



## CAPÍTULO V

### SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR FIBRA OPTICA

#### 5.1 Introducción

Un sistema de comunicación de fibra óptica está compuesto por una o varias fibras para cada dirección de transmisión; equipo terminal de línea y regeneradores.

Como por la fibra óptica se transmiten señales de luz se tiene en cada extremo de la comunicación un convertidor electro-óptico que convierte la señal electrónica en óptica para transmitir y un detector el cual tendrá que hacer lo contrario del transmisor o emisor como se puede observar en la figura 5.1



Figura 5.1 Diagrama de bloques de un sistemas de comunicación

#### 5.2 Equipos ópticos

##### 5.2.1 Emisores

Los emisores ópticos reciben una señal eléctrica modulada y la convierten en una señal óptica modulada.

El emisor óptico típicamente envía “pulsos ópticos”, encendiendo o apagando la fuente de luz, o cambiando la intensidad.

Los emisores ópticos tienen las siguientes características básicas:



- ✓ Longitud de onda media
- ✓ Ancho espectral
- ✓ Potencia media
- ✓ Frecuencia de modulación

### **5.2.1.1 Longitud de onda media**

En fibra óptica la luz no se transmite en toda la frecuencia; aquí se utilizan las ventanas como se estudio en el capítulo 1 existen 3 ventanas las que transmiten en la frecuencia de 850, 1300 y 1550 nm.

Los emisores ópticos se eligen de manera tal que emitan luz en alguna de las ventanas explicadas.

### **5.2.1.2 Ancho Espectral**

Es el rango de longitudes de onda central por el que la potencia de luz es emitida por un transmisor.

El láser tiene anchos espectrales más pequeños que el LED, por lo que pueden concentrar mayor potencia en las cercanías de la longitud de onda central.

### **5.2.1.3 Potencia Media**

Es la relación de la intensidad de luz durante la modulación se mide en miliwatts o dBm. (Decibel miliwatts).

### **5.2.1.4 Frecuencia de modulación.**

Es la frecuencia a la que la luz puede ser encendida o apagada esto limita la velocidad de transmisión de datos; para mejorar este factor algunos emisores



no apagan ni encienden la fuente de luz sino que mas bien cambian el nivel de intensidad.

### 5.2.1.5 Tipos de emisores ópticos

Existen dos tipos de emisores ópticos:

- ✓ Diodo LED
- ✓ Diodo láser

#### 5.2.1.5.1 Diodo LED (Light Emitting Diode)

Se utiliza generalmente en sistemas de comunicación con:

- ✓ Fibras multimodo de apertura numérica alta
- ✓ Secciones de regeneración pequeñas o recorridos cortos como en redes locales o tendidos en pequeñas áreas
- ✓ Baja velocidad de modulación, función del ancho de banda permitido.

En los diodos LED, la luz es generada por emisión espontánea por lo que las ondas emitidas no se encuentran en fase entre si ya que este fenómeno es aleatorio.

Uno de los parámetros importantes dentro de los sistemas ópticos de comunicación es el espectro de una fuente debido a la dispersión cromática que es visto como un ensanchamiento de los pulsos; este ancho espectral como se vio anteriormente es proporcional a la longitud de onda aproximadamente 50nm en longitudes de onda de 850 nm. Y 100 nm. En longitudes de onda de 1300nm, en la Figura 5.2 podemos ver el espectro de un LED.

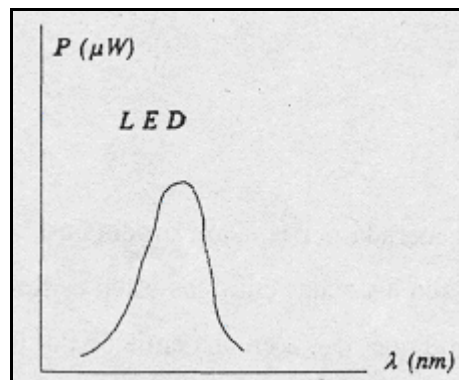


Figura 5.2 Espectro de un LED

Existen dos tipos de diodos LED para fibras multimodo:

- ✓ Los de tipo Burrus, o de emisión por superficie,
- ✓ Diodos ELED, o diodos de emisión de borde.

En los diodos ELED la radiación es más direccional, por lo que las pérdidas de acoplamiento a la fibra serán menores, además, el ancho de banda espectral mejora completamente llegando a ser de 10 nm. En la Tabla 5.1 podemos ver las características de los LEDs.

Característica	LED	ELED
Longitud de onda (nm)	850-1300	850-1300
Anchura espectral (nm)	30-110	10-50
Corriente de excitación (mA)	20-300	20-300
Potencia media de salida (mW)	1	<3
Anchura de banda (MHz.Km)	- 10-50	50-200
Temperatura máxima admisible	60°	60°
Vida media (horas)	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>

Tabla 5.1. Características de los diodos LED<sup>1</sup>

<sup>1</sup> [http://www.mentor.mec.es/electdigital/apend\\_f.htm](http://www.mentor.mec.es/electdigital/apend_f.htm)



### 5.2.1.5.2 Diodo LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

En el láser su emisión es siempre coherente, es decir, los trenes de onda que emergen de él están siempre en fase, independientemente de cual sea su ancho espectral de emisión la cual se puede observar en la Figura 5.3.

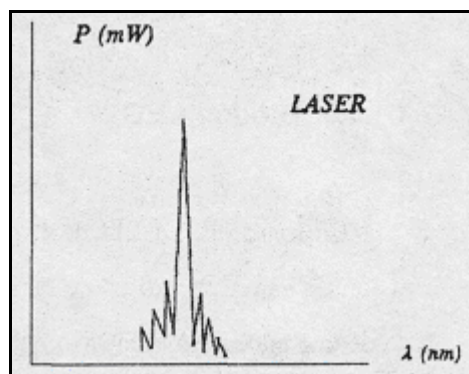


Figura 5.3 Espectro de un láser

El LASER se utiliza en sistemas con:

- ✓ Potencia óptica de salida alta
- ✓ Fibras mono modo o multimodo.
- ✓ Alta velocidad máxima de modulación y grandes capacidades de transmisión.
- ✓ Gran longitud, donde se requiere alta potencia y baja dispersión en la fibra.

La estructura de un LASER es igual a la del LED por lo que si queremos que funcione como LASER la corriente de excitación debe sobrepasar la llamada corriente umbral ya que por debajo de esta se comportaría como un LED como se puede observar en la Figura 5.4.

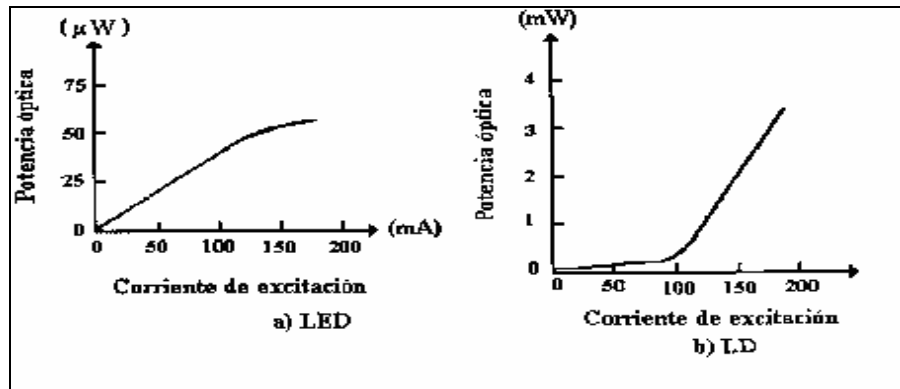


Figura 5.4 Curva de emisión de un LED y diodo láser LD

Una característica importante del láser es la dependencia de la potencia de emisión con la temperatura, lo que obliga a mantener el láser en un ambiente térmicamente estable. En la siguiente tabla veremos las características del láser.

Característica	Ga Al As	In Ga As P
Longitud de onda (nm.)	800-900	900-1550
Anchura espectral (nm)	0.1-4	0.1-6
Corriente de excitación (mA)	0.2	0.5
Potencia media de salida (mW.)	5-20	5-20
Anchura de banda (MHz/Km)	80-150	40-100
AT máximo admisible (°C)	0.5-2	0.5-2
Vida media (horas)	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>

Tabla 5.2 Características del láser <sup>2</sup>

En lo que se refiere a la anchura espectral su pequeño valor favorece una baja dispersión cromática en la fibra.

El tiempo de vida de los diodos láser es menor que el de los LED.

<sup>2</sup> [www.ifca.unican.es/Top/Presentaciones/Presentacion\\_Laseres2.ppt](http://www.ifca.unican.es/Top/Presentaciones/Presentacion_Laseres2.ppt)



### 5.2.1.5.3 Diodos Láser Especiales

Dentro de este grupo podemos citar al láser con ranura de Bragg los cuales utilizan una técnica de realimentación que consiste en la perturbación periódica a lo largo de la cavidad reduciéndola hasta quedar un solo modo longitudinal. El periodo de esta ranura viene dado por:

$$T = \lambda / 2n$$

Ecuación 5.1 Periodo en láser con ranura de Bragg.

Donde:

$\lambda$  = Longitud de onda.

$n$  = índice de refracción.

Las ranuras actúan como espejos para la longitud de onda a calcular haciendo que las otras longitudes de onda sean transparentes.

Existen dos tipos de este láser los cuales son:

- ✓ **DFB** (Distributed Feedback - Retroalimentación Distribuida) el cual tiene las ranuras en la zona activa.
- ✓ **DBR** (Distributed Bragg Reflector - Reflector de Bragg distribuido) Al contrario del DFB las ranuras se utilizan fuera de la zona activa.

Estas reflexiones se logran gracias al uso de rejillas de Bragg que funcionan con la ley de reflexión de Bragg que se puede explicar con la Figura 5.5:

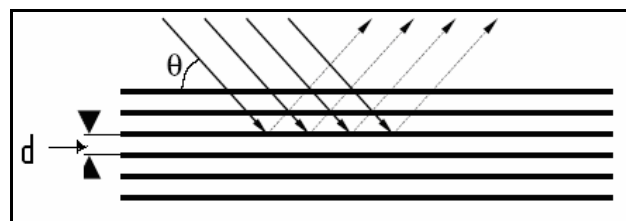


Figura 5.5 Reflexión de Bragg.



Al tener un haz de luz incidiendo en un número de planos reflejantes separados una distancia  $d$  el ángulo en el cual la reflexión es máxima está dado por:

$$\text{sen } \theta = m \frac{\lambda}{2d}$$

Ecuación 5.2 Reflexión máxima de Bragg.

Cuando  $m=1$  se le denomina ángulo de Bragg para los demás  $m$  existe reflexión pero mínima.

En la Figura 5.6 se va a poder observar con mejor claridad el sector donde se encuentran las ranuras tanto del DFB como del DBR.

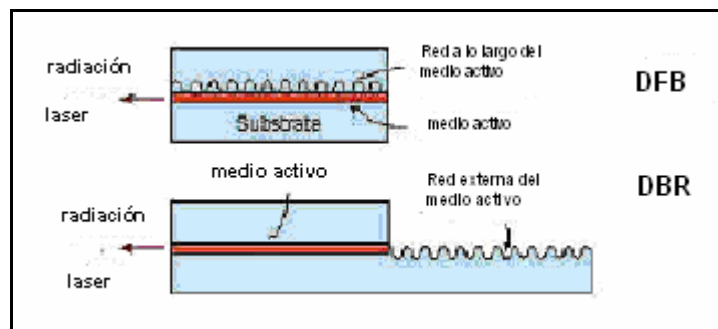


Figura 5.6 DFB Y DBR <sup>3</sup>

### 5.2.2 Detectores

Los receptores ópticos convierten la luz recibida en señales eléctricas; para ser utilizados en un enlace de fibra deben trabajar en la misma ventana que los emisores.

Los detectores ópticos tienen las siguientes características:

- ✓ Sensibilidad.
- ✓ Tasa de errores (BER) Bit Error Rate.
- ✓ Rango Dinámico.

<sup>3</sup> [http://www.tfo.upm.es/docencia/2003\\_04/emisores.pdf](http://www.tfo.upm.es/docencia/2003_04/emisores.pdf)





### 5.2.2.1 Sensibilidad.

La sensibilidad establece la potencia mínima necesaria en el emisor para que el receptor pueda recuperar una señal en una distancia de fibra óptica determinada.

### 5.2.2.2 Tasa de errores (BER=Bit Error Rate).

Es el porcentaje de bits detectados erróneamente ya que durante la conversión de la señal óptica en eléctrica se puede producir errores. En esto se utiliza la característica de sensibilidad puesto que si la señal recibida es menor a esta la tasa de errores será mayor.

### 5.2.2.3 Rango dinámico.

Es la diferencia entre el nivel de potencia máximo y el nivel de potencia mínimo en la que un receptor funciona correctamente. Esto se da debido a que si la potencia transmitida por el emisor es muy baja para la sensibilidad del receptor la tasa de errores será mayor si ocurre lo contrario, la tasa de errores también será alta puesto que se recibirá señales distorsionadas.

### 5.2.2.4 Tipos de detectores

Entre los tipos de detectores ópticos tenemos:

- ✓ Fotodiodo PIN
- ✓ Fotodiodo de Avalancha APD
- ✓ Fototransistores
- ✓ Detectores fotodarlington
- ✓ Detectores PIN-FET e integrados

#### 5.2.2.4.1 Fotodiodo PIN

Son fotodiodos del tipo P – N los cuales tienen una polarización inversa añadiendo un semiconductor intrínseco entre las capas P – N.



Este fotodiodo con arreglo PIN (p-intrínseco-n) viene prevaciado, ya que la región intrínseca carece de las impurezas necesarias para generar corrientes portadoras en la oscuridad

La velocidad y sensibilidad de los fotodiodos PIN son muy adecuadas para la mayoría de las aplicaciones de fibras ópticas y son ampliamente usadas en sistemas de alto desempeño, conectados a preamplificadores electrónicos mejoran la sensibilidad.

#### **5.2.2.4.2 Fotodiodo de Avalancha APD**

Este tipo de detectores, se basan en un proceso tipo avalancha que ayudan a suministrar corrientes superiores lo que permite que no necesite de amplificadores después de la detección, la desventaja que tienen es que son intrínsecamente ruidosos y mas sensibles a la temperatura .

#### **5.2.2.4.3 Fototransistores**

Funcionan igual que un transistor normal la diferencia es que la corriente de base es generada por la luz.

La corriente que ingresa en la unión base-emisor es amplificada, dando un capacidad de respuesta mucho más alta que un simple fotodiodo. Sin embargo, este incremento reduce el tiempo de respuesta y la linealidad, y en algunos casos, genera ruido.

#### **5.2.2.4.4 Detectores fotodarlington**

Son amplificadores tipo darlington integrados, en los que a la salida de un fototransistor es alimentada a la base de un segundo transistor para amplificar la señal.

Al añadirse el segundo transistor se incrementa la sensibilidad, pero disminuye la velocidad y aumenta el ruido.



#### **5.2.2.4.5 Detectores PIN-FET e integrados**

Es un receptor que reúne las funciones de detector y amplificador o preamplificador en un mismo circuito integrado.

El circuito amplifica la señal eléctrica antes del ruido provocado por la resistencia de carga aumentando la potencia de salida.

Este tipo de circuitos también convierten la señal de corriente del fotodiodo en señal de voltaje, de modo que el nivel de voltaje es compatible con etapas de amplificación de la señal.

#### **5.2.4 Multiplexores**

Multiplexan (juntan) o demultiplexan (separan) la potencia óptica de diferentes longitudes de onda

#### **5.2.5 Amplificadores ópticos**

Los amplificadores ópticos aumentan el nivel de la señal óptica internamente, utilizando el principio de la emisión estimulada que es la base de los láser, amplifican un haz de luz débil de ingreso produciendo una señal fuerte de salida.

Un aspecto crítico para el uso de los amplificadores ópticos es su longitud de onda de operación, la cual depende del elemento dopante, y determina su compatibilidad con los sistemas existentes y cómo pueden ser insertados en los sistemas nuevos.

### **5.3 Modulación**

Dentro de un sistema de comunicación de cualquier tipo deben modularse las señales que se transmiten en fibra óptica los tipos de modulación dependen de la señal moduladora de los transmisores pudiendo ser analógica o digital.



### 5.3.1 Modulación Analógica

Es la señal analógica modulada a la portadora óptica en intensidad (IM), esto se realiza variando la amplitud de la corriente al nivel de polarización elegido.

Las señales pueden transmitirse:

- ✓ Modulando en banda base (D-IM)
- ✓ Con una subportadora eléctrica modulada en amplitud (AM-IM)
- ✓ Con una subportadora eléctrica modulada en frecuencia (FM-IM) o en fase (PM-IM)
- ✓ Modulando un tren de impulsos, que actuará como subportador, en amplitud, duración, posición, etc. y luego éste modulará el haz luminoso.

Como las fuentes ópticas tienen la característica de no linealidad afectan a la calidad de transmisión especialmente con LEDs con modulaciones D-IM y AM-IM; esto obliga a operar con índices de modulación bajos obteniendo poca potencia de la señal. Esto repercute en una limitación de la distancia a la que se ubique la sección de regeneración de la señal. El láser puede mejorar esto pero requiere de dispositivos especiales; la ventaja de esta solución es el pequeño ancho de banda requerido.

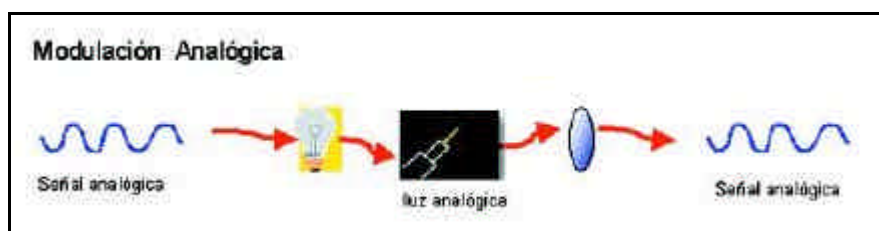


Figura 5.7 Modulación Analógica

El empleo de la modulación FM-IM o PM-IM tiene menor influencia de la falta de linealidad de la fibra óptica pero necesita un mayor ancho de banda.

En la figura 5.7 se puede observar como se modula la señal mediante luz analógica.

El comportamiento del sistema cuando se emplea un tren de impulsos para modular el haz de luz es muy similar al de las señales digitales, que permiten la



transmisión de una potencia mayor al dejar de ser importantes las exigencias de linealidad para transmitir impulsos.

### 5.3.2 Modulación Digital

La modulación digital aporta una gran inmunidad al ruido, aunque a costa de un mayor ancho de banda, lo que determina su empleo preferente en las transmisiones ópticas. Además, como se ha dicho antes, los sistemas digitales permiten el empleo de una mayor potencia de emisión. En particular, las señales PCM (MIC) se muestran especialmente indicadas para la transmisión por sistemas ópticos.

En la Figura 5.8 se puede observar un esquema de modulación digital.

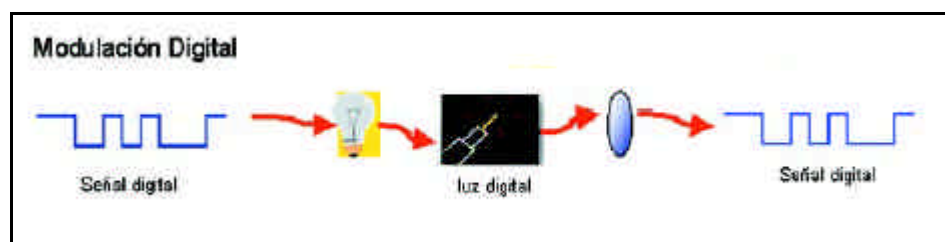


Figura 5.8 Modulación Digital

Se puede utilizar moduladores externos al mismo, lo que se conoce como Modulación electro-óptica. El empleo de moduladores externos superan los problemas de inestabilidad, ruido y degradación de las características espectrales que los LD presentan a grandes velocidades.

### 5.3.3 Modulador electro óptico

Es una guía de ondas óptica de un material adecuado como el niobato de litio o galio arsénico (GaAs) con una estructura de control formada por electrodos.

Al aplicar una tensión a los electrodos se produce un cambio en la fase de la señal o un efecto de acoplamiento modal en la onda, este efecto se puede



modular en fase, amplitud, cambio de polarización o conversión de frecuencia empleando geometrías adecuadas.

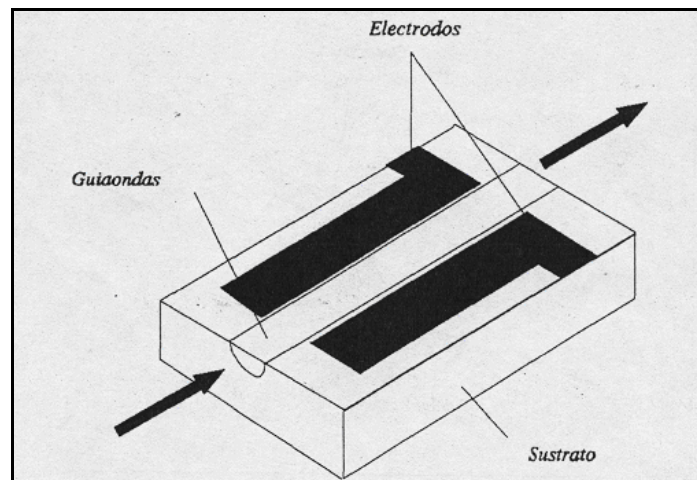


Figura 5.9 Modulador electro óptico

El modulador de fase de la figura 5.9 aplica una tensión a los electrodos de control donde el campo eléctrico modifica el índice de refracción del sustrato dando lugar a un cambio de fase de la señal.

Para modular en amplitud se aplican campos eléctricos de signo contrario donde en las ramas de la fibra se consiguen dos señales desfasadas con relación a la entrada respectivamente; estas señales sumadas a la salida dan como resultado una señal de la misma fase pero de diferente amplitud como podemos observar en la figura 5.10

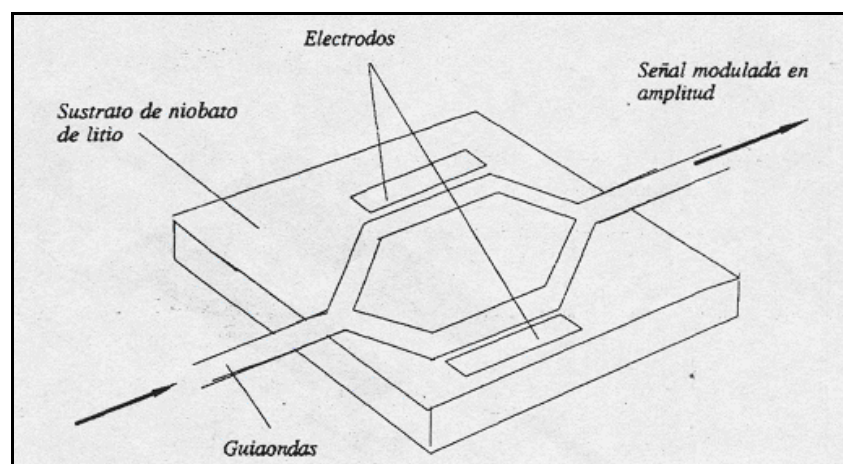


Figura 5.10 Modulador de amplitud.



## 5.4 Multiplexación

La multiplexación consiste en transmitir varias fuentes de información por un mismo canal de comunicación como se muestra en la Figura 5.11.

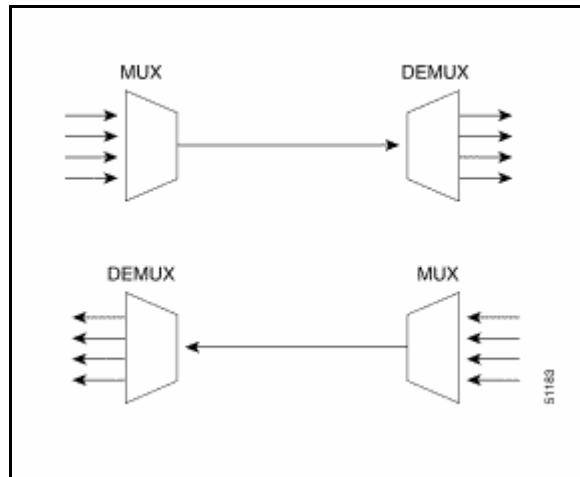


Figura 5.11 Multiplexación

La principal ventaja de la multiplexación es reducción de costos minimizando el número de enlaces entre dos puntos.

Existen varias técnicas de multiplexación que son:

- ✓ Multiplexación por división de tiempo (TDM)
- ✓ Multiplexación estadística por división de tiempo (STDM)
- ✓ Multiplexación por división de onda (WDM)
- ✓ Multiplexación por división de onda densa (DWDM)

### 5.4.1 Multiplexación por división de tiempo (TDM)

En este tipo de Multiplexación se aumenta la capacidad de transmisión de un enlace dividiendo el tiempo en intervalos mas pequeños de manera que los bits de las múltiples entradas se puedan transportar aumentando el número de bits transmitidos por segundo

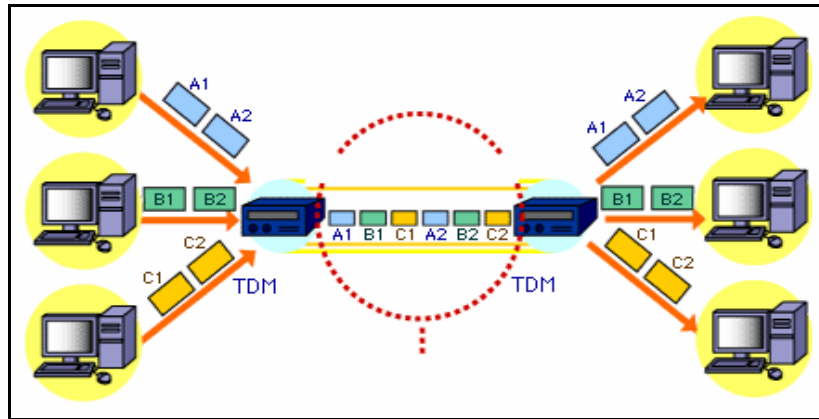


Figura 5.12 Multiplexación TDM

Como se observa en la Figura 5.12 tenemos tres canales distintos los cuales son multiplexados en un solo canal de tal manera que cada determinado tiempo ingresa un paquete de información de distinto canal en orden serial denominado método round-robin. La desventaja de este método ocurre cuando un canal este vacío ya que se pierde el intervalo de tiempo que hay para ese canal, esto se elimina en la multiplexación STDM la cual da una prioridad al canal que tiene mas número de paquetes a enviar.

#### 5.4.2 Multiplexación por división en longitud de onda (WDM)

Es una tecnología óptica que utiliza diferentes longitudes de onda para transmitir dos o más flujos de información sobre una misma fibra de manera simultánea en el mismo sentido u opuesto como se muestra en la Figura 5.13.

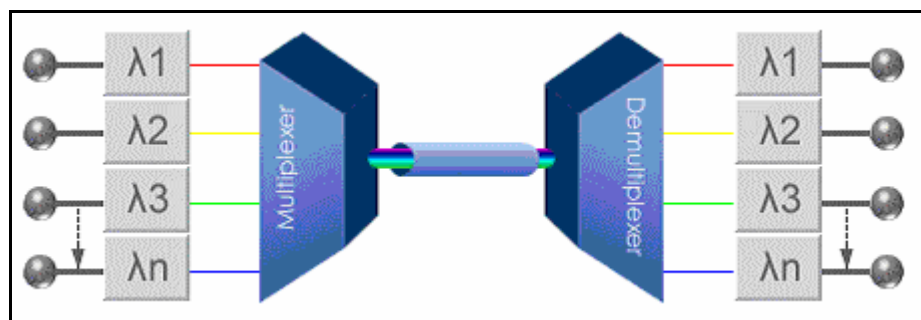


Figura 5.13 WDM

Con este tipo de multiplexación se aumenta la capacidad de transmisión en cables de fibra óptica por ejemplo la multiplexación densa de longitud de onda





puede transportar 80 canales separados de datos por un solo cable usando diversas longitudes de onda.

La multiplexación WDM presenta las siguientes ventajas:

- ✓ Aumenta la capacidad del enlace, multiplicando el valor inicial por el número de longitudes de onda multiplexados.
- ✓ El formato de modulación de las señales multiplexadas no necesita ser el mismo.
- ✓ La multiplexación no divide la potencia entre los canales multiplexados
- ✓ Aumenta la flexibilidad del sistema al aplicarse a flujos de información en sentidos opuestos

Entre las desventajas de este tipo de multiplexación podemos citar la degradación de la sensibilidad del receptor a causa de la diafonía óptica entre canales, causado sobre todo por superposición de los espectros de las fuentes usadas y reflexiones.

**DWDM** utiliza longitudes de onda de menos espacio que WDM lo que hace que tenga una capacidad global mayor de multiplexación, otra característica de DWDM es que puede amplificar todas las longitudes de onda en una sola vez sin necesidad de convertirlas en señales eléctricas; además puede transportar señales de diferentes velocidades y tipos a la vez.

En DWDM se utiliza fibra óptica monomodo ya que la fibra multimodo solo puede diferenciar 3 longitudes de onda.

#### **5.4.2.1 Componentes empleados en la multiplexación**

En lo que se refiere a componentes que se emplean en la multiplexación pueden ser activos o pasivos.

Dentro de los componentes activos tenemos las fuentes y los detectores, también se pueden utilizar un transductor E/O u O/E que llegan al correspondiente multiplexor o demultiplexor óptico.



Los dispositivos pasivos se pueden clasificar en dos:

- ✓ Dispositivos microópticos
- ✓ Dispositivos de fibra

#### **5.4.2.1.1 Dispositivos micro ópticos**

Como dispositivos micro ópticos se utilizan prismas aprovechando el cambio de índice de refracción con la longitud de onda.

También se utilizan las redes de difracción cuyo rendimiento depende de la longitud de onda.

La composición de este tipo de componentes es una retícula de difracción la cual es utilizada para separar luz en sus diferentes longitudes de onda los tipos más comunes de retículas comprenden lentes biconvexas o bien de índice gradual.

Otro componente micro óptico utilizado es el filtro interferencial utilizado para separar una línea del resto del conjunto espectral.

Uno de estos filtros es el poligonal en el que en cada cara interna de un polígono se aloja un filtro de diferente banda de paso accediendo una fibra a cada uno de ellos seleccionándose las bandas de paso en cada una de las reflexiones.

Otro filtro interferencial es el dicróico el cual está formado por dos lentes que pueden ser de índice gradual en los que se inserta un espejo del mismo tipo.

Al momento de saber que dispositivo utilizar se debe tener muy en cuenta el campo de acción en el que se utilizan así las redes de difracción se utilizan con fibra multimodo y los filtros interferenciales en fibras monomodo esto es por la capacidad de resolución.



### 5.4.2.1.2 Dispositivos de fibra

Dentro de este tipo de dispositivos se encuentran los acopladores que transfieren potencia óptica entre fibras, son intrínsecamente selectivos a la longitud de onda.

Se utilizan dos técnicas de acoplamiento la de **trenzado y fusión** en donde las fibras se trenzan, se calientan hasta fundir y se estiran para producir un estrechamiento hasta poner en contacto los dos núcleos. La otra técnica es la del **acoplador pulimentado** en el cual se utiliza un bloque acoplador en el que las dos fibras se fijan dentro de hendiduras curvas talladas en sendos bloques de cuarzo.

Los acopladores encuentran aplicación inmediata para la construcción de redes en estructura de bus existiendo dos posibilidades como se muestra en la Figura 5.14:

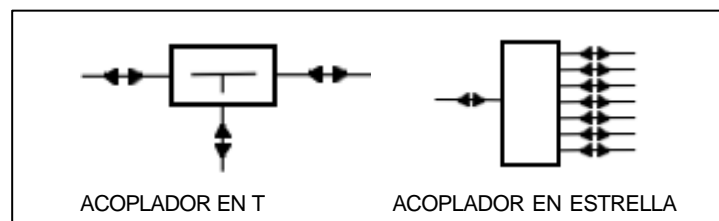


Figura 5.14 Acopladores

- ✓ Estructura con acopladores en T
- ✓ Estructura con acopladores en Estrella

El acoplador en T extrae la luz de un haz y la inyecta hacia dos salidas, mientras que el acoplador en estrella puede representarse por una matriz de  $M \times N$  puertas de entrada y salida.

En acopladores en T las pérdidas crecen según el número de terminales en cambio en acopladores en estrella la pérdida es en forma logarítmica.

En cuanto a los acopladores en estrella, pueden ser de tipo transmisivo o reflexivo; en ambos casos, las señales que proceden de las fibras de entrada se mezclan en el acoplador, dividiéndose por igual en las fibras de salida.



## 5.5 Ruidos

En todo sistema de comunicaciones existen interferencias o alguna fuerza contraria a estos sistemas que hace que el porcentaje de datos que trasladan del transmisor al receptor no sea del 100 %.

Se define como ruido a señales extrañas a la transmisión de datos que llegan a degenerarla.

En fibra óptica se puede llegar a degenerar la señal por las siguientes causas:

- Atenuación
- Dispersión

Estos dos temas fueron tratados en el ítem 2.5.2 y 2.53.

La Tabla 5.3 nos muestra los tipos de ruido que se presentan en un enlace de fibra óptica:

Ruido	Provocado por	Tipo de fibra	Perdida	Características
Dispersión Modal	Modos de pulso	Fibra multimodo		No se puede evitar en la fibra MM. Es menor en la de índice gradual
Dispersión Cromática	Material de la fibra Guía de onda	Todo tipo de fibra		No se puede evitar. Por fabricación se puede lograr que ese punto quede en una ventana específica. (DSF)
Absorción Infrarroja y ultravioleta	Interacción entre fotones y moléculas que viajan por la fibra			La infrarroja se provoca en la 2da y 3ra ventana La ultravioleta en la 1ra ventana
Esparcimiento Rayleigh	Presencia de centro de difracción en la fibra.			
Atenuación por tramo	Características de fabricación de la fibra	Todo tipo de fibra	3 dB/Km Multimodo	
Pérdida por impurezas	Fabricación de la fibra y pueden ser de naturaleza metálica como:			Se pueden controlar las impurezas metálicas.




	hierro, cromo, cobalto y níquel y los iones hidroxilo (OH).			
Pérdidas por curvatura	se le da a la fibra una curvatura excesivamente pequeña ; por el aumento de temperatura	Todo tipo de fibra tiene un ángulo mínimo de curvatura		Se puede evitar teniendo cuidado en la instalación de la fibra.
Atenuación por empalme	Variación del índice de reflexión	Todo tipo de fibra por lo conectores, y empalmes	01 dB 2 dB	Al momento de empatar la fibra se debe realizar con mucho cuidado para no aumentar la pérdida promedio
Pérdida por Inserción	Instalación de conectores	Todo tipo de fibra y se la muestra con el siguiente gráfico	0.2 dB	Viene dado por la fórmula $IL(dB) = -10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}}$
Pérdida por retorno	Instalación de conectores		0.2 dB	Viene dado por la fórmula $RL(dB) = -10 \log_{10} \frac{P_{refl}}{P_{in}}$

Tabla 5.3 Diferentes tipos de ruidos que existen en la fibra óptica

## 5.6 Diseño de un enlace por fibra óptica

Se empieza por determinar los requerimientos del sistema tales como: ancho de banda, velocidad de transmisión, distancia del enlace, etc.

Dependiendo de los requerimientos se escogerán los elementos idóneos disponibles como: transmisores, receptores, fibra óptica, conectores y tipos de empalme.

Dado estos electos se deben considerar las siguientes variables:

- ✓ Fuente de luz: potencia de salida, ancho espectral, tiempo de respuesta, pérdida de acoplamiento.
- ✓ Detector óptico: sensibilidad, rango dinámico, ancho de banda, BER
- ✓ Fibra óptica: tipo, atenuación, dispersión, apertura numérica, longitud de onda.
- ✓ Atenuación en empalmes, conectores y acopladores.
- ✓ Costos.



### 5.6.1 Presupuesto de Potencia

Aquí se debe determinar la potencia requerida en el transmisor de manera que la potencia que llega al receptor con el BER o S/N deseados.

Se define como:

**Potencia del transmisor – Nivel de potencia a la entrada del receptor = Pérdidas + Margen.**

El margen es una potencia de seguridad que permitirá degradaciones del sistema como por ejemplo degradaciones del transmisor, empalmes o pequeñas roturas del cable.

Se deben tomar en cuenta todos los tipos de pérdida que se presentan en la fibra, conectores, empalmes, acopladores.

### 5.6.2 Cálculo de la distancia entre regeneradores

Se puede calcular bajo los siguientes criterios:

- ✓ La máxima atenuación que permite el sistema
- ✓ Dispersión temporal máxima que el sistema admite para una tasa de error admisible

#### 5.6.2.1 Criterio de la máxima atenuación que permite el sistema

Se puede calcular con la siguiente fórmula

$$P_F \left[ M_E + 2a_c + Na_E + M_c \prod_{i=1}^{n+1} a_i \right] = S_O + S + P_P$$

Ecuación 5.3 Cálculo de distancia de regeneradores 1

Donde:

$P_F$  = Potencia inyectada en la fibra. Variable aleatoria.

$M_E$  = Margen del equipo (6 a 8 dB). Variable aleatoria.

$S_O$  = sensibilidad del receptor para una velocidad y una tasa de error determinadas.

$a_c$  = atenuación por conector



$N$  = número de empalmes

$a_E$  = atenuación por empalme

$M_C$  = Margen de seguridad del cable

Se suelen tomar los siguientes datos:

- 2dB para una longitud menor a 20 Km.
- 2dB + (L - 20) Km. \* 0.1 dB/Km. para L > 20 Km.

$L$  = Longitud total del cable entre regeneradores

$\Delta S$  = Penalización por interferencia entre símbolos

$l_i$  = Distancia entre los empalmes

$P_p$  = Pérdida por partición de modos

$a$  = 0.36 dB/Km.

De esta función tenemos la siguiente fórmula:

$$L = \frac{P_F (M_E + 2e_c + Na_E + M_C) So + S + P_p}{a}$$

Ecuación 5.4 Cálculo de distancia de regeneradores 1.1

Un análisis de esta fórmula nos llevaría a considerar los siguientes valores más desfavorables como son:

$$\Delta S + P_p = 1$$

$$M_E = 8$$

$$M_C = 4$$

Dado estos resultados la fórmula quedaría

$$L_{max} = \frac{P_F \cdot 8 + 2e_c + Na_E + 4 + So + (S + P_p)}{a}$$

Ecuación 5.5 Cálculo de distancia de regeneradores 1.2

$$L_{max} = \frac{P_F + 2e_c + Na_E + So + 13}{a}$$

Ecuación 5.6 Cálculo de distancia de regeneradores 1.3<sup>4</sup>

<sup>4</sup> [http://lcd.efn.uncor.edu/frames/publicaciones/archivos/lcd\\_0004.pdf](http://lcd.efn.uncor.edu/frames/publicaciones/archivos/lcd_0004.pdf)



### 5.6.2.2 Criterio de la máxima dispersión

Viene dado por la limitación del ancho de banda que es posible transmitir por la dispersión, teniendo el ancho de banda a transmitir tenemos la siguiente fórmula:

$$s(\text{ns}) = \frac{0.187}{B(\text{GHZ})}$$

Ecuación 5.7 Cálculo de la distancia de regeneradores 2

Si no se dispone del ancho de banda se utiliza la relación

$$s(\text{ns}) = \frac{K_0}{R(\text{Mbps})}$$

Ecuación 5.8 Cálculo de la distancia de regeneradores 2.1

Donde  $K_0$  está entre 200 y 300 para fibra multimodo, y debe reducirse hasta 100 para fibra monomodo en sistemas de gran capacidad.

$$\left[ \sigma_m^2 + (\sigma_e + \sigma_g)^2 \right]^{1/2} \leq \frac{0.187}{B} = \frac{K_0}{R}$$

Ecuación 5.9 Cálculo de la distancia de regeneradores 2.2

Donde:

B (en GHz) es el ancho total del sistema

R (en Mbps) es la velocidad.

$s_m$  = dispersión modal

$s_c$  = dispersión espectral, intramodal o del material.

$s_g$  = dispersión por efecto guíaondas

En fibras multimodo la dispersión de guía de ondas es despreciable por lo que se tiene la siguiente fórmula





$$0,187 * \frac{L^{1/2}}{B_0} + M(?) * \frac{L^y}{2.35} = \frac{K_0}{R}$$

Ecuación 5.10 Cálculo de la distancia de regeneradores 2.3

Siendo  $M(?)$  el coeficiente de dispersión del material en ps/Km.\*nm,  $A?$  el ancho espectral de la fuente entre puntos al 50%,  $L$  la longitud máxima de la sección a calcular en Km. y  $y$  el factor de concatenación.

En la fibra multimodo de índice escalonado el factor predominante es la dispersión modal por lo que la fórmula queda:

$$\frac{0.187 * L^{1/2}}{B_0} = \frac{K_0}{R}$$

Ecuación 5.11 Cálculo de la distancia de regeneradores 2.4

El parámetro  $0,187 / B_0$  es la dispersión modal unitaria  $s_{mo}$  por lo que la fórmula es.

$$s_{mo} * L^{1/2} = \frac{K_0}{R}$$

Ecuación 5.12 Cálculo de la distancia de regeneradores 2.5

$$L^{1/2} = \frac{K_0}{s_{mo} R}$$

Ecuación 5.13 Cálculo de la distancia de regeneradores 2.6

En la fibra multimodo de índice gradual tenemos la siguiente fórmula:

$$L_{max} = \left( \frac{0.187}{B} \right)^{1/y} \leq \left( \frac{K_0}{R * \sigma_{mo}} \right)^{1/y}$$

Ecuación 5.14 Cálculo de la distancia de regeneradores 2.7

En este tipo de fibra se puede tomar el valor  $y = 0.75$



## 5.7 Tecnologías de redes WAN que utilizan fibra óptica

En cuanto a tecnologías de redes WAN que utilizan fibra óptica tenemos: SDH, SONET, FDDI, entre otras.

### 5.7.1 SONET y SDH

SONET (Synchronous Optical Network) Y SDH (Synchronous Digital Hierarchy) son estándares para el transporte óptico de datos TDM en fibra, el primero utilizado en Estados Unidos y el segundo en Europa.

Estos estándares toman varios flujos de bits, los multiplexan, modulan la señal ópticamente y envían mediante un dispositivo emisor de fibra cuya velocidad de transmisión es igual al número de flujos o canales existentes por la velocidad que tiene cada uno de ellos, esto lo podemos observar en la Figura 5.15

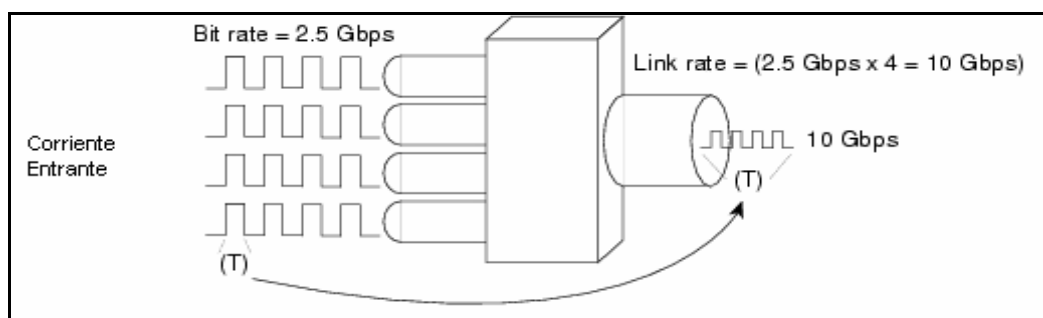


Figura 5.15 SONET TDM

En este estándar la unidad utilizada es de 64 kbps equivalente a una llamada, con multiplexación TDM se pueden enviar en un solo canal 24 en Estados Unidos y 32 en Europa con una velocidad de 1,544 o 2,048 Mbps respectivamente.

En la Tabla 5.3 se puede ver la jerarquía de múltiples llamadas telefónicas.



Señal	Velocidad	Canales de voz
DS0	64 Kbps	1 DS0
DS1	1,544 Mbps	24 DS0
DS2	6,312 Mbps	96 DS0
DS3	44,736 Mbps	28 DS1

Tabla 5.3 Jerarquía de llamadas telefónicas

En la Tabla 5.4 la tecnología SONET/SDH se puede comparar jerárquicamente con la Tabla 5.3.

Canal óptico	Señal SONET	Velocidad	Capacidad
OC-1	STS-1	51,84 Mbps	1 DS3
OC-3	STS-3/STM-1	155,52 Mbps	3 DS3
OC-12	STS-12/STM-4	622,08 Mbps	12 DS3
OC-48	STS-48/STM-16	2488,32 Mbps	48 DS3
OC-192	STS-192/STM-64	9953,28 Mbps	192 DS3

Tabla 5.4 Jerarquía SONET / SDH <sup>5</sup>

SONET/SDH tiene desventajas puesto que no existen nociones de prioridad y congestión haciendo la jerarquía de multiplexación rígida, es ineficiente también al momento de transportar datos puesto que es una tecnología para tráfico de voz.

### 5.7.2 FDDI

FDDI (Interfaz de datos distribuidos por fibra) opera a 100 Mb/s utilizando fibra óptica multimodo a 1310 nm y transmisores basados en leds.

La utilización mas común de FDDI es en backbone para conectar redes LAN entre si.

FDDI utiliza 2 anillos con transmisión de token como se puede ver en la figura 5.16 en el cual existen estaciones clase A (DAS) que se conectan a los dos anillos y estaciones clase B (SAS) que se conectan a un anillo.

<sup>5</sup> <http://www.monografias.com/trabajos10/sonet/sonet.shtml>

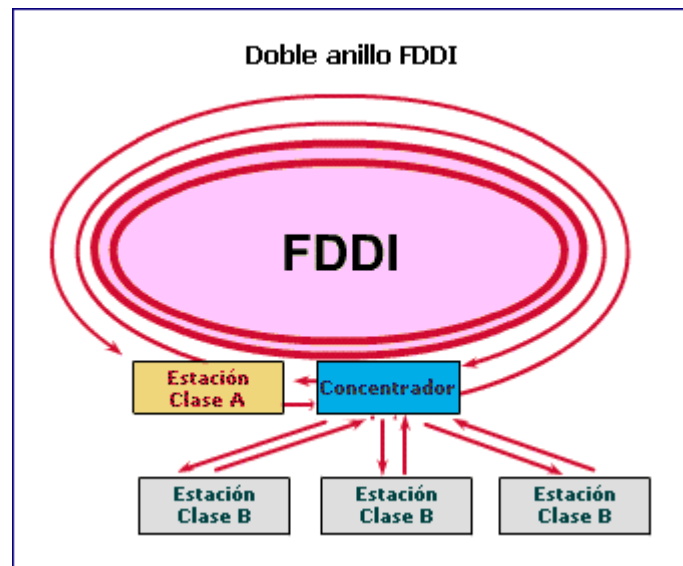


Figura 5.16 FDDI

### 5.7.3 ATM

En ATM (Modo de transferencia asíncrono) se utiliza la multiplexación STDM teniendo límites en cuanto a la velocidad que se puede alcanzar por las celdas ATM y el reensamblaje (SAR) que componen los paquetes de datos.

Adecuada en entornos LAN y WAN soportando muchos servicios por un solo medio; su principal ventaja es el manejo de QoS (Calidad de Servicio).

Las características más importantes de ATM son:

- ✓ Capacidad de integración de diversos tipos de tráfico
- ✓ Asignación dinámica y flexible del ancho de banda
- ✓ Optimización entre caudal y latencia
- ✓ Optimiza la relación entre la suma de las velocidades de pico de las fuentes y la velocidad de enlace.

ATM es un medio de transferencia de datos basado en celdas de longitud física usando un método orientado a conexión, utilizando canales virtuales.



#### **5.7.4 Gigabit Ethernet**

Esta tecnología permite la migración y la integración con Ethernet, posee un gran ancho de banda el cual es 1000 Mb. por segundo; este tipo de tecnología como se basa en ethernet usa su misma técnica CSMA/CD, su mismo formato y tamaño de frame operando a 1000 Mbps.

Los últimos avances de la tecnología es 10 Gigabit Ethernet se presenta por la necesidad de internconectar las redes LAN que trabajan a 10, 100 y 1000 Mbps de ethernet.

Se puede utilizar también DWDM en gigaethernet siempre y cuando se utilice fibra óptica 1000 base lx, además usando láser de 1550 nm se pueden alcanzar distancias de 40 a 80 Km.

Ethernet ofrece las ventajas técnicas de una tecnología comprobada, fiable y sencilla. Las implementaciones son estándar e ínter operables, y a un coste muy inferior que SONET y ATM. Arquitecturalmente la ventaja de ethernet es su potencial emergente para servir una solución escalable y extremo a extremo.

#### **5.8 Aplicaciones de los sistemas de transmisión ópticos**

En cuanto a aplicaciones de sistemas de transmisión ópticos tenemos enlaces punto – punto, redes de distribución y difusión, redes LAN.

##### **5.8.1 Enlaces Punto – Punto**

Transportan señales ópticas de un lado hacia otro independientemente de la distancia a que se encuentren; ejemplo de este tipo de enlaces son:

- ✓ Enlaces entre computadoras dentro de un edificio o dos
- ✓ Sistemas ópticos marinos que unen continentes



Cuando la longitud excede de los 100 Km. como en el último caso; es necesaria la utilización de amplificadores, repetidores o regeneradores de la señal óptica.

Es necesario saber que se va a utilizar para la generación de la señal óptica en cuanto al uso de amplificadores estos no pueden escalonarse indefinidamente ya que a medida que amplifican la señal también amplifican la dispersión limitando el desempeño del sistema; por el contrario los regeneradores de señal reconstruyen el flujo de bits original y nuevamente se envía a través de la fibra hasta llegar a otro regenerador; esto se puede hacer las veces que sea necesario como se puede observar en el siguiente gráfico:

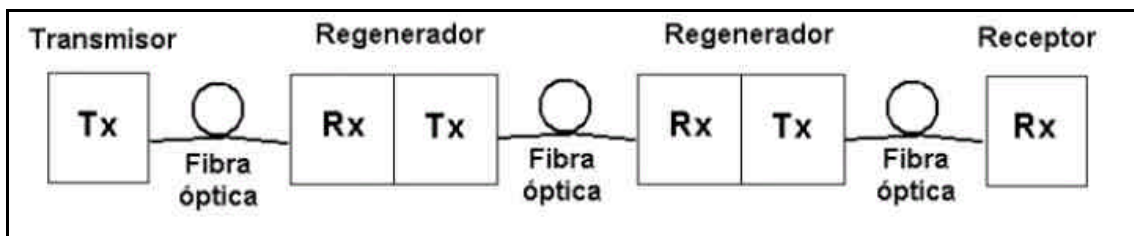


Figura 5.17 Enlace punto a punto con regeneradores

### 5.8.2 Redes de distribución y difusión

Existen muchas aplicaciones en donde la información a más de ser transmitida debe ser distribuida a un grupo de usuarios como son:

- ✓ Distribución de servicios de telecomunicaciones
- ✓ Difusión de canales de video por televisión por cable
- ✓ La red digital de servicios integrados

Las distancias de transmisión son menores a 50 Km. y la velocidad de los datos llega hasta 10 Gbps.

Existen dos topologías utilizadas la de hub y bus; en la topología de hub el canal de distribución toma lugar en las centrales; en el otro caso un solo canal lleva una señal óptica multicanalizada como se puede observar en la figura 5.18.

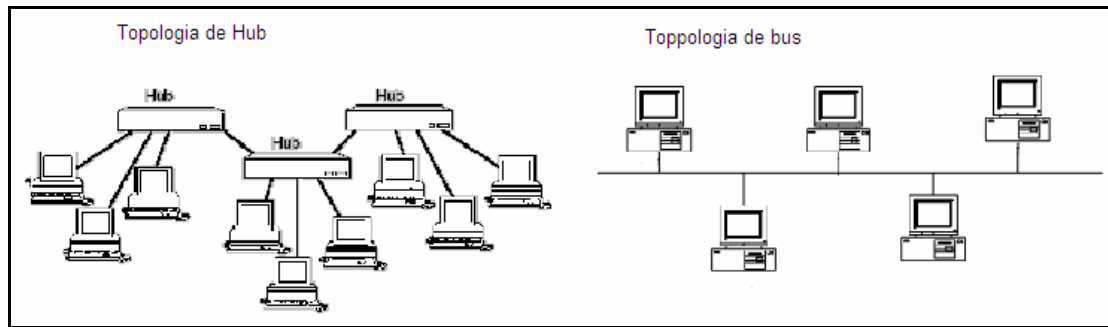


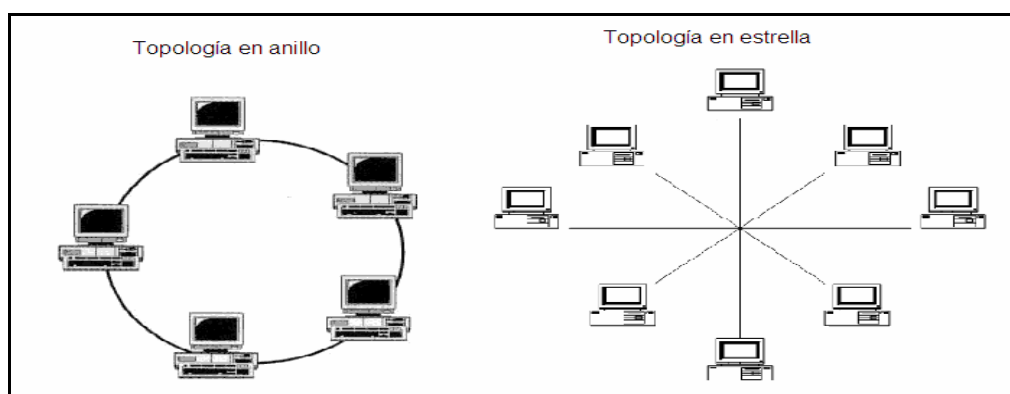
Figura 5.18 Topología de hub y bus

### 5.8.3 Redes LAN

Cuando la distancia a que se conectan los equipos mediante fibra óptica son pequeñas por ejemplo menores a 10 Km. se habla de redes LAN. En este tipo de redes existen tres topologías la de bus, la de anillo y la de estrella que se explican con la Figura 5.19.

En la topología en anillo cada nodo puede recibir y transmitir datos utilizando un transmisor – receptor; por el anillo recorre un token donde cada nodo lo monitorea para escuchar su propia dirección y recibir la información.

En la topología en estrella los nodos están conectados a través de enlaces punto a punto desde un nodo central; en fibra óptica se utilizan los acopladores.

Figura 5.19 Topología en anillo y estrella<sup>6</sup>

<sup>6</sup> <http://informatica.uv.es/it3guia/FT/cap4-ft-lan.pdf>