

Capítulo 6

Utilización del ancho de banda: Multiplexación y Ensanchado

La utilización del ancho de banda es el buen uso del ancho de banda disponible para conseguir unos objetivos específicos.

- La eficiencia se puede conseguir mediante la multiplexación.**
 - La intimidad y la eliminación de las interferencias se puede conseguir mediante el ensanchado.**
-

6-1 MULTIPLEXACIÓN

- Siempre que el ancho de banda de un medio que enlaza dos dispositivos es mayor que el ancho de banda que necesitan los dispositivos, el enlace se puede compartir.
- La multiplexación es el conjunto de técnicas que permiten la transmisión simultánea de múltiples señales a través de un único enlace de datos.

A medida que se incrementa el uso de los datos y las telecomunicaciones, se incrementa también el tráfico.

Temas a tratar en esta sección:

Multiplexación por división de frecuencia.

Multiplexación por división de longitud de onda (WDM)

Multiplexación síncrona por división del tiempo

Figura 6.1 *División de un enlace en canales.*

- n líneas de entrada, envían sus flujos de transmisión a un multiplexor (MUX), que los combina en un único flujo. En el extremo receptor, el flujo se introduce en un demultiplexor (DEMUX), que separa el flujo en sus transmisiones componentes y los dirige a sus correspondientes líneas.
- Enlace, se refiere al camino físico que conecta dos dispositivos.
- Canal, se refiere a la porción de un enlace que transporta una transmisión entre un par dado de líneas.

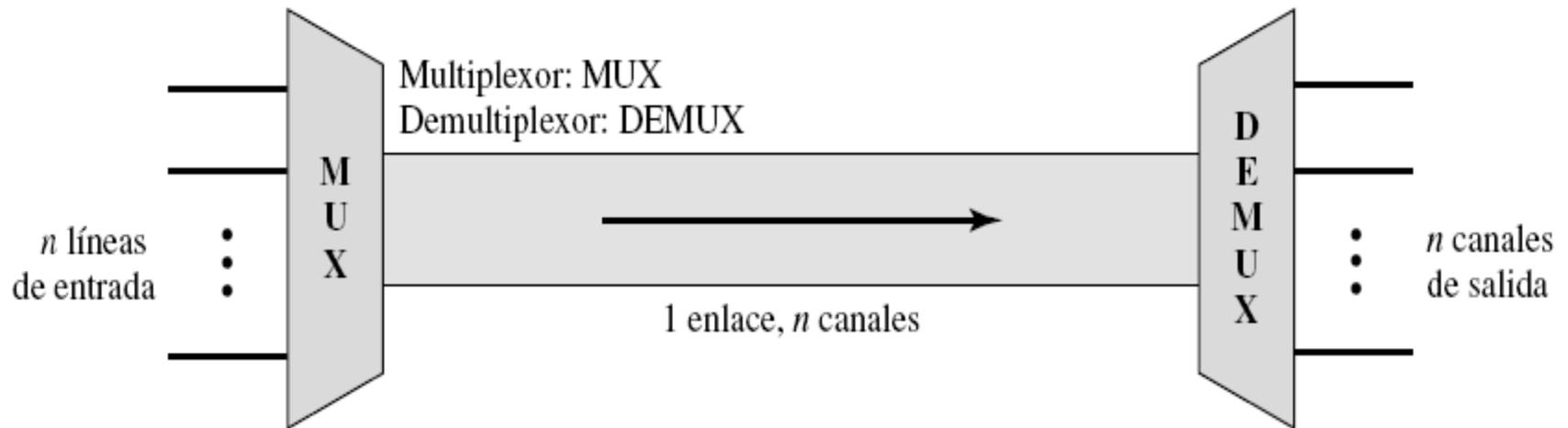
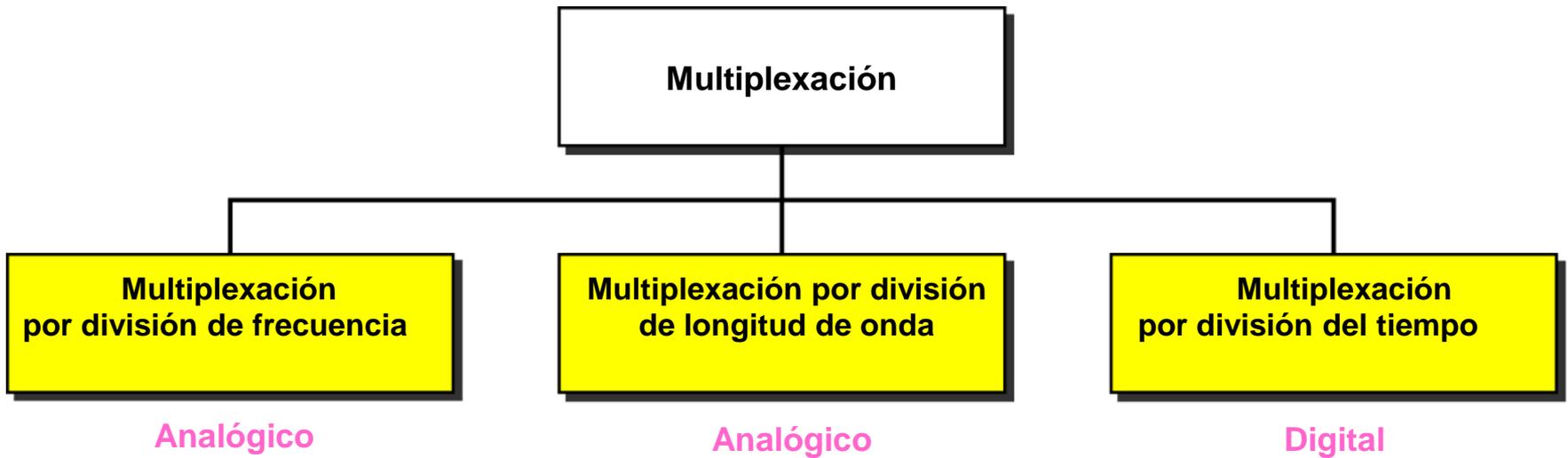
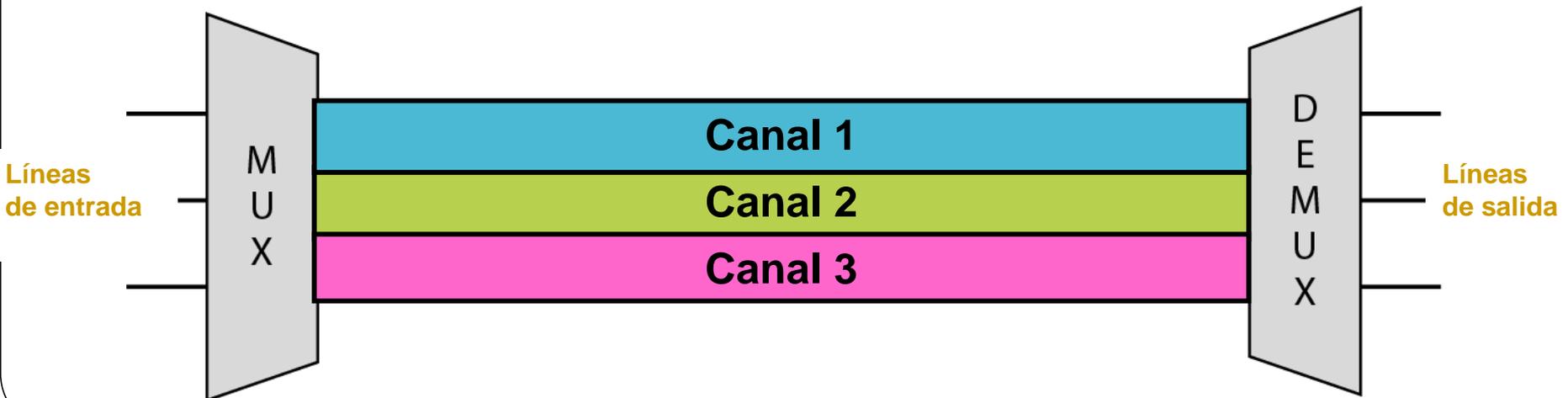


Figura 6.2 *Categorías de multiplexación.*



Multiplexación por división de frecuencia.

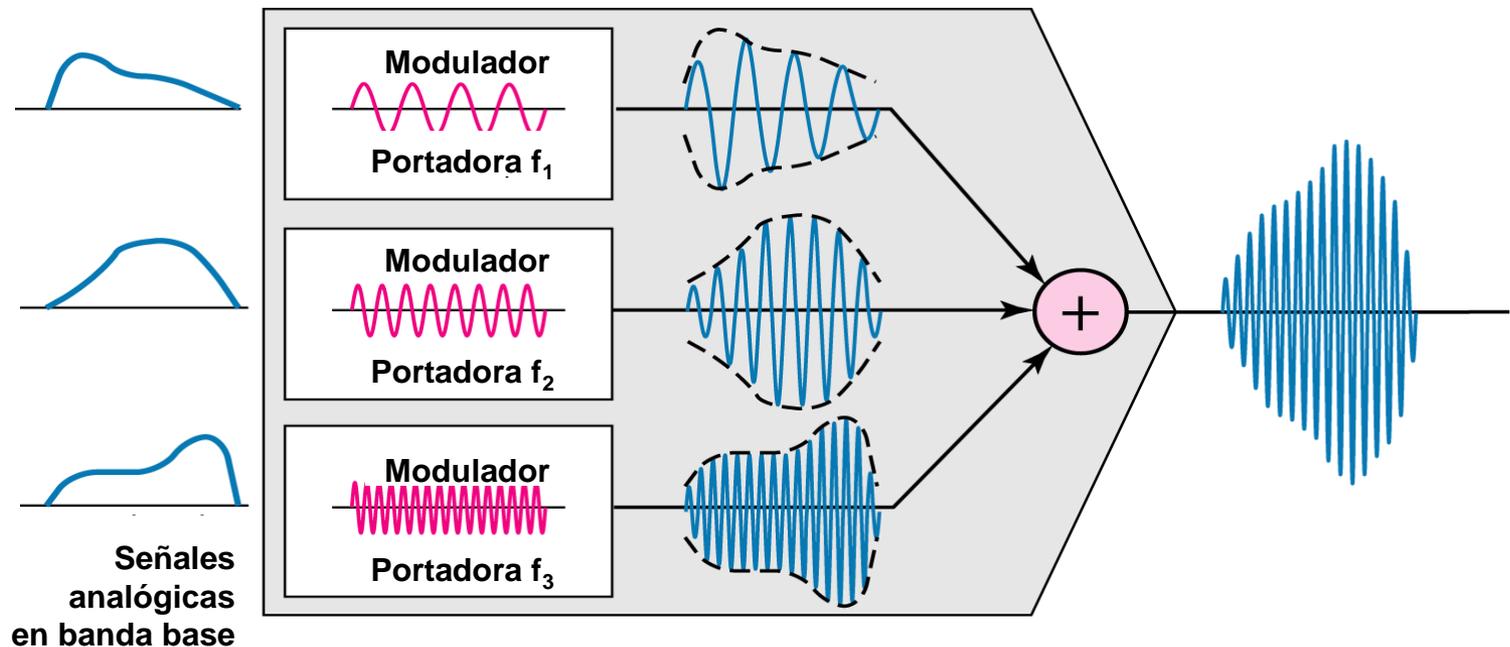
- Es una técnica analógica.
- Se utiliza cuando el ancho de banda de un enlace (en hercios) es mayor que los anchos de banda combinados de las señales a transmitir.
- Las señales generadas por cada dispositivo emisor se modulan usando distintas frecuencias portadoras. Estas señales moduladas se combinan en una única señal compuesta que será transportada por el enlace.
- Los canales deben estar separados por tiras de anchos de banda sin usar, denominadas bandas de guarda.



FDM es una técnica de multiplexación analógica que combina señales analógicas.

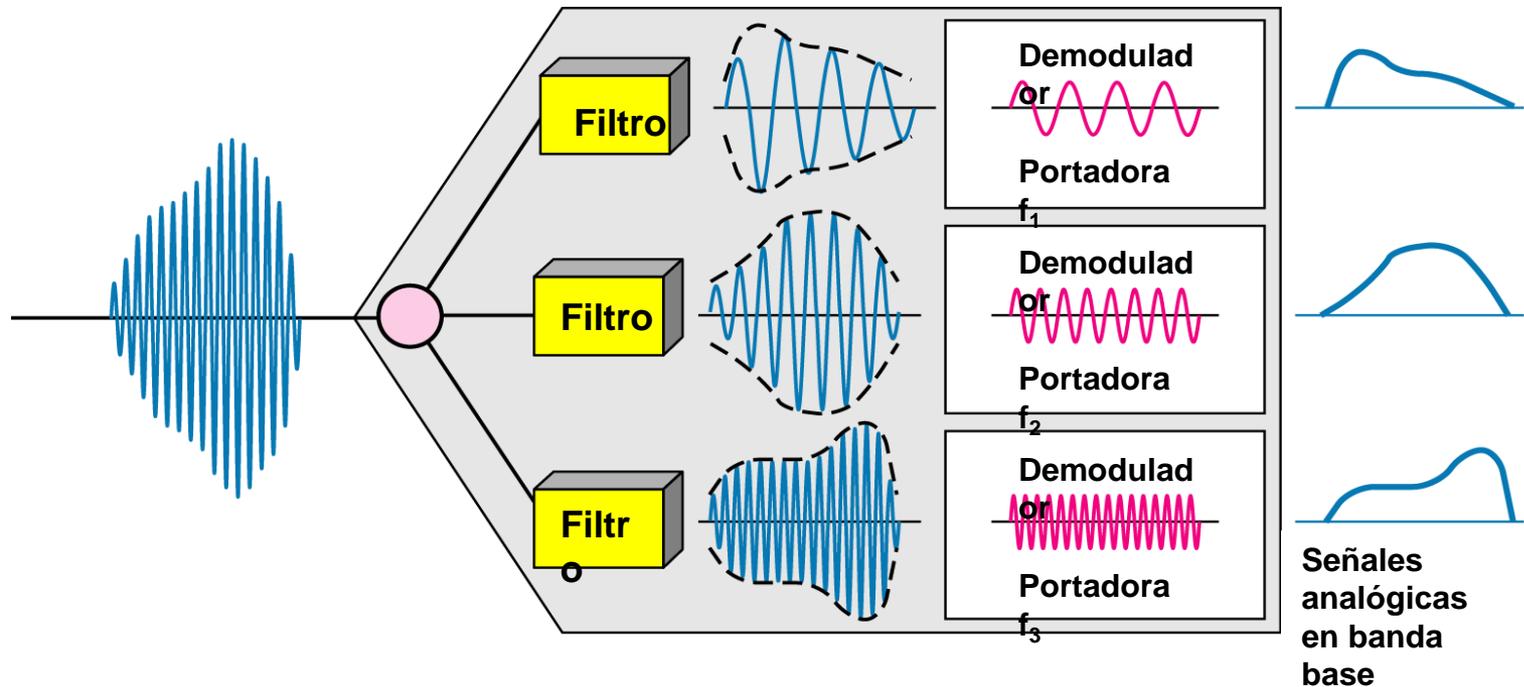
Proceso de multiplexación FDM

- Cada fuente genera una señal con un rango de frecuencia similar.
- Dentro del multiplexor, estas señales similares se modulan sobre distintas frecuencias portadoras (f_1 , f_2 y f_3)..
- Las señales moduladas resultantes se combinan después en una única señal compuesta que se envía sobre un enlace que tiene ancho de banda suficiente para acomodarlas.



Ejemplo de demultiplexación FDM

- El demultiplexor usa una serie de filtros para descomponer la señal multiplexada en las señales componentes que la constituyen.
- Las señales individuales se pasan a un demodulador que las separa de sus portadoras y las pasa a líneas de salida.



Asuma un canal de voz que ocupa un ancho de banda de 4 KHz. se necesita combinar tres canales de voz en un enlace con un ancho de banda de 12 KHz, de 20 a 32 KHz. Muestre la configuración utilizando el dominio de frecuencia. Asuma que no hay bandas de guarda.

Solución

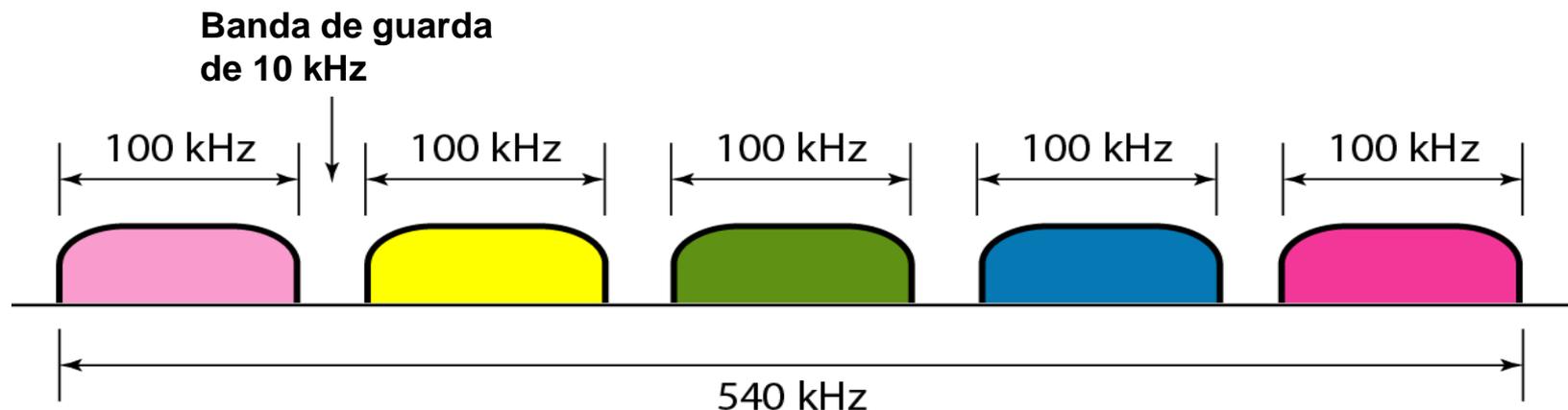
Se desplaza (modula) cada uno de los tres canales de voz a un ancho de banda diferente como se muestra en la Figura 6.6. Se utiliza el ancho de banda de 20 a 24 KHz para el primer canal, el ancho de banda de 24 a 28 KHz para el segundo y el ancho de banda de 28 a 32 KHz. Luego se combinan como se muestra en la figura 6.6.

Cinco canales, cada uno con un ancho de banda de 100 KHz, son multiplexados juntos. ¿Cuál es el ancho de banda del enlace si se necesita una banda de guarda de 10 KHz entre los canales para evitar interferencias?

Solución

Para cinco canales, se necesitan al menos cuatro bandas de guarda. Esto significa que el ancho de banda requerido es al menos

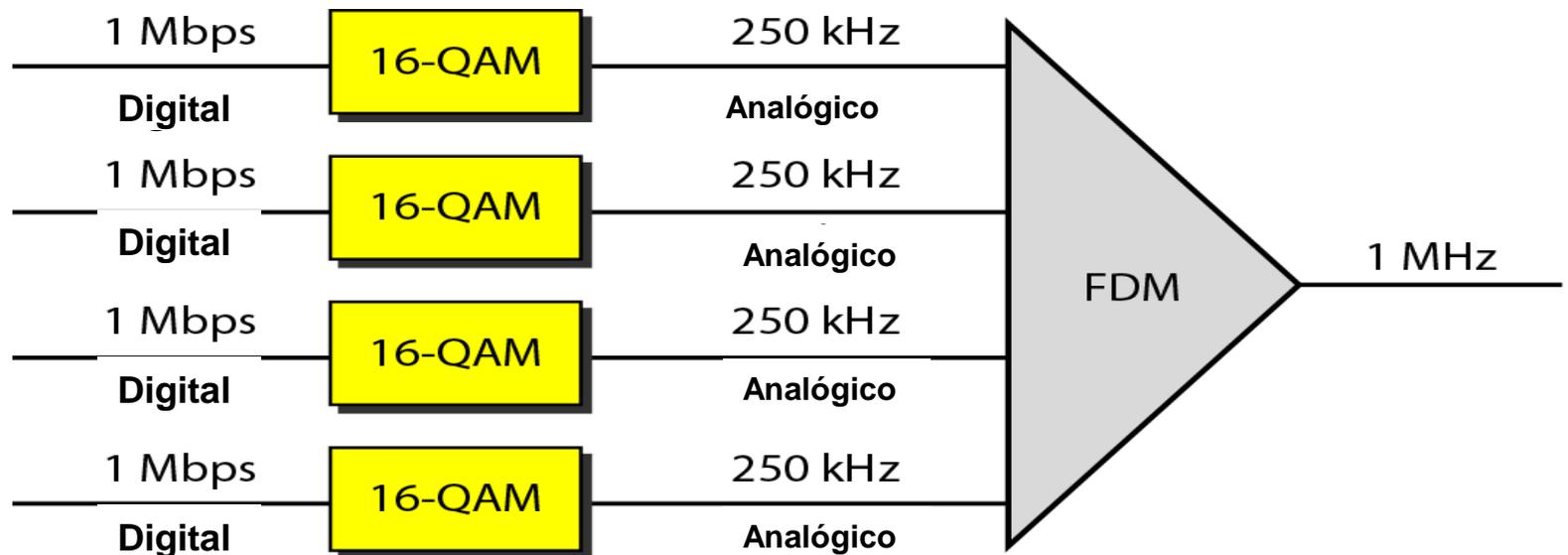
$$5 \times 100 + 4 \times 10 = 540 \text{ KHz,}$$



Para cuatro canales de datos (digitales), cada uno transmitido a 1 Mbps, se utiliza un canal de satélite de 1 MHz. Diseñe una configuración apropiada utilizando FDM.

Solución

El canal de satélite es analógico. se divide en cuatro canales, cada uno de 250 KHz de ancho de banda. Cada canal digital de 1 Mbps es modulado de forma que 4 bits se modulen a 1 Hz. Una solución es utilizar la modulación 16-QAM. La Figura 6.8 muestra una configuración posible.



El sistema de portadora analógica:

- Para maximizar la eficiencia de su infraestructura, las compañías telefónicas han multiplexado tradicionalmente las señales de líneas de bajo ancho de banda en líneas de gran ancho de banda.
- Para líneas analógicas se utiliza FDM.

Uno de estos sistemas jerárquicos utilizado por AT&T está compuesto por grupos, supergrupos, grupos master y grupos jumbo:

- 12 canales de voz se multiplexan en una línea de mayor ancho de banda para crear un **grupo** (48 KHz).
- El **supergrupo** combinan hasta 5 grupos (60 canales de voz y 249 KHz).
- 10 supergrupos forman un **grupo master** (2.40 MHz y 600 canales de VOZ).
- Seis grupos máster forman un **grupo jumbo** (15,12 MHz y 3600 canales de voz)

Figura 6.9 Jerarquía analógica.

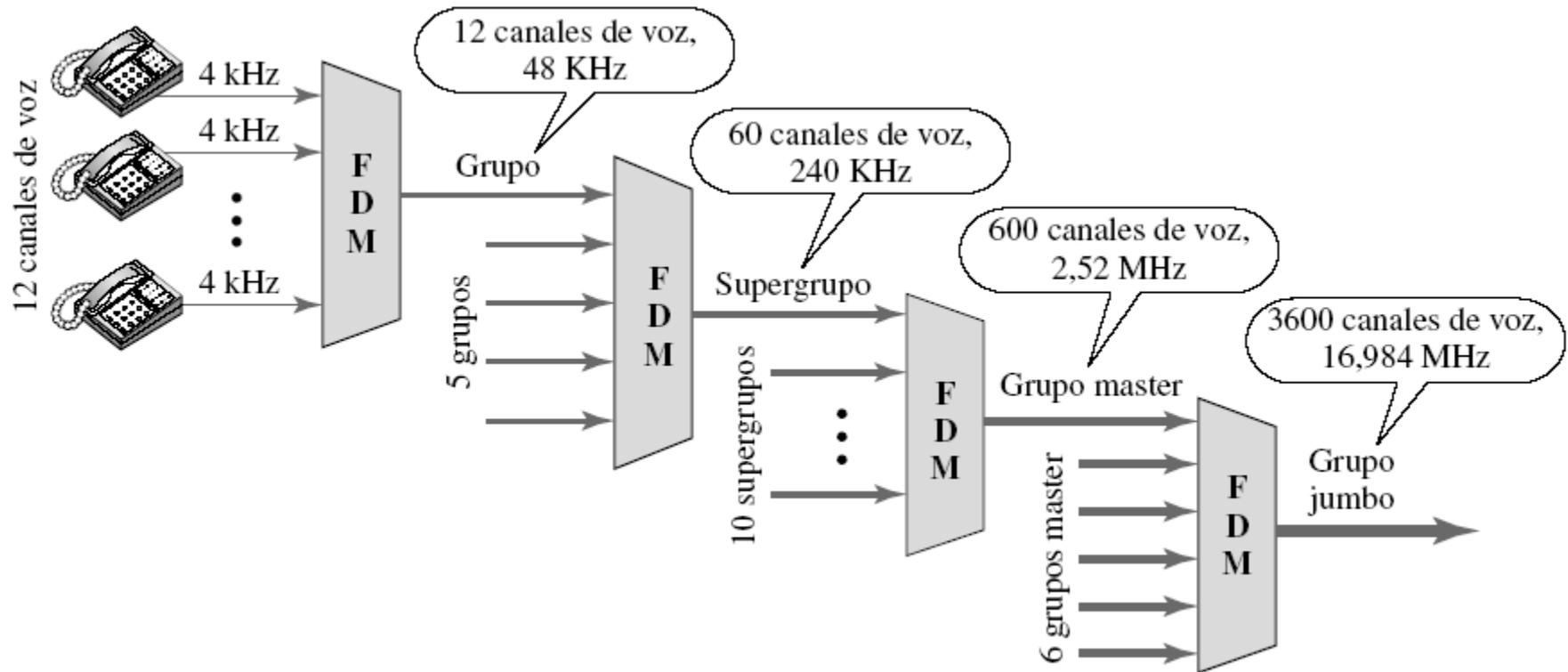
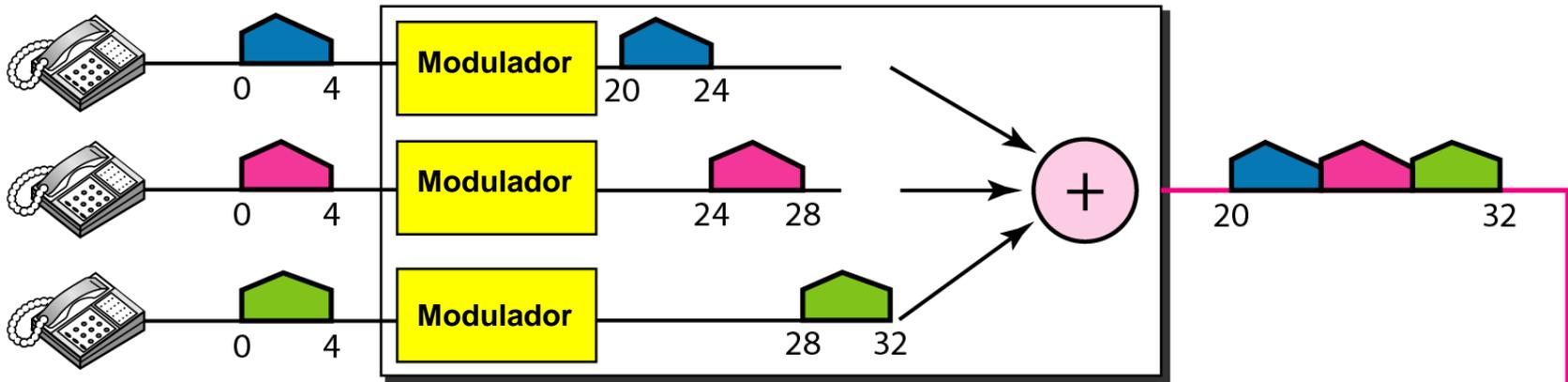
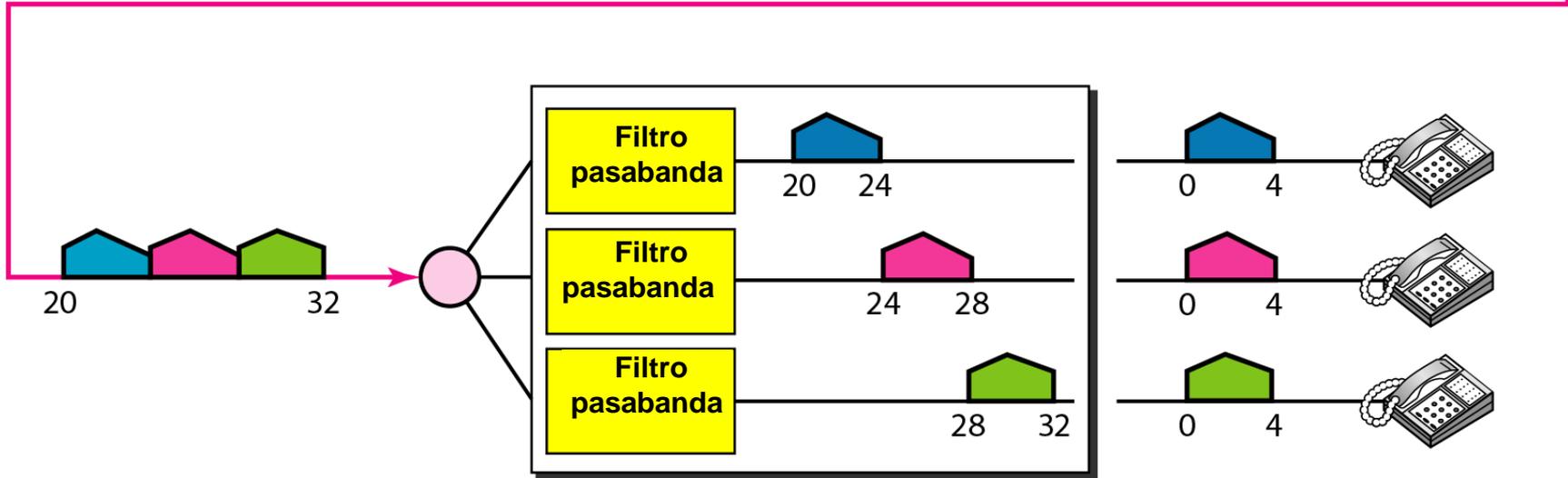


Figura 6.6 Ejemplo 6.1

Desplazar y combinar



Enlace con ancho de banda más grande



Filtrar y desplazar

El sistema de teléfonos móviles avanzado (AMPS) utiliza dos bandas. la primera banda de 824 a 849 MHz se utiliza para el envío, y la de 869 a 894 MHz para la recepción. Cada usuario tiene un ancho de banda de 30 KHz en cada dirección. La voz de 3 KHz se modula utilizando FM, que crea una señal modulada de 30 KHz. ¿Cuánta gente puede utilizar sus teléfonos móviles simultáneamente?

Solución

Cada banda es de 25 MHz. Si se divide 25 MHz entre 30 KHz, se obtiene 833.33. En realidad, la banda se divide en 832 canales. De estos, 42 canales se utilizan para control, lo que significa que sólo 790 canales están disponibles para los usuarios AMPS se tratará en detalle en el capítulo 16.

Multiplexación por división de longitud onda (WDM).

- Diseñado para utilizar la capacidad de alta tasa de datos de la fibra óptica.
- Es una técnica de multiplexación analógica que combina señales ópticas. El uso de cable de fibra óptica para una única línea gasta el ancho de banda disponible. La multiplexación permite combinar varias líneas en una.
- Se combinan múltiples haces de luz dentro de una única luz en el multiplexor, haciendo la operación inversa en el demultiplexor.
- Esto se resuelve fácilmente con un prisma.
- **WDM denso (WDMD)** multiplexa un gran número de canales, situando los canales muy cerca unos de otros.

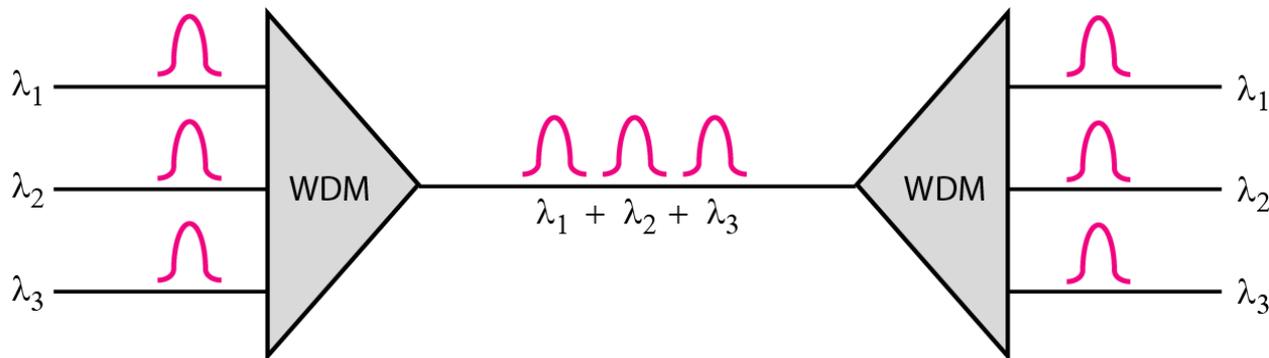
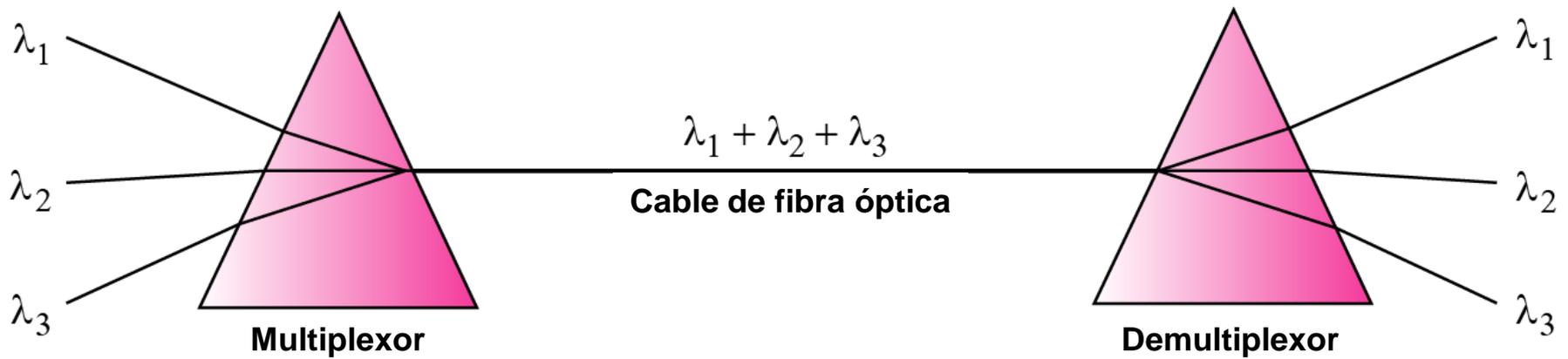
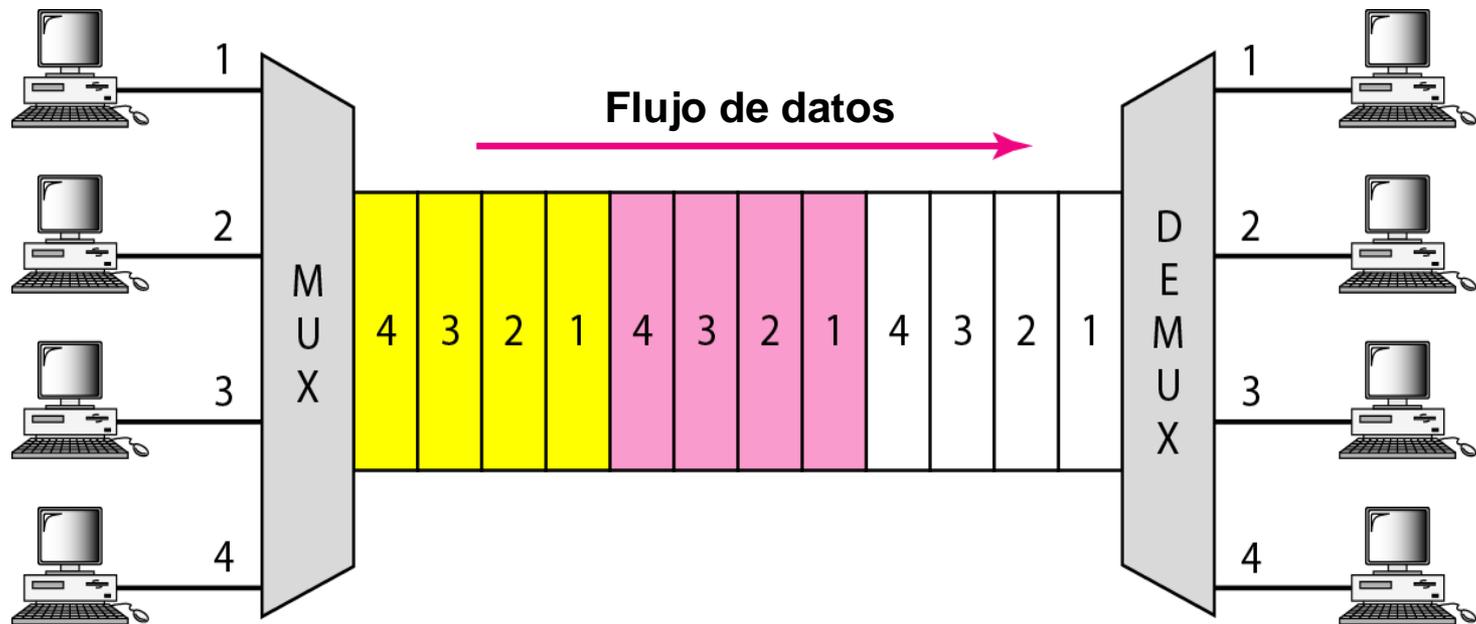


Figura 6.11 *Los prismas en la multiplexación y demultiplexación WDM.*



Multiplexación síncrona por división del tiempo (TDM)

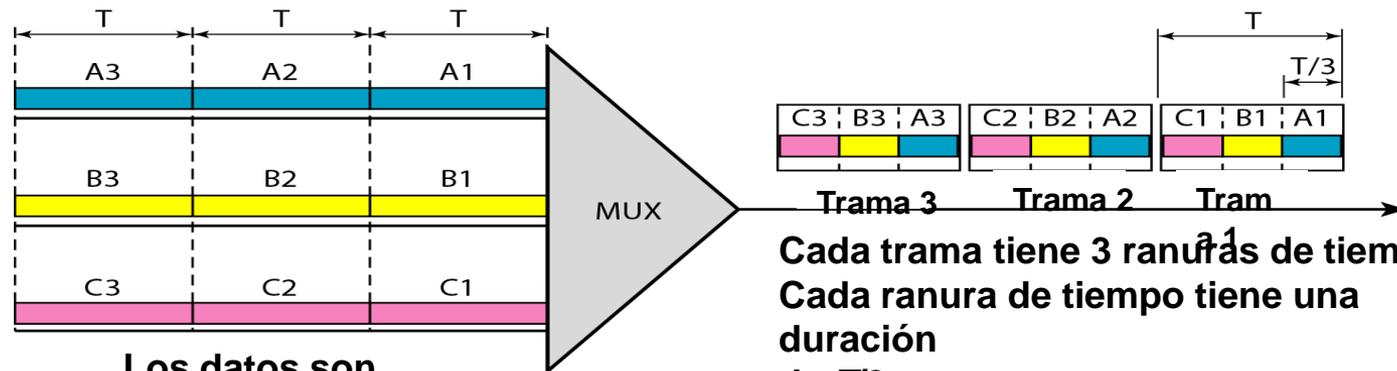
- Es una técnica de multiplexación digital que combina varios canales de baja tasa en uno de alta tasa.
- En lugar de compartir una porción del ancho de banda como en FDM, se comparte el tiempo. Cada conexión ocupa una porción del tiempo en el enlace.



- Cada conexión de entrada tiene una asignación en la salida aunque no se envíen datos.

Ranuras de tiempo y tramas:

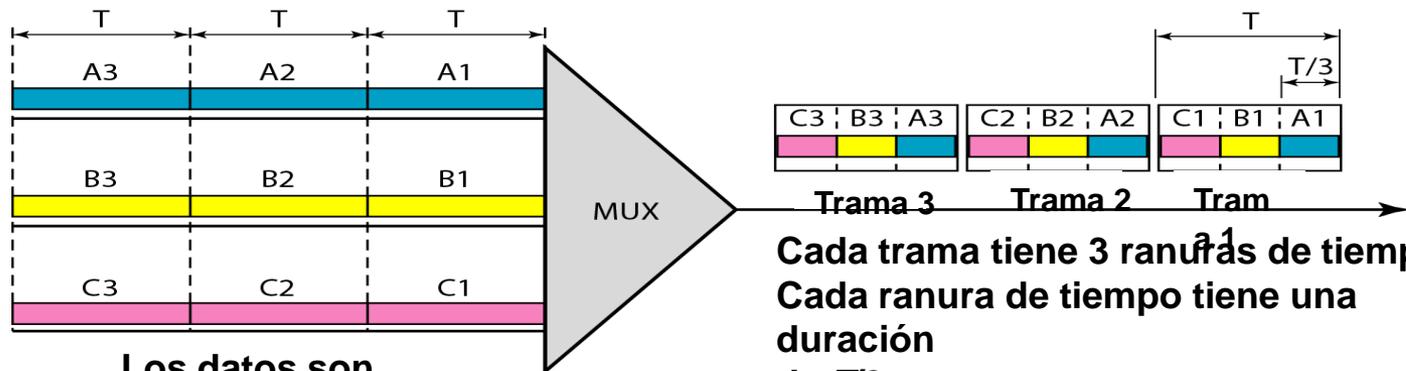
- El flujo de datos de cada conexión de entrada se divide en unidades, donde cada unidad ocupa una ranura de tiempo de entrada.
- Una unidad puede ser un bit, un carácter o un bloque de datos.
- Cada unidad de entrada se convierte en una unidad de salida y ocupa una ranura de tiempo en la salida.



Los datos son tomados de cada línea cada T s.

Cada trama tiene 3 ranuras de tiempo. Cada ranura de tiempo tiene una duración de $T/3$ s.

- La duración de una ranura de salida es n veces más corta que la duración de una ranura de entrada, siendo n el número de conexiones.
- En una trama se introduce una ronda de unidades de datos de cada conexión de entrada.
- Si se tienen n conexiones, la trama se divide en n ranuras de tiempo.
- La tasa de datos en el enlace es n veces más rápida, y la duración de la unidad es n veces más corta.



Los datos son tomados de cada línea cada T s.

Cada trama tiene 3 ranuras de tiempo. Cada ranura de tiempo tiene una duración de $T/3$ s.

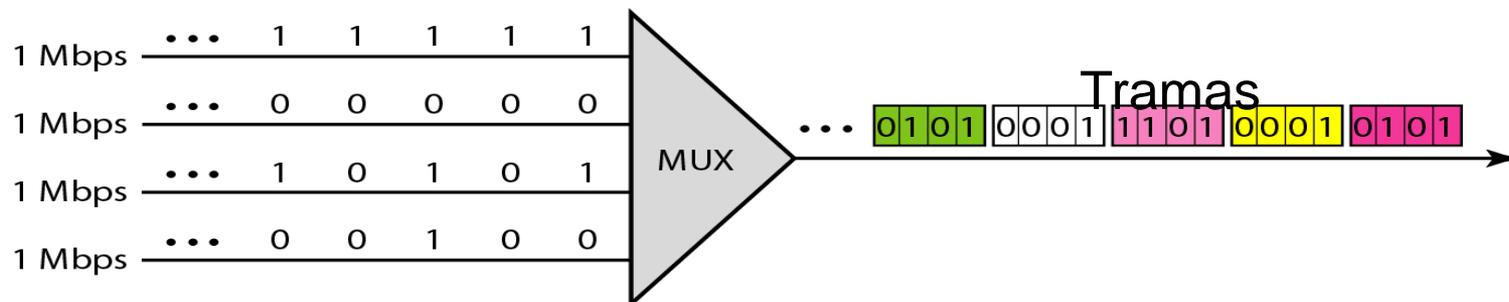
En la Figura anterior, la tasa de datos para cada conexión de entrada es de 3 kbps. si la unidad de multiplexación es 1 bit, ¿Cuál es la duración de (a) cada ranura de tiempo, (b) cada ranura de salida y (c) cada trama??

Solución

Se puede responder a estas preguntas de la siguiente forma:

- a. La tasa de datos para cada entrada es de 1 kbps. Esto significa que la duración de un bit es $1 / 1000$ s o 1 ms. La duración de la ranura de tiempo de entrada es 1 ms (la misma que la duración de 1 bit).
- b. La duración de cada ranura de tiempo en la salida es la tercera parte de la ranura de tiempo en la entrada. Esto significa que la duración de la ranura de tiempo en la salida es $1/3$ ms.
- c. Cada trama transporta tres ranuras de tiempo. Por tanto, la duración de una trama es $3 \times 1/3$ ms o 1 ms. la duración de una trama es la misma que la duración de una unidad de entrada.

La Figura 6.14 muestra TdM síncrona con un flujo de datos para cada entrada y un flujo de datos para la salida. La unidad de datos es 1 bit. Encuentre: (a) la duración de un bit en la entrada, (b) la duración de un bit en la salida, (c) la tasa de bits de salida y (d) la tasa de tramas de salida.



Solución

Se puede responder a estas preguntas de la siguiente forma:

- La duración de un bit de entrada es el inverso de la tasa de bits: $1/1 \text{ Mbps} = 1 \text{ microsegundo}$.
- La duración de un bit de salida es la cuarta parte de la duración del bit de entrada $1/4 \text{ microsegundo}$.

- c. La tasa de bits de salida es la inversa de la duración del bit de salida o $1/4$ microsegundos o 4 Mbps. Esto se puede deducir también del hecho de que la tasa de salida es 4 veces mayor que la tasa de entrada; por tanto la tasa de salida es $4 \times 1 \text{ Mbps} = 4 \text{ Mbps}$.

- d. La tasa de tramas siempre es la misma que la tasa de entrada. Por tanto la tasa de tramas es 1.000.000 tramas por segundo. Debido a que se envían 4 bits en cada trama, se puede verificar el resultado de la pregunta anterior multiplicando la tasa de tramas por el número de bits por trama.

Cuatro conexiones de 1 kbps se multiplexan juntas. Una unidad es 1 bit. Encuentre (a) la duración de 1 bit antes de la multiplexación, (b) la tasa de transmisión del enlace, (c) la duración de una ranura de tiempo y (d) la duración de la trama.

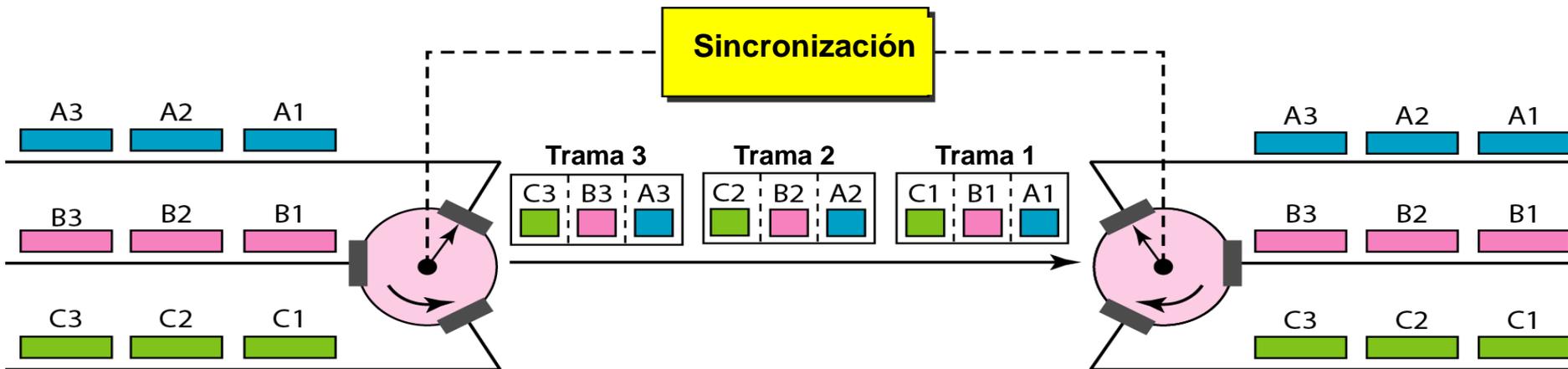
Solución

Se puede responder a las preguntas anteriores de la siguiente forma:

- a. La duración de 1 bit antes de la multiplexación es $1/1$ kbps o 0,001 s (1 ms).
- b. La tasa del enlace es 4 veces la tasa de una conexión o 4 kbps.
- c. La duración de cada ranura de tiempo es la cuarta parte de la duración de cada bit antes de la multiplexación, o $1/4$ ms o 250 microsegundos. observe que también se puede calcular esto a partir de la tasa de datos del enlace, 4 kbps. la duración del bit es la inversa de la tasa de datos o $1/4$ ms o 250 microsegundos.
- d. La duración de una trama es siempre la duración de una unidad antes de la multiplexación o 1 ms. También se puede calcular esto de otra forma. Cada trama en este caso tiene cuatro ranuras de tiempo. Por tanto la duración de una trama es 4 veces 250 microsegundos o 1 ms.

Entrelazado

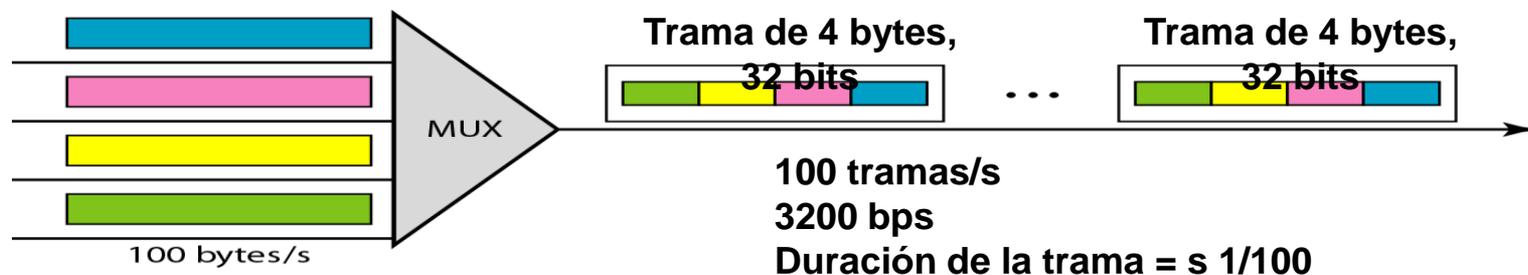
- Se puede visualizar como dos conmutadores de rápida rotación, no en el lado de la multiplexación y otro en el lado de la demultiplexación.
- Los conmutadores se sincronizan y rotan a la misma velocidad pero en direcciones opuestas.
- En el lado del multiplexador cuando el conmutador se abre frente a una conexión, esta conexión tiene la oportunidad de enviar una unidad por el camino. A este proceso se llama **entrelazado**.
- En el demultiplexador, cuando el conmutador abre frente a una conexión puede recibir.



Se multiplexan cuatro canales utilizando TDM. si cada canal envía 100 bytes/s y se multiplexa 1 byte por canal, muestre la trama que viaja por el enlace, el tamaño de la trama, la duración de la trama, la tasa de tramas y la tasa de bits para el enlace.

Solución

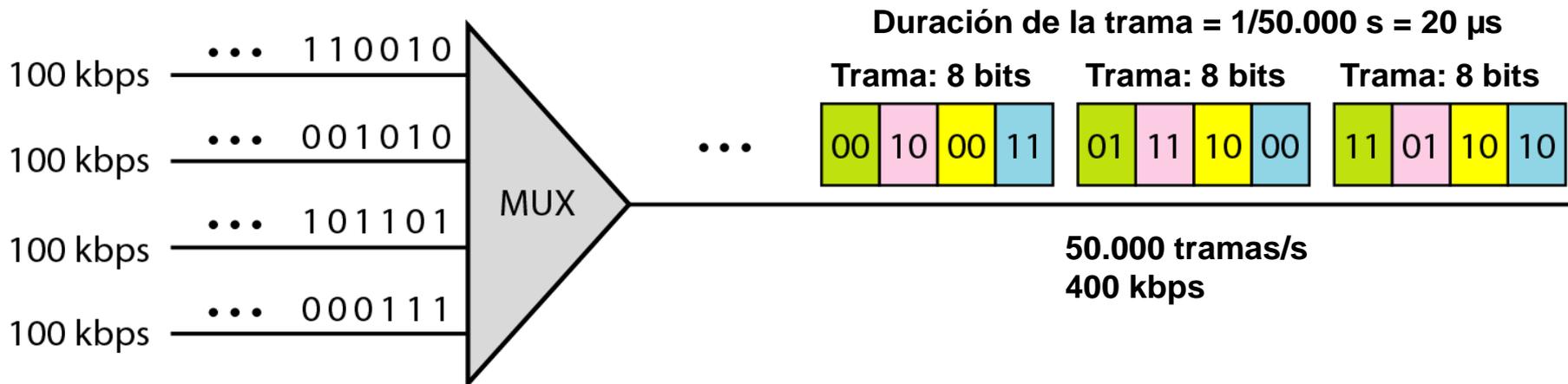
El multiplexor se muestra en la figura. Cada trama transporta 1 byte de cada canal; el tamaño de cada trama es, por tanto, de 4 bytes o 32 bits. debido a que cada canal envía 100 bytes/s y una trama transporta 1 byte para cada canal, la tasa de tramas debe ser 100 tramas por segundo. la duración de una trama es, por tanto, $1/100$ s. El enlace transporta 100 tramas por segundo, y puesto que cada trama contiene 32 bits, la tasa de bits es de $100 \times 32 = 3200$ bps. Esto es cuatro veces la tasa de bit de cada canal, que es $100 \times 8 = 800$ bps.



Un multiplexor combina cuatro canales de 100 kbps utilizando una ranura de tiempo de 2 bits. Muestre la salida con cuatro entradas cualesquiera. ¿Cuál es la tasa de tramas? ¿Cuál es la duración de la trama? ¿Cuál es la tasa de bits? ¿Cuál es la duración del bit?

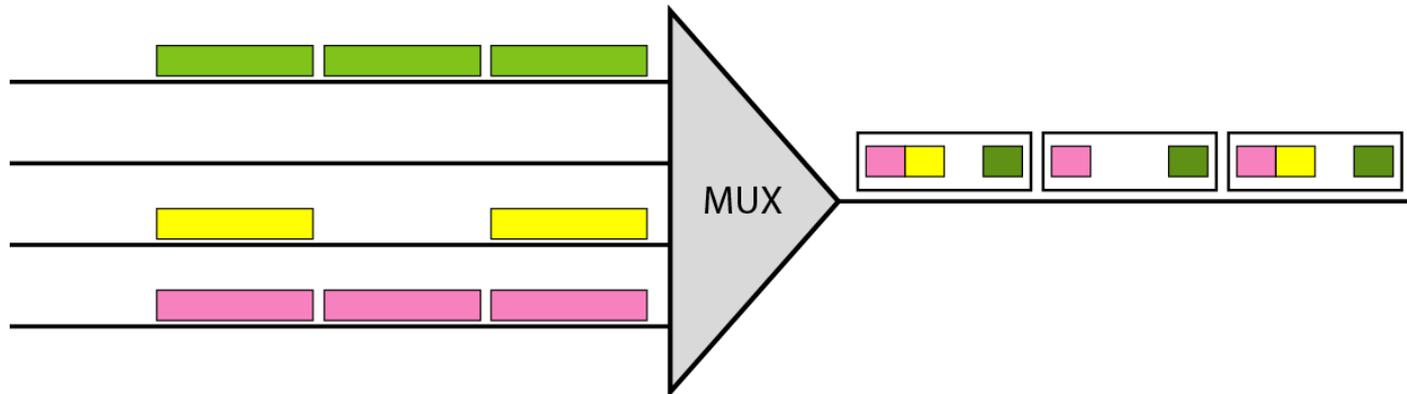
Solución

La Figura 6.17 muestra la salida para cuatro entradas cualesquiera. El enlace transporta 50.000 tramas por segundo. La duración de la trama es por tanto $1/50.000$ s o 20 microsegundos. La tasa de tramas es de 50.000 tramas por segundo y cada trama transporta 8 bits; la tasa de bits es de $50.000 \times 8 = 400.000$ bits o 400 kbps. La duración de un bit es de $1/400.000$ s o 2.5 microsegundos.



Ranuras vacías

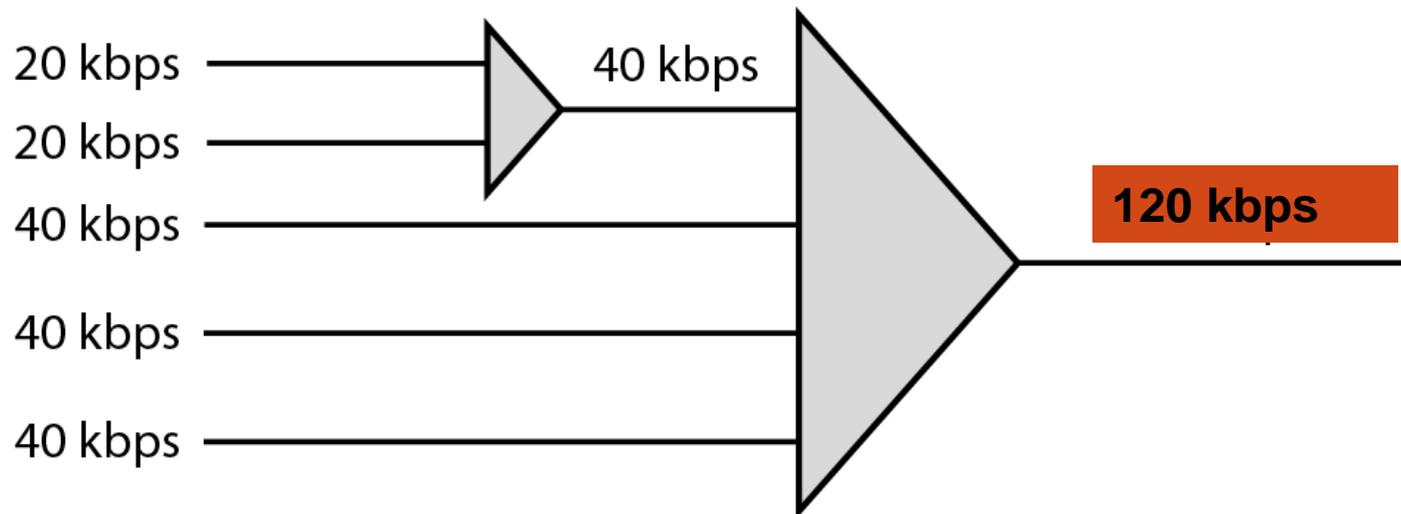
- TDM no es tan eficiente como podría ser.
- Si un emisor no tiene datos que enviar, la ranura correspondiente en la trama de salida está vacía.



Gestión de la tasa de datos:

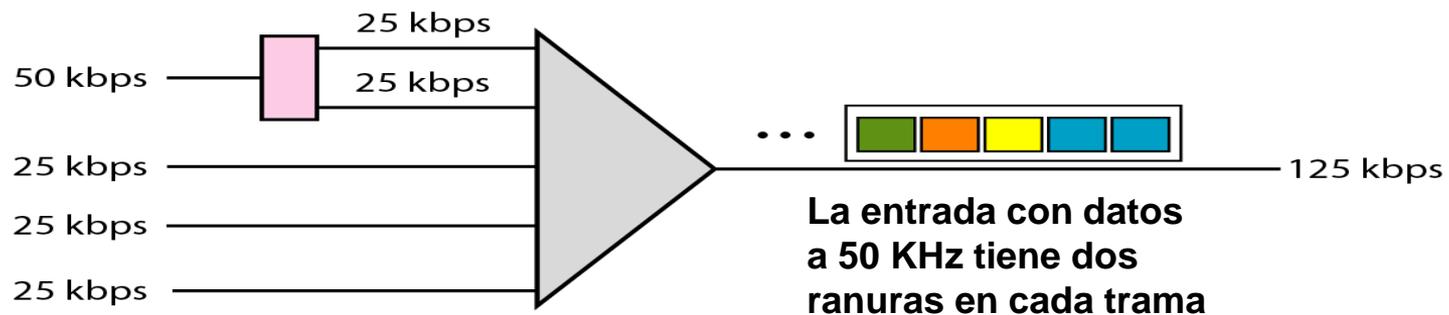
➤ Si las tasas de datos de entrada no son iguales se pueden emplear tres Estrategias: multiplexación multinivel, asignación de múltiples ranuras e inserción de pulsos.

- **Multiplexación multinivel:** Técnica utilizada cuando la tasa de datos de una línea es múltiplo de otras.



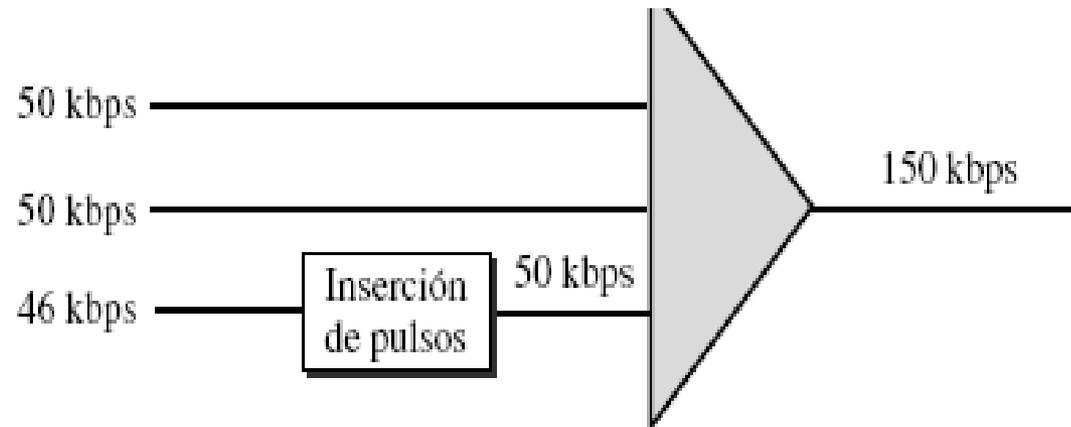
•Asignación de múltiples ranuras:

A veces es más eficiente asignar más de una ranura en una trama a una única línea de entrada, por ejemplo, insertando un conversor serie paralelo en la línea para hacer dos entradas a partir de una.



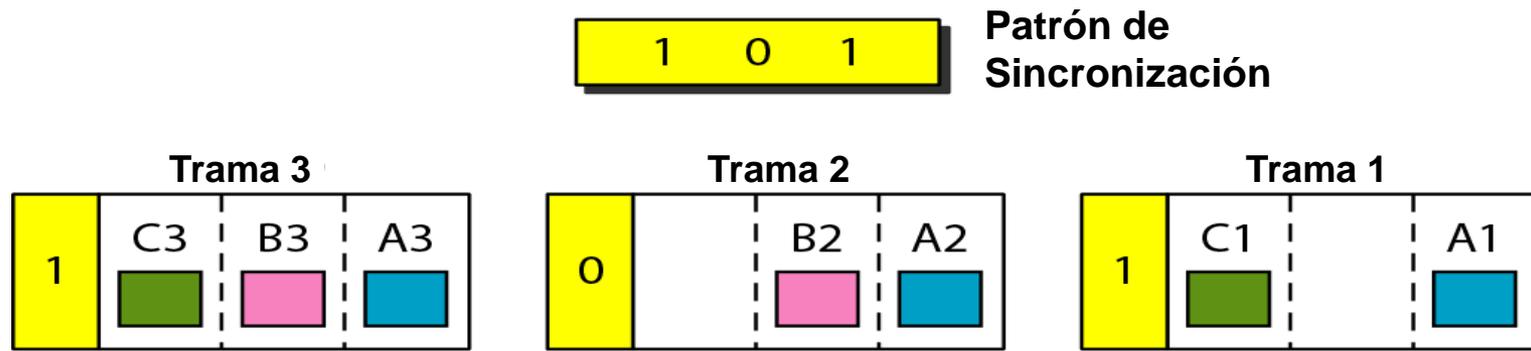
• Inserción de impulsos

- Esta técnica se usa cuando las tasas de datos no son múltiplos unas de otras.
- Se hace que la tasa más alta sea la dominante y al resto de tasas se le añaden bit extras hasta igualarla con la dominante.



Sincronización de tramas:

- Si el multiplexor y el demultiplexor no están sincronizados, un bit de un canal puede ser recibido por un canal equivocado.
- Por esta razón se añaden uno o más bits de sincronización al comienzo de cada trama, denominados bits de tramado. En la mayoría de los casos consta de 1 bit por trama, alternando entre 0 y 1.



Hay cuatro fuentes, cada una de las cuales crea 250 caracteres por segundo. Si la unidad de entrelazado es un carácter y se añade un bit de sincronización a cada trama, encuentre (a) la tasa de datos de cada fuente, (b) la duración de cada carácter en cada fuente, (c) la tasa de tramas, (d) la duración de cada trama, (e) el número de bits en cada trama (f) la tasa de datos del enlace.

Solución

Se puede responder a las preguntas de la siguiente forma:

- a. La tasa de datos para cada fuente es $250 \times 8 = 2000$ bps = 2 kbps.
- b. Cada fuente envía 250 caracteres por segundo, por tanto, la duración de un carácter es $1/250$ s o 4 ms.

- c. Cada trama tiene un carácter de cada fuente, lo que significa que el enlace necesita enviar 250 tramas por segundo para asegurar la tasa de transmisión de cada fuente..
- d. La duración de cada trama es $1/250$ s o 4 ms. Obsérvese la duración de cada trama es la misma que la duración de cada carácter procedente de cada fuente.
- e. Cada trama transporta 4 caracteres y 1 bit extra de sincronización. Esto significa que cada trama tiene:
 $4 \times 8 + 1 = 33$ bits.

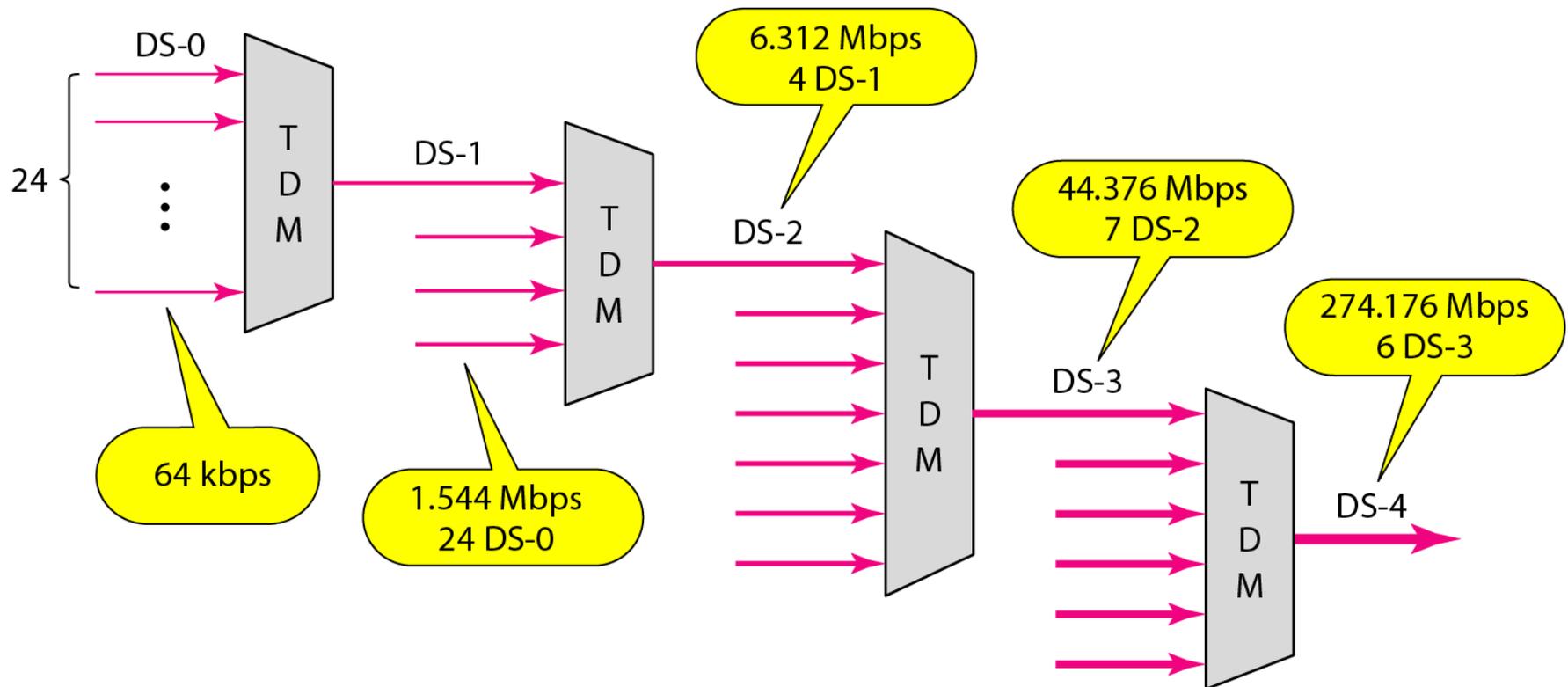
Se multiplexan dos canales, uno con una tasa de 100 kbps y otro con una tasa de 200 kbps. ¿Cómo se puede conseguir? ¿Cuál es la tasa de tramas? ¿Cuál es la duración de la trama? ¿Cuál es la tasa de bits del enlace?

Solución

Se puede asignar una ranura al primer canal y dos ranuras al segundo canal. Cada trama transporta 3 bits. La tasa de trama es de 100.000 tramas por segundo porque transporta 1 bit del primer canal. la duración de la trama es $1/100.000$ s o 10 ms. la tasa de bits es $100.000 \text{ tramas/s} \times 3 \text{ bits por trama}$, o 300 kbps.

Jerarquía digital

➤ Implementación TDM a través de una jerarquía de señales digitales por parte de las compañías telefónicas



DS-0 a DS-4 son los nombres de los servicios, las compañías telefónicas usan las líneas T.

Líneas cuyas capacidades coinciden precisamente con las tasas de datos de los servicios DS-0 a DS-4.

Tabla 6.1 *DS y tasas de líneas T*

<i>Servicio</i>	<i>Línea</i>	<i>Tasa (Mbps)</i>	<i>Canales de voz</i>
DS-1	T-1	1,544	24
DS-2	T-2	6,312	96
DS-3	T-3	44,736	672
DS-4	T-4	274,176	4032

Figura 6.24 Línea T-1 para multiplexar líneas telefónicas

- Las líneas T se pueden usar también para transmisión analógica (conexiones telefónicas regulares), asumiendo que las señales analógicas son muestreadas y después multiplexadas.

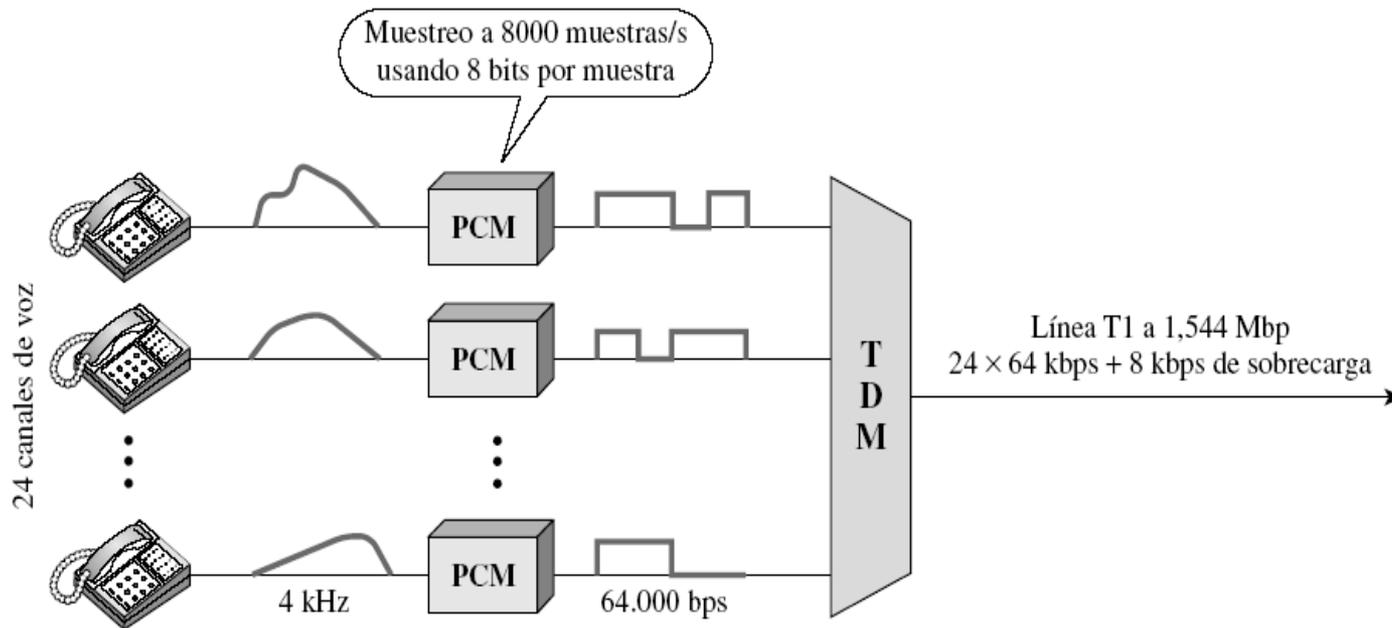
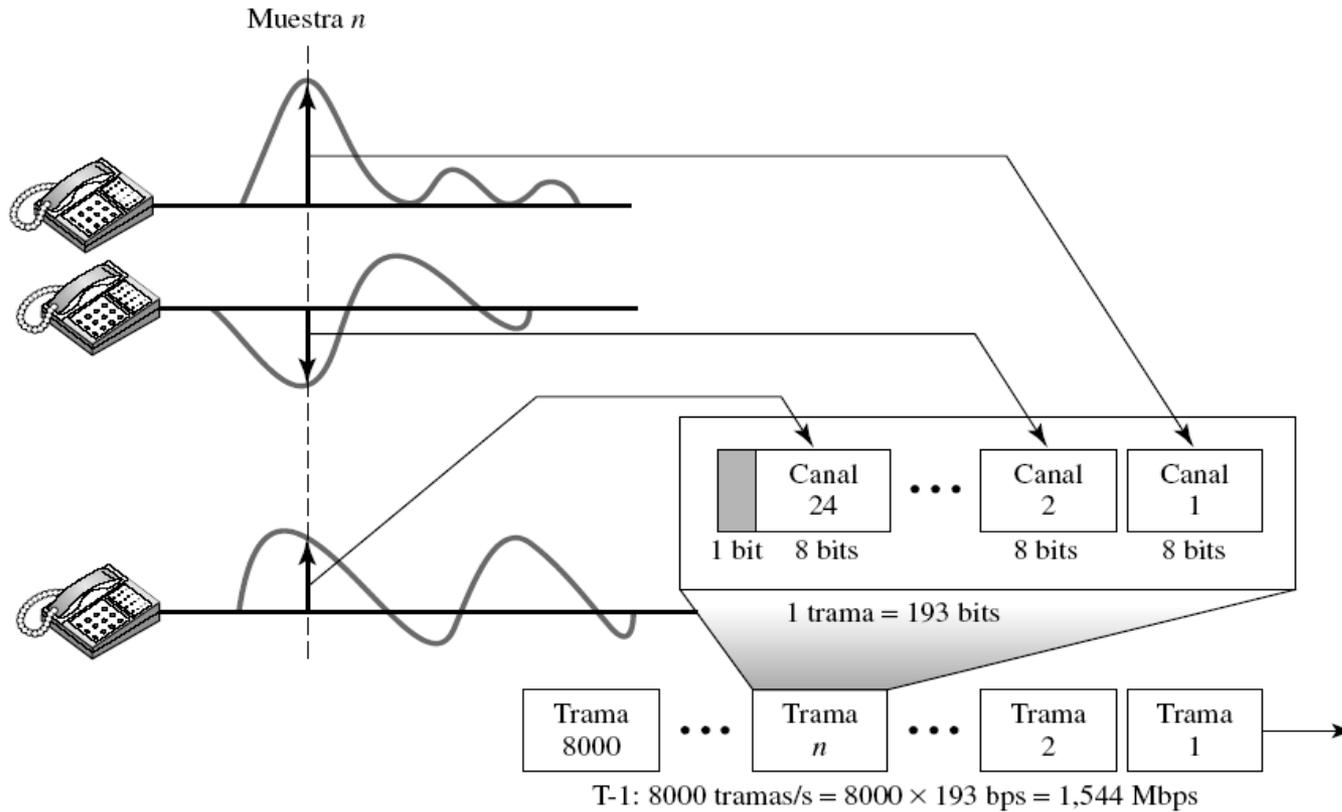


Figura 6.25 Estructura de la trama T-1



LINEAS E

o Versión europea de las líneas T.

o Ambos sistemas son conceptualmente iguales, pero con capacidades distintas.

Tabla 6.2 *Tasas de la línea E*

<i>Línea</i>	<i>Tasa (Mbps)</i>	<i>Canales de voz</i>
E-1	2,048	30
E-2	8,448	120
E-3	34,368	480
E-4	139,264	1920

Multiplexación estadística por división del tiempo:

- Las ranuras de tiempo se asignan dinámicamente, mejorando el ancho de banda.
- Sólo cuando una línea de entrada tiene datos que enviar obtiene una ranura en la trama de salida.
- El número de ranuras en cada trama es menor que el número de líneas de entrada.

Direccionamiento:

- Se incluye la dirección del receptor en cada ranura, para indicar donde será entregada.
- El direccionamiento en su forma más sencilla puede tener n bits para definir N líneas de salida diferentes con $n = \log_2 N$.

Tamaño de la ranura:

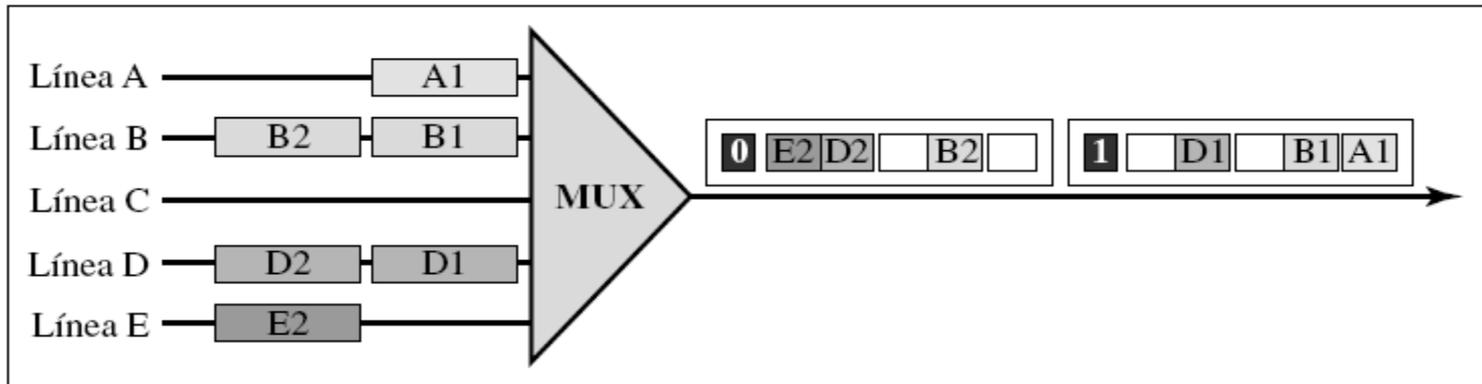
- Puesto que una ranura de tiempo transporta datos y direcciones, la relación entre tamaño de datos y el de direcciones debe ser razonable para asegurar que la transmisión es eficiente.

No necesitan sincronización.

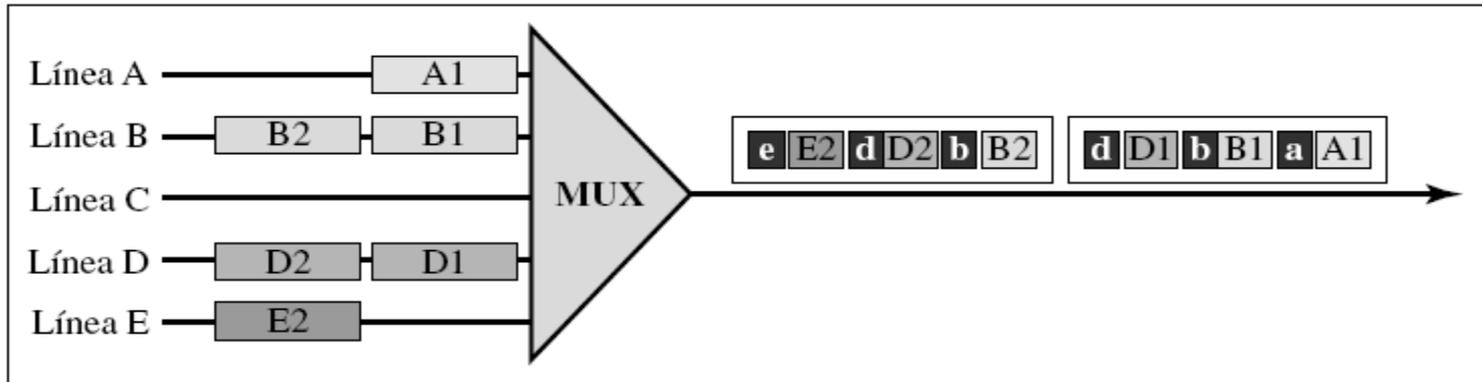
Ancho de banda:

- La capacidad del enlace normalmente es menor que la suma de las capacidades de cada canal.
- Se define la capacidad del enlace de acuerdo a la estadística de carga de cada canal.
- Durante periodos de tiempo de pico, algunas ranuras tendrán que esperar.

Figura 6.26 *Comparación de las ranuras en TDM*



a. TDM síncrona



b. TDM estadística

6-2 ESPECTRO ENSANCHADO

La multiplexación combina señales de varias fuentes para conseguir un uso eficiente del ancho de banda.

En el espectro ensanchado se combinan señales de varias fuentes para tener un ancho de banda mayor, pero el objetivo es algo diferente. Hay dos técnicas para ensanchar el ancho de banda.

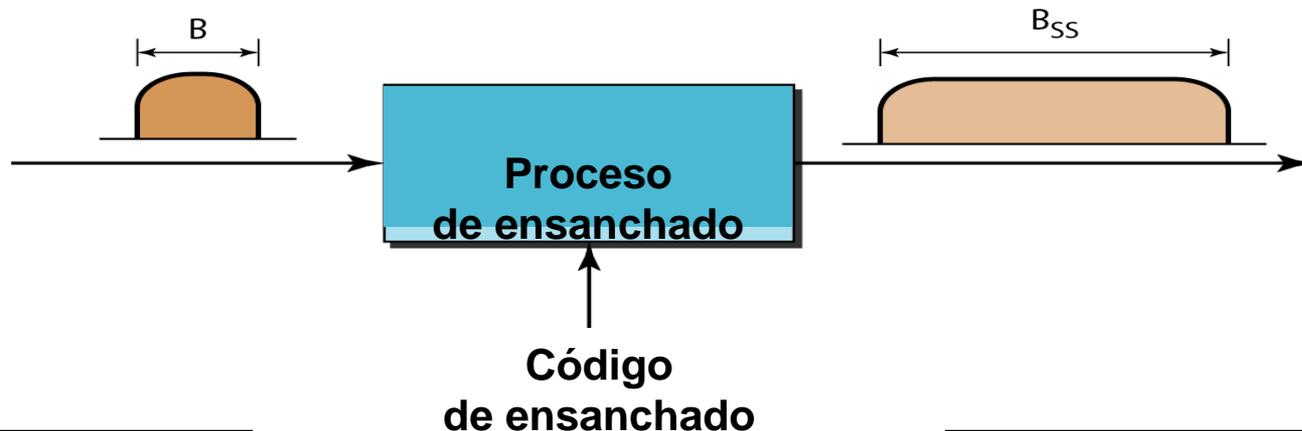
Temas a tratar en esta sección:

Espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS)

Espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS)

Espectro ensanchado

- o Se diseñó para su uso en aplicaciones inalámbricas (LAN y WAN).
- o En las aplicaciones inalámbricas, todas las estaciones utilizan el aire o el vacío como medio de comunicación. Las estaciones deben ser capaces de compartir el medio sin ser interceptadas ni sufrir interferencias de intrusos.
- o Las técnicas de espectro de ensanchado, añaden redundancia.
- o Si el ancho de banda de cada estación es B , el ensanchado lo expande a $B_{SS} \gg B$.
- o Estos objetivos se consiguen a través de dos principios:
 - El ancho de banda asignado a cada estación necesita ser bastante mayor que el necesario. Esto permite la redundancia.
 - La expansión del ancho de banda original ha de ser hecho por un proceso que sea independiente de la señal original.
- o Hay dos técnicas para ensanchar el ancho de banda: **espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS)** y **espectro de ensanchado por secuencia directa (DSSS)**.



Espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS):

- La señal se emite sobre una serie de frecuencias aparentemente aleatorias, saltando de frecuencia en frecuencia sincrónicamente con el transmisor. Los receptores no autorizados escucharán una señal ininteligible. Si se intentara interceptar la señal, sólo se conseguiría para unos pocos bits.
- El orden en los saltos en frecuencia se determina según una secuencia pseudoaleatoria almacenada en unas tablas, y que tanto el emisor y el receptor deben conocer.
- Un generador de códigos pseudoaleatorio, denominado ruido pseudoaleatorio (PN), crea un patrón de K bits para cada periodo de salto T_h .
- La tabla de frecuencias utiliza el patrón para encontrar la frecuencia a ser utilizada para este periodo y la pasa al sintetizador de frecuencias.
- El sintetizador crea una señal portadora para esa frecuencia, y la señal origen modula la señal portadora.

Figura 6.28 *Espectro ensanchado por salto de frecuencias (FHSS)*

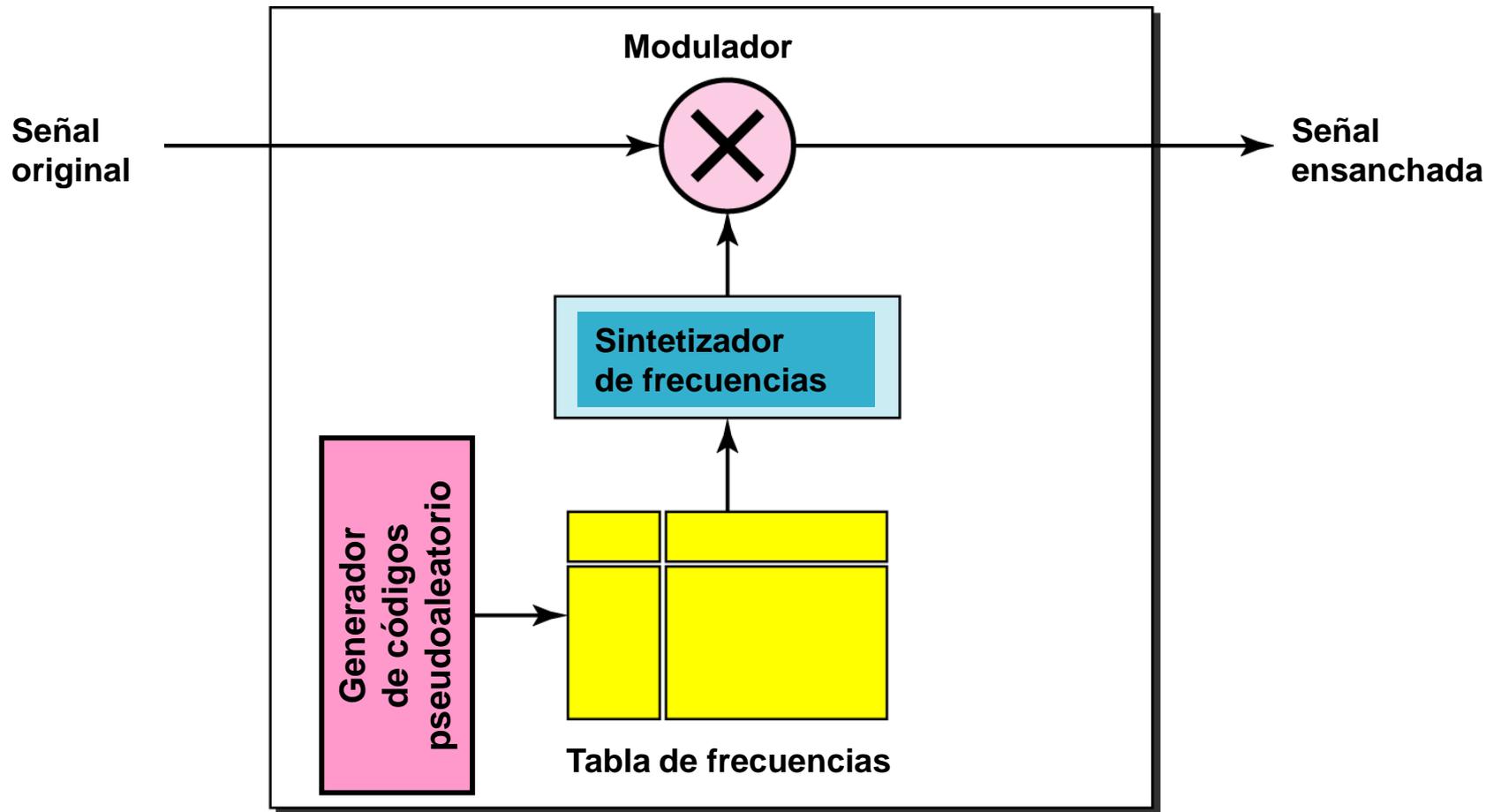


Figura 6.29 *Selección de frecuencias en FHSS*

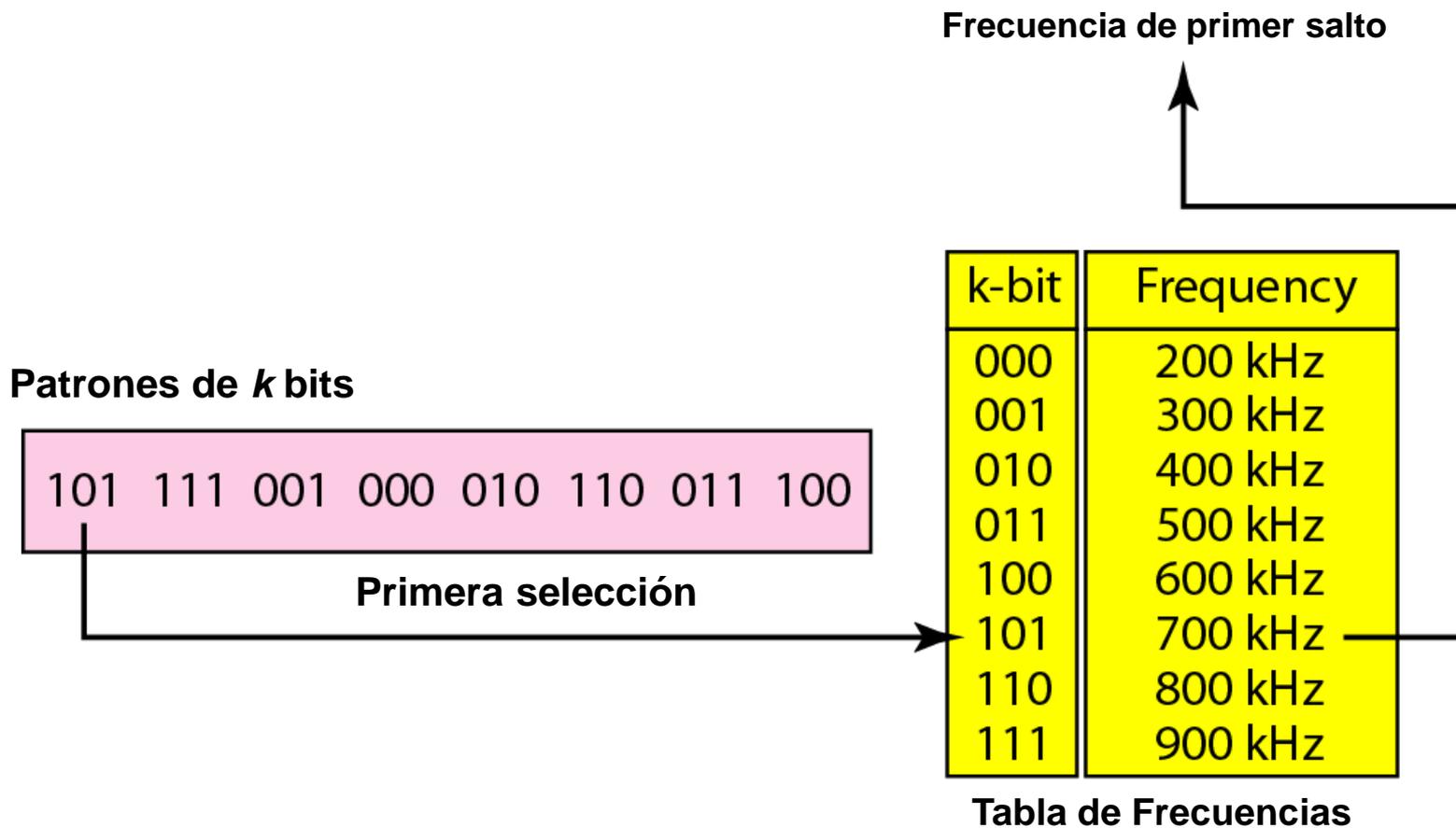


Figura 6.30 Ciclos FHSS

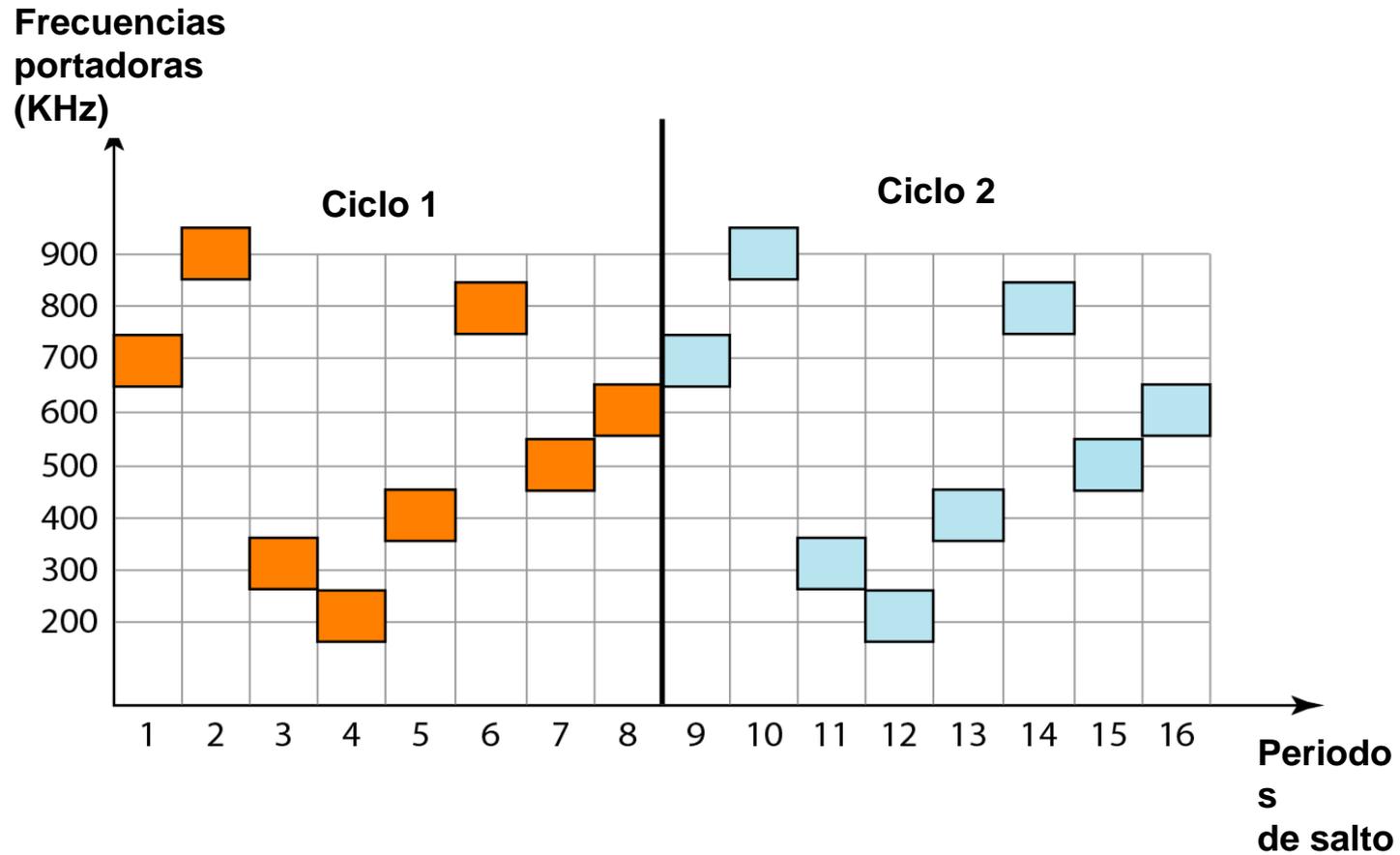
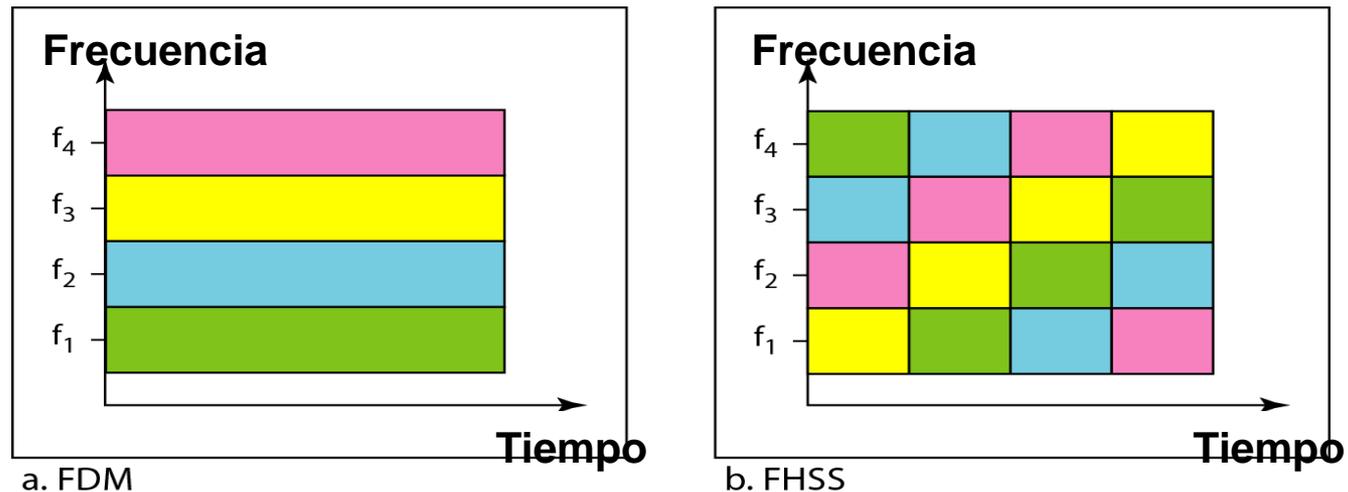


Figura 6.31 *Compartición del ancho de banda*

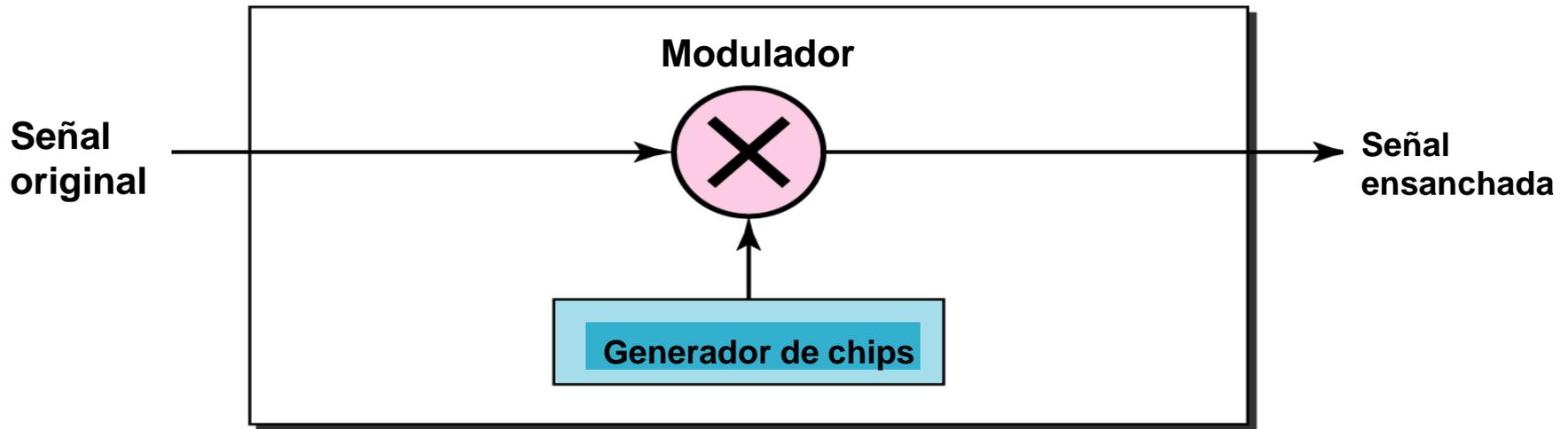
Si el número de frecuencias de salto es M , se pueden multiplexar M canales utilizando el mismo ancho de banda B_{ss} .

Cada estación solo utiliza una frecuencia en cada periodo de salto, las otras $M-1$ frecuencias pueden ser utilizadas por otras $M-1$ estaciones.



Espectro de ensanchado por secuencia directa (DSSS):

- Se reemplaza cada bit de datos por n bits utilizando un código de ensanchado.
- Cada bit tiene asignado un código de n bits, denominados chips, donde la tasa de chips es n veces la tasa de bits de datos.



Secuencia de Barke:

- También llamado código de dispersión o pseudoruido. Es una secuencia rápida diseñada para que aparezca aproximadamente la misma cantidad de 1 que de 0.

Un ejemplo de esta secuencia es el siguiente. +1-1+1+1-1+1+1+1-1-1-1-1 Solo los receptores a los que el emisor haya enviado previamente la secuencia podrán recomponer la señal original. Además, al sustituir cada bit de datos a transmitir, por una secuencia de 11 bits equivalente, aunque parte de la señal de transmisión se vea afectada por interferencias, el receptor aún puede reconstruir fácilmente la información a partir de la señal recibida.

