

7

TRANSMISIÓN ANALÓGICA CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA



Objetivo

● Describir la conversión digital a analógica, proceso de cambiar una de las características de una señal analógica en información basada en una señal digital. Estas técnicas forman parte de las tecnologías del nivel físico de las redes móviles 4G y 5G.

Manual de clases

Última modificación:
22 de abril de 2023

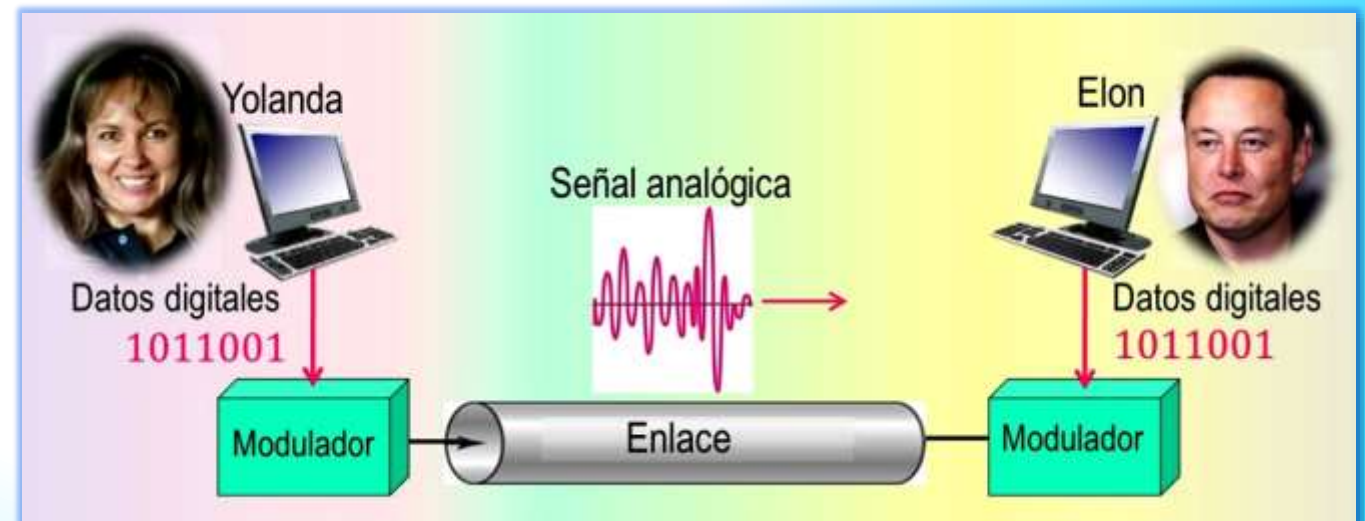
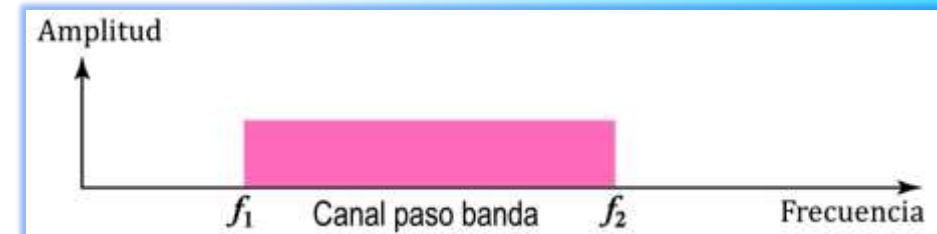
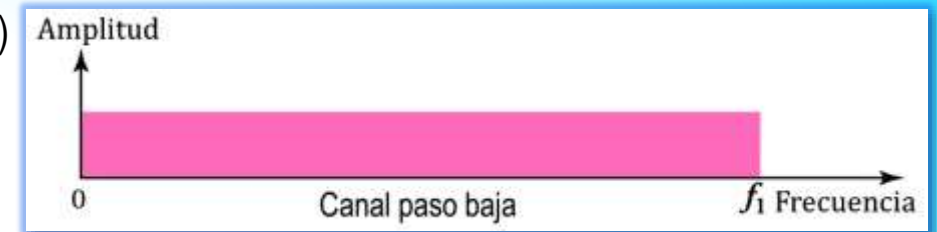
Tema 7 de:
TRANSMISIÓN DE DATOS
Edison Coimbra G.

1. CONCEPTOS DE MODULACIÓN

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

¿Cuándo es necesaria la transmisión analógica? (Forouzan, 2020)

- **La transmisión** digital es muy deseable, y para ella se necesita un **canal paso baja**. Pero cuando solo se dispone de un **canal paso banda**, la única elección es la **transmisión analógica**.
- **La conversión digital a analógica** es el proceso de cambiar una de las características de una señal analógica en información basada en una señal digital.
- **La figura** muestra la relación entre la información digital (**datos digitales**), el proceso de modulación de digital a analógica (**Modulador**) y el valor de la **señal analógica** resultante.



Características de la conversión digital a analógica

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

El proceso de modulación

(Forouzan, 2020)

- **Las tres características** que describen completamente a una onda seno son: la **amplitud** (voltaje instantáneo), la **frecuencia** y la **fase**. La amplitud pico de la onda es proporcional a la energía que transporta.

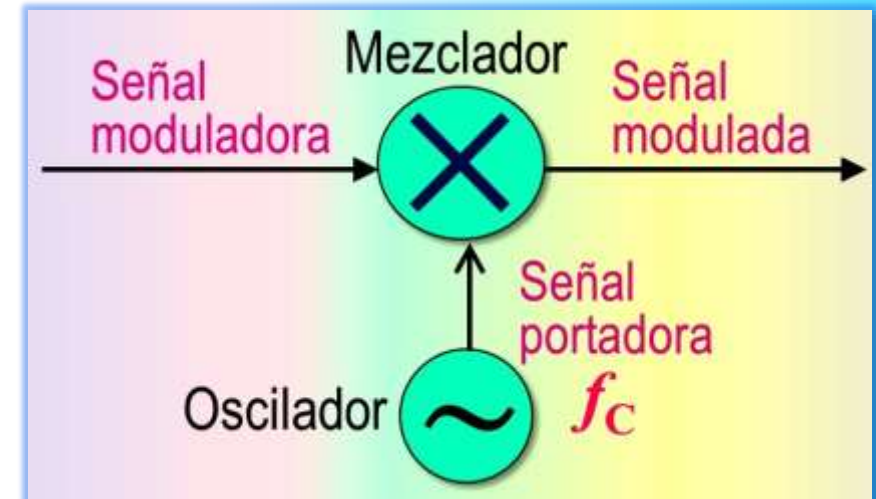
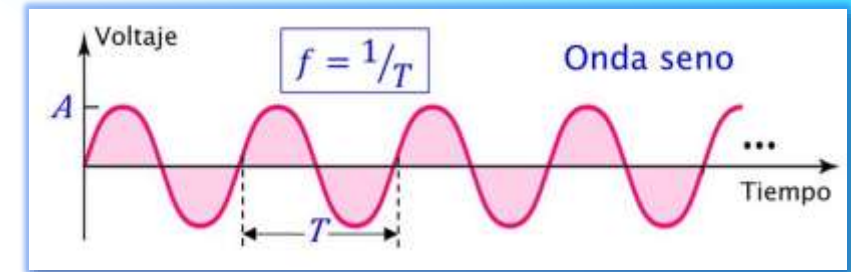
- **Se puede cambiar** el valor de las características de una onda seno al ritmo de las variaciones de la amplitud de la señal de información que se quiere transmitir. A este proceso se denomina **modulación**.

- **La figura ilustra** el esquema del proceso de modulación, donde:

- ► **El modulador** es un dispositivo electrónico que “mezcla” las señales.
- ► **La señal moduladora** es la información (analógica o digital) que se quiere transmitir.
- ► **La señal portadora** es una onda seno cuyas características variarán al ritmo de las variaciones de la señal de información. La información se “imprime” en la portadora.
- ► **La señal modulada**, es la señal analógica resultante que transporta la información por un canal paso banda. La transmisión por radio solo permite la propagación de portadoras analógicas.

$$v(t) = A \sin(2\pi f t + \theta)$$

$v(t)$ = voltaje instantáneo, en **V**.
 A = amplitud pico, en **V**.
 f = frecuencia de la onda, en **Hz**.
 θ = fase de la onda, en **radianes**.



Características de la conversión digital a analógica

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Tipos de modulación

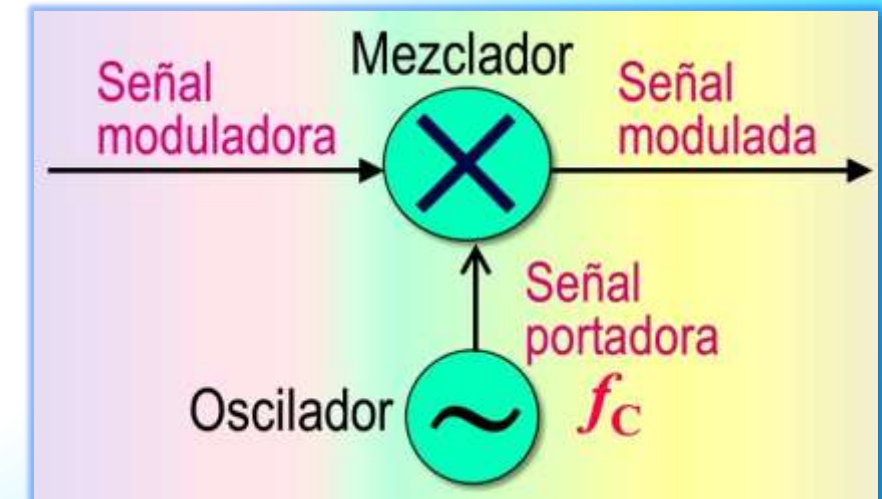
(Forouzan, 2020)

- **Por tanto**, cambiar una característica de la señal portadora puede servir para representar datos analógicos o digitales. Cualquiera de las tres características citadas puede alterarse para obtener los diferentes tipos de modulación que se muestran en la tabla.

Tipos de modulación	
Analógica	Digital
● Si la señal moduladora es analógica (voz y video).	● Si la señal moduladora es digital (voz y video digitalizados y datos de PC).
▶ AM . Modulación de amplitud.	▶ ASK . Modulación por desplazamiento de amplitud.
▶ FM . Modulación de frecuencia.	▶ FSK . Modulación por desplazamiento de frecuencia.
▶ PM . Modulación de fase.	▶ PSK . Modulación por desplazamiento de fase.
	▶ QAM . Modulación de amplitud en cuadratura.

$$v(t) = A \sin(2\pi f t + \theta)$$

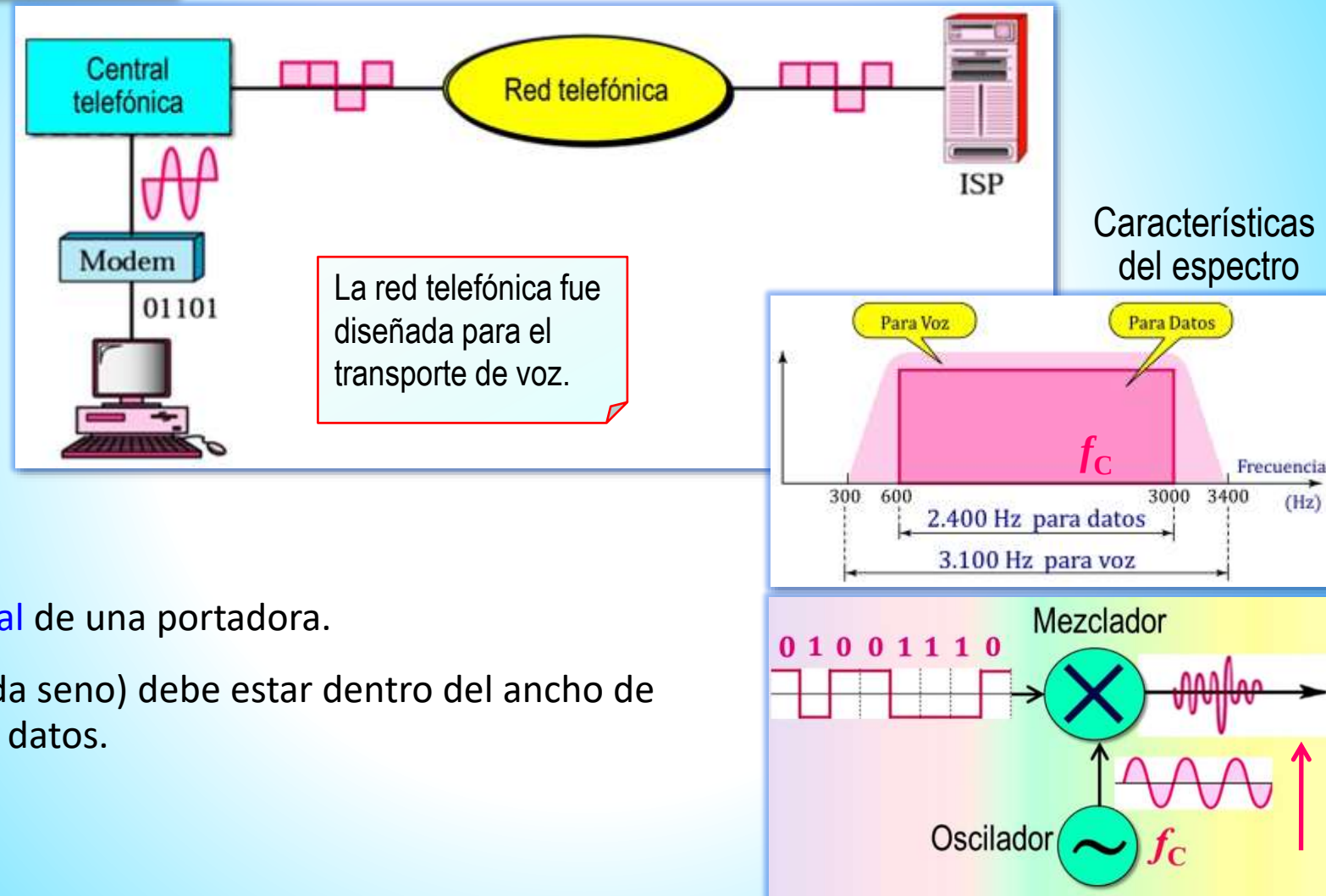
$v(t)$ = voltaje instantáneo, en **V**.
 A = amplitud pico, en **V**.
 f = frecuencia de la onda, en **Hz**.
 θ = fase de la onda, en **radianes**.



Características de la conversión digital a analógica

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Orígenes del acceso a Internet (Forouzan, 2020)



¿Qué técnica se utiliza?

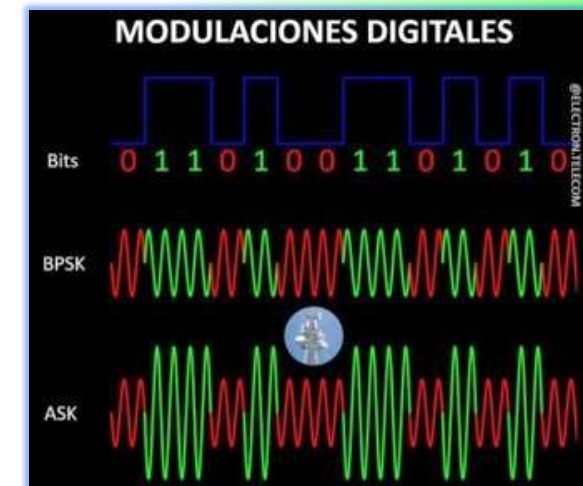
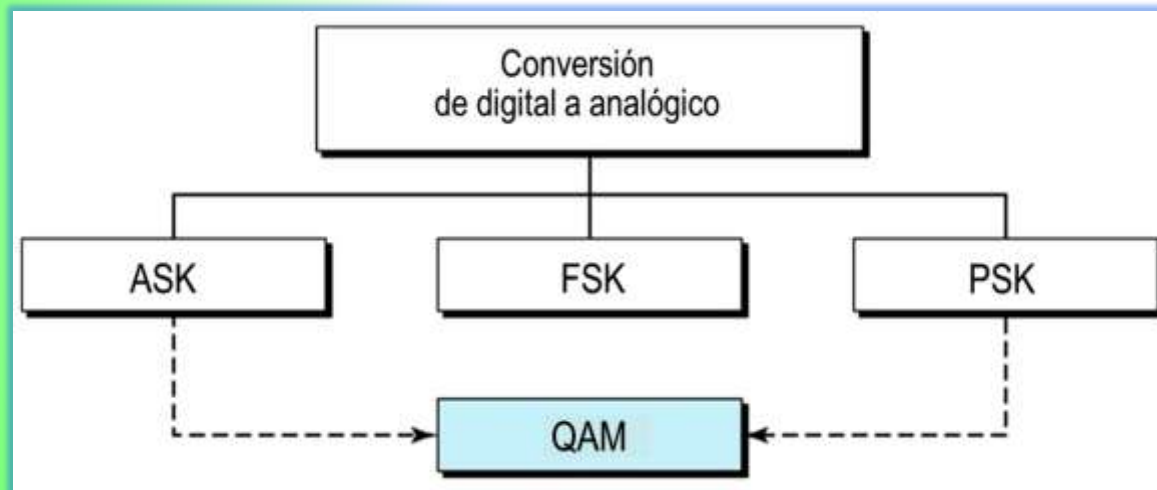
- La modulación digital de una portadora.
- La portadora (la onda seno) debe estar dentro del ancho de banda destinado para datos.

2. ASPECTOS DE LA MODULACIÓN DIGITAL

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Tipos de modulación digital (Forouzan, 2020)

- **Cambiar una característica** de una señal eléctrica sencilla, puede servir para representar datos digitales. Cualquiera de las tres características puede alterarse dando, al menos, tres mecanismos para modular datos digitales en señal analógica: **Modulación por desplazamiento de amplitud** (ASK, *Amplitude Shift keying*), **Modulación por desplazamiento de frecuencia** (FSK, *Frequency Shift keying*) y **Modulación por desplazamiento de fase** (PSK, *Phase Shift Keying*).



- **Además**, hay un cuarto mecanismo (y mejor) que combina cambios en fase y amplitud y que se denomina **modulación de amplitud en cuadratura** (QAM), la cual es la más eficiente de estas opciones y es el mecanismo que se usa todos los módems modernos (véase la figura 5.2).

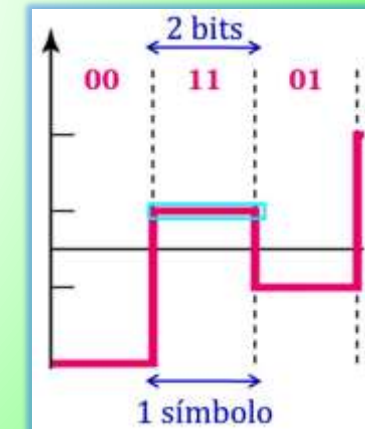
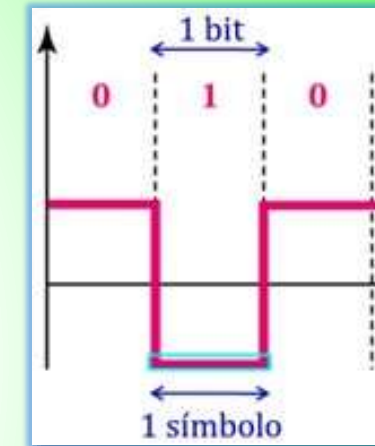
Aspectos de la modulación digital

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Elementos de señal frente a elementos de datos

(Forouzan, 2020)

- **► Elementos de datos.** En las comunicaciones de datos, el objetivo es intercambiar elementos de datos, que son las entidades más pequeñas que pueden representar una pieza de información: [este es el bit](#).
- **► Elementos de señal.** En comunicaciones de datos digitales, un elemento de señal lleva elementos de datos. Un elemento de señal es la unidad más corta (en tiempo) de una señal digital: [este es el símbolo](#).
- **En otras palabras,** los elementos de datos (los bits) son los que se necesitan enviar, los elementos de señal (los símbolos) son los que se pueden enviar. Los bits son transportados; los símbolos (variaciones de voltaje) son los portadores.
- **Se define la tasa r** como el número de bits transportados por cada símbolo.
 - **► Ejemplo 1.** Un bit es transportado por un símbolo ($r = 1$).
 - **► Ejemplo 2.** Un símbolo transporta 2 bits ($r = 2$).



Aspectos de la modulación digital

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Tasa de bits frente a tasa de símbolos

(Forouzan, 2020)

- ► **La tasa de bit** es el número de bits enviados en 1 segundo. Su unidad es el bps.
- ► **La tasa de símbolos** es el número de símbolos enviados en 1 segundo. Su unidad es el símbolos por segundo o Baud.
- **La relación** entre la tasa de bits y la tasa de símbolos se puede expresar así.
- **Existen diferentes terminologías** comunes utilizadas en las publicaciones especializadas.
 - ☒ La **tasa de bit** se denomina en algunas ocasiones tasa de datos, velocidad de datos o velocidad de transmisión.
 - ☒ La **tasa de símbolos** se denomina también **tasa de señal**, **tasa de pulsos**, **tasa de modulación** o **tasa de Baud**.
- **Una analogía** puede ayudar: en transporte un símbolo o un baud es análogo a un automóvil mientras que un bit es análogo a un pasajero. Es necesario maximizar el número de personas por coche para reducir el tráfico.
- ► **Ejemplo 3.** Una señal analógica transporta 4 bits en cada símbolo. Si se envían 1.000 símbolos/s, calcule la tasa de bits.
- ► **Ejemplo 4.** Una señal analógica tiene una tasa de bit 8 kbps y una tasa de símbolos de 1 kbaud. ¿Cuántos bits son transportados por cada símbolo? ¿Cuántos símbolos son necesarios ?

$$\text{Tasa de bits} = \text{Tasa de símbolos} \times r$$

r = número de bits transportados por cada símbolo

4 kbps

8 bits /símbolo

256 símbolos

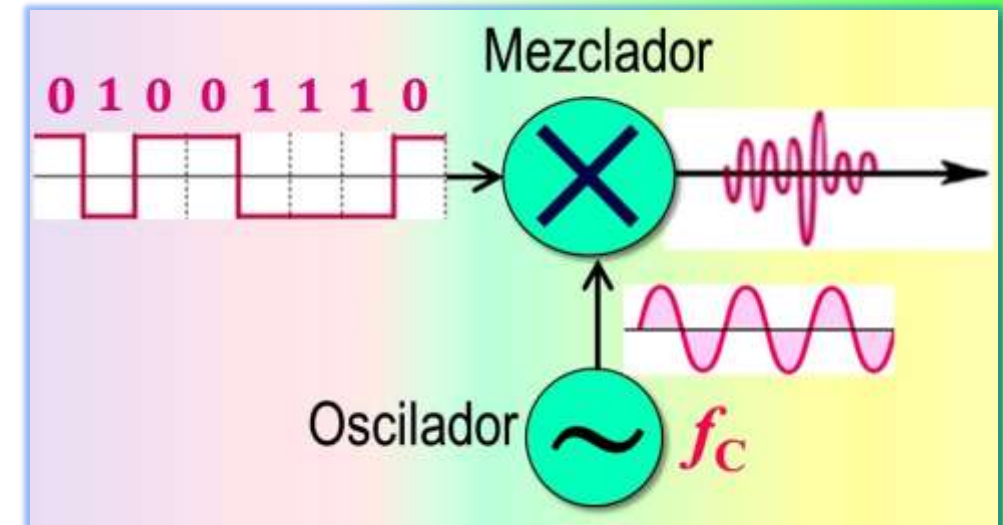
Aspectos de la modulación digital

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Ancho de banda y señal portadora

(Forouzan, 2020)

- ► **El ancho de banda** necesario para la transmisión analógica de una señal digital es proporcional a la tasa de símbolos (tasa de señal), excepto para FSK en la que se debe añadir las diferencias entre las señales portadoras. Se tratará el ancho de banda para cada técnica.
- ► **La señal portadora.** En la transmisión analógica, el oscilador local produce una señal de alta frecuencia que actúa como base para la señal de información. Esta señal base se denomina **señal portadora** o frecuencia portadora (f_c). El dispositivo que la recibe está ajustado para frecuencia de la señal portadora que espera del emisor.
 - ► **La información digital** se modula sobre la señal portadora modificando una o más de sus características (amplitud, frecuencia, fase). Este tipo de modificación se denomina **modulación** (o modulación por desplazamiento o modulación digital).



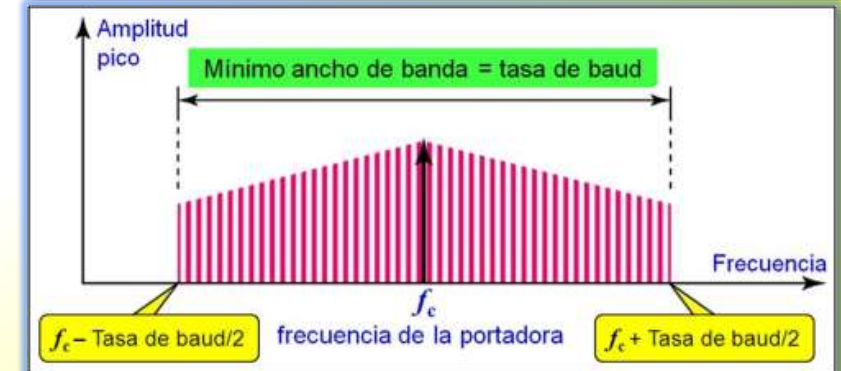
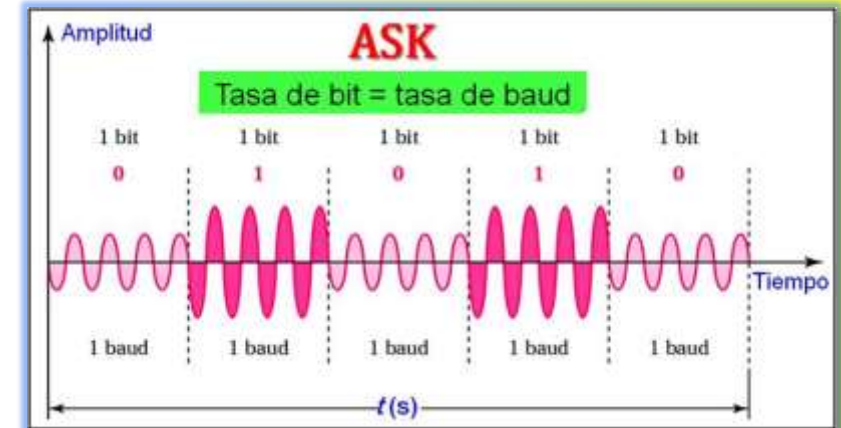
3. MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE AMPLITUD ASK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Visión conceptual de ASK

(Forouzan, 2020)

- **En la modulación ASK**, la amplitud de la señal portadora se cambia para crear símbolos. Tanto la frecuencia como la fase permanecen constantes mientras que la amplitud cambia.
- **ASK binaria**. Se pueden tener varios niveles (tipos) de símbolos, cada uno con distinta amplitud. ASK binario se implementa normalmente usando solo dos niveles.
 - ☒ Es muy común implementar ASK binaria como **modulación on-off**, donde la amplitud pico de un símbolo 0; el otro es el mismo que la amplitud de la frecuencia portada.
- **Ancho de banda para ASK**. Aunque la señal portadora es solo una onda seno simple, el proceso de modulación produce una señal compuesta aperiódica que tiene un conjunto de frecuencias continuo. Como se espera, el ancho de banda (B) es proporcional a la tasa de símbolos.
- **Sin embargo**, hay otro factor dependiente del proceso de modulación que hará que el ancho de banda (B) necesario tenga un valor mínimo y uno máximo. El aspecto más importante aquí es la localización del ancho de banda.
- **La mitad del ancho de banda** se encuentra en f_c , donde se sitúa la **frecuencia portadora**. Esto significa que si hay disponible un canal paso banda, se puede elegir f_c de forma que la señal modulada ocupe el ancho de banda.
 - ☒ Se puede desplazar el ancho de banda (B) disponible para usar lo que esté disponible.



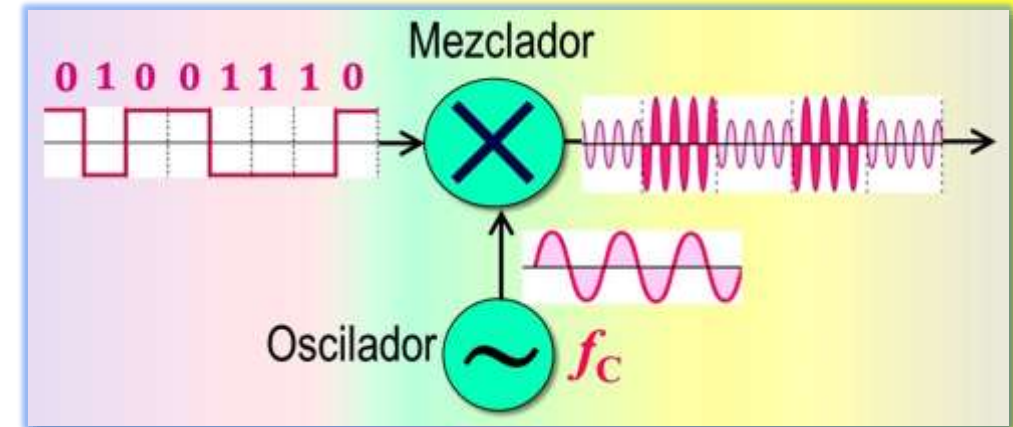
Modulación por desplazamiento de amplitud ASK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Implementación de ASK

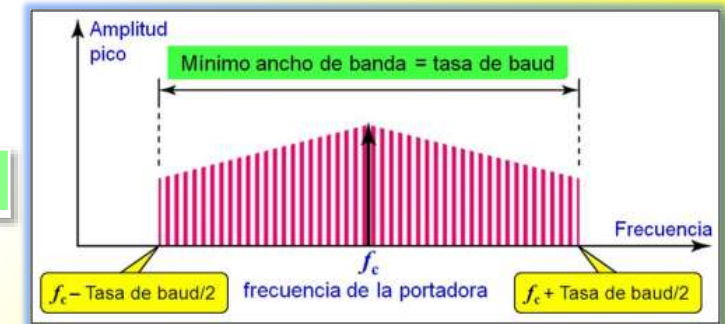
(Forouzan, 2020)

- La figura muestra cómo se puede implementar el ASK binarios de forma sencilla.
 - Si los datos digitales se presentan como una señal digital NRZ polar con dos niveles de amplitud de voltaje, la implementación se puede llevar a cabo multiplicando la señal digital NRZ por la señal portadora que viene de un oscilador.
 - Cuando la amplitud de la señal NRZ es negativa (1), la amplitud de la frecuencia portadora se mantiene.
 - Cuando la amplitud de la señal NRZ es positiva (0) la amplitud de la frecuencia portadora disminuye o se hace 0.
- Ejemplo 5.** Sea un ancho de banda (B) disponible de 100 kHz que se extiende entre 200 y 300 kHz, ¿Cuál es la frecuencia portadora y la tasa de bits si se modulan los datos usando ASK binario?



$$f_c = 250 \text{ kHz}$$

$$\text{Tasa de bits} = 100 \text{ kbps}$$



Modulación por desplazamiento de amplitud ASK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Ejemplos de ASK

(Forouzan, 2020)

- **Ejemplo 6.** Dado un ancho de banda (B) de 5 kHz para una señal ASK, ¿Cuál es la tasa de símbolos y la tasa de bits?

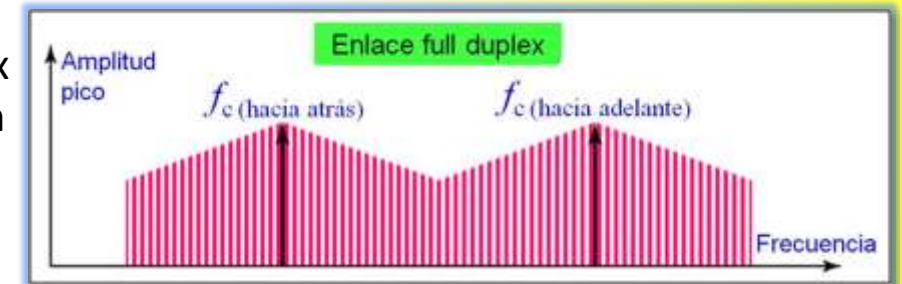
Tasa de símbolos = 5 ksim/s

Tasa de bits = 5 kbps

- **Ejemplo 7.** Calcule el ancho de banda (B) mínimo para una señal ASK que se transmite a 2 kbps. El modo de transmisión es half-dúplex.

B = 2 kHz

- **Enlaces full-duplex.** En transmisión de datos, se pueden usar enlaces full-duplex con comunicación en ambos sentidos. Es necesario dividir el ancho de banda en dos frecuencias portadoras. La figura muestra las posiciones de dos frecuencias portadoras y los anchos de banda.

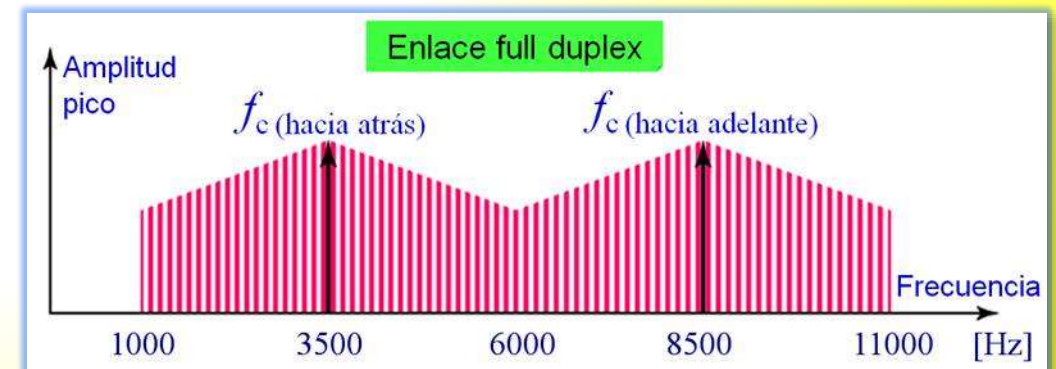


- **Ejemplo 8.** Dado un ancho de banda de 10 kHz (1 a 11 kHz), dibuje el diagrama para una señal ASK full-dúplex. Calcule los anchos de banda, las portadoras y la tasa de bits en cada dirección. Asuma que no hay intervalos entre bandas de ambas direcciones.

Anchos de banda = 5 kHz

$f_c = 3,5$ kHz y 8,5 kHz

Tasa de bits = 5 kbps



3. MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA FSK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

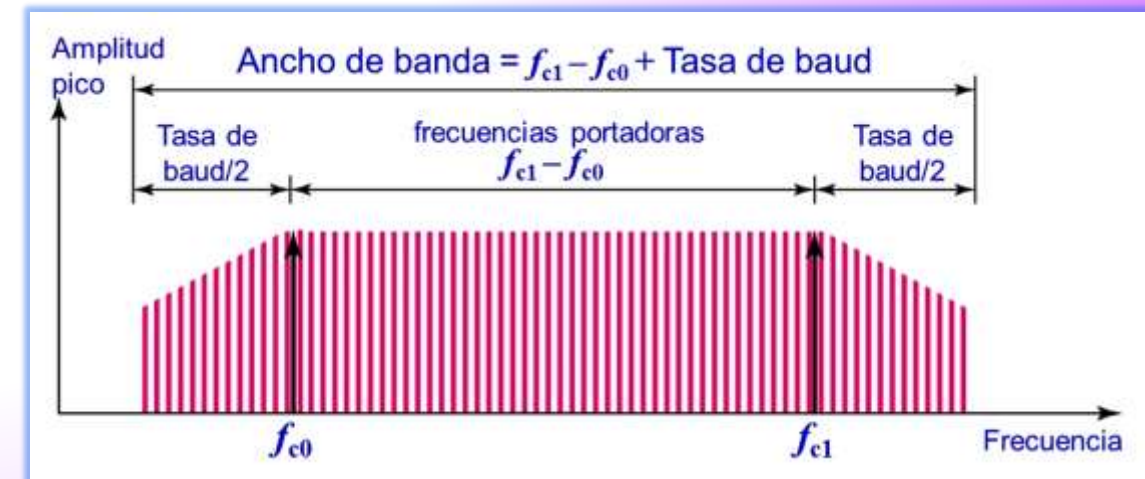
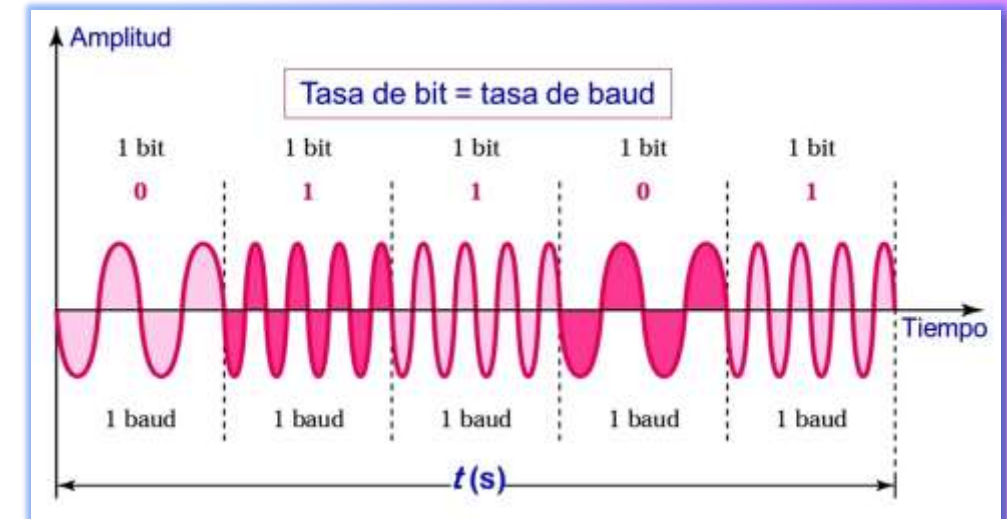
Visión conceptual de FSK

(Forouzan, 2020)

- **En la modulación FSK**, la frecuencia de la señal portadora cambia para representar los datos. La frecuencia de la señal modulada durante la duración de un símbolo es constante, pero cambia para el símbolo siguiente si el bit cambia. Tanto la amplitud pico como la fase permanecen constantes para todos los símbolos.
- **FSK binaria.** Una forma de pensar en FSK binaria es considerar dos frecuencias portadoras f_{c0} y f_{c1} . Se usa la primera si el bit es 0: la segunda si el bit es 1.
- **Ancho de banda para FSK.** De nuevo, las señales portadoras son ondas seno simple, pero la modulación crea una señal aperiódica compuesta con frecuencias continuas. Se puede pensar en FSK como en dos señales ASK, cada una con sus frecuencias portadoras f_{c0} y f_{c1} , por tanto, el ancho de banda mínimo es la diferencia entre ambas frecuencia portadoras mas la tasa de Baud.
- **Ejemplo 9.** Dado un ancho de banda disponibles de 100 kHz que se extiende entre 200 y 300 kHz ¿Cuál es la frecuencia portadora y la tasa de bits se se modulan los datos usando FSK y se elige que la diferencia entre portadoras esnde 50 kHz ?

$$f_c = 250 \text{ kHz}$$

$$\text{Tasa de bits} = 50 \text{ kbps}$$



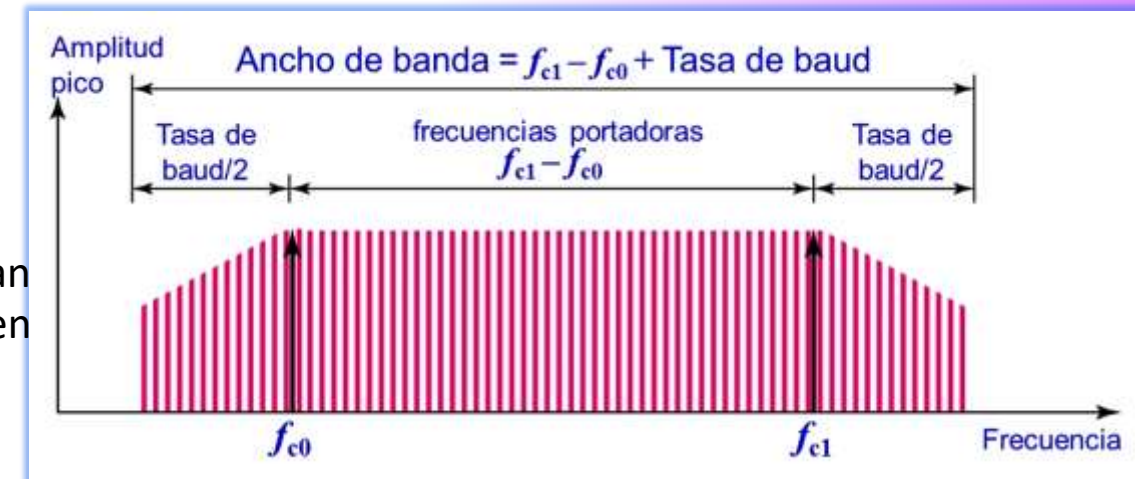
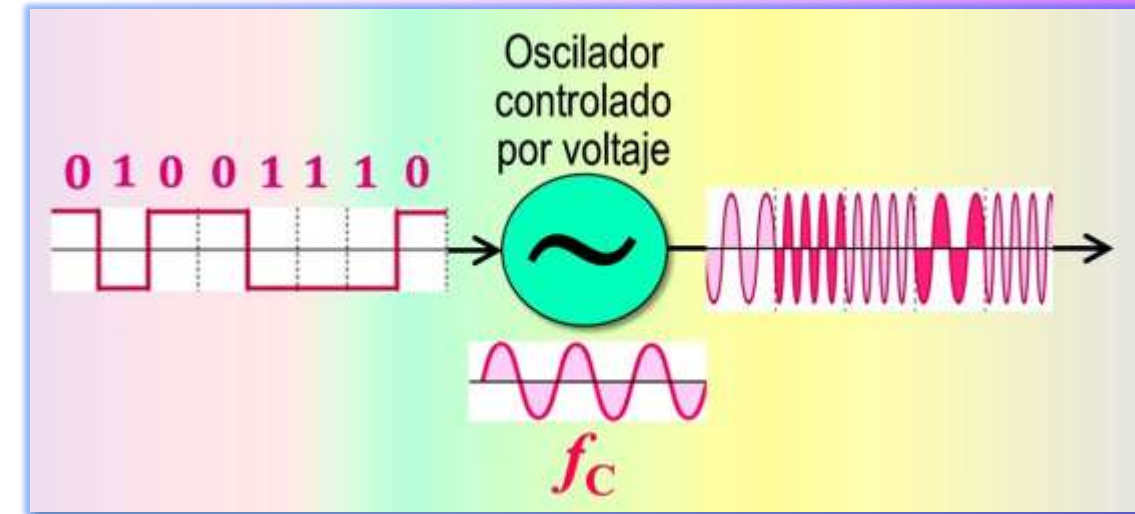
3. MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA FSK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Implementación de FSK

(Forouzan, 2020)

- La **modulación FSK** se puede implementar usando un oscilador controlado por voltaje que cambia su frecuencia según el voltaje de entrada. La entrada al oscilador es una señal polar NRZ polar.
 - ► Cuando la **amplitud** de NRZ es negativa, el oscilador mantiene su frecuencia regular.
 - ► Cuando la **amplitud** de NRZ es positiva, se incrementa la frecuencia.
- **FSK multinivel.** Se puede usar más de dos frecuencias. Por ejemplo, se pueden usar cuatro frecuencias distintas f_1, f_2, f_3, f_4 , para enviar 2 bits al mismo tiempo. Para enviar 3 bits al mismo tiempo, se pueden usar ocho frecuencias, y así sucesivamente.
 - ☒ Sin embargo, es necesario recordar que las frecuencias necesitan estar separadas para que el modulador y el demodulador funcionen adecuadamente.
- **Se tiene que tener** en cuenta que la FSK necesita más ancho de banda que las otras técnicas, en especial la FSK multinivel; esta última es útil cuando el ruido es un aspecto relevante.



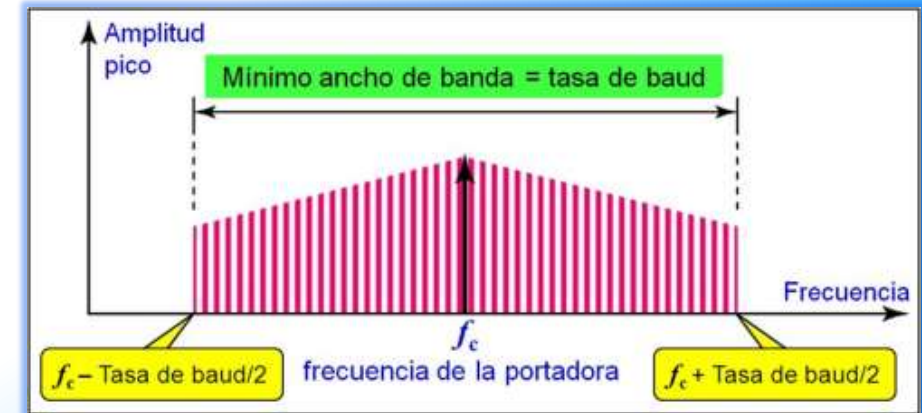
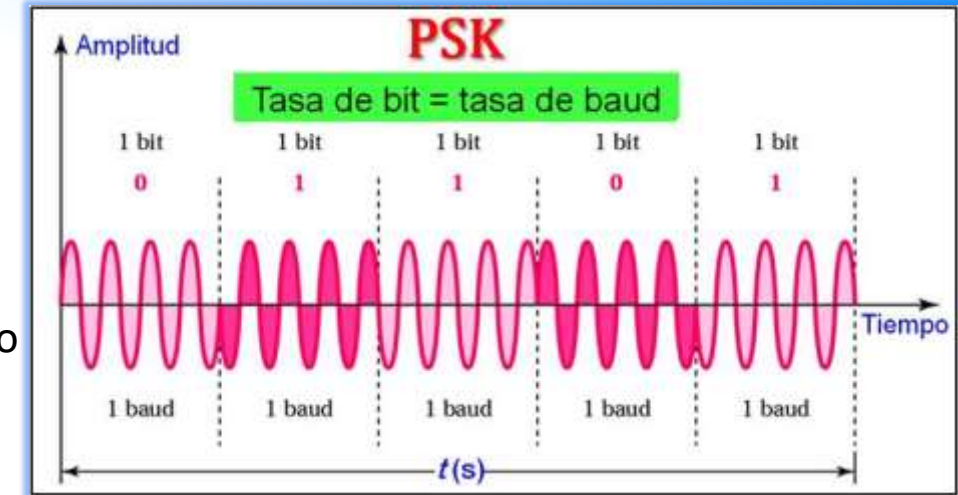
4. MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE PSK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Visión conceptual de PSK

(Forouzan, 2020)

- En la **modulación PSK**, la fase de la portadora cambia para representar dos o más símbolos. Tanto la amplitud pico como la frecuencia permanecen constantes mientras la fase cambia.
- **Actualmente PSK** es más frecuente que ASK o FSK. Sin embargo, QAM, que combina ASK y PSK, es el método dominante de conversión de digital analógico.
- **PSK binaria** (BPSK). Es la más simple, en la que solo hay dos símbolos, uno con una fase de 0° y otro con una fase de 180° . La figura da una visión conceptual de PSK.
- La **PSK binaria** es tan sencilla como la ASK binaria con una gran ventaja: es menos susceptible al ruido. En ASK el criterio para detectar un bit es la amplitud de la señal; en PSK es la fase. El ruido puede cambiar la amplitud más fácilmente de lo que puede cambiar la fase. Por otro lado, PSK es superior a la FSK por que no se necesita tener dos señales portadoras.
- **Ancho de banda de BPSK**. El ancho de banda es el mismo que para la ASK binaria.



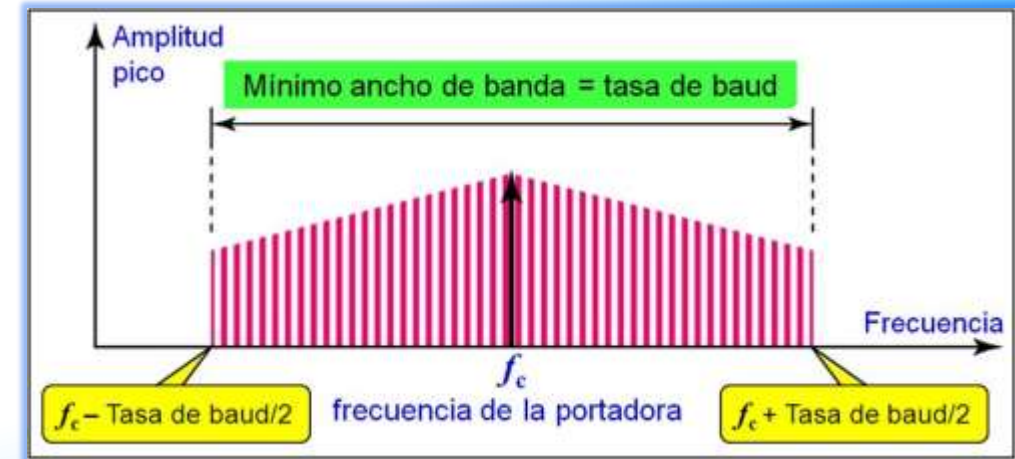
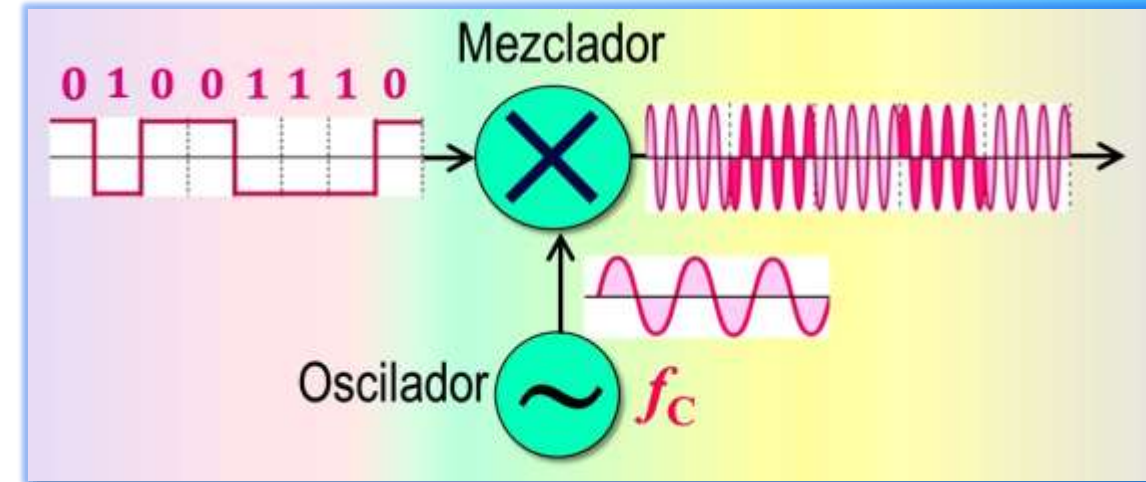
Modulación por desplazamiento de fase PSK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Implementación de BPSK

(Forouzan, 2020)

- La **implementación de BPSK** es tan sencilla como la de ASK. La razón es que el símbolo con fase 180° se puede ver como el complemento del símbolo con fase 0° . Esto da una pista de la forma de implementar BPSK.
- Se usa la misma idea que para ASK, con una señal NRZ polar que se multiplica por la frecuencia de la portadora:
- El bit 0 (voltaje positivo) se representa con una fase que empieza en 0° .
- El bit 1 (voltaje negativo) se representa con una fase que empieza en 180° .



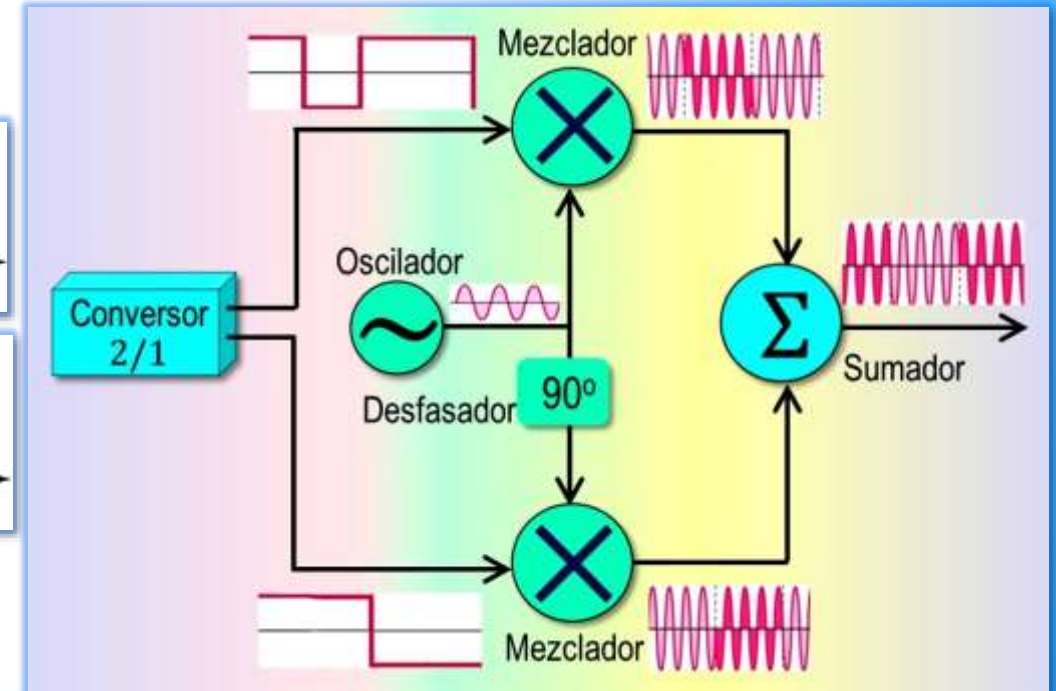
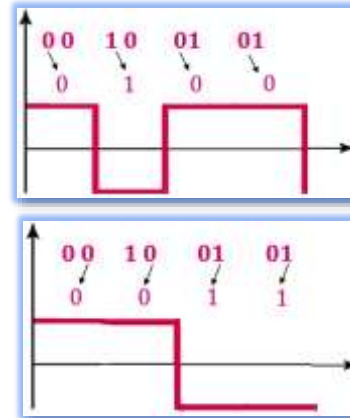
Modulación por desplazamiento de fase PSK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

PSK en cuadratura: QPSK

(Forouzan, 2020)

- La sencillez de BPSK llevo a los diseñadores a usar 2 bits simultáneamente en cada símbolo, disminuyendo de esta forma la tasa de baudios y el ancho de banda necesario. Este esquema se denomina PSK en cuadratura o QPSK, porque usa dos modulaciones BPSK separadas; una es en la en-fase, la otra la cuadratura (desfasada).
- Los bits que llegan se pasan primero a través de una conversión serie paralela que envía un bit a un modulador y el siguiente bits al otro.
- Si la duración de cada bit en la señal entrante es T ; la duración de cada bit enviado a la correspondiente señal BPSK es $2T$. Esto significa que el bit de cada señal BPSK tiene la mitad de la frecuencia de la señal original.
- Las dos señales compuestas creadas por cada mezclador son ondas seno con la misma frecuencia, pero con fases distintas.
- Cuando se suman, el resultado es otra onda seno, con una de las cuatro posibles de las fases siguientes: 45° , -45° , 135° y -135° .
- Hay cuatro tipos de símbolos, de forma que se pueden enviar 2 bits por símbolo.



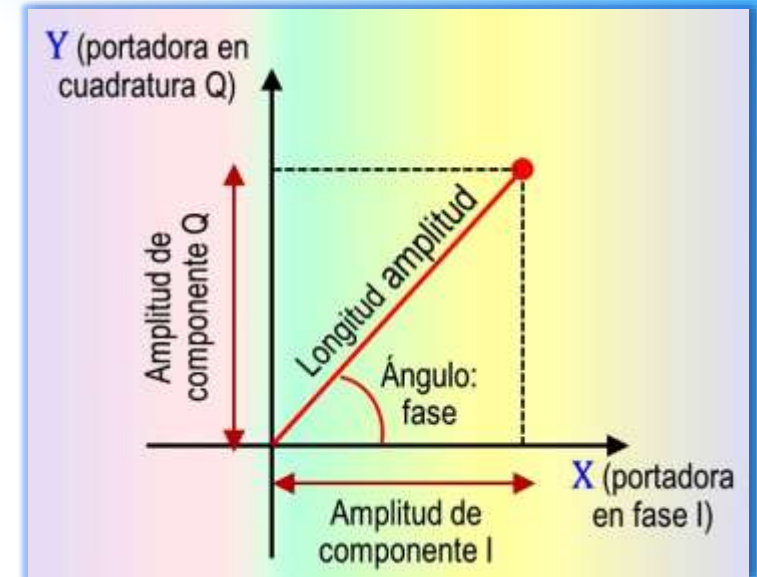
Modulación por desplazamiento de fase PSK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Diagrama de constelación

(Forouzan, 2020)

- **Un diagrama de constelación** ayuda a definir la amplitud y la fase de un símbolo, particularmente cuando se usan dos portadoras (una fase y otra en cuadratura). El diagrama es útil cuando se trabaja con ASK, PSK o QAM multinivel.
- **El símbolo** se representa como un punto. El bit o la combinación de bits que puede transportar se escribe a menudo junto a él. EL diagrama tiene dos ejes.
 - ► El eje horizontal **X** está relacionado con la portadora en fase (I).
 - ► El eje vertical **Y** está relacionado con la portadora en cuadratura (Q).
- **Para cada punto** del diagrama se pueden deducir cuatro piezas e información: .
 - ► **1. La proyección del punto** sobre el eje X define la amplitud pico del componente en-fase (I).
 - ► **2. La proyección del punto** sobre el eje Y define la amplitud pico del componente en cuadratura (Q).
 - ► **3. La longitud de la línea** (vector) que conecta el punto al origen es la amplitud pico del símbolo (combinación de los componentes X e Y).
 - ► **4. El ángulo** que hace la línea con el eje X es la fase del símbolo. Toda la información necesaria se puede encontrar fácilmente en un diagrama en constelación.



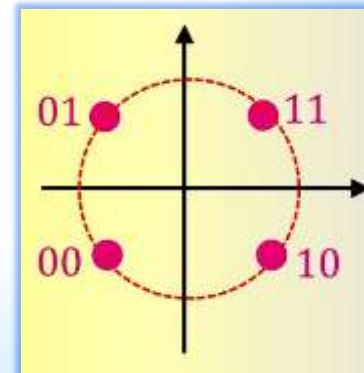
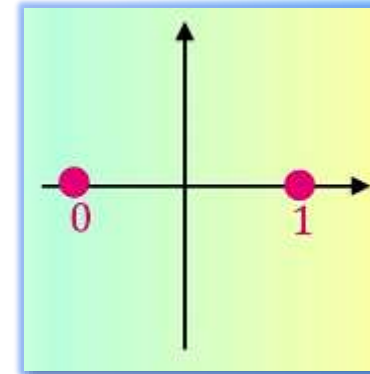
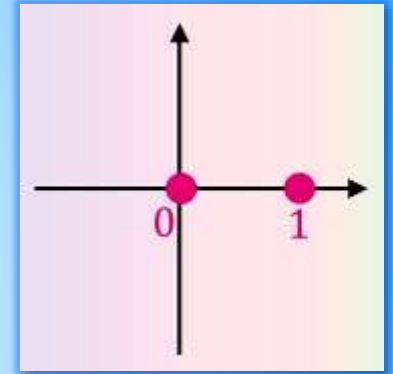
Modulación por desplazamiento de fase PSK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Constelaciones PSK

(Forouzan, 2020)

- ► **Ejemplo 10.** Muestre los diagramas de constelación para señales ASK (OOK), BPSK y QPSK.
- ► **ASK (OOK).** Para ASK se usa solo una portadora en fase, además los dos puntos deberían estar en el eje X. El 0 binario tiene una amplitud de 0 V; el 1 binario tiene una amplitud de 1 V (por ejemplo). Los puntos se localizan en el origen y en la unidad **1**.
- ► **BPSK.** BPSK solo usa también una portadora en fase. Sin embargo, se usa una señal NRZ polar para la modulación. Crea dos tipos de símbolos, uno con amplitud **1** y otro con amplitud **-1**. En otras palabras, BPSK crea dos símbolos distintos, uno con amplitud 1 V y en fase y el otro con amplitud 1 V desfasado 180°.
- ► **QPSK.** QPSK usa dos portadoras, una en fase y la otra de cuadratura. El punto **11** está formado por dos símbolos combinados, ambos con amplitud de 1 V. Un símbolo se representa por la portadora en fase y la otra por la portadora en cuadratura. La amplitud del elemento final de señal enviado para este elemento de 2 bits es $2^{1/2}$ y la fase es de 45°. El argumento es similar para los otros tres puntos. Todos los elementos de señal tienen una amplitud de $2^{1/2}$, pero sus fases son distintas (45°, -45°, 135° y -135°). Por supuesto, se podría haber elegido que la amplitud de la portadora fuera $1/(2^{1/2})$ para hacer las amplitudes finales de 1 V.



Modulación por desplazamiento de fase PSK

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Ejemplos de PSK

(Forouzan, 2020)

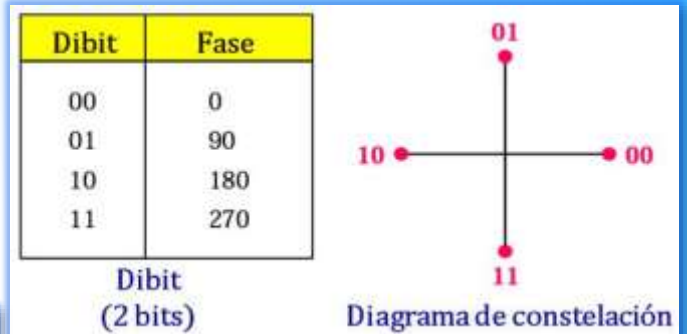
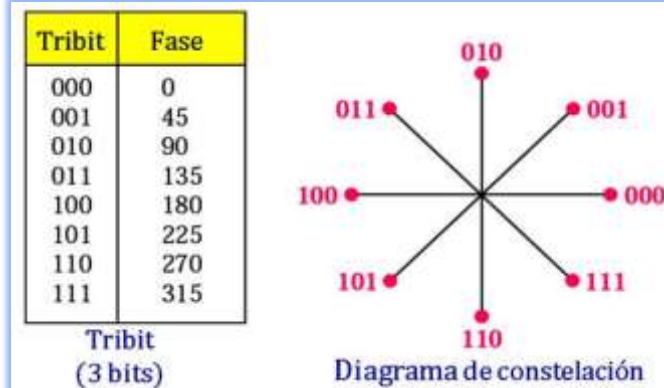
- **Ejemplo 11.** Halle el ancho de banda de una señal que se trasmite a 12 Mbps para QPSK.
- **Ejemplo 12.** Calcule el ancho de banda mínimo para una señal 4PSK (QPSK) que se transmite a 2 kbps. El modo de transmisión es half-duplex. Dibuje el diagrama de constelación.

En QPSK se transportan 2 bits en cada símbolo, por tanto $B = 6 \text{ MHz}$

En QPSK se transportan 2 bits en cada símbolo, por tanto $B = 1 \text{ kHz}$

- **Ejemplo 13.** Dado un ancho de banda disponible de 5 kHz para una señal 8PSK, calcule la tasa de símbolos Baud y la tasa de bits.

En 8PSK se transportan 3 bits en cada símbolo, por tanto la tasa de símbolos de 5 kBd y la tasa de bits es 15 kbps



- **Ejemplo 14.** Un diagrama de constelación está formado por 8 puntos igualmente espaciados, separados 45° sobre un círculo. Si la tasa de bit es 4,8 kbps, ¿cuál es la tasa de símbolos?

Tasa de símbolos = 1,6 kBd

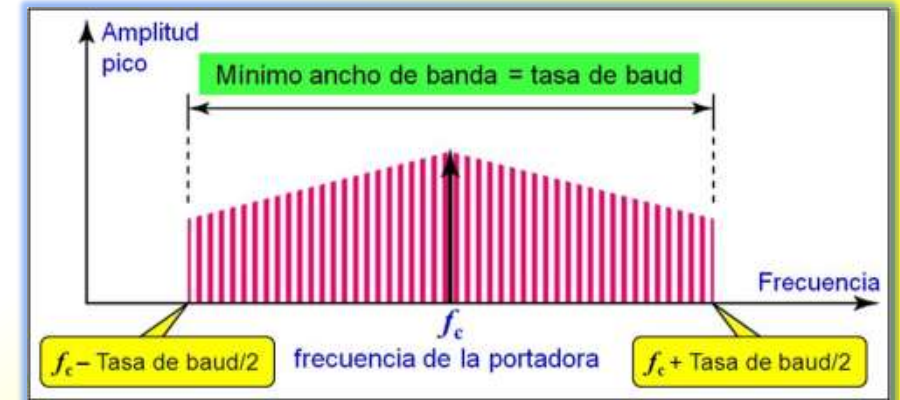
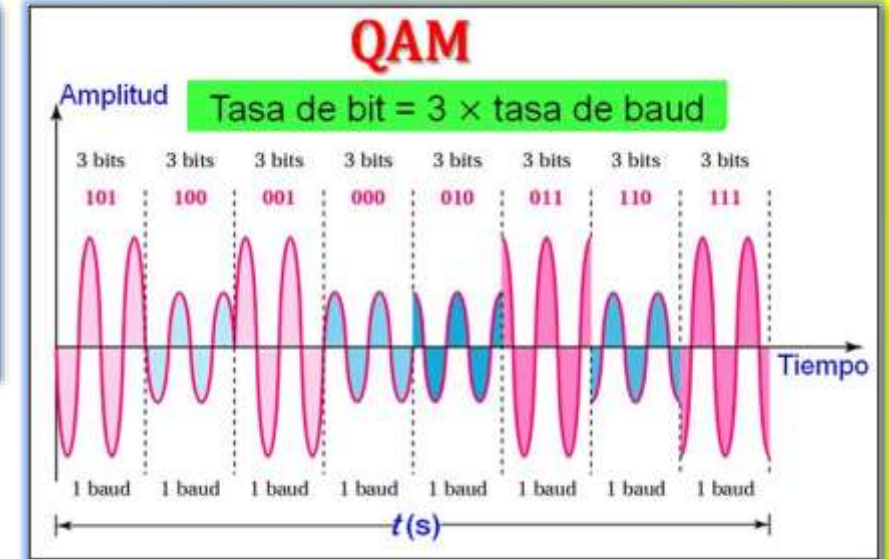
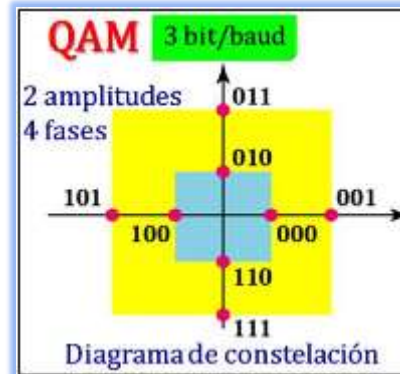
4. MODULACIÓN DE AMPLITUD EN CUADRATURA QAM

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Visión conceptual de QAM

(Forouzan, 2020)

- **PSK está limitado** por la habilidad de los equipos de distinguir pequeñas diferencias en fase. Este factor limita su tasa de bits potencial. Hasta ahora, se han ido alterando únicamente las tres características de una onda seno una cada vez, pero ¿qué pasa si se alteran dos? ¿Por qué no combinar ASK y PSK?
- **La idea** de usar dos portadoras, una en fase y otra en cuadratura, con distintos niveles de amplitud para cada portadora es el concepto que subyace tras la **Modulación de amplitud en cuadratura (QAM)**.
- **Ejemplo 15.** Un esquema de modulación QAM tiene el diagrama de constelación mostrado en la figura.
- **El ancho de banda** mínimo necesario para una transmisión QAM es el mismo que es necesario para transmisión ASK y PSK. QAM tiene las mismas ventajas que PSK sobre ASK



Modulación de amplitud en cuadratura QAM

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

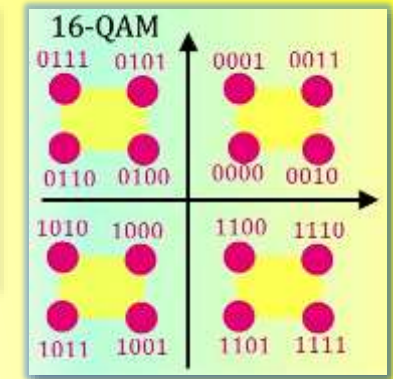
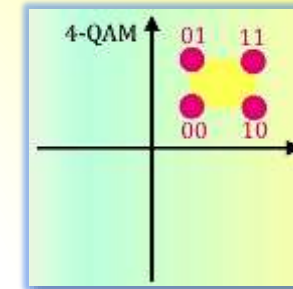
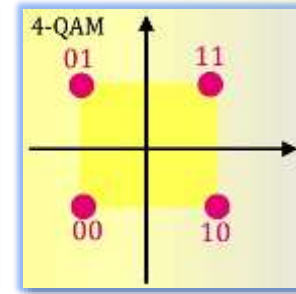
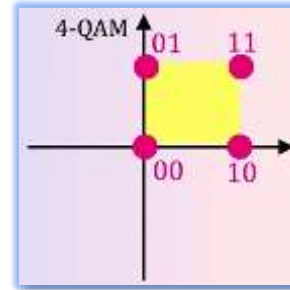
Constelaciones de QAM

(Forouzan, 2020)

- Las **variaciones posibles** QAM son numerosas.

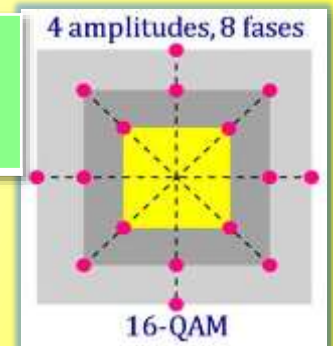
Algunos de estos esquema son:

- **4-QAM** sencillo: cuatro tipos distintos de símbolos usando una señal NRZ unipolar para modular cada portadora. Este es el mecanismo usado por ASK (OOK).
- **4-QAM** usando NRZ polar, pero esto es exactamente igual a QPSK.
- **4-QAM** en el que se ha usado una señal son dos niveles positivos para modular cada una de las portadoras.
- **Finalmente**, la constelación 16-QAM de una señal con ocho niveles, cuatro positivos y cuatro negativos.
- **Ejemplo 16.** Calcule la tasa de bit para una señal 16-QAM de 1 kBd.
- **Ejemplo 17.** Calcule la tasa de símbolos para una señal 64-QAM de 72 kbps.



En 16-QAM se transportan 4 bits en cada símbolo, por tanto la tasa de bits es 4 kbps.

En 64-QAM se transportan 6 bits en cada símbolo, por tanto la tasa de símbolos es 12 kBd.



Modulación de amplitud en cuadratura QAM

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Ejemplos de QAM

(Forouzan, 2020)

- **Ejemplo 18.** La línea telefónica tiene un ancho de banda de 4kHz. ¿Cuál es el máximo número de bits que se pueden enviar usando cada una de las técnicas siguientes? **a)** ASK, **b)** QPSK, **c)** 16-QAM, **d)** 64-QAM.

a) 4 kbps

b) 8 kbps

b) 16 kbps

b) 24 kbps

- **Ejemplo 19.** Una corporación tiene un medio de transmisión con un ancho de banda de 1 MHz (paso baja). La corporación necesita crear 10 canales independientes separados, cada uno de los cuales debe ser capaz de enviar al menos 1 Mbps. La compañía ha decidido usar tecnología QAM.

a) ¿Cuál es el mínimo número de bits por símbolo para cada canal?

b) ¿Cuál es el número de puntos en el diagrama de constelación para cada canal?

Cada canal tiene un $B = 0,1$ MHz, o sea su tasa de símbolos es 0,1 MBd. Por tanto, para una tasa de bits de 1 Mbps, se requieren 10 bits/símbolo.

Si se tienen 10 bits/símbolo, entonces la cantidad de símbolos o de puntos en el diagrama de constelación es $2^{10} = 1024$.

- **Ejemplo 20.** Una compañía de cable usa uno de los canales de TV por cable (con un ancho de banda de 6 MHz) para proporcionar comunicaciones digitales a cada residente. ¿Cuál es la velocidad disponible para cada residente si la compañía usa la técnica 64-QAM?

En 64-QAM se transportan 6 bits en cada símbolo, la tasa de símbolos es 6 MBd, por tanto la tasa de bits es 36 Mbps.

Referencias bibliográficas

CONVERSIÓN DIGITAL A ANALÓGICA

Referencias bibliográficas

- Blake, Roy (2012). *Electronic Communication Systems*. Cengale, India: Thomson
- CISCO (2015). *CCNA Routing and Switching. Introduction to Networks*. CISCO.
- CISCO (2016). *Introducción a las redes*. Madrid: Pearson Education, S.A.
- Forouzan, B. A. (2020). *Transmisión de datos y redes de comunicaciones*. Madrid: McGraw-Hill.
- Huawei Technologies (2020). *Basics of data communication networks*. Huawei.
- Kurose, J. Keith, R. (2017). *Redes de computadoras: un enfoque descendente*. Madrid: Pearson Education, S.A.

FIN

Tema 7 de:
TRANSMISIÓN DE DATOS
Edison Coimbra G.