

REDES ADMINISTRATIVAS

UNIDAD 2: REDES OPTICAS DE TRANSPORTE

CLASE 4 Multiplexación WDM CWDM DWDM FDDI

Bienvenidos a la clase 4, en esta ocasión continuamos viendo las redes ópticas de transporte.

La tecnología conocida como Multicanalización por división de longitud de onda (WDM), es hoy uno de los temas de mayor interés dentro del área de la infraestructura de redes ópticas, debido a la necesidad cada vez más creciente de ampliar las capacidades de transmisión en las redes de telecomunicaciones.

Esta tecnología multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda, usando luz procedente de un láser o un LED.

FOTONICA

Actualmente, se está llegando a los límites de miniaturización de los circuitos electrónicos.

Además, el límite de la conmutación electrónica se estima en 50 giga bits por segundo.

Se necesitan velocidades de Terabits por segundo para acomodar el rápido crecimiento de la Red Internet y su demanda de ancho de banda. Por lo que las tecnologías basadas en la multiplexación por división de tiempo (TDM) usada en la mayor cantidad de redes por fibra óptica se hace muy costosa para alcanzar el crecimiento de tráfico demandado.

Las redes ópticas sincronizadas SONET y la jerarquía Digital Sincronizada (SDH), operan a 40 giga Bits por segundo en su mayor capacidad y tienen limitaciones en las fuentes de rayos láser.

El enlace por fibra óptica permite más ancho de banda que el de cable.

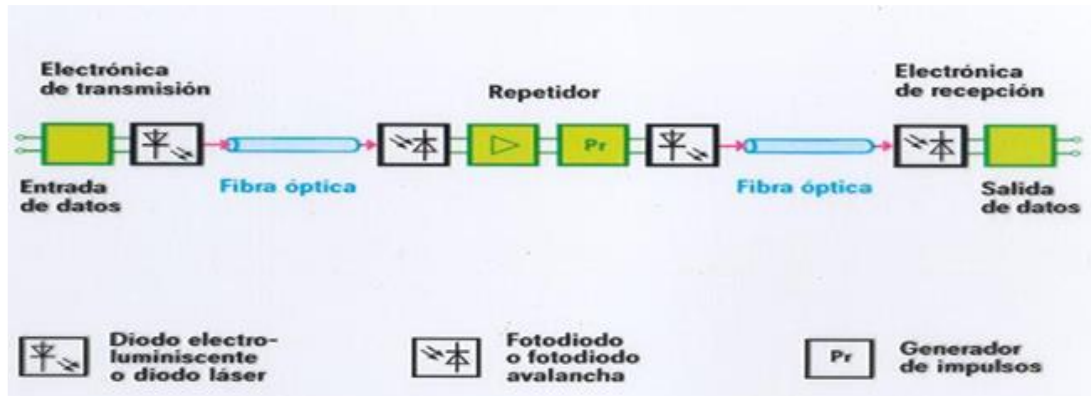


figura 1 tecnología optoelectrónica.

El procesamiento electrónico de la señal siempre se tiene:

- al procesar la señal de información en el transmisor
- al crear la señal óptica
- al regenerar la señal en el repetidor
- al procesar la señal en el receptor

Se pretende que la señal tenga el menor ancho de espectro posible.

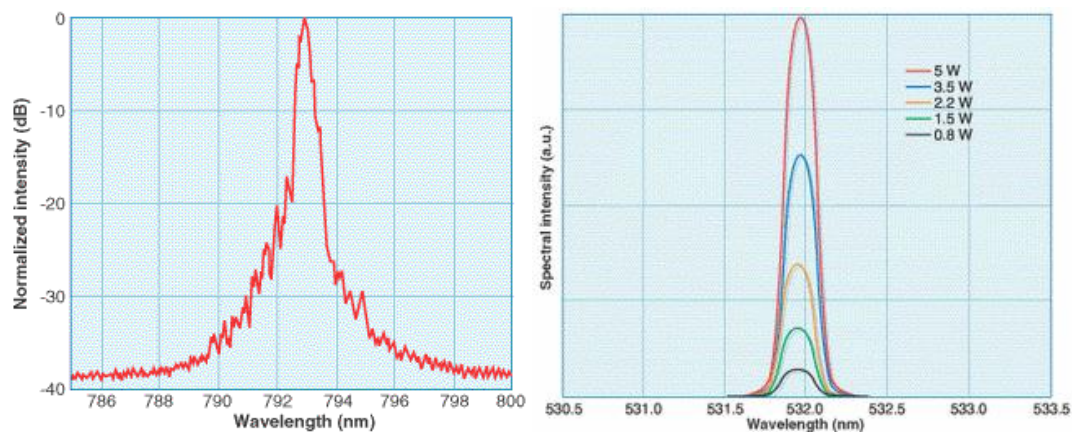


figura 2 Diodo Laser

Existen distintas clasificaciones de las fibras ópticas de acuerdo con su aplicación. Puede ser según el modo de propagación, según el índice de refracción y también según los materiales de fabricación como plástico y de **SiO₂** con distintos materiales dopantes como B₂O₃, GeO₂ o P₂O₅).

En el siguiente esquema se resumen distintos tipos de fibra óptica.

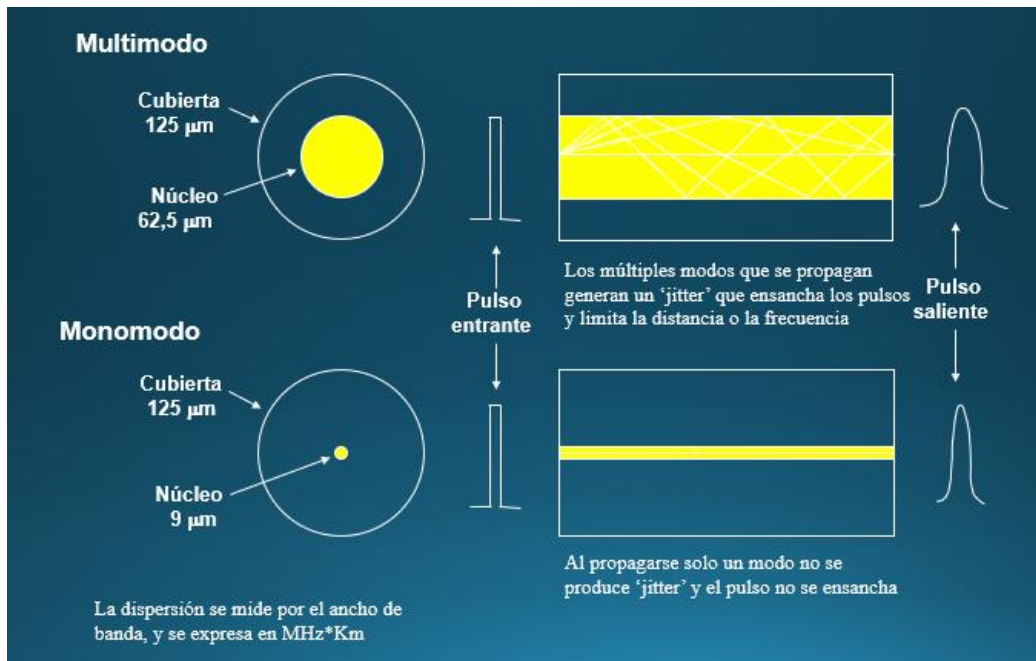


figura 3 tipos de fibra óptica

DISPERSION CROMATICA

La velocidad de la luz en el vidrio depende de su índice de refracción. El índice de refracción depende de la longitud de onda, por lo que las diferentes componentes de un pulso viajan a diferente velocidad (las frecuencias mayores viajan más rápido. Como consecuencia de esto el pulso se ensancha.

Para atenuar este efecto se han desarrollado en los últimos años fibras especiales:

- DSF (Dispersion Shifted Fiber)
- NZDS (Non-Zero Dispersion Shifted)
- DCF (Dispersion Compensating Fiber)

El efecto de la dispersión cromática es más importante cuanto mayor es la frecuencia de los pulsos (es decir, la tasa en bits/s) y la distancia física que la señal ha de recorrer en la fibra.

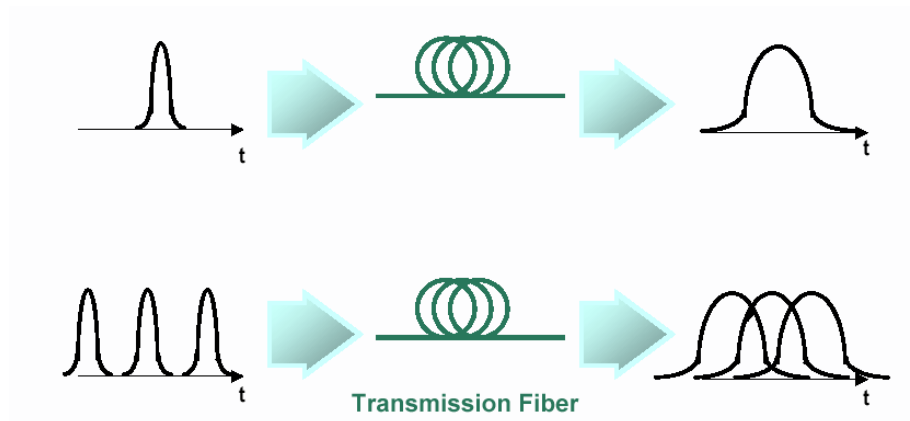


figura 4 frecuencia y distancia de la señal

El efecto de la tasa de bits en la dispersión no es lineal. La dispersión aumenta con el cuadrado de la tasa de bits.

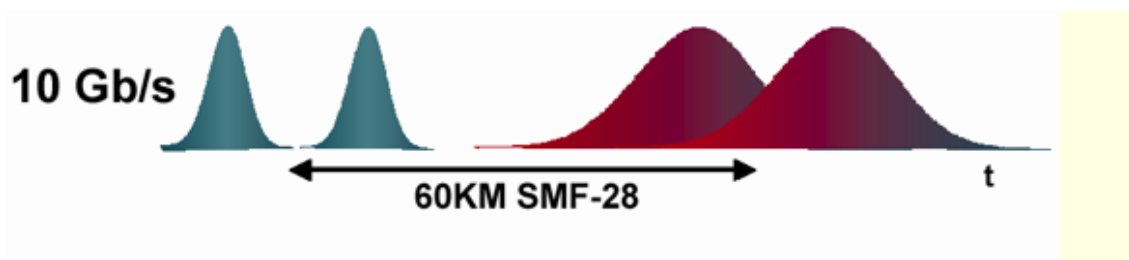
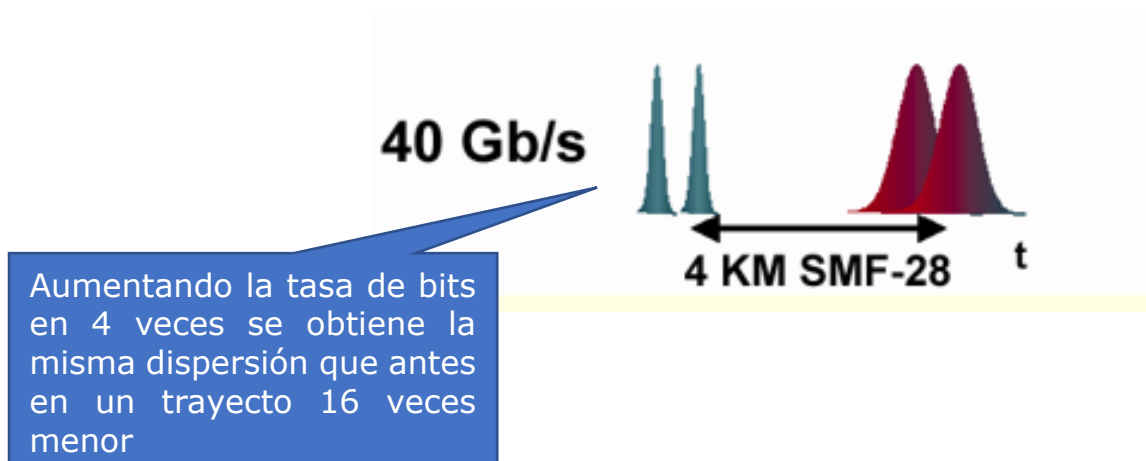


figura 5 Dispersión no lineal



ATENUACION SEGÚN LA LONGITUD DE ONDA

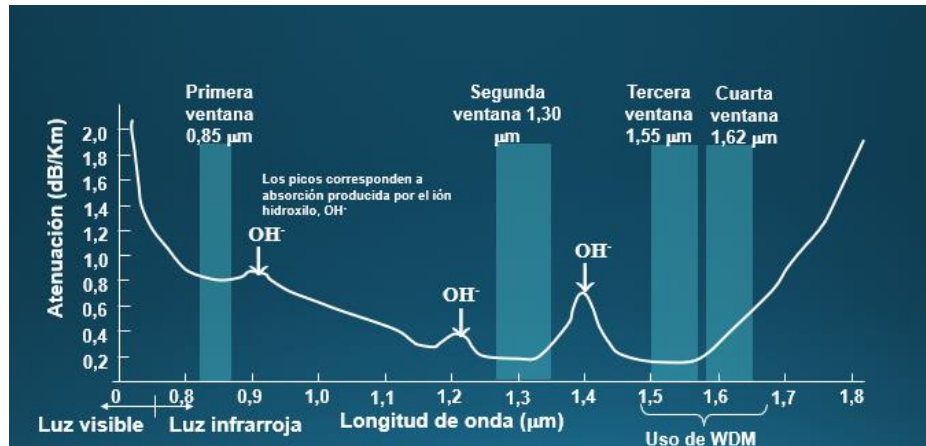


figura 6 Atenuación en fibra óptica

Aquí se puede observar la atenuación de la fibra óptica en función de la longitud de onda. Como se indica en la figura las crestas que aparecen se deben a la absorción debida al ion hidroxilo, OH⁻. A medida que las técnicas de fabricación de fibra óptica van mejorando la altura de esas crestas disminuye.

Se espera que en el futuro se pueda reducir la cresta de 1,4 micras, lo cual permitirá ensanchar la segunda y tercera ventana.

VENTANAS DE LA FIBRA OPTICA

La fibra óptica no es igualmente transparente a todas las λ (longitudes de onda); hay cuatro ventanas en las que es más transparente:

Ventana	λ (nm)	Atenuac.(dB /Km)	Alcance (Km)	Costo opto-electrónica	Usos
1*	820 900	2,3	2	Bajo	LAN (GE)
2* (banda S)	1280 1350	0,5	40	Medio	LAN (GE, 10GE), WAN (SONET)
3* (banda C)	1530 1565	0,28	180	Elevado	LAN (GE, 10GE), WAN (SONET, WDM)
4* (banda L)	1565 1625	0,35		Muy elevado	DWDM

figura 7 Ventanas

Cada ventana tiene una atenuación diferente, lo que condiciona el alcance máximo de la señal luminosa.

Las longitudes de onda mayores tienen atenuaciones menores, por lo que las conexiones de largo alcance se suelen hacer en tercera ventana.

Muy recientemente se ha empezado a utilizar también una cuarta ventana un poco más allá de la tercera, en la zona de los 1625 nm.

Para largas distancias (más de 2 Km) o altas velocidades (más de 600 Mb/s) se emplean emisores láser exclusivamente. Los emisores más sencillos y baratos son los de primera ventana; los más complejos y caros son los de tercera y cuarta.

REDES DE COMUNICACIÓN ÓPTICA

El incremento de la demanda de ancho de banda en las comunicaciones junto con el costo elevado del despliegue de cables nuevos conduce a la búsqueda de métodos para incrementar o aprovechar la capacidad de la fibra óptica existente.

La multiplexación es una técnica empleada para combinar información de diferentes orígenes sobre un medio de comunicación común, logrando reducir los costos y la complejidad de la red de comunicaciones.

Existen diferentes técnicas de multiplexación que pueden ser combinadas, para aumentar la capacidad de transmisión de un enlace óptico:

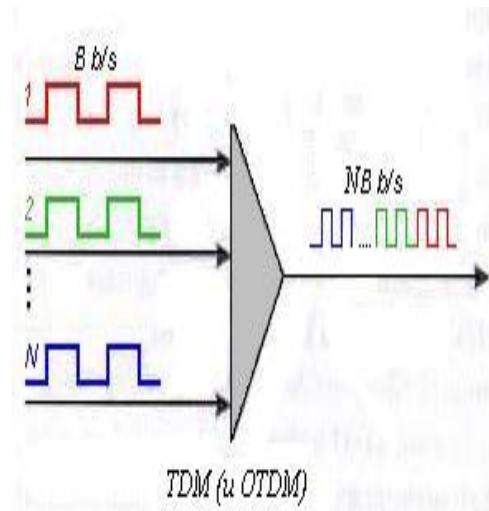
- **TDM**, time division multiplexing.
- **SDM**, space division multiplexing.
- **WDM**, wavelength division multiplexing.
- **SCM**, subcarrier multiplexing.
- **CDM**, code division multiplexing.

MULTIPLEXACION POR DIVISION DE TIEMPO. TDM

La técnica de multiplexación por división en el tiempo (TDM, Time División Multiplexing), como muestra la siguiente figura, logra incrementar la velocidad de transmisión binaria intercalando datos de distintos canales, formando una cadena de datos de mayor velocidad.

Los dos principales problemas de la TDM son la dispersión cromática y la PMD (Polarization mode dispersion). Estos efectos limitan la capacidad de incremento de la tasa binaria conseguida mediante la TDM

Otra limitación de la TDM viene dada por la velocidad a la que operan los circuitos electrónicos, que se supera mediante la multiplexación en el dominio óptico, OTDM.



MULTIPLEXACION POR DIVISION DE ESPACIO. SDM

Esta técnica tiene dos inconvenientes que afectan al costo del sistema de comunicaciones en el que se emplea.

El primero inconveniente surge a la hora de ampliar el número de fibras en un enlace existente.

Esta operación es muy cara, incluso en distancias cortas, en el caso de que sea necesario poner cables nuevos.

Por ello, cuando se instala un nuevo enlace óptico, el cable contiene cientos de fibras ópticas para evitar la instalación de futuros cables.

La segunda desventaja de SDM es que por cada fibra se requiere un equipo de amplificación o repetidores por lo que el costo de la infraestructura se incrementa considerablemente para enlaces de grandes distancias.

Las técnicas de multiplexación TDM y WDM permiten compartir los amplificadores y/o repetidores entre varios canales reduciendo así el costo.

La SDM es una técnica competitiva cuando las distancias en las que se va a emplear son tan cortas que no se requieren equipos de amplificación o repetidores.

MULTIPLEXACION POR DIVISION EN LONGITUDES DE ONDA. WDM

¿Cuál es su función?

Enviar varias señales a diferentes longitudes de onda, es decir diferentes λ por una misma fibra (luz de varios 'colores').

WDM puede ser:

- **Densa** (DWDM, 'Dense' WDM): se utilizan 16 o más λ
- **Ligera** (CWDM 'Coarse' WDM): se utilizan 2 o 4 λ

WDM transmite por una misma fibra varias señales cada una en una longitud de onda diferente y con la misma tasa binaria, sin que interfieran entre sí ya que están lo suficientemente separadas.

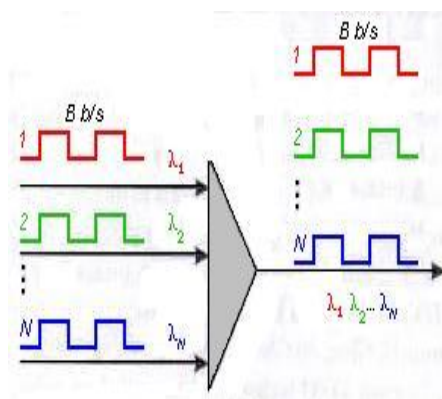
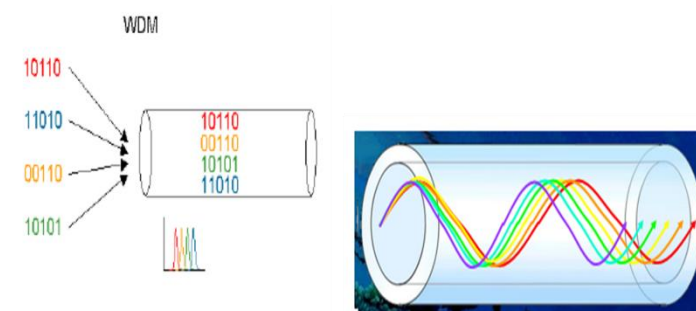


figura 8 MUX WDM

La técnica consiste en emplear varias fibras ópticas entre los dos extremos de un enlace, una para cada canal de comunicación.



$$BL = (B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_n)L$$

figura 9 Funcionamiento de WDM

COMPOSICIÓN Y DESCOMPOSICIÓN ÓPTICA APLICADO EN WDM.

La idea es simple:

 Se quieren combinar múltiples haces de luz dentro de una única luz en el **multiplexor**.

 Hacer la operación inversa en el **demultiplexor**.

Mostrar

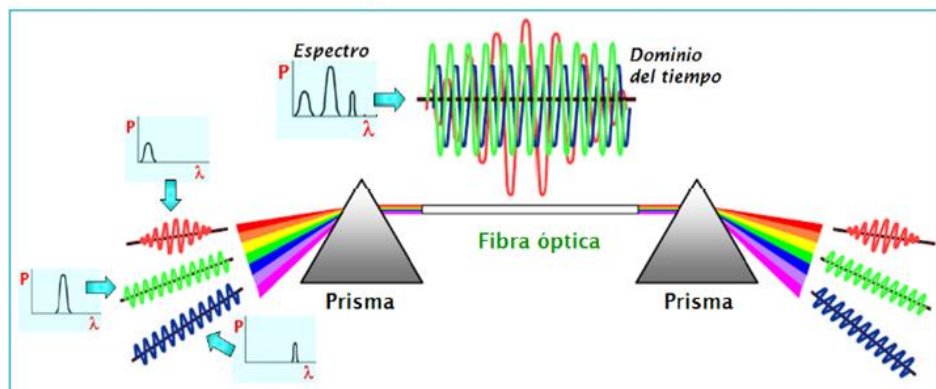


Figura 10 Composición y descomposición WDM

Los transmisores están constituidos con láser monomodo (SLM) con modulación externa para reducir el chirp (variación temporal de la frecuencia de la luz (del azul al rojo o del rojo al azul)).

Las señales de cada canal se combinan mediante un multiplexor WDM antes de ser introducidas en la fibra óptica.

A lo largo del enlace se emplean EDFAs para contrarrestar la atenuación.

En el receptor los canales son separados mediante un demultiplexor WDM y conducidos a un receptor.

Además, se puede extraer un canal específico en un punto intermedio del trayecto mediante multiplexadores ópticos de inserción/extracción (OADM, Optical Add-Drop Multiplexer).

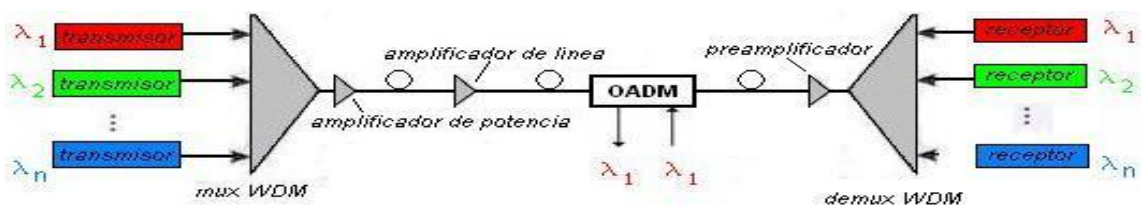


figura 10 Esquema de WDM

Las señales monocromáticas de diferentes λ son generadas por láseres y conducidas por n fibras hasta el multiplexor.

El multiplexor combina las señales que le lleguen en una señal policromática que se envía a una sola fibra para su transmisión.

El demultiplexor separa las diferentes λ de la señal policromática para su correspondiente procesamiento.

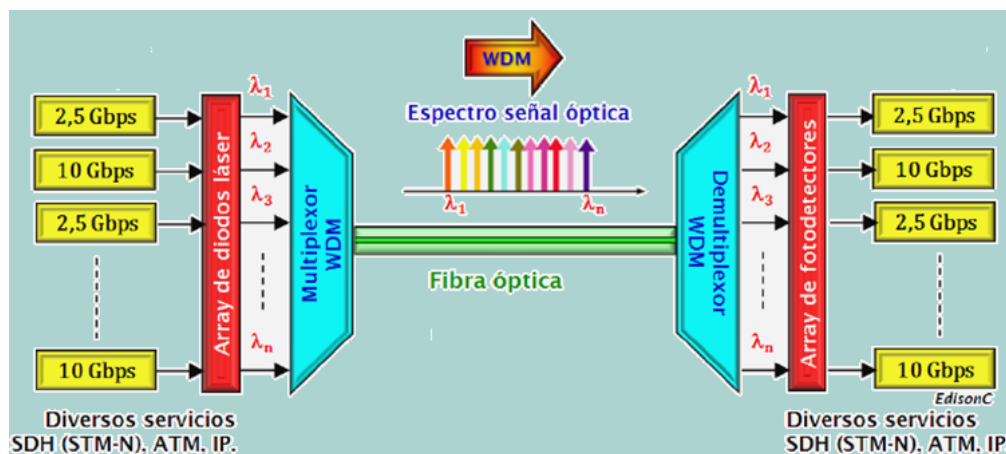


figura 11 Multiplexación y demultiplexación WDM

ENLACES PUNTO A PUNTO

En un enlace punto a punto de fibra óptica existe una fuente de luz localizada en el extremo transmisor y un fotodetector en el extremo receptor.

La capacidad alta del enlace depende de la separación entre los canales adyacentes.

Existen factores que limitan la separación entre canales.
Estos son:

- Estabilidad y sintonía de láser DFB
- Degradación de la señal durante la transmisión por efectos no lineales
- Crosstalk intercanal durante el multiplexing

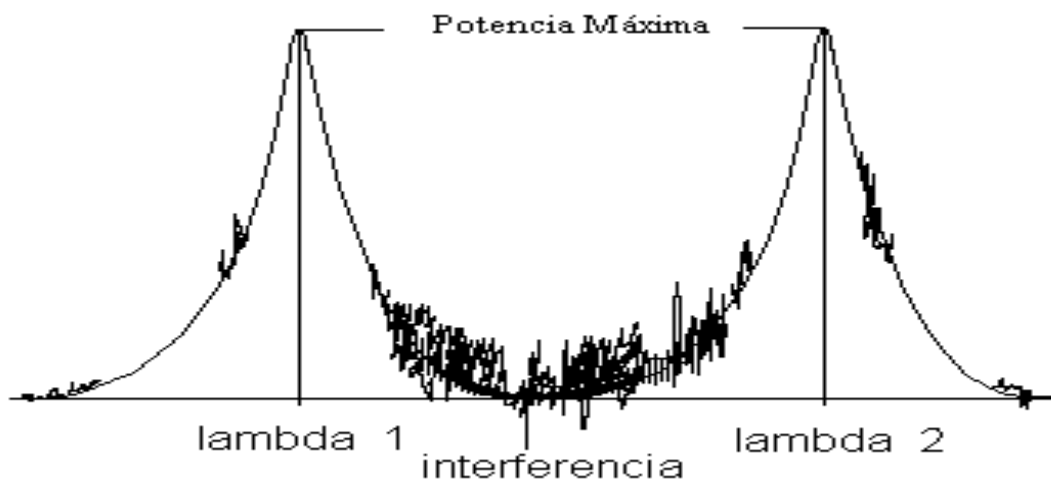


figura 12 Limitación entre canales

Las fibras que mantienen la polarización guían la luz hacia dos ejes de propagación principales ortogonales. Es posible que la luz de un eje principal cambie al otro por desalineación.

Dentro de los sistemas WDM existen dos subtipos:

- Los sistemas SWDM (WDM simple), en los cuales las longitudes de onda de las portadoras se encuentran distanciadas ampliamente; por ejemplo, utilizando una portadora a 1550 nm y otra a 1310nm.
- Sistemas DWDM (WDM denso), en estos sistemas el espaciado entre las longitudes de onda de los canales es muy reducido, dando lugar a una gran densidad de canales. Estos sistemas consiguen la máxima eficiencia en el uso de la fibra. Cuando se habla de sistema WDM sin indicar la categoría se hace referencia a este segundo grupo de sistemas.

Para garantizar la compatibilidad de los productos de distintos fabricantes y diseñadores de equipos se estableció un estándar por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Éste establece una malla o rejilla de longitudes de onda para la ubicación de los canales WDM.

EVOLUCION DE WDM

Generación	Ventana	Número de λ	Denominación	Separación	Años
1ª (WDM)	2ª y 3ª	2	Wideband WDM	240 nm	Finales de los 80
2ª (WDM)	3ª	2-8	Narrowband o Coarse WDM	400 GHz (3,2 nm)	Principios de los 90
3ª (DWDM)	3ª	16-40	Dense WDM	100-200 GHz (0,8-1,6 nm)	Mediados de los 90
4ª (DWDM)	3ª	64-160	Dense WDM	25-50 GHz (0,2-0,4 nm)	Finales de los 90

LAS VENTAJAS DE WDM SOBRE TDM

Con esta técnica se aprovecha mejor el ancho de banda de la fibra óptica.

Las tasas de transmisión binaria de cada canal son más bajas que la de la señal multiplexada TDM, por lo que la distancia de transmisión límite impuesta por la dispersión cromática es mayor que en un sistema

TDM. De la misma manera la limitación que impone la PDM no es tan grave.

Además, la distancia entre repetidores y amplificadores es mucho mayor al poder emplearse EDFAs por operar en la tercera ventana.

El sistema es más escalable. Es decir, la capacidad de transmisión se puede incrementar de forma modular añadiendo nuevas longitudes de onda.

El diseño de los sistemas WDM es transparente al formato y velocidad de transmisión de los datos. Lo cual es la principal ventaja de esta técnica.

En redes complejas es más sencillo emplear WDM frente a TDM porque la extracción y la inserción de canales es más sencilla gracias a los elementos ópticos como los OADM.

LOS INCONVENIENTES DE WDM.

Los sistemas WDM no son apropiados en fibras DSF debido a las consecuencias del efecto no lineal de FWM (*four-wave mixing*).

Los amplificadores ópticos empleados en WDM requieren un perfil de la ganancia plano, además de proporcionar una ganancia independiente del número de longitudes de onda.

WDM requiere disponer de un receptor y un láser para cada longitud de onda, lo cual incrementa su coste. Aunque en TDM basta con un único láser y receptor, la electrónica asociada a la multiplexación y demultiplexación es más cara.

La transparencia de los sistemas WDM es también un inconveniente a la hora de monitorizar las señales pues no se desconoce el formato y la tasa binaria de cada canal. Lo que dificulta el monitoreo de la tasa de error de bit (BER, *bit error rate*).

Los efectos no lineales y las diafonías aumentan, pues se están enviando muchas señales muy próximas en diferentes longitudes de onda y con elevada potencia. Así como la dispersión, ya que se transmiten señales a una elevada tasa de transmisión.

FACTORES LIMITANTES

¿Qué factores limitan el rendimiento de la fibra óptica monomodo en dwdm?

Mezclado de cuatro ondas (FWM, Four Wave Mixing) que consiste en una diafonía (crosstalk) entre canales contiguos.

Afecta a sistemas DWDM si disminuye el espaciado entre canales mientras aumenta la potencia de la señal.

Para reducirlo se pueden utilizar canales de anchura desigual o incrementar la dispersión cromática.

Aunque parezca extraño en DWDM no interesa tener dispersión cero en ninguna longitud de onda pues entonces el efecto de FWM se hace muy notable y el rendimiento decae.

LA FIBRA NZDSF

La fibra DSF se diseñó pensando en transmitir una sola λ en 3ª ventana con una dispersión lo más pequeña posible.

La dispersión tan baja a ciertas λ provoca efectos no lineales e introduce interferencias cuando se utiliza DWDM. Por eso la fibra DSF no es adecuada en este tipo de aplicaciones

Para resolver este problema se desarrollaron a mediados de las 90 fibras denominadas NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber) que por diseño tienen dispersión no nula en la 3ª y 4ª ventana.

Esta fibra es la más utilizada actualmente en larga distancia. La fibra DSF ya no se utiliza.

CWDM

Los equipos WDM altamente sofisticados utilizados por las operadoras en enlaces de larga distancia permiten un elevado número de canales con una separación estrecha entre ellos. Esto es lo que se conoce como DWDM (Dense WDM).

Existen en el mercado otros equipos con una capacidad más reducida en cuanto al número de canales pero que tienen un costo más reducido. Estos equipos tienen también un alcance menor, por lo que resultan idóneos en redes de ámbito metropolitano. Esto se conoce a veces como 'Coarse' WDM.

DWDM se utiliza en enlaces de largo alcance y gran capacidad, porque en este caso es más rentable.

En pequeñas distancias el ahorro en fibras no compensa el costo de los equipos, pero se pueden usar otros de menos λ (4-8) que tienen un costo muy inferior.

La CWDM (de 4-8 λ) es interesante en enlaces de ámbito metropolitano.

CWDM no usa amplificadores ópticos. Para distancias superiores a 50 Km se usan repetidores.

A medida que la tecnología avance aumentará el número de λ tanto en CWDM como en DWDM.

En la figura 14 vemos un ejemplo de aplicación de CWDM.

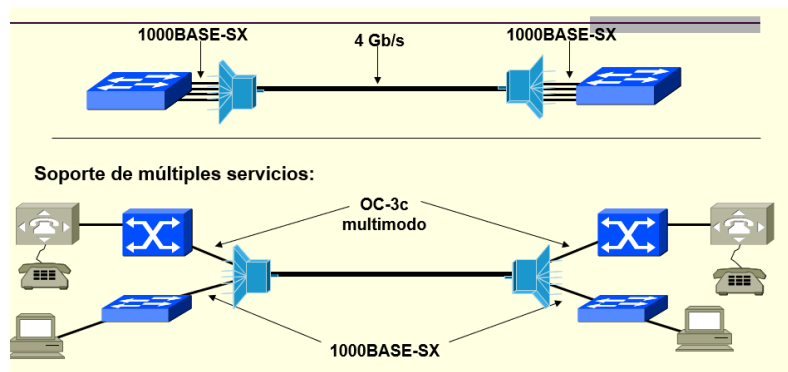


figura 13 Aplicación de CWDM

En el primer caso se utiliza para agregar cuatro enlaces Gigabit Ethernet a través de un par de fibras y suministrar así una capacidad agregada de 4 Gb/s full duplex entre las dos redes.

En el segundo caso se utiliza el equipo para transmitir por la misma fibra dos señales diferentes, una de Gigabit Ethernet y la otra de ATM a 155 Mb/s. De esta forma se puede efectuar la conexión de centralitas con toda la funcionalidad y garantías de calidad de servicio de ATM y a

la vez aprovechar el rendimiento y bajo costo de Gigabit Ethernet, sin tener que utilizar para ello dos pares de fibras.

Además del ahorro de fibras que supone el uso de WDM permite utilizar en los equipos interfaces de corto alcance y bajo costo, utilizando los caros transceptores de tercera ventana únicamente en la conexión entre los equipos WDM.

TRANSMISION EN FIBRA OPTICA A LARGA DISTANCIA

En fibra óptica existe, como en cualquier otro medio físico, una distancia máxima a la que puede transmitirse la señal con un determinado nivel de fiabilidad. Esa distancia máxima es mayor en tercera ventana que en segunda ventana gracias a su menor atenuación.

Cuando se supera ese valor máximo se puede recurrir a amplificadores o repetidores. Los amplificadores actúan de manera analógica sobre la señal óptica, sin convertirla en señal eléctrica. En cambio, los repetidores la convierten en señal eléctrica, la amplifican, sincronizan y le dan forma (la hacen de nuevo 'cuadrada').

En 2ª ventana no hay amplificadores, por lo que se utilizan siempre repetidores, teniendo que colocar uno cada 40 Km aproximadamente.

En 3ª y 4ª ventana se pueden utilizar amplificadores, que resultan más baratos y sencillos, pero la señal se degrada gradualmente por lo que cada cierto número de amplificadores es necesario instalar repetidores.

La aparición de amplificadores de 3ª ventana ha sido crucial para el desarrollo de WDM, ya que los amplificadores actúan sobre toda la banda de forma transparente e independientemente del tipo de señales transmitidas y del número de canales utilizados.

En cambio, el uso de repetidores requiere desmultiplexar los canales de la fibra y regenerar cada uno independientemente para volver a multiplexarlos después hasta el siguiente repetidor.

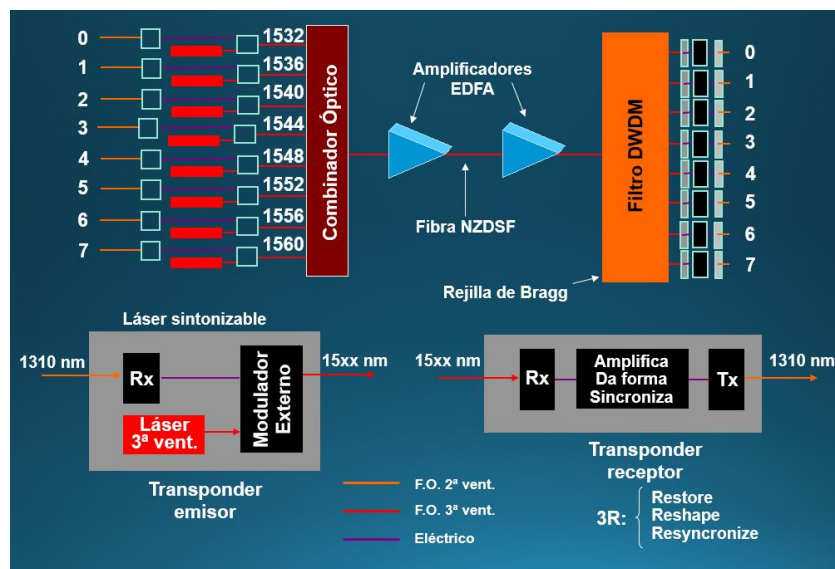


figura 14 Funcionamiento de un multiplexor DWDM

En este esquema se muestra cómo funciona un equipo multiplexor DWDM de ocho canales.

Por la izquierda llegan ocho señales todas ellas a 1310 nm (segunda ventana) que corresponde a la longitud de onda estándar de SONET/SDH. Esas señales llegan por ocho fibras diferentes.

Cada una de las señales es recibida por un transponder, que se encarga de convertirla en una señal eléctrica y generar a partir de ella una señal óptica con un láser de tercera ventana; mediante un modulador externo esta señal óptica se genera en la longitud de onda que le corresponde a ese transponder de acuerdo con la asignación de canales efectuada previamente.

De esta forma se generan ocho señales a longitudes de onda ligeramente diferentes, que se combinan en una misma fibra mediante el combinador óptico. Dependiendo de la distancia a cubrir puede ser necesario utilizar amplificadores EDFA intermedios.

En el trayecto se utilizará fibra NZ-DSF para reducir el efecto de dispersión debido a la distancia y velocidad.

Una vez recibido el haz luminoso se ha de dividir en las ocho componentes iniciales, para lo cual se emplea una Rejilla de Bragg, un filtro DWDM que básicamente funciona como un prisma separando la luz por longitudes de onda. Cada una de las ocho señales es recibida entonces por un transponder diferente que se ocupa de convertirla en señal eléctrica y regenerarla a nivel digital como si fuera un repetidor

(3R, amplificarla, darle forma y sincronizarla). Después se genera a partir de esa señal eléctrica una señal óptica en segunda ventana, equivalente a la señal inyectada en el lado del emisor.

Por supuesto en un sistema DWDM bidireccional (como son la mayoría) habrá una serie equivalente de dispositivos para la transmisión en sentido opuesto.

AMPLIFICADORES EDFA

Con DWDM interesa que los amplificadores tengan un comportamiento lo más lineal posible en todo el rango de λ utilizado.

De lo contrario la señal se distorsiona demasiado y habrá que poner repetidores más a menudo (más costo)

En 3ª y 4ª ventana se usan amplificadores EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) que tienen fibra óptica dopada con erbio (metal usado en algunas aleaciones).

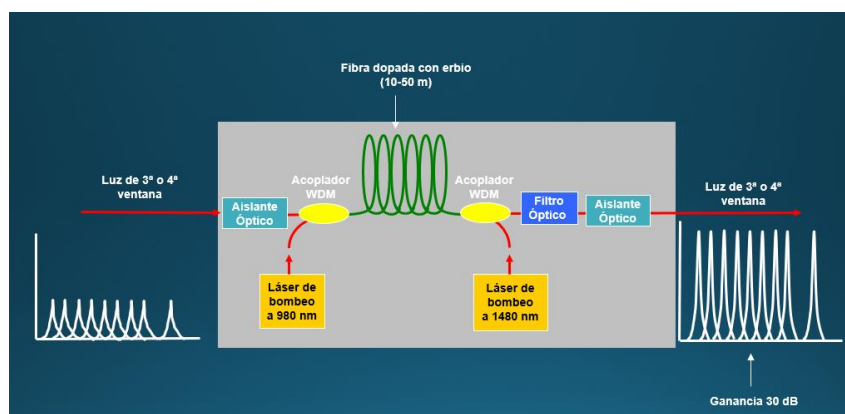


figura 15 Diseño de un amplificador EDFA

Los amplificadores de WDM tienen una bobina de 10 a 50 metros de una fibra óptica especial que contiene pequeñas cantidades de un metal denominado erbio.

Esta fibra óptica se ilumina con dos fuentes láser de 980 y 1480 nm.

Los átomos de erbio tienen la propiedad de absorber la energía transmitida por este láser y pasar a un estado denominado 'excitado'.

Los átomos de erbio liberan la energía que tienen almacenada cuando pasa por la fibra un haz láser de tercera ventana, y la liberan generando luz láser precisamente de la misma frecuencia que la luz recibida, con lo que el dispositivo se convierte en la práctica en un amplificador de luz.

Para que el sistema funcione de forma continuada es preciso inyectar continuamente la luz de 980 y 1480 nm, por lo que el amplificador requiere una constante aportación de energía externa.

GANANCIA DE UN EDFA en 3era VENTANA

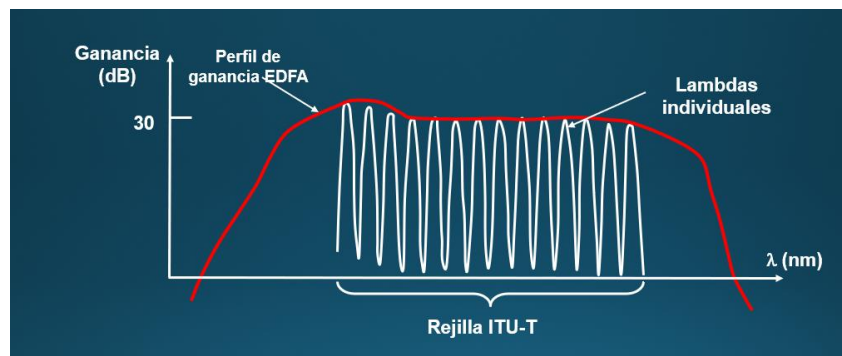
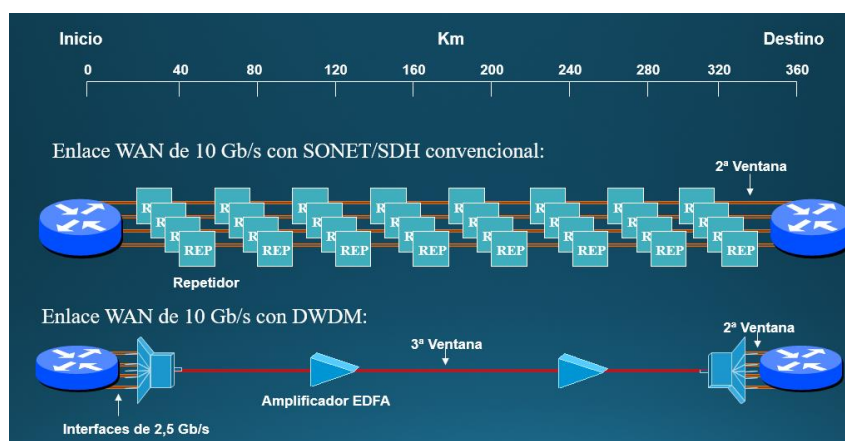


figura 16 Perfil de ganancia EDFA

Para que la señal no se distorsione demasiado cuando se utilizan varios amplificadores en serie es preciso que la curva de ganancia de un amplificador sea lo más plana posible dentro del rango de longitudes de onda utilizado. Afortunadamente los amplificadores EDFA cumplen esta condición, como puede verse por la gráfica.

VENTAJAS DE DWDM CON AMPLIFICADORES EDFA



Esta figura muestra de manera gráfica la diferencia entre el equipamiento necesario para establecer cuatro enlaces SONET/SDH OC-48 (2,5 Gb/s) a la manera tradicional, o mediante DWDM.

En el primer caso se utilizan cuatro pares de fibras, uno para cada enlace. Además, al utilizar equipos de segunda ventana es necesario colocar cada 40 Km un repetidor para cada uno de los cuatro enlaces, por lo que se necesitan en total 32 repetidores.

En el segundo caso se instala un equipo DWDM en cada extremo, con lo que los cuatro enlaces utilizan el mismo par de fibras. Al utilizar equipos de tercera ventana solo es necesario instalar dos amplificadores en todo el trayecto.

Cada amplificador actúa simultáneamente sobre todos los canales que se transmiten.

Si más tarde fuera necesario aumentar el número de enlaces en el primer caso habría que instalar 8 repetidores por cada nuevo enlace (suponiendo que hubiera fibras ópticas libres).

En cambio, en el segundo caso solo sería necesario incorporar el módulo correspondiente en los equipos DWDM de los extremos, sin realizar ninguna modificación en los equipos intermedios.



VIDEOS SUGERIDOS

Para completar con el tema de hoy los invito a ver los siguientes videos sobre WDM.

WDM HUAWEI <https://www.youtube.com/watch?v=5gWWuwZ101o>

