



Capítulo 8:

Tecnologías para el transporte de señales

Apoyo en la





En este capítulo se tratarán los siguientes temas:

- 8.1 Introducción
- 8.2 Multiplexación
- 8.3 Multiplexación por división de frecuencia (FDM)
- 8.4 Multiplexación por división de tiempo – TDM
- 8.5 Multiplexación por división de tiempo estadística - (STDM)
- 8.6 Redes ópticas
- 8.7 Transmisión sincrónica
- 8.8 Comunicaciones por redes ópticas
- 8.9 Jerarquía digital sincrónica
- 8.10 SONET - Synchronous Optical Network
- 8.11 Interrelación entre SONET y SDH
- 8.12 El futuro de las redes ópticas.



8.1 Introducción

8.1.1 La crisis del ancho de banda

La crisis del ancho de banda obligó a la digitalización de las redes de telecomunicaciones hasta el domicilio del usuario final, es decir, incluir lo que se ha dado en llamar la última milla de la red. Para ello se siguieron utilizando los pares telefónicos, pero aprovechando al máximo todo el ancho de banda disponible de ese tipo de medios, que solo eran aprovechados hasta el límite de los *3400 Hz*.

Es evidente que por los mismos se podía enviar más que un canal telefónico o su equivalente mediante un módem para su utilización en la transmisión de datos. Precisamente, la **multiplexación del ancho de banda disponible** fue en este caso la solución adecuada.

También se han desarrollado muchas más tecnologías para dar solución al problema del incremento de tráfico. Una de ellas es el conjunto de las denominadas xDLS. Las mismas se basan en la reutilización de los cables de cobre y son de alguna manera una forma elemental de multiplexación del ancho de banda. En los pares de cobre utilizados para prestar el servicio telefónico se multiplexa el total del ancho de banda disponible en tres partes: una para el canal para voz, una banda de protección y otra para el canal para datos.



Modulación y digitalización de señales

8.1.2 Exaflood: un fenómeno de las crisis del ancho de banda

La crisis del ancho de banda, que se tradujo en una demanda explosiva, se complementó con un aumento en las expectativas de los consumidores que buscaban obtener accesos de alta velocidad a los servicios de Internet. Estos sucesos han dado lugar a un fenómeno conocido como *Exaflood*, un angloneologismo traducido como **Diluvio Digital** que deriva de la palabra *exabyte* (1 EB = 1.000.000.000.000.000.000 B. Es decir, 1.000.000 TB), una unidad de medida de información hace pocos años impensada.

Alude a la avalancha de datos transmitidos por la Red Internet a muy altas velocidades que genera un factor de estrés, afectando las infraestructuras de las redes y los costos de los proveedores, pues exige grandes inversiones de capital. Todo ello se ha traducido en cambios en los costos de explotación y operación.

Es por ello que los proveedores de servicios están buscando una manera de reducir los costos del transporte de grandes volúmenes de tráfico a través de servicios innovadores.



8.1.3 Los requerimientos de ancho de banda de distintos sectores

Los sistemas de comunicaciones que sirven como estructuras fundamentales de las naciones para la prestación de distintos servicios deben actualmente estar en condiciones de satisfacer variados requerimientos. Estos implican necesidades de anchos banda que son continuamente crecientes.

Entre ellos se pueden destacar los siguientes:

- Empresas comerciales y organismos gubernamentales.
- Investigación y educación superior.
- Usuarios residenciales.



Modulación y digitalización de señales

8.1.4 Distintas variantes para mejorar la capacidad de un canal

- La más elemental es la que se utiliza en los módems de frecuencia vocal. En ellos se aumenta, en las transmisiones multinivel, el número de niveles utilizado; siempre que la relación señal ruido lo permita.
- Aumentar la velocidad de modulación, y consecuentemente la velocidad de transmisión de datos, con relación a los valores típicos que normalmente se disponen. Por ejemplo, en los canales de frecuencia de voz cuando se van a transmitir datos por medio de módems y el canal esta con una relación señal/ruido muy baja.
- Enviar varias comunicaciones simultáneas utilizando procedimientos de multiplexación, como se describirá en este capítulo.
- Utilizar al máximo el ancho de banda disponible del medio de comunicaciones instalado y equiparlo adecuadamente con el hardware de comunicaciones necesario para aprovechar la totalidad de la capacidad disponible.



8.1.5 La idea de multiplexar

La **multiplexación del ancho de banda** disponible es una solución que permite agrupar, en un mismo medio de comunicaciones, canales diferentes que inclusive podrían prestar servicios diversos, de manera que permita aprovechar la totalidad del ancho de banda disponible. De esta manera se logra hacer más eficiente y rentable el uso del vínculo de comunicaciones que se ha establecido.

Precisamente, sobre la base de desarrollar estas ideas surge la idea de multiplexar (o multiplicar), entendiéndola primariamente como la técnica que permite que por un único canal físico de comunicaciones puedan cursarse varias comunicaciones simultáneas, sin que estas interfieran entre sí.

Los equipos que realizan estas funciones reciben el nombre de **multiplexores**. A similitud de los módems, que modulan y demodulan según transmitan o reciban señales, ellos **multiplexarán o demultiplexarán** según estén conectados en una u otra parte del circuito de datos.

Estos equipos pertenecen también al grupo que conforma el denominado **circuito de datos**.

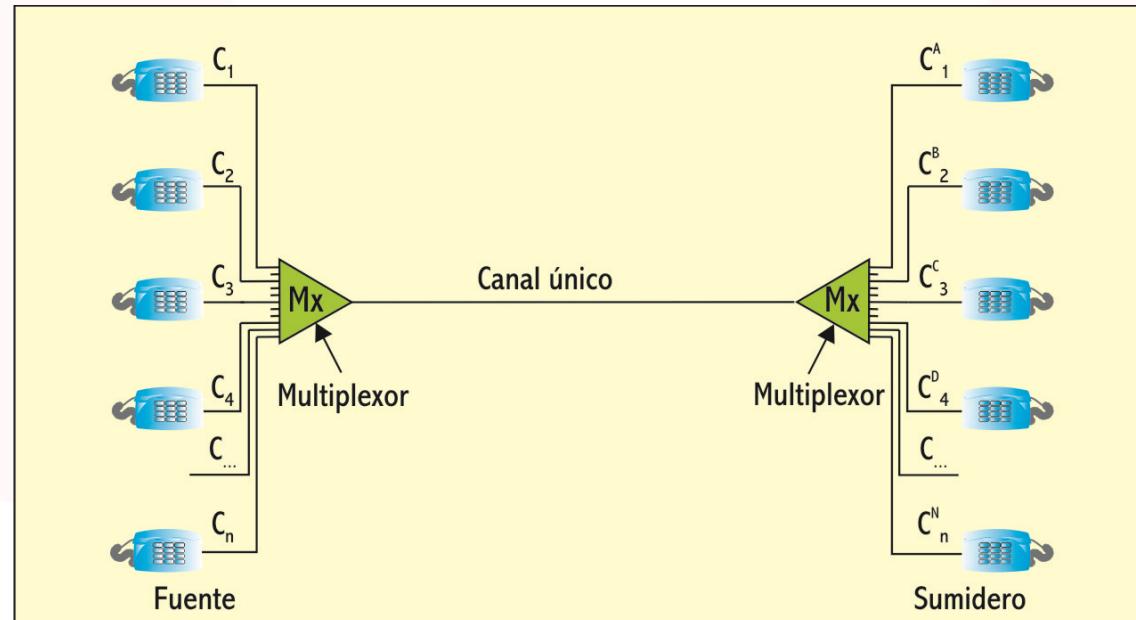


Modulación y digitalización de señales

8.2 Multiplexación

8.2.1 Definición de multiplexación

Se denomina multiplexar a la función de repartir, según una ley fija en el tiempo, un único canal de comunicaciones de capacidad C entre n subcanales de entrada de capacidades C_i , cuya suma de velocidades no puede superar el valor C .





Modulación y digitalización de señales

8.2.2 Uso de las técnicas de multiplexación

Se pueden señalar como razones que justifican el uso de técnicas de multiplexación las siguientes:

- Proporcionar una solución rápida a los problemas derivados de la crisis del ancho de banda generada por el incremento explosivo de los usos de las redes de telecomunicaciones.
- Utilización plena del ancho de banda disponible que cada medio de comunicaciones está en capacidad de proporcionar con base en sus características físicas.
- La demanda de circuitos de capacidades múltiples, es decir, de casos en que se requieren canales de distintas capacidades.
- Proporcionar bifurcaciones normales sobre distintos circuitos de transmisión, que muchas veces se necesitan en la configuración de cualquier red.
- La necesidad que existe de enviar, muchas veces, varios mensajes simultáneos entre dos puntos, entre varios equipos terminales existentes en cada extremo de un canal.
- Los descuentos que a menudo otorgan las empresas de servicios de telecomunicaciones en los servicios interurbanos e internacionales por uso de circuitos de mayor capacidad. Este hecho permite generar un genuino ahorro de costos, sin tener que limitar el uso de los servicios de telecomunicaciones.



8.2.3 Técnicas de multiplexación

Las funciones de multiplexación y demultiplexación se pueden realizar usando tres procedimientos o técnicas básicas.

Estas son:

- Multiplexado por división de frecuencia - **FDM** - *Frequency Division Multiplexing*.
- Multiplexado por división de tiempo - **TDM** - *Time Division Multiplexing*.
- Multiplexado por división de tiempo estadístico - **STDM** - *Statistical Time Division Multiplexing*.

A su vez, los sistemas de multiplexado pueden utilizar técnicas denominadas plesiocronas o sincrónicas.



8.3 Multiplexación por división de frecuencia

8.3.1 Definición y breve reseña histórica

Definiremos como **Multiplexación por división de frecuencia** a la técnica que consiste en dividir el ancho de banda usado para la transmisión por un único canal de comunicaciones en subcanales de comunicaciones independientes entre sí, donde a cada subcanal se le asigna un rango de frecuencias diferente, pero comprendido en el ancho de banda total disponible en el canal.

Los primeros multiplexores por división de frecuencia utilizaron técnicas de modulación por amplitud. Cada canal usaba un tono de frecuencia distinta, que se hacía nula o no de acuerdo a la señal digital proveniente del terminal.

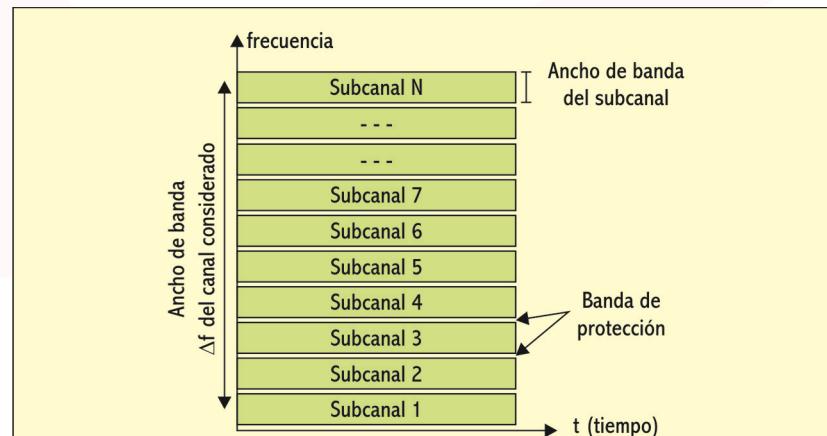


8.3.2 Esquemas de funcionamiento de la multiplexación por división de frecuencia

La multiplexación por división de frecuencia **divide** el ancho de banda disponible en el circuito de datos en varios **subcanales independientes**.

Para ello, asigna a cada uno de ellos una porción de espectro de frecuencia, de forma tal que el ancho de banda del canal debe ser mayor a la suma del ancho de banda de cada uno de los subcanales.

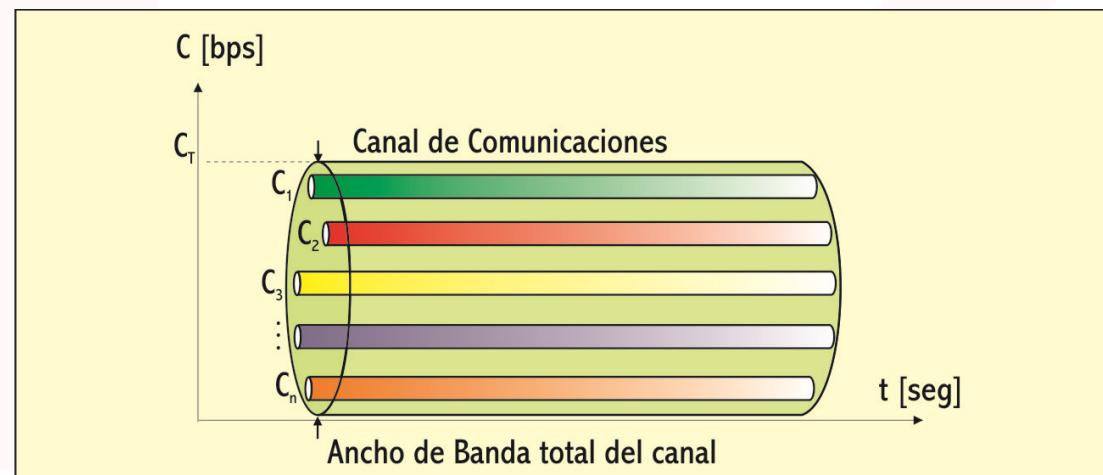
Cada subcanal está separado del anterior y del posterior por una denominada **banda de protección**. Por otra parte, esta opera con una velocidad menor a la que se podría operar con el ancho de banda del canal completo.





8.3.2 Esquemas de funcionamiento de la multiplexación por división de frecuencia

En la multiplexación por división de frecuencia la característica esencial es la siguiente: Los equipos terminales que utilizan cada subcanal toman parte del ancho de banda del canal todo el tiempo.





8.3.3 Formación del esquema básico de multiplexación por división de frecuencia

El primer esquema básico de multiplexación posee dos maneras diferentes de ir ensamblando los canales denominadas **Sistemas de Pregrupos con Traslación y Traslación de Canales Simples**.

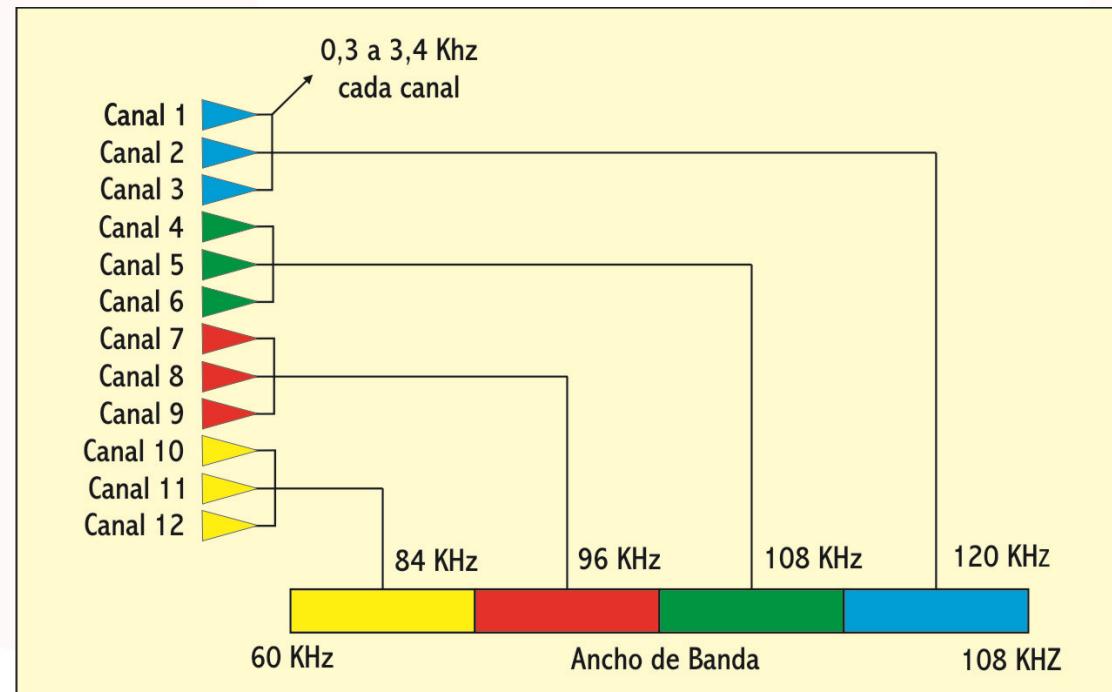
- Sistemas de pregrupos con translación: combina tres canales tomando para cada uno 4 kHz, dado que en dicho ancho de banda está incluida la parte que es necesario utilizar como banda de protección para evitar el denominado ruido de intermodulación. Los canales son modulados en banda lateral con supresión de portadora. Este procedimiento ofrece las ventajas de reducir el ruido y facilitar el procedimiento de demodulación en el receptor.

Esta combinación genera lo que se denomina un **Pregrupo**, combinándose cuatro pregrupos, separados cada uno de ellos por un ancho de banda de 12 kHz sobre portadoras que pueden estar sobre las frecuencias de 84, 96, 108 y 120 kHz. Estos forman lo que denominaremos **Grupo Básico**, que consta de 12 canales. Los mismos son transportados en un ancho de banda comprendido entre 60 y 108 kHz.



Modulación y digitalización de señales

8.3.3 Formación del esquema básico de multiplexación por división de frecuencia





8.3.3 Formación del esquema básico de multiplexación por división de frecuencia

Traslación de canales simples: en este caso, cada canal de 4 kHz es modulado sobre una portadora diferente para cada uno de los 12 canales que forman el grupo primario. Cada canal es modulado en amplitud por 12 portadoras diferentes. Por ejemplo, para el canal ubicado en la frecuencia más baja de la banda se usa una portadora de 64 kHz. Esta, al generar una doble banda lateral, ocuparía 4 kHz arriba y debajo de dicha frecuencia.

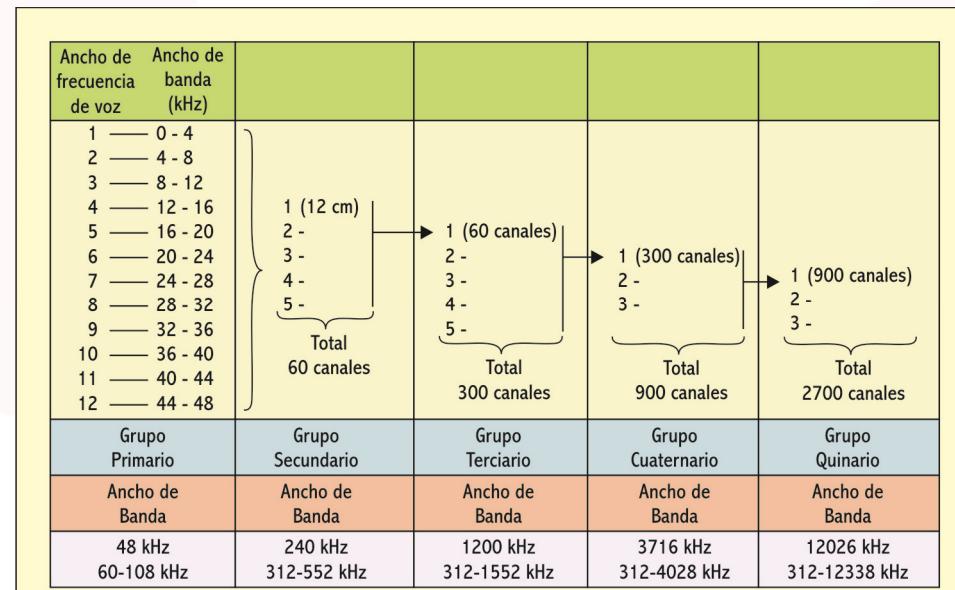
CANAL DE VOZ	FRECUENCIA DE LA PORTADORA	ANCHO DE BANDA USADO
Canal 1	64 KHz	60 a 64 KHz
Canal 2	68 KHz	64 a 68 KHz
Canal 3	72 KHz	68 a 72 KHz
Canal 4	76 KHz	72 a 76 KHz
Canal 5	80 KHz	76 a 80 KHz
Canal 6	84 KHz	80 a 84 KHz
Canal 7	88 KHz	84 a 88 KHz
Canal 8	92 KHz	88 a 92 KHz
Canal 9	96 KHz	92 a 96 KHz
Canal 10	100 KHz	96 a 100 KHz
Canal 11	104 KHz	100 a 104 KHz
Canal 12	108 KHz	104 a 108 KHz



8.3.4 Formación de órdenes superiores de multiplexación de las jerarquías analógicas

La formación de esquemas de multiplexación que permitan un mayor número de canales en el mismo medio de comunicaciones está basada en la disponibilidad de ancho de banda que cada uno de ellos pueda tener.

Las técnicas que permiten formar esquemas con un mayor número de canales están basadas en el armado de combinaciones que dependen de la norma que se use a tales efectos.





8.3.5 Utilización del concepto de multiplexación por división de frecuencia en otras aplicaciones

8.3.5.1 Acceso múltiple por división de frecuencia

El procedimiento denominado **Acceso Múltiple por División de Frecuencia** es una técnica de multiplexación que manejan varios protocolos de comunicaciones utilizados en radiocomunicaciones, como por ejemplo los que son utilizados en las redes de telefonía móvil.

El mismo consiste en dividir el ancho de banda del espectro de frecuencia que va ser utilizado en función del servicio de radiocomunicaciones que se va a prestar en distintos canales de anchos de banda de un determinado valor. Este debe estar en relación al servicio que se va a prestar.

Se accede al medio a través de uno de los canales disponibles existentes dentro del ancho de banda total. Los usuarios utilizarán el ancho de banda asignado sin interferirse entre sí.

Esta técnica, aun hoy, es utilizada en sistemas de comunicaciones tanto analógicos como digitales y en particular en la telefonía móvil, como es el caso de la tecnología GSM. La misma corresponde a un estándar de la telefonía móvil de segunda generación.



Modulación y digitalización de señales

8.3.5.2 Utilización del espectro para los servicios de radiodifusión

La utilización de la banda de ondas medias para el uso de la radiodifusión comercial de modulación en amplitud es otro ejemplo que puede ser asimilado a la multiplexación por división de frecuencia.

Sobre un espectro que va desde aproximadamente los 530 hasta los 1.600 kHz se distribuyen las estaciones comerciales conocidas como de radiodifusoras de AM. Cada una de ellas transmite con una frecuencia de portadora distinta a través de una señal modulada en doble banda lateral de 10 kHz cada una.

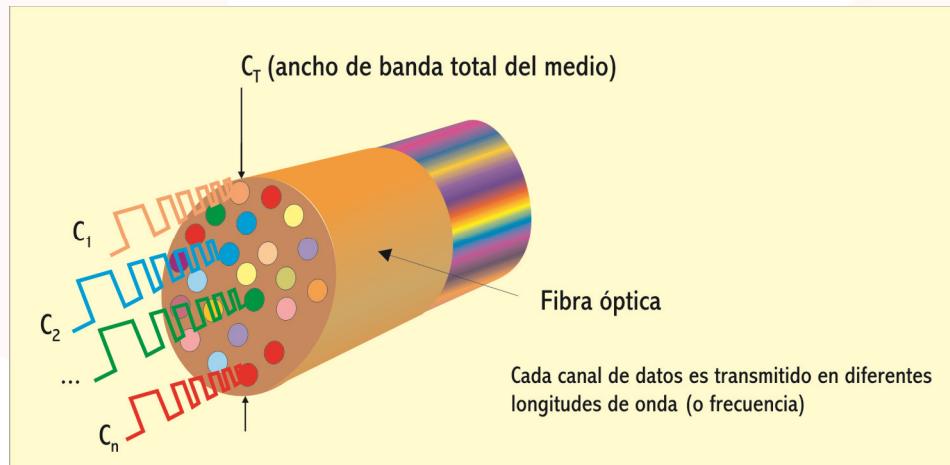
Análogamente, las estaciones de frecuencia modulada comerciales operan según las normas adoptadas por los distintos países en el orden de las muy altas frecuencias. La mayoría de ellos utilizan la banda que va de 87,5 MHz a 108 MHz con una separación de anchos de banda de 100 kHz entre cada estación. En otros pocos países se utilizan bandas de resguardo de 50 o 200 kHz.



8.3.5.3 Multiplexación por división de longitud de onda

Este tipo de multiplexación se denomina por longitud de onda, porque las frecuencias muy elevadas, como las utilizadas para los rayos de luz, se caracterizan más a menudo por su longitud de onda que por su frecuencia.

Estas tecnologías han permitido aumentar aún más el ancho de banda disponible en los enlaces de fibra óptica al permitir que por una única fibra puedan transmitirse n canales diferentes. Cada canal utilizará una longitud de onda diferente.





Modulación y digitalización de señales

8.3.5.4 Multiplexación por división de frecuencias ortogonales

Se entiende como tal a la utilización de un canal de comunicaciones de un determinado ancho de banda para enviar por él un conjunto de subcanales con ondas portadoras ortogonales de diferentes frecuencias separadas por anchos de banda pequeños, que serán moduladas con distintas tecnologías digitales (como QAM o PSK) y donde cada una de ellas transportará una información diferente.

Esta tecnología se utiliza también, entre otros casos, en:

- Tecnología PLC
- Redes inalámbricas IEEE 802.11a, g y n (conocida también como Wi-Fi).
- Redes de telefonía celular de cuarta generación: 4G; es la cuarta generación de los estándares de telefonía móvil. Utiliza la tecnología denominada LTE. Sucede a las familias conocidas como 2G y 3G.
- Acceso de banda ancha móvil - IEEE 802.20/IEEE 802.16e (conocida también como WiMax).
- Sistemas para transmisión digital de señales de audio y vídeo conocidos como DTV o DTT.



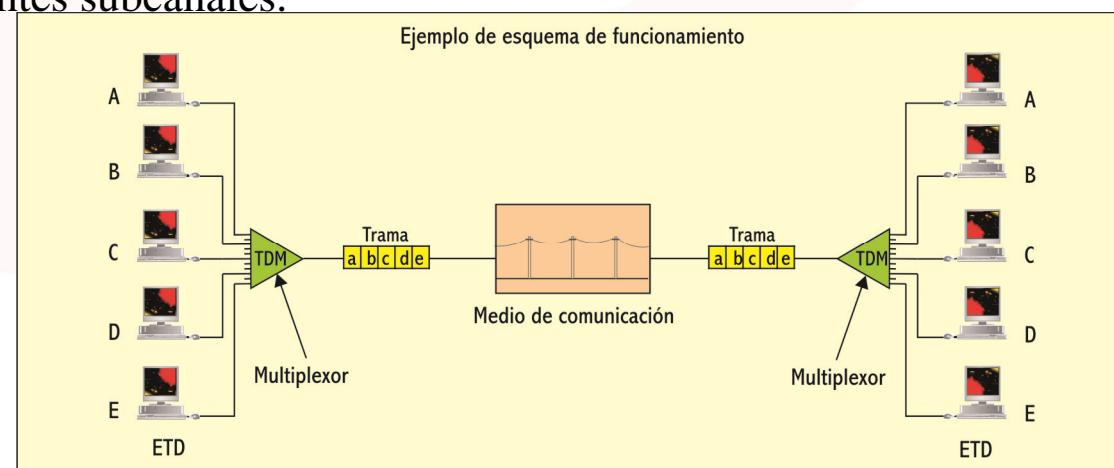
Modulación y digitalización de señales

8.4 Multiplexación por división de tiempo

8.4.1 Introducción y definición

Definiremos como multiplexación por división de tiempo a la técnica que consiste en dividir el tiempo de transmisión de una secuencia de datos transmitida por un único canal de comunicaciones en subcanales de comunicaciones independientes entre sí, donde a cada subcanal se le asigna un segmento de dicho tiempo.

Usando un canal de transmisión se crean **ranuras de tiempo** que un equipo denominado **multiplexor** adjudica a los subcanales o señales de entrada de una manera determinada. Cada uno de dichos subcanales de comunicaciones recibe la señal de un equipo terminal diferente que denominaremos A, B, C, etc. El multiplexor procederá a armar una trama con todos los datos aportados por los diferentes subcanales.

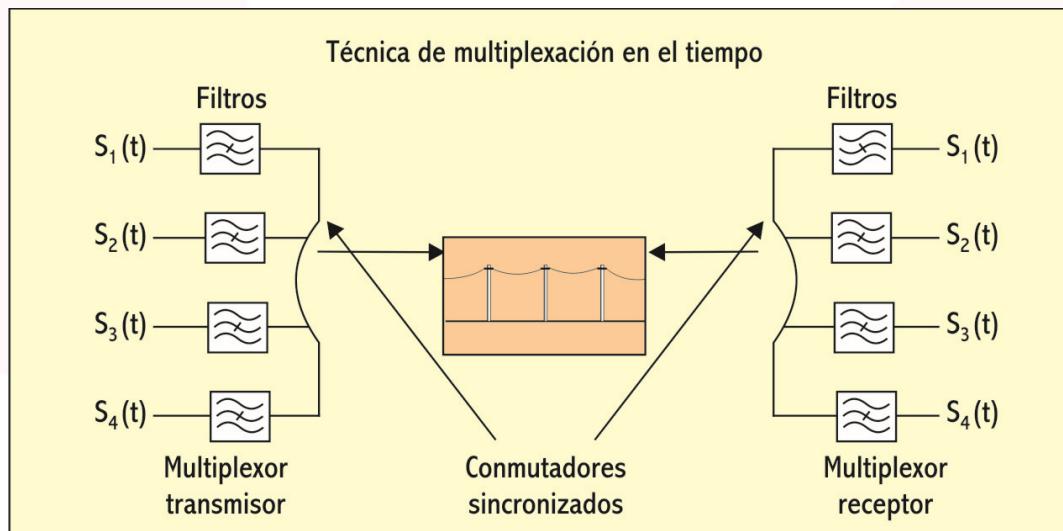




8.4.2 Esquema de funcionamiento de la multiplexación por división de tiempo

8.4.2.1 Procedimiento general

Para proceder a realizar el proceso de multiplexación por división de tiempo podemos suponer a un conmutador rotativo electrónico ubicado en el transmisor, que toma secuencialmente muestras de cada señal correspondientes a cada subcanal. En el receptor existirá otro conmutador rotativo similar, sincronizado con el del transmisor.



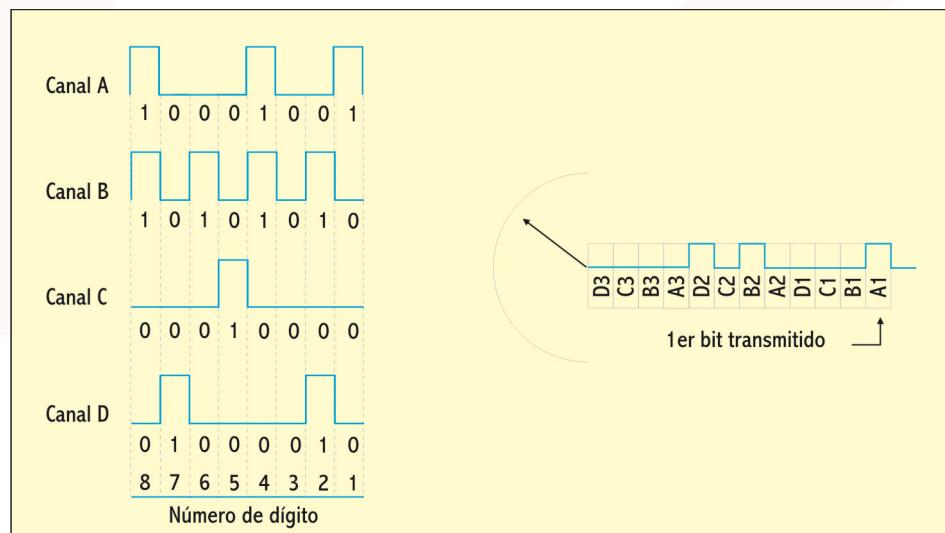


Modulación y digitalización de señales

8.4.2.2 Armado de las tramas

Para el armado de las tramas y el sincronismo existen dos formas para implementar las tramas o adjudicar las ranuras de tiempo o *slots*. Estas formas se denominan entramado de bits y entramado de caracteres.

- Entramado de bits: en este procedimiento cada período de tiempo o *slot* se ajusta para que transporte un solo bit de cada terminal. El mismo se efectúa especialmente cuando se combinan flujos de datos, provenientes de terminales semejantes. También es denominado dígito por dígito o por su nombre en inglés *digit interleaving*. Cada trama está formada por los bits de sincronismo y por un bit de cada terminal. Esta técnica es la más simple y económica en cuanto a la electrónica que usa, pues no requiere almacenamiento de cada carácter ni otras funciones adicionales.

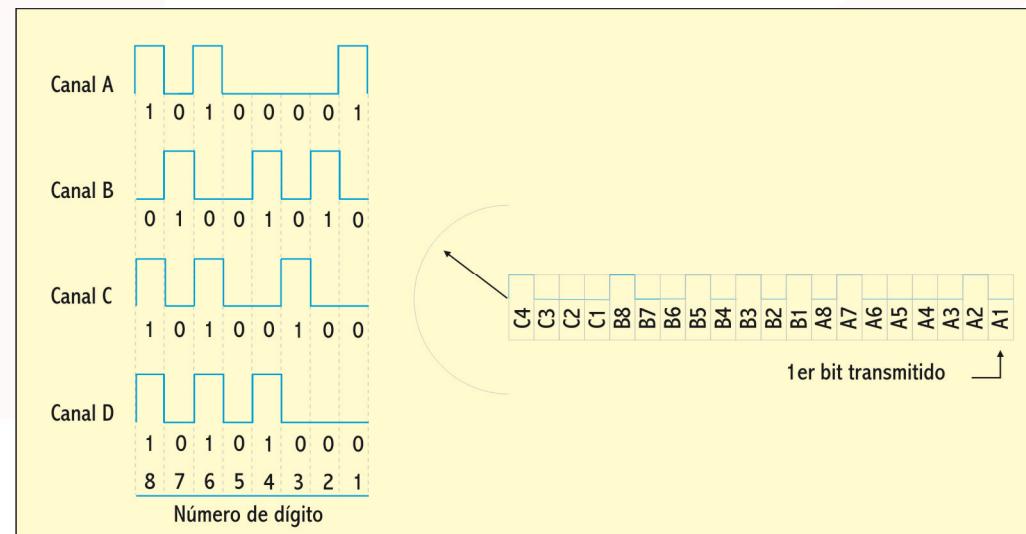




Modulación y digitalización de señales

8.4.2.2 Armado de las tramas

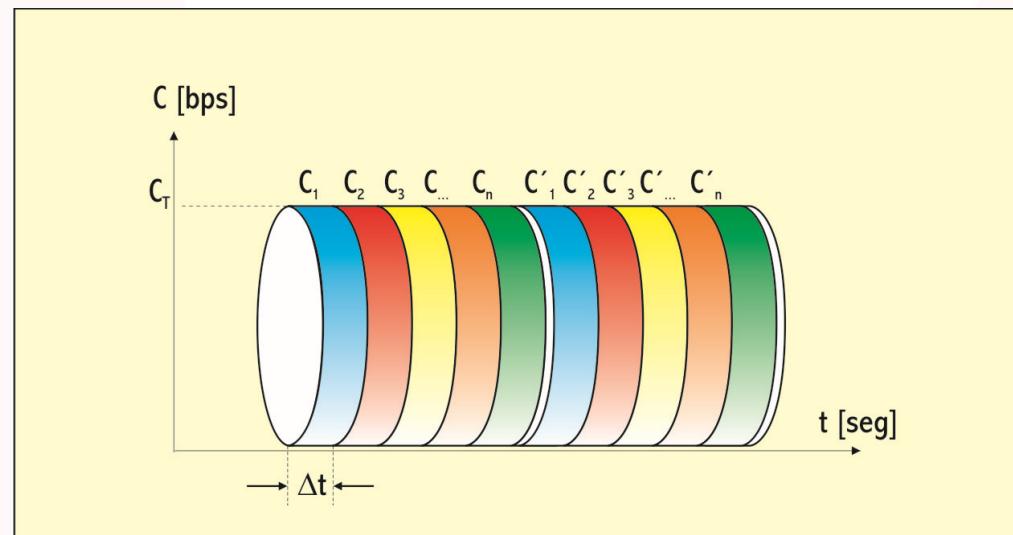
- Entramado de caracteres: esta otra alternativa se denomina entrelazado o entramado de caracteres (palabras). Se emplea cuando las señales están compuestas por un grupo de caracteres o palabras que por razones operacionales es conveniente preservar en su integridad. En este caso, la llave rotativa del multiplexor deberá detenerse en cada entrada de canal mientras está siendo transferido el carácter. Resulta claro que si en las entradas están arribando continuamente los datos, será necesario algún tipo de almacenamiento local para acumular las señales mientras se espera la siguiente transferencia.





8.4.2.2 Armado de las tramas

En la multiplexación por división de frecuencia, la característica esencial es la siguiente: Los equipos terminales que utilizan cada subcanal toman todo el ancho de banda del canal, parte del tiempo.





Modulación y digitalización de señales

8.4.3 Formación del esquema básico de multiplexación digital

El desarrollo del equipamiento que usa la técnica de modulación por pulsos codificados ha permitido el desarrollo de las técnicas de multiplexación por división de tiempo y su uso generalizado en los sistemas digitales de transmisión. Presenta numerosas ventajas sobre los sistemas analógicos.

Es conocido que para permitir la transmisión de las señales analógicas a lo largo del canal es necesario colocar, a distancias determinadas, equipos amplificadores que si bien mejoran su el nivel, perjudican la relación señal/ruido por dos razones: amplifican el ruido que se encuentra sumado a la señal útil y a la vez, por mejor que se los construyan, generan un ruido propio. Por tal razón, las señales sufren un deterioro con la distancia que a ciertos valores las hace ininteligibles.

Por el contrario, la digitalización de las señales en las redes permite el uso de repetidores regenerativos. Estos evitan que los fenómenos asociados con las señales tales como el ruido, la atenuación y la distorsión no pasen a la sección siguiente de estos equipos.



Modulación y digitalización de señales

8.4.4 Sincronización

La multiplexación por división de tiempo, desde el punto de vista tecnológico, requiere una implementación más compleja que la que se utiliza en los sistemas por división de frecuencia.

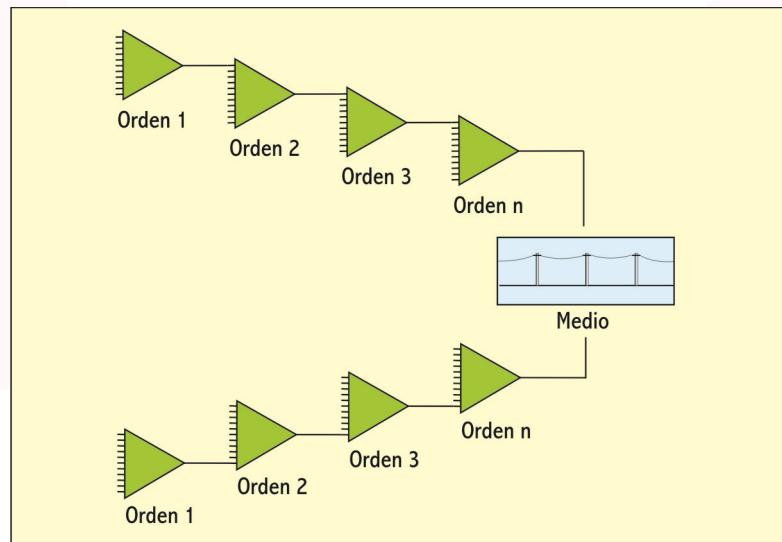
El multiplexor y el demultiplexor deben tener los relojes de tiempo sincronizados para evitar que los bits transmitidos no lleguen en el orden adecuado y así puedan ser entregados al canal de salida al que pertenecen.

Por tal motivo es necesario agregar bits de sincronismo para evitar errores en la transmisión de las tramas. Estos bits permiten sincronizar el flujo que ingresa al demultiplexor para separar correctamente los distintos bits que forman cada muestra y de esta manera entregarla al canal correspondiente para que sea transmitida a su destino.



8.4.5 Formación de órdenes superiores de multiplexación de la jerarquía digital plesiócrona

Los sistemas de multiplexación digital de primera generación del tipo TDM se denominan técnicamente **Sistemas Plesiócronos**, o también, el conjunto de los distintos niveles de multiplexación, **Jerarquía Digital Plesiócrona**. El concepto de plesiócrono ha sido definido por la UIT - T en su Recomendación G.701 y adoptado por todos los distintos sistemas de multiplexación digital.



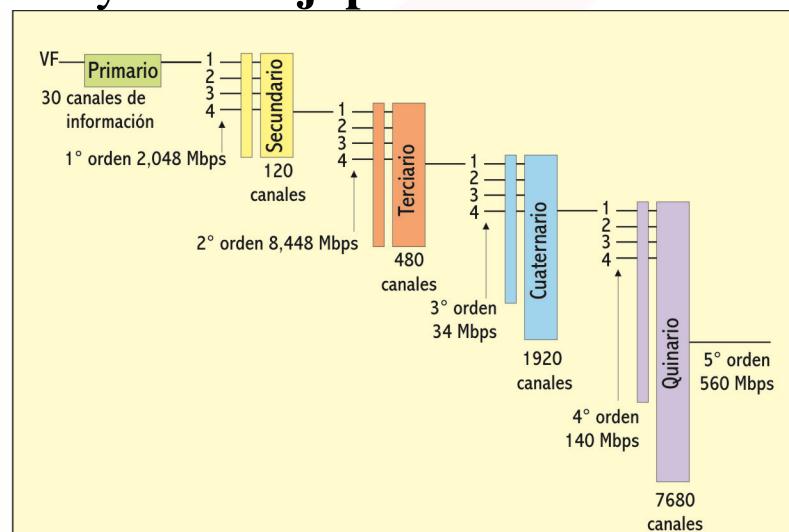


Modulación y digitalización de señales

8.4.5 Formación de órdenes superiores de multiplexación de la jerarquía digital plesiócrona

Es de destacar que tanto en la **Jerarquía Digital Plesiócrona - PDH** como en la **Jerarquía Digital Sincrónica - SDH** el primer nivel corresponde al **Grupo Básico** que tiene un ancho de banda de 2,048 Mbps y su estructura es la que fue descripta oportunamente en este capítulo. Las diferencias se encuentran a niveles superiores. En particular, se usan tres tipos de jerarquías de multiplexación que se suelen conocer como **norma europea**, **norma americana** y **norma japonesa**.

Orden	Velocidad de transmisión	Cantidad de bits por trama	Duración de la trama μ s	Nº de Canales
1	2,048 Mbps	256	125,00	30
2	8,448 Mbps	848	100,38	120
3	34,368 Mbps	1536	44,69	480
4	139,264 Mbps	2904	20,85	1920
5	564,992 Mbps	2688	4,70	7680





8.4.5 Formación de órdenes superiores de multiplexación de la jerarquía digital plesiócrona

Obsérvese que la **norma japonesa** respeta la **norma americana** en sus dos primeros órdenes, pero comienza a diferir en la forma de armar los órdenes tres y cuatro.

Orden ¹⁶	Velocidad de transmisión	Grupos de orden inferior	Número de canales
DS1/T1	1,544 Mbps	---	24
DS2/T2	6,312 Mbps	4	96
DS3/T3	44,736 Mbps	7	672
DS4/T4 (E)	139,264 Mbps	3	2016
DS4/T4	274,176 Mbps	6	4032
DS5/T5	564,992 Mbps	12	8064

NOTA: Los órdenes DS4/T4 (E); DS4/T4 y DS5/T5 la cantidad grupos de orden inferior se refieren al grupo DS3/T3

Orden	Velocidad de transmisión	Grupos de orden inferior	Número de canales
1	1,544 Mbps		24
2	6,312 Mbps	4	96
3	32,064 Mbps	5	480
4	97,728 Mbps	3	1440



8.5 Multiplexación por división de tiempo estadística

8.5.1 Introducción

La multiplexación por división de tiempo estadística, conocida como *Statistical Time Division Multiplexing – STDM*, es una variante de la **Multiplexación por División de Tiempo - TDM**. Trata de aprovechar los tiempos muertos de transmisión en las líneas de comunicaciones.

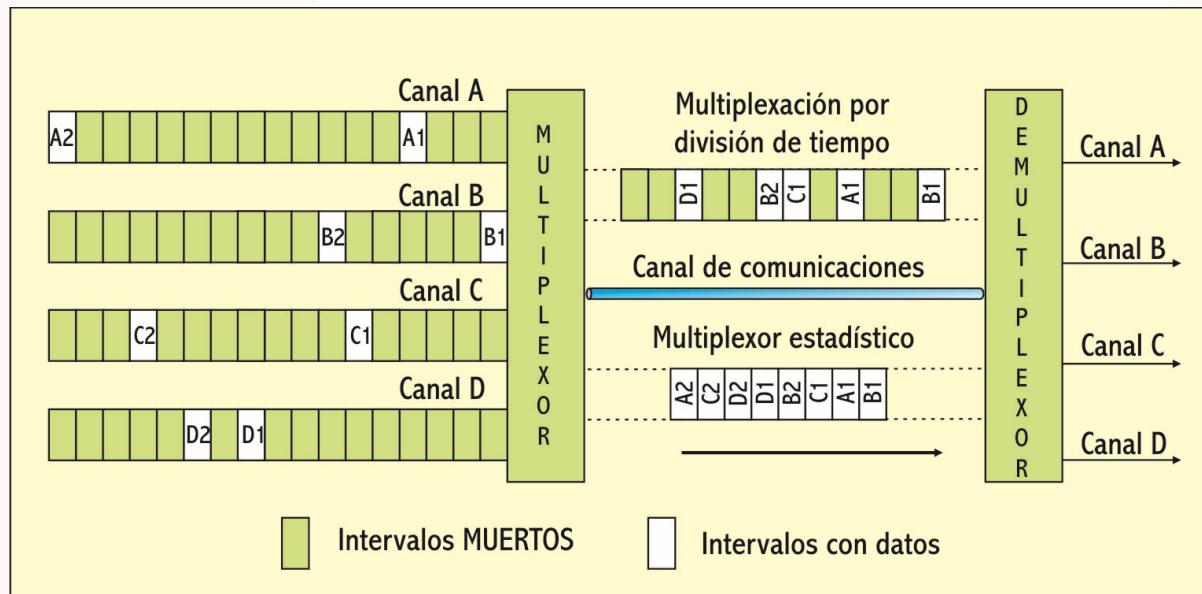
8.5.2 Esquema de funcionamiento de la multiplexación por división de tiempo estadística

El nombre de este tipo de funciones está relacionado con su funcionamiento. Precisamente, se denominan **estadísticos** por asignar un régimen de tiempo de transmisión a los terminales según una base estadística y no **igual valor temporal para cada equipo terminal**. Esa base estadística se determina en función de la actividad que en cada momento tienen los terminales.

En la multiplexación estadística se pueden aprovechar todos los segmentos de transmisión y, además, se obtiene una reducción apreciable del número de caracteres de sincronismo mediante la utilización de tramas suficientemente largas (hasta varias veces las que se usan en la multiplexación por división de tiempo).



8.5.2 Esquema de funcionamiento de la multiplexación por división de tiempo estadística





8.6 Redes ópticas

8.6.1 Introducción

8.6.1.1 *Reseña histórica*

Las denominadas redes ópticas han ido creciendo en forma vertiginosa a partir del desarrollo de las fibras ópticas y las necesidades de anchos de banda crecientes. Precisamente, las **fibras ópticas** así como se las conoce actualmente comenzaron a ser estudiadas en la década de los años 50 en el siglo pasado.

Los primeros experimentos que llevaron a aplicaciones prácticas fueron desarrollados en 1952 por **Narinder Singh Kapany**, un investigador indio formado en Inglaterra a quien se lo reconoce como el padre de la fibra óptica. Kapany utilizó inicialmente trabajos realizados por el físico irlandés **John Tyndall**. Este fue quien realizó los primeros estudios sobre los caminos que podía recorrer la luz dentro de distintos materiales curvándose por reflexión, como por ejemplo en el agua. Sus trabajos fueron presentados por primera vez ante la comunidad científica en 1870, momento cuando, además, quedó demostrado que el cristal era un medio eficaz para su transmisión a distancias mayores.

Los primeros usos de la fibra óptica fueron aplicados a la medicina a través del endoscopio médico patentado en 1956 por la Universidad de Michigan, que permitió mediante el uso de un haz de fibras semiflexibles la transmisión de imágenes.

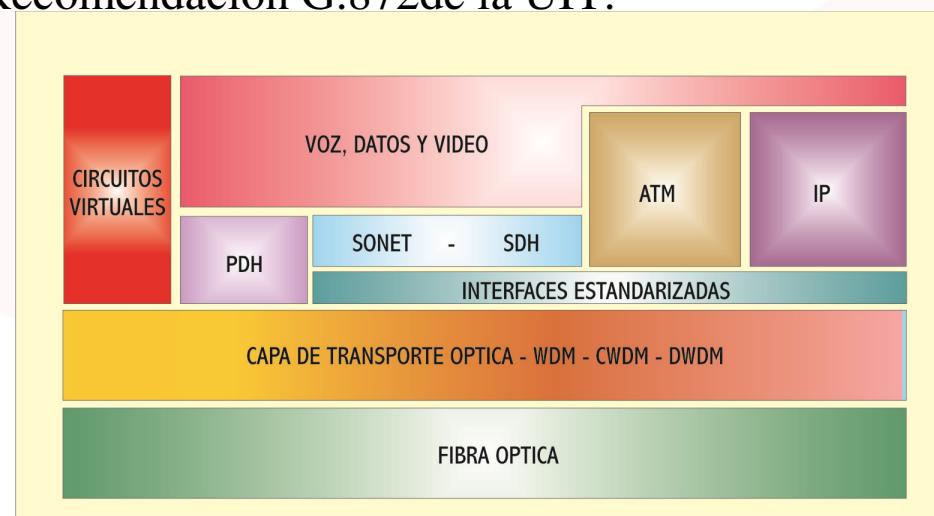


Modulación y digitalización de señales

8.6.1.2 Definición y características

Se denominan redes ópticas a aquellas redes de telecomunicaciones de muy alta capacidad basadas en tecnologías ópticas que poseen sus distintos nodos interconectados por enlaces de fibra óptica y son capaces de proporcionar funciones de transporte, multiplexación, enrutamiento y gestión, constituyendo una capa de bajo nivel denominada Capa de Transporte Óptica sobre la cual pueden funcionar diversas tecnologías que permiten dar conectividad utilizando las mismas como Capa Física del Modelo OSI.

Dichas redes proporcionan, a tal fin, señales portadoras digitales que son independientes de los distintos protocolos que los usuarios requieren según sus necesidades. Sus características están descriptas en la Recomendación G.872 de la UIT.



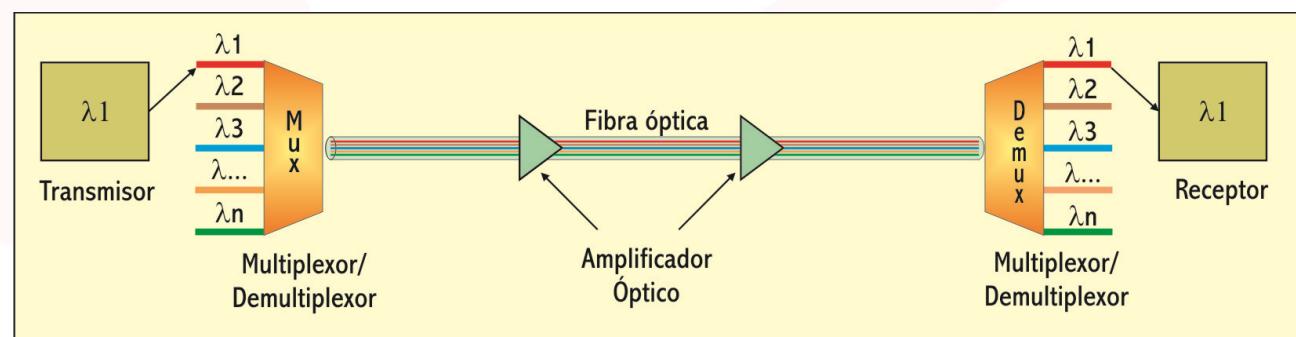


Modulación y digitalización de señales

8.6.1.2 Definición y características

En las redes actuales, la Capa de Transporte Óptico permite brindar servicio a distintas capas de diferentes tipos de protocolos de comunicaciones. Cada uno de ellos tiene requisitos específicos que permiten prestar la amplia gama del conjunto de servicios requeridos por los usuarios.

En particular, mientras ATM e IP pueden ser soportados por distintos medios de comunicaciones, los protocolos SDH y SONET solo están diseñados para operar exclusivamente sobre la capa de transporte óptica a través de las interfaces correspondientes. Para su funcionamiento, la Capa de Transporte Óptico requiere utilizar, además del elemento básico que son las fibras ópticas, distintos equipos tales como *transponder*, multiplexores, amplificadores y otros que se explicitarán en detalle.





8.6.1.3 Ventajas de las redes ópticas

- Se pueden obtener grandes anchos de banda por fibra instaladas.
- Son compatibles con los servicios de voz, datos y vídeo.
- Anchos de banda variables y escalables con una latencia adecuada.
- Avances tecnológicos continuos, en especial en la tecnología DWDM.
- Posibilidad de instalar cables construidos con varias fibras en razón de que cada una posee un diámetro y peso reducido.
- Son inmunes a las interferencias electromagnéticas.
- Poseen tasas de errores reducidas.
- Las fibras poseen una atenuación muy baja, lo que permite extender la distancia de transmisión utilizando muy pocos amplificadores o en algunas distancias directamente eliminando su necesidad.
- Proporcionan un mayor grado de seguridad que los enlaces de cable de cobre o los de naturaleza inalámbrica.
- Operación sumamente flexible.
- Excelente rentabilidad para sus operadores.



Modulación y digitalización de señales

8.6.2 Sistemas ópticos WDM, CWDM, DWDM

8.6.2.1 Fibras ópticas

La empresa Corning Glass Incorporated introdujo las primeras fibras ópticas en el mercado de telecomunicaciones en el año 1970. Estaban constituidas por fibra de vidrio purificado con una calidad que las hacía utilizables en las redes de comunicaciones. Tenían una atenuación del orden de 20 dB/km para la longitud de onda de 633 nm, correspondiente al láser de helioneón.

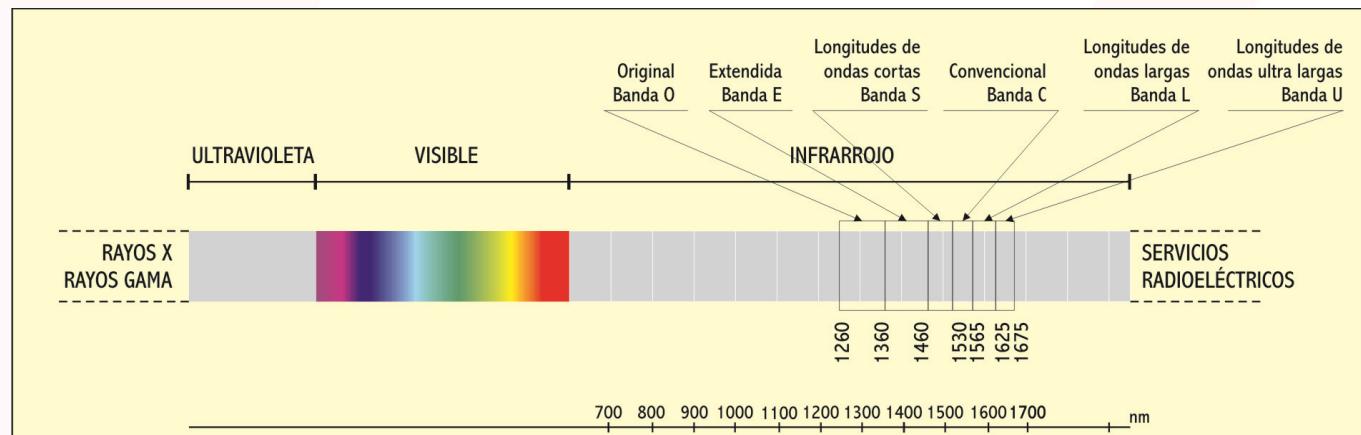
El primer uso importante fue realizado por la empresa AT&T, que utilizó fibras multimodo para establecer enlaces punto a punto sobre líneas digitales multiplexadas en modo plesiócrono con el estándar DS3 a una velocidad de 45 Mbps (ver Tabla 8-5). Posteriormente, con la aparición de las fibras monomodo se alcanzaron velocidades de transmisión hasta 10 veces mayores en tramos del orden de los 30 km aproximadamente.

Banda	Denominación	Intervalo [nm]	Observaciones
O	Original	1260 - 1360	Original
E	Extendida	1360 - 1460	Extended
S	Longitudes de ondas cortas	1460 - 1530	Short wavelength
C	Convencional	1530 - 1565	Conventional
L	Longitudes de ondas largas	1565 - 1625	Long wavelength
U	Longitudes de ondas ultra largas	1625 - 1675	Ultra long wavelength



8.6.2.1 Fibras ópticas

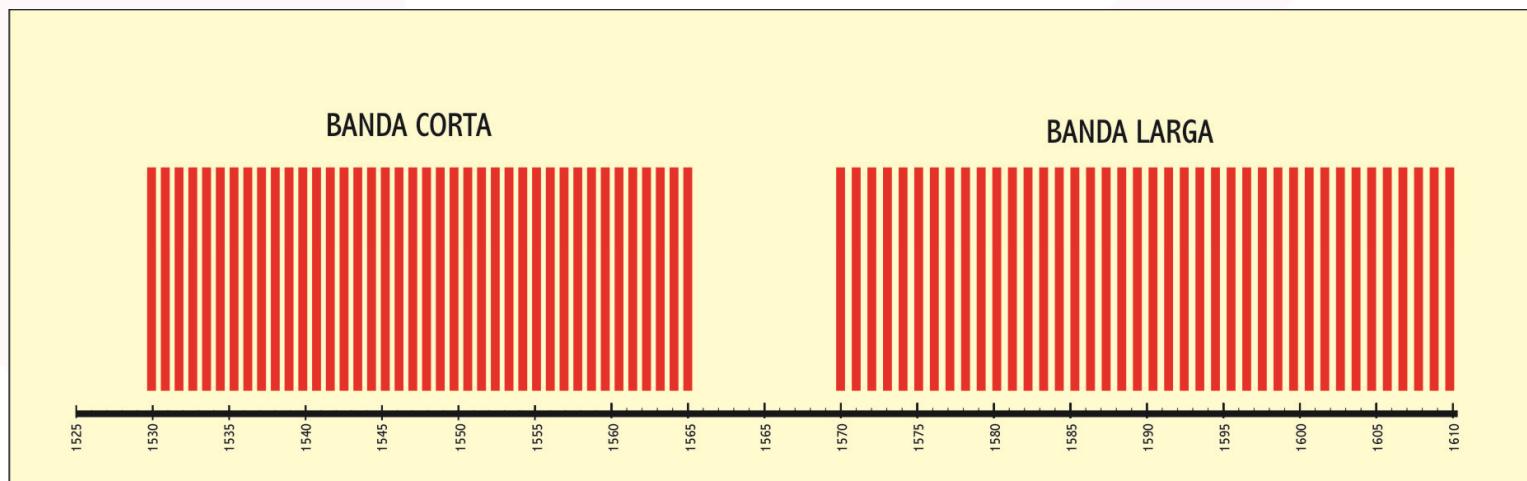
Inicialmente, los altos costos de la fibra óptica motivaron a la industria a buscar optimizar su utilización. Los primeros resultados se obtuvieron en 1994, cuando se introdujo, a través de la firma IBM, el primer equipamiento de fibras ópticas monomodo que utilizaba el concepto de WDM.





8.6.2.1 Fibras ópticas

Los equipos poseían una atenuación media de 0,2 dB/km y permitían operar en canales de velocidades de 200 Mbps utilizando interfaces propietarias a distancias de entre 43 a 50 km en modo bidireccional. Se utilizaba para ellos solamente un par de fibras. Tenían capacidad para multiplexar la longitud de onda inicialmente en ocho canales, posteriormente en diez y luego a cuarenta operando en la banda C - tercera ventana.

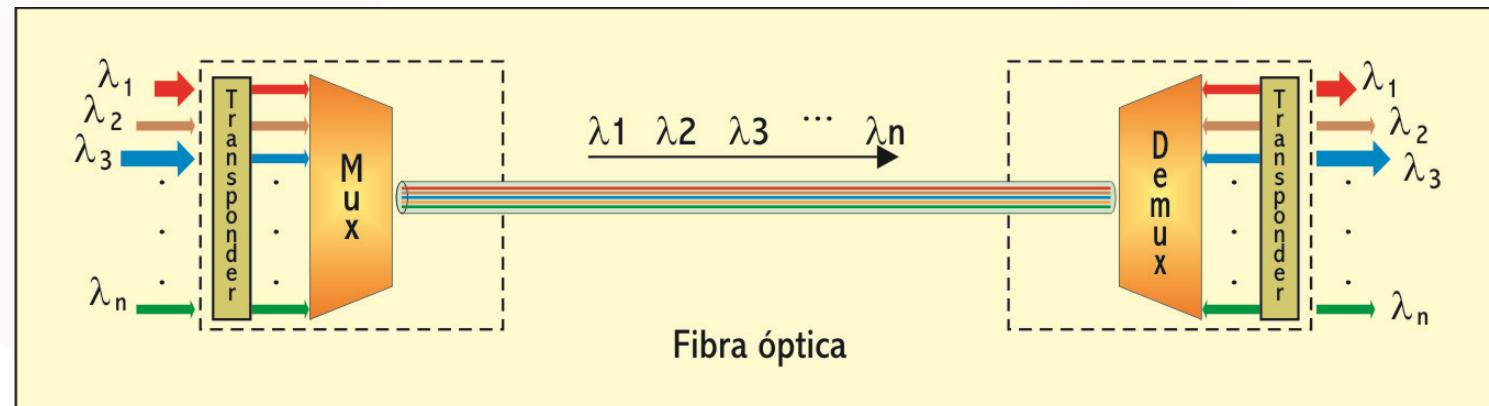




Modulación y digitalización de señales

8.6.2.2 Sistemas de transmisión por fibras

Un sistema de transmisión por fibra óptica DWDM está compuesto por dos equipos denominados *transponder* y multiplexor, ubicados en ambos extremos de la fibra y, adicionalmente, en función de la longitud del tramo a ser cubierto, amplificadores que mantengan la amplitud y forma de la señal.

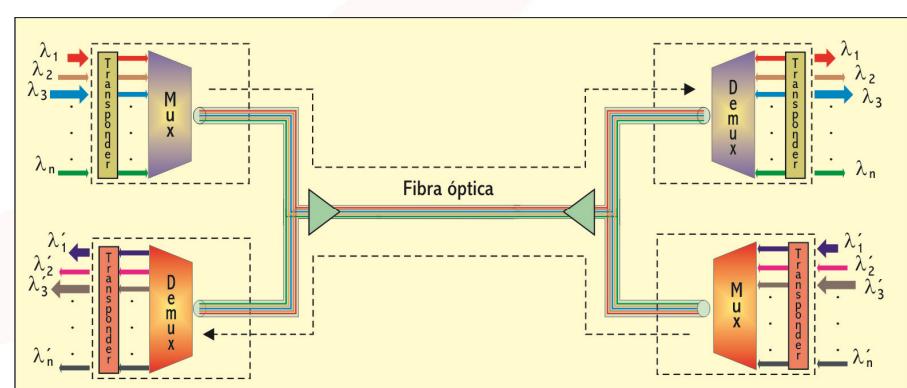
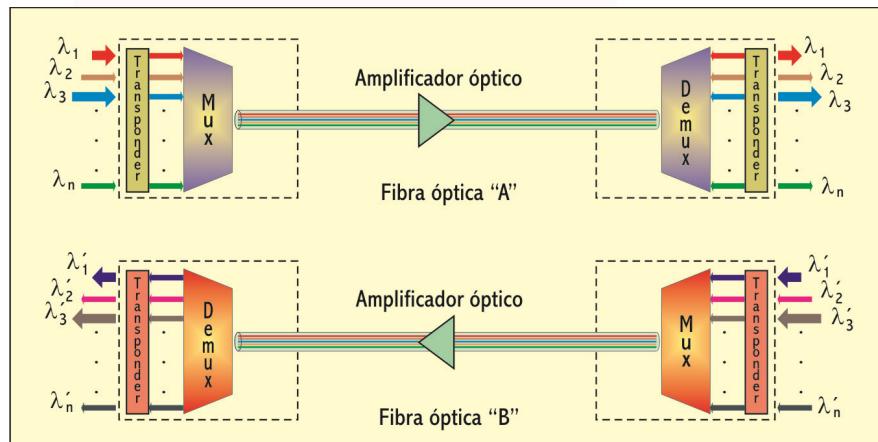




Modulación y digitalización de señales

8.6.2.3 Sistemas unidireccionales y bidireccionales

Los sistemas WDM sobre una única fibra pueden funcionar en forma unidireccional o bidireccional. Cuando se utilizan sistemas unidireccionales para la transmisión en ambos sentidos se deben utilizar dos fibras: una para transmisión y otra para recepción. Las normas que utilizaron los fabricantes se denominaron WDM D (*dense*) o C (*coarse*), llamados en forma simplificada equipamientos D/C/WDM (Multiplexación Densa DWDM y Multiplexación Gruesa - CWDM).





8.6.2.4 Capacidad de las fibras

Las fibras de distintas tecnologías DWDM están en condiciones para que con los sistemas ópticos que con ellas se puedan construir se obtengan distintas configuraciones. Por ejemplo: 40 canales separados a 100 GHz cada uno, 80 canales separados a 50 GHz o, como se están obteniendo en últimos desarrollos, hasta 160 canales ópticos separados entre sí por 25 GHz.

Como regla general, cuanto mayor es el número de canales en que se multiplexan en una fibra, menor es la velocidad a la que se puede transmitir por cada uno de ellos.

Los distintos sistemas están relacionados con las tecnologías desarrolladas por los distintos fabricantes. Así, hay sistemas de 80 canales de 2,5 Gbps cada uno, lo que permite transportar 200 Gbps en total, otros de 40 canales de 10 Gbps transportando 400 Gbps, y casos de fibras que son multiplexadas en 80 canales que operan a 10 Gbps cada uno y que permiten transportar un total de 800 Gbps.



Modulación y digitalización de señales

8.6.2.5 Atenuación en la propagación de las señales ópticas

En los sistemas de comunicaciones ópticas, la propagación de las señales a través de las fibras que interconectan transmisores y receptores sufren atenuaciones debido a los distintos componentes que integran este tipo de sistemas, tales como las mismas fibras, los acopladores, multiplexores, *transponder*, etc., que durante el recorrido van acumulando pérdidas.

Por lo tanto, después de ciertas distancias la acumulación de estas pérdidas requiere que las señales sean tratadas para restaurar su nivel de calidad y puedan ser procesadas en su destino en forma adecuada.

Inicialmente, para esta tarea se utilizaron regeneradores que requerían que las señales fueran convertidas de ópticas a eléctricas y nuevamente en ópticas para que las mismas pudieran continuar el proceso de transmisión.

Actualmente, esta técnica ha sido superada por **amplificadores ópticos** que no requieren la conversión óptica - eléctrica – óptica, ofreciendo sólidas ventajas respecto al procedimiento que se ejecutaba con los regeneradores. El uso de amplificadores ópticos permite transmitir señales ópticas a distancias mucho mayores sin la necesidad de utilizar regeneradores.

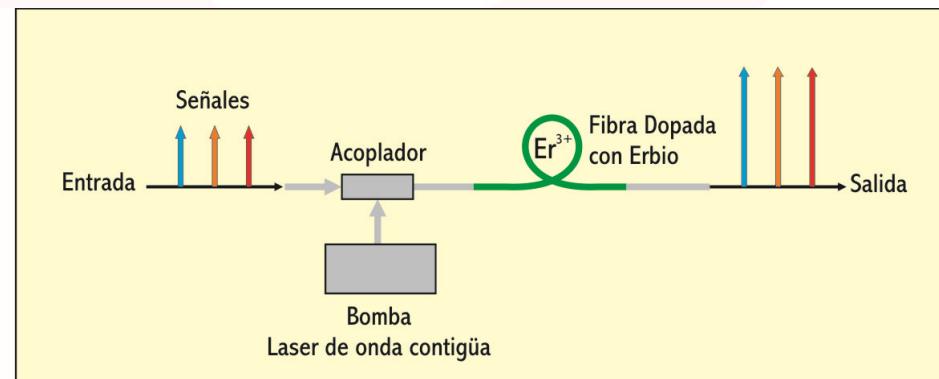


Modulación y digitalización de señales

8.6.2.6 Amplificador de fibra dopada con Erbio

Uno de los tipos más utilizados como amplificadores ópticos son aquellos que utilizan fibras dopadas con tierras raras, en particular como se describirá en este tipo de equipos, aquellos que utilizan erbio ionizado en forma trivalente. El erbio (Er^{3+}) es un elemento químico cuyo número atómico es 68.

Estos amplificadores utilizan un fenómeno físico conocido como emisión estimulada. El mismo fue introducido por Albert Einstein en el año 1917. A diferencia de la emisión espontánea que se reparte por igual en todas las direcciones del espacio, la emisión estimulada solamente tiene lugar en la misma dirección y sentido del haz de luz que actúa como estimulador.

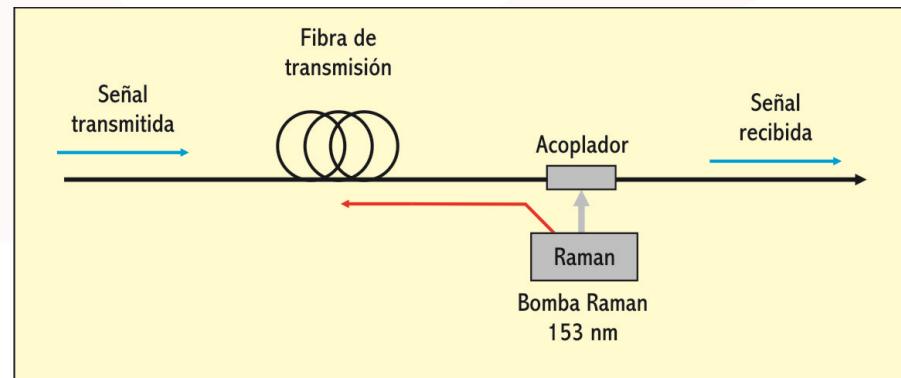




8.6.2.7 Amplificador de Raman

Este tipo de amplificadores ópticos está construido sobre la base de lo que se conoce como **Dispersión Raman** (*Raman Scattering*) o **Efecto Raman**. Este fenómeno fue el resultado de investigaciones iniciadas en el año 1922 por el físico indio **Chandrasekhara Venkata Raman** y publicadas en un trabajo que se denominó *Difraccion Molecular de la Luz*.

Estos sistemas de amplificación se basan en un proceso de interacción no lineal entre la señal óptica y una señal generada por una bomba de gran potencia. Las bombas que utilizan estos amplificadores utilizan diodos láser que generan ondas continuas de luz. Las fibras monomodo utilizadas con amplificadores Raman no requieren ser dopadas con tierras raras.



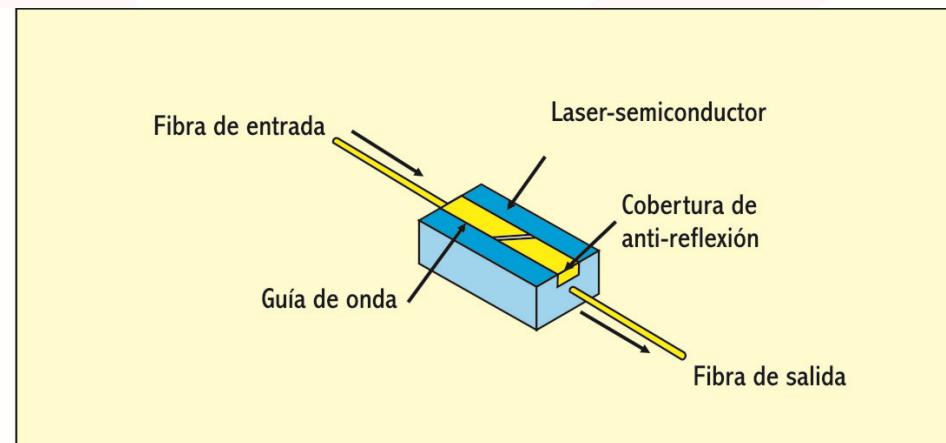


Modulación y digitalización de señales

8.6.2.8 Amplificador óptico de semiconductores

Los amplificadores ópticos de semiconductores conocidos como SOAs son diodos láser sin espejos finales con fibras unidas en cada extremo. Poseen una capa antireflectante y una guía de onda cortada en ángulo para evitar que la estructura se comporte como un láser. La figura muestra un esquema de un amplificado óptico de semiconductores.

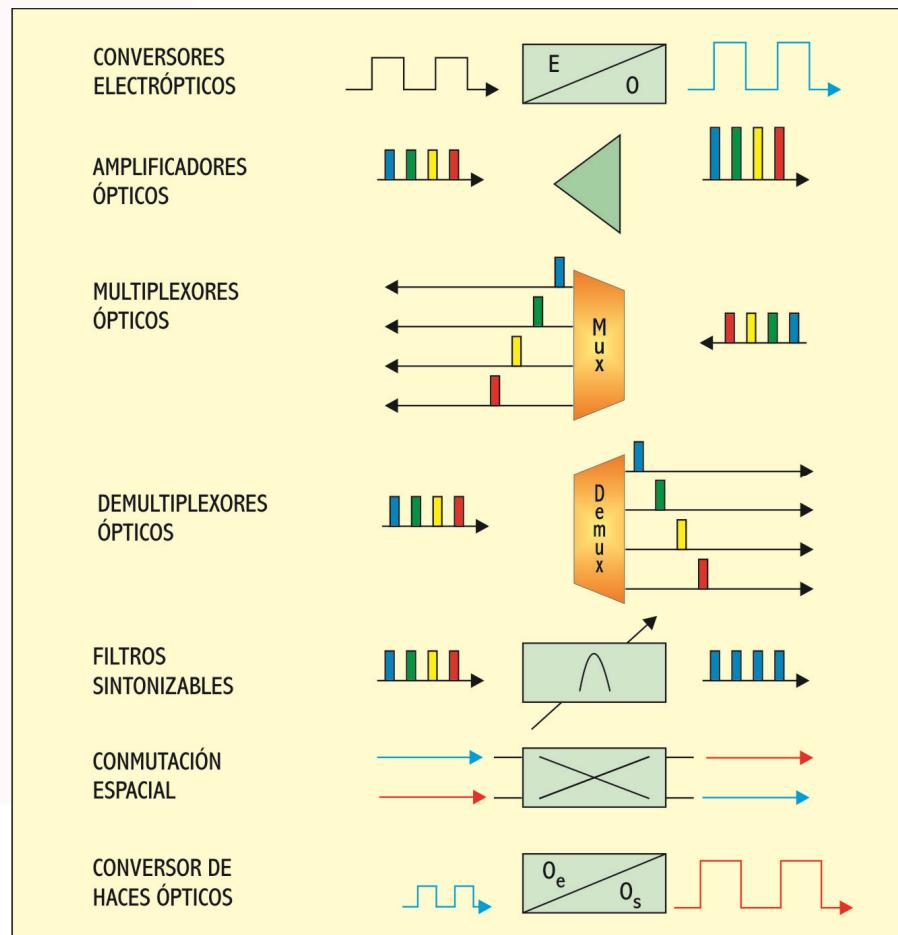
Trabajan entre los 1310 y 1550 nm, actúan en modo bidireccional y están construidos en tamaños reducidos. Comparados con los EDFA, sus prestaciones no resultan tan efectivas. Poseen menos ganancia que aquéllos y sus mayores inconvenientes son: altas perdidas por acoplamiento, mayor factor de ruido, fuerte dependencia de los efectos derivados de la polarización y un comportamiento no muy lineal cuando se operan a elevadas velocidades.





Modulación y digitalización de señales

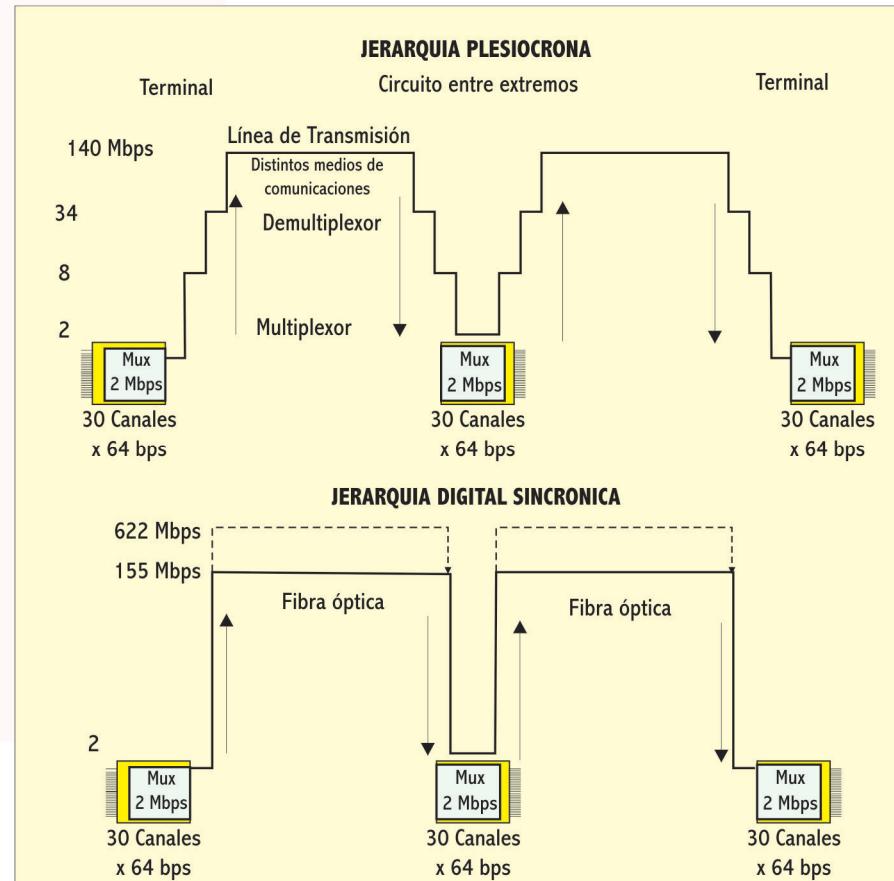
8.6.2.9 Funciones que realizan los distintos tipos de hardware óptico





8.7 Transmisión sincrónica

8.7.1 Introducción





8.7.2 Historia y características

El primer estándar sincrónico fue concebido por dos investigadores de los Laboratorios Bellcore: R. J. Bohm y Y. C. Ching. Su nombre, *Synchronous Optical Network – SONET*, **fue originalmente propuesto por el Bell Communications Research, más conocido como Bellcore**. Sus investigaciones tenían como fin desarrollar una familia de interfaces para su uso en las compañías telefónicas utilizando exclusivamente redes ópticas. Su proceso de normalización comenzó a fines de 1984 y los estudios se formalizaron en 1985 en el **subcomité T1X1 del Comité T1**, en el marco de la organización ANSI.

Durante el proceso de estandarización se plantearon dos desafíos con el objeto de lograr una interfaz normalizada internacionalmente y útil comercialmente. La primera fue lograr que SONET pudiera trabajar en un ambiente plesiócrono sin perder su naturaleza sincrónica. El segundo fue tratar de resolver las incompatibilidades existentes entre el grupo básico de la señal europea que trabajaba a 2,048 Mbps y el de la jerarquía utilizada en América del Norte que funcionaba a 1,544 Mbps.

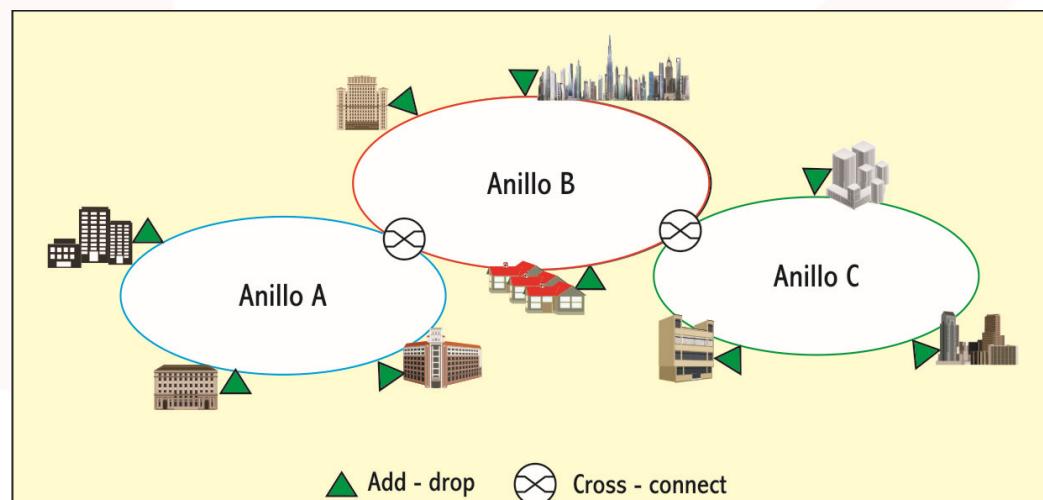
El sistema SONET parte de una velocidad básica de 51,84 Mbps que denomina canal STS-1. Sus anchos de banda mayores resultan múltiplos enteros de dicha velocidad. Un tributario virtual es una estructura utilizada para el transporte de una velocidad menor a un STS-1. Estos, muchas veces, resultan convenientes para hacer frente a solicitudes de menores anchos de banda.



8.8 Comunicaciones por redes ópticas

8.8.1 Topología de las redes ópticas de comunicaciones

Las fibras ópticas, según sea del tipo multimodo o monomodo, pueden ser utilizadas en distintos tipos de redes de comunicaciones, como es el caso de las montantes, que se construyen en las Redes de Área Local o en tramos de ellas, en que por razones de distancia es necesaria su utilización. Sin embargo, su uso más importante es cuando se utilizan formando anillos ópticos en redes de amplia cobertura geográfica, aunque también se utilizan en enlaces punto a punto.

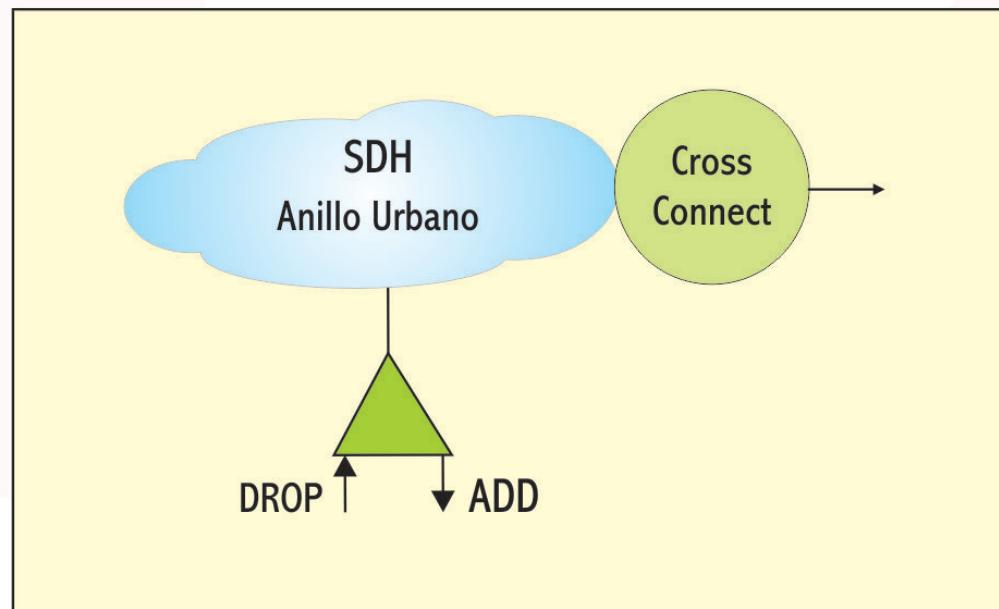




Modulación y digitalización de señales

8.8.1 Topología de las redes ópticas de comunicaciones

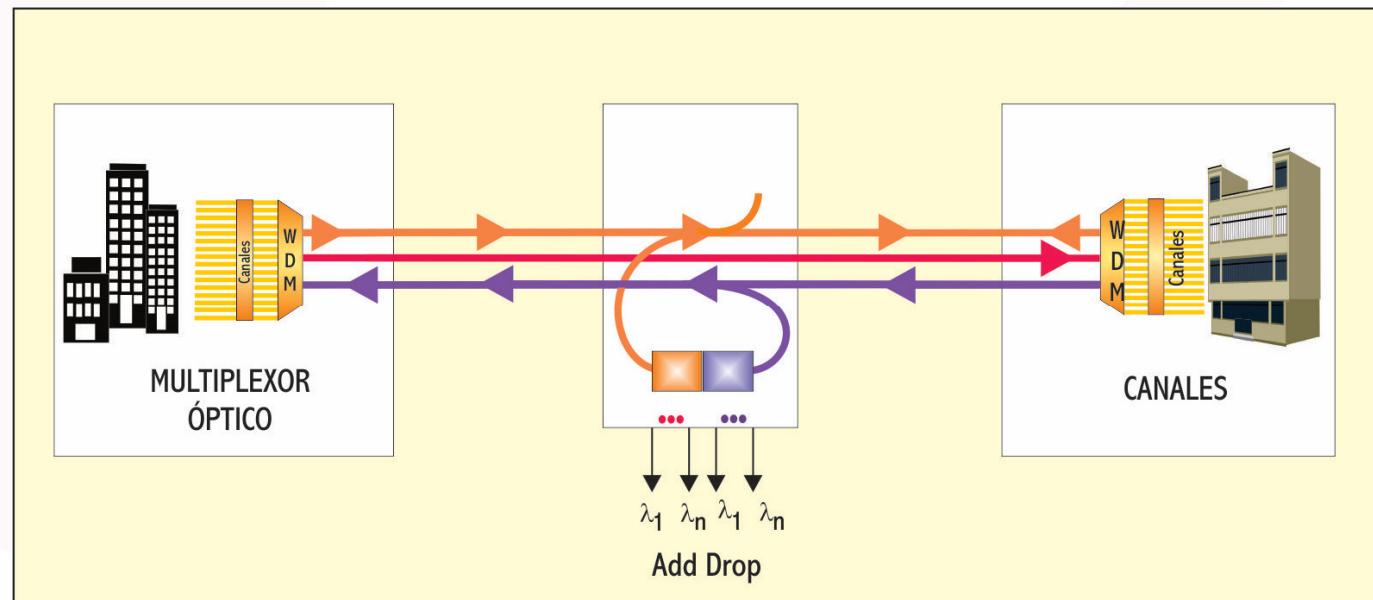
En el caso de que se utilicen enlaces punto a punto y que las fibras sean del tipo DWDM o WDM, donde cada fibra esté multiplexada por división de frecuencia, en cada extremo de los mismos deberán instalarse equipos terminales multiplexores para permitir la extracción de los canales que transporta cada fibra. La figura muestra la relación de los equipos *crossconnect* y *add/drop* con un anillo óptico.





8.8.1 Topología de las redes ópticas de comunicaciones

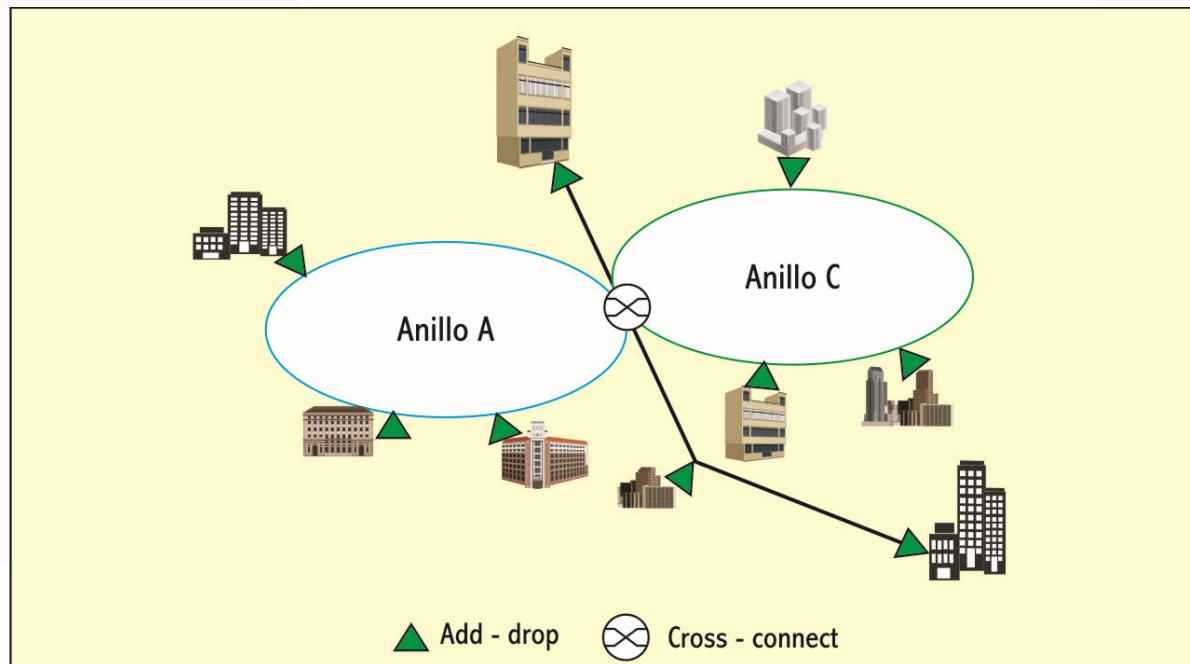
También podrían establecerse enlaces punto a punto con derivaciones utilizando un add/drop en la mitad del recorrido. La figura muestra un ejemplo de este tipo de topología.





8.8.1 Topología de las redes ópticas de comunicaciones

También podría establecerse un enlace con derivaciones utilizando en forma conjunta equipos cross-connect y add/drop. La figura muestra un ejemplo de este tipo de configuración mixta.





8.8.2 Funciones de transporte y conmutación en redes ópticas

Las redes ópticas formadas por medio de anillos ópticos poseen la capacidad de que, ante una interrupción o corte en una parte del anillo, el tráfico automáticamente se redirecciona de manera tal que las dos partes en las que el anillo quedó dividido permanezcan con servicio. Los tiempos en que esta actividad se realiza normalmente son menores a los 50 milisegundos.

Los equipos cross-connect permiten la conmutación de las tramas, o parte de ellas. Con este tipo de equipos, pueden ser transportadas desde un anillo hacia otro anillo adyacente y así seguir o derivar parte de la información en un enlace punto a punto hacia otro punto de la red. Es decir, las tramas deben contener información de servicio, además de la propia de los usuarios, de tal forma que las tramas puedan direccionarse hasta alcanzar su destino final.

En un nivel de transporte óptico se facilita esta función que permitirá que dos usuarios, por ejemplo, intercambien grupos plesiócronos aunque no pertenezcan al mismo anillo óptico.

Una vez que la trama pase por su destino se utilizará un Dropel que se encargará de extraer la parte de la información de la trama y entregársela al usuario final. O también pudiera darse el caso de que este necesite incorporar al anillo información que enviará a otro destino; para ello utilizará un Add. Tanto uno como otro tienen funciones similares a la de los multiplexores.



8.8.3 Clasificación de las redes ópticas de transporte

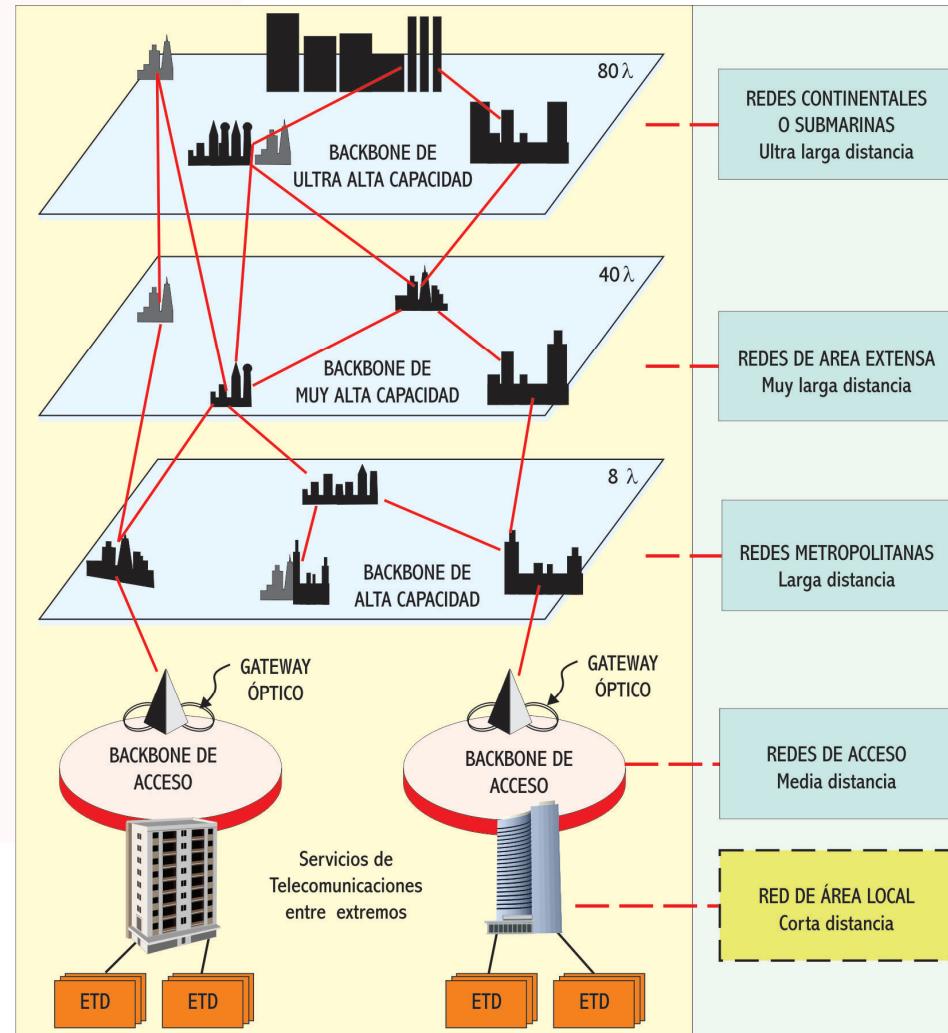
La clasificación típica de las redes de comunicaciones en área local, metropolitana y extensa no coincide con los criterios que se utilizan para la clasificación de las redes ópticas; en este caso se utiliza un nuevo concepto. En esta tecnología se habla de distintos tipos de redes más vinculadas a su rango de cubrimiento, que normalmente tiene relación con su capacidad. En las redes ópticas, cuanto mayor es el cubrimiento geográfico de la red mayor debe ser la posibilidad de que las fibras puedan ser equipadas para lograr la mayor capacidad posible. Los diferentes tipos de redes son los siguientes:

- Redes de Acceso.
- Redes Metropolitanas.
- Redes Regionales (LH) Alta Capacidad o de Larga Distancia.
- Redes Continentales o Submarinas (ULH) de muy Alta Capacidad o de Ultralarga Distancia.



Modulación y digitalización de señales

8.8.3 Clasificación de las redes ópticas de transporte





8.9 Jerarquía digital sincrónica

8.9.1 Características generales

El sistema **SDH** puede transportar las señales tributarias habituales existentes en los sistemas plesiocronos. Asimismo, también dispone de la flexibilidad suficiente para dar cabida a los nuevos tipos de señales de servicios para los clientes que los operadores deseen incorporar en el futuro.

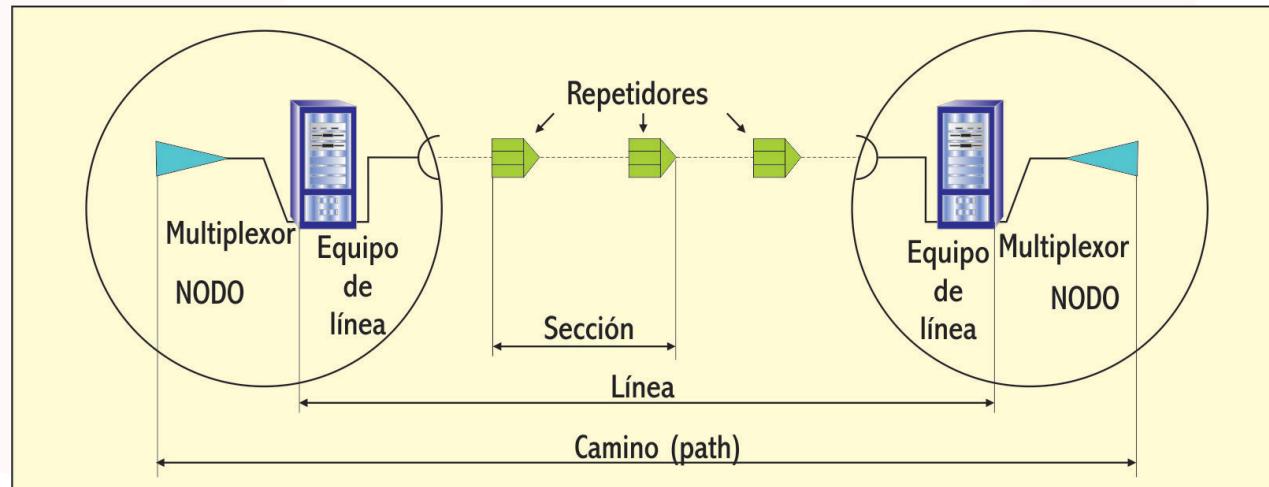
El sistema tiene cinco niveles jerárquicos. Parte de una velocidad básica de 155,22 Mbps para un valor de $N = 1$ y permite distintos valores de velocidades según vaya variando el N , de acuerdo a los valores que se muestran en la tabla.

Denominación	Velocidad exacta	N	Número de canales	Velocidad simplificada
STM - 1	155,520 Mbps	1	1.890	155 Mbps
STM - 4	622,060 Mbps	4	7.560	620 Mbps
STM - 16	2488,320 Mbps	26	30.240	2,5 Gbps
STM - 64	9953,280 Mbps	64	120.960	10 Gbps
STM - 256	39813,120 Mbps	256	483.840	40 Gbps



8.9.1 Características generales

La figura muestra el *hardware* de red que interviene entre dos nodos y la nomenclatura que distingue a cada tramo de dicho recorrido.

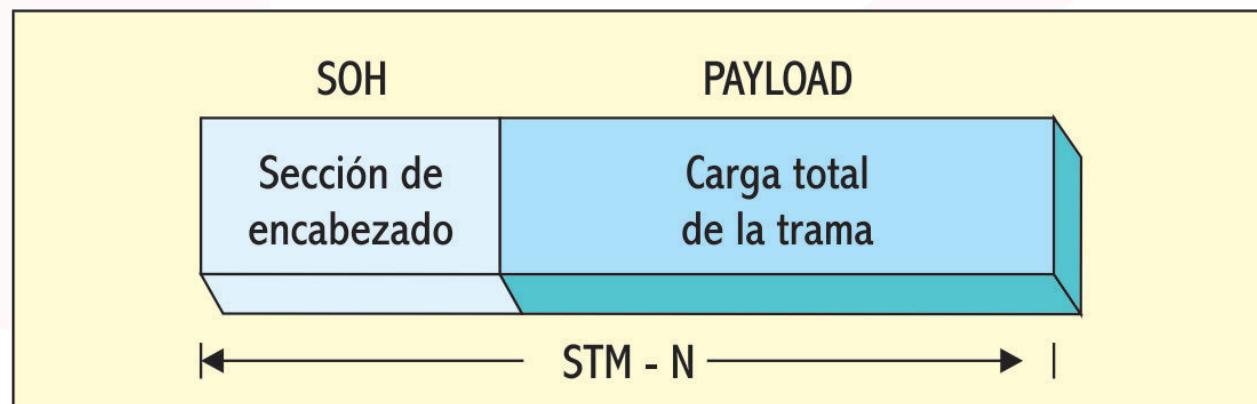




8.9.2 Estructura de las tramas SDH

A diferencia de las tramas plesiócronas en las que el análisis de su estructura debe hacerse en una dimensión, en este caso es necesario analizarlo en una y dos dimensiones.

La trama denominada específicamente *Synchronous Transport Modules - STM - N* (Módulo para el Transporte Sincrónico para el nivel **N**) en una dimensión permite distinguir dos secciones diferenciadas: una, que se denomina *Section Overhead - SOH* (sección de encabezado), y otra conocida por su expresión en inglés, *Payload* (capacidad total de carga).



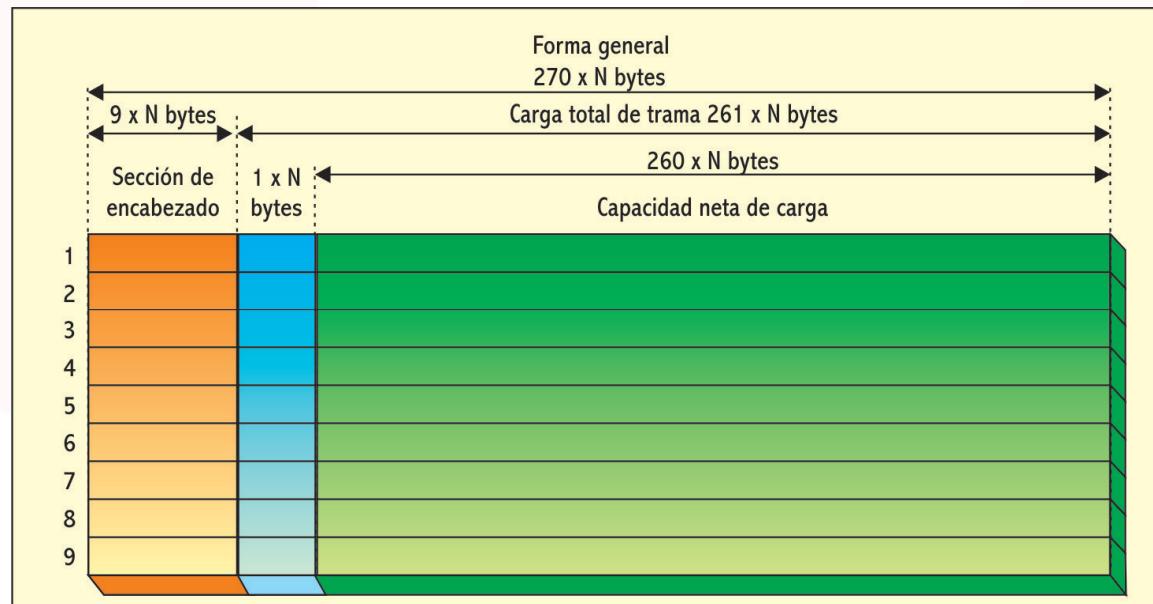


Modulación y digitalización de señales

8.9.2 Estructura de las tramas SDH

La estructura general de la trama en dos dimensiones es la que se muestra en la figura y se expresa a través de un mapa bidimensional.

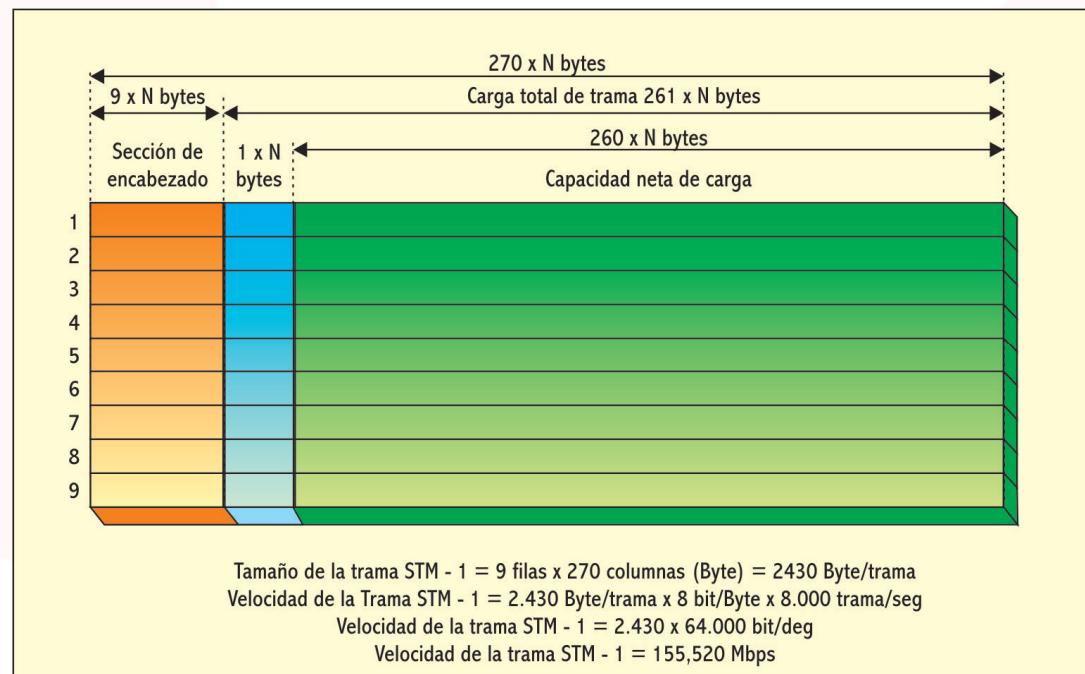
La velocidad a la que se deberá desplazar cada módulo de transporte sincrónico **STM – N** resultará de resolver la ecuación (8-5). El valor de *64 kbps* surge del valor de duración de la trama, que es siempre constante e igual a $125 \mu s$.





8.9.2 Estructura de las tramas SDH

La figura nos muestra la forma explícita de la estructura de un Módulo de Transporte Sincrónico - STM - 1 que corresponderá a la velocidad de *155,520 Mbps*. En forma similar, se podrían describir los módulos para otros valores de *N*.





8.9.3 Contenedores virtuales: transporte de señales PDH

Una de las aplicaciones más importantes de la multiplexación digital sincrónica es la de poder transportar señales, que han sido multiplexadas con equipamiento que usa la Jerarquía Digital Plesiócrona - PDH.

Con este fin se ha definido lo que se ha llamado Contenedores Virtuales - VC, que podríamos definir como; la estructura de la Jerarquía Digital Sincrónica - SDH que permite transportar la información útil en la trama (denominada Capacidad Neta de Carga) para un dado N en cualquiera de sus niveles.

En la trama STM – 1, existen dos partes fundamentales que son: el encabezamiento de sección y lo que hemos denominado Contenedor Virtual.

Número	Designación del Contenedor	Velocidad de la multiplexación PDH
1	VC - 11	1,544 Mbps
2	VC - 12	2,048 Mbps
3	VC - 2	6,048 Mbps
4	VC - 3	34,368 y 44, 736 Mbps
5	VC - 4	139,264 Mbps



8.9.3 Contenedores virtuales: transporte de señales PDH

La capacidad total neta de carga de una trama se podrá llenar de distintas formas para usar variadas combinaciones de contenedores que podrán transportar sistemas tributarios plesiócronos de orden inferior. Incluso contenedores más grandes pueden transportar a otros más pequeños, haciendo totalmente flexibles los sistemas.

En forma esquemática, la tabla muestra cómo se podrían formar contenedores de orden superior con combinaciones de orden inferior.

Contenedor Virtual	Combinaciones posibles con otros valores
VC - 4 - 139,264 Mbps	Una señal cuaternaria plesiócrona de igual valor Tres contenedores VC - 3 (34,368 ó 44,736 Mbps)
VC - 3 - 34,368 ó 44,736 Mbps	7 contenedores VC - 2 28 contenedores VC - 11 21 contenedores VC - 12 Combinaciones de los anteriores, sin superar el valor máximo



8.10 SONET

Las características de esta norma son muy similares a las definidas para la Jerarquía Digital Sincrónica, variando fundamentalmente la forma de las tramas y las velocidades de cada nivel de multiplexación.

La **Jerarquía SONET** define una jerarquía de velocidades de datos normalizadas cuyo nivel menor, denominado STS-1, funciona a una velocidad de 51,84 Mbps.

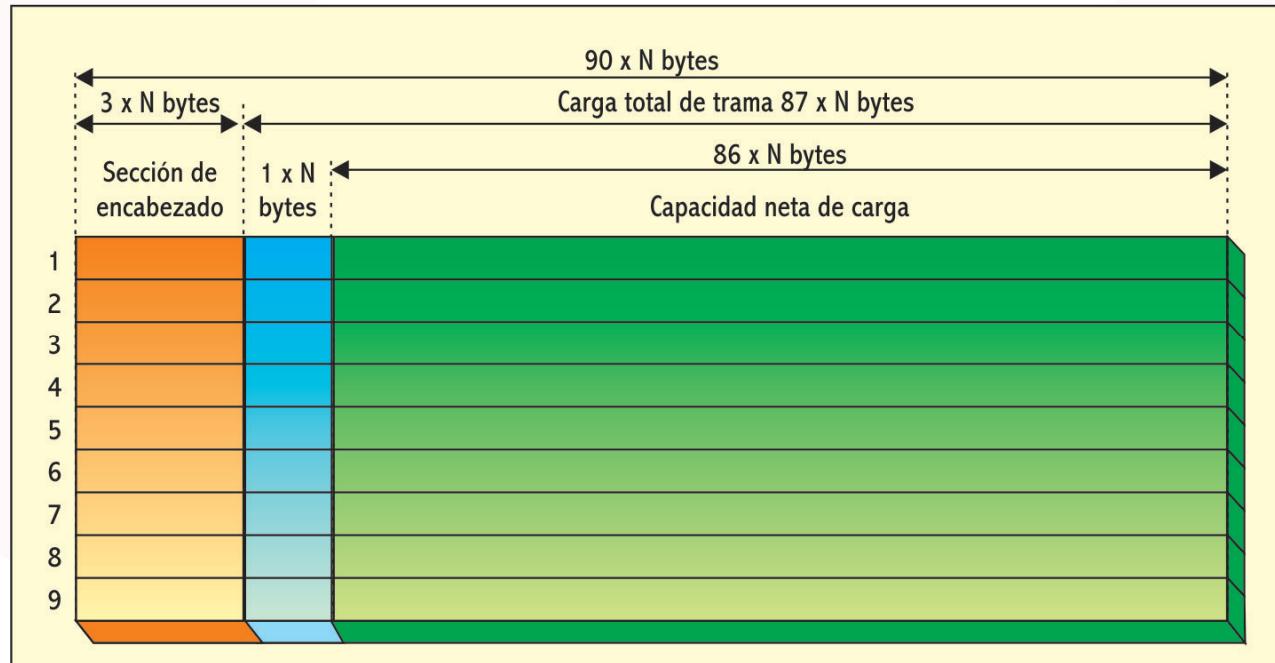
También los distintos niveles reciben la denominación de “OC – n”, que proviene de la expresión en inglés “portadora óptica”: *Optical Carrier*. El número que sigue a OC indica el nivel de multiplexación que corresponde. Si por ejemplo fuera OC - 2, significará que se trata del segundo nivel.

NIVELES		VELOCIDADES		
OPTICO	ELECTRICO	ENCABEZAMIENTO	UTIL	TOTAL
OC - 1	STS - 1	1,728 Mbps	50,112 Mbps	51,840 Mbps
OC - 3	STS - 3	5,184 Mbps	150,336 Mbps	155,520 Mbps
OC - 9	STS - 9	15,552 Mbps	451,008 Mbps	466,560 Mbps
OC - 12	STS - 12	20,736 Mbps	601,334 Mbps	622,080 Mbps
OC - 18	STS - 18	31,104 Mbps	902,016 Mbps	933,120 Mbps
OC - 24	STS - 24	41,472 Mbps	1.202,688 Mbps	1.244,160 Mbps
OC - 36	STS - 36	62,208 Mbps	1.804,032 Mbps	1.866,240 Mbps
OC - 48	STS - 48	82,994 Mbps	2.405,376 Mbps	2.488,320 Mbps
OC - 96	STS - 96	165,888 Mbps	4.810,752 Mbps	4.976,640 Mbps
OC - 192	STS - 192	331,776 Mbps	9.621,504 Mbps	9.953,280 Mbps
OC - 768	STS - 768	1.327,104 Mbps	38.486,016 Mbps	39.813,120 Mbps



8.10 SONET

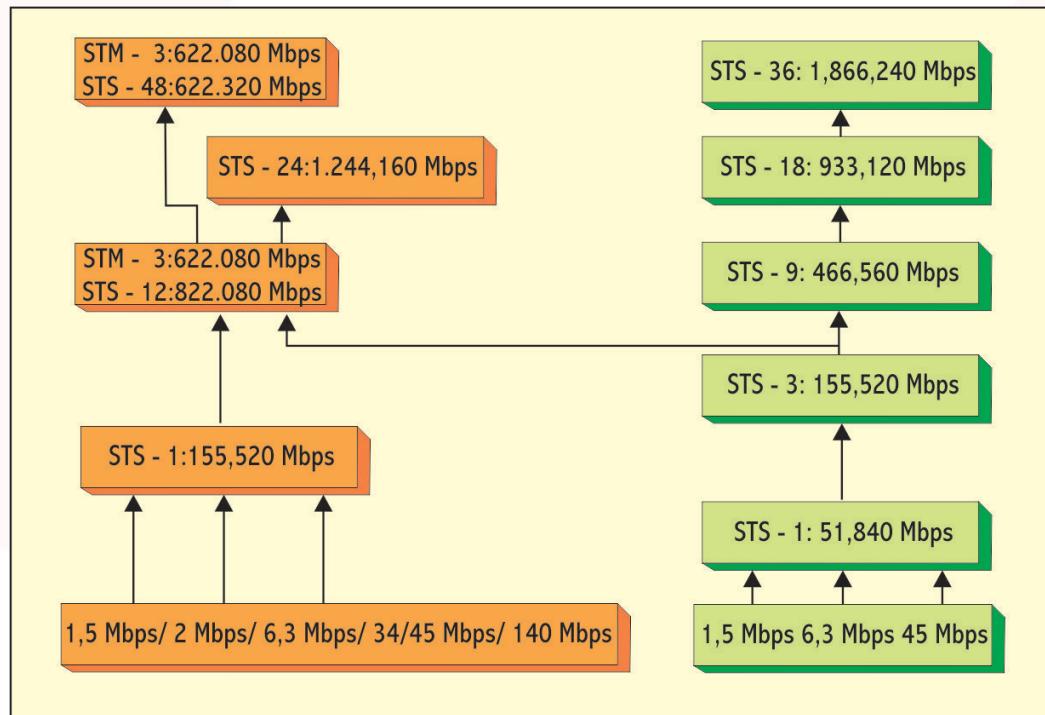
La figura muestra la forma genérica de la trama de esta norma, en la que se pueden observar pequeñas diferencias con la norma de la UIT - T.





8.11 Interrelación entre SONET y SDH

La interrelación entre una y otra norma y la forma en que estas permiten la transmisión de niveles de las jerarquías plesioícronas se muestra en la figura.





Modulación y digitalización de señales

8.12 EL futuro de las redes ópticas

Se está buscando aprovechar el carácter revolucionario de las nuevas tecnologías ópticas para sacar de ellas un mayor valor agregado que les mejore la ecuación económica de sus servicios.

En ese contexto se estudian las distintas infraestructuras posibles para que las próximas generaciones de redes ópticas brinden, además, servicios compatibles con los requerimientos de muy alta velocidad. La capacidad pensada inicialmente para las redes ópticas de 10 Gbps ha resultado insuficiente. Actualmente, esos valores están siendo llevados a 40 Gbps, 100 Gbps y aun mayores.

El desafío que deben satisfacer los proveedores de servicios es el de reducir el costo de transportar grandes volúmenes de tráfico y al mismo tiempo proveer nuevos servicios innovadores de valor.

Los nuevos conceptos sobre las arquitecturas de transporte están orientados a combinar las tecnologías de transporte óptico con las de enrutamiento. Es por ello que hoy se puede hablar de *hardware* óptico de conmutación como lo son los *switchs* y *routers opticos*, que permiten, a través del uso de protocolos IP, lograr costos de transporte que satisfagan cualquier demanda de los nuevos servicios de voz, datos y multimedia a costos razonables.