

2. Capítulo 2: Multiplexión

Normalmente, dos estaciones de comunicaciones no utilizan toda la capacidad de un enlace de datos; con objeto de mejorar la eficiencia sería posible compartir esta capacidad. Un concepto general para tal compartición es el de multiplexación.

Una aplicación usual de la multiplexación son las comunicaciones de larga distancia. Los enlaces de las redes de larga distancia son líneas de alta capacidad de fibra, de cable coaxial o de microondas, de modo que pueden transportar simultáneamente varias transmisiones de voz y de datos haciendo uso de las técnicas de multiplexación.

La Figura 2.1 muestra la función de multiplexación en su forma más simple. Existen 4 entradas a un multiplexor, que se conecta a un demultiplexor mediante un único enlace de datos. El enlace es capaz de transportar 4 canales de datos independientes. El multiplexor combina (multiplexa) los datos de las 4 líneas de entrada y los transmite a través de un enlace de datos de capacidad superior.

Por su parte, el demultiplexor capta la secuencia de datos multiplexados, separa (demultiplexa) los datos de acuerdo con el canal y los envía hacia las líneas de salida correspondientes.

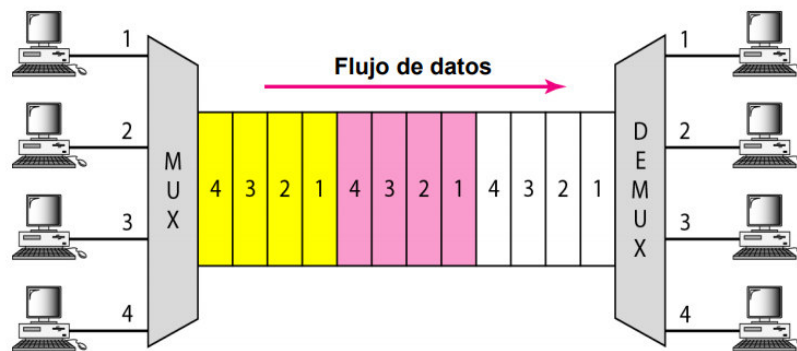


Figura 2.1: Multiplexión de 4 líneas con datos

El amplio uso de las técnicas de multiplexación en comunicaciones de datos se puede explicar como sigue:

A medida que la velocidad aumenta, la transmisión es más efectiva desde el punto de vista del coste. Es decir, para una aplicación y distancia dadas, el coste por kbps decrece con el incremento en la velocidad de transmisión de datos. De forma análoga, el coste de los equipos de transmisión y recepción, por kbps, decrece con el aumento de la velocidad.

La mayor parte de los dispositivos de comunicación de datos requieren velocidades de datos relativamente bajas.

Los puntos anteriores se refieren a dispositivos de comunicación de datos, pudiéndose aplicar también a comunicaciones de voz. Es decir, cuanto mayor sea la capacidad de la transmisión, en términos de canales de voz, menor será el coste por canal de voz individual, siendo reducida la capacidad requerida por cada canal de voz.

Este capítulo centra su interés en tres tipos de técnicas de multiplexación. La primera, multiplexación por división en frecuencias (FDM), luego la multiplexación por división de tiempo (TDM) junto a su variante, la multiplexación por división de tiempo estadística (STDM) y por último la nueva multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y su variante, la multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM). En todos los casos se describirán los estándares y la aplicación de las distintas técnicas de multiplexación en los enlaces perimetrales y troncales del sistema de transmisión de datos, voz y video.

2.1. Multiplexión por División de Frecuencias (FDM, Frequency Division Multiplexing)

Es posible utilizar FDM cuando el ancho de banda útil del medio de transmisión es mayor que la suma de los anchos de banda de las señales a transmitir. Cuando esto sucede, se pueden transmitir varias señales simultáneamente si cada una de ellas se modula con una frecuencia portadora diferente y las frecuencias portadoras están suficientemente separadas para que los anchos de bandas de las señales no se solapen, interfiriéndose entre sí.

En la Figura 2.1.1 a la derecha se muestra un esquema que representa la idea básica de FDM. En él se observa la entrada de seis líneas a un multiplexor, el cual modula cada señal a una frecuencia diferente - f_1, \dots, f_6 -. Cada señal modulada necesita un cierto ancho de banda centrado alrededor de su frecuencia portadora que se denomina canal. Para evitar interferencias, los canales se separan mediante bandas de seguridad, las cuales son zonas no utilizadas del espectro.

La señal compuesta transmitida a través del medio es analógica; sin embargo, las señales de entrada pueden ser tanto digitales como analógicas. En el caso de que la entrada sea digital, las señales se pueden pasar a través de módems para ser convertidas en analógicas. En cualquier caso, la señal de entrada analógica se debe modular para trasladarla a la banda de frecuencia apropiada.

Un ejemplo típico de FDM es la televisión por aire y por cable. La señal de televisión ocupa un ancho de banda de 6 MHz. Así pues, haciendo uso de FDM se pueden multiplexar varias señales de TV por un cable coaxil, cada una de ellas con un ancho de banda de 6 MHz. Dado el enorme ancho de banda de un cable coaxil - hasta 500 MHz -, haciendo uso de FDM se puede transmitir simultáneamente decenas de señales de TV.

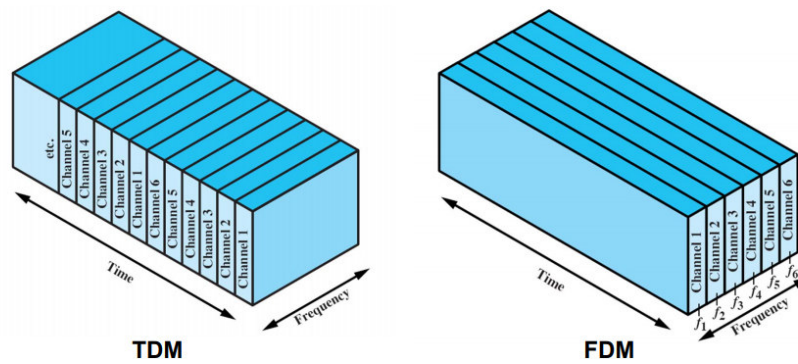


Figura 2.1.1: TDM y FDM

2.1.1. Sistema FDM

En la Figura 2.1.1.1 se presenta un esquema general de un sistema FDM donde se muestra con cierto detalle las transformaciones que sufren las señales de entrada en cada etapa. Mediante el uso de este sistema, en un extremo (Figura 2.1.1.1(a)) se multiplexan varias señales analógicas o digitales [$m_i(t)$, $i = 1, n$], para luego ser enviadas a través de un mismo medio de transmisión hasta el otro extremo (Figura 2.1.1.0(c)).

En primer lugar, cada señal $m_i(t)$ modula una portadora f_i . Dado que se usan varias portadoras, cada una de ellas se denomina subportadora. Se puede hacer uso de cualquier tipo de modulación. Luego las señales moduladas analógicas resultantes se suman para dar lugar a una señal $m_b(t)$ en banda compuesta, que en la Figura 2.1.2 se denomina señal FDM en banda base.

En la Figura 2.1.1.1(b) se muestra el resultado de lo expuesto. El espectro de la señal $m_i(t)$ se desplaza hasta quedar centrado en f_i . Para que este esquema funcione adecuadamente, f_i se debe elegir de modo que los anchos de banda de las distintas señales no se solapen en forma significativa. Si esto no se cumple, resultaría imposible recuperar las señales originales. Una vez ubicadas adecuadamente las señales moduladas, la señal compuesta resultante puede desplazarse como un todo a otra frecuencia portadora a través de un proceso adicional de modulación. Este último proceso no es obligatorio en la implementación de la técnica de multiplexión; solo se lleva a cabo en el caso de necesitarse trasladar la señal compuesta a la banda de frecuencia propia de cada tipo de enlace. En este segundo paso de modulación no necesariamente se debe utilizar la misma técnica de modulación que la utilizada en el primero.

La señal FDM modulada $s(t)$ tiene un ancho de banda total B , donde $B > \sum B_i$, con $i = 1$ hasta $i = n$. Esta señal analógica se puede transmitir a través de un medio adecuado. En el extremo receptor (Figura 2.1.2(c)) -, se demodula la señal FDM modulada para recuperar $m_b(t)$ la cual se hace pasar a través de n filtros pasabanda, cada uno centrado en torno a f_i con un ancho de banda B_i para $1 \leq i \leq n$. De esta forma, la señal se divide de nuevo en sus componentes, siendo cada una de ellas demoduladas para recuperar la señal original correspondiente.

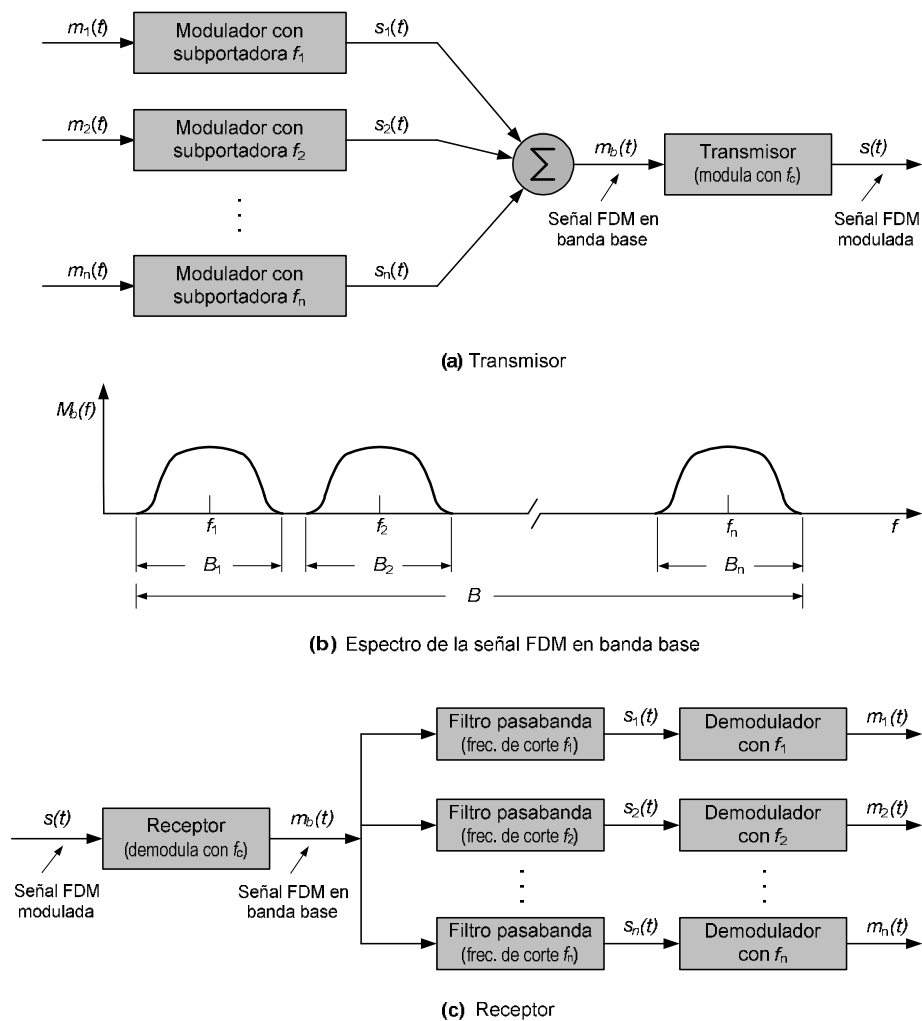
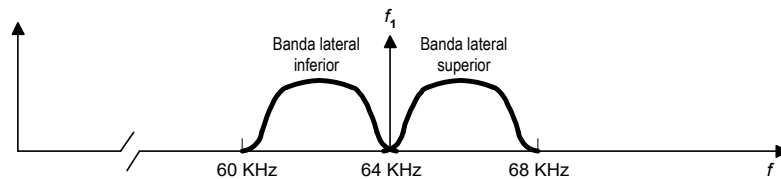
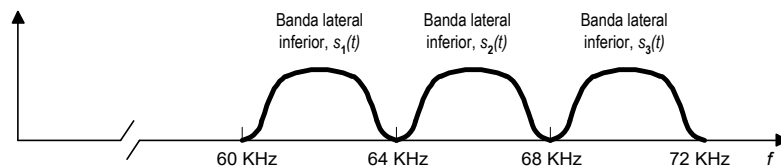


Figura 2.1.1.1: Sistema FDM

Ejemplo

Considérese un ejemplo sencillo consistente en la transmisión simultánea de tres señales de voz a través de un medio de transmisión. Como se ha mencionado, el ancho de banda que se reserva en el sistema de transmisión de la red telefónica para una señal de voz es de 4 KHz, con un espectro efectivo comprendido entre 300 y 3.400 Hz - Figura 2.1.1.2(a) -. Esto es lo que se denomina canal de voz. Si una señal de este tipo se usa para modular en amplitud una portadora de 64 KHz se obtiene el espectro de la Figura 2.1.1.2(b). La señal modulada tiene un ancho de banda de 8 KHz, extendiéndose desde los 60 hasta los 68 KHz. Para hacer uso eficiente del ancho de banda se elige transmitir solo la banda lateral inferior. Si ahora las tres señales de voz se usan para modular “señales portadoras” a frecuencias de 64, 68 y 72 KHz, y solo se utiliza la banda lateral inferior de cada una de ellas, se obtiene el espectro de la Figura 2.1.1.2(c).

(a) Espectro de $m_1(t)$ (b) Espectro de $s_1(t)$ para $f_1 = 64$ KHz

(c) Espectro de la señal compuesta usando subportadoras de 64 KHz, 68 KHz y 72 KHz.

Figura 2.1.1.2: Multiplexión de tres señales de voz

Existen dos potenciales problemas en un sistema FDM de voz cuando no se realiza un adecuado tratamiento de las señales de entrada que pueden afectar la calidad de la comunicación:

El primer problema es la diafonía, que puede aparecer si los espectros de señales componentes adyacentes se solapan en forma importante. En el caso de las señales de voz, con un ancho de banda efectivo de solo 3.100 Hz - de 300 a 3.400 Hz -, resulta adecuado un ancho de banda de 4 KHz. El espectro de señales generadas por módems para transmisión de datos en la banda de voz, también cabe bien en este ancho de banda.

El segundo problema potencial es el ruido de intermodulación, tratado en la parte 1 de las Notas acerca de Redes y Comunicaciones. En un enlace largo, los efectos no lineales de los amplificadores sobre una señal en un canal dan lugar a componentes en frecuencias que pueden producir interferencias en otros canales.

2.1.2. Sistemas de Portadora Analógica

El sistema de transmisión de larga distancia existente en todo el mundo ha sido diseñado para transmitir señales en la banda de voz a través de enlaces de transmisión de alta capacidad, como cable coaxial y sistemas de microondas. La primera técnica, y aún hoy de amplio uso, para la utilización de enlaces de alta capacidad es FDM. Una jerarquía de esquemas fue adoptada internacionalmente bajo los auspicios de la ITU-T (Tabla 2.1.2.1). En los Estados Unidos, AT&T diseñó un FDM para dar cabida a sistemas de transmisión de distintas capacidades.

Tabla 2.1.2.1: Estándares portadora FDM Internacional (ITU-T) y EE.UU.

Número de canales de voz	Ancho de banda	Espectro	AT & T	ITU-T
12	48 kHz	60-108 kHz	Grupo	Grupo
60	240 kHz	312-552 kHz	Supergrupo	Supergrupo
300	1,232 MHz	812-2.044 kHz		Grupo maestro
600	2,52 MHz	564-3.084 kHz	Grupo maestro	
900	3,872 MHz	8,516-12,388 MHz		Grupo supermaestro
$N \times 600$			Grupo maestro multiplexado	
3.600	16,984 MHz	0,564-17,548 MHz	Grupo jumbo	
10.800	57,442 MHz	3,124-60,566 MHz	Grupo jumbo multiplexado	

En el primer nivel de la jerarquía AT&T se combinan 12 canales de voz para dar lugar a una señal grupo con un ancho de banda de $12 \times 4 \text{ kHz} = 48 \text{ kHz}$, en el rango 60-108 kHz. Las señales se generan de forma similar a la descrita previamente haciendo uso de frecuencias subportadoras de entre 64 y 108 kHz en incrementos de 4 kHz. El siguiente bloque es el supergrupo de 60 canales, que está formado por cinco señales de grupo multiplexadas en frecuencia. En este nivel, cada grupo se trata como una única señal con un ancho de banda de 48 kHz, modulándose por la correspondiente subportadora. Las subportadoras tienen frecuencias comprendidas entre 420 y 612 kHz en incrementos de 48 kHz. La señal resultante ocupa la banda 312-552 kHz.

Existen distintas variantes para la formación de un supergrupo. Cada una de las cinco entradas al multiplexor de supergrupo puede ser un canal de grupo con 12 señales de voz multiplexadas. Es más, cualquier señal de hasta 48 kHz de ancho de banda contenida entre los 60 y los 108 kHz se puede usar como entrada al multiplexor de supergrupo. Otra posibilidad consiste en combinar 60 canales de ancho de banda de voz en un supergrupo, lo cual puede reducir los costes de multiplexación, ya que no se precisa una interfaz con el multiplexor de grupo.

2.2. Multiplexión por División de Tiempo (TDM, Time Division Multiplexing)

La multiplexión por división en el tiempo sincrónica (TDM) es posible cuando la velocidad de transmisión alcanzable por el medio es mayor que la suma de las velocidades de las señales digitales a transmitir. La técnica TDM consiste en transmitir varias señales digitales a través de una única ruta de transmisión mediante la mezcla temporal (Multiplexión) de partes de cada una de las señales de entrada. Por ejemplo, si un multiplexor tiene 4 entradas de 9,6 Kbps; para transportar los datos de todas las entradas por una única línea se requiere de ésta una capacidad de al menos 57,6 Kbps ($= 4 \times 9,6 \text{ Kbps}$). La justificación de este requisito se verá con más claridad más adelante. En la Figura 2.2.1 a la izquierda, se muestra cómo se ubican en el tiempo los canales que corresponden a sendas conexiones.

El proceso de mezcla puede comprender a un bit, un byte, o bloques de bits o de bytes de cada señal de entrada; por este motivo las señales a multiplexar deben ser digitales, aunque pueden transportar datos digitales o analógicos. En la Figura 2.3.1 se presenta un esquema simplificado que sirve para explicar la operación de multiplexión/demultiplexión usando TDM. Se trata de 4 entradas donde los datos de cada una se pueden asumir como compuestos por una secuencia continua de bloques de bits o bytes. La operación de multiplexado consiste en la lectura secuencial de bloques de datos, uno de cada línea de entrada y puestos en forma ordenada en el medio de transmisión. En el otro extremo, el demultiplexor lleva a cabo la tarea inversa; esto es: operando en forma sincronizada con el multiplexor, toma cada bloque de datos del medio de transmisión y lo ubica en la salida correspondiente.

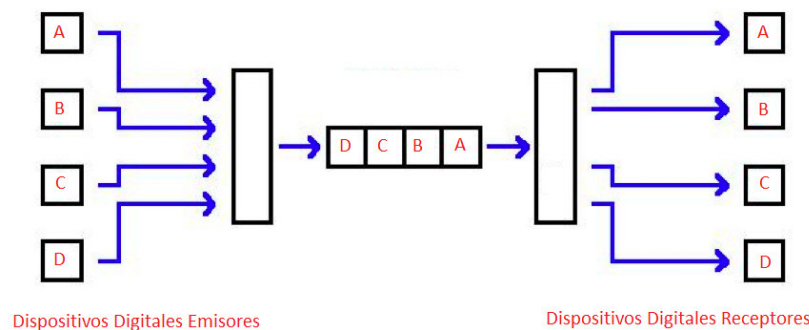


Figura 2.2.1: Multiplexado por división de tiempo

2.2.1. Sistema TDM

En la Figura 2.2.1.1 se muestra un esquema de un sistema TDM donde se muestran con mayor detalle las operaciones que tienen lugar en las distintas etapas. Este sistema multiplexa varias señales digitales $[m_i(t), i = 1, n]$ que son enviadas por un mismo medio de transmisión.

De cada señal de entrada procedente de una fuente particular se almacena brevemente una muestra en una memoria temporal - buffer -. Cada buffer tiene el tamaño suficiente para alojar un grupo de bits o de bytes de la muestra correspondiente. Una vez que las muestras han sido almacenadas, son leídas secuencialmente para componer una secuencia de datos digital $m_c(t)$.

Obsérvese que la lectura debe ser lo suficientemente rápida para que cada memoria temporal se desocupe antes de que ingresen nuevos datos a ella. Este hecho impone la condición de que, para que no haya superposición temporal de los datos en el

medio, la velocidad de $m_c(t)$ debe ser, al menos, igual a la suma de las velocidades de las señales $m_i(t)$, como se señaló anteriormente. La señal digital $m_c(t)$ puede transmitirse directamente o puede hacerse pasar a través de un módem para dar lugar a una señal analógica. En ambos casos la transmisión es normalmente sincrónica.

Los datos transmitidos tienen un formato similar al mostrado en la Figura 2.2.1.1(b). Los datos se organizan en tramas y cada trama contiene un conjunto de ranuras temporales que forman un ciclo. En cada trama se pueden dedicar una o más ranuras a cada una de las fuentes. El conjunto de ranuras dedicadas a una fuente, de trama en trama, se llama canal. Obsérvese que en TDM la visión de canal es diferente a la de FDM en donde un canal está asociado a una fracción de ancho de banda del medio de transmisión.

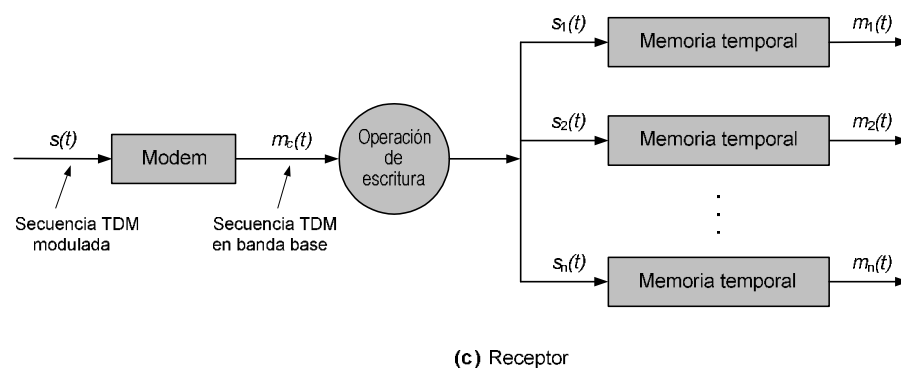
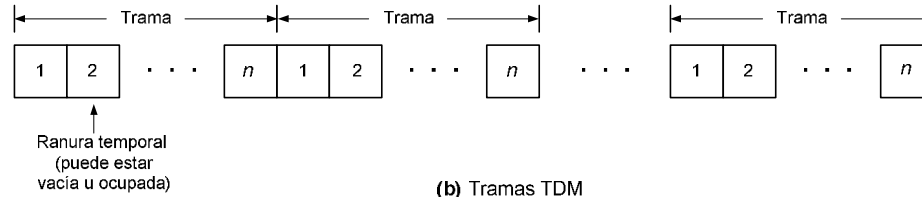
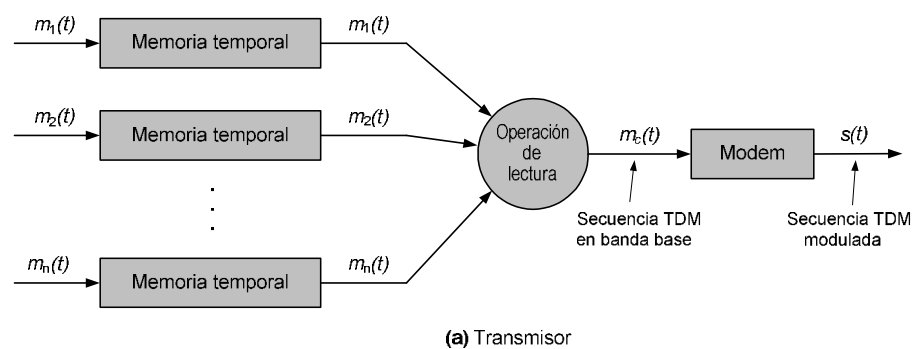


Figura 2.2.1.1: Sistema TDM completo

Se puede aplicar TDM para multiplexar muestras de uno o más bits o bytes. Por ejemplo, cuando se multiplexan caracteres que normalmente provienen de fuentes asincrónicas, cada ranura temporal contiene un byte de datos. Usualmente, los

bits de principio y de fin de cada byte se eliminan antes de la transmisión y luego son reinsertados por el receptor, mejorando así la eficiencia. La multiplexión de uno o más bits se usa con fuentes sincrónicas, pudiéndose realizar también con fuentes asincrónicas.

Los datos multiplexados se demultiplexan en el receptor y se encaminan hacia la memoria temporal de destino apropiada. Para cada fuente de entrada $m_i(t)$ existe un destino de salida que recibirá los datos ingresados a la misma velocidad a la que fueron generados.

La técnica TDM sincrónica no se denomina “sincrónica” porque se emplee transmisión sincrónica, sino porque se pre asigna cada ranura temporal a una fuente y a una salida específicas, siendo cada ranura escrita y leída “sincronizadamente” en cada extremo. Las ranuras temporales asociadas a cada fuente se transmiten tanto si estas tienen datos que enviar como si no tienen. Esto, por supuesto, también ocurre en FDM. En ambos casos se desaprovecha la capacidad de la línea de transmisión a costa de simplificar la implementación. Sin embargo, un dispositivo TDM sincrónico puede gestionar fuentes a distintas velocidades incluso cuando se hacen asignaciones fijas de las ranuras temporales. Por ejemplo, al dispositivo de entrada más lento se le podría asignar una ranura por ciclo, mientras que a los más rápidos se les podrían asignar varias ranuras por ciclo.

2.2.2. Control del Enlace en TDM

Se puede observar en la Figura 2.2.1.1(b) que la secuencia de datos transmitida no contiene las cabeceras y colas propias de la transmisión sincrónica. La razón es que no es necesario el mecanismo de control proporcionado por un protocolo de enlace de datos. Resulta instructivo hacer hincapié en este punto, para lo cual se consideran dos mecanismos clave en el control del enlace de datos que son: control de flujo y control de errores.

Control de Flujo

Es claro que el control de flujo no es necesario en lo que se refiere al multiplexor y al demultiplexor. La velocidad de los datos es fija en la línea de salida del multiplexor; además, tanto éste como el demultiplexor están diseñados para operar a esa velocidad. Pero supóngase que una de las líneas de salida está conectada a un dispositivo receptor que, por algún motivo, se ve impedido de aceptar datos temporalmente. Esta situación genera un problema en la transmisión del que derivan solo dos alternativas: o cesa la transmisión de tramas TDM hasta que el receptor está en condiciones de recibir datos nuevamente, o se pierden los datos destinados al citado dispositivo.

Definitivamente ninguna de las dos alternativas planteadas se puede aceptar. El cese de la transmisión es imposible puesto que las restantes líneas de salida están esperando recibir datos en instantes de tiempo predeterminados. Esta imposición, en general, no es caprichosa, sino que responde a las necesidades de las aplicaciones. En

ese sentido, puede ser que los datos transmitidos sean de voz o video en tiempo real, los cuales no aceptan mayores retardos que unos pocos milisegundos.

La solución consiste en que el dispositivo de salida que se ha saturado detenga el flujo de datos proveniente del correspondiente dispositivo de entrada. Así, el canal en cuestión transmitirá ranuras vacías durante algún tiempo - las correspondientes al dispositivo saturado -, pero las tramas con destino al resto de los dispositivos mantendrán la misma velocidad de transmisión.

Control de Errores

El razonamiento es el mismo para el control de errores. No se debería solicitar la retransmisión de una trama TDM completa si ocurriera un error en uno de los canales. Los dispositivos que utilizan los otros canales no necesitan una retransmisión, ni tampoco tienen conocimiento de que algún otro dispositivo en otro canal la ha solicitado. De manera análoga al control de flujo, la solución consiste en aplicar el control de errores para cada canal de forma independiente.

El control de flujo y el control de errores pueden aplicarse para cada canal independientemente usando un protocolo de control de enlace de datos como HDLC. En la Figura 2.2.2.1 se muestra un ejemplo simplificado para facilitar la explicación. Se suponen dos fuentes de datos, cada una de las cuales utiliza HDLC. Una de ellas transmite una secuencia de tramas HDLC de tres bytes de datos cada una y la otra fuente transmite tramas HDLC con cuatro bytes de datos.

Por sencillez, y aunque es más frecuente la mezcla de bits, supóngase que se usa multiplexión por mezcla de caracteres. Obsérvese lo que sucede. Los bytes de las tramas HDLC de las dos fuentes se transmiten juntos a través de la línea multiplexada. Al lector puede resultar incómodo inicialmente este diagrama dado que en cierto sentido las tramas HDLC han perdido su integridad. Por ejemplo, cada secuencia de comprobación de trama (FCS) en la línea se aplica a un conjunto distinto de bits. Incluso la FCS está dividida. No obstante, todas las piezas se ensamblan correctamente antes de que se reciban en el dispositivo correspondiente al otro extremo del protocolo HDLC. En este sentido, la operación de multiplexión/demultiplexión es transparente para las estaciones conectadas; es como si existiese un enlace dedicado para cada par de estaciones comunicadas.

En la Figura 2.2.2.1 se necesita un refinamiento. Ambos extremos de la línea tienen que ser una combinación multiplexor/demultiplexor con una línea full duplex entre ellos. Así pues, cada canal consta de dos conjuntos de ranuras, una en cada sentido de la transmisión. Los dispositivos conectados en cada extremo pueden, de a pares, usar HDLC para controlar su propio canal, con lo cual relevan a los multiplexores de estas tareas.

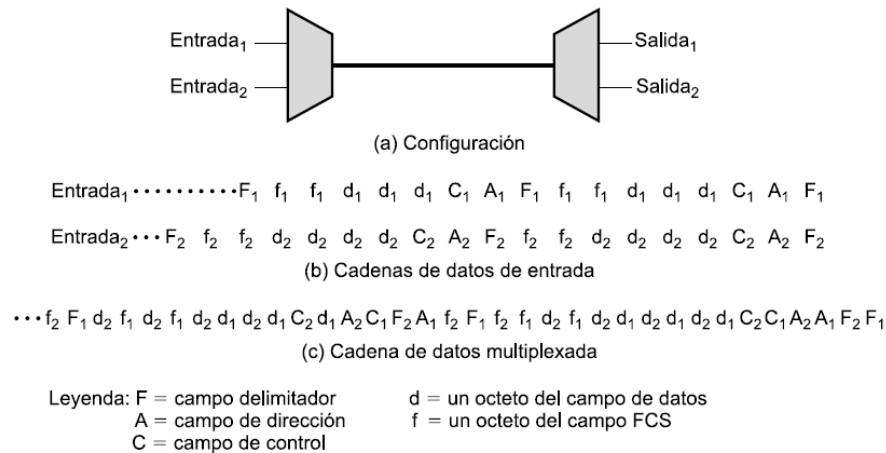


Figura 2.2.2.1: Control de enlace de datos en TDM

Delimitación de Tramas

Ya se ha visto que no es necesario un protocolo de control de enlace para gestionar el enlace TDM. No obstante, es necesaria una delimitación básica. Dado que no se han especificado indicadores o caracteres de sincronización - SYNC - para delimitar las tramas TDM, es necesario un método para asegurar la sincronización de éstas. Es clara la importancia de mantener la sincronización de trama ya que si la fuente y el destino se desincronizan se perderán los datos de todos los canales.

Quizás el mecanismo más usual para llevar a cabo la delimitación de tramas sea el conocido como delimitación por dígitos añadidos. En este esquema, generalmente, se incluye un bit de control en cada trama TDM. A modo de “canal control”, en cada trama se usa una combinación predefinida de bits. Un ejemplo típico es el patrón de bits alternados 101010..., que se usa debido a que su aparición resulta poco probable en un canal de datos, al menos como una secuencia larga. De este modo, para sincronizar, el receptor compara los bits de entrada en una determinada posición de la trama con el patrón esperado. Si no coincide se compara con los bits sucesivos hasta que se encuentre la combinación de bits y este persista a lo largo de varias tramas. Una vez realizada la sincronización, el receptor continúa el monitoreo del canal de bits de delimitación. Si desaparece el patrón, el receptor debe llevar a cabo de nuevo el proceso de búsqueda.

2.2.3. Sistema de Portadora Digital

Los sistemas con portadora digital son aquellos que organizan la transmisión de varias señales usando la técnica TDM sincrónica. Se han creado estándares que se usan para transmitir señales de voz, datos y video.

Existe una estructura jerárquica para sistemas que usan transmisión digital propuesta por la UIT-T que es el sector de normalización de la UIT (Unión Internacional de las Telecomunicaciones). La UIT es una organización que depende de las Naciones Unidas y fue creada en 1993 para sustituir al CCITT que hasta esa fecha tuvo similares funciones. La estructura propuesta, fue adoptada por todos los países del mundo, menos EEUU, Canadá y Japón que adoptaron otra estructura no compatible con la propuesta por la UIT-T. Ambas estructuras TDM sincrónicas son jerárquicas; es decir, presentan diferentes capacidades relacionadas por distintos órdenes de multiplicidad, como se puede observar en la Tabla 3.1.

Esta estructura jerárquica, también es conocida como PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy, Jerarquía Digital Plesiócrona). El término plesiócrono se deriva del griego “*plesio*”, cercano y “*chronos*”, tiempo, y se refiere al hecho de que las redes PDH funcionan en un estado donde las diferentes partes de la red están casi, pero no completamente sincronizadas.

La base de la jerarquía propuesta por la UIT-T es el formato de nivel 1 que está basado en la multiplexión de 32 canales digitales, de los que se utilizan 30 para datos y 2 para señalización de control. Cada trama en el nivel 1 contiene 256 bits que es el resultado del producto de 8 bits de muestra por canal por 32 canales. Los 32 canales ocupan una capacidad total de 2,048 Mbps y un enlace de estas características y velocidad se denomina enlace E1.

De forma similar se ha especificado para el otro estándar un enlace T1 con 24 canales y 1,544 Mbps. Tanto para E1 como para T1 se han especificado niveles superiores de multiplexión. Así, en el nivel 2, la portadora E2 agrupa 4 entradas E1 resultando una velocidad de 8.448Mbps, y así sucesivamente. En el otro estándar, y usando órdenes de multiplicidad distintos, a partir de T1 se han especificado enlaces T2, T3, etc, como se muestra en la Tabla 2.2.3.1.

Tabla 2.2.3.1: Estándares portadora TDM Internacional (ITU-T) y EE.UU.

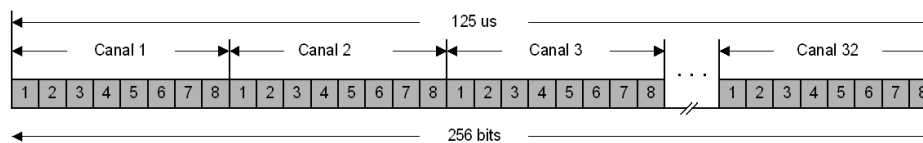
Norteamérica			Internacional (ITU-T)		
Nomenclatura	Número de canales de voz	Velocidad (Mbps)	Nivel	Número de canales de voz	Velocidad (Mbps)
DS-1	24	1,544	1	30	2,048
DS-1C	48	3,152	2	120	8,448
DS-2	96	6,312	3	480	34,368
DS-3	672	44,736	4	1.920	139,264
DS-4	4.032	274,176	5	7.680	565,148

Transmisión Digital de Voz

En la transmisión digital de voz cada canal contiene los datos digitales de un canal de voz. La señal de voz analógica se digitaliza mediante la técnica de Modulación por Codificación de Pulsos - PCM -. Debido a que en telefonía se otorga a la

señal analógica de voz un ancho de banda de 4 KHz; para que no haya pérdida de información por digitalización, es necesario muestrear esta señal a razón de 8.000 muestras por segundo. Se decidió que cada muestra se digitalice usando 8 bits; por lo tanto, un canal de voz digitalizada requiere una velocidad de $(8\text{bits}) \times (8.000\text{muestras/seg}) = 64 \text{ Kbps}$.

Como, además, la estructura mínima - nivel 1 - es de 32 canales, se encuentra que la velocidad de la portadora necesaria para transmitir los mismos es de $(32 \text{ canales}) \times (64 \text{ Kbps}) = 2,048 \text{ Mbps}$. Se destinan 30 canales para transmitir 30 comunicaciones de voz y 2 canales de control. Los canales de control son usados por los switches telefónicos en los extremos para enviarse señales de inicio o fin de las conexiones, tiempo de duración de las mismas, etc. En la Figura 2.2.3.2 se muestra el formato de la trama de una transmisión E1; es decir, 32 canales digitales multiplexados en TDM sincrónico a una velocidad de 2,048 Mbps. La señal que transporta estos datos se llama portadora E1.



Referencias

- El enlace consta de 32 canales con la siguiente información:
- 30 canales de voz; cada canal con 8 bits por muestra usando PCM
 - 2 canales se destinan para enviar datos de señalización entre los extremos.

Figura 2.2.3.2. Formato de trama del nivel 1 (E1,2,048 Mbps) de la UIT-T.

La estructura adoptada por los tres países nombrados, a diferencia del resto del mundo, es incompatible con la propuesta por la ITU-T. Se basa en la multiplexión de 24 canales donde cada trama contiene 8 bits por canal más un bit de delimitación; es decir, $24 \times 8 + 1 = 193 \text{ bits}$. En este caso, la señal de voz también se muestrea a 8.000 veces por segundo, siendo la velocidad de transmisión de $193 \times 8.000 = 1,544 \text{ Mbps}$. En este estándar, de los 8 bits de la muestra, 7 son de datos y 1 de control; además, que multiplexan 24 canales en lugar de 32. La señal que opera a esta velocidad se denomina portadora T1.

Los enlaces E1 y T1 se utilizan en telefonía tanto para interconectar centrales telefónicas privadas, también llamadas PBX (Private Branch Exchange), así como enlace de acceso de una PBX a un switch telefónico de la red telefónica pública. Cabe resaltar que en todos los casos el enlace E1 es punto a punto. En este sentido, en el domicilio del usuario debe existir una PBX que concentra las líneas telefónicas de los teléfonos internos y proporciona el servicio TDM sincrónico en conexión con el switch telefónico público.

Transmisión Digital de Datos

El formato de nivel 1 también se emplea para proporcionar transmisión digital de datos, tanto entre dispositivos de usuario, así como entre éstos y los equipos de red - switches y multiplexores -. En el caso del esquema propuesto por la UIT-T, por cuestiones de compatibilidad con la voz, se usa la misma velocidad de 2,048 Mbps o una fracción de ella. La fracción se obtiene de dividir 2.048 en un número entero. Así, algunas de las velocidades más comúnmente usadas son 64, 128, 256, 512, 1.024 Kbps. También se proveen enlaces de datos a 9,6, 19,2 y 32 Kbps. Una conexión que usa alguna de estas velocidades se denomina E1 fraccional.

En la Figura 2.2.3.3 se muestra el formato de la trama de una conexión E1 usada para transmitir datos en general. La secuencia de bits se organiza en tramas consecutivas de 256 bits que se repiten cada 125µs y cada trama consta de 32 ranuras temporales de 8 bits. La primera ranura se usa con fines de delimitación y sincronización, mientras que las 31 ranuras restantes se usan para albergar canales de usuario. Así pues, cada canal permite transportar datos a 64 Kbps. Para una transmisión a 2,048 Mbps se utiliza el esquema de codificación AMI con HDB3.

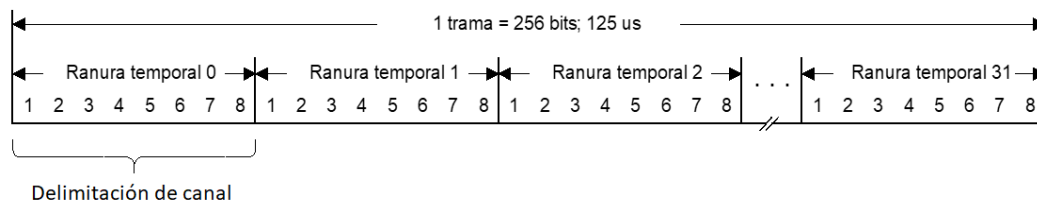


Figura 2.2.3.3: Formato de una trama de datos para un enlace E1

En la Figura 2.2.3.4 se muestra un ejemplo de conexión que usa E1 fraccional entre dispositivos de usuario y un equipo de red pública. Los dispositivos de usuario utilizados para la conexión en parte privada son los routers; el equipo de red en la parte pública es un switch Frame Relay, como podría haber sido un switch ATM, o un MUX TDM, como el de la figura 2.2.3.5.

El router, es un dispositivo diseñado para establecer conexiones entre redes y enlaces de diverso tipo. Por lo tanto, como elemento de conexión entre una instalación de usuario (cualquier organización) y la red de servicios de comunicación (accedida a través de Telecom, Telefónica, Claro, Fibertel, Telecentro, entre otros), el router está provisto de interfaces que le permiten conectar redes locales a los distintos tipos de acceso que brindan los proveedores de comunicaciones (líneas digitales, líneas telefónicas, enlaces xDSL, satelitales, etc.). La interfaz para línea digital (puede tener más de una) soporta el enlace E1 fraccional que se usa como un tipo de acceso para conectarse a la red pública.

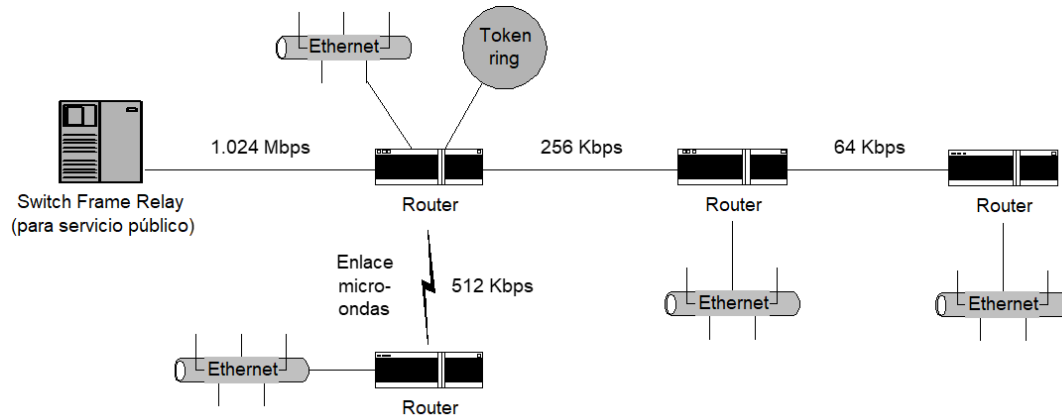


Figura 2.2.3.4: Conexión para transmisión de datos digitales E1 fraccional

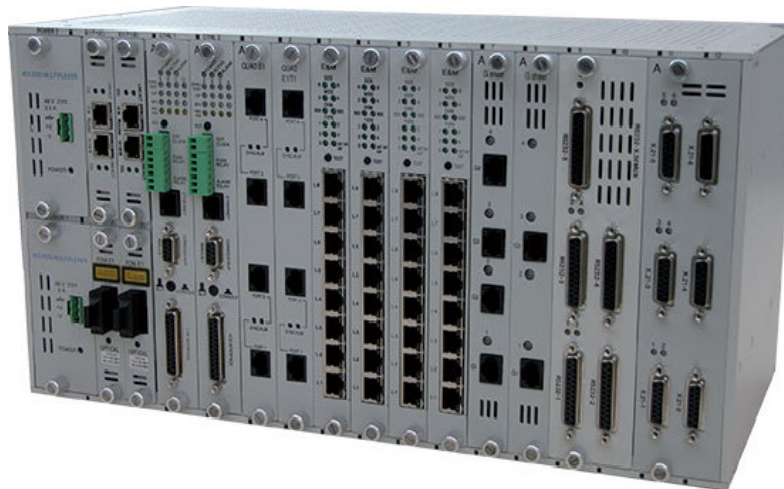


Figura 2.2.3.5: Multiplexor QX3440, 64 líneas E1/T1, 128 Mbps de backplane

2.2.4. SONET (EE UU) / SDH (el resto del mundo)

La Red Óptica Síncrona (SONET, Synchronous Optical NETwork) es una interfaz de transmisión óptica propuesta originalmente por BellCore y normalizada por ANSI. La ITU-T ha publicado, en la recomendación G.707, una versión compatible denominada Jerarquía Digital Síncrona (SDH, Synchronous Digital Hierarchy). Ambas se idearon para proporcionar una especificación que aproveche las ventajas que proporciona la transmisión digital de alta velocidad a través de fibra óptica.

Jerarquía de señal

La especificación SONET define una jerarquía de velocidades de datos digitales normalizadas (Tabla 2.2.3.5). En el nivel más bajo, denominado STS-1

(Synchronous Transport Signal level 1) u OC-1 (Optical Carrier level 1)¹, la velocidad es 51,84 Mbps. Esta velocidad se puede usar para transportar una sola señal DS-3 o un grupo de señales a velocidad inferior, como DS1, DS1C, DS2 y otras velocidades ITU-T (por ejemplo, 2,048 Mbps).

Tabla 2.2.3.5: Jerarquía de señal SONET/SDH

Nomenclatura SONET	Nomenclatura ITU-T	Velocidad	Velocidad de información útil (Mbps)
STS-1/OC-1	STM-0	51,84 Mbps	50,112 Mbps
STS-3/OC-3	STM-1	155,52 Mbps	150,336 Mbps
STS-9/OC-9		466,56 Mbps	451,008 Mbps
STS-12/OC-12	STM-4	622,08 Mbps	601,344 Mbps
STS-18/OC-18		933,12 Mbps	902,016 Mbps
STS-24/OC-24		1,24416 Gbps	1,202688 Gbps
STS-36/OC-36		1,86624 Gbps	1,804032 Gbps
STS-48/OC-48	STM-16	2,48832 Gbps	2,405376 Gbps
STS-96/OC-96		4,87664 Gbps	4,810752 Gbps
STS-192/OC-192	STM-64	9,95328 Gbps	9,621504 Gbps
STS-768	STM-256	39,81312 Gbps	38,486016 Gbps
STS-3072		159,25248 Gbps	1,53944064 Gbps

Se pueden combinar varias señales STS-1 para formar una señal STS-N. La señal se crea mezclando octetos de N señales STS-1 mutuamente sincronizadas.

La velocidad menor considerada en la jerarquía digital síncrona de la ITU-T (SDH) es 155,52 Mbps, denominada STM-1 (Synchronous Transport Module, Módulo de Transporte Síncrono). Ésta se corresponde con STS-3 de SONET.

La figura 2.2.3.5 muestra un ejemplo de multiplexión SDH a partir de la entrada de múltiples enlaces E_n .

¹ Una velocidad OC-N es la equivalente a una señal eléctrica STS-N. Los dispositivos de usuario finales transmiten y reciben señales eléctricas, las cuales deben convertirse a y desde señales ópticas para su transmisión a través de fibras ópticas.

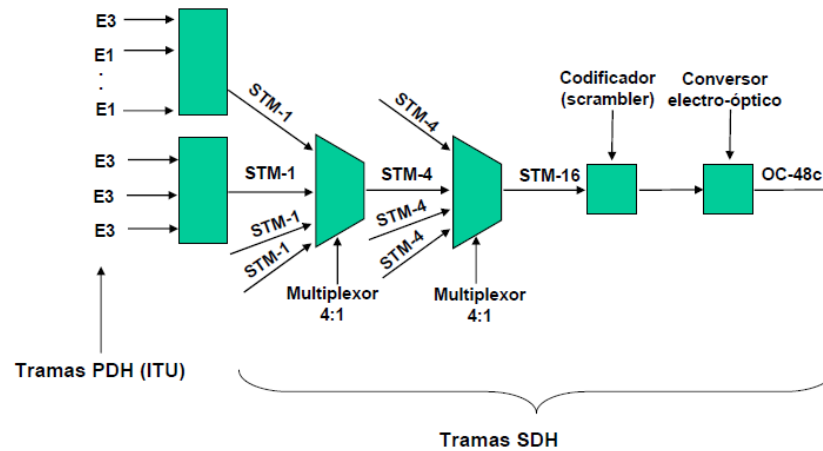


Figura 2.2.3.5: Multiplexión SDH

2.3. Multiplexión por División de Tiempo Estadística (Statistic TDM, Time Division Multiplexing)

En un multiplexor por división en el tiempo sincrónico es usual que se desaprovechen muchas de las ranuras temporales dentro de una trama. Una aplicación típica de TDM sincrónica es la conexión de varios terminales al puerto compartido de un computador central. Aun cuando sea el caso en que todos los terminales estén operando activamente, la mayor parte del tiempo no existe transferencia de datos en ningún terminal.

Una alternativa de la técnica TDM sincrónica es TDM estadística (STDM). El multiplexor estadístico aprovecha esta característica típica del intercambio de datos en los sistemas reales, como el descrito en el párrafo anterior, mediante la reserva dinámica bajo demanda de las ranuras o divisiones temporales. Al igual que en TDM sincrónica, el multiplexor estadístico tiene varias líneas de entrada/salida, por un lado, y una línea multiplexada de velocidad superior por otro. Cada línea de entrada/salida tiene asociada una memoria temporal - buffer -. En el caso del multiplexor estadístico hay n líneas de entrada/salida, pero con solo k , con $k < n$, ranuras temporales disponibles en cada trama TDM. La función de entrada del multiplexor consiste en leer las memorias de entrada aceptando los datos hasta que se complete una trama, enviándola posteriormente. En el otro extremo, el demultiplexor recibe la trama y distribuye las ranuras temporales de datos a las memorias temporales de salida correspondientes.

Dado que la técnica STDM presenta la ventaja de que los dispositivos conectados no transmiten durante todo el tiempo, la velocidad de la línea de salida multiplexada es menor que la suma de las velocidades de los dispositivos conectados. Así, un multiplexor estadístico puede usar una velocidad inferior para dar servicio a un número de dispositivos igual al soportado por un multiplexor sincrónico. Dicho de otra

forma, si un multiplexor estadístico y uno sincrónico usan un enlace a la misma velocidad, el multiplexor estadístico puede dar servicio a más dispositivos.

En la Figura 2.3.1 se da un ejemplo de STDM donde se comparan las técnicas TDM sincrónica y estadística. En dicha figura se consideran cuatro fuentes que generan datos en cuatro intervalos de tiempo (t_0 , t_1 , t_2 y t_3). En el caso del multiplexor sincrónico se tiene una velocidad de salida efectiva de cuatro veces la velocidad de cualquiera de los dispositivos de entrada. Durante cada intervalo, los datos se toman de las cuatro fuentes y posteriormente se envían. Por ejemplo, en el primer intervalo las fuentes C y D no producen datos, de modo que dos de las cuatro ranuras temporales transmitidas por el multiplexor sincrónico se encuentran vacías.

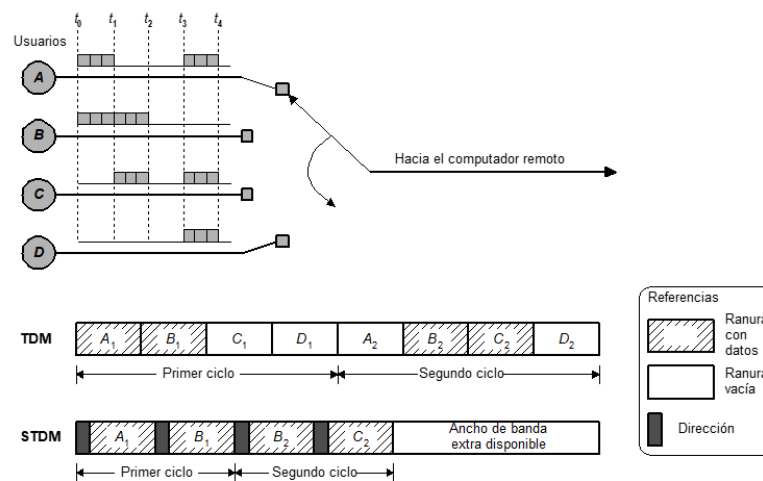
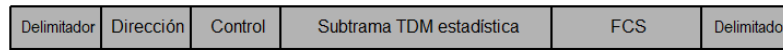


Figura 2.3.1: Comparación TDM sincrónica y estadística

Por el contrario, el multiplexor estadístico no envía ranuras temporales vacías mientras no haya datos que enviar. Así, durante el primer intervalo se envían las ranuras de A y B. Ahora bien, sucede que con este esquema se pierde el significado posicional de las ranuras. Es decir, no se sabe a priori qué fuente de datos utilizará cada ranura. Luego, dado que los datos se reciben desde las líneas de entrada de forma impredecible, es necesario contar con información de direccionamiento para asegurar que el envío se distribuirá de manera apropiada a cada línea de salida. Por lo tanto, en el caso de la técnica STDM es necesario disponer de más información suplementaria por ranura ya que cada una de ellas debe transportar una dirección, además de los datos propiamente dichos.

La estructura de trama usada por el multiplexor estadístico repercute en las prestaciones finales del mismo. Es claro que resulta deseable minimizar la cantidad de bits suplementarios con objeto de mejorar la eficiencia. En general, un sistema STDM usa un protocolo sincrónico similar al HDLC. Dentro de una trama HDLC, la trama de datos debe contener bits de control por el proceso de multiplexación. En la Figura 2.3.2 se muestran dos formatos posibles. En el primer caso solo se incluye una fuente de datos

por trama. Esta fuente se identifica mediante una dirección. La longitud del campo de datos es variable, marcándose su final por el final de toda la trama. Este esquema puede funcionar adecuadamente para carga baja, pero resulta bastante ineficiente en condiciones de carga alta.



(a) Trama completa



(b) Subtrama con una fuente por trama



(c) Subtrama con varias fuentes por trama

Figura 2.3.2: Formato de trama TDM estadística

Una forma de mejorar la eficiencia consiste en permitir que se empaqueten varias fuentes de datos en una misma trama. En este caso es necesario, sin embargo, algún procedimiento para especificar la longitud de los datos de cada una de las fuentes. De este modo, la subtrama TDM estadística consta de una secuencia de campo de datos, cada uno de ellos etiquetado con una dirección y una longitud. Pueden usarse varias técnicas para hacer aún más eficiente esta aproximación. El campo de dirección se puede reducir a través del uso de direcciones relativas; es decir, cada dirección especifica el número de la fuente actual en relación a la anterior, módulo el número total de fuentes. Así, por ejemplo, en lugar de un campo de dirección de 8 bits bastaría con uno de 4 bits.

Otra mejora es el uso de una etiqueta de dos bits con el campo de longitud. Un valor de 00, 01 o 10 corresponden con un campo de datos de uno, dos, o tres bytes, no siendo necesario considerar un campo de longitud. En este caso, el valor 11 indicaría que se incluye el campo de longitud.

Prestaciones de STDM

Se ha mencionado que la velocidad de salida en un multiplexor estadístico es menor que la suma de las velocidades de las entradas. Esto está permitido dado que se supone que la cantidad media de entrada es menor que la capacidad de la línea de salida. El problema de este enfoque es que, aunque la entrada conjunta promedio sea menor que la capacidad de la línea de salida, puede haber períodos picos en los que la entrada exceda la capacidad de la línea de salida.

La solución a este problema consiste en incluir una memoria temporal en el multiplexor para almacenar temporalmente el exceso de datos de entrada. En la Tabla 2.3.3 se da un ejemplo de comportamiento de este tipo de sistemas. Se suponen 10 fuentes,

cada una de ellas con una capacidad de 1.000 bps, y que la entrada media por fuente es el 50% del máximo. Así, en promedio, la carga de entrada es de 5.000 bps. En este ejemplo se consideran dos casos: multiplexores con capacidad de salida de 5.000 bps y 7.000 bps.

Tabla 2.3.3: Prestaciones de un multiplexor estadístico

Entrada ^(*)	Capacidad = 5.000 bps		Capacidad = 7.000 bps	
	Salida	Exceso	Salida	Exceso
6	5	1	6	0
9	5	5	7	2
3	5	3	5	0
7	5	5	7	0
2	5	2	2	0
2	4	0	2	0
2	2	0	2	0
3	3	0	3	0
4	4	0	4	0
6	5	1	6	0
1	2	0	1	0
10	5	5	7	3
7	5	7	7	3
5	5	7	7	1
8	5	10	7	2
3	5	8	5	0
6	5	9	6	0
2	5	6	2	0
9	5	10	7	2
5	5	10	7	0

(*) Entrada = 10 fuentes, 1.000 bits por fuente; velocidad de entrada promedio = 50 % del máximo.

Las entradas en la tabla mencionada muestran el número de bits de entrada procedentes de cada uno de los 10 dispositivos por cada milisegundo y la salida del multiplexor. Cuando la entrada excede la salida, el exceso se debe almacenar temporalmente.

Existe un compromiso entre el tamaño de la memoria temporal usada y la velocidad de la línea de salida. Sería deseable usar los menores valores posibles tanto de memoria como de velocidad, pero una reducción en uno de estos valores requiere el incremento del otro. Se trata, pues, de una relación de compromiso entre ambos valores. Téngase en cuenta que el deseo de reducir el tamaño de la memoria temporal no se debe al costo de ésta, sino al hecho de que a más cantidad de memoria mayor es el retardo. Por tanto, el verdadero compromiso está entre el tiempo de respuesta del sistema - retardo - y la velocidad de la línea de salida. En esta sección se presentan algunas medidas aproximadas para evaluar este compromiso. Estas medidas son suficientes para la mayoría de las situaciones.

Se definen los siguientes parámetros para un multiplexor por división en el tiempo estadístico:

I = número de las fuentes de entrada.

R = velocidad en cada fuente, en bps.

M = capacidad efectiva de la línea de salida, en bps.

α = fracción media de tiempo que transmite cada fuente, con $0 < \alpha < 1$.

$K = M/IR$ = proporción entre la capacidad de la línea de salida y la entrada máxima total.

El parámetro M se ha definido teniendo en consideración los bits suplementarios incluidos por el multiplexor. Es decir, la velocidad máxima a la que pueden transmitirse los bits de datos es menor que M , dependiendo esa diferencia de la relación de número de bits suplementarios a número de bits de datos.

El parámetro K es una medida de la compresión alcanzada por el multiplexor. Por ejemplo, para una capacidad M dada, si $K = 0,25$ se pueden gestionar, utilizando la misma capacidad de enlace, cuatro veces más dispositivos que mediante un multiplexor por división en el tiempo sincrónico. El valor de K está acotado por:

$$\alpha < K < 1$$

- Un valor de $K = 1$ corresponde a un multiplexor por división en el tiempo sincrónico, ya que el sistema tiene capacidad para atender a todos los dispositivos de entrada ingresando datos todo el tiempo.
- Un valor de $K = \alpha$ implica que el promedio de la entrada es igual a la velocidad de la línea de salida. Se necesitará en consecuencia una memoria muy grande para poder evacuar todos los datos de entrada.
- Un valor de $K < \alpha$ significa que el promedio de la entrada excederá la capacidad del multiplexor y se producirá rebalse de datos, puesto que aún con una memoria infinita el sistema será incapaz de evacuar los datos de entrada.

Se pueden obtener algunos resultados considerando al multiplexor como una cola atendida por un solo servidor. Se alcanza una situación de cola cuando un servicio recibe el pedido de un “cliente” y, al encontrarlo ocupado, tiene que esperar. El retardo sufrido por el pedido de un servicio es el tiempo de espera en la cola más el tiempo que le lleva al servidor atender el pedido (tiempo de servicio). El retardo depende del patrón de tráfico de llegada y de las características del servidor. El caso del servidor con un tiempo de servicio constante se puede relacionar fácilmente con el multiplexor estadístico:

$$\lambda = \alpha IR$$

$$T_s = 1/M$$

La velocidad de llegada promedio λ en bps es igual a la entrada potencial total - IR - multiplicada por la fracción de tiempo α con que transmite cada fuente. El tiempo de servicio T_s , en segundos, es el tiempo empleado en transmitir un bit, que es $1/M$. Obsérvese que:

$$\rho = \lambda T_s = \alpha IR / M = \alpha / K = \lambda / M$$

El parámetro ρ es la utilización o fracción de capacidad total del enlace utilizado. Por ejemplo, si la capacidad M es 50 Kbps y $\rho = 0,5$, la carga del sistema es 25 Kbps.

2.4. Multiplexión por División en la longitud de Onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing)

Toda la potencialidad de la fibra óptica puede explotarse mediante la transmisión de haces de luz a frecuencias diferentes sobre una misma fibra. Aunque esto es una forma de multiplexación por división en frecuencias (FDM), se denomina usualmente multiplexación por división en la longitud de onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing).

En WDM, el haz de luz a través de la fibra consta de varios colores, o longitudes de onda, cada uno de los cuales transporta un canal de datos distinto. En 1997 se alcanzó un hito cuando los Laboratorios Bell pusieron en marcha un sistema WDM con 100 haces, cada uno de ellos operando a 10 Gbps y consiguiéndose una velocidad total de 1 billón de bits por segundo (lo que se conoce como 1 terabit por segundo o 1 Tbps).

En la actualidad existen sistemas comerciales con 160 canales de 10 Gbps. En entorno de laboratorio, Alcatel ha conseguido transportar 256 canales a 39,8 Gbps cada uno, lo que supone un total de 10,1 Tbps, sobre una distancia de 100 km.

Un sistema WDM típico tiene la misma arquitectura que uno FDM. Diversas fuentes generan un haz láser a diferentes longitudes de onda. Éstos son enviados a un multiplexor, el cual combina las fuentes para su transmisión sobre una misma línea de fibra. Amplificadores ópticos, generalmente espaciados decenas de kilómetros entre sí, se encargan de amplificar todas las longitudes de onda simultáneamente. Finalmente, la señal compuesta se recibe en el demultiplexor, donde se separan los canales componentes y se envían hacia los receptores pertinentes en el punto de destino.

La mayor parte de los sistemas WDM operan en el rango de 1.550 nm. En los primeros sistemas se reservaban 200 GHz para cada canal, pero en la actualidad la mayoría de los sistemas Multiplexación WDM usan un espaciado de 50 GHz. El espaciado de canal definido en la norma G.692 de la ITU-T, que da cabida a 80 canales de 50 GHz, se resume en la Tabla 2.4.1. Recordar que $c = v * \lambda$ (v : velocidad de la luz en el vacío, λ : longitud de onda, c : frecuencia).

Tabla 2.4.1: Espaciado entre canales del sistema WDM (ITU-T G.692)

Frecuencia (THz)	Longitud de onda en el vacío (nm)	50 GHz	100 GHz	200 GHz
196,10	1.528,77	X	X	X
196,05	1.529,16	X		
196,00	1.529,55	X	X	
195,95	1.529,94	X		
195,90	1.530,33	X	X	X
195,85	1.530,72	X		
195,80	1.531,12	X	X	
195,75	1.531,51	X		
195,70	1.531,90	X	X	X
195,65	1.532,29	X		
195,60	1.532,68	X	X	
...	...			
192,10	1.560,61	X	X	X

WDM comparado con TDM

SDH TDM toma señales síncronas y asíncronas y las multiplexa en una sola señal con velocidad de transferencia muy superior, utilizando una sola longitud de onda sobre la fibra óptica. Es necesario que las señales de origen deban convertirse de eléctrica a óptica, o de óptica a eléctrica antes de ser multiplexadas.

WDM toma múltiples señales ópticas, las asigna a longitudes de onda individuales y multiplexa las longitudes de onda sobre una sola fibra. Otra diferencia fundamental entre las dos tecnologías es que WDM puede transportar múltiples protocolos sin un formato de señal común, mientras que SDH no puede hacerlo (Figura 2.4.2).

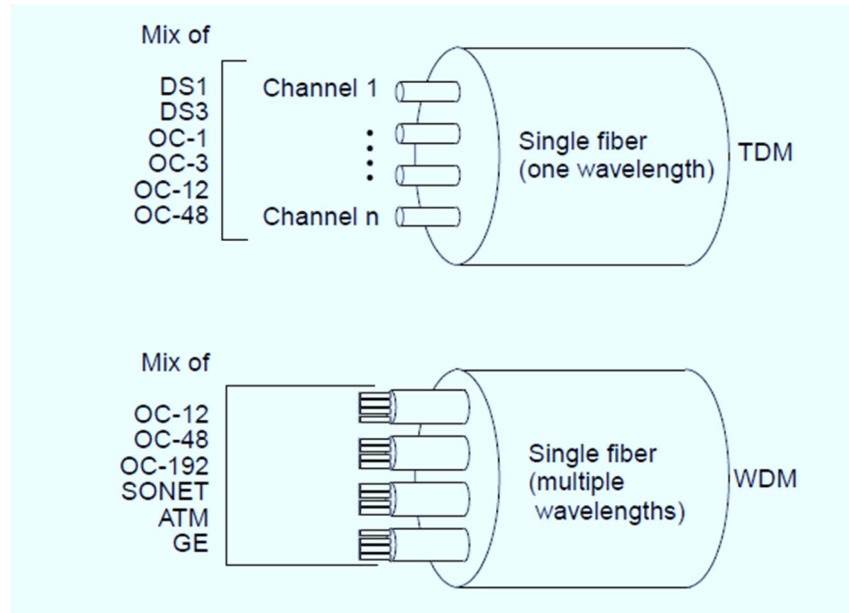


Figura 2.4.2: Multiplexión TDM versus WDM

2.4.1. Evolución de WDM: hacia la DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)

La primera implementación de WDM comenzó a fines de la década de 1980 utilizando las dos longitudes de onda ampliamente espaciadas en las regiones de los 1310 nm y 1550 nm (o 850 nm y 1310 nm), a veces llamadas WDM de banda ancha. La figura 2.4.1.1 muestra un ejemplo de esta forma simple de WDM. Observe que uno de los pares de fibras se utiliza para transmitir y el otro para recibir. Esta es la disposición más eficiente y la que más se encuentra en los sistemas DWDM.

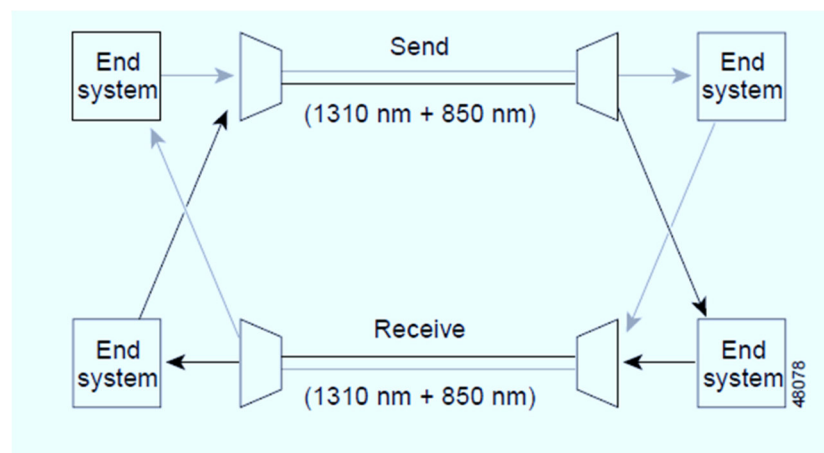


Figura 2.4.1.1: WDM con dos canales

A principios de la década de 1990 se produjo una segunda generación de WDM, a veces llamada WDM de banda estrecha, en la que se utilizaron hasta ocho canales. Estos canales ahora estaban espaciados en un intervalo de aproximadamente 400 GHz en la ventana de los 1550 nm. A mediados de la década de 1990, estaban surgiendo sistemas densos de WDM (DWDM) con 16 a 40 canales y espaciado de 100 a 200 GHz. A finales de la década de 1990, los sistemas DWDM habían evolucionado hasta el punto donde eran capaces de 64 a 160 canales paralelos, densamente empaquetados a intervalos de 50 o incluso 25 GHz.

Como muestra la Figura 2.4.1.2, la progresión de la tecnología puede verse como un aumento en el número de longitudes de onda acompañadas de una disminución en el espaciamiento de las longitudes de onda. Junto con una mayor densidad de longitudes de onda, los sistemas también avanzaron en su flexibilidad de configuración, a través de funciones add-drop (WDM utiliza dispositivos multiplexores que tienen la capacidad de “agregar” o “eliminar” canales de longitud de ondas), y capacidades de gestión.

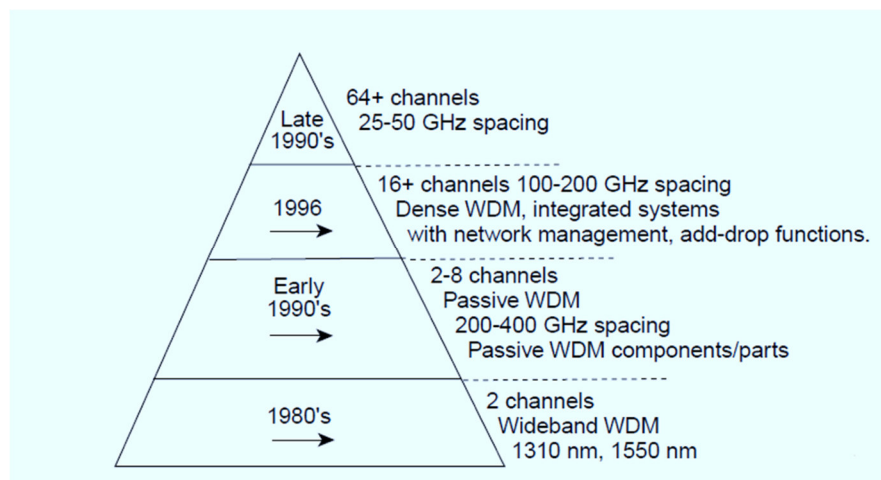


Figura 2.4.1.2: Evolución de la tecnología DWDM

El hecho de poder manipular tantas señales sobre un único enlace de fibra óptica ha producido un avance sin igual en las capacidades de transmisión de los enlaces a lo largo de la red mundial. Esta nueva tecnología de Multiplexión en un modelo de señales separadas por muy poco espacio espectral (denso) ha generado beneficios:

- ✓ Aumento de capacidad: Gran capacidad de transmisión agregada.
- ✓ Capacidad de actualización: crecimiento del cliente sin necesidad de fibra a colocar.
- ✓ Flexibilidad: multiplexación óptica de adición / eliminación (OADM), Conexión cruzada óptica (OXC)
- ✓ Escalabilidad: posibilidad de agregar nuevos nodos a la red.

- ✓ Transparencia de la red: independencia de la velocidad, el formato y Protocolos.

La Figura 2.4.1.3 muestra la implementación de un enlace DWDM con hasta 80 canales (OC-192, 10 Gbps), separados por 50GHz, logrando velocidades de 800 Gbps.

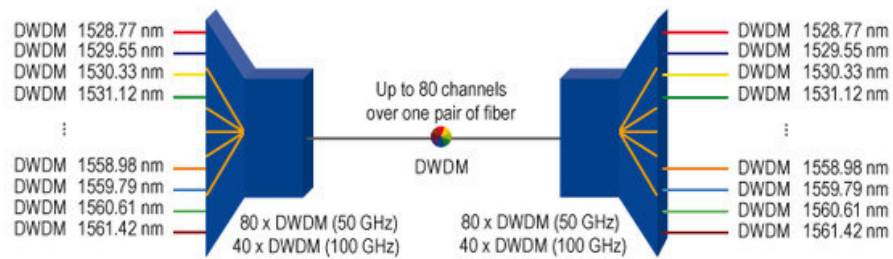


Figura 2.4.1.3: multiplexor de 80 canales sobre un par de fibra

2.4.2. Funcionamiento de DWDM

En esencia, DWDM implica una pequeña cantidad de funciones de capa física. Estas se representan en Figura 2.4.2.1, que muestra un esquema DWDM para cuatro canales. Cada canal óptico ocupa su propia longitud de onda.

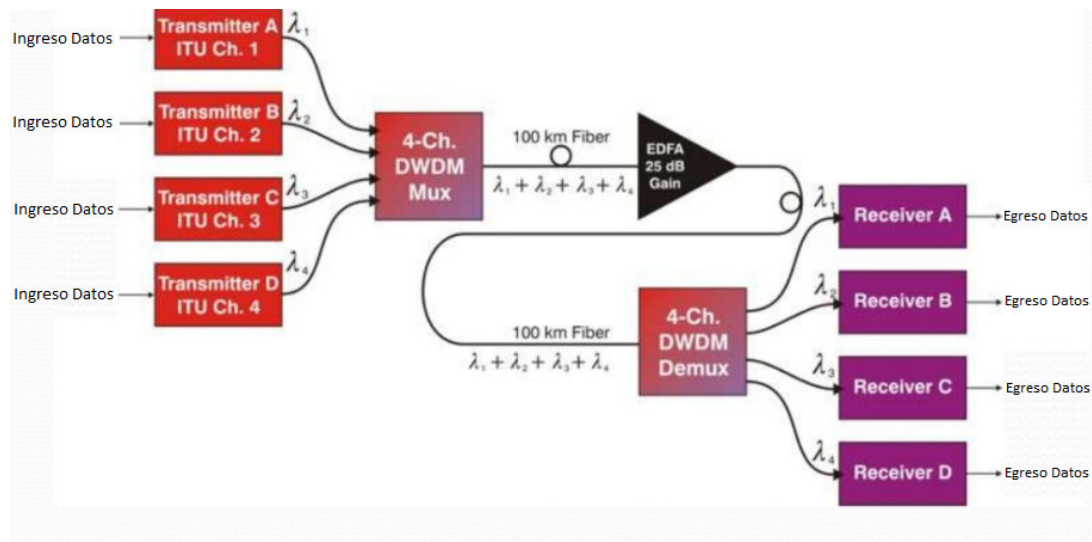


Figura 2.4.2.1: Multiplexión DWDM de cuatros canales

Amplificadores ópticos

Debido a la atenuación, existen límites en cuanto al tiempo que un segmento de fibra puede propagar una señal con integridad antes de que tenga que ser regenerado. Antes de la llegada de los amplificadores ópticos (OA), tenía que haber un repetidor para cada señal transmitida, lo que convertía al sistema en muy costoso. El amplificador óptico (OA, Optical Amplifier) permite amplificar todas las longitudes de onda a la vez y sin conversión óptico-eléctrico-óptica (OEO). Además de ser utilizados a lo largo de los enlaces ópticos, los amplificadores ópticos también se pueden utilizar para aumentar la potencia de la señal después de la multiplexación o antes de la demultiplexación, las cuales pueden introducir pérdidas en el sistema.

Amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier)

Para hacer posible transportar las grandes cargas que DWDM es capaz de transmitir a largas distancias, el EDFA fue una tecnología clave. El erbio es un elemento químico color plateado cuyo símbolo es Er y su número atómico es 68. Éste cuando es excitado, emite luz alrededor de 1,54 micrómetros, una longitud de onda de baja atenuación para las fibras ópticas utilizadas en DWDM. La figura 2.4.2.2 muestra un diagrama simplificado de un EDFA. La señal débil ingresa a la fibra dopada con erbio, en la que se inyecta luz a 980 nm o 1480 nm usando una bomba láser. Esta luz inyectada estimula los átomos de erbio para liberar su energía almacenada como luz adicional de 1550 nm. A medida que este proceso continúa por la fibra, la señal se hace más fuerte. Las emisiones generadas en el EDFA también agregan ruido a la señal; esto determina presencia de ruido en un EDFA.

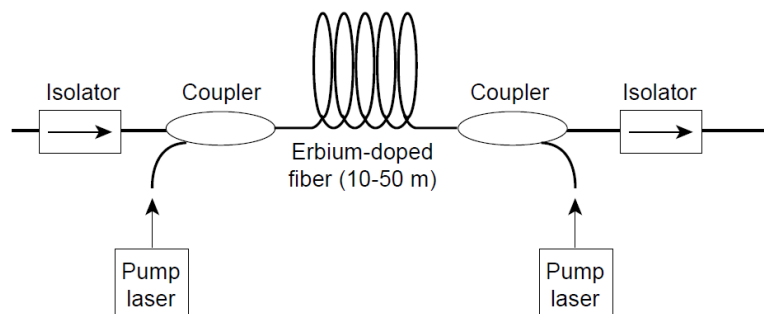


Figura 2.4.2.2: Amplificador Óptico EDFA

Los parámetros clave de rendimiento de los amplificadores ópticos son la ganancia, la uniformidad de la ganancia, el nivel de ruido y la potencia del ruido. Los EDFA suelen ser capaces de obtener ganancias de 30 dB o más y una potencia de salida de +17 dB o más. Los parámetros objetivo al seleccionar un EDFA, sin embargo, son el bajo ruido y ganancia plana. La ganancia debe ser plana porque todas las señales deben amplificarse uniformemente. Mientras que la ganancia de señal proporcionada con la tecnología EDFA es inherentemente dependiente de la longitud de onda, se puede corregir con filtros de aplanamiento de ganancia. Tales filtros son a menudo integrados en los EDFA modernos.

El bajo nivel de ruido es un requisito porque el ruido, junto con la señal, se amplifica. Este efecto es acumulativo y no se puede filtrar el ruido. En ese sentido la relación señal ruido es un factor limitante en el número de amplificadores que se pueden concatenar y, por lo tanto, limita la longitud de un solo enlace de fibra. En la práctica, las señales pueden viajar hasta 120 km entre amplificadores. A distancias más largas de 600 a 1000 km la señal debe ser regenerada.

Multiplexores y demultiplexores

Debido a que los sistemas DWDM envían señales de varias fuentes a través de una sola fibra, es necesario incluir algún medio que combine las señales entrantes. Esto se hace con un multiplexor, que toma longitudes de ondas óptica de múltiples fibras y las converge en un solo haz. En el extremo receptor, el sistema debe poder separar los componentes de la luz para que puedan ser detectados discretamente.

Los demultiplexores realizan esta función separando el haz recibido en sus componentes de longitud de onda y acoplarlos a fibras individuales. La demultiplexación debe realizarse antes de que se detecte la luz, porque los foto detectores son inherentemente dispositivos de banda ancha que no pueden detectar selectivamente una solo longitud de onda.

Los multiplexores y demultiplexores pueden ser de diseño pasivo o activo. Los diseños pasivos se basan en prismas, rejillas de difracción o filtros, mientras que los diseños activos combinan dispositivos pasivos con filtros sintonizables.

Los principales desafíos en estos dispositivos es minimizar la diafonía (crosstalk) y maximizar la separación de canales. La diafonía es una medida de qué tan bien están separados los canales, mientras que la separación de canales se refiere a la capacidad para distinguir cada longitud de onda.

Técnicas de multiplexión y demultiplexión

Antes de describir las técnicas de multiplexión y demultiplexión vamos a recordar lo que es la refracción y la difracción:

- La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina en el cambio de velocidad que experimenta la onda. El índice de refracción es precisamente la relación entre la velocidad de la onda en un medio de referencia (el vacío para las ondas electromagnéticas) y su velocidad en el medio del que se trate.
- En física, la difracción es un fenómeno característico de las ondas que consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentran un obstáculo. La

difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas sonoras, ondas en la superficie de un fluido y ondas electromagnéticas como la luz y las ondas de radio

Se puede realizar una forma simple de multiplexación o demultiplexión de luz utilizando un prisma. Figura 2.4.2.3 muestra el caso de una demultiplexión. Un rayo paralelo de luz policromática incide en una superficie de un prisma, cada longitud de onda de los componentes se refracta de manera diferente. Este es el efecto "arco iris". En la salida luz, cada longitud de onda está separada de la siguiente por un ángulo. Luego, una lente enfoca cada longitud de onda para el punto donde necesita ingresar una fibra. Los mismos componentes se pueden utilizar a la inversa para multiplexar diferentes longitudes de onda en una fibra.

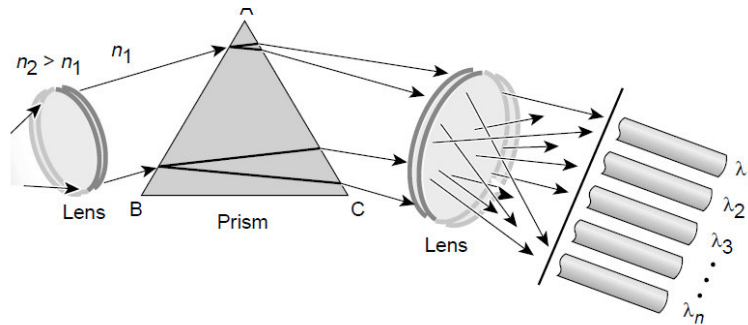


Figura 2.4.2.3: Demultiplexión por refracción prismática

Otra tecnología se basa en los principios de difracción y de interferencia óptica. Cuando una fuente de luz policromática incide en una rejilla de difracción (Figura 2.4.2.4), cada longitud de onda es difractada en un ángulo diferente y por lo tanto a un punto diferente en el espacio. Usando una lente, estas longitudes de onda se puede enfocar en fibras individuales.

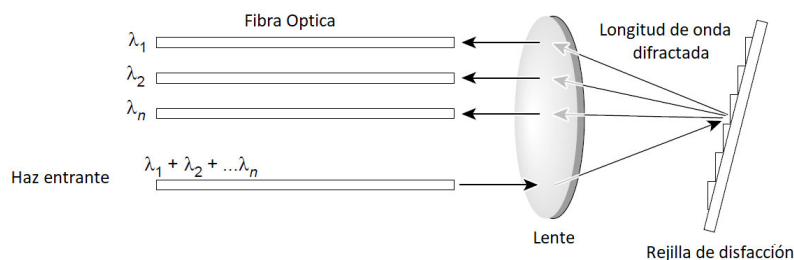


Figura 2.4.2.4: Multiplexión usando una rejilla de distracción

Las rejillas de guía de ondas en matriz (AWG) también se basan en principios de difracción. Un dispositivo AWG, a veces llamado enrutador de guía de onda óptica o enrutador de rejilla de guía de onda, consta de una matriz de guías de onda de canal curvo con una diferencia fija en la longitud del camino entre canales adyacentes (Figura 2.4.2.5). Las guías de ondas están conectadas a cavidades en la entrada y salida.

Cuando entra la luz la cavidad de entrada, se difracta y entra en la matriz de guías de ondas. La diferencia de longitud óptica de cada guía de ondas introduce retardos de fase en la cavidad de salida, donde se acopla una matriz de fibras. El proceso da como resultado diferentes longitudes de onda que tienen la máxima interferencia en diferentes ubicaciones, lo que corresponden a los puertos de salida.

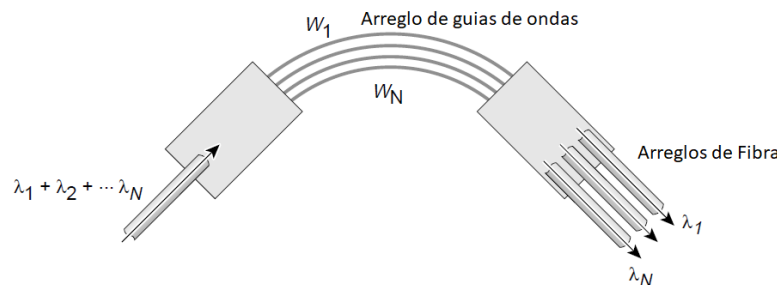


Figura 2.4.2.5: Multiplexión mediante una rejilla de guía de ondas en matriz

Una tecnología diferente utiliza filtros de interferencia en dispositivos llamados filtros de película fina o filtros de interfaz multicapa. Al colocar filtros en el enlace, los cuales consisten en películas delgadas, las longitudes de onda pueden diferenciadas y demultiplexadas. La propiedad de cada filtro es tal que transmite una longitud de onda mientras refleja las otras. Al conectar en cascada estos dispositivos, se pueden demultiplexar muchas longitudes de onda

Multiplexores ópticos de adición / eliminación (OADM, Optical Add/Drop Multiplexer)

Entre los puntos de multiplexión y demultiplexión en un sistema DWDM, hay un área en la que existen múltiples longitudes de onda. A menudo es deseable poder quitar o insertar uno o más longitudes de onda en algún punto a lo largo de este lapso. Un multiplexor óptico de adición / eliminación (OADM) realiza esta función. En lugar de combinar o separar todas las longitudes de onda, el OADM puede eliminar algunas mientras agregan a otras. Los OADM son una parte clave para avanzar hacia el objetivo de las redes totalmente ópticas. Los OADM son similares en muchos aspectos a SONET ADM, excepto que solo se agregan y quitan longitudes de onda ópticas (no se produce ninguna conversión de la señal de óptica a eléctrica). La figura 2.4.2.6 es una representación esquemática del proceso de agregar y quitar longitudes de onda. Este ejemplo incluye pre y pos-amplificación; estos componentes que pueden o no estar presentes en un OADM, dependiendo de su diseño.

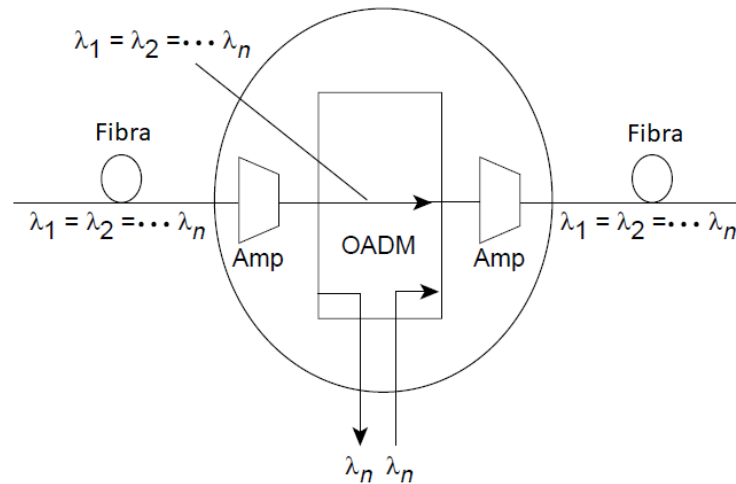


Figura 2.4.2.6: Multiplexor óptica de adición y eliminación de señales (OADM)

Hay dos tipos generales de OADM. La primera generación es un dispositivo fijo que está físicamente configurado para eliminar longitudes de onda predeterminadas específicas mientras agrega otras. La segunda generación es reconfigurable y capaz de seleccionar dinámicamente qué longitudes de onda se agregan y se eliminan (ROADM, Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer). Estos últimos tienen las prestaciones de los OADM más la capacidad de ser configurados a través de comandos en forma centralizada, lo cual permite administrar y crecer modularmente en las prestaciones de la red. En la actualidad, los ROADM son claves en el desarrollo de las redes ópticas.

Los ROADM (Reconfigurable OADM) tienen las prestaciones de los OADM más la capacidad de configurar por tele-comandos desde un centro de operación de red o NOC cuáles λ K serán subidas y/o bajadas en cada punto de interconexión. Esto flexibiliza el diseño de las redes DWDM, pues pueden reconfigurarse en cualquier momento provisionando canales Add/Drop en forma centralizada. Además, pueden crecer modularmente. Emplean filtros ópticos más amplificadores laser que son reconfigurables por software. Constituye un dispositivo con tres componentes básicos (Figura 2.4.2.7):

- ✓ Un conmutador selectivo de longitud de onda o WSS (Wavelength Selective Switch)
- ✓ Un monitor de canal
- ✓ Un amplificador

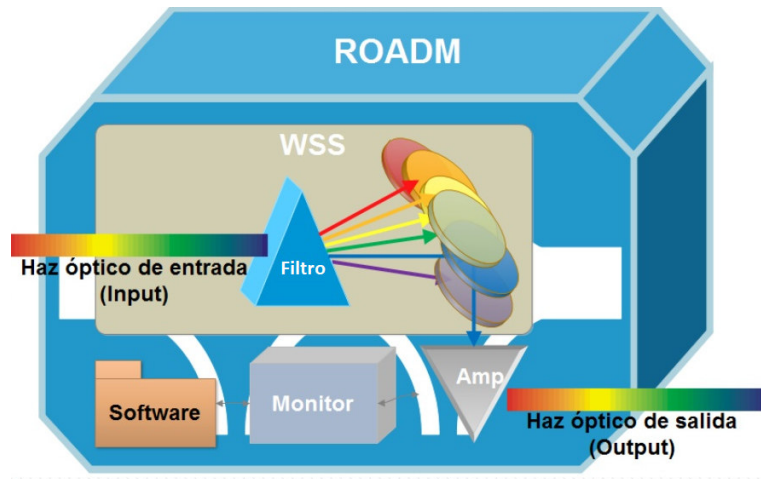


Figura 2.4.2.7: ROADM

Los filtros de película fina se han convertido en la tecnología elegida por los OADM en el actual sistema DWDM de alcance metropolitano, debido a su bajo costo y estabilidad. Para la segunda generación emergente de OADM, otras tecnologías, como las redes de fibra sintonizable y los circuladores², cobrarán importancia.

Interfaces para DWDM

La mayoría de los sistemas DWDM admiten interfaces ópticas estándar SONET / SDH de corto alcance a las que se le puede conectar un dispositivo cliente compatible con SONET / SDH. En los sistemas WDM de larga distancia de hoy en día, esta es una interfaz OC-48c / STM-16c que opera en la longitud de onda de 1310 nm. Además, otras interfaces importantes en el área metropolitana y las redes de acceso son comúnmente compatibles: Ethernet (incluido Fast Ethernet y Gigabit Ethernet) y Canal de Fibra (Fiber Channel). El nuevo estándar de 10 Gigabit Ethernet es compatible con una interfaz OC-192 de muy corto alcance (VSR) que utiliza fibra óptica monomodo (MM) entre 10 Gigabit Ethernet y los equipos DWDM.

En el lado del cliente, puede haber terminales SONET / SDH, conmutadores ATM o enrutadores. Los transpondedores son en la actualidad una pieza clave para conectar los sistemas DWDM, ya que convierten las señales ópticas entrantes en las longitudes de onda correspondientes con el estándar ITU para que puedan ser multiplexadas,

Línea de transmisión basada en DWDM

Funcionamiento del sistema de la Figura 2.4.2.8:

² Dispositivo pasivo no recíproco de tres o cuatro puertos, en el que una señal de microondas o de radiofrecuencia que entra en cualquier puerto se transmite al siguiente puerto en forma de rotación.

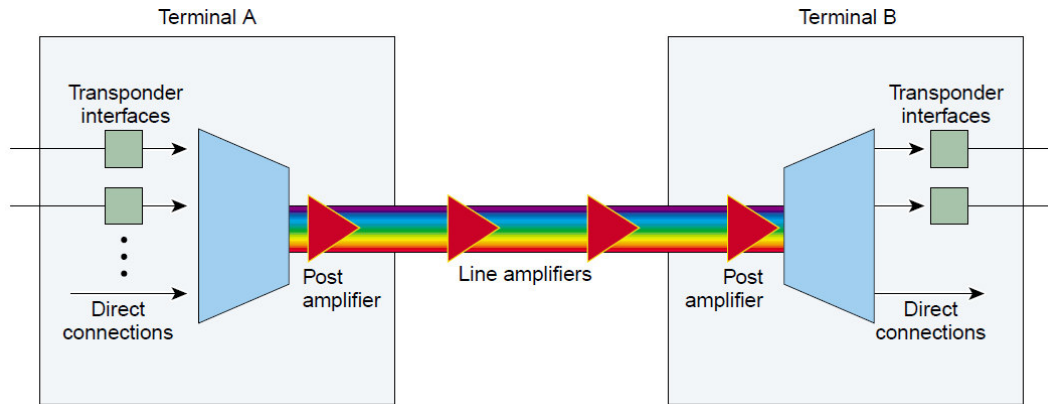


Figura 2.4.2.8: Arquitectura de un sistema de transmisión DWDM

1. El transpondedor acepta la señal de entrada en forma de láser estándar monomodo o multimodo. La entrada puede provenir de diferentes medios físicos y diferentes protocolos y tipos de tráfico.
2. La longitud de onda de cada señal de entrada se asigna a una longitud de onda DWDM.
3. Las longitudes de onda DWDM del transpondedor se multiplexan en una sola señal óptica y se lanzan en la fibra. El sistema también puede incluir la capacidad de aceptar señales ópticas directas al multiplexor; tales señales podrían provenir, por ejemplo, de un nodo satélite.
4. Un post-amplificador aumenta la fuerza de la señal óptica cuando sale del sistema (opcional).
5. Se utilizan amplificadores ópticos a lo largo del tramo de fibra según sea necesario (opcional).
6. Un preamplificador aumenta la señal antes de que ingrese al sistema final (opcional).

2.4.3. Redes basadas en DWDM

Antes de hablar sobre la implementación de redes basadas en DWDM es apropiado entender la arquitectura de una red global. Es la naturaleza de las redes de comunicaciones modernas estar en un estado de evolución continua. Factores tales como el crecimiento de la complejidad de los servicios, los patrones cambiantes de uso y la redistribución del contenido hacen que la definición exacta de las partes de una red global sea un trabajo en constante evolución. Sin embargo, se pueden definir grandes “sub-redes” basadas en distintas variables, como por ejemplo tecnología de transporte, distancias, aplicaciones, anchos de banda, entre otros. La figura 2.4.3.1 describe una jerarquía de red de alcance mundial:

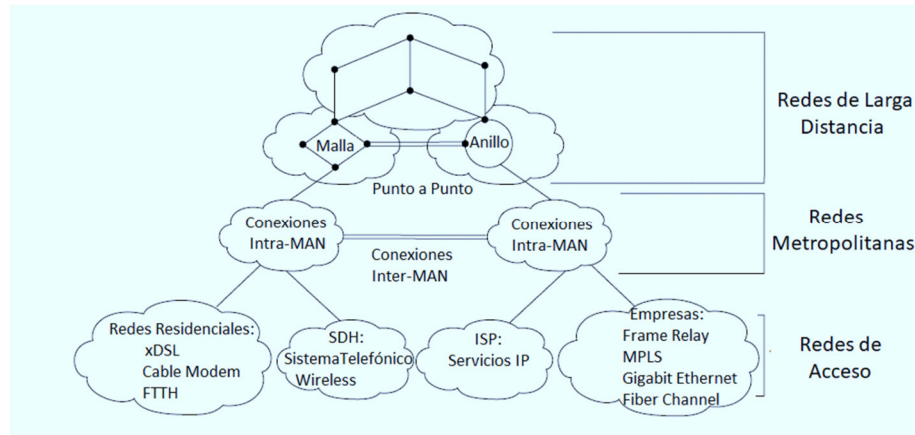


Figura 2.4.3.1: Jerarquía de una red global

Redes de larga distancia

Las redes de larga distancia son el núcleo de la red global. Dominada por un pequeño grupo de grandes operadores transnacionales y globales, las redes de largo alcance conectan las redes MAN a lo largo del mundo. Su aplicación principal es el transporte, por lo que su principal preocupación es la capacidad (ancho de banda) y distancia. En muchos casos estas redes tradicionalmente se han basado en tecnología Synchronous Optical Network (SONET) o Synchronous Digital Hierarchy (SDH), pero han experimentado un extraordinario crecimiento en la demanda de tráfico en los últimos 10 años.

Para elevar el ancho de banda de un enlace, es necesario lograr un aumento en la velocidad de bits por segundo, aumentar la capacidad de multiplexión agregando mayor cantidad de longitudes de ondas distintas y por último implementar esquemas de modulación que puedan enviar más de 1 bit por elemento de señal.

La figura 2.4.3.2 muestra la evolución de la tecnología DWDM implementada en el backbone de una red global. La figura 2.4.3.3 muestra las distintas capacidades de transmisión que se puede obtener sobre un pelo de fibra óptica.

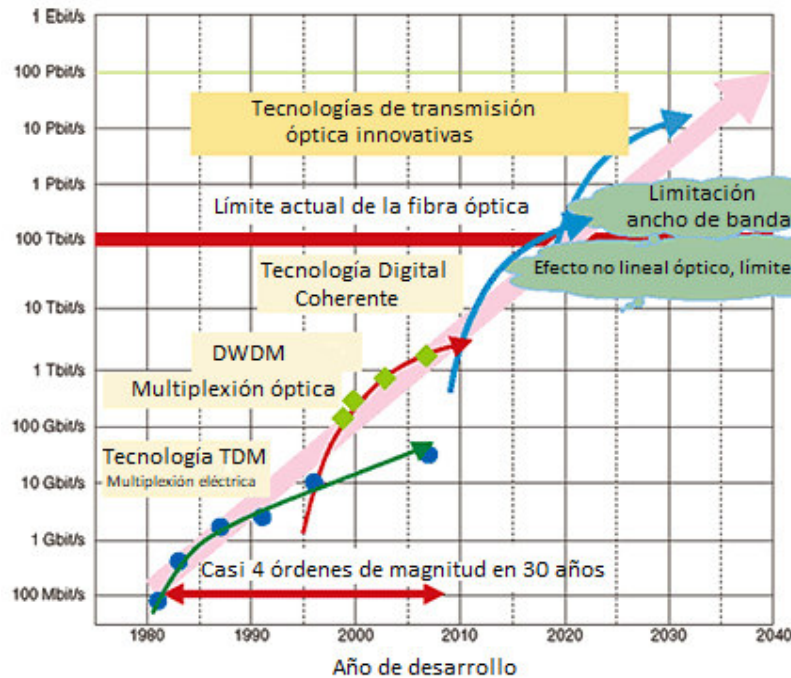


Figura 2.4.3.2: Evolución de la transmisión óptica

La figura 2.4.3.3 muestra las distintas capacidades de transmisión que se puede obtener sobre un pelo de fibra óptica.

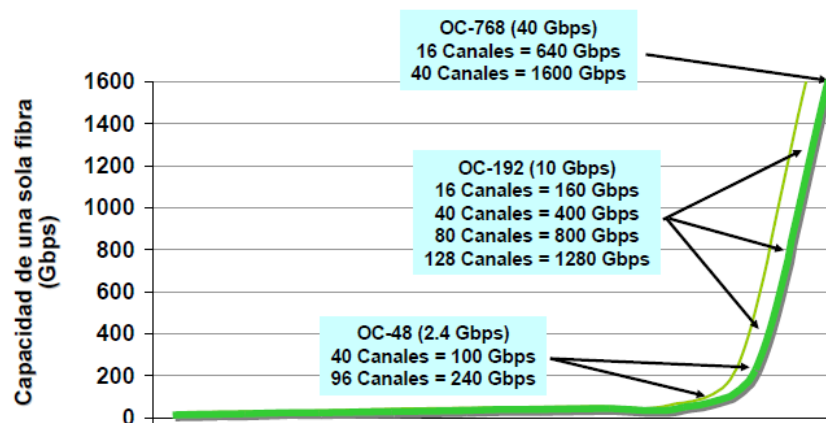


Figura 2.4.3.3: Capacidad total de una sola fibra con DWDM

DWDM y la Tecnología Digital Coherente

Como se mencionó anteriormente, el crecimiento del tráfico de datos es “dramático”. Cada vez más usuarios solicitan un nuevo conjunto de servicios que son

demandados en línea y que tienen una capacidad de espera muy limitada. Esto implicaba mejorar las prestaciones de las redes ópticas desplegadas en el mundo.

Las redes DWDM en sus comienzos utilizaron Modulación de Intensidad y Detección Directa (IM/DD) para transmitir las señales. En este tipo de modulación, la intensidad de la luz se enciende y apaga para representar los estados "1" y "0" de una señal digital. A esto se le llamó procesamiento óptico directo.

La evolución de la técnica de modulación llegó con el procesamiento óptico coherente o transmisión óptica coherente. Esta es una técnica que utiliza la modulación de la amplitud y la fase de la luz, así como la transmisión a través de dos polarizaciones, para permitir el transporte de información considerablemente mayor a través de un cable de fibra óptica. Al usar el procesamiento de señales digitales tanto en el transmisor como en el receptor, la óptica coherente también ofrece mayores velocidades de transmisión, mayores grados de flexibilidad, y un mejor rendimiento óptico.

La óptica coherente resuelve los problemas de capacidad que afrontan los proveedores de red. Toma los típicos unos y ceros en una señal digital (el parpadeo de encendido y apagado de la luz en la fibra), utiliza tecnología sofisticada para modular la amplitud y la fase de esa luz y envía la señal a través de cada una de dos polarizaciones. Esto, a su vez, imparte considerablemente más información sobre la luz que se trasmite a gran velocidad a través de un cable de fibra óptica.

La tecnología óptica coherente avanzada tiene una serie de atributos clave, entre ellos:

- ✓ La corrección anticipada de errores (FEC), que permite que las señales atraviesen distancias más largas a la vez que requiere una menor cantidad de puntos de regeneración. Esto da lugar a líneas fotónicas más sencillas, menos equipos y menos costos, mientras que, por supuesto, aumenta el ancho de banda significativamente.
- ✓ Conformación espectral, que proporciona una mayor capacidad a través de Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer (ROADM, Multiplexores de inserción óptica reconfigurables) en cascada, lo que proporciona una mayor eficiencia espectral para supercanales.
- ✓ Flexibilidad, lo que significa que la tecnología se puede adaptar para una amplia variedad de redes y aplicaciones, y la misma tarjeta puede soportar múltiples formatos de modulación o diferentes velocidades de baudios, lo cual permite a los operadores elegir entre una variedad de velocidades de línea. Los transceptores coherentes totalmente programables proporcionan una amplia gama de opciones sintonizables con granularidad fina entre las capacidades graduales, que permiten a los operadores de red hacer uso de toda la capacidad disponible y convertir el exceso de margen en servicios generadores de ingresos.
- ✓ Fuerte mitigación de la dispersión, que ofrece un mejor rendimiento óptico a mayores tasas de bits.

Por otra parte, esta nueva tecnología óptica maximiza las técnicas de transmisión sobre las cuatro dimensiones físicas que forman parte de una onda de luz (Figura 2.4.3.4):

- ✓ Aplicación de técnicas de modulación en amplitud y fase de una portadora óptica determinada, por ejemplo, mediante modulación de amplitud en cuadratura y detección coherente.
- ✓ Aplicación de multiplexación por división de polarización (PDM), por ejemplo, mediante modulación y detección de polarización dual.
- ✓ Aplicación de multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM), por ejemplo, sobre una amplia ventana de amplificación óptica.
- ✓ Aplicación por multiplexación por división de espacio (SDM), por ejemplo, utilizando múltiples fibras monomodo en un mismo cable de fibra.

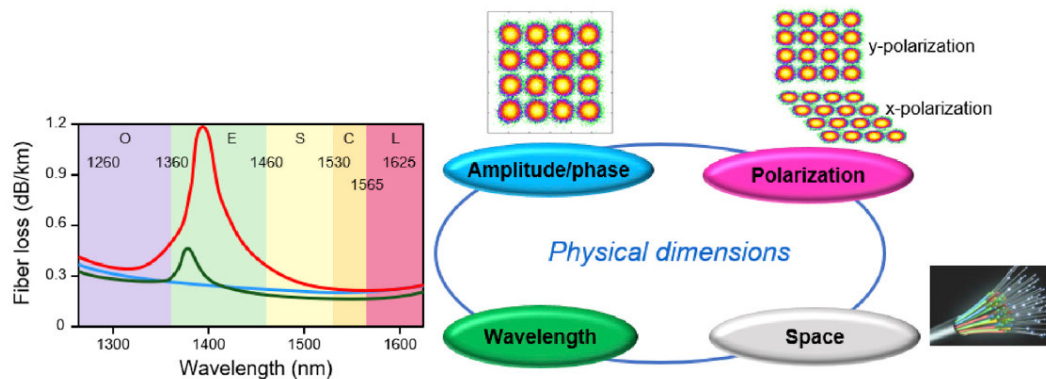


Figura 2.4.3.4: Dimensiones físicas de una onda de luz para mejorar la capacidad de transmisión de la fibra óptica. Fuente (Xiang, 2019)

La siguiente Tabla 2.4.3.4 muestra la evolución en las velocidades de transmisión de fibra óptica a lo largo de los últimos 40 años. Esta evolución tiene que ver con lo descrito a lo largo de esta sección dedicada al análisis de la aplicación de la multiplexión a la transmisión de datos utilizando fibra óptica. Se puede observar con claridad la velocidad del canal en los años 80 era de 2.5 Gb/s y la velocidad total del sistema era la misma. A partir de la maximización de las cuatro dimensiones desarrollada en párrafos anteriores, se llega a la década del 20 a obtener una velocidad de 400 Gb/s por canal, logrando una velocidad total del sistema de 32 TB/s.

Al hacer un análisis de la Tabla, se observa que la velocidad de transmisión de un único canal de datos sobre fibra óptica se ha incrementado de 2.5 Gb/s en 1989 a 400 Gb/s en 2019, lo que implica un incremento mayor a las cien veces. Las principales tecnologías responsables de ese cambio son: detección óptica de alta velocidad, corrección de errores de avance de decisión difícil (HD-FEC), modulación binaria diferencial por desplazamiento de fase (DPSK) y modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (DQPSK); detección óptica coherente asistida por procesamiento de señales digitales (oDSP), la polarización de decisión suave FEC (SD-FEC), multiplexión por división de polarización (PDM); modulación de amplitud en cuadratura de alto orden

(QAM), modelado por constelación, como CS probabilístico (PCS), oDSP avanzado como detección más rápida que Nyquist (FTN), y dispositivos opto-electrónicos de alta velocidad (OE) de clase 100 Gbaudios.

Tabla 2.4.3.4: Evolución de las velocidades de transmisión usando fibra óptica

Año	1980	1990	2000	2010	2020
Velocidad del Canal	2.5 Gb/s	10 Gb/s	40 Gb/s	100 Gb/s	200/400 Gb/s
Formato de Modulación	OOK (NRZ)	OOK (RZ)	DPSK DQPSK	PDM-QPSK	PDM-nQAM, CS, PAM4, DMT
Características del Sistema	Single-span, Single-channel	Multi-span with EDFAs, WDM	DWDM, Raman, ROADMs	1:N WSS, CDC-ROADMs	Flexible-grid WDM, M:N WSS, Super-C EDFA
Capacidad Total del Sistema	2.5 Gb/s (single channel)	400 Gb/s (40 WDM channel)	1.6 Tb/s (40 WDM channel)	8 Tb/s (80 DWDM channel)	16~32 Tb/s (Fixed-grid or flex-grid channels)
Alcance del Sistema	100 km (single span)	1000 km	1000 km @40G 3000 km @10G	4000 km @100G	2000(1000) km @200(400)G
Tecnología utilizada	Directly modulated laser	High-speed modulation, HD-FEC	Differential phase-shift-keying	Coherent detection with oDSP, SD-FEC	100Gbaud-class OE device and advanced oDSP

Velocidad Máxima de Transmisión: año 2020 (Pandemia)

La velocidad de Internet más rápida del mundo se ha registrado a unos increíbles 178 terabits por segundo (Tb/s), conexión lo suficientemente veloz como para descargar toda la biblioteca de Netflix en cosa de un parpadeo. Esta velocidad lograda en pruebas de laboratorio es una respuesta de la ciencia a la altísima demanda de conectividad provocada por una pandemia desatada durante el año 2020, lo que obligó al mundo entero a iniciar un proceso de aislamiento social.

Para alcanzar esta velocidad, los ingenieros de University College London (UCL), Xtera y KDDI Research conformaron un equipo mediante el que desarrollaron nuevas tecnologías para, principalmente, conseguir sacarle un provecho mayor a la infraestructura de fibra óptica existente. La mayoría de las redes son actualmente capaces de soportar un ancho de banda de hasta 4.5 THz, mientras otras tecnologías nuevas que se acercan a los 9 THz. No obstante, el nuevo sistema del equipo eleva el listón a 16,8 THz.

Para hacerse de un mayor espacio en la «autopista» de Internet, los investigadores desarrollaron nuevas constelaciones de Forma geométrica (GS). Básicamente, consisten en patrones de combinaciones de señales que alteran la fase, el brillo y la polarización de las longitudes de onda, con el fin de encajar más información en la luz, sin que las longitudes de onda interfieran entre sí. Esto se hizo combinando diferentes tecnologías de amplificadores existentes en un sistema combinado. (Galdino, Edwards, Yi, Sillekens, & otros, 2020)

Redes de Area Metropolitana

Se han promovido numerosas tecnologías para el transporte y encapsulación de datos en el área de alcance metropolitano. Una característica de estas redes, como se señaló anteriormente, es que están llamadas a respaldar una variedad de tipos y tarifas de tráfico nuevos y antiguos. En general, sin embargo, existe una tendencia absoluta hacia el uso de una capa óptica para el transporte de datos digitales.

La Figura 2.4.3.5 muestra la pila de protocolos que pueden interactuar con la red óptica, en este caso utilizando la tecnología de multiplexión DWDM.

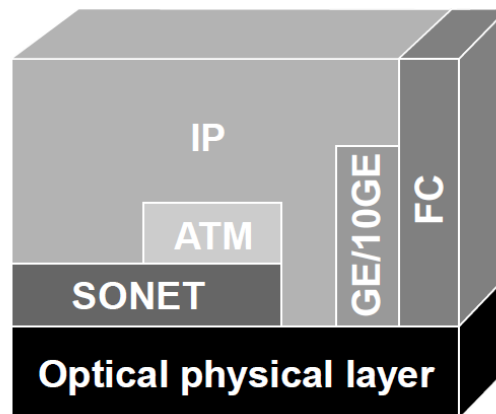


Figura 2.4.3.5: Protocolos de red y enlace de datos sobre la capa óptica

SONET/SDH (en la Argentina se implementa SDH)

SONET / SDH ha sido la base de los MAN durante los últimos años, sirviendo como la capa de transporte para la red de conmutación de circuitos basada en TDM y la mayoría de las redes de datos superpuestas. Mientras SONET / SDH se ha convertido en una tecnología muy resistente, su implementación sigue siendo bastante cara.

Las ineficiencias inherentes a la adaptación de los servicios de datos a la jerarquía optimizada para voz y a un sistema inflexible. La jerarquía de multiplexación sigue siendo problemática. Más importante aún, las limitaciones de escalamiento de capacidad: OC-768 puede ser el límite práctico de SONET / SDH, y la falta de respuesta al tráfico IP en ráfagas hace que cualquier tecnología basada en TDM sea una mala elección para el futuro.

ATM (Asynchronous Transfer Mode)

Muchos proveedores de servicios prefieren ATM porque puede encapsular diferentes protocolos y tipos de tráfico en un formato común para la transmisión sobre una infraestructura SDH. Mientras tanto, el mundo de las redes de datos, que está

abrumadoramente orientado a IP, favorece el paquete sobre SONET/SDH (POS), lo que evita la costosa capa intermedia de ATM. Avances en IP, combinados con la capacidad de los routers de escalar a 10, 40 y 100 Gbps, permiten desarrollar una red basada en IP que es adecuada para transportar principalmente tráfico de datos, y en segundo lugar voz.

Sin embargo, ATM sigue vigente en el área metropolitana. Puede adaptarse a interfaces que conectan líneas de mayor velocidad y proporcionan servicios de circuitos virtuales gestionados, al tiempo que ofrecen capacidades de gestión del tráfico.

Por lo tanto, los dispositivos de borde ATM se usan comúnmente para terminar el tráfico, incluidos VoIP, DSL y Frame Relay

Gigabit Ethernet

Gigabit Ethernet (GE) es una tecnología probada para una fácil migración e integración en sistemas tradicionales Ethernet. Es relativamente económico en comparación con otras tecnologías que ofrecen la misma tasa de transmisión, pero no proporciona calidad de servicio (QoS) o tolerancia a fallas por sí solo. Cuando se limita a las topologías punto a punto, las colisiones y el acceso múltiple con detección de portadora (CSMA) no son motivo de preocupación, resultando en un uso más efectivo del ancho de banda completo. Debido que la capa física óptica puede soportar distancias mucho más largas que el cable tradicional de Categoría 5, Gigabit Ethernet sobre fibra (1000BASE-LX, por ejemplo) se puede extender al ámbito de área amplia utilizando DWDM.

El avance en tecnología Ethernet (10, 40 y 100 Gigabit Ethernet), está siendo impulsado por la necesidad de interconecte LAN Ethernet que operen a mayores velocidades. Se pueden utilizar 10 Gigabit Ethernet para conectar varios enlaces de acceso de 1 Gigabit Ethernet a las redes troncales y así poder acceder a la WAN. Usando serie de longitudes de onda alrededor de los 1550 nm, distancias de 40 a 80 km son posibles con 10 Gigabit Ethernet sobre una fibra estándar monomodo. Con esta tecnología, los proveedores de servicios pueden construir redes Ethernet simples sobre fibra oscura sin SDH ni ATM y proporcionan servicios de alta velocidad de 10/100/1000 Mbps a muy bajo costo. Además, se puede utilizar una interfaz OC-192 de muy corto alcance (VSR) para conectar 10 Gigabit Ethernet a un equipo DWDM sobre fibra MM.

Ethernet ofrece las ventajas técnicas de una tecnología probada, adaptable, confiable y sin complicaciones. Las implementaciones son estándar e interoperables, y el costo es mucho menor que el de SDH o ATM.

Otra opción es la combinación de IP usando la red MPLS. Es más, los puertos 10, 40 y 100 Gigabit Ethernet están disponibles comercialmente. El protocolo MPLS, es un estándar recogido en la RFC 3031 del IETF, que permite integrar en IP el modo de conmutación rápido por etiquetas utilizado por ATM además de proporcionar ingeniería del tráfico, cursar tráfico con distintas QoS, proteger ciertas rutas y crear redes privadas virtuales o VPN's (Virtual Private Networks). La Figura 2.4.3.6 muestra un anillo de fibra DWDM usando tramas Ethernet.

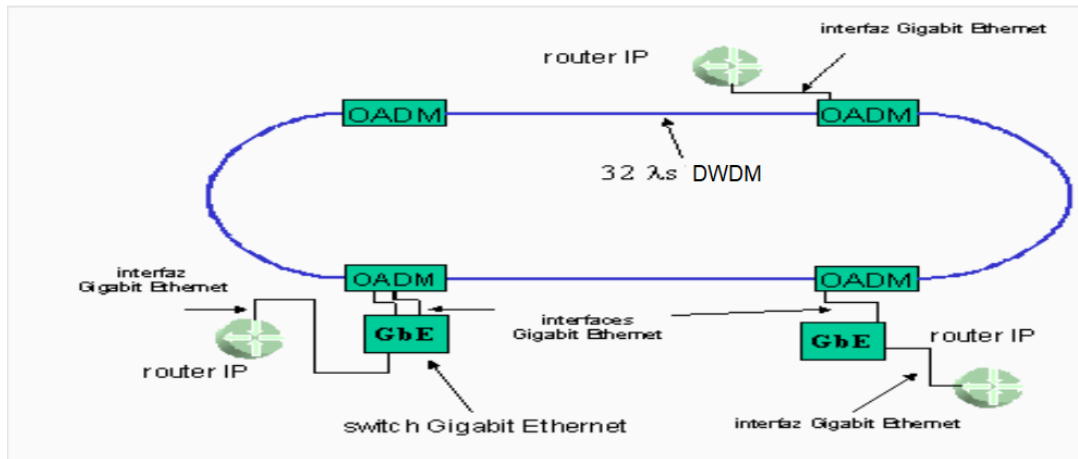


Figura 2.4.3.6: Anillo DWDM transportando Gigabit Ethernet

Desde el punto de vista arquitectónico, la ventaja de Ethernet es su potencial emergente para servir como un dispositivo escalable de extremo a extremo.

Canal de Fibra

El canal de fibra es la tecnología de enlace de datos predominante que se utiliza en las redes de área de almacenamiento (SAN). En la actualidad maneja velocidades de 400 MB/s. El canal de fibra es un reemplazo del protocolo “*Small Computer System Interface (SCSI)*”, como interfaz de alta velocidad para aplicaciones como datos copia de seguridad, recuperación y creación de reflejo.

El canal de fibra viene sin las limitaciones de distancia muy cortas de SCSI; también evita las restricciones de SCSI porque cada nodo actúa como un repetidor óptico. El canal de fibra se puede implementar en una topología punto a punto, o de malla mediante un conmutador.

El canal de fibra, al igual que otros protocolos, se puede transportar directamente sobre la capa óptica utilizando DWDM

IP (Internet Protocol) sobre DWDM

Existen tres opciones en general;

- ✓ Óptica Directa: Óptica DWDM conectada directamente a enrutadores y conmutadores (Figura 2.4.3.7), son, para algunos, la definición más pura de IP sobre DWDM. El enrutador o conmutador tiene acceso directo a la capa óptica sin la necesidad de ningún equipamiento adicional a los multiplexores pasivos. Los beneficios de esta arquitectura son costos reducidos de equipamiento y menos cajas para administrar.

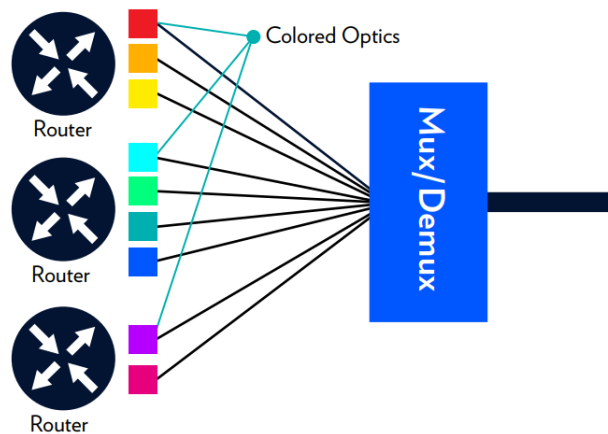


Figura 2.4.3.7: Enrutador conectado directamente al multiplexor DWDM

- ✓ Segmentación de Red: La alternativa a la óptica directa es la segmentación de la red, mediante la cual se utilizan transpondedores para segmentar la parte de enrutamiento de la red desde la parte óptica / DWDM de la red 1. Se implementan ópticas grises en los enrutadores y la conversión a longitudes de onda DWDM se lleva a cabo utilizando transpondedores en una caja separada. Las ventajas de esta arquitectura son muchas, incluido el enrutador, el aislamiento de fallas, las capacidades ópticas expandidas y el desacoplamiento de la hoja de ruta tecnológica. Para muchas empresas, especialmente aquellas con redes más complejas, la segmentación de la red basada en transpondedores es la elección correcta. Figura 2.4.3.8 es un ejemplo de la segmentación de red basada DWDM.

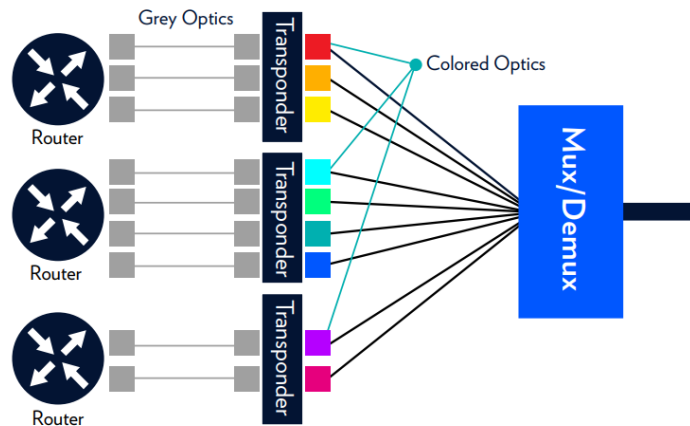


Figura 2.4.3.8: Segmentación de la red basada en DWDM

- ✓ Utilización del protocolo GMPLS: Para aprovechar el ancho de banda de DWDM es necesario un protocolo que realice la misma misión que realiza MPLS en la arquitectura de IP sobre Gigabit Ethernet. Este protocolo es el protocolo estandarizado por la IETF, GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching),

la evolución de MPLS. Este soporta no sólo dispositivos de conmutación de paquetes, sino también de conmutación en el tiempo, en longitud de onda y de fibras ópticas.

Puesto que está diseñado para soportar diferentes tipos de tráfico, las redes pueden ser escaladas y simplificadas mediante el desarrollo de una nueva clase de elemento diseñado para manejar diferentes tipos de tráfico simultáneamente. De esta forma GMPLS ofrece un panel de control único e integrado y extiende la disponibilidad de recursos y gestión del ancho de banda a lo largo de todas las capas de la red, ofreciendo así una rápida provisión de servicios de cualquier tipo, en cualquier momento, con cualquier calidad de servicio, con cualquier grado de disponibilidad y con cualquier destino. Esta provisión tiene además un costo operativo muy bajo por utilizar las ampliamente disponibles herramientas de gestión IP y utilizar un plano de control idéntico para gestionar la red óptica. Pero GMPLS permite también evolucionar gradualmente de una compleja red de transporte de datos de varias capas a una red con únicamente dos capas. Esto es debido a que la funcionalidad proporcionada actualmente por las capas ATM y SONET/SDH como la ingeniería de tráfico, la QoS, o las VPN, será progresivamente proporcionada por la red fotónica DWDM mediante GMPLS y los “digital wrappers”³

2.4.4. Redes de Transporte Óptico

Las redes de transporte óptico (en inglés Optical Transport Network, OTN) son un conjunto de elementos de red ópticos conectados mediante fibra óptica capaces de proveer transporte, multiplexación, enrutado, gestión y supervisión de las señales ópticas.

La red de transporte óptico según la norma G.709 permitirá que los operadores preparen el terreno para una infraestructura de red de servicios múltiples optimizada en tráfico IP.

Las recomendaciones ITU-T G.872, G.709 y G.798 definen las Redes de Transporte Óptica (OTN) o Jerarquías de Transporte Óptico (OTH) como la nueva generación de tecnologías de transmisión digital.

Este tipo de tecnología está basada en el protocolo G.709 que se está extendiendo más allá del dominio eléctrico de transición para el transporte digital y se está convirtiendo rápidamente en un marco estándar para gestionar señales tanto eléctricas como ópticas. En otras palabras, impulsando longitudes de onda ópticas, la tecnología OTN ha permitido la transformación de las Redes de Transporte básicas en redes ópticas reales de múltiples longitudes de onda.

³ Los “digital wrappers”, estandarizados en la G.709 del ITU-T y en proceso de implementación se encargarían de añadir bytes de sobrecarga que soporten la gestión y el control del canal óptico

La siguiente Figura 2.4.4.1 muestra en forma resumido el concepto de funcionamiento de los servicios OTN. Se puede observar que los clientes pueden ser distintos tipos de servicios (Gigabit Ethernet, Fiber Channel, SDH, IP, entre otras)

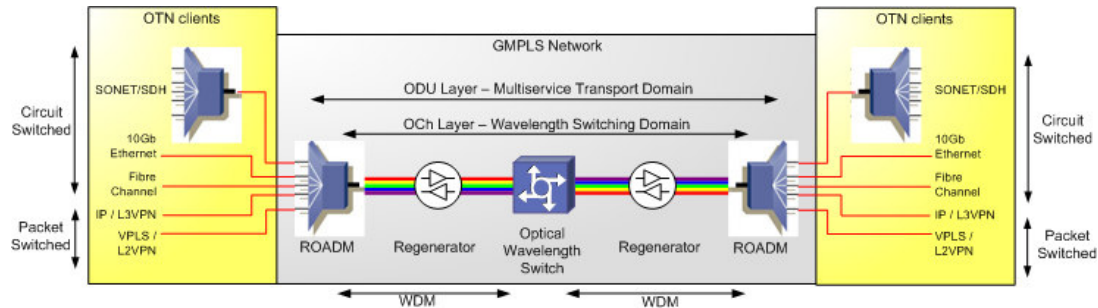


Figura 2.4.4.1: Esquema de una red OTN