

Taller de Comunicaciones Eléctricas

Introducción Laboratorio 4

Ing. Sergio Arriola-Valverde. M.Sc
Ing. Néstor Hernández Hostaller. M.Sc
Ing. Alexander Barrantes Muñoz. M.Sc

Escuela de Ingeniería Electrónica
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Contenidos y Cronograma

- Introducción
- Modulación Analógica
- Modulación Digital

Cronograma del Curso

Semana		Tema	Lugar
1		Introducción Laboratorio 1-Búsqueda Tema Proyecto Final	Virtual
2		Medición Laboratorio 1	Virtual
3		Exposición 1, Informe 1, Quiz 1, Introducción Laboratorio 2, Exposición Teórica	Virtual
4		Medición Laboratorio 2	Virtual
5		Exposición 2, Informe 2, Quiz 2, Introducción Laboratorio 3, Anteproyecto, Exposición Teórica	Virtual
6		Medición Laboratorio 3	Virtual
7		Exposición 3, Informe 3, Quiz 3, Introducción Laboratorio 4, Exposición Teórica	Virtual
8		Medición Laboratorio 4	Virtual
9		Exposición 4, Informe 4, Quiz 4, Introducción Laboratorio 5, Avance 1, Exposición Teórica	Virtual
10		Medición Laboratorio 5	Virtual
11		Exposición 5, Informe 5, Quiz 5, Introducción Laboratorio 6, Exposición Teórica	Virtual
12		Medición Laboratorio 6	Virtual
13		Exposición 6, Informe 6, Quiz 6, Avance 2 ,Exposición Teórica	Virtual
14		Trabajo en proyecto	Virtual
15-16-17		Trabajo en proyecto, Tutorial	Virtual
18		Presentación del proyecto	Virtual

Cronograma del Curso

Semana		Tema	Lugar
1		Introducción Laboratorio 1-Búsqueda Tema Proyecto Final	Virtual
2		Medición Laboratorio 1	Virtual
3		Exposición 1, Informe 1, Quiz 1, Introducción Laboratorio 2, Exposición Teórica	Virtual
4		Medición Laboratorio 2	Virtual
5		Exposición 2, Informe 2, Quiz 2, Introducción Laboratorio 3, Anteproyecto, Exposición Teórica	Virtual
6		Medición Laboratorio 3	Virtual
7		Exposición 3, Informe 3, Quiz 3, Introducción Laboratorio 4	Virtual
8		Medición Laboratorio 4	Virtual
9		Exposición 4, Informe 4, Quiz 4, Introducción Laboratorio 5, Avance 1, Exposición Teórica	Virtual
10		Medición Laboratorio 5	Virtual
11		Exposición 5, Informe 5, Quiz 5, Introducción Laboratorio 6, Exposición Teórica	Virtual
12		Medición Laboratorio 6	Virtual
13		Exposición 6, Informe 6, Quiz 6, Avance 2 ,Exposición Teórica	Virtual
14		Trabajo en proyecto	Virtual
15-16-17		Trabajo en proyecto, Tutorial	Virtual
18		Presentación del proyecto	Virtual

Contenidos y Cronograma

- Introducción
- Modulación Analógica
- Modulación Digital

Introducción

- Ecuaciones fundamentales que describen el fenómeno del electromagnetismo (Ecuaciones de Maxwell) junto con las ecuaciones de materiales:

Son ecuaciones diferenciales acopladas de primer orden en tiempo y espacio.

- Las cargas experimentan fuerzas de Coulomb y Lorentz en campos electromagnéticos:
- El comportamiento se puede clasificar como:
 - estático (estacionario):** electrostática, magnetostática (E/H desacoplado)
 - quasi-estacionario:** difusión, efecto piel, Corr. Eddy (E/H parcialmente acoplado)
 - dinámico:** propagación de onda, radiación, dispersión (E/H acoplado totalmente)

Introducción

Forma “puntual” de las Ecuaciones de Maxwell par el caso dinámico

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

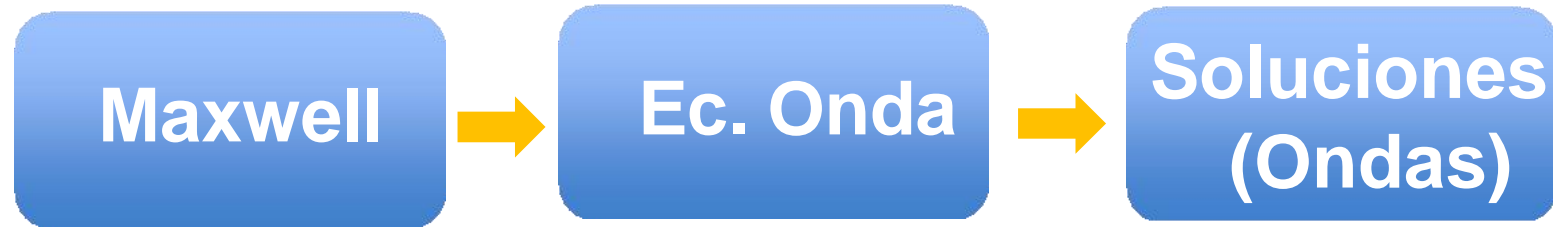
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Campos Dinámicos

- Existe dependencia temporal
- Acople E-M completo
- Para describir campos que varían rápidamente
- Para propagación de ondas y radiación

Concepto de Propagación de Onda



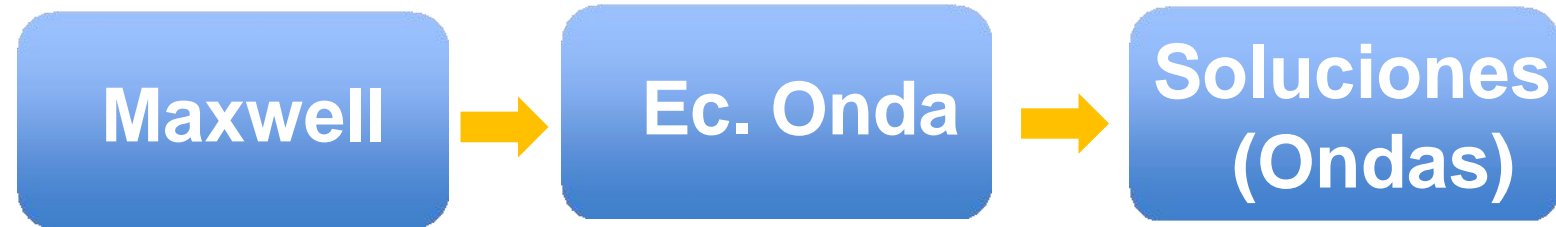
Ejemplo onda TEM, caso armónico:

$$E_x(z, t) = f_1 \left(t - \frac{z}{v} \right) + f_2 \left(t + \frac{z}{v} \right) \quad E_x(z, t) = |E_{x0}| \cos(\omega t - k_0 z)$$

$$H_y(z, t) = f_1 \left(t - \frac{z}{v} \right) + f_2 \left(t + \frac{z}{v} \right) \quad H_y(z, t) = |H_{x0}| \cos(\omega t - k_0 z)$$

Onda Viajera → función del tiempo y espacio

Concepto de Propagación de Onda



Ejemplo onda TEM, caso armónico:

$$\begin{aligned} E_x(z, t) &= \mathcal{E}_x(z, t) + \mathcal{E}'_x(z, t) \\ &= |E_{x0}| \cos [\omega(t - z/v_p) + \phi_1] + |E'_{x0}| \cos [\omega(t + z/v_p) + \phi_2] \\ &= \underbrace{|E_{x0}| \cos [\omega t - k_0 z + \phi_1]}_{\text{propagación } z \text{ hacia adelante}} + \underbrace{|E'_{x0}| \cos [\omega t + k_0 z + \phi_2]}_{\text{propagación } z \text{ hacia atrás}} \end{aligned}$$

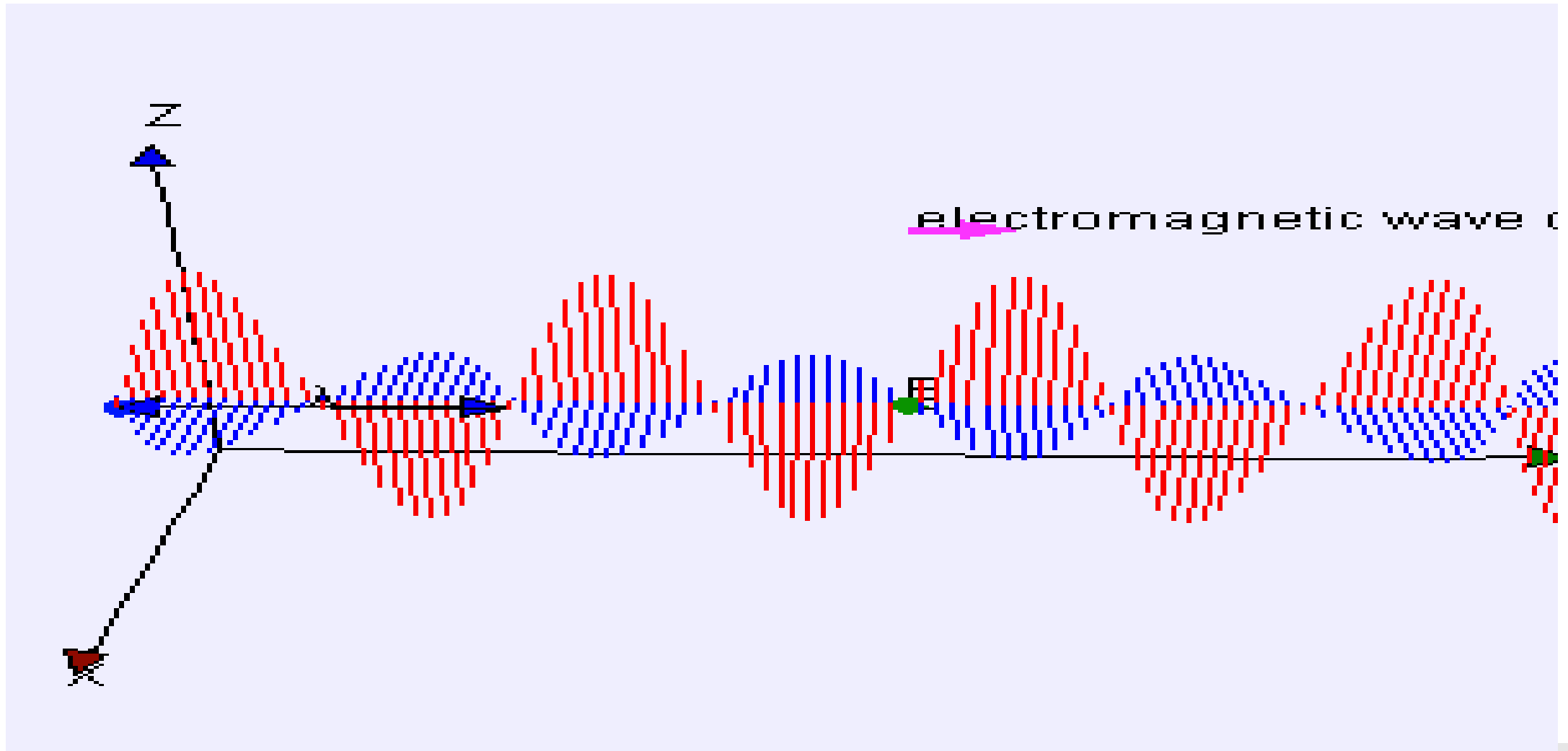
Onda Viajera \rightarrow función del tiempo y espacio

$$k_0 \equiv \frac{\omega}{c} \text{ rad/m}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k_0} \text{ (espacio libre)}$$

$$v_p = c$$

Concepto de Propagación de Onda



Contenidos y Cronograma

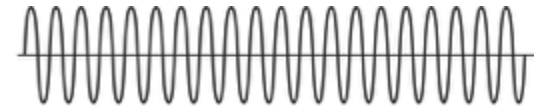
- Introducción
- **Modulación Analógica**
- Modulación Digital

Modulación

Señal en Banda Base: Información en espectro natural desde cero hasta una frecuencia máxima. $m(t)$

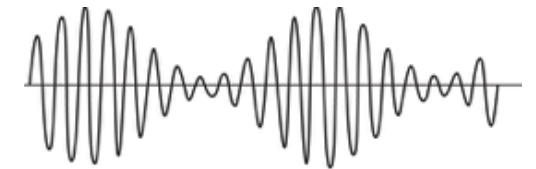


Portadora: señal a modular, si es una senoidal se denomina modulación en onda continua (CWM) o analógica. $c(t)$



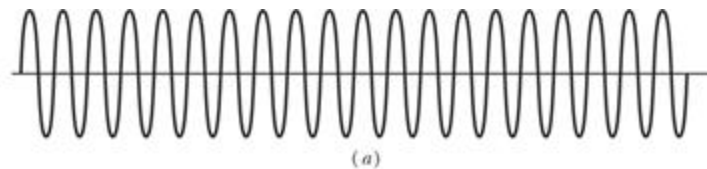
Modulación: proceso a través del cual alguna característica de una señal portadora es modificada de acuerdo a una señal de información (moduladora). Implica un desplazamiento en frecuencia para que la información se ubique en una cierta banda en la que pueda ser transmitida.

Señal modulada: portadora modulada con la información. $s(t)$

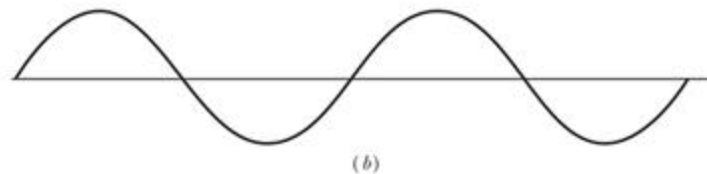


Demodulación: proceso inverso a la modulación que permite recuperar la señal de información.

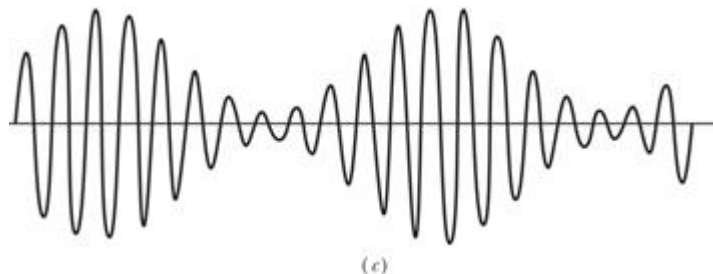
Modulación



Portadora



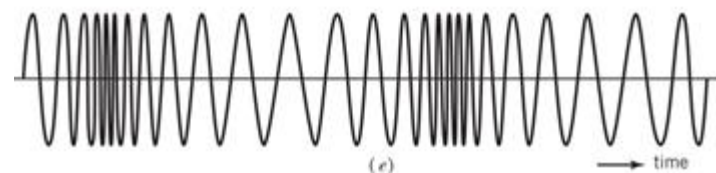
Moduladora



Modulación en Amplitud

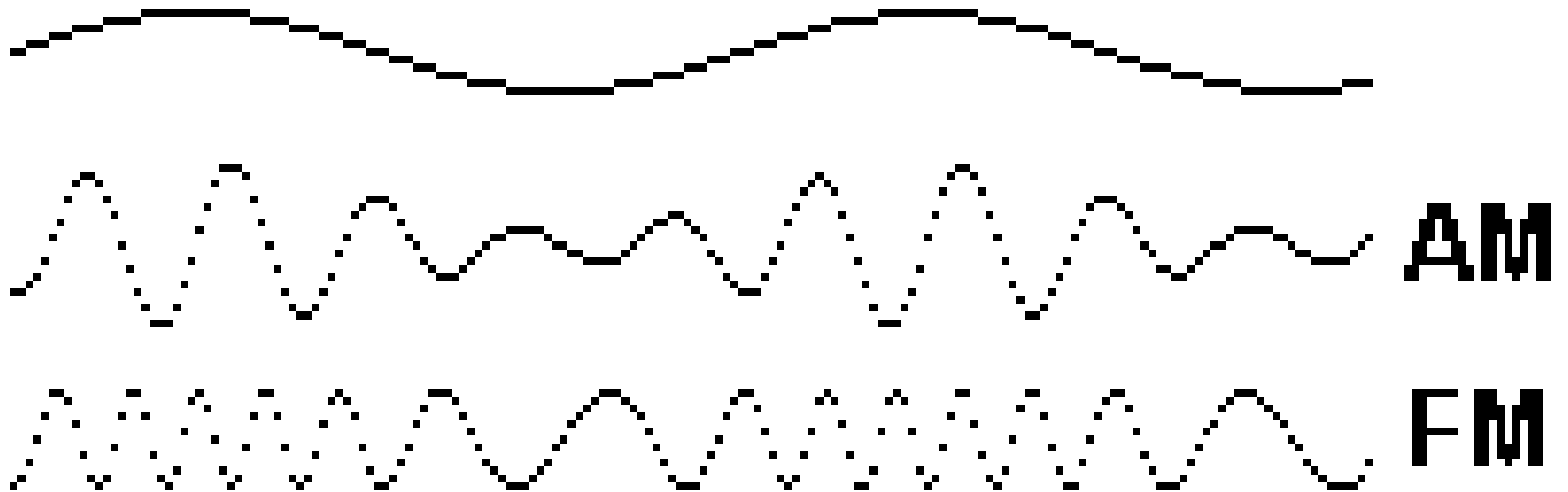


Modulación en Fase



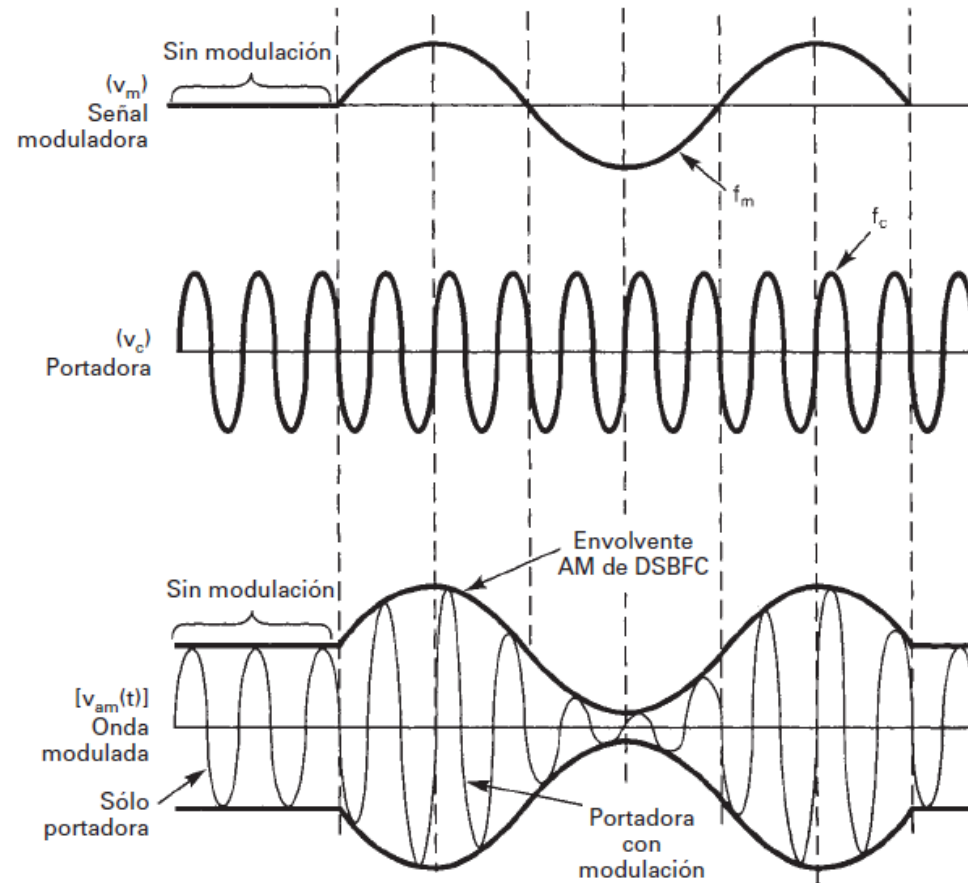
Modulación en Frecuencia

Modulación



Modulación AM

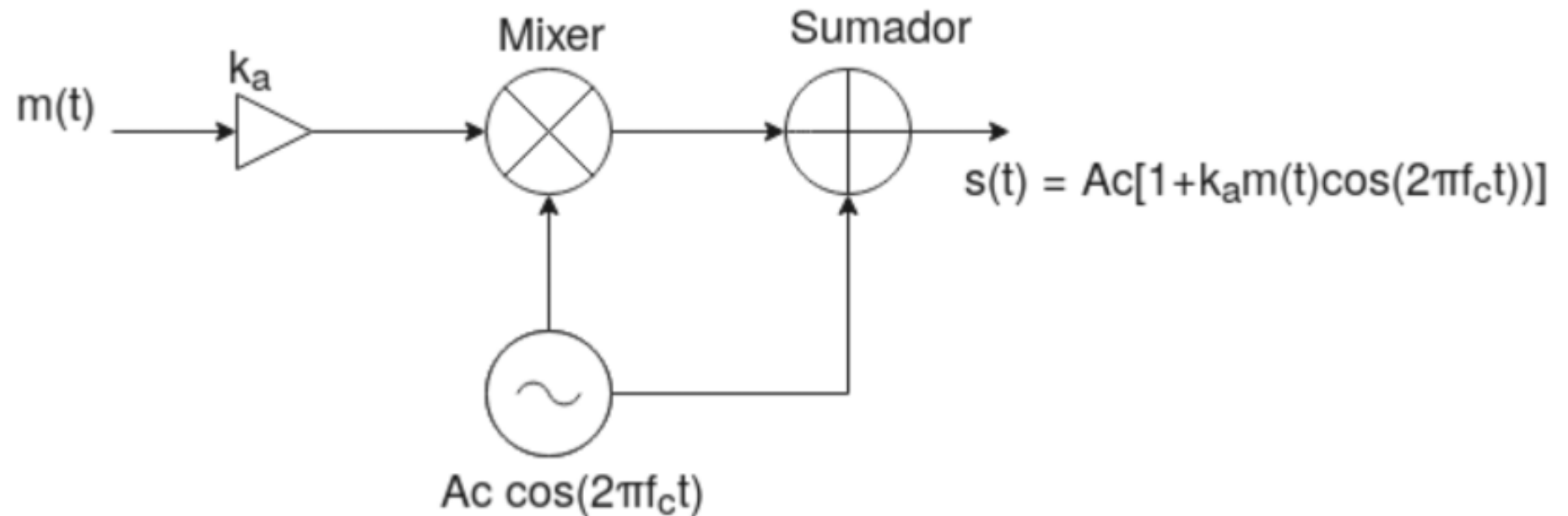
La amplitud de la portadora varía según la amplitud de la señal de información.



Modulación AM

AM-DSB

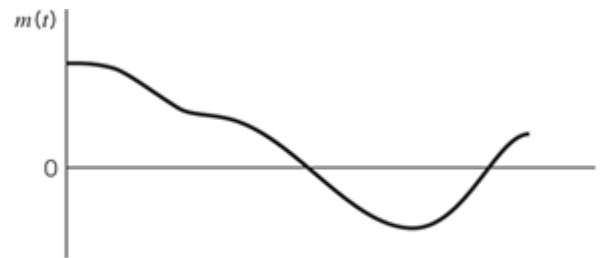
La amplitud de una portadora sinusoidal $c(t)$ es variada alrededor de un valor medio linealmente con la señal en banda base de información $m(t)$.



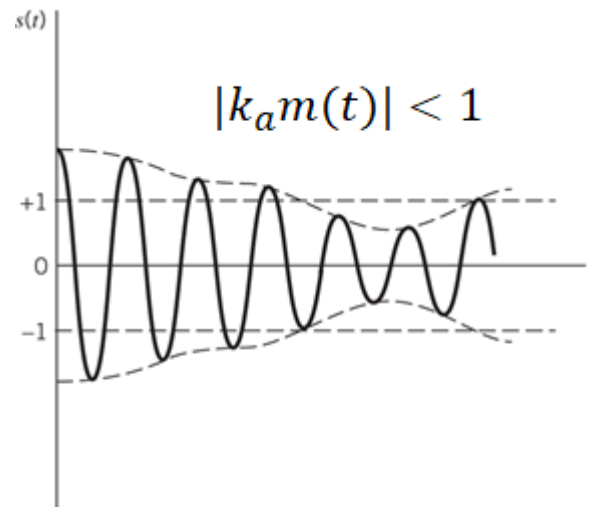
Modulación AM

AM-DSB

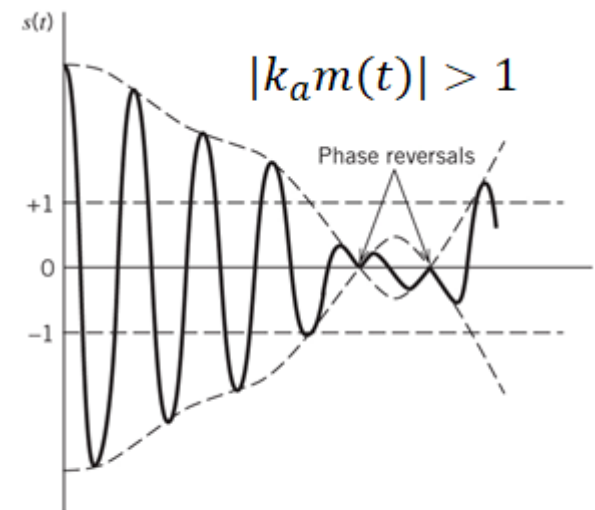
Moduladora



(a)



Onda modulada

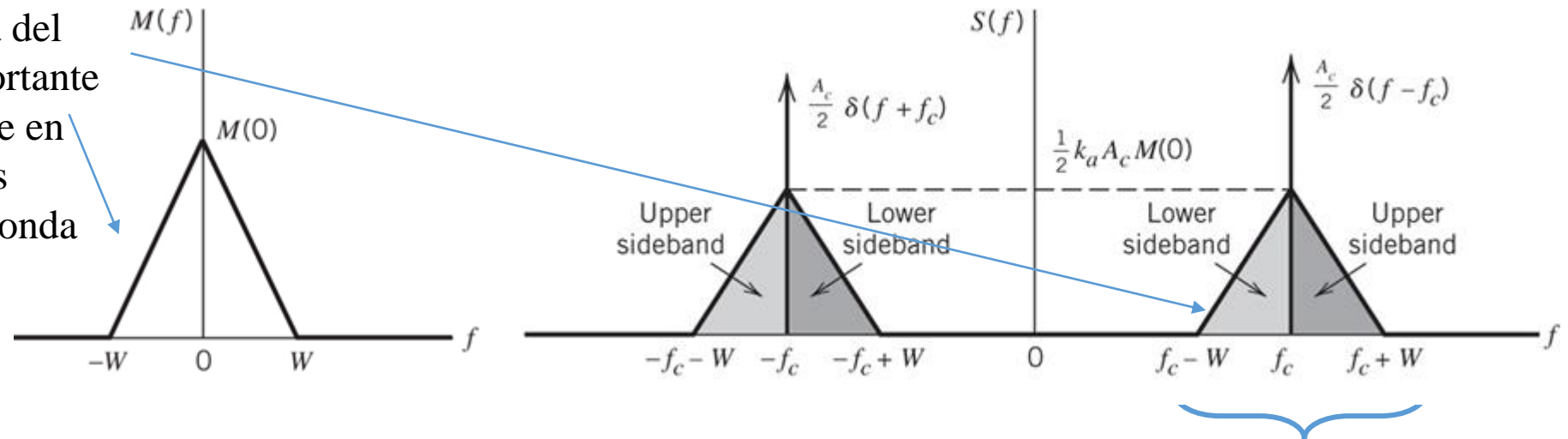


Onda sobre modulada

Modulación AM

AM-DSB

Parte negativa del espectro es importante porque aparece en frecuencias positivas de la onda modulada

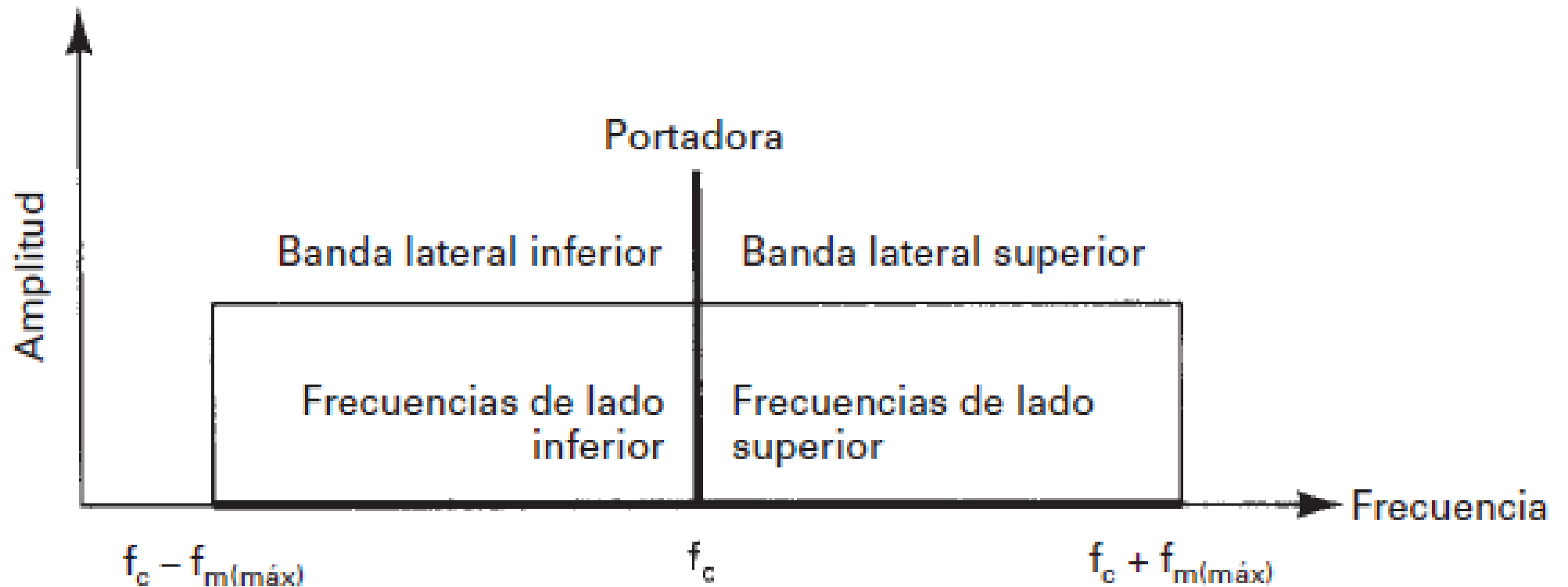


Este método se llama **DSB-LC** debido a la presencia explícita de la portadora. También conocida simplemente como **AM**

$$B_T = 2W : \text{ancho de banda de transmisión}$$

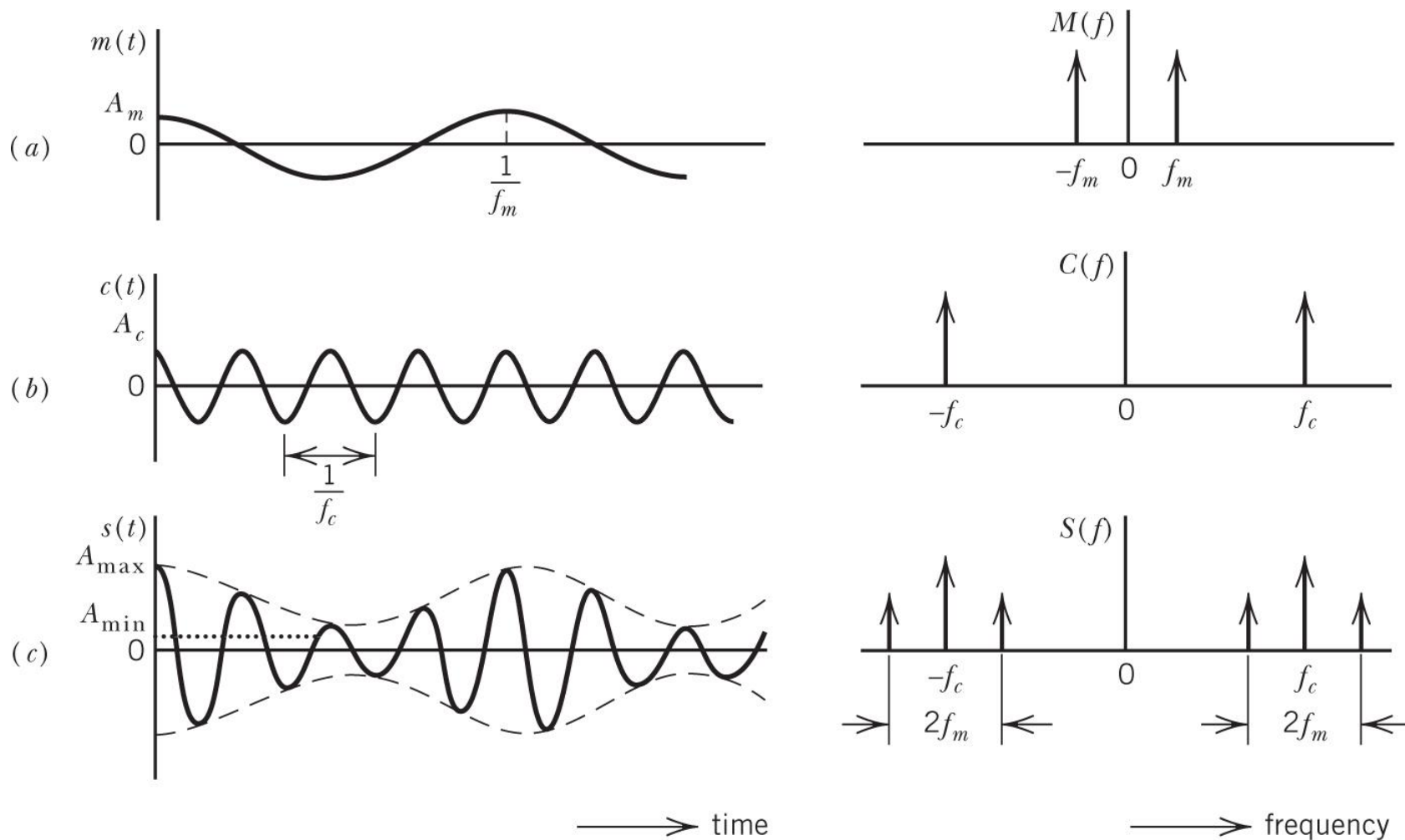
Modulación AM

AM-DSB

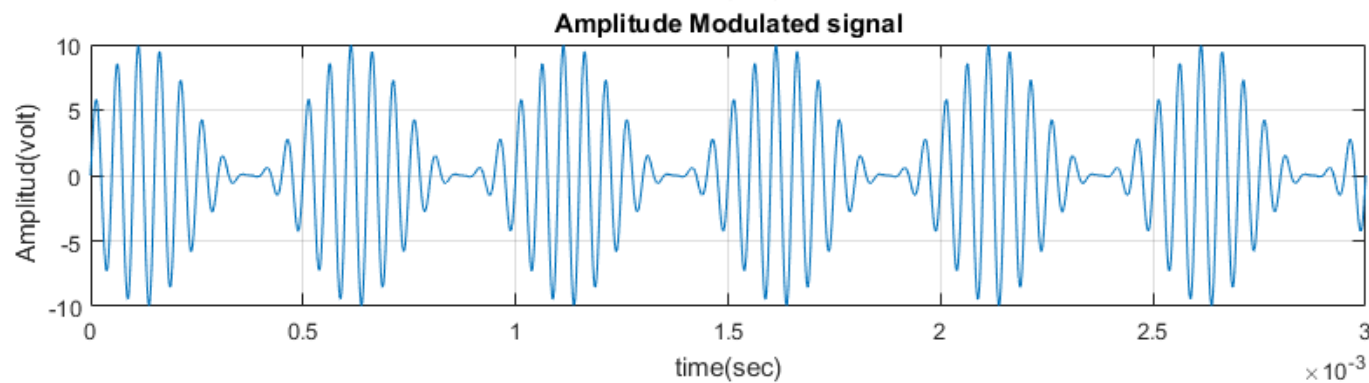
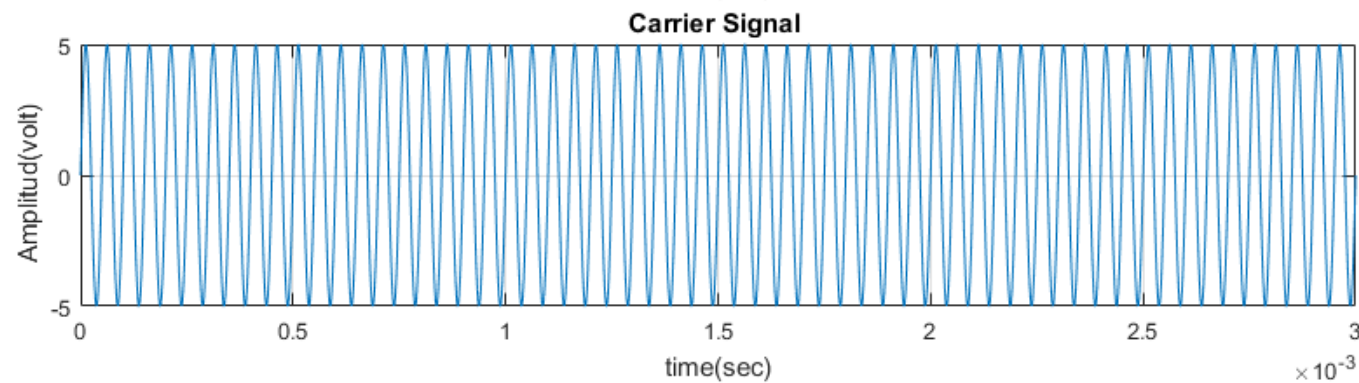
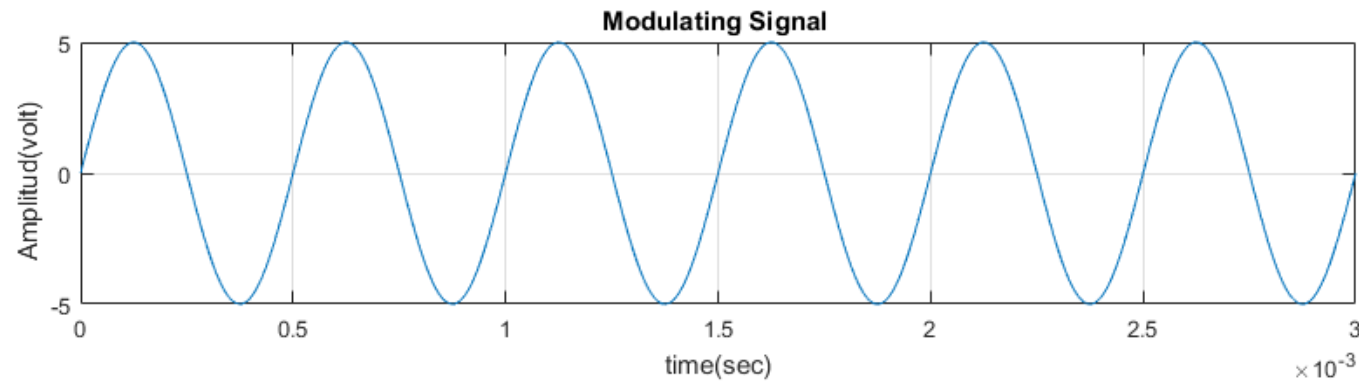


Modulación AM

AM-DSB



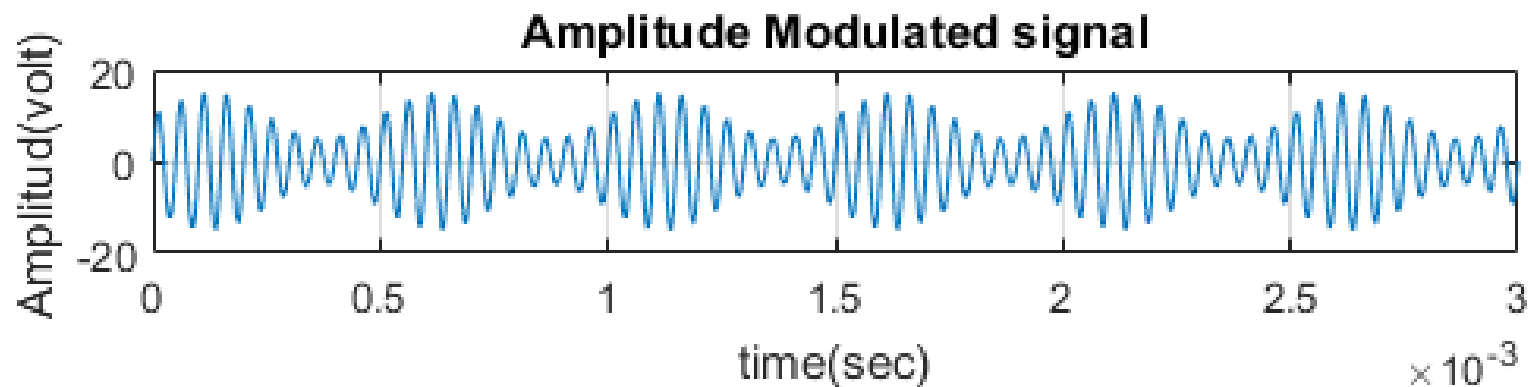
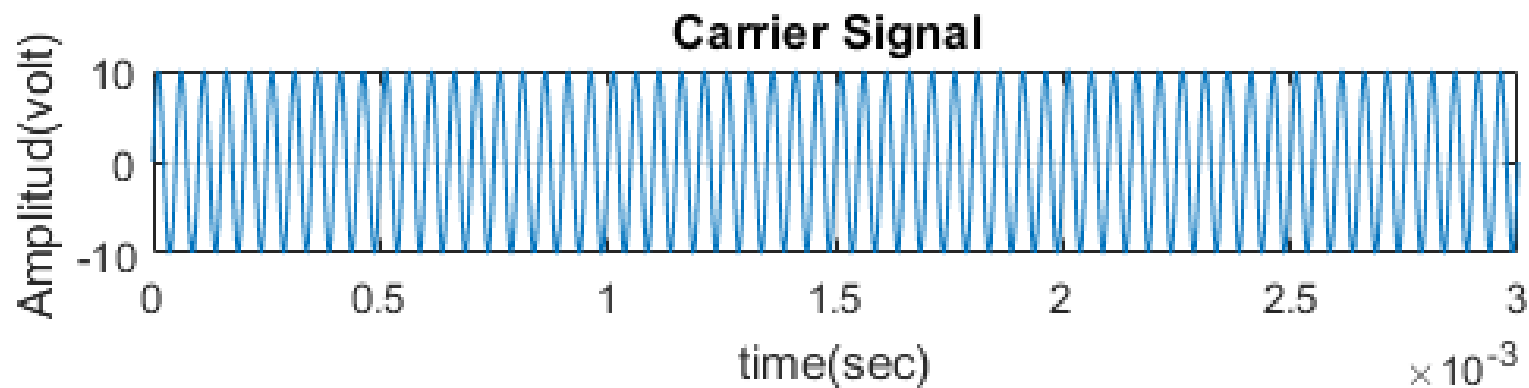
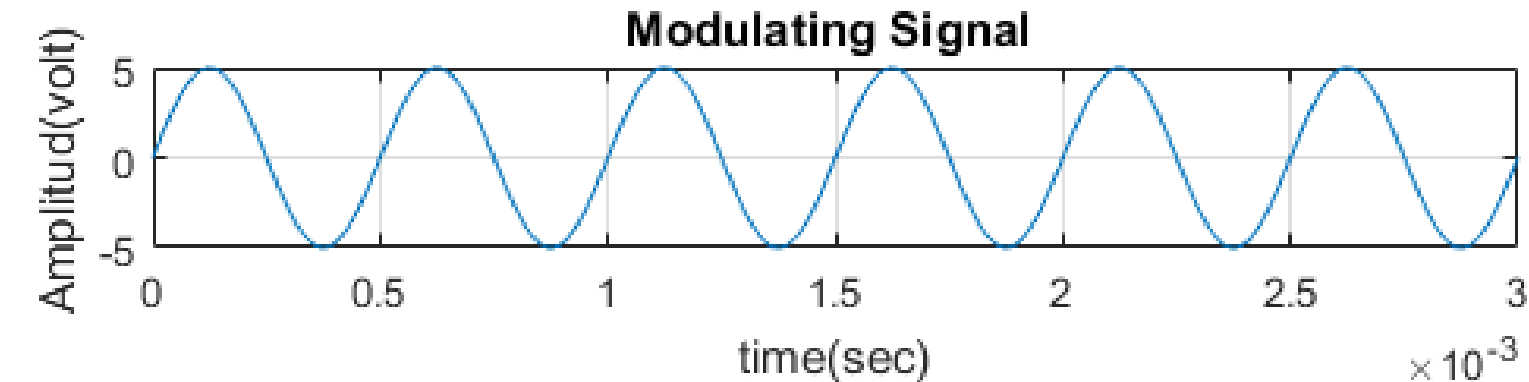
Modulación



Índice de
modulación

$$m = 1$$

Modulación

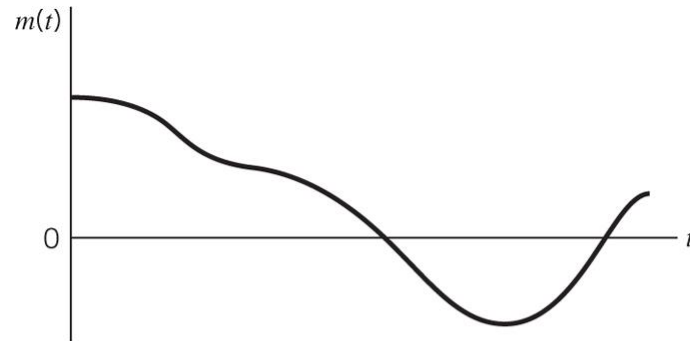


Índice de
modulación

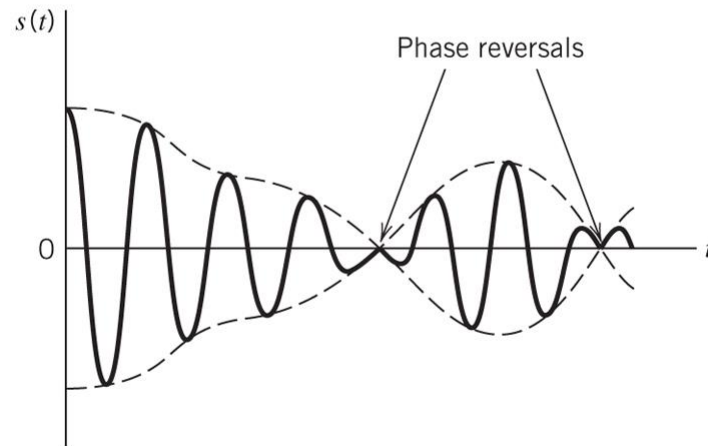
$$m = 0,5$$

Modulación AM

AM-DSB-SC

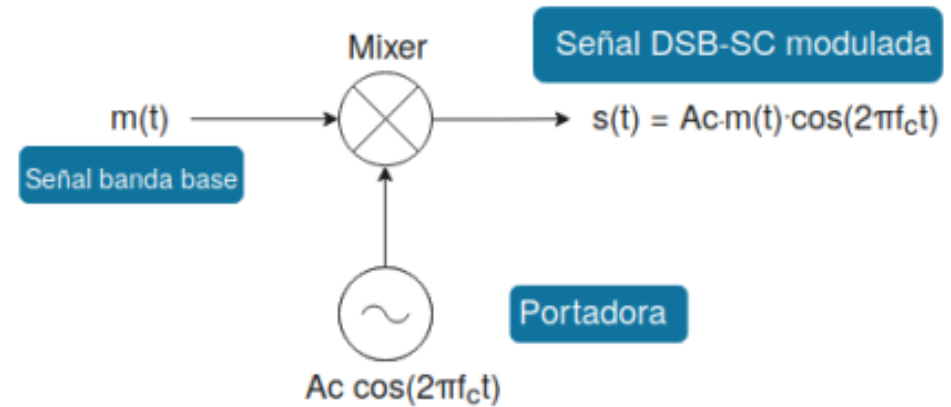


(a)



(b)

■ Modulador DSB – SC

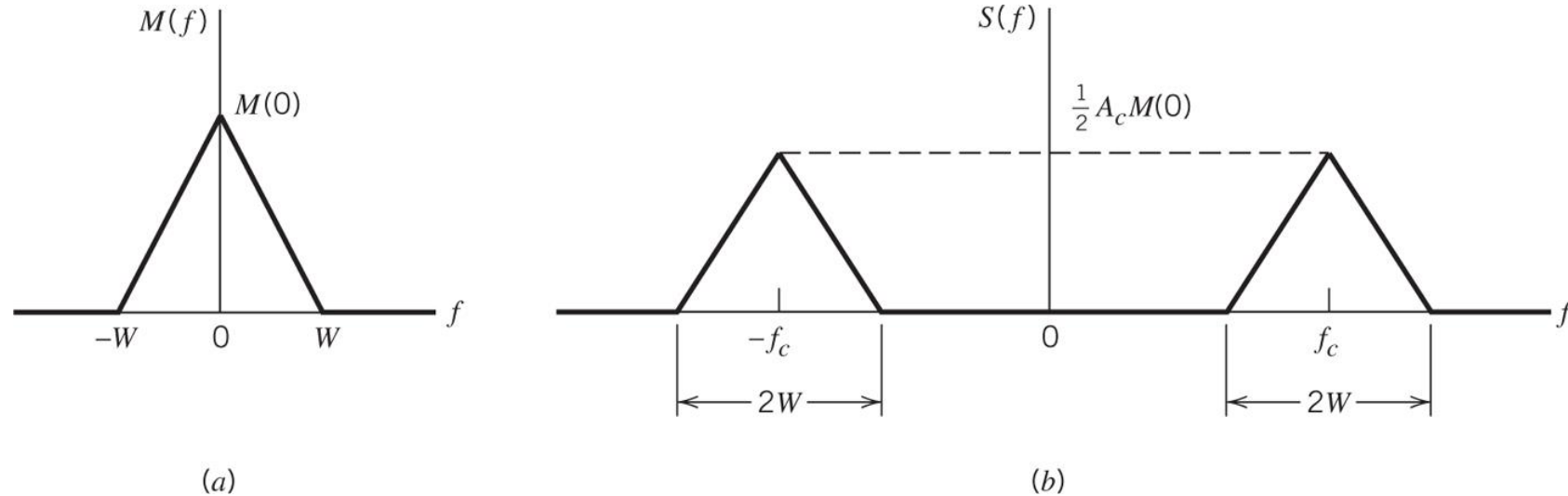


$$v_1(t) = c(t) \cdot m(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \cdot m(t)$$

- Se logra multiplicando la señal de información con la portadora.
- Reversión de la fase ocurre cuando moduladora es cero.

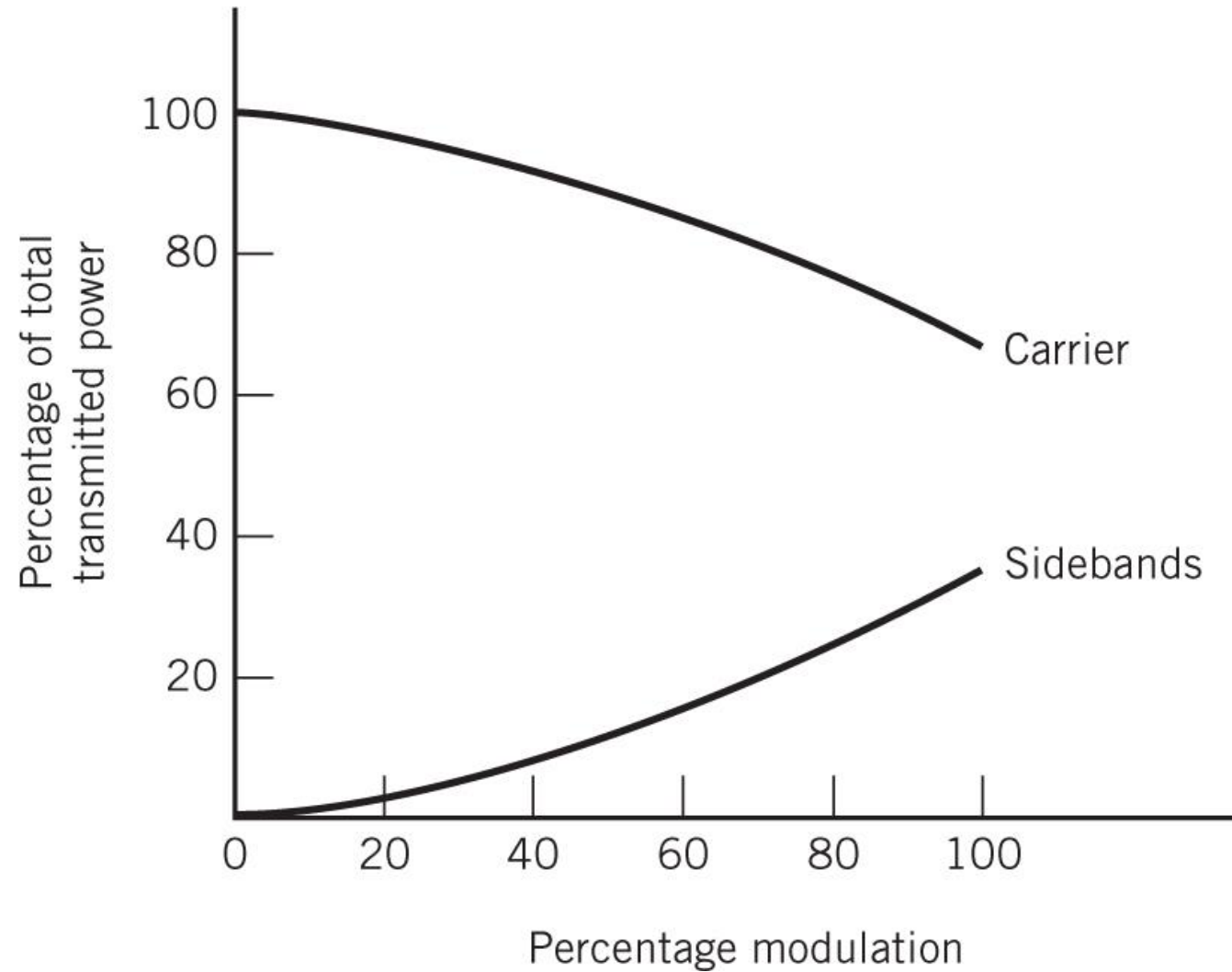
Modulación AM

AM-DSB-SC



- Se traslada espectro de la moduladora por $\pm f_c$
- Requiere ancho de banda $2W$ (igual que DSB-LC)
- Toda la potencia está en las bandas laterales, por lo que la eficiencia de potencia teórica es cercana al 100%

Modulación AM



Modulación AM

Tipos:

DSB-LC: con portadora, mayor consumo de potencia, pero receptores son fáciles de implementar.

DSB-SC: se suprime la portadora, mejor en términos de potencia a costa de receptores más complejos.

VB: se suprime alguna de las dos partes del espectro. Lo mejor en términos de potencia y ancho de banda.

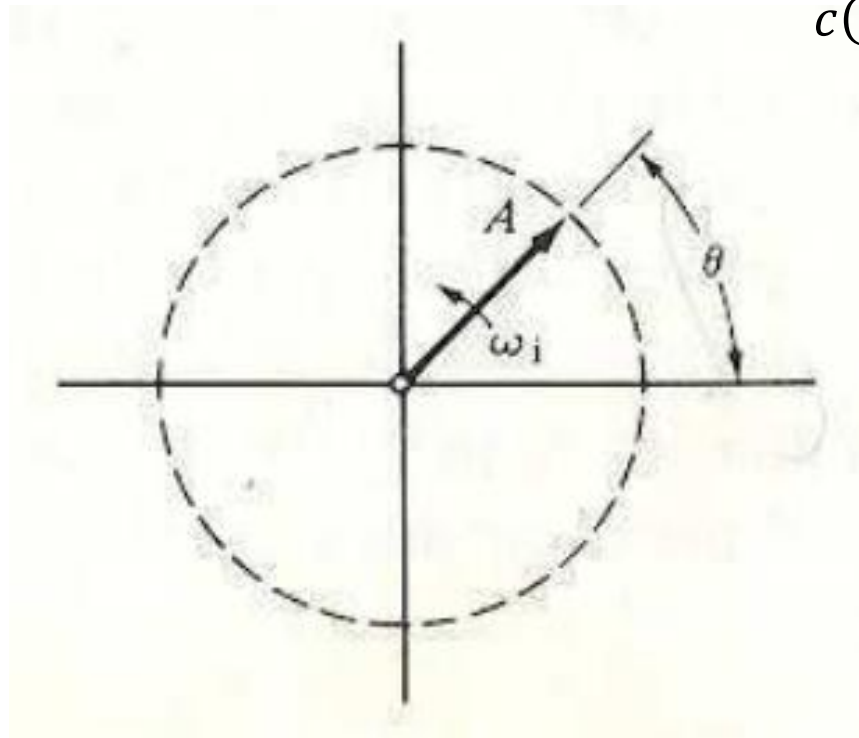
Características:

Tipo de modulación lineal y de detección no coherente (no requiere recuperar fase en el receptor)

Relativamente ineficiente en términos de potencia y ancho de banda.

Modulación PM

Fase de una portadora senoidal es variada de acuerdo a una señal de información en banda base.



$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \theta_c) \quad \rightarrow \quad \theta_i(t) = 2\pi f_c t + \theta_c$$

$$\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad f_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{2\pi dt}$$

$$\theta_i(t) = \int_0^t \omega_i(\tau) d\tau + \theta_0$$

Hay 2 formas de introducir la información: en la frecuencia o en su fase instantánea, FM o PM

Modulación PM

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + \theta_c$$

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t)$$

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

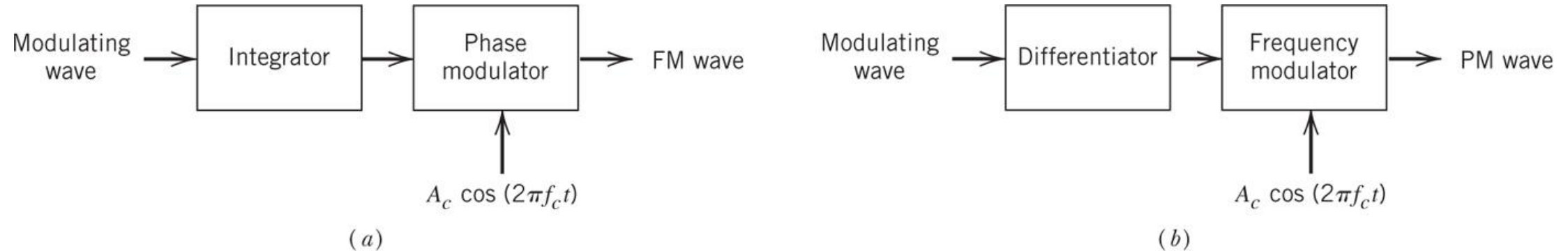


Sensibilidad de fase

$$f_i = \frac{d\theta_i(t)}{2\pi dt} = f_c + k_p \frac{dm(t)}{2\pi dt}$$

Modulación de fase PM: el ángulo instantáneo se varía linealmente con la señal de información. La frecuencia instantánea también varía.

Modulación PM



Señal FM puede ser vista como integración de la señal modulada en fase, señal PM como la diferenciación de una señal FM

Modulación PM

Potencia transmitida constante: dada que amplitud de la señal se mantiene, $P_{avg} = (1/2)A_c^2$ (carga de 1 Ohmio)

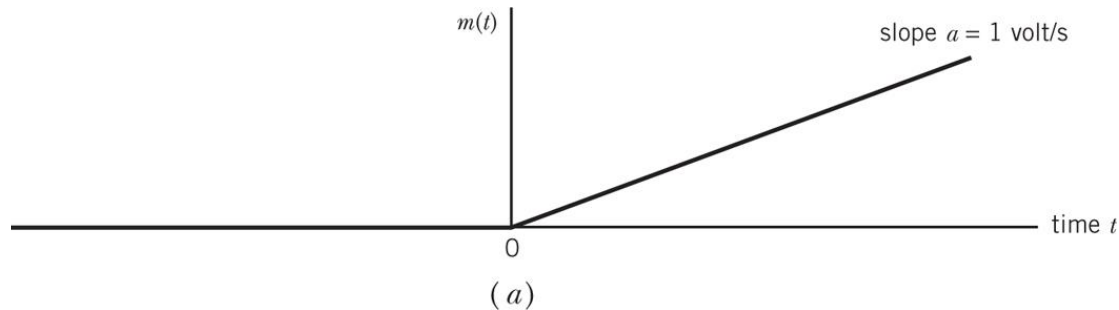
Proceso no lineal: no se cumple el principio de superposición con respecto a dos señales de modulación.

Irregularidad en cruces por cero: efecto de no linealidad, información reside en los cruces por cero suponiendo que la frecuencia portadora es mucho mayor que la frecuencia de la señal de información.

Dificultad de visualización del mensaje: también atribuido al carácter no lineal de la modulación, en contraste con AM.

Balance entre ancho de banda y desempeño contra ruido: modular frecuencia es menos sensible a ruido en comparación con la amplitud, pero al costo de un ancho de banda mayor. Tener esta posibilidad de controlar ancho de banda vs desempeño a ruido no es posible en AM.

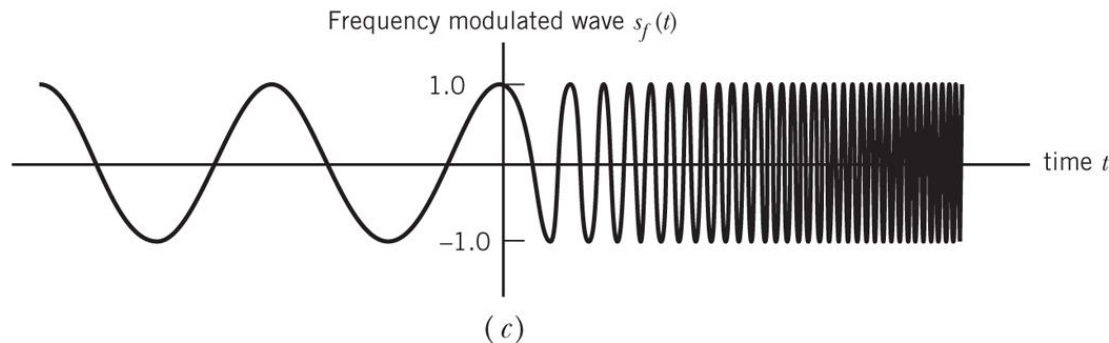
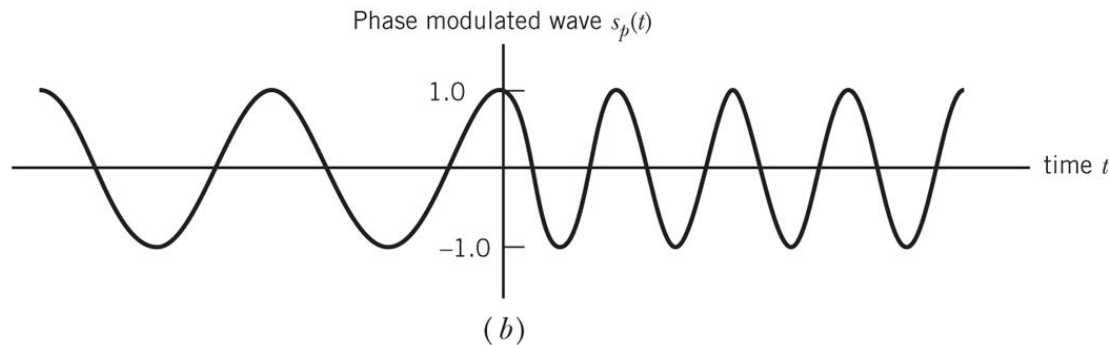
Modulación PM



Modulación en Fase:

- Se mantiene regularidad de cruces por cero, cambiando la frecuencia de $\frac{1}{4}$ Hz a:

$$f_c + k_p (a/2\pi) = \frac{1}{2} \text{ Hz}$$



Modulación PM/FM

Tipos:

PM: se controla el argumento de fase en la portadora en función de la señal moduladora.

FM: se controla la frecuencia de la señal portadora en función de la señal moduladora.

Características:

Tipo de modulación no lineal, donde el ancho de banda es función del índice de modulación / desviación.

Tipo de detección coherente.

Mejor inmunidad de ruido, controlable con el ancho de banda.

Modulación

	AM	DSB	SSB	FM
BANDWIDTH	$2 f_m$	$2 f_m$	f_m	$2 (\beta+1)f_m$
SNR	LINEAR	LINEAR	LINEAR	NON-LINEAR
EFFICIENCY	33%	50%	100%	$\leq 100\%^*$
COMPLEXITY	LOW	MODERATE	MODERATE	HIGH

Contenidos y Cronograma

- Introducción
- Modulación Analógica
- Modulación Digital

Modulación Digital

¿Que es un canal AWGN?

Modulación Digital

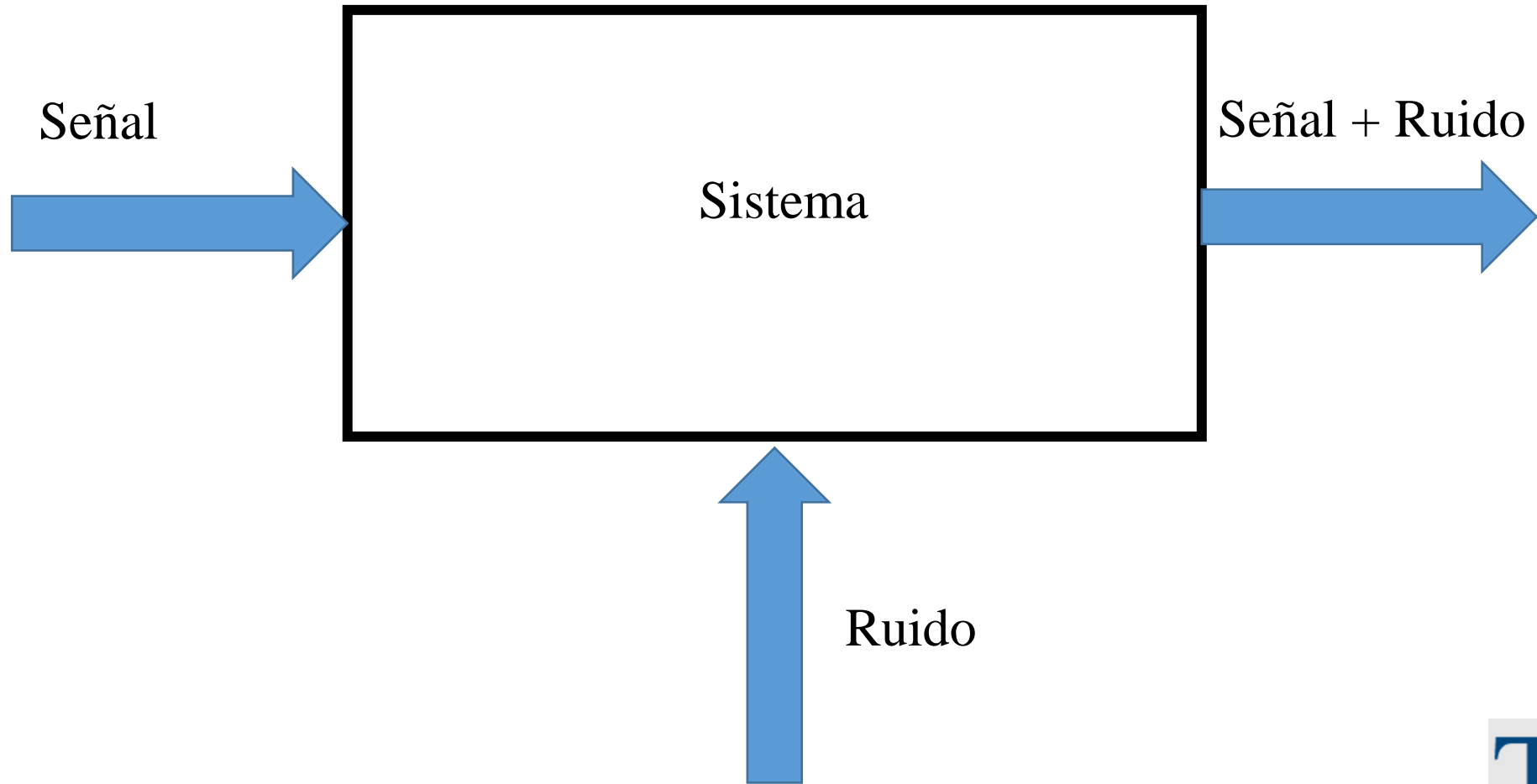
El ruido blanco es una señal aleatoria.

valores en instantes de tiempo distintos no tienen relación alguna entre sí.

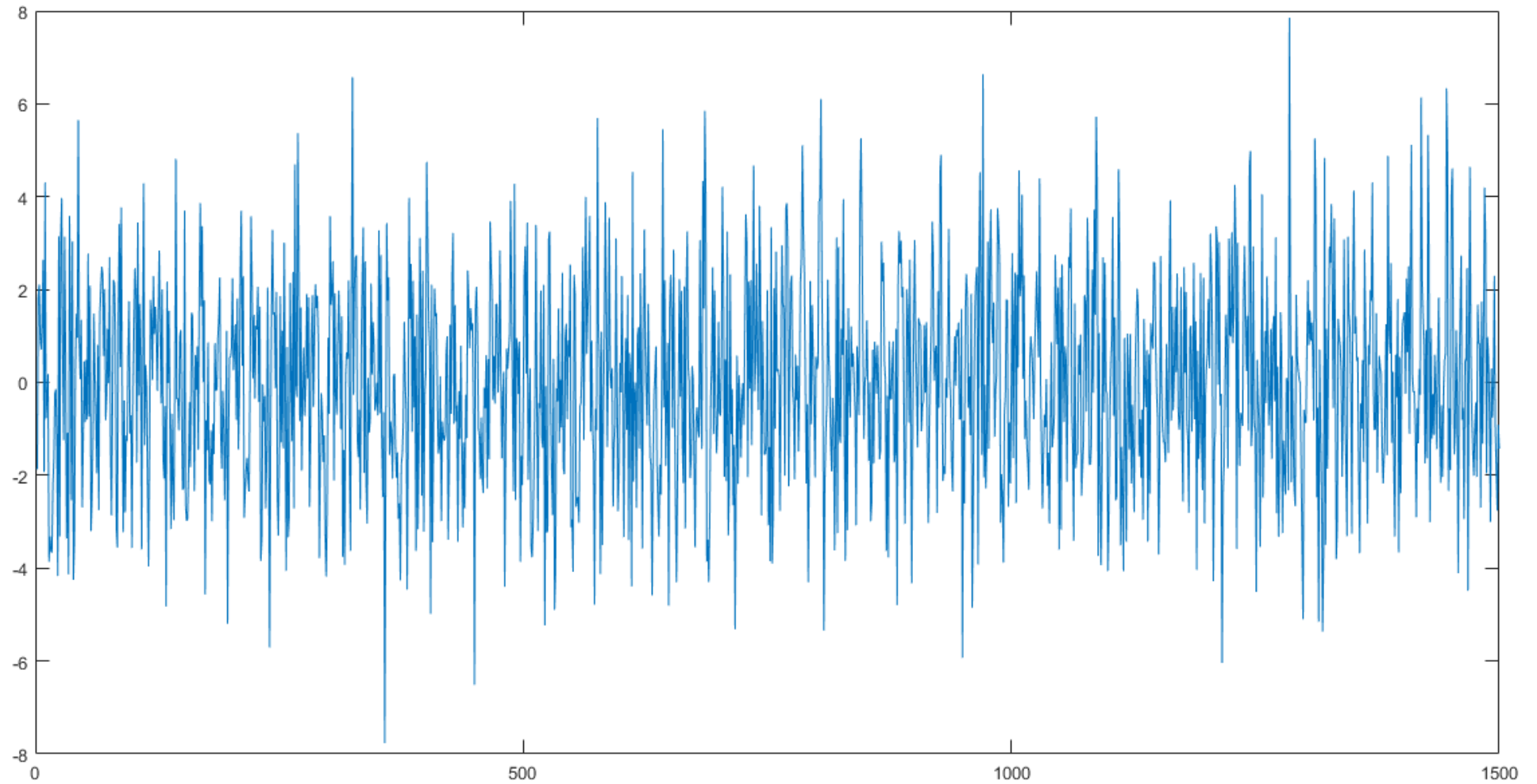
No existe correlación estadística entre sus valores.

Ruido blanco Gaussiano será aquel cuya función de densidad responde a una distribución normal.

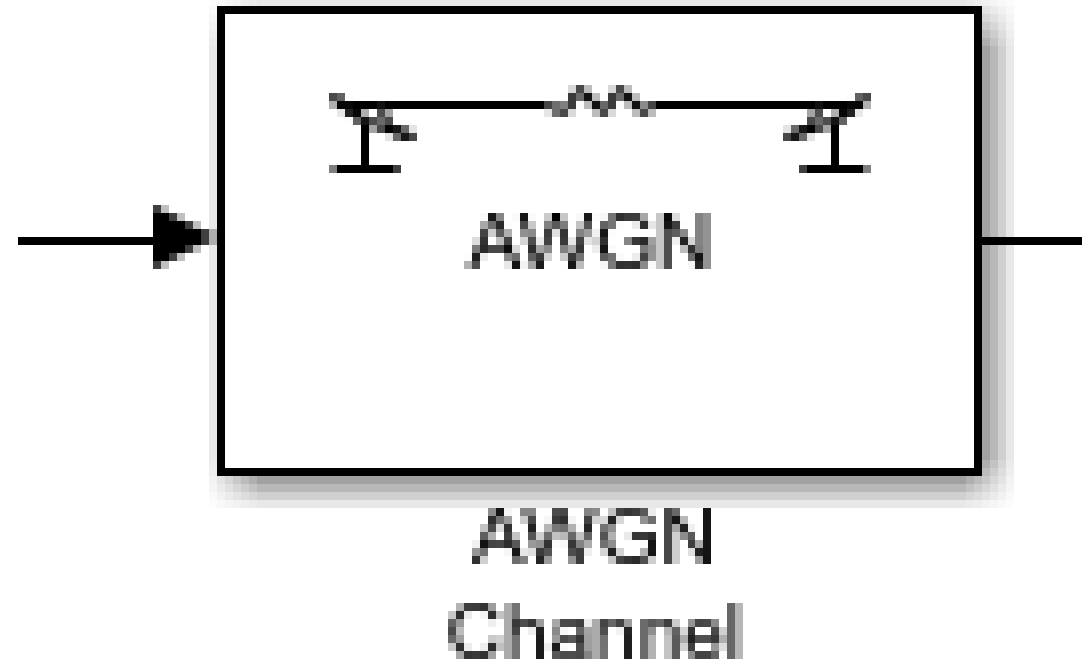
Modulación Digital



Modulación Digital



Modulación Digital



Modulación Digital

¿Que es EbNo?

Modulación Digital

- Es una métrica para medir eficiencia.
- Es semejante al SNR pero debe ser dividida por la eficiencia espectral que contiene el enlace.
- Es utilizado en modelo de simulación de canales por ejemplo AWGN.
- Existe una relación entre E_b/N_0 y SNR.

Modulación Digital

AWGN Channel (mask) (link)

Add white Gaussian noise to the input signal. The input signal can be real or complex. This block supports multichannel processing.

When using either of the variance modes with complex inputs, the variance values are equally divided among the real and imaginary components of the input signal.

Parameters

Input processing: Columns as channels (frame based) ▼

Initial seed:

67

Mode: Signal to noise ratio (Eb/No) ▼

Eb/No (dB):

20

Number of bits per symbol:

1

Input signal power, referenced to 1 ohm (watts):

1

Symbol period (s):

1

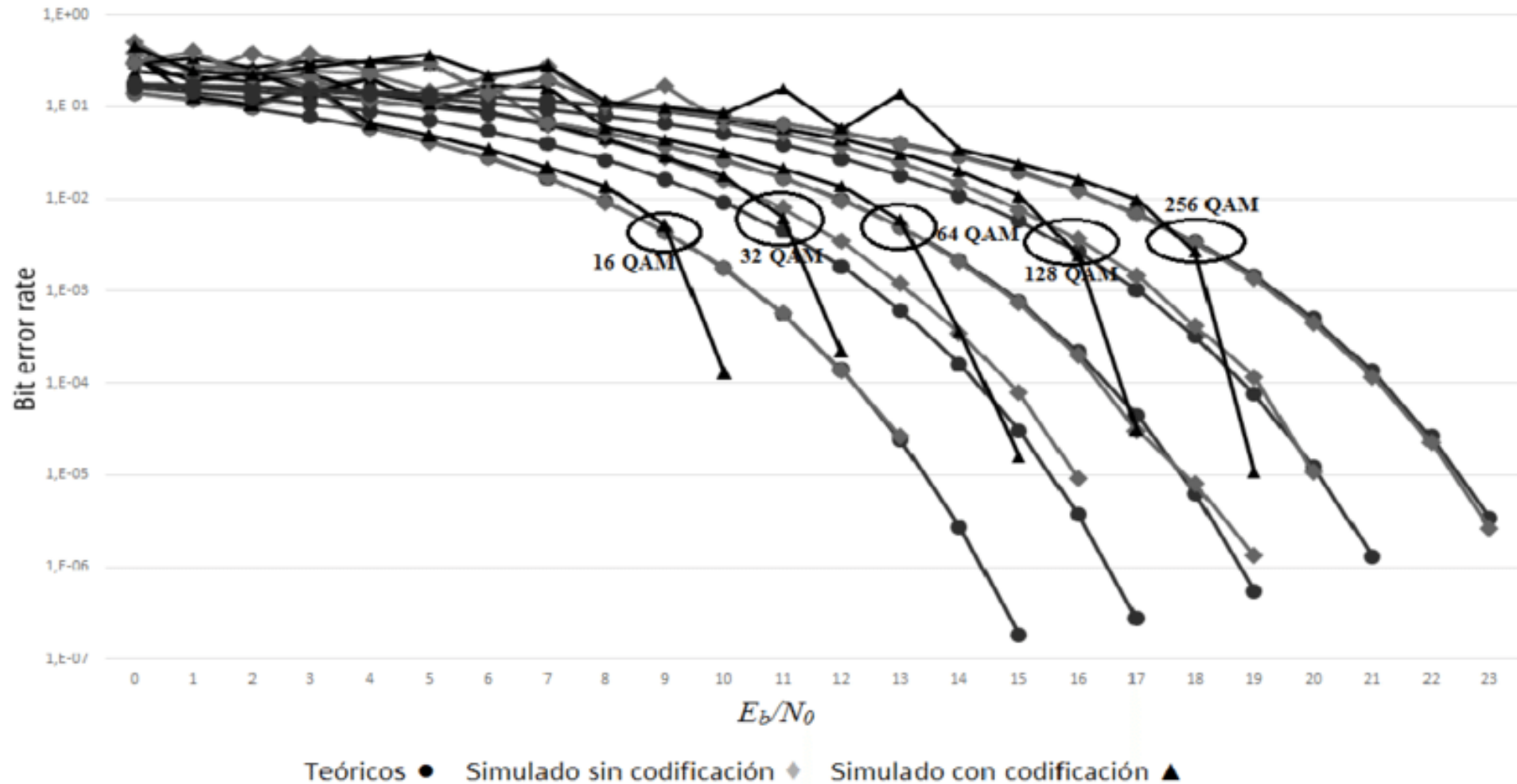
Modulación Digital

¿Que es el BER?

Modulación Digital

- Por sus siglas del inglés significa Bit Error Rate.
- Se define con la cantidad de bits recibidos de manera incorrecta sobre la cantidad de bits enviados.
- Valor idea para este caso debería ser de 0.

Modulación Digital



Tomado de: https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Grafica-BER-vs-Eb-N0-para-las-modulaciones-QAM-propuestas-teoricas-simuladas_fig3_322682828

Modulación Digital

¿Que es la transformada de Hilbert?

Modulación Digital

Es utilizada en el área de telecomunicaciones, y en otros ámbitos.

En aplicación en telecomunicaciones esta transformada permite describir la envolvente compleja de una señal modulada con una portadora real.

$$\hat{s}(t) = \mathcal{H}\{s\}(t) = (h * s)(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau.$$

Modulación Digital

¿Que es un filtro Raised-Cosine?

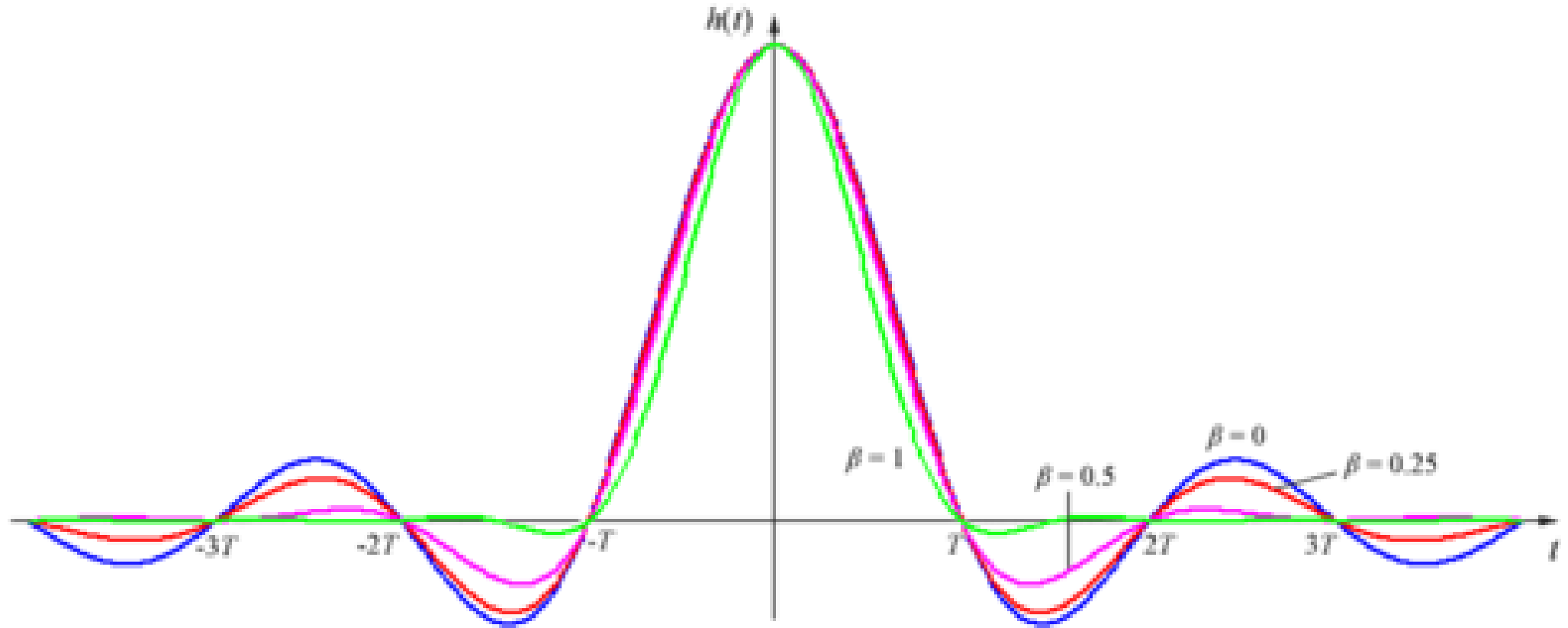
Modulación Digital

- Es un filtro utilizado en el área de comunicaciones eléctricas.
- Es ampliamente utilizado debido a que ayuda a minimizar de manera eficaz el ISI interferencia entre símbolos (No haya traslapes entre símbolos).
- Se denomina Raised-Cosine debido a que la parte espectral nula es un coseno.

$$|H(f)| = \begin{cases} 1.0, & |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi T}{\beta} \left[|f| - \frac{1-\beta}{2T} \right] \right) \right], & \frac{1-\beta}{2T} < |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0, & \text{resto} \end{cases}$$

$0 \leq \beta \leq 1$

Modulación Digital



Modulación Digital

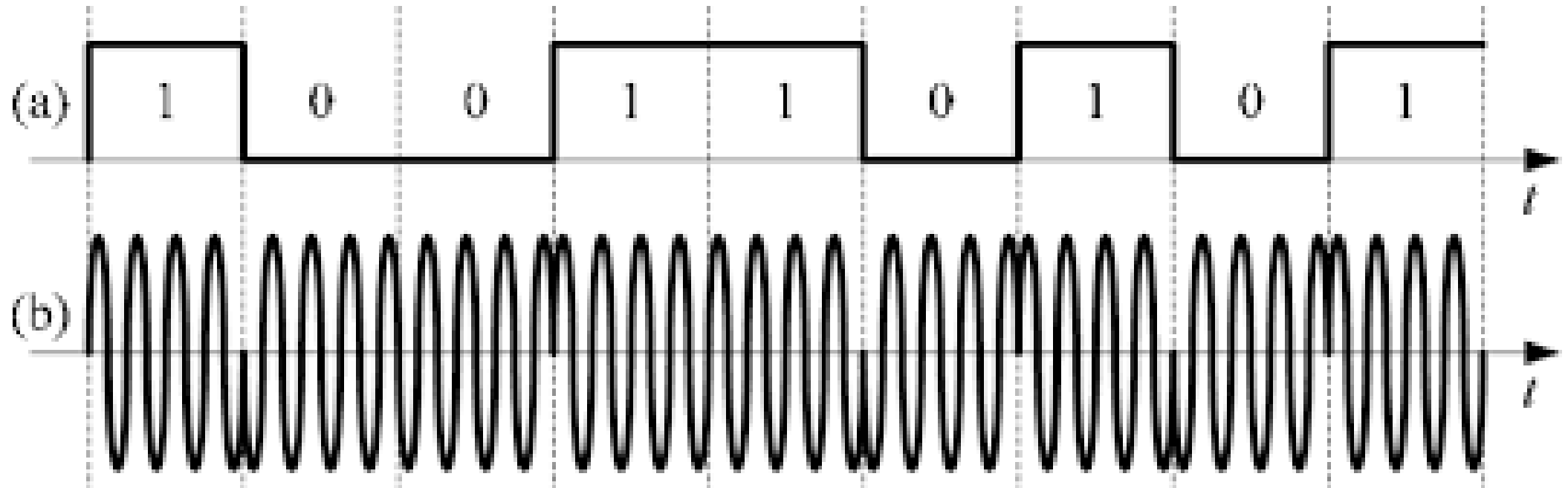
¿Qué son Modulaciones Digitales?

Modulación Digital

¿Qué son Modulaciones Digitales?

La modulación digital es el proceso de codificar una señal de información digital en la amplitud, fase o frecuencia de la señal transmitida

Modulación Digital



Modulación Digital

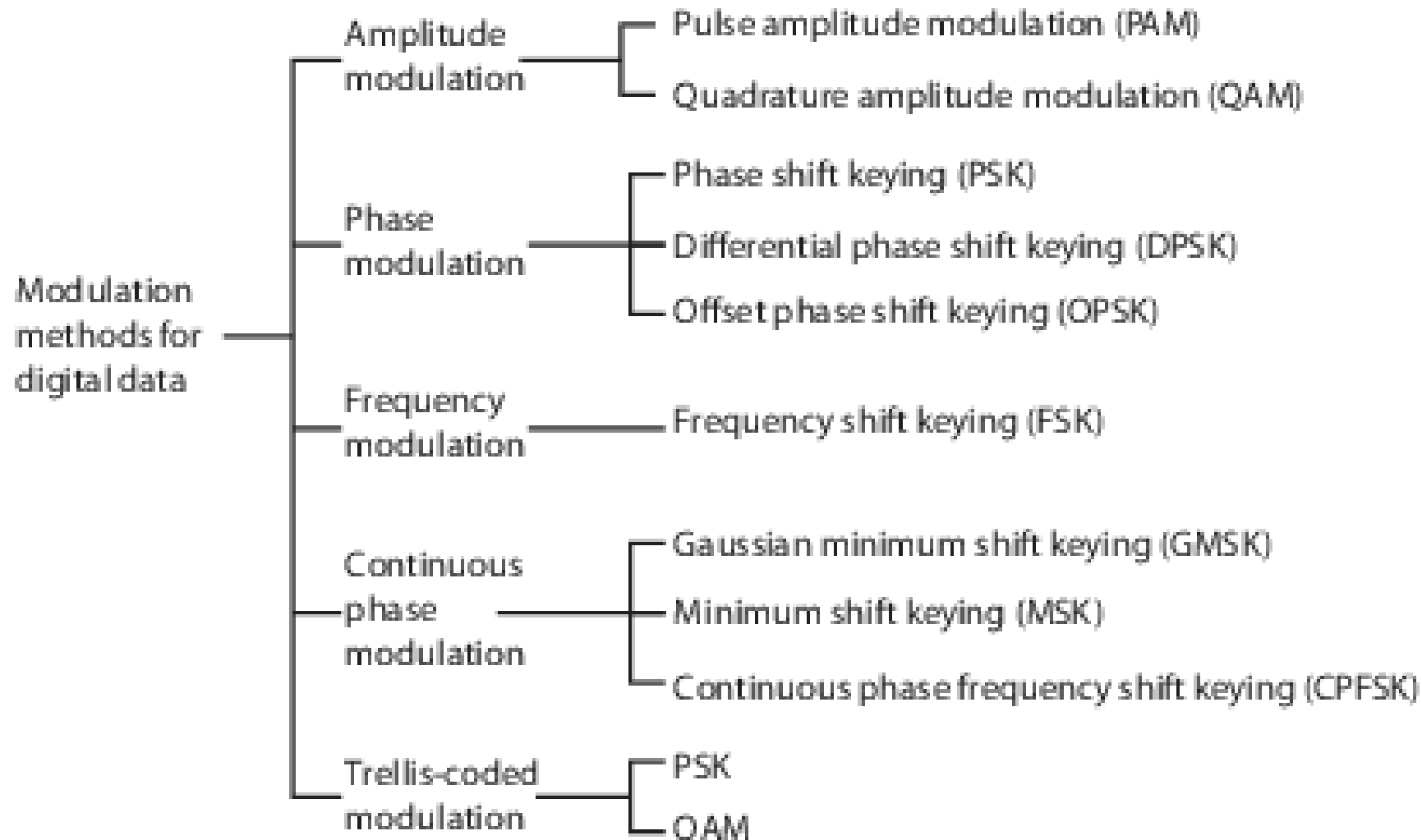
El proceso de codificación afecta el ancho de banda de la señal transmitida y su solidez a las degradaciones del canal.

En general, una técnica de modulación codifica varios bits en un símbolo, y la velocidad de transmisión del símbolo determina el ancho de banda de la señal transmitida.

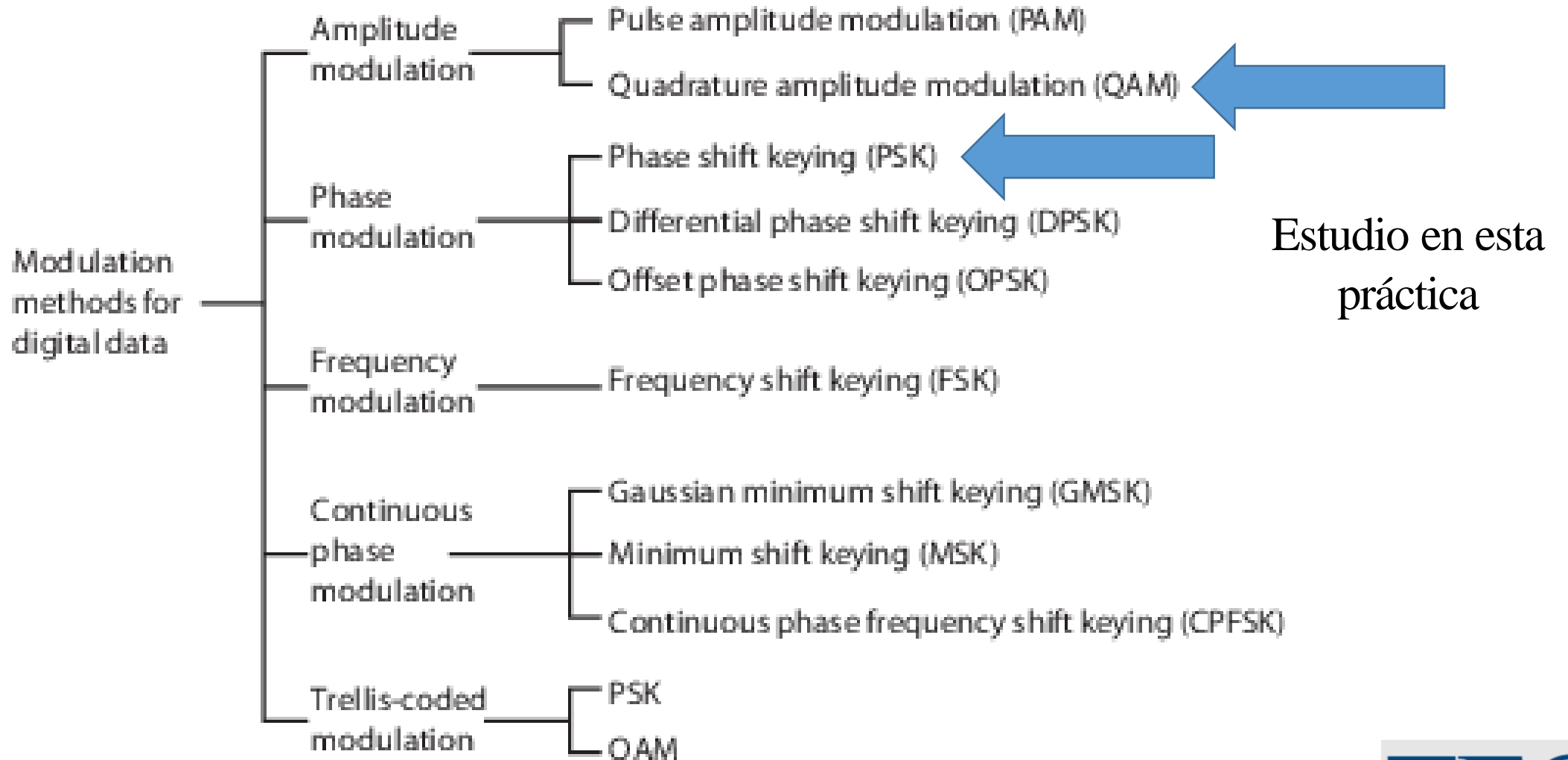
Dado que el ancho de banda de la señal está determinado por la velocidad del símbolo, tener una gran cantidad de bits por símbolo generalmente produce una velocidad de datos más alta para un ancho de banda de señal dado.

Sin embargo, cuanto mayor sea el número de bits por símbolo, mayor será el SNR requerida para un BER objetivo dado.

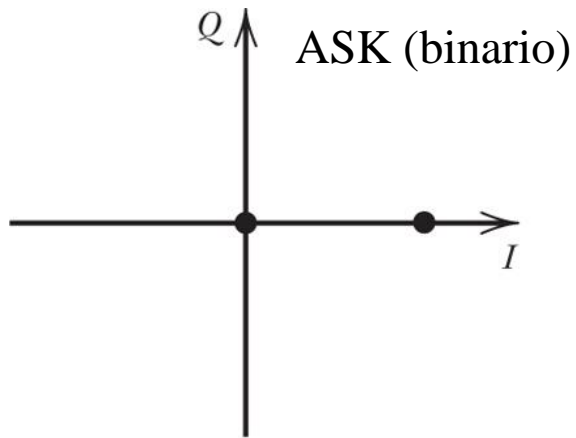
Modulación Digital



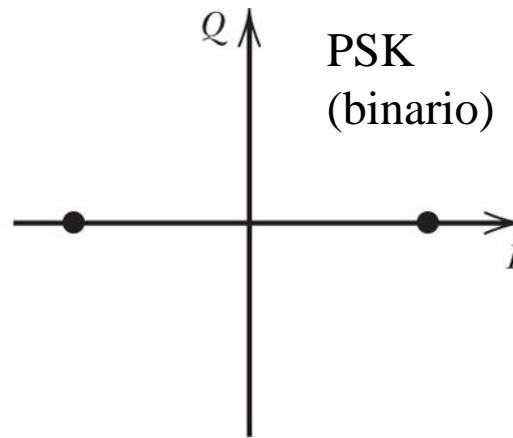
Modulación Digital



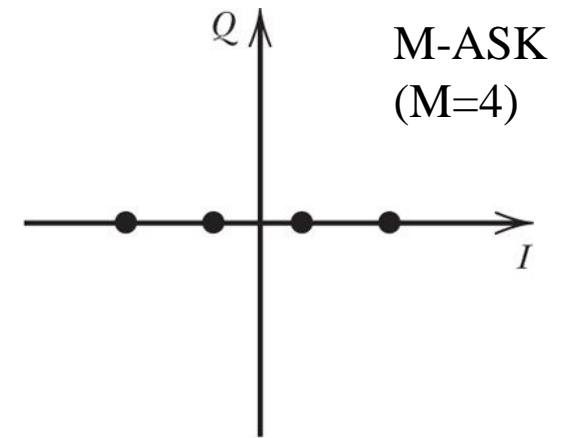
Sistemas M-arios



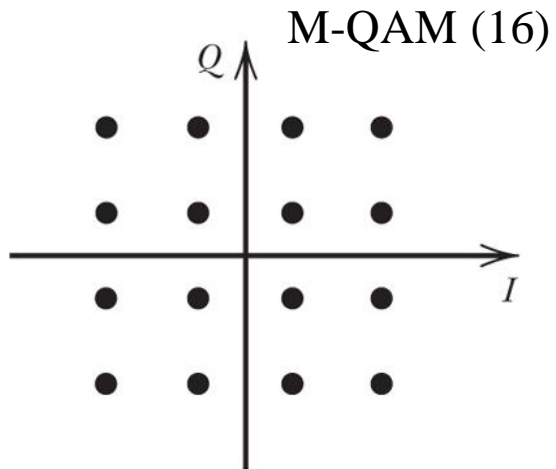
(a)



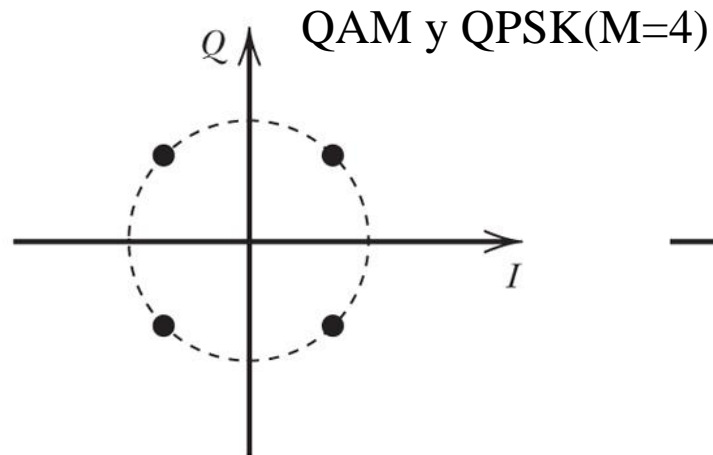
(b)



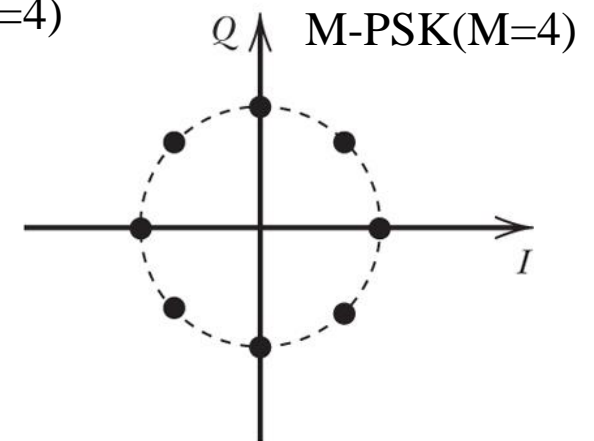
(c)



(d)



(e)



(f)

Modulaciones Digitales

Tipos:

- Diferentes acercamientos basados en ASK, PSK o FSK, coherentes y no coherentes.

Características:

- Mejor utilización del ancho de banda e inmunidad a ruido.
- Posible utilización en sistemas de múltiples símbolos y canales (multiplexación).

Modulación Digital

PSK (Phase-Shift Keying)

- Esquema de modulación digital que consiste en parámetros de una señal periódica en una fase.
- Los datos se representan utilizando cambios discretos en la fase de una señal portadora.
- El numero de cambios puede ser aleatorio y generalmente igual a un potencia de 2.

Modulación Digital

BPSK (Binary Phase Shift Keying)

- Llamado a veces PRK (Phase Reversal Keying ó 2PSK).
- Usa dos fases las cuales están separadas por 180° .
- Su diagrama de constelación solo comprende el eje real.
- Tiene solo disponible 1 bit/símbolo.

Modulación Digital

BPSK (Binary Phase Shift Keying)

La función matemática que describe la modulación BPSK es:

$$s(t) = Am(t) \cos(2\pi f_c t)$$

Definida en un intervalo $0 < t < T$

Donde A es una constante, la función $m(t)$ puede ± 1 , f_c representa la frecuencia de la portadora y T la duración del bit.

Modulación Digital

BPSK (Binary Phase Shift Keying)

La ecuación anterior se puede simplificar como:

$$s_n(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi ft + \pi(1 - n)), \quad n = 0, 1.$$

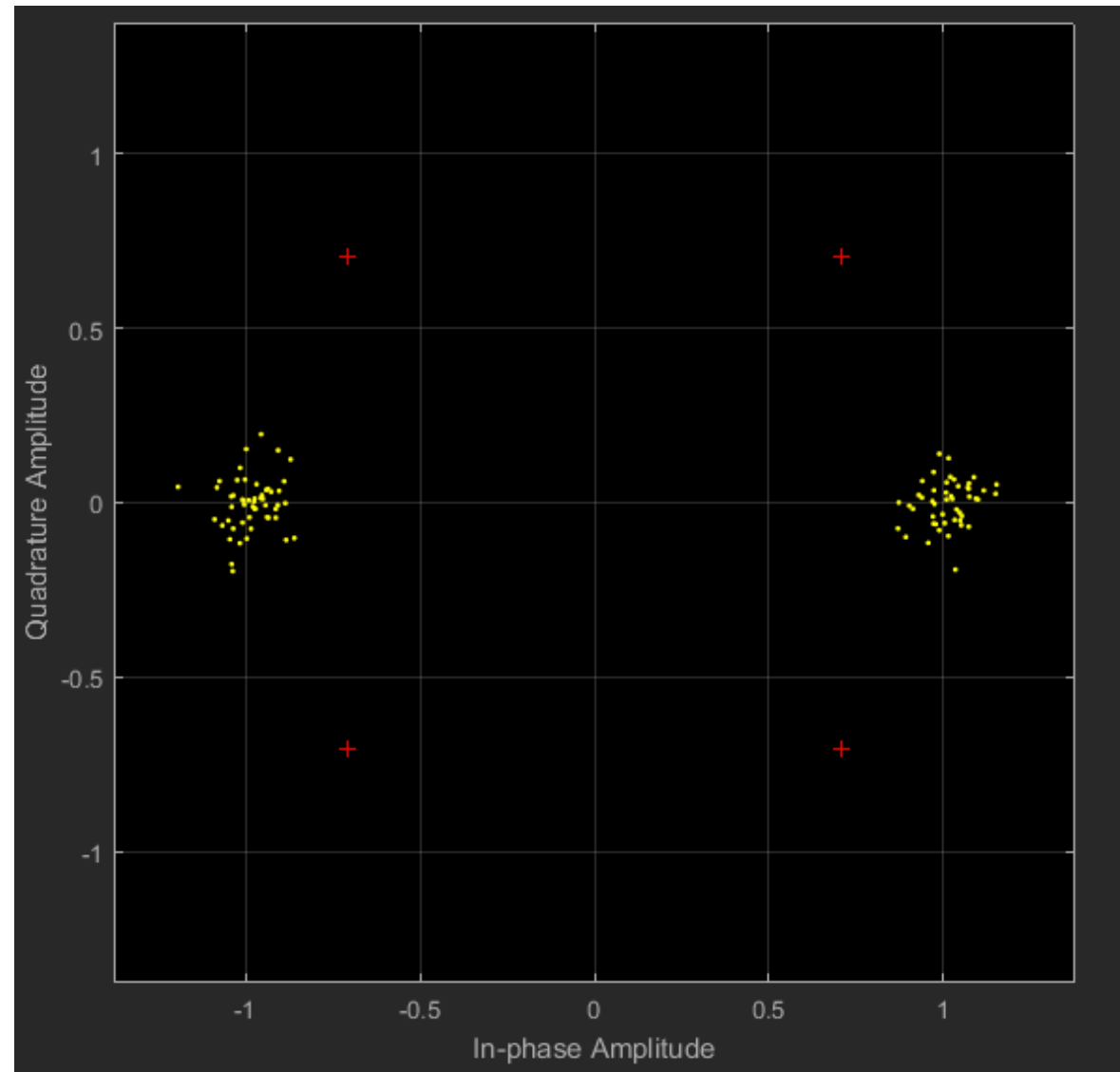
Donde para un “0”

$$s_0(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi ft + \pi) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi ft)$$

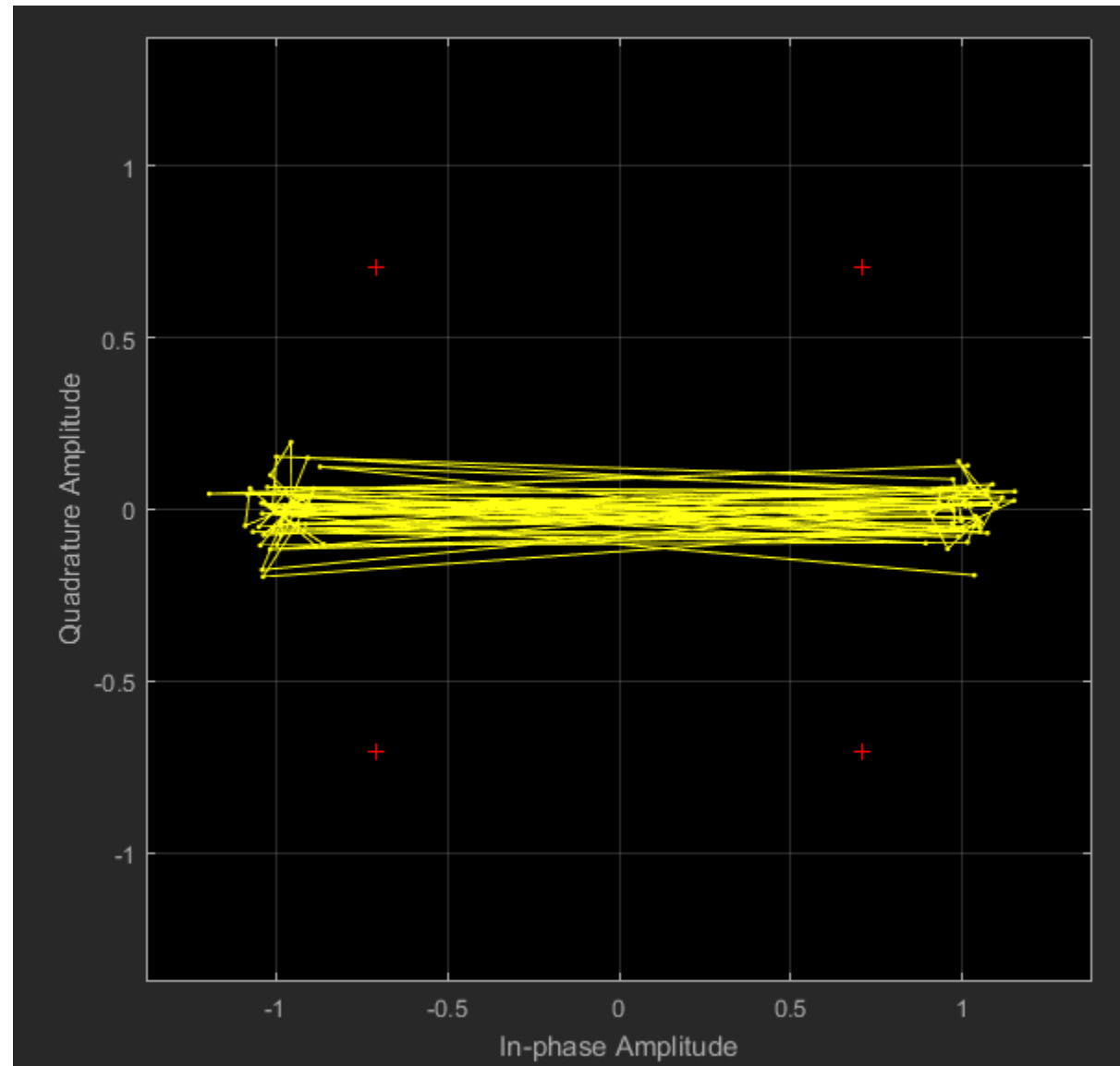
Donde para un “1”

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi ft)$$

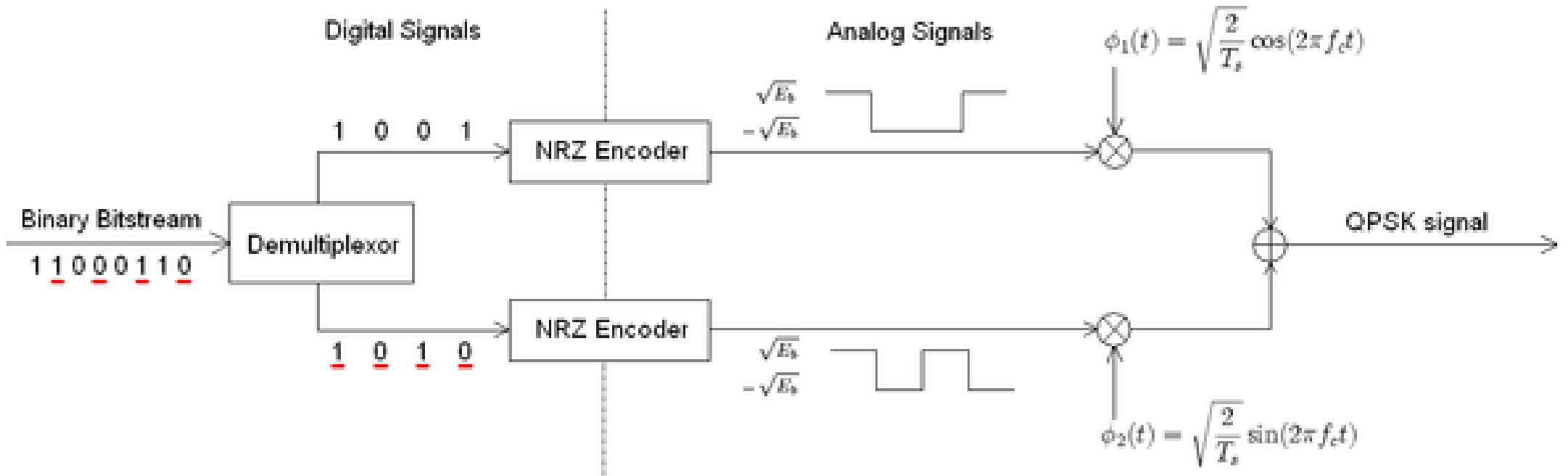
Modulación Digital



Modulación Digital

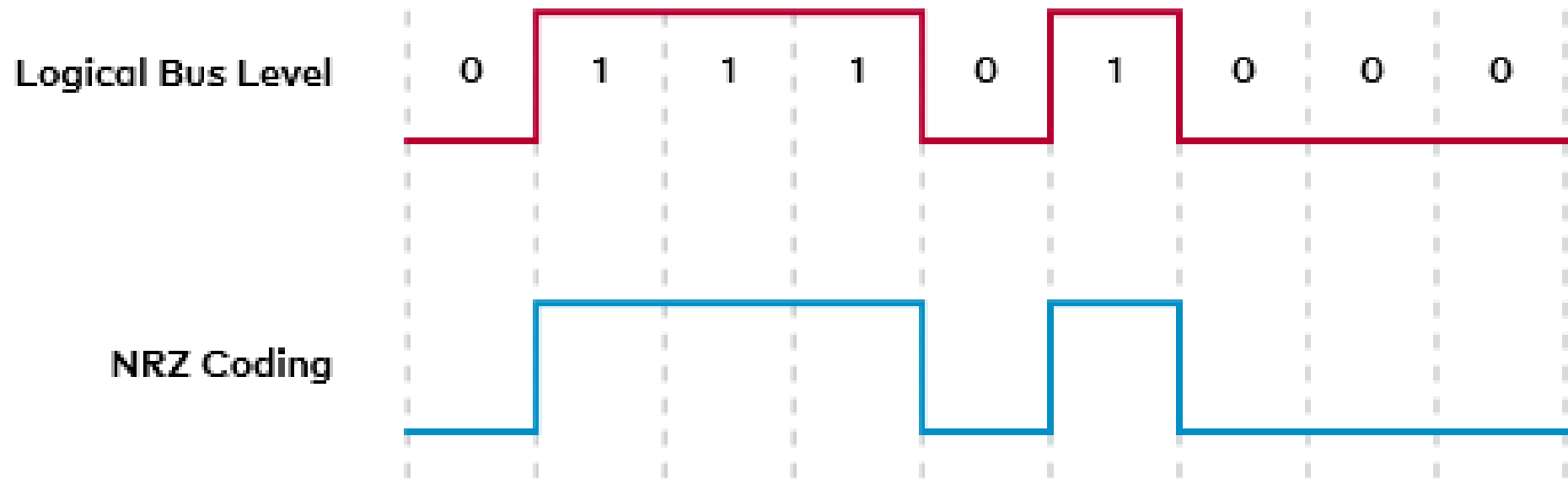


Modulación Digital



Modulación Digital

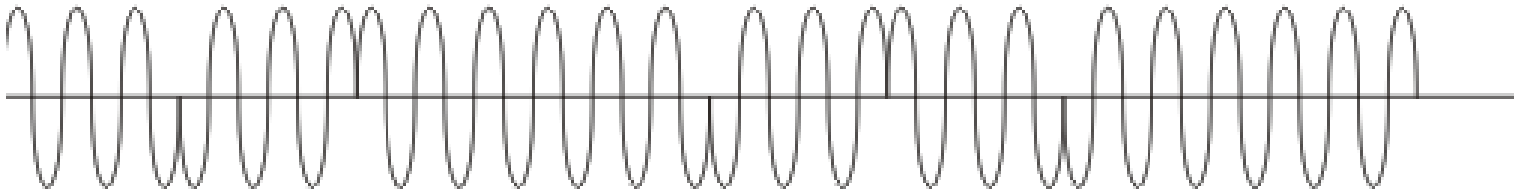
NRZ Coding



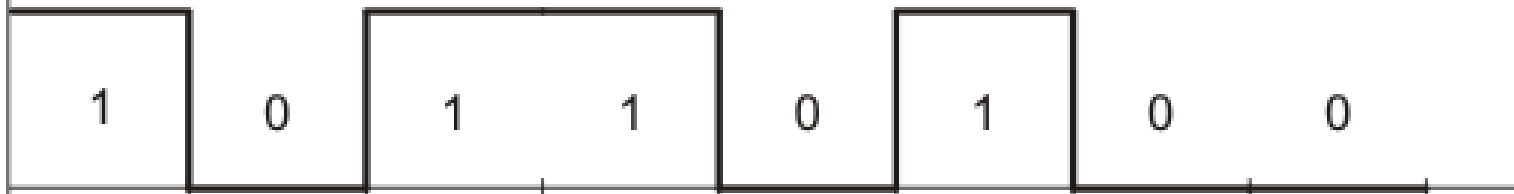
NRZ evita que el voltaje no vuelva a cero entre bits consecutivos de valor uno. Mediante la asignación de un nivel de tensión a cada símbolo se simplifica la tarea de decodificar un mensaje.

Modulación Digital

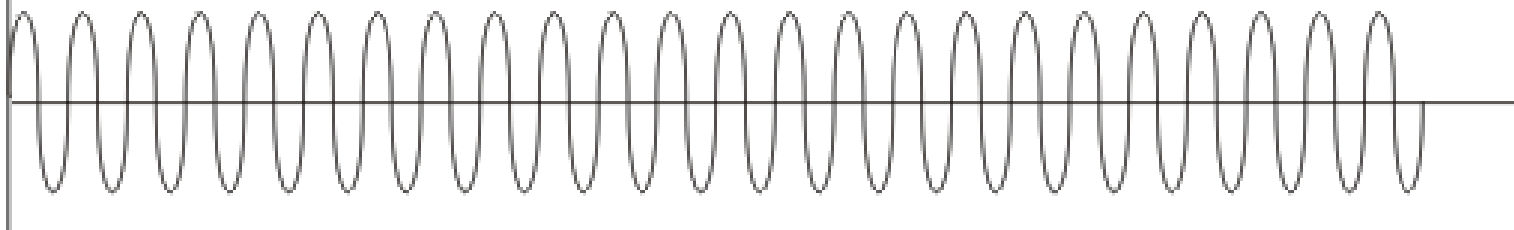
Señal modulada



Señal moduladora



Señal portadora



Modulación Digital

QAM (Modulación en Amplitud y Cuadratura)

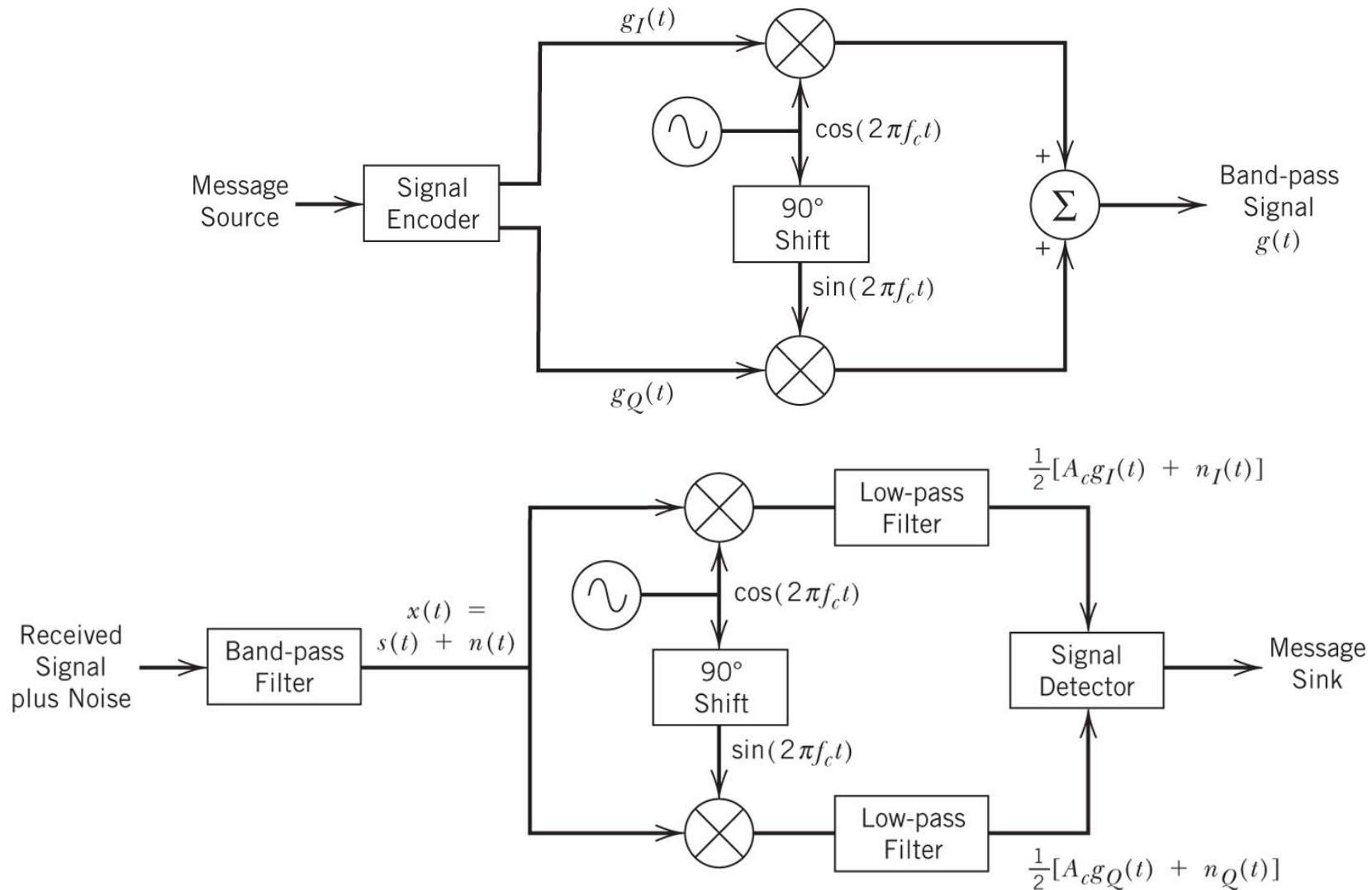
- Esquema de modulación digital en la que el mensaje esta contenido en amplitud y fase.
- Se transmiten dos mensajes independientes por un único camino.
- Se consigue modulando la portadora desfasada en 90° entre uno y otro mensaje
- Dos canales ortogonales del mismo ancho de banda
- Eficiencia en el ancho de banda.

Modulación Digital

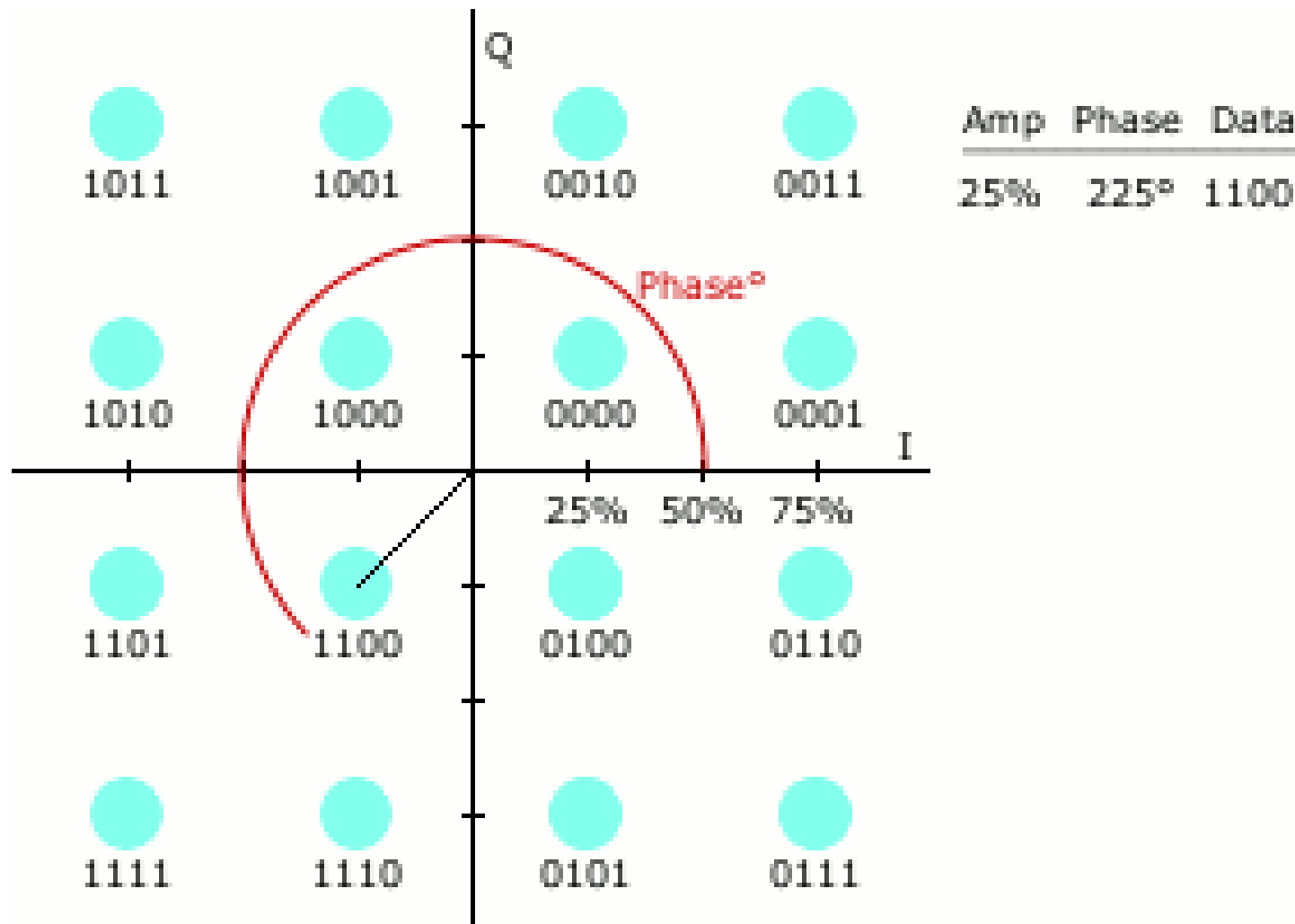
QAM (Modulación en Amplitud y Cuadratura)

- Modulación empleada en módems de velocidad superiores a los 2400 bps.
- Se utiliza en sistemas de televisión, microondas, etc.
- Es la base de la modulación TCM Trellis Coded Modulation, consigue velocidades de transmisión muy elevadas.

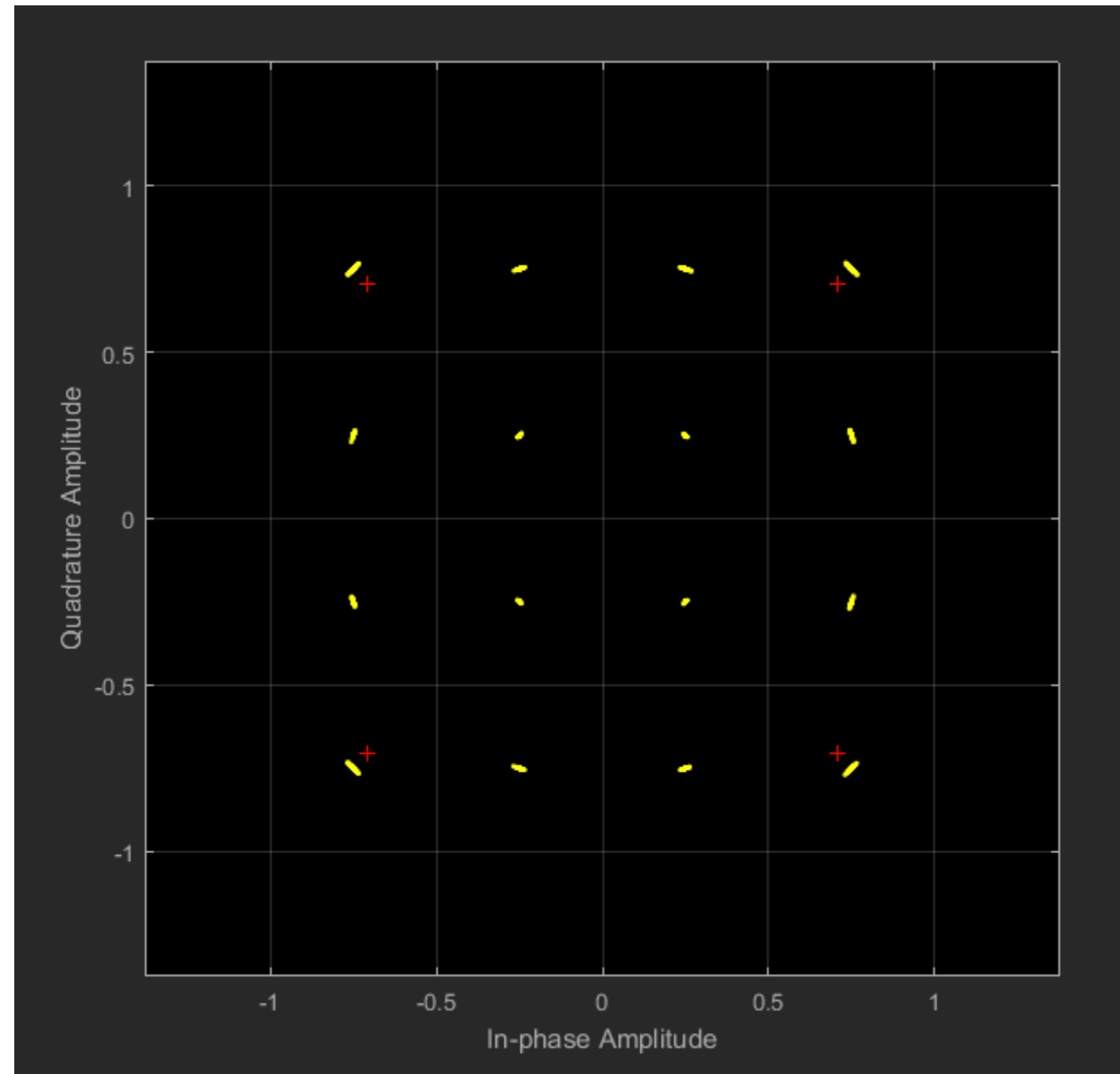
Modulación Digital



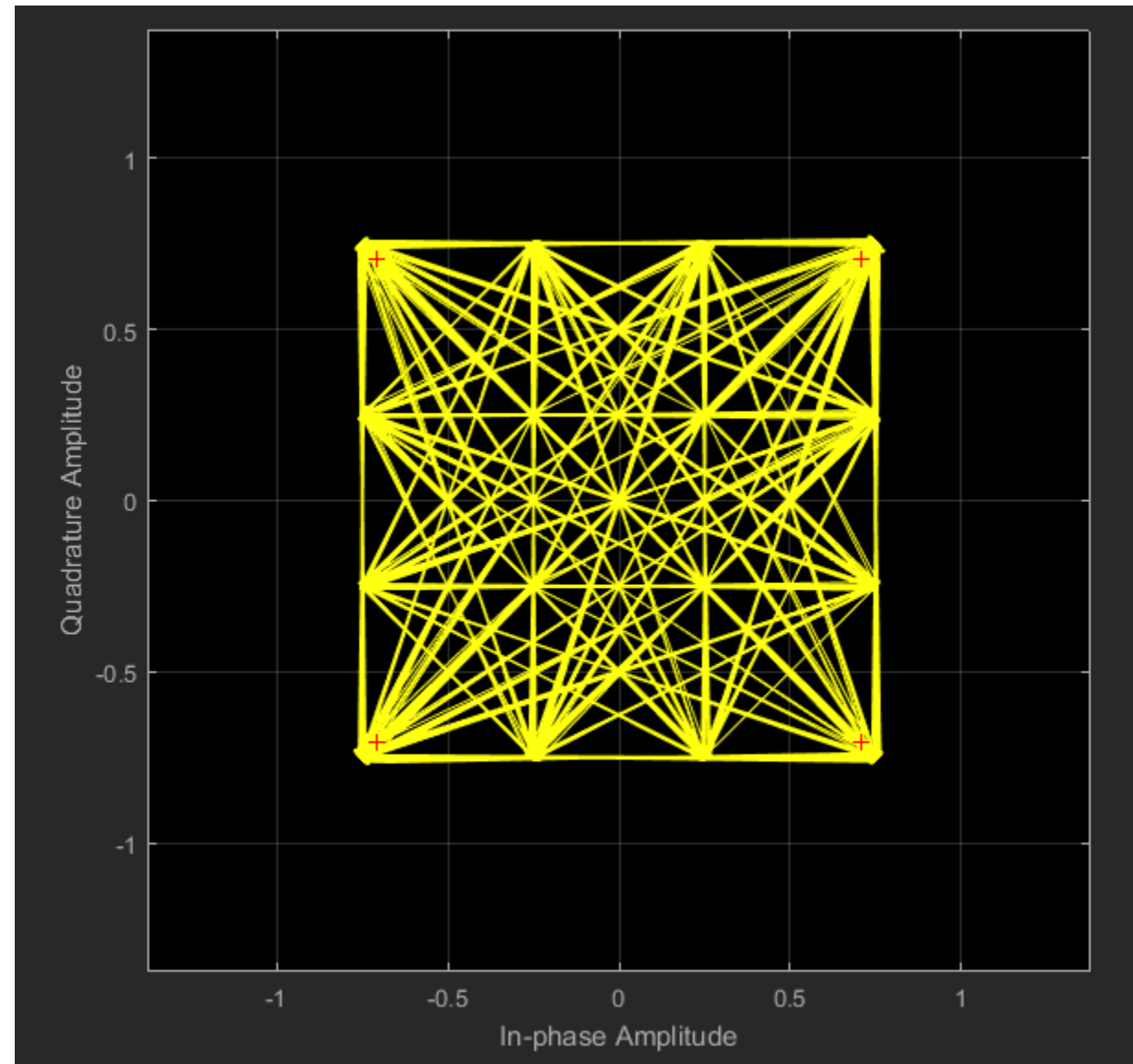
Modulación Digital



Modulación Digital



Modulación Digital



Bibliografía

[1] Hayt, W. *Teoría Electromagnética*, Mc Graw-Hill, Octava Edición, 2013.

[2] Sadiku M. *Elementos de Electromagnetismo*, Alfaomega, Traducción de la tercera edición en inglés, México, 2004.

Para más información pueden ingresar a: tec-digital ó <http://www.ie.tec.ac.cr/sarriola/>

Esta presentación se ha basado parcialmente en compilación para semestre anteriores de cursos de Laboratorio de Teoría Electromagnética II, Laboratorio de Comunicaciones Eléctricas y Comunicaciones Eléctricas I por Aníbal Coto-Cortés, Renato Rimolo-Donadio, Sergio Arriola-Valverde y Luis Carlos Rosales.

