



Modulaciones Digitales

Agostini, Emiliano S.

Departamento de Ingeniería Electrónica,
Facultad Regional San Francisco, Córdoba, Argentina.

Cabrera, Mauricio

Departamento de Ingeniería Electrónica,
Facultad Regional San Francisco, Córdoba, Argentina.

Cortesse, Agustín

Departamento de Ingeniería Electrónica,
Facultad Regional San Francisco, Córdoba, Argentina.

Gandino, Matias

Departamento de Ingeniería Electrónica,
Facultad Regional San Francisco, Córdoba, Argentina.

Griglio, Tomás

Departamento de Ingeniería Electrónica,
Facultad Regional San Francisco, Córdoba, Argentina.

Maggi, Santiago

Departamento de Ingeniería Electrónica,
Facultad Regional San Francisco, Córdoba, Argentina.

Perez, Mariano

Departamento de Ingeniería Electrónica,
Facultad Regional San Francisco, Córdoba, Argentina.



Índice

1. Introducción	3
1.1. Modulaciones Digitales	3
1.2. Concepto de símbolo, tasa de bits y ancho de banda	4
2. DESARROLLO	5
2.1. Modulación FSK (Frequency Shift Keying)	5
2.2. Modulación PSK (Phase Shift Keying)	6
2.3. Modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying)	6
2.4. Modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)	7
2.5. Modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation)	8
2.6. Modulación 16-QAM	8
3. CONCLUSIONES	9



1. Introducción

1.1. Modulaciones Digitales

La modulación digital es una técnica que permite transmitir información binaria, o sea, unos y ceros, a través de señales analógicas como ondas senoidales.

Lo que se hace es modificar alguna característica de la señal portadora (amplitud, frecuencia o fase) según los bits que se quieren enviar.

A diferencia de la modulación analógica, en la digital las variaciones no son continuas, sino que solo pueden tomar valores fijos o discretos, llamados niveles.

Estas técnicas comenzaron a usarse en la telegrafía, pero se hicieron muy importantes a partir de los años 70 y 80 con la llegada de los sistemas digitales y las comunicaciones inalámbricas.

Hoy, la modulación digital es la base de tecnologías modernas como Wi-Fi, LTE, 5G y televisión digital.

Entre las técnicas más elementales se destacan:

- **ASK (Amplitude Shift Keying):** cambia la amplitud de la señal portadora dependiendo del bit transmitido. Es una de las formas más simples de modulación digital.
- **FSK (Frequency Shift Keying):** representa los bits mediante cambios en la frecuencia de la portadora; por ejemplo, una frecuencia para el 0 y otra para el 1.
- **PSK (Phase Shift Keying):** los bits se codifican modificando la fase de la portadora.
- **BPSK (Binary PSK):** es la versión más simple del PSK. Usa dos fases posibles, 0° y 180° , por lo que transmite un bit por símbolo.
- **QPSK (Quadrature PSK):** utiliza cuatro fases separadas 90° , lo que permite transmitir dos bits por símbolo, duplicando la eficiencia de BPSK.
- **QAM (Quadrature Amplitude Modulation):** combina cambios de amplitud y de fase al mismo tiempo, lo que permite enviar más información en cada símbolo.
- **16-QAM:** es una versión de QAM con 16 combinaciones posibles de amplitud y fase, lo que equivale a 4 bits por símbolo.



- **M-PSK:** es una versión general de PSK donde se usan muchas fases distintas (M) para representar varios bits por símbolo. Cuantos más niveles se usan, más eficiente es la transmisión, pero también más sensible al ruido.

1.2. Concepto de símbolo, tasa de bits y ancho de banda

En los sistemas digitales, cada grupo de bits que modula un estado particular de la portadora se denomina símbolo (S).

De este modo, se distingue entre:

- **Tasa de bits (R_b):** cantidad de bits transmitidos por segundo.
- **Tasa de símbolos (R_s):** cantidad de símbolos transmitidos por segundo (baudios).

Ambas magnitudes están relacionadas por la expresión a continuación donde M es el número de estados o símbolos posibles de la modulación.

$$R_b = R_s \cdot \log_2(M)$$

El ancho de banda ocupado (BW) es el rango de frecuencias que la señal modulada necesita para transmitirse sin distorsión ni solapamiento entre símbolos. A partir de la fórmula de Hartley, se establece la relación general:

$$R_b = 2 \cdot BW \cdot \log_2(M)$$

De la cual se deduce:

$$BW = \frac{R_b}{2 \cdot \log_2(M)}$$

Esta expresión demuestra que a mayor número de niveles M , es posible transmitir más bits por símbolo y, por ende, reducir el ancho de banda necesario para una misma tasa de datos, incrementando la eficiencia espectral del sistema.

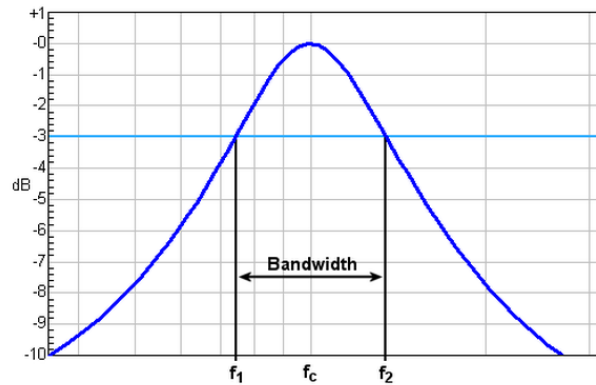


Figura 1: Ancho de banda.

2. DESARROLLO

2.1. Modulación FSK (Frequency Shift Keying)

La **modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)** transmite información digital variando la **frecuencia de la portadora** entre varios valores discretos según el bit o símbolo a enviar. La amplitud y la fase se mantienen constantes, por lo que sólo cambia la frecuencia de la señal:

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_i t), \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Dentro de esta técnica existen distintas variantes:

- **BFSK (Binary FSK):** usa sólo dos frecuencias (f_1 y f_2) para representar los bits 0 y 1.
- **M-FSK:** emplea varias frecuencias posibles ($M > 2$), donde cada frecuencia representa un símbolo de varios bits.

El ancho de banda ocupado depende del número de frecuencias utilizadas. Para el caso binario (BFSK), se aproxima por:

$$BW \approx 2\Delta f + R_b$$

FSK ofrece buena inmunidad al ruido, aunque requiere más ancho de banda que PSK o QAM. Se utiliza en enlaces de baja velocidad como Bluetooth, telemetría y módems. En esta modulación, la tasa de bits (R_b) indica la cantidad de bits transmitidos por segundo y, en el caso binario (BFSK), coincide con la tasa de símbolos (R_s), ya que cada frecuencia representa un solo bit.

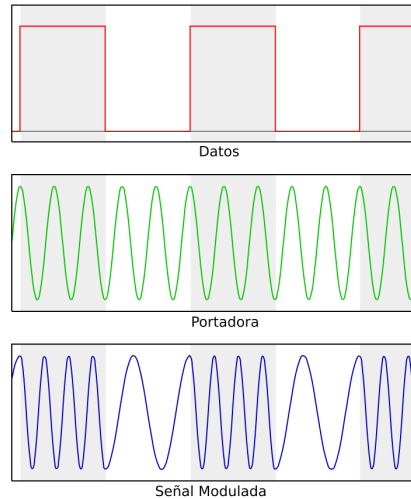


Figura 2: Modulación por desplazamiento de frecuencia.

2.2. Modulación PSK (Phase Shift Keying)

La **modulación por desplazamiento de fase (PSK)** codifica los bits modificando la **fase de la portadora**, manteniendo constante su amplitud y frecuencia. Cada estado de fase representa un símbolo binario:

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \phi_i)$$

donde ϕ_i toma valores discretos (por ejemplo, 0 y π en la versión binaria).

La relación general entre la tasa de bits y la tasa de símbolos es:

$$R_b = R_s \cdot \log_2(M)$$

y el ancho de banda mínimo requerido:

$$BW \approx R_s = \frac{R_b}{\log_2(M)}$$

PSK ofrece buena eficiencia espectral, aunque es sensible a errores de fase. Su desempeño y complejidad dependen del número de fases (M) utilizadas, ya que a mayor cantidad de fases se transmiten más bits por símbolo, pero también aumenta la sensibilidad al ruido y los errores de sincronización.

2.3. Modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying)

La **BPSK** es la forma más simple de la modulación por desplazamiento de fase, utilizando dos fases: 0° para el bit “1” y 180° para el bit “0”. Su



señal se define como:

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \pi b(t))$$

donde $b(t)$ representa la señal binaria modulante.

El ancho de banda de la modulación BPSK puede expresarse de dos formas. Teóricamente, el ancho mínimo necesario para transmitir la información sin interferencia entre símbolos es:

$$BW \approx R_b$$

Sin embargo, considerando el espectro real de la señal (ancho de banda de nulo a nulo), el valor se duplica:

$$BW_{nn} \approx 2R_b$$

donde R_b es la tasa de bits. Esta última expresión representa de manera más precisa el ancho de banda ocupado en un sistema físico, ya que incluye los lóbulos laterales de la señal BPSK.

En consecuencia, BPSK presenta alta inmunidad al ruido y se utiliza en sistemas donde la fiabilidad es prioritaria, como enlaces espaciales y comunicaciones de baja tasa de error. Su principal desventaja es que transmite sólo un bit por símbolo, lo que limita su eficiencia espectral frente a modulaciones de orden superior como QPSK o 8-PSK.

2.4. Modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

La **QPSK** utiliza cuatro fases (0° , 90° , 180° y 270°) para representar combinaciones de dos bits por símbolo:

$$00 \rightarrow 0^\circ, \quad 01 \rightarrow 90^\circ, \quad 11 \rightarrow 180^\circ, \quad 10 \rightarrow 270^\circ$$

La señal modulada puede escribirse como:

$$s(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \phi_i)$$

La tasa de símbolos es:

$$R_s = \frac{R_b}{2}$$

por lo que el ancho de banda requerido se reduce a la mitad respecto de BPSK:

$$BW \approx \frac{R_b}{2}$$



QPSK duplica la eficiencia espectral de BPSK, manteniendo buena robustez frente al ruido. Es ampliamente usada en Wi-Fi, LTE y TV digital.

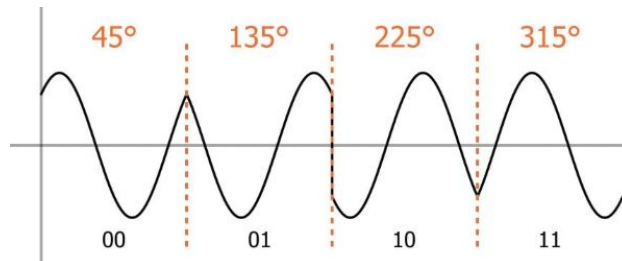


Figura 3: Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.

2.5. Modulación QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

La **QAM** combina variaciones simultáneas de **amplitud y fase** para transmitir más bits por símbolo. Cada símbolo se representa como un punto en el plano en cuadratura (I-Q):

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

donde $I(t)$ y $Q(t)$ son las componentes en fase y en cuadratura. El signo negativo indica un desfase de 90° entre ambas, aunque según la convención puede usarse también el signo positivo.

La **tasa de bits** (R_b) representa la cantidad de bits transmitidos por segundo, mientras que la **tasa de símbolos** (R_s) indica la cantidad de cambios de señal por segundo. En QAM, al aumentar el número de niveles de modulación (M), se transmiten más bits por símbolo sin incrementar significativamente el ancho de banda.

En cuanto al **ancho de banda**, QAM resulta más eficiente que otras técnicas, ya que utiliza dos señales ortogonales —una en amplitud y otra en fase— para duplicar la capacidad de transmisión dentro de un mismo canal, logrando una alta eficiencia espectral.

2.6. Modulación 16-QAM

La **16-QAM** utiliza 16 combinaciones distintas de amplitud y fase, permitiendo transmitir **4 bits por símbolo**. Cada punto de la constelación representa una combinación única de bits en el plano I-Q, donde se codifican simultáneamente dos bits en la componente en fase (I) y dos en la componente en cuadratura (Q).

La tasa de símbolos se reduce en comparación con modulaciones de menor orden, ya que cada símbolo transporta más información: en 16-QAM,



se envían 4 bits por cada símbolo transmitido. En consecuencia, el ancho de banda necesario también disminuye en proporción, logrando una mayor eficiencia espectral.

Esta modulación ofrece una **alta eficiencia espectral**, permitiendo mayores tasas de transmisión en el mismo ancho de banda. Sin embargo, requiere una excelente relación señal-ruido y buena linealidad en el canal para evitar errores en la detección de los niveles de amplitud y fase.

3. CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de este trabajo se comprendió cómo las distintas técnicas de modulación digital permiten transmitir información binaria utilizando señales analógicas de manera eficiente y confiable. Se observó que cada tipo de modulación presenta un equilibrio distinto entre el **ancho de banda**, la **tasa de bits** y la **robustez frente al ruido**, por lo que la elección de la técnica depende de las condiciones del canal y de los objetivos del sistema de comunicación.

Aprendimos que las modulaciones más simples, como FSK o BPSK, ofrecen gran confiabilidad pero menor eficiencia espectral, mientras que las más complejas, como QPSK y QAM, logran transmitir más información en el mismo ancho de banda, aunque requieren una mejor relación señal-ruido y mayor precisión en la sincronización.

En síntesis, el estudio de las modulaciones digitales permitió comprender la importancia de optimizar el uso del espectro y la necesidad de adaptar la técnica de modulación a cada aplicación concreta, buscando siempre el mejor compromiso entre velocidad de transmisión, eficiencia y calidad de la señal.

REFERENCIAS

- Pisciotto, N. O., Liendo, C. G., & Lauro, R. C. (2015). *Transmisión de Televisión Digital Terrestre en la norma ISDB-Tb*. Universidad Blas Pascal, Córdoba. Capítulo 3: Modulación Digital.
- Xiong, Fuqin. (2006). *Digital Modulation Techniques* (2nd ed.). Artech House Publishers.
- Haykin, S. (2008). *Sistemas de Comunicación* (5^a ed.). Pearson Educación.