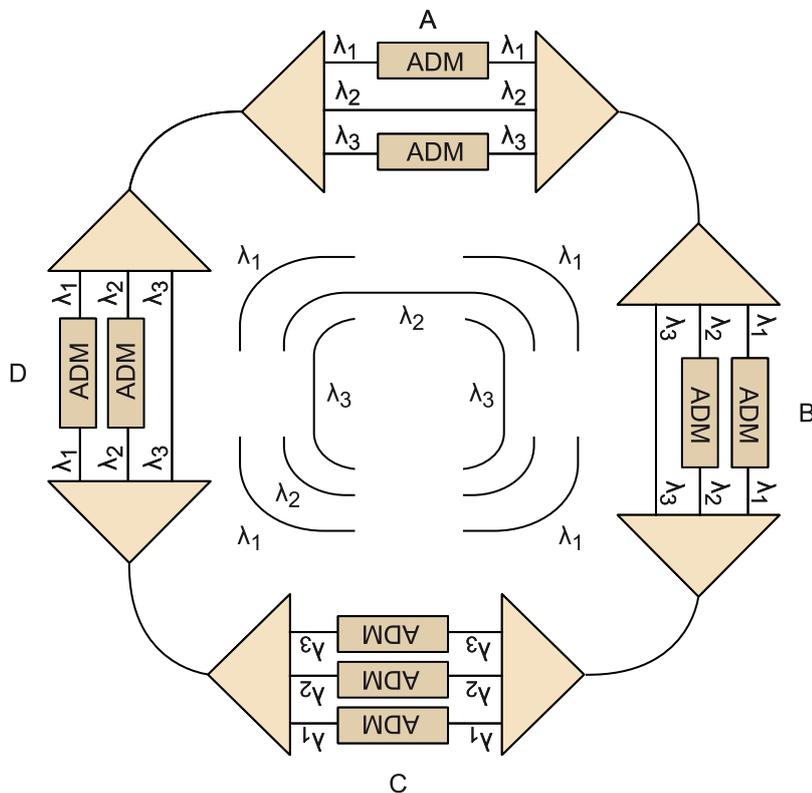


Figura 27. Esquema de la red en anillo (sentido antihorario)

Observemos el esquema propuesto: en el nodo A no añadiremos ni extraeremos información de  $\lambda_2$ , y en los nodos B y D no añadiremos ni quitaremos información de  $\lambda_3$ . Por lo tanto, se puede eliminar un *add drop multiplexer* en los nodos A, B y D.

### 1.6.2. Ejemplo II

Disponemos de una red en anillo bidireccional que queda definido por la figura siguiente, donde solo se representa el anillo en el que la información fluye en sentido horario. Los ADM que se muestran en cada nodo de la figura se utilizan, es decir, no son redundantes. Tanto el anillo horario como el antihorario soportan un sistema WDM de cuatro portadoras cada uno con un tráfico simétrico entre nodos. En todos los enlaces entre los nodos, tenemos las cuatro portadoras asignadas y, por lo tanto, no quedan canales libres del sistema WDM.

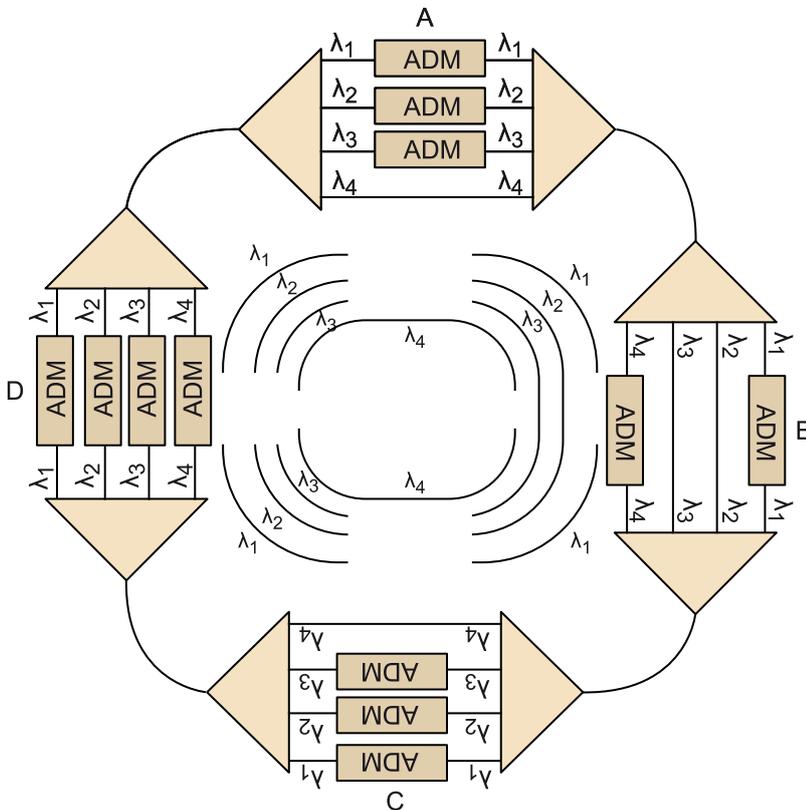


Figura 28. Esquema de la red en anillo

A partir de la figura, deducid la matriz de asignación de tráfico entre nodos.

Tal y como se indica, el anillo es bidireccional y esto significa que disponemos de un anillo de fibra que funciona en sentido horario y un anillo en sentido antihorario. En la figura, tenemos representado el anillo considerando un solo sentido. El anillo en sentido contrario tendrá la misma distribución de nodos y de ADM que el que hemos representado, puesto que el tráfico es simétrico.

Sobre el esquema de red, y viendo la distribución de ADM en cada nodo, trazaremos los enlaces que hay entre nodos. Si en un nodo encontramos un ADM en la longitud de onda cuyo enlace estamos trazando, entonces este nodo será fuente y destino del tráfico de esta longitud de onda. Sin embargo, si no hay ADM en la longitud de onda cuyo enlace estamos trazando, el nodo ni quita ni añade tráfico a la portadora de la longitud de onda.

Hay que tener en cuenta, tal y como dice el enunciado, que en todos los enlaces entre los nodos tenemos las cuatro portadoras asignadas. Por lo tanto, no quedan portadoras sin asignar entre nodos.

Una vez conocemos los diferentes enlaces del anillo, podemos hacer una tabla con los enlaces, el tráfico soportado por estos y la asignación de portadoras.

Tabla 6. Asignación de longitudes de onda

Enlace	Tráfico	Portadoras
AB	1	$\lambda_1$
BC	1	$\lambda_1$
CD	3	$\lambda_1\lambda_2\lambda_3$
DA	3	$\lambda_1\lambda_2\lambda_3$
DB	2	$\lambda_4$
AC	2	$\lambda_2\lambda_3$

Hay que notar que el sentido de los enlaces de la tabla anterior es siempre horario. A partir de la tabla anterior, podemos rellenar la parte de la matriz de tráfico que corresponde al sentido horario. Teniendo en cuenta que los enlaces tienen un tráfico bidireccional y simétrico, podemos rellenar el resto de la matriz de tráfico.

Tabla 7. Demanda de tráfico

	A	B	C	D
A	-	1	2	3
B	1	-	1	2
C	2	1	-	3
D	3	2	3	-

## 2. Topologías de fibra hasta el hogar (FTTH)

Las redes de acceso constituyen el último segmento de la red de un operador de telecomunicaciones antes de llegar al usuario final. Actualmente, las redes de acceso fijo se basan principalmente en cables de cobre. Estos cables fueron originalmente instalados para la transmisión analógica de señales a baja frecuencia, con la única finalidad de dar servicio de telefonía. Debido a su disponibilidad, con el advenimiento de la comunicación de datos entre ordenadores estas líneas de cobre también se han utilizado para la transmisión de señales digitales. A pesar de todo, su capacidad es limitada y, por lo tanto, esta parte de la red de acceso constituye lo que se conoce como *bottleneck* o cuello de botella.

Durante muchos años, se han hecho predicciones optimistas de manera recurrente, las cuales decían que la fibra óptica muy pronto se extendería hasta las casas, más que nada por los beneficios potenciales que ofrece esta tecnología. Por desgracia, estas visiones han acabado sucumbiendo a las realidades de la economía, la regulación y el interés de los principales operadores en la persistencia y explotación de las infraestructuras existentes.

Hoy día, el concepto de fibra hasta el hogar (FTTH) se está convirtiendo en una realidad, mientras que las nuevas aplicaciones permanecen a la espera, a punto para usuarios potenciales: intercambio de ficheros, vídeo bajo demanda, videoconferencia y televisión sobre IP. El entretenimiento, sin embargo, no es el único uso del ancho de banda, sino que también es posible tener beneficios sociales y ambientales a partir de una buena infraestructura que ofrezca banda ancha: telemedicina, *e-learning*, teletrabajo, cámaras de seguridad con conexión a Internet y servicios de monitorización remota de energía. A pesar de que estas son las aplicaciones que por ahora se ven evidentes, también pueden aparecer otras nuevas en un futuro más cercano, capaces de mejorar nuestra calidad de vida. De este modo, la innovación continúa y, según lo que se cree, las necesidades de ancho de banda seguirán creciendo, lo que hace que, hoy por hoy, solo las tecnologías de fibra hasta el hogar sean las claras candidatas para dar servicio con el ancho de banda pedido.

Se espera que la demanda de velocidad por parte del usuario sea más y mayor en un futuro próximo. Precisamente, en 1998 Jakob Nielsen predijo que el ancho de banda medio por usuario se incrementaría en un 50% al año. Con los datos de los que se dispone hoy, se ve que esto se ha ido cumpliendo durante los últimos años. Es importante remarcar que, en caso de que continúe esta tendencia, se espera que en el 2020 cada usuario pida un ancho de banda medio de 1 Gb/s.

### Nota

FTTH es la abreviatura del inglés *fiber to the home*.

### Nota

IP es la abreviatura del inglés *Internet protocol*.

### Enlace recomendado

Si queréis saber más sobre la ley de Nielsen, podéis ver el enlace siguiente:

<http://www.nngroup.com/articles/niensens-law-of-internet-bandwidth/enlla%E7>

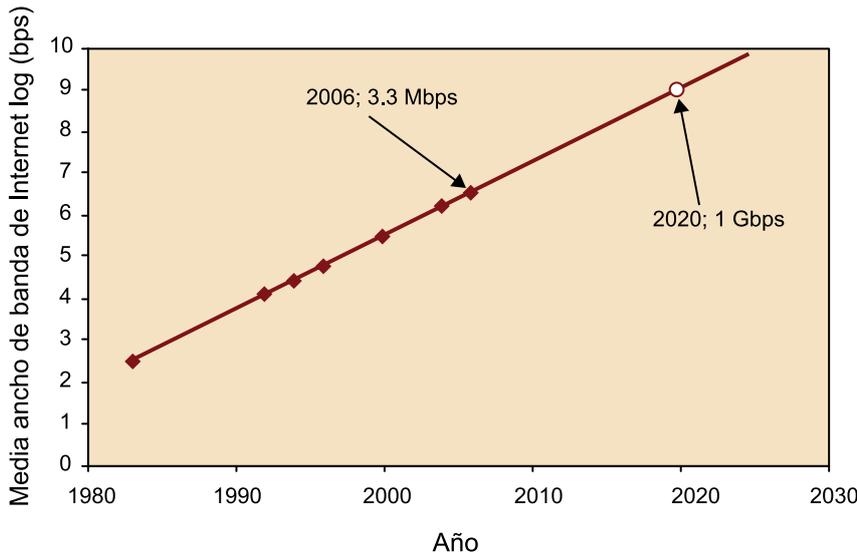


Figura 29. Predicción de la ley de Nielsen sobre el ancho de banda y datos obtenidos hasta el 2006 (puntos cuadrados)

Con la clara finalidad de dar apoyo a las necesidades y los servicios mencionados anteriormente, en los últimos años se han propuesto una serie de tecnologías, cada una con determinadas ventajas e inconvenientes. Las tablas 8 y 9 enumeran las soluciones disponibles para las aplicaciones del mercado de acceso.

Hasta hace pocos años, la solución adoptada para dar acceso de banda ancha a los usuarios consistió en reaprovechar el ancho de banda de los cables de cobre ya instalados y acercar la fibra óptica cada vez más al usuario final. Este fue el objetivo de las tecnologías de fibra hasta la acera (FTTC). El problema que tienen es que están muy limitadas por la capacidad del cobre, por lo que solo se puede aumentar el ancho de banda (y la velocidad del servicio) disminuyendo la distancia máxima cubierta por la red de acceso. Por ejemplo, VDSL2 puede proporcionar 100 Mb/s por usuario, pero solo a una distancia máxima de 300 m.

**Nota**

FTTC es la abreviatura del inglés *fiber to the curb*. La mayoría de estas tecnologías daban (y dan) servicio basándose en las populares técnicas xDSL.

Tabla 8. Tecnologías actuales para el servicio de banda ancha basadas en cable de cobre

	ADSL				VDSL				
	Básico	+	2	2+	Básico		2		
Velocidad de bajada (Mb/s)	3	8	15	20	13	26	52	30	100
Distancia (km)	3	3	6	1,5	1,5	1	0,3	1	0,3

Tabla 9. Tecnologías actuales para el servicio de banda ancha basadas en fibra óptica

	BPON	GPON	EPON
Velocidad de bajada (Mb/s)	155,52	1.244,16	
	622,08	2.488,32	1.000
	1.244,26		

	<b>BPON</b>	<b>GPON</b>	<b>EPON</b>
<b>Distancia (km)</b>	20	20	10

Esta es la razón por la que la fibra hasta el hogar ha aparecido y se está convirtiendo en una realidad en muchas regiones del mundo. En primer lugar, aparecieron enlaces de fibra punto a punto (PtP), mientras que últimamente las redes ópticas pasivas (PON) punto a multipunto se emplean para implementar la fibra hasta el hogar, principalmente en Asia y en Estados Unidos. La primera generación de PON (principalmente los estándares GPON y EPON) ofrece anchos de banda de gigabit por segundo, de manera típica compartidos entre varias decenas de usuarios. En estos sistemas, el ancho de banda efectivo garantizado al usuario es de 40-80 Mb/s, puesto que la velocidad de bit es compartida entre usuarios del mismo segmento (por ejemplo, 32).

#### Nota

*PtP* es la abreviatura del inglés *point to point* y *PON*, de *passive optical network*.

Precisamente, ahora estamos viviendo el despliegue de las redes FTTH, basadas en las normas GPON y EPON. Sin embargo, los entes de estandarización están trabajando para incluir sistemas FTTH de más capacidad. Por ejemplo, el IEEE ha acabado recientemente la norma P802.3av 10G-EPON, mientras que la ITU también tiene prácticamente acabada la norma XG-PON de 10 Gb/s. En estos sistemas, el ancho de banda garantizado por usuario será de 150-300 Mb/s aproximadamente, dado que la velocidad de 10 Gb/s también se comparte entre los usuarios de un mismo segmento, típicamente 32.

#### Nota

IEEE es una asociación dedicada a la innovación y la estandarización. La sigla corresponde a su nombre en inglés: Institute of Electrical and Electronics Engineers. ITU es la Unión Internacional de Telecomunicaciones, una entidad de estandarización en el ámbito mundial. La sigla también corresponde a su nombre en inglés: International Telecommunications Union.

En el futuro, las siguientes generaciones de PON estarán disponibles (del mismo modo que hemos tenido varias generaciones de xDSL) con el claro objetivo de conseguir una mayor capacidad y un coste más bajo y de dar nuevos servicios.

De este modo, para una mejor comprensión de lo que está sucediendo, nos centraremos en proporcionar una visión clara de cuáles son las tecnologías y arquitecturas que se pueden encontrar en las redes ópticas de acceso actuales.

## 2.1. Punto a punto

Las redes ópticas de acceso punto a punto surgen de la extensión de los enlaces de larga distancia, que también se llevan a cabo de este modo. Un ejemplo es el que se muestra en la figura 30. De manera típica, se utiliza una sola fibra en cada dirección del enlace. Así, una fibra se utiliza para la comunicación descendente, mientras que una segunda fibra se usa para la comunicación ascendente. Esto quiere decir que un gran número de conexiones punto a punto requeriría muchos componentes activos, además de un cable que contuviese muchas fibras. Por lo tanto, los costes de instalación y mantenimiento serían prohibitivos comparados con una red tradicional de distribución basada en el cobre.

Como convenio, se dice que la comunicación descendente (o de bajada) es aquella que va de la centralita a los usuarios, mientras que la de sentido ascendente va de los usuarios hacia la centralita.

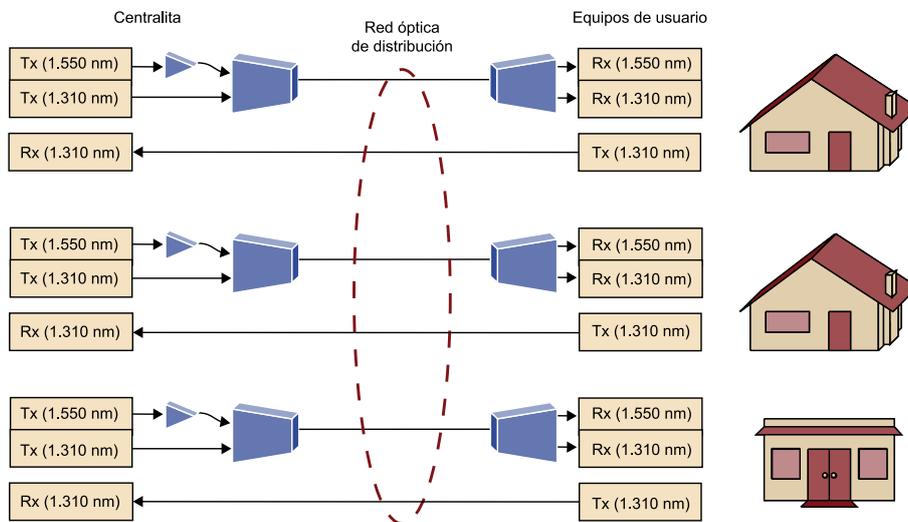


Figura 30. Red óptica pasiva con arquitectura punto a punto

En cuanto al ancho de banda, en una red punto a multipunto no se comparte entre los diferentes usuarios, porque cada abonado tiene su propio transmisor y receptor dedicados en la centralita. Esto quiere decir que para un sistema STM-16/OC-48<sup>1</sup> (que normalmente se utiliza en estas redes punto a punto), la velocidad de bit entregada a cada cliente es de 2.488,32 Mb/s.

Además, estas arquitecturas no prevén ningún tipo de multiplexación de usuarios por división de longitud de onda, por lo que solo se sirve un canal por fibra. En un principio, la comunicación se lleva a cabo en dos longitudes de onda distintas:

- 1.310 nm para la voz y los datos digitales.
- 1.550 nm para el vídeo analógico (principalmente, distribución de televisión por cable).

Observad que, por lo tanto, el enlace de 1.550 nm es unidireccional, mientras que el de 1.310 nm también tiene su fibra de vuelta hacia la centralita.

En lo que respecta a los transmisores y receptores, hay que decir que se utiliza una modulación de intensidad. Puesto que las longitudes de onda están fijadas según los servicios y las velocidades de transmisión no son excesivamente altas, se usan láseres de modulación directa como transmisores. Respecto a la recepción, se pasa por un filtro óptico (para seleccionar la longitud de onda dependiente del servicio) y se usa una fotodetección directa, sin ningún

<sup>(1)</sup>STM-16/OC-48 es el estándar del ITU para transmisión de datos orientado a redes de larga distancia.

#### Nota

APD es la abreviatura del inglés *avalanche photodiode*.

tipo de preamplificador óptico. Por este motivo, para cubrir un buen margen de atenuación de la red es preciso un fotorreceptor de baja sensibilidad. Por ejemplo, uno que esté basado en fotodiodo de avalancha o APD.

Otra característica interesante de estas redes es que no hay amplificación óptica en la planta de distribución, por lo que cada enlace óptico queda limitado a una distancia aproximada de 100 km. Dado que las redes de acceso típicas suelen tener distancias máximas de hasta 20 km, utilizar arquitecturas de punto a punto para estas aplicaciones significa perder una gran cantidad de recursos y dinero. Por este motivo, las arquitecturas de red que se usan de manera más amplia son aquellas con esquemas de conexión punto a multipunto.

## 2.2. Punto a multipunto: redes ópticas pasivas

La arquitectura de red punto a multipunto surge de la necesidad de una alternativa a las redes punto a punto. En la figura 31, podéis ver un esquema de esto. Básicamente, están compuestas por una centralita y un árbol de fibra que tiene en cada rama a un usuario conectado. La red de distribución óptica incluye una fibra de alimentación (en inglés, *feeder*), una etapa de distribución (divisor de potencia de la figura 31) y varias fibras que conectan con el usuario final. A diferencia de la arquitectura punto a punto, los clientes comparten el acceso a la centralita utilizando una multiplexación en el dominio temporal (TDM). De este modo, cuanto mayor es el número de usuarios conectados, el ancho de banda efectivo por usuario se reduce.

**Nota**

TDM es la abreviatura del inglés *time division multiplexing*.

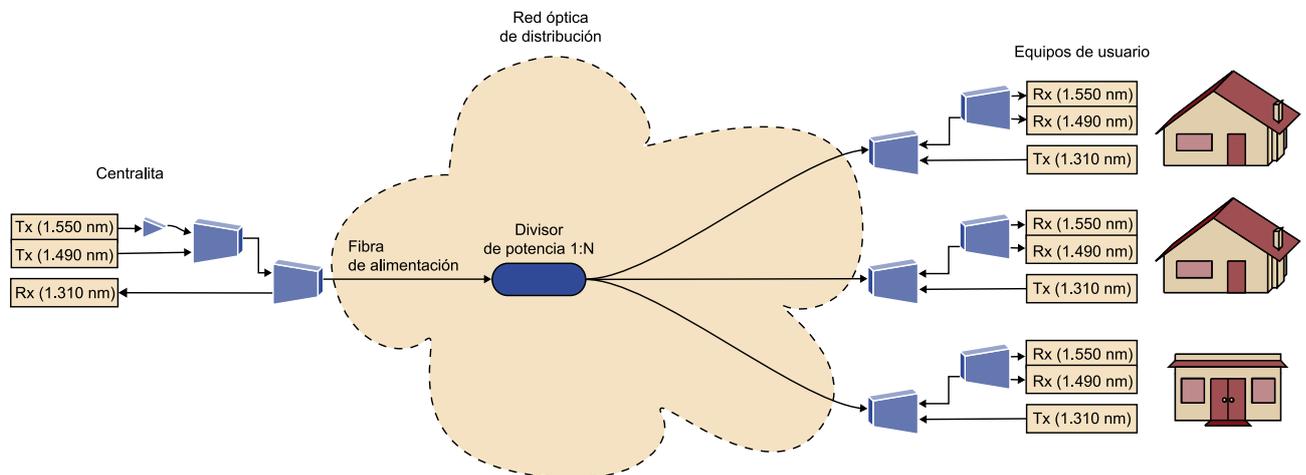


Figura 31. Red óptica pasiva con arquitectura punto a multipunto

A pesar de que las redes punto a punto también son pasivas, cuando en la bibliografía se habla de PON o redes ópticas pasivas en general se hace referencia a arquitecturas punto a multipunto.

Por su popularidad, las implementaciones de redes punto a multipunto son las más reguladas por las organizaciones de estandarización. Concretamente, las normas más populares son las siguientes:

- EPON (soportada por el grupo IEEE Ethernet).
- GPON (soportada por el ITU).

Tal vez, la mayor diferencia entre las dos normas reside en su arquitectura de protocolo. GPON ofrece ATM para voz, Ethernet para datos y una encapsulación patentada para otros servicios. EPON, en cambio, utiliza IP para transmitir datos, voz y vídeo.

A pesar de estas diferencias, las dos normas se implementan con transmisores y receptores de modulación de intensidad y detección directa. Del mismo modo que en las redes punto a multipunto, las velocidades de transmisión no son excesivamente altas, por lo que se utilizan láseres de modulación directa y bajo coste (por ejemplo, láser de cavidad Fabry-Pérot). Respecto a la recepción, es idéntica en las redes punto a punto y se utiliza un filtro óptico seguido de una fotodetección directa y sin ningún tipo de preamplificador óptico.

A continuación, comentaremos brevemente estos estándares y sus nuevas versiones (10G-EPON y XG-PON), y señalaremos sus características principales: la relación de división (es decir, el número máximo de usuarios a los que pueden servir), la distancia máxima, las longitudes de onda utilizadas y el tipo de red de datos.

### 2.2.1. Estándares desplegados: gigabit PON y gigabit Ethernet PON

Como se ha dicho antes, GPON es un estándar que soporta una solución multiprotocolo de transporte. Los circuitos virtuales se establecen para diferentes tipos de servicios utilizando tecnología ATM. Este tipo de transporte ofrece una alta calidad de servicio, pero implica también una sobrecarga significativa porque hay que establecer los circuitos virtuales para cada tipo de servicio.

En cuanto al número de usuarios para servir, GPON prevé relaciones de división de 16, 32 y 64, lo que quiere decir que este es el número máximo de clientes a los que se puede dar servicio en una sola red. A pesar de que la distancia típica PON es de 20 km, la distancia máxima especificada por GPON puede ser de hasta 60 km. Sin embargo, los equipos GPON están diseñados para unas pérdidas de enlace máximas de 30 dB, por lo que 60 km es una distancia poco soportada para dar servicio a 32 usuarios.

#### Bibliografía recomendada

Sobre EPON:

**G. Kramer** (2004). *Ethernet Passive Optical Networks*. McGraw-Hill.

Sobre GPON:

**M. Hajduczenia; H. J. A. da Silva** (2009, junio). "Next generation PON systems - current status". *Proceedings of the International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2009)*.

#### Nota

ATM es un concepto para posibilitar la transferencia de datos de modo asíncrono, e incluye la multiplexación por división en tiempo. Es la abreviatura del inglés *asynchronous transfer mode*.

Del mismo modo que en la arquitectura de red que acabamos de describir, cada usuario está conectado a una sola fibra y para conseguir comunicación simultánea en los dos sentidos, se utilizan longitudes de onda diferentes para los sentidos de comunicación ascendente y descendente. Precisamente, el margen entre 1.260 nm y 1.360 nm (centrado a 1.310 nm) está reservado para la comunicación ascendente, mientras que el rango de 1.480 nm a 1.500 nm se usa para la comunicación descendente. GPON también conserva la superposición de vídeo analógico utilizado en las arquitecturas punto a punto, que se coloca en la banda que va de 1.550 nm a 1.560 nm.

**Nota**

La comunicación simultánea en los dos sentidos también se denomina *full-duplex*.

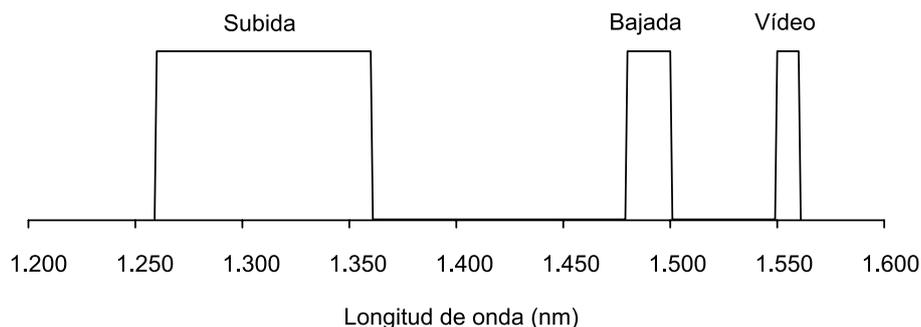


Figura 32. Ocupación de longitudes de onda de GPON y EPON

Finalmente, en cuanto a la velocidad de conexión, son compatibles varias velocidades de datos, que se muestran en la tabla 10. Básicamente, se prevén dos tipos de velocidades de bajada (1.244,16 Mb/s y 2.488,32 Mb/s). Para cada uno de estos casos hay varias proporciones asimétricas y simétricas que se pueden utilizar en el sentido ascendente, desde 155,52 Mb/s hasta 2.488,32 Mb/s. A pesar de todo, las velocidades más utilizadas corresponden a la combinación de 2.488,32 Mb/s en sentido descendente y 1.244,16 Mb/s en sentido ascendente.

Tabla 10. Velocidades soportadas por GPON

Bajada	Subida
1.244,16 Mb/s	155,52 Mb/s
1.244,16 Mb/s	622,08 Mb/s
1.244,16 Mb/s	1.244,16 Mb/s
2.488,32 Mb/s	155,52 Mb/s
2.488,32 Mb/s	622,08 Mb/s
2.488,32 Mb/s	1.244,16 Mb/s
2.488,32 Mb/s	2.488,32 Mb/s

EPON, en cambio, proporciona conectividad para cualquier tipo de comunicación por paquetes basada en IP o de otro tipo. Puesto que los dispositivos Ethernet están en todas las partes de la red, ya sea de manera local en casa

y/o en todo el camino a través de las redes troncales regionales, nacionales y mundiales, la implementación de EPON puede llegar a ser altamente rentable desde el punto de vista de protocolo.

En cuanto al número de usuarios para servir, EPON prevé coeficientes de división de 16 y 32, este último en conjunción con el hecho de codificar los datos para la corrección de errores. El código corrector especificado es RS(255,239), que puede corregir los errores de transmisión y convertir una probabilidad de error en el bit de  $10^{-4}$  (peor caso) en una probabilidad de error de  $10^{-15}$ . En EPON, las dos relaciones de división se pueden utilizar para cubrir la distancia máxima, especificada en 20 km.

Finalmente, EPON usa el mismo margen de longitudes de onda que GPON: para la comunicación ascendente, el margen de 1.260-1.360 nm; para la comunicación descendente, los 1.480-1.500 nm; y los 1.550-1.560 nm para la difusión de vídeo analógico. La velocidad de datos soportada es de 1 Gb/s para todas las direcciones del enlace, tanto en sentido ascendente como descendente.

Como punto final, hay que decir que lo que se ha presentado aquí es solo una descripción muy cualitativa de cómo funcionan estas normas. Si queréis profundizar algo más en este tema, os recomendamos que estudiéis los estándares en cuestión.

### 2.2.2. Estándares en despliegue: 10G-EPON y XG-PON

La norma 10G-EPON (definida como IEEE std 802.3av) se inició con el objetivo de añadir velocidades de hasta 10 Gb/s a la norma EPON. Para conseguir una actualización sin problemas, se supone que los tres tipos de velocidades de tráfico siguientes pueden coexistir en la misma red pasiva:

- Simétrico de 10 Gb/s en sentido ascendente/descendente.
- Asimétrico de 10 Gb/s en sentido descendente y 1 Gb/s en sentido descendente.
- 100% compatible con EPON, con velocidad simétrica de 1 Gb/s en sentido ascendente/descendente.

Las señales descendentes se transmiten desde la centralita en bandas de longitudes de onda diferentes en función de la velocidad. De este modo, 1 Gb/s se transmite a los 1.480-1.500 nm, mientras que a 1.575-1.580 nm se transmiten 10 Gb/s. En el equipo receptor del usuario, se selecciona una señal u otra mediante el uso de un filtro óptico.

#### Enlaces recomendados

En los enlaces siguientes, podéis descargar las dos normas en formato PDF.

Especificaciones de medio físico de G-PON:  
[http://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e%20id=T-REGUE-RA-G.984.2-200303-I!!PDF-E%20type=items](http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e%20id=T-REGUE-RA-G.984.2-200303-I!!PDF-E%20type=items)

Especificaciones de capa de acceso de G-PON:  
[http://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e%20id=T-REGUE-RA-G.984.3-200803-I!!PDF-E%20type=items](http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e%20id=T-REGUE-RA-G.984.3-200803-I!!PDF-E%20type=items)

Especificaciones de Ethernet (incluye EPON): <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html>

#### Referencia bibliográfica

K. Tanaka; A. Agatha; Y. Horiuchi (2010). "IEEE 802.3av 10G-EPON standardization and its research and development status". *IEEE / OSA Journal of Lightwave Technology* (vol. 4, núm. 28).

Por otro lado, las señales ascendentes se transmiten en una banda de longitud de onda similar y con un cierto encabalgamiento (1.260-1.360 nm para 1 Gb/s y 1.260-1.280 nm para 10 Gb/s) en los terminales de usuario. Dado que la multiplexación se lleva a cabo en el dominio temporal, para recibir señales ascendentes consecutivas que tienen distintas velocidades y potencias (procedentes de equipos de usuarios distintos con diferentes niveles de potencia), en la centralita se necesita un doble receptor capaz de recibir estas ráfagas.

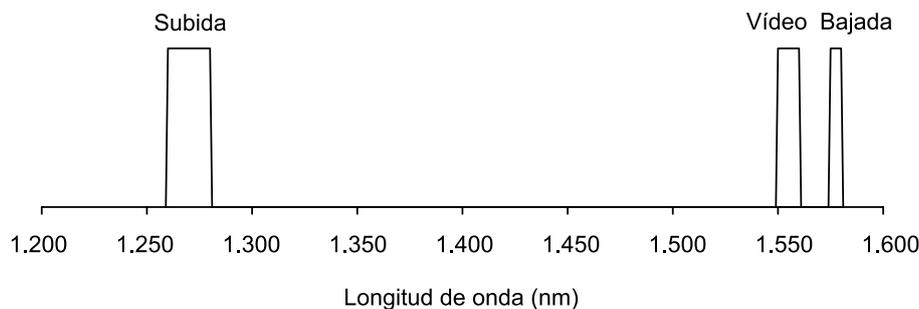


Figura 33. Ocupación de longitudes de onda común entre 10G-EPON y XG-PON

En la norma 10G-EPON se considera la superposición de vídeo analógico, algo que también se incluyó en EPON (utilizando la banda de 1.550 nm a 1.560 nm). Además, 10G-EPON utiliza un código corrector de errores de mayor ganancia, Reed-Solomon (255,223), para rebajar al máximo el coste de los transceptores ópticos. La coexistencia de 10G-EPON y EPON se puede conseguir mediante el uso de estas especificaciones y de un algoritmo dinámico de asignación de ancho de banda a doble velocidad (que quedaría fuera de la norma). De este modo, los operadores de red podrían actualizar los sistemas PON sin problemas.

Por su parte, el ITU acaba de desarrollar la norma XG-PON Q2/15, que se enfoca a velocidades de 2.488,32 Mb/s para el sentido ascendente y 9.953,28 Mb/s para el descendente. En este caso, se estudian las funcionalidades siguientes:

- Internet de alta velocidad.
- Emulación y/o simulación de servicios tradicionales.
- IPTV.
- Red de servicios a móvil (con el requisito añadido de sincronización de tiempo entre centralita y terminal de usuario).

Para todo esto, la migración de manera suave desde GPON es uno de los requisitos. Por ahora, el alcance máximo entre centralita y los terminales de usuario se establece en 20 y 40 km, mientras que se dice que su extensión a 60 km se añadirá en una versión revisada.

La asignación de longitudes de onda en XG-PON es la misma que la de distribución IEEE 10G-EPON, de modo que los componentes ópticos puedan ser comunes entre los dos estándares. Además, se espera que el margen de longitudes de onda de XG-PON se pueda aumentar en un futuro, para rellenar

también la región de 1.290-1.330 nm para la comunicación ascendente y los 1.480-1.500 nm para el flujo de datos descendente. En cualquier caso, la asignación específica de longitudes de onda tiene que permitir que, para un caso concreto, tanto XG-PON como 10G-EPON coexistan en la misma fibra sin superposiciones de longitudes de onda entre los mismos.

Del mismo modo que en IEEE 10G-EPON, la cuestión de cómo implementar un algoritmo de corrección de errores es uno de los temas importantes. En este caso concreto, se usa el código RS(248, 216) para la bajada, que relaja la probabilidad de error objetivo a  $10^{-3}$ . Para la subida se utiliza el RS(248, 232), que relaja la probabilidad de error objetivo a  $10^{-4}$ .

Las pérdidas máximas entre la centralita y los terminales de usuario se especifican sobre los 35 dB, por lo cual muchos de los operadores de red que ya hayan desplegado la generación anterior de PON podrían reutilizar la infraestructura de fibra ya existente.

Una característica importante que se está discutiendo es el hecho de si hay que incluir también la multiplexación por división de longitud de onda para que las redes sean capaces de servir a más usuarios. En el momento actual, parece que no es probable que aparezca una revisión de XG-PON en este sentido, por lo que será necesario esperar a un nuevo estándar para incluir este tipo de multiplexación.

Al igual que en el apartado anterior, os queremos recordar que esta es solo una descripción cualitativa de los estándares y que, si queréis entrar con más detalle en su funcionamiento, os recomendamos que los estudiéis con calma.

#### **Ejemplo: cálculo de la cobertura de una red XG-PON**

En este ejemplo veremos cómo se calcularía la cobertura de una red de acceso; por ejemplo, una que cumpla el estándar XG-PON.

Si consultáis la normativa de capa física de XG-PON, veréis que se especifican muchos tipos de red, cada una pensada para cubrir un margen de atenuación determinado. Para este ejemplo, nos fijaremos en la red extendida de clase E2b.

De este modo, tendremos que la centralita emite una potencia entre los 14,5 dBm y los 16,5 dBm, y que en la bajada se especifica una sensibilidad de -21,5 dBm para la probabilidad de error objetivo de  $10^{-3}$ . En lo que respecta a la subida, encontramos que el terminal de usuario transmite a una potencia que está entre 2 dBm y 7 dBm, y que la sensibilidad en recepción se especifica como -33,5 dBm para la probabilidad de error objetivo de  $10^{-4}$ . Por este motivo, en los dos casos (subida y bajada) estaremos teniendo una cobertura de atenuación mínima de 35 dB.

De estas pérdidas que cubre la red, tenemos que descontar 6 dB para considerar otras degradaciones que puedan afectar al sistema.

- **Relación de extinción:** En una modulación real, siempre tendremos una relación de extinción que en este estándar se define como mayor de 8,2 dB. Por lo tanto, en el peor caso de relación de extinción estaremos teniendo una penalización en sensibilidad ligeramente por encima de 1 dB.
- **Dispersión y no linealidades de la fibra:** En un principio, la dispersión es un parámetro que no afectará demasiado a la comunicación por el hecho de transmitir a relativamente poca distancia. Respecto a las no linealidades, es posible tener una

#### **Enlaces recomendados**

Desde los enlaces siguientes, podéis descargar las dos normas en formato PDF.

Especificaciones de medio físico de XG-PON:

[http://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e%20id=T-REGUE-RA-G.987.2-201010-I!!!PDF-E%20type=items](http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e%20id=T-REGUE-RA-G.987.2-201010-I!!!PDF-E%20type=items)

Especificaciones de capa de acceso de XG-PON:

[http://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e%20id=T-REGUE-RA-G.987.3-201010-I!!!PDF-E%20type=items](http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e%20id=T-REGUE-RA-G.987.3-201010-I!!!PDF-E%20type=items)

Especificaciones de 10G-EPON: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.3av-2009.pdf>

cierta penalización aunque estemos transmitiendo a una potencia bastante alta en la bajada, pero para esta velocidad y sin señales a longitudes de onda cercanas no es un efecto importante. Sin embargo, podemos dejar un margen de 1 dB adicional para tener en cuenta estas degradaciones.

- **Variaciones en la fabricación de los dispositivos:** Siempre es posible tener variaciones entre las prestaciones de los dispositivos reales respecto de sus hojas de especificaciones, y por este motivo se suele dejar 2 dB de margen para compensar este efecto.
- **Envejecimiento del enlace:** Con el paso de los años un determinado enlace pierde prestaciones de funcionamiento, lo que se puede traducir en incrementos de atenuación. En general, se suele dejar 2 dB de margen para este término.

Si tenemos en cuenta estos factores, nos queda un margen neto de 29 dB de atenuación para trabajar y dimensionar la red. A partir de aquí, es posible hacer el cálculo de la distancia máxima y el número de usuarios considerando que siempre tendremos que cumplir:

$$A(\text{dB}) = L \cdot \alpha + 3 \log_2 N \quad (6)$$

### Lectura de la fórmula (6)

$A = 29$  dB: margen de atenuación que hemos fijado.

$L$ : distancia máxima (en km).

$\alpha$ : pérdidas de la fibra (en dB/km).

$N$ : número de usuarios.

Observad que consideramos que  $N$  tiene que ser siempre una potencia de 2, por el hecho de que los divisores de potencia se fabrican concatenando acopladores 50:50. Por lo tanto, para servir a un número de usuarios que no sea potencia de 2, tendremos que dimensionar la red para que  $N$  sea la potencia de 2 inmediatamente superior.

Por ejemplo, si queremos cubrir un vecindario de 100 hogares, deberemos dimensionar la red con  $N = 128$ , porque el otro valor correcto por debajo sería  $N = 64$ , y nos quedaríamos cortos.

En cuanto al resto, podemos considerar que desplegamos una fibra monomodo estándar, con pérdidas por atenuación de  $\alpha = 0.25$  dB/km. Notad que consideramos iguales las pérdidas por el sentido ascendente y descendente, para simplificar los cálculos.

A continuación, podemos expresar el número de usuarios en función de la distancia máxima para nuestro caso. Esto se puede ver de manera gráfica en la figura 34, cuyos valores relevantes podéis observar en la tabla 11.

Tabla 11. Número de usuarios, velocidades mínimas por usuario (bajada y subida) y las correspondientes distancias máximas

Número de usuarios	Velocidad de bajada	Velocidad de subida	Distancia máxima
512	19,4 Mb/s	4,9 Mb/s	8 km
256	38,9 Mb/s	9,7 Mb/s	20 km
128	77,8 Mb/s	19,4 Mb/s	32 km
64	155,5 Mb/s	38,9 Mb/s	44 km
32	311 Mb/s	77,8 Mb/s	56 km

A partir de los resultados de la figura 34, hay que tener en cuenta un par de cosas. En primer lugar, que si hacemos una red con un alcance muy localizado, el máximo número de usuarios a los que se puede dar servicio es de  $N = 512$  (pérdidas de 27 dB). Si hacemos  $N = 1.024$ , las pérdidas suben hasta 30 dB, 1 dB por encima del margen de 29 dB que hemos establecido. En segundo lugar, hay que tener en cuenta que según el estándar XG-PON,

las relaciones de división válidas son siempre superiores a 32. Por este motivo, estamos limitados a una distancia máxima de la red de 56 km.

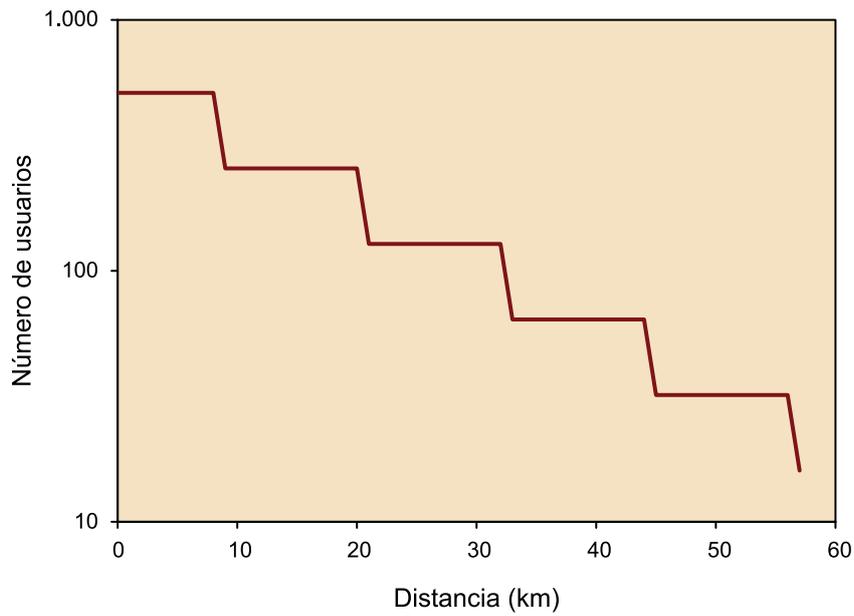


Figura 34. Número de usuarios en función de la distancia máxima para la red del ejemplo propuesto

Para acabar, a partir de aquí podemos encontrar también las velocidades mínimas por usuario en cada caso. Dado que la red estandarizada tiene fijadas las velocidades agregadas (2.488,32 Mb/s de subida y 9.953,28 Mb/s de bajada), solo tenemos que dividir las por el número de usuarios concurrentes en el peor de los casos. Podéis ver los valores resultantes para cada caso en la tabla 11.

## Bibliografía

**Kramer, G.** (2004). *Ethernet Passive Optical Networks*. McGraw-Hill.

**Hajduczenia, M.; da Silva, H. J. A.** (2009, junio). "Next generation PON systems - current status". *Proceedings of the International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2009)*.

**Ramaswami, R.; Sivarajan, K. N.; Sasaki, G. H.** (2008). *Optical Networks: A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann.

**Tanaka, K.; Agatha, A.; Horiuchi, Y.** (2010). "IEEE 802.3av 10G-EPON standardization and its research and development status". *IEEE / OSA Journal of Lightwave Technology* (vol. 4, núm. 28).

