

# Sistemas de Comunicación

## - Comunicaciones Digitales -

## - QAM -

Ph.D. Cristian Guarnizo Lemus

[cristianguarnizo@itm.edu.co](mailto:cristianguarnizo@itm.edu.co)

# Contenido

1. 8-QAM
2. 16-QAM
3. Eficiencia de Ancho de Banda
4. Recuperación de Portadora

# 1. QAM

La modulación de amplitud en cuadratura (QAM) es una forma de modulación digital, donde la información digital está contenida tanto en **la amplitud** como en **la fase** de la portadora transmitida.

# 1. 8-QAM

La ocho QAM es una técnica de codificación M-aria en la que  $M=8$ . A diferencia de la 8-PSK, la señal de salida de un modulador 8-QAM **no es una señal de amplitud constante**.

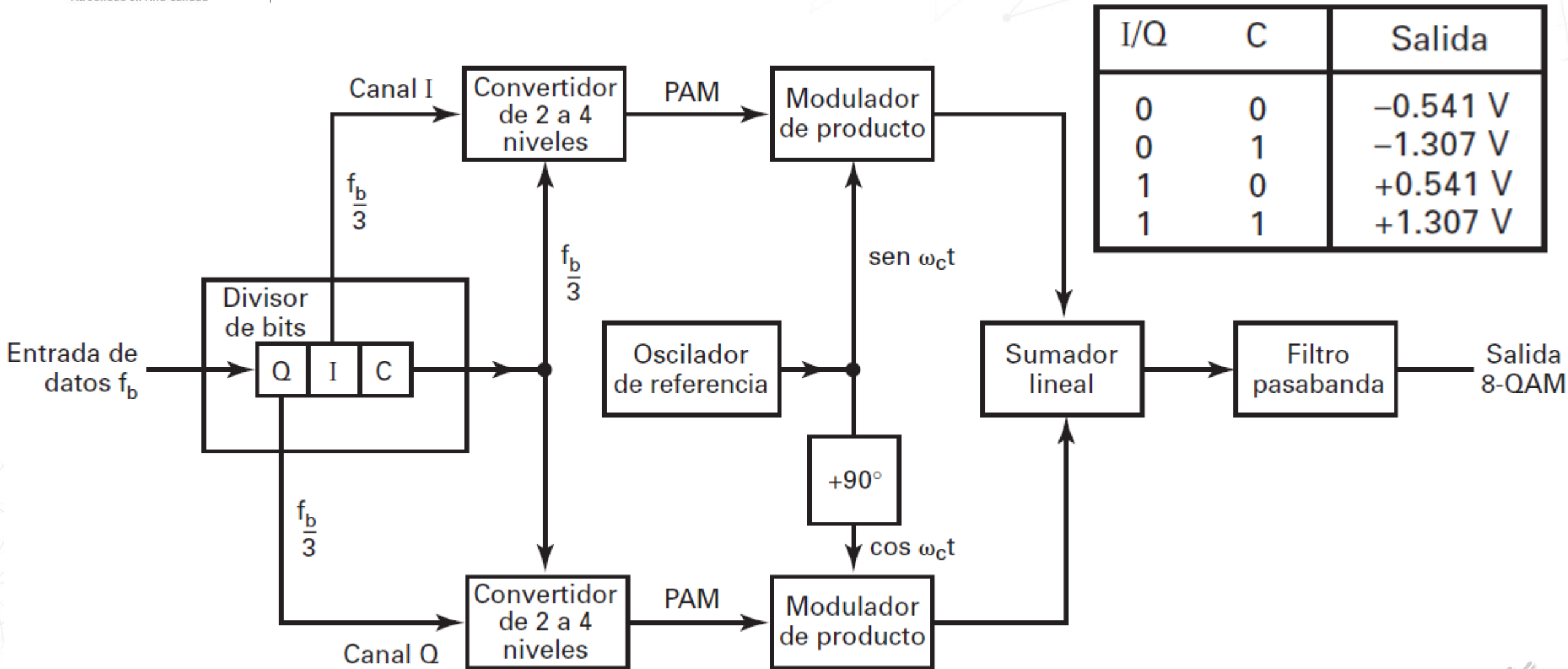
# 1. Modulador 8-QAM

Los datos se dividen en grupos de 3 bits: las corrientes I, Q y C de bits, cada una con  $f_{bI} = f_{bQ} = f_{bC} = f_b/3$ .

Los bits I y Q determinan la polaridad de la señal PAM en la salida de los convertidores de 2 a 4 niveles.

El bit C determina la magnitud.

# 1. Modulador 8-QAM





# 1. Modulador 8-QAM

**Ejemplo (Tomasi, 12-8):**

Calcular la amplitud y la fase de salida del transmisor 8-QAM de la figura anterior, para una entrada de bits  $Q=0$ ,  $I=0$  y  $C=0$  (000).

Para  $I=0$  y  $C=0$  se tiene

$$I = (-0.541) \sin(\omega_c t)$$

Para  $Q=0$  y  $C=0$  se tiene

$$Q = (-0.541) \cos(\omega_c t)$$

$$0.765 \sin(\omega_c t - 135^\circ)$$

# 1. Modulador 8-QAM

## Ejercicio:

Calcular la amplitud y la fase de salida del transmisor 8-QAM, para una entrada de bits  $Q=1$ ,  $I=0$  y  $C=1$  (101).

I/Q	C	Salida
0	0	-0.541 V
0	1	-1.307 V
1	0	+0.541 V
1	1	+1.307 V

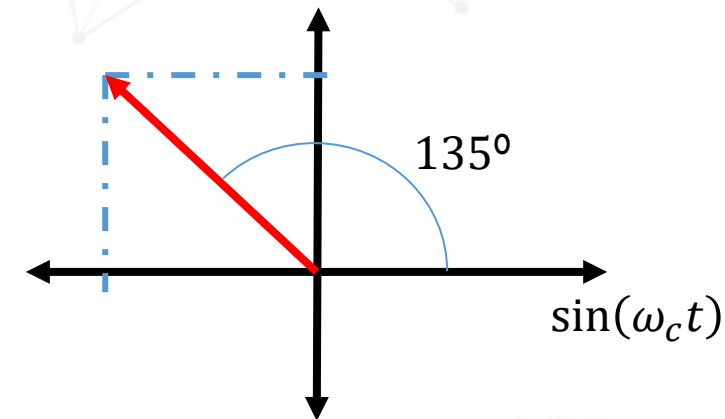
Para  $I=0$  y  $C=1$  se tiene

$$I = (-1.307) \sin(\omega_c t)$$

Para  $Q=1$  y  $C=1$  se tiene

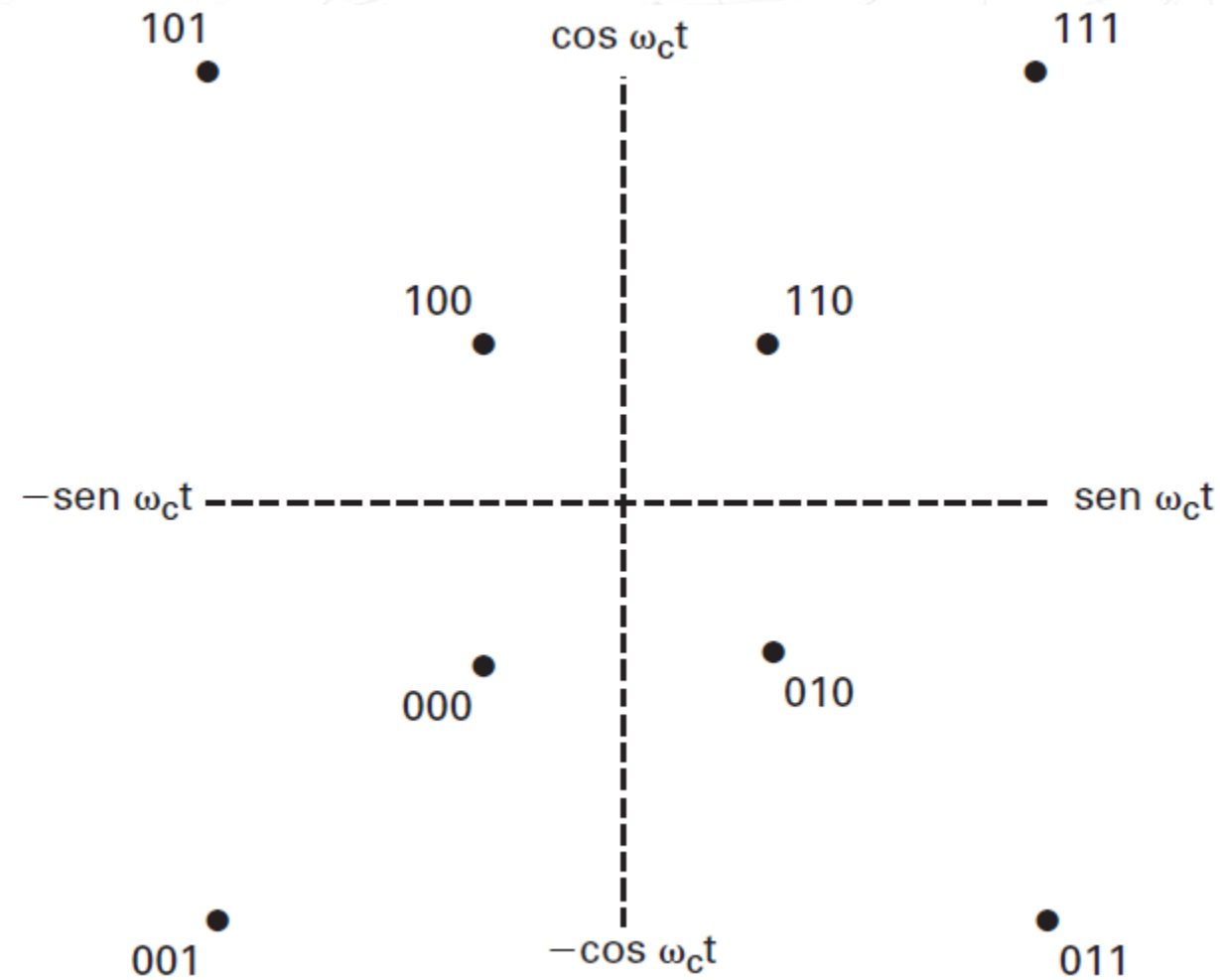
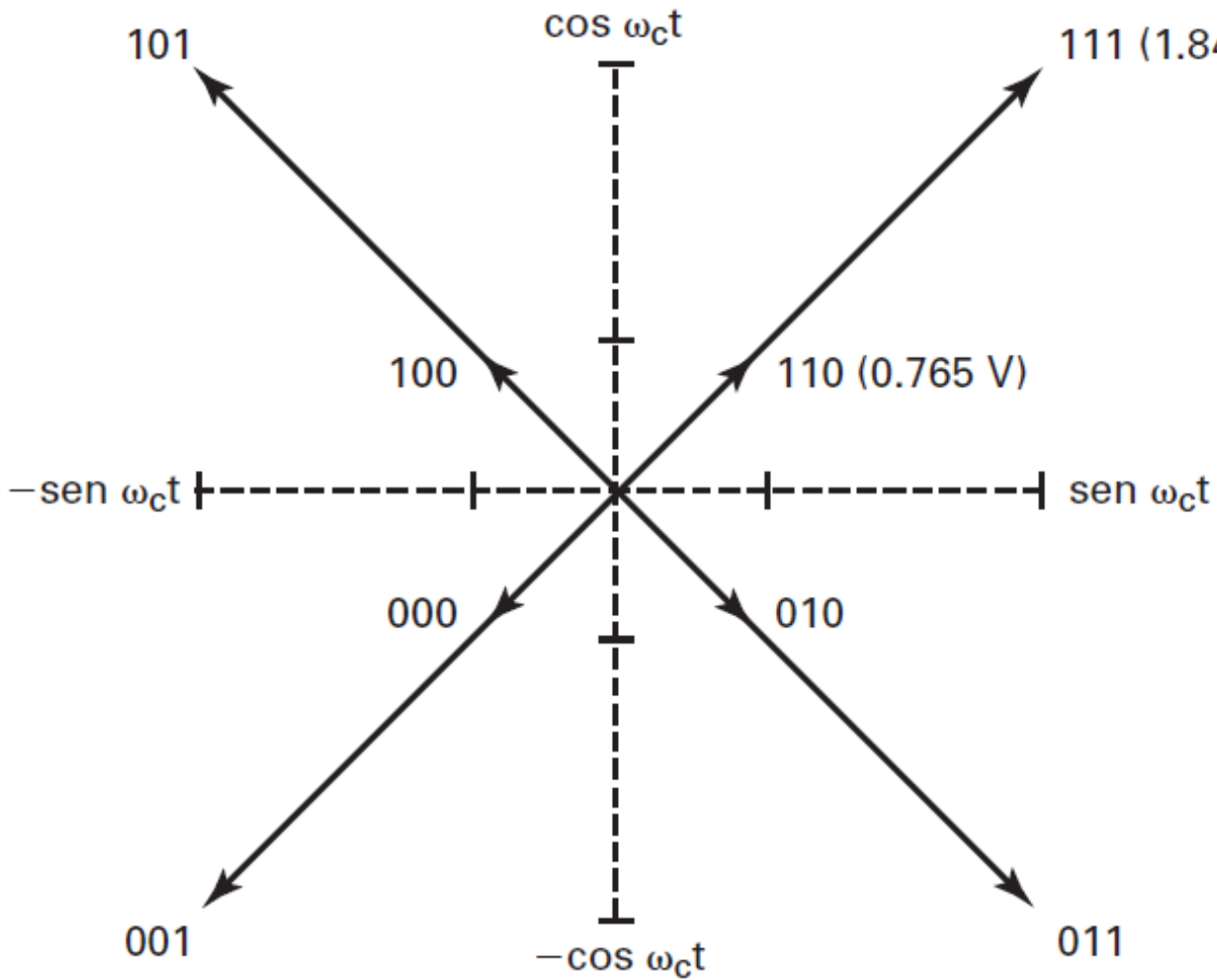
$$Q = (+1.307) \cos(\omega_c t)$$

$$1.848 \sin(\omega_c t + 135^\circ)$$





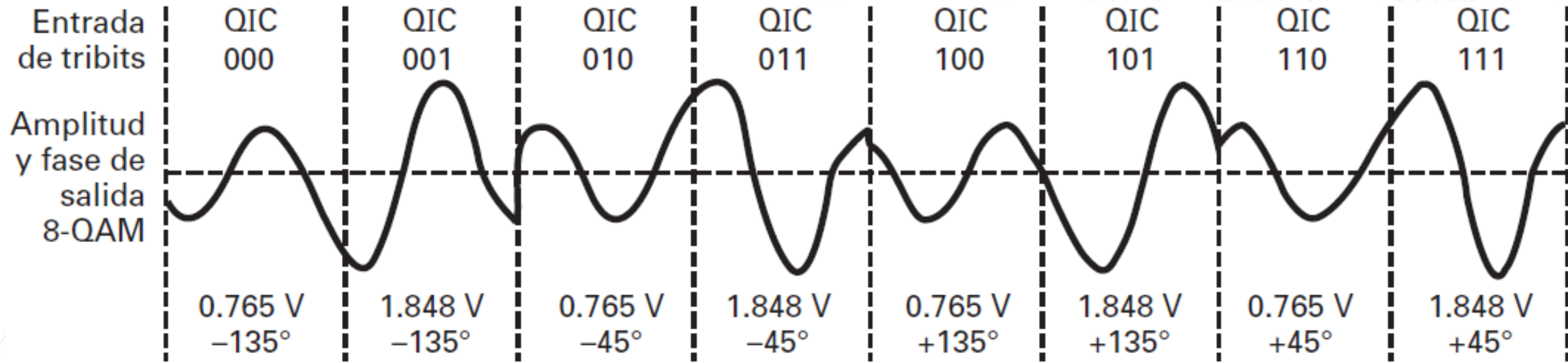
# 1. Modulador 8-QAM



# 1. Modulador 8-QAM

Entrada binaria			Salida 8-QAM	
Q	I	C	Amplitud	Fase
0	0	0	0.765 V	$-135^\circ$
0	0	1	1.848 V	$-135^\circ$
0	1	0	0.765 V	$-45^\circ$
0	1	1	1.848 V	$-45^\circ$
1	0	0	0.765 V	$+135^\circ$
1	0	1	1.848 V	$+135^\circ$
1	1	0	0.765 V	$+45^\circ$
1	1	1	1.848 V	$+45^\circ$

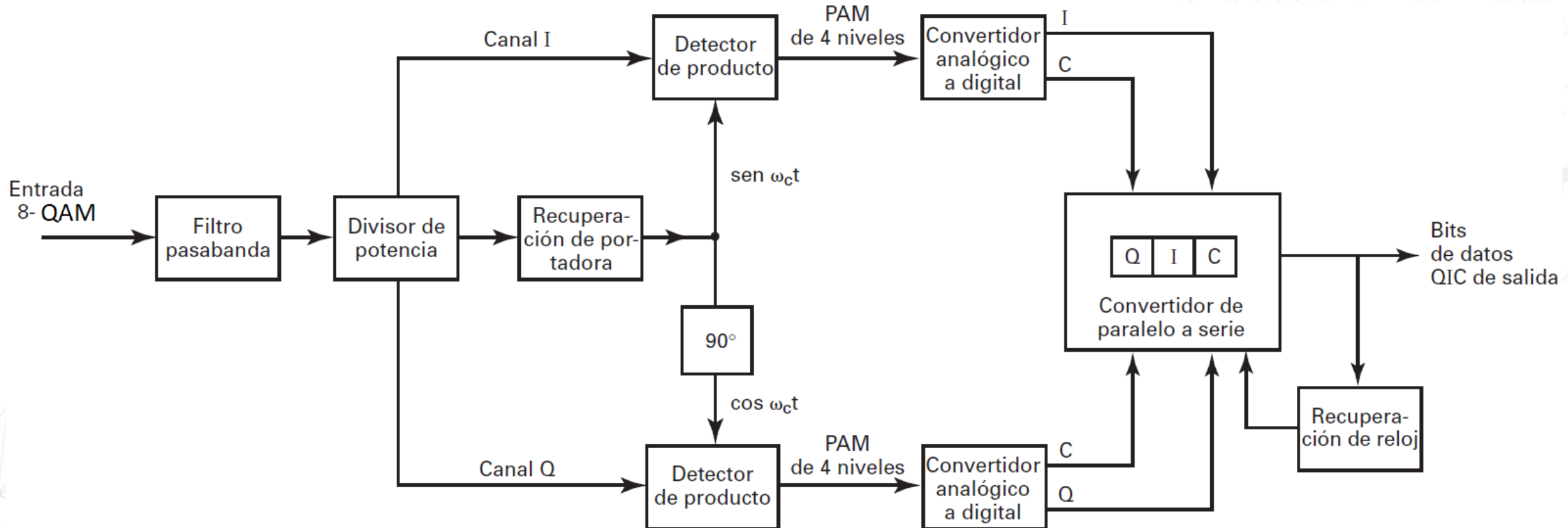
# 1. Modulador 8-QAM



# 1. 8-QAM – Ancho de Banda

Recordemos que  $f_{bI} = f_{bQ} = f_{bC} = f_b/3$ , entonces la máxima frecuencia de la moduladora y la máxima rapidez de cambio a la salida es  $\frac{f_b}{3}$  igual que para 8-PSK.

# 1. Receptor 8-QAM



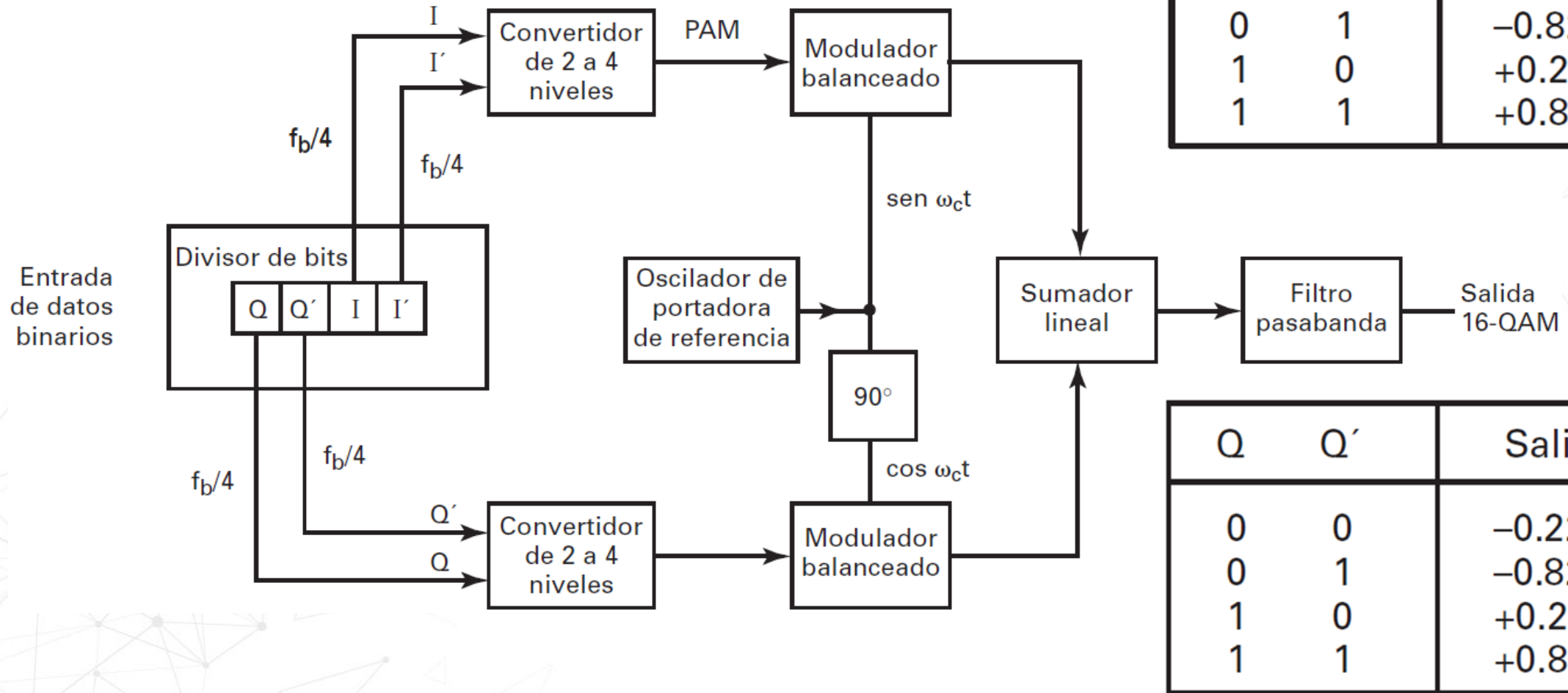


## 2. 16-QAM

Al igual que 16-PSK, la 16-QAM es un sistema M-ario con  $M=16$ . Los datos de entrada se manejan en grupo de 4 bits. Los datos binarios se dividen en 4 canales: I, I', Q y Q'. La rapidez en bits en cada canal es  $f_b/4$ . Los bits I y Q determinan la polaridad en la salida. Mientras, que los bits I' y Q' determinan la magnitud.



## 2. 16-QAM



I	I'	Salida
0	0	-0.22 V
0	1	-0.821 V
1	0	+0.22 V
1	1	+0.821 V

Q	Q'	Salida
0	0	-0.22 V
0	1	-0.821 V
1	0	+0.22 V
1	1	+0.821 V

## 2. 16-QAM

Ejemplo (Tomasi, 12-9):

Calcular la amplitud y la fase de salida del transmisor 16-QAM, para una entrada de bits  $Q=0$ ,  $Q'=0$ ,  $I=0$  y  $I'=0$  (0000).

Para  $I=0$  y  $I'=0$  se tiene

$$I = (-0.22) \sin(\omega_c t)$$

Para  $Q=0$  y  $Q'=0$  se tiene

$$Q = (-0.22) \cos(\omega_c t)$$

$$\left. \begin{array}{l} I = (-0.22) \sin(\omega_c t) \\ Q = (-0.22) \cos(\omega_c t) \end{array} \right\} 0.311 \sin(\omega_c t - 135^\circ)$$

## 2. 16-QAM

### Ejercicio:

Calcular la amplitud y la fase de salida del transmisor 8-QAM, para una entrada de bits  $Q=1$ ,  $Q'=0$ ,  $I=1$  y  $I'=0$  (1010).

I	I'	Salida
0	0	-0.22 V
0	1	-0.821 V
1	0	+0.22 V
1	1	+0.821 V

Q	Q'	Salida
0	0	-0.22 V
0	1	-0.821 V
1	0	+0.22 V
1	1	+0.821 V

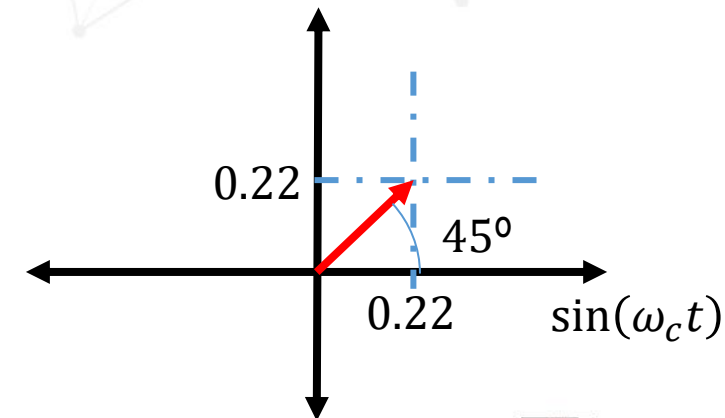
Para  $I=1$  y  $I'=0$  se tiene

$$I = (+0.22) \sin(\omega_c t)$$

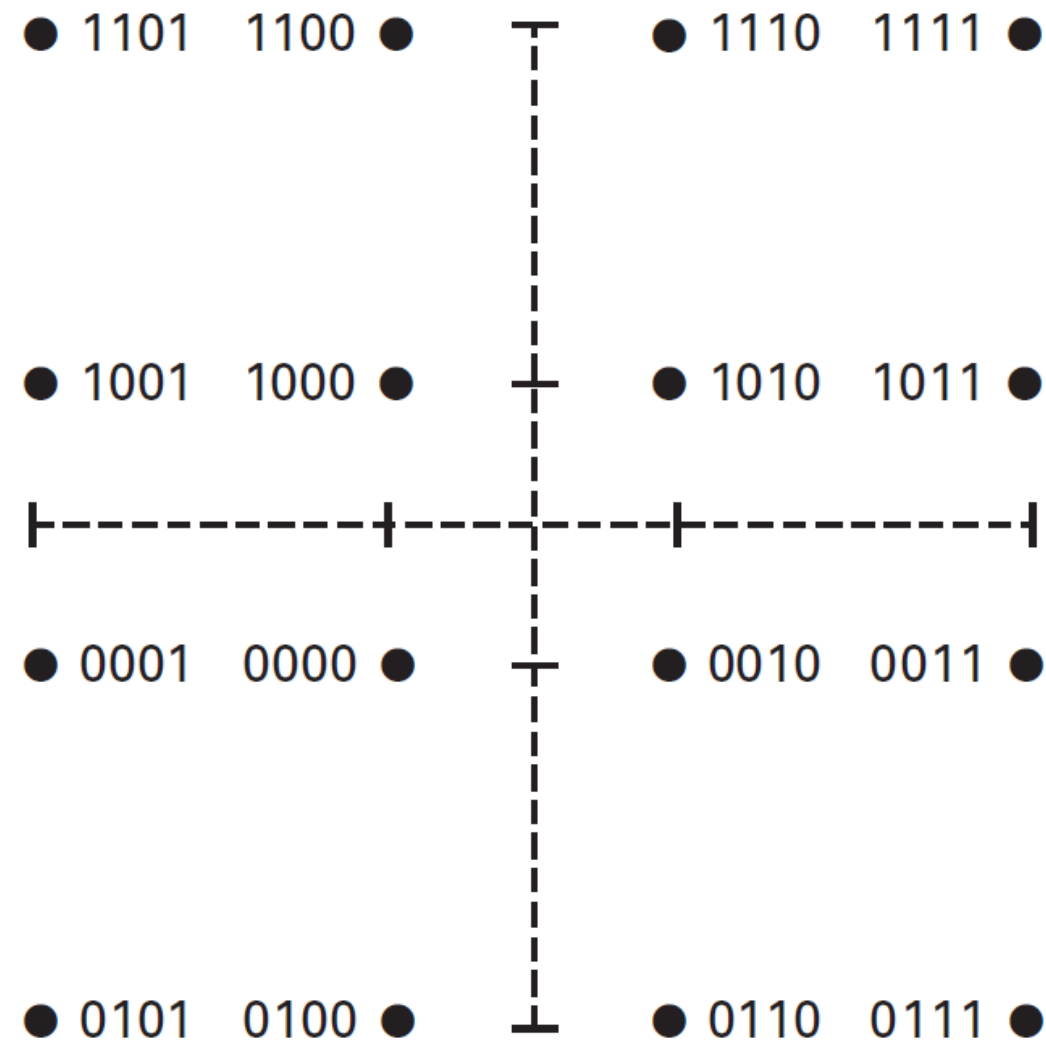
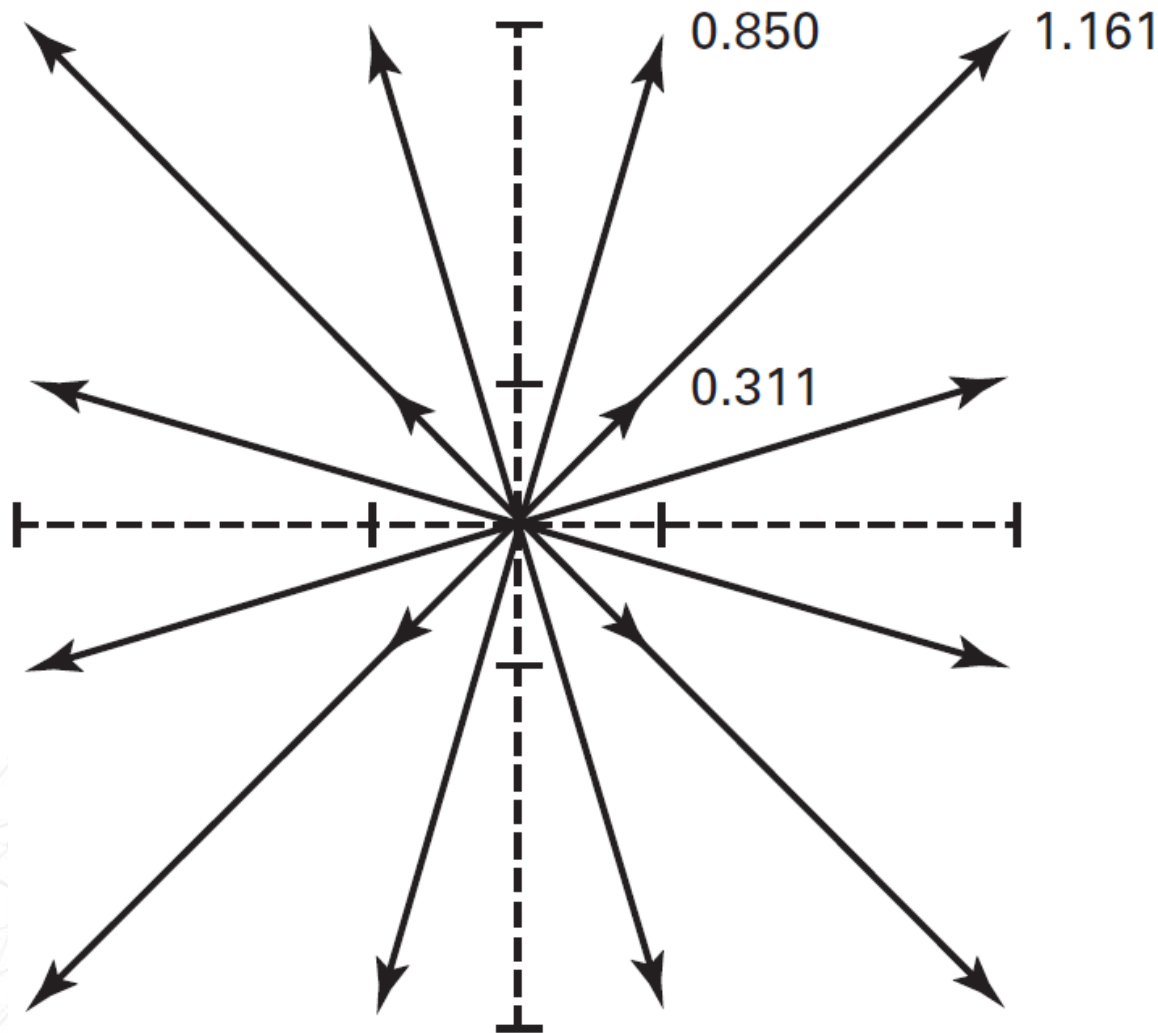
Para  $Q=1$  y  $Q'=0$  se tiene

$$Q = (+0.22) \cos(\omega_c t)$$

$$0.311 \sin(\omega_c t + 45^\circ)$$



## 2. 16-QAM



## 2. 16-QAM

Entrada binaria				Salida 16-QAM	
Q	Q'	I	I'		
0	0	0	0	0.311 V	-135°
0	0	0	1	0.850 V	-165°
0	0	1	0	0.311 V	-45°
0	0	1	1	0.850 V	-15°
0	1	0	0	0.850 V	-105°
0	1	0	1	1.161 V	-135°
0	1	1	0	0.850 V	-75°
0	1	1	1	1.161 V	-45°
1	0	0	0	0.311 V	135°
1	0	0	1	0.850 V	165°
1	0	1	0	0.311 V	45°
1	0	1	1	0.850 V	15°
1	1	0	0	0.850 V	105°
1	1	0	1	1.161 V	135°
1	1	1	0	0.850 V	75°
1	1	1	1	1.161 V	45°

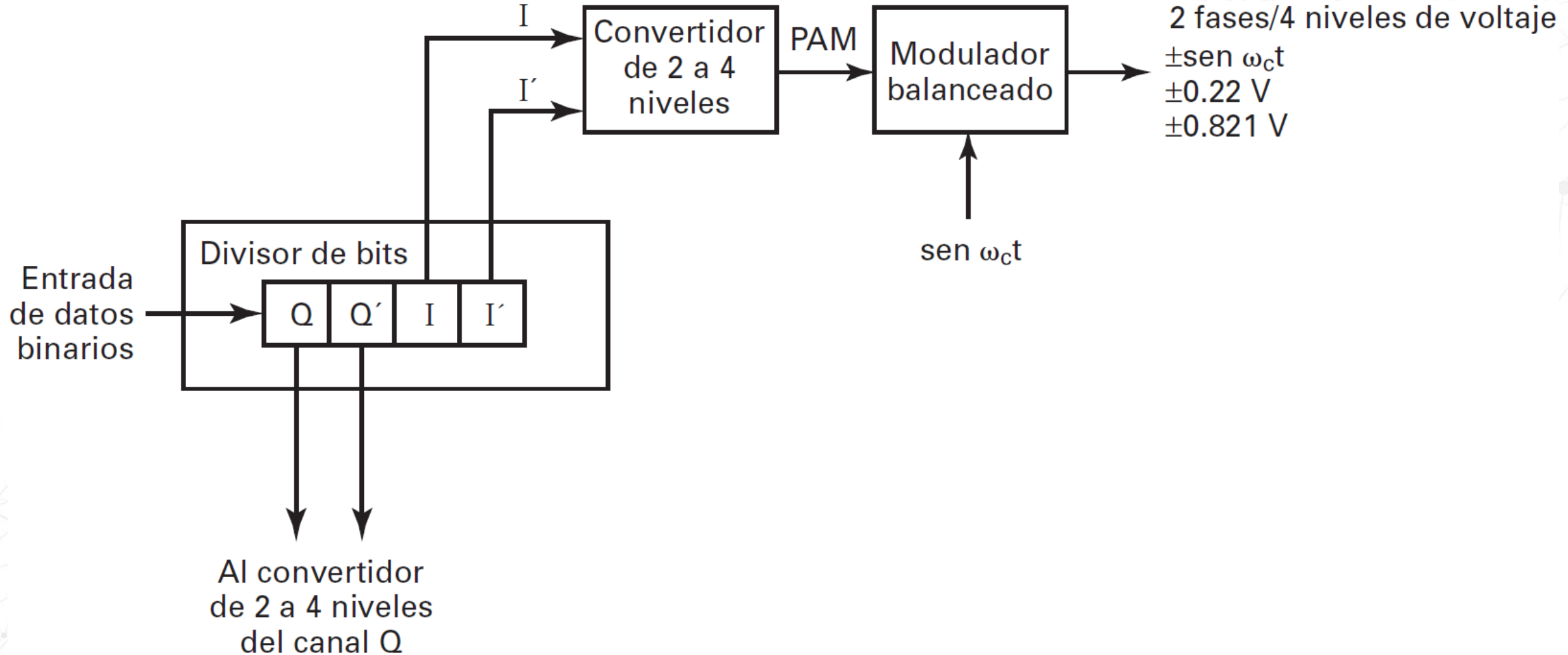


## 2. 16-QAM – Ancho de Banda

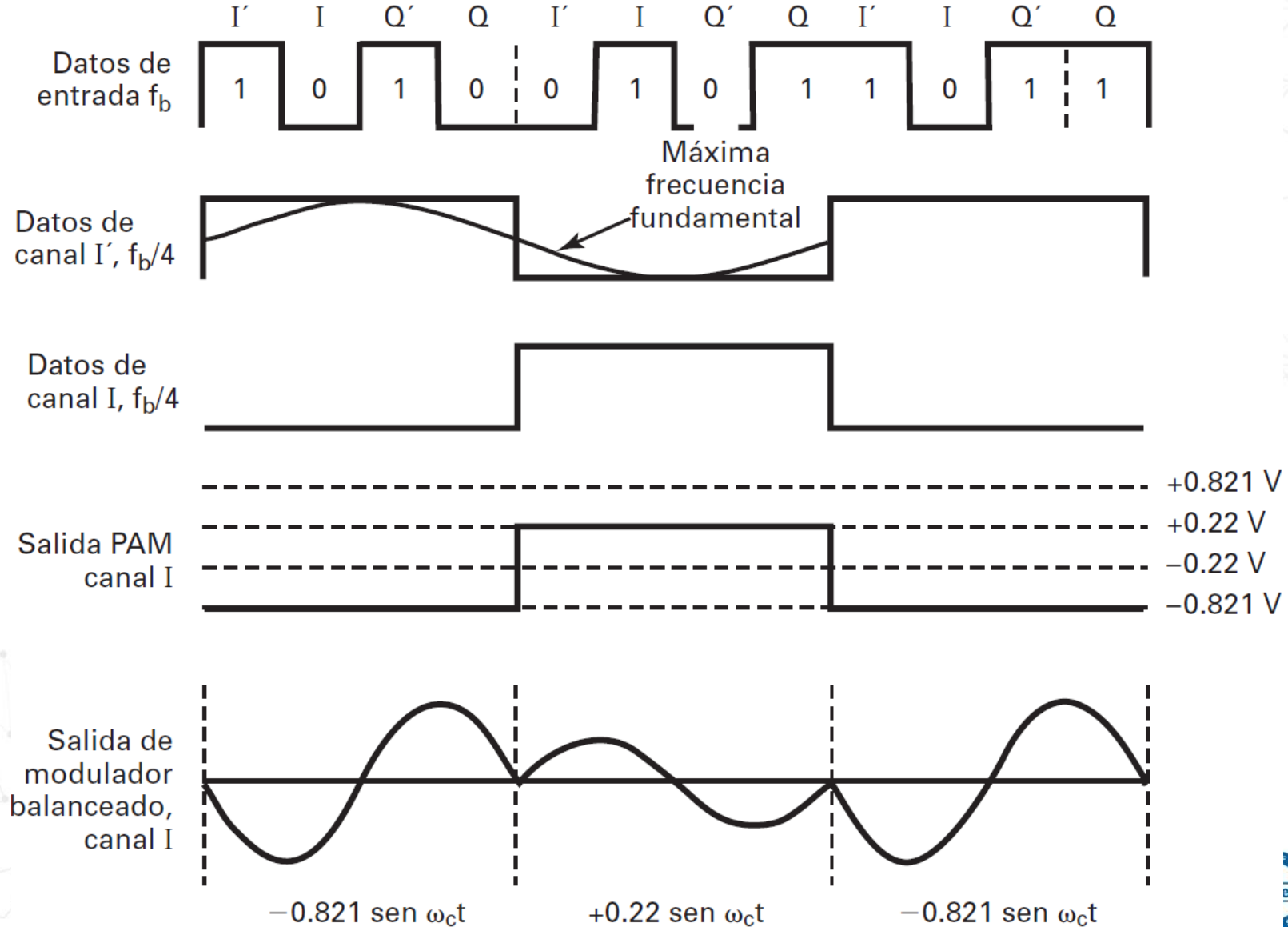
Recordemos que  $f_{bQ} = f_{bQ'} = f_{bI} = f_{bI'} = f_b/4$ , entonces la máxima frecuencia de la moduladora y la máxima rapidez de cambio a la salida es  $f_b/4$ .



## 2. 16-QAM – Ancho de Banda



## 2. 16-QAM – Ancho de Banda



## 2. 16-QAM – Ancho de Banda

La frecuencia máxima en cualquiera de los canales es  $f_a = f_b/8$ . Los baudios es igual a  $f_b/4$ .

$$\text{Salida} = [X \sin(2\pi f_a t)] \times [\sin(2\pi f_c t)]$$

$$\text{Salida} = \left[ X \sin \left( 2\pi \frac{f_b}{8} t \right) \right] \times [\sin(2\pi f_c t)]$$

El ancho mínimo de banda es

$$\left( f_c + \frac{f_b}{8} \right) - \left( f_c - \frac{f_b}{8} \right) = \frac{2f_b}{8} = \frac{f_b}{4}$$

## 2. 16-QAM – Ancho de Banda

Ejemplo (Tomasi, 12-10):

Calcular la frecuencia bilateral mínima de Nyquist  $f_N$  y los baudios para un modulador 16-QAM con rapidez de entrada de datos  $f_b = 10\text{Mbps}$  y  $f_c = 70\text{MHz}$ .

$$f_{bI} = f_{bI'} = f_{bQ} = f_{bQ'} = \frac{f_b}{4} = \frac{10\text{Mbps}}{4} = 2.5\text{Mbps}$$

$$f_a = \frac{f_{bQ}}{2} = \frac{f_{bI}}{2} = \frac{2.5\text{Mbps}}{2} = 1.25\text{Mbps}$$

## 2. 16-QAM – Ancho de Banda

Ejemplo (Tomasi, 12-10):

La onda de salida de cada modulador balanceado

$$\sin(2\pi f_a t) \sin(2\pi f_c t)$$

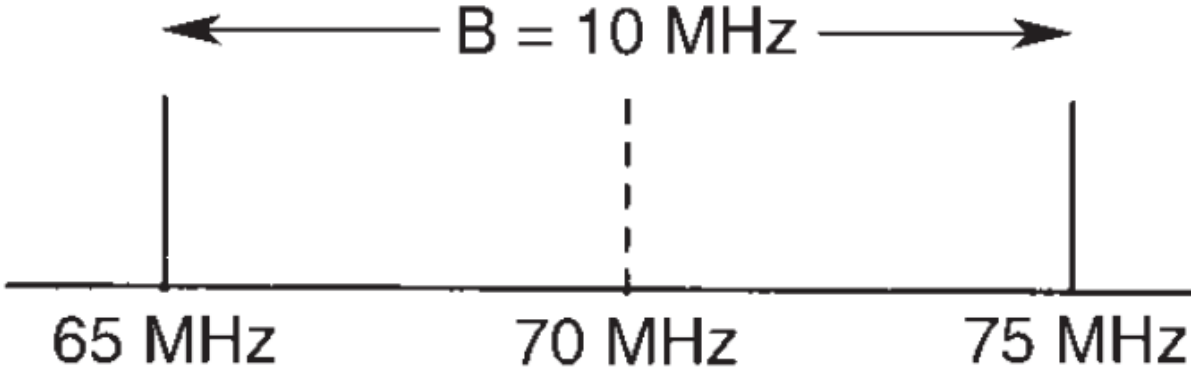
$$\frac{1}{2} \cos(2\pi (f_c - f_a) t) - \frac{1}{2} \cos(2\pi (f_c + f_a) t)$$

$$\frac{1}{2} \cos(2\pi (68.75 \text{ MHz}) t) - \frac{1}{2} \cos(2\pi (71.25 \text{ MHz}) t)$$

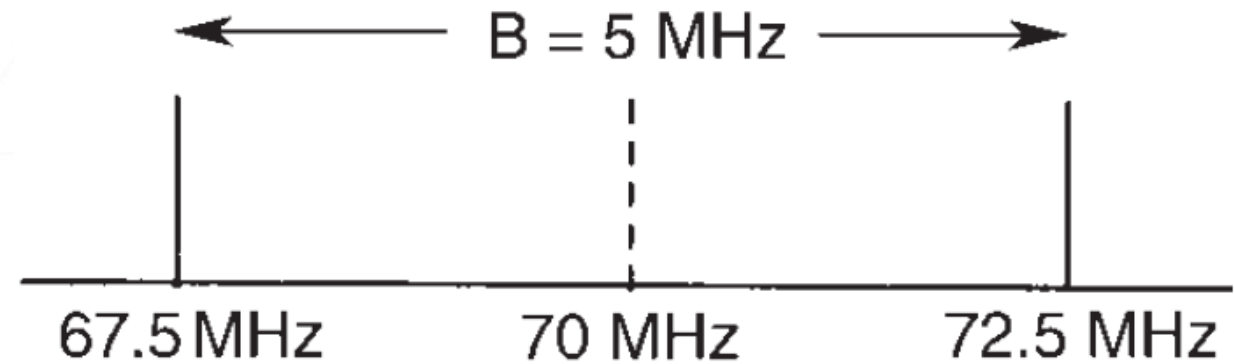
$$f_N = (68.75 - 71.25) \text{ MHz} = 2.5 \text{ MHz}$$

## 2. 16-QAM – Ancho de Banda

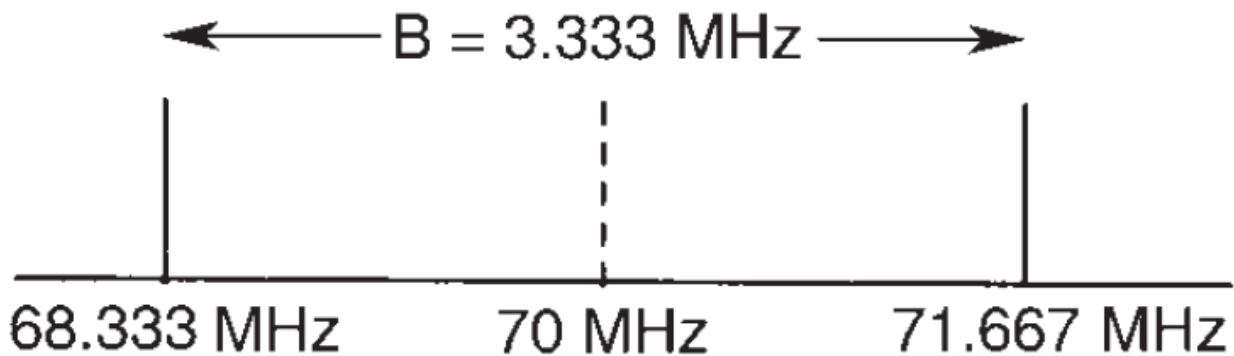
**BPSK 10Mbauds**



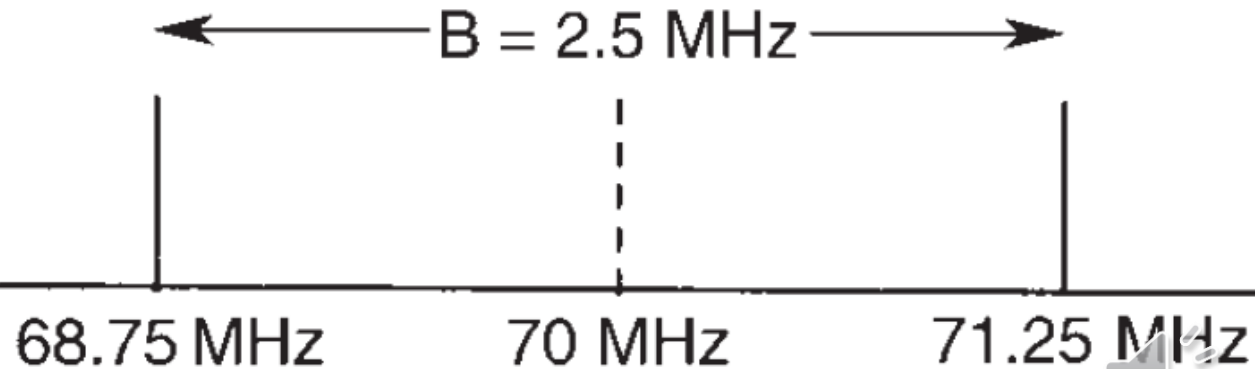
**QPSK 5Mbauds**



**8-PSK 3.33Mbauds**



**16-QAM 2.5Mbauds**





### 3. Eficiencia de ancho de banda

También conocida como densidad de información, se usa para comparar dos técnicas de modulación digital. Es la relación de rapidez de transmisión de bits entre el ancho mínimo de banda necesario.

$$\begin{aligned}\text{Eficiencia de AB} &= \frac{\text{rapidez de transmisión (bps)}}{\text{ancho mínimo de banda (Hz)}} \\ &= \frac{\text{bits/segundo}}{\text{hertz}} = \frac{\text{bits/s}}{\text{ciclos/s}} = \frac{\text{bits}}{\text{ciclo}}\end{aligned}$$

### 3. Eficiencia de ancho de banda

Ejemplo (Tomasi, 12-11):

Determinar las eficiencias de ancho de banda para los siguientes esquemas de modulación: BPSK, QPSK, 8-PSK y 16-QAM.

Esquema de modulación	Ancho de banda mínimo (MHz)
BPSK	10
QPSK	5
8-PSK	3.33
16-QAM	2.5

### 3. Eficiencia de ancho de banda

$$\text{BPSK: eficiencia de AB} = \frac{10\text{Mbps}}{10\text{MHz}} = \frac{1\text{bps}}{\text{Hz}} = \frac{1 \text{ bit}}{\text{ciclo}}$$

$$\text{QPSK: eficiencia de AB} = \frac{10\text{Mbps}}{5\text{MHz}} = \frac{2\text{bps}}{\text{Hz}} = \frac{2 \text{ bits}}{\text{ciclo}}$$

$$\text{8-PSK: eficiencia de AB} = \frac{10\text{Mbps}}{3.33\text{MHz}} = \frac{3\text{bps}}{\text{Hz}} = \frac{3 \text{ bits}}{\text{ciclo}}$$

$$\text{16-QAM: eficiencia de AB} = \frac{10\text{Mbps}}{2.5\text{MHz}} = \frac{4\text{bps}}{\text{Hz}} = \frac{4 \text{ bits}}{\text{ciclo}}$$

### 3. Eficiencia de ancho de banda

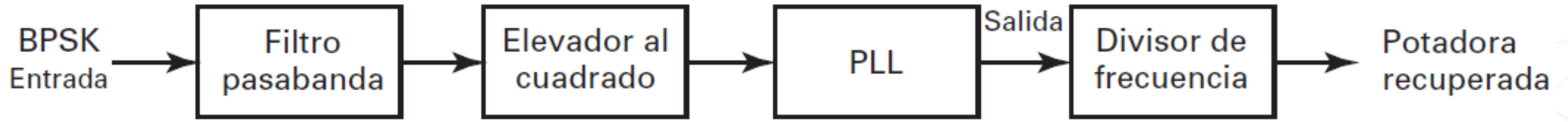
Modulación	Codificación	Ancho de banda (Hz)	Baudios	Eficiencia de ancho de banda (bps/Hz)
FSK	Un bit	$\geq f_b$	$f_b$	$\leq 1$
BPSK	Un bit	$f_b$	$f_b$	1
QPSK	Dibit	$f_b/2$	$f_b/2$	2
8-PSK	Tribit	$f_b/3$	$f_b/3$	3
8-QAM	Tribit	$f_b/3$	$f_b/3$	3
16-PSK	Cuadribit	$f_b/4$	$f_b/4$	4
16-QAM	Cuadribit	$f_b/4$	$f_b/4$	4

## 4. Recuperación de portadora

En los sistemas PSK y QAM la portadora se suprime en los moduladores balanceados y, en consecuencia, no se transmite. Existen 3 sistemas para recuperar la portadora: lazo cuadrático, lazo de costas y remodulador.



## 4. Lazo cuadrático



Empleado comúnmente para recuperar la portadora en BPSK. Al elevar al cuadrado se elimina la modulación y generar la segunda armónica de  $f_c$ . La fase de esta armónica se rastrea con PLL. La frecuencia del VCO en el PLL se divide entre 2.

$$\sin^2(\omega_c t) = -\boxed{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \cos(2\omega_c t)$$

Se elimina con un HPF

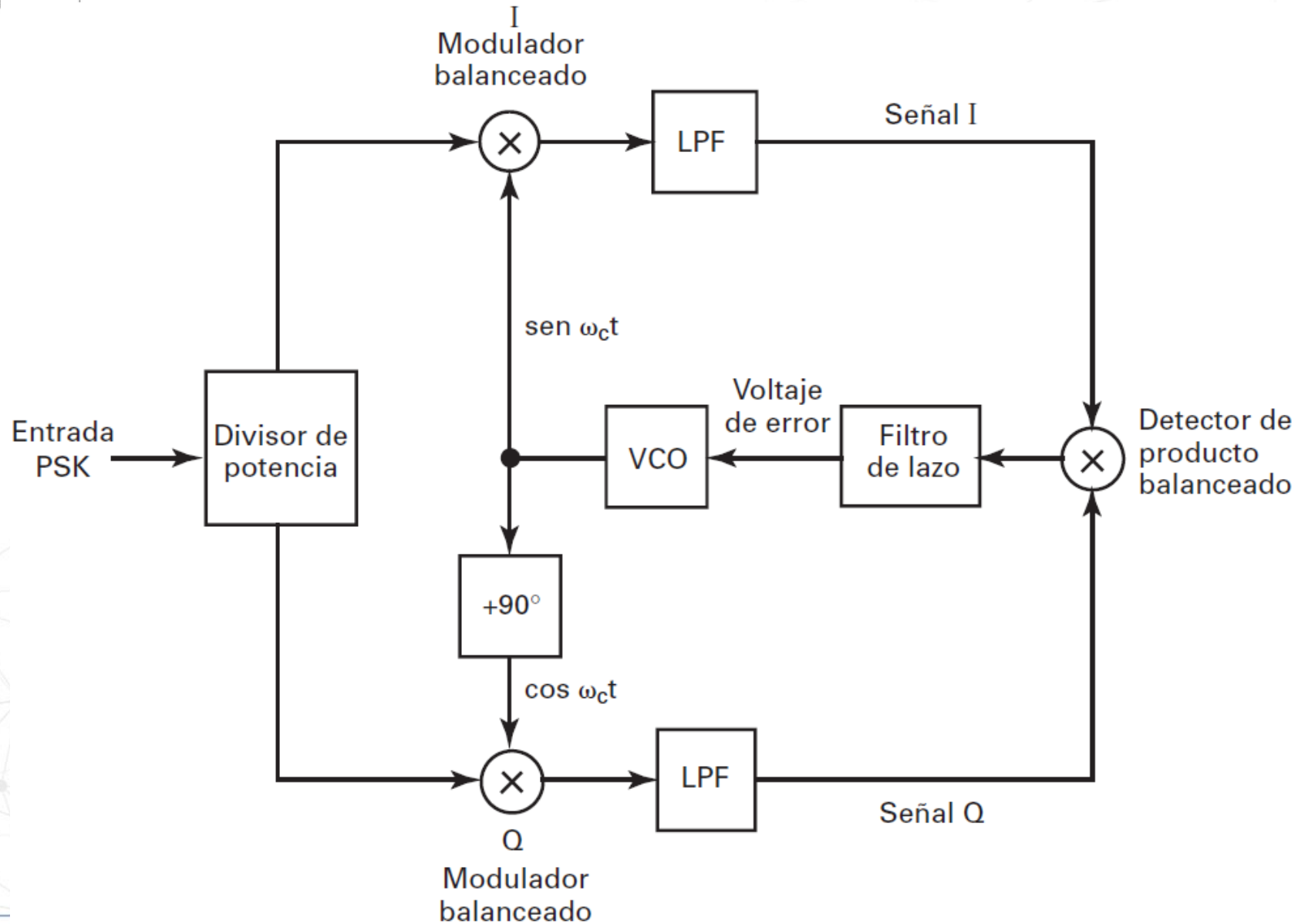


## 4. Lazo de costas

Produce los mismos resultados que un circuito que eleva al cuadrado seguido de un PLL en vez del filtro BPF.

Una vez la frecuencia del VCO es igual a la de la portadora suprimida, el producto de las señales I y Q producirá un voltaje de error proporcional a cualquier error de fase en el VCO. El voltaje de error controla la fase, y por ende, la frecuencia del VCO.

## 4. Lazo de costas

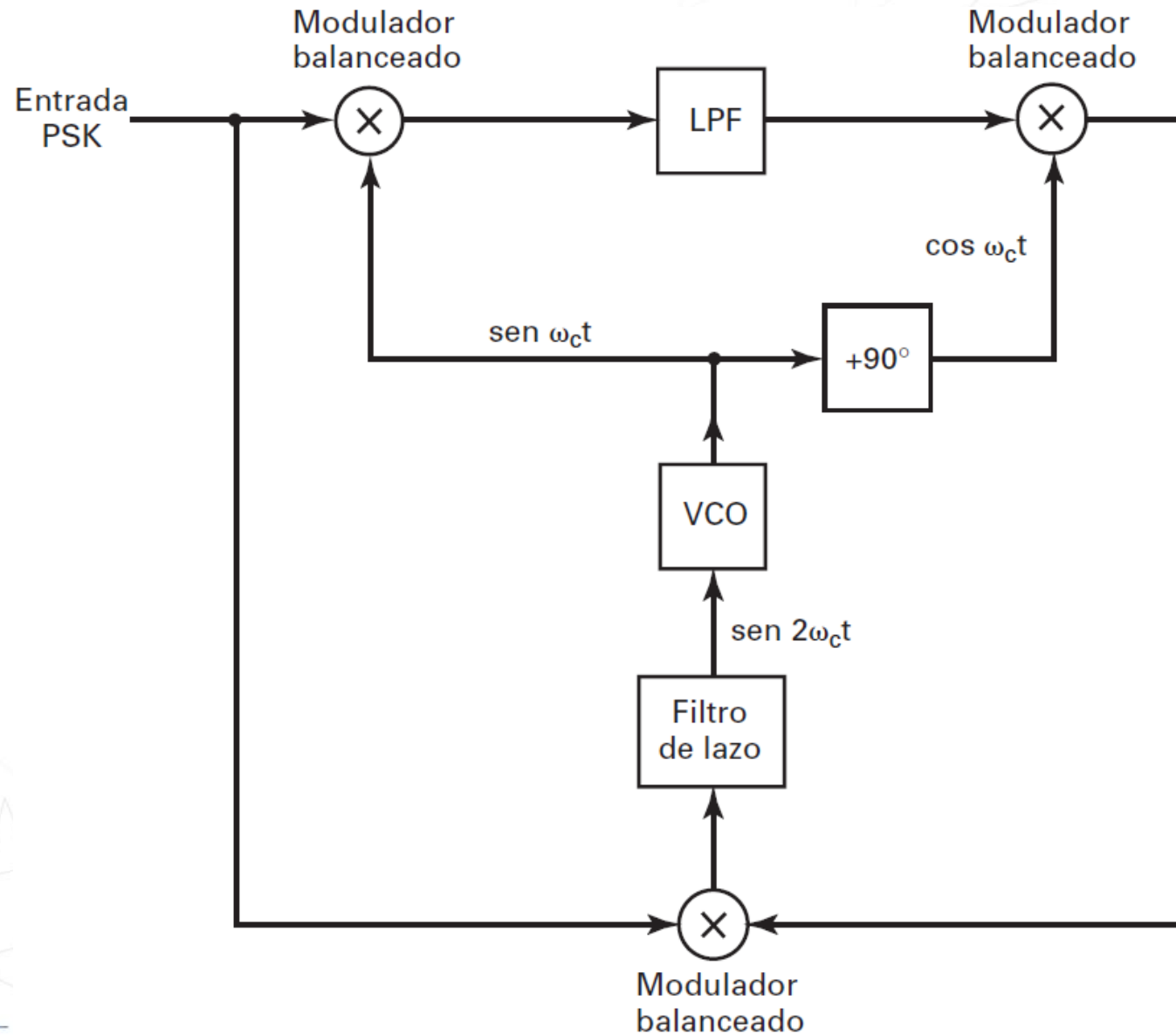


## 4. Remodulador

Produce un voltaje de error de lazo que es proporcional al error de fases entre la señal de entrada y la señal del VCO. Este esquema tiene un tiempo mas corto de adquisición que los lazos cuadráticos o el de costas.

Para recuperar la portadora para técnicas de codificación mas grandes que la binaria, se usan circuitos que elevan la señal a la cuarta, octava y otras potencias mayores.

## 4. Remodulador



# Bibliografía

- BLAKE, Roy. (2004). Sistemas electrónicos de comunicaciones. Thomson.
- TOMASÍ, Wayne. (2003) Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. 4ª ed. Prentice Hall.
- FRENZEL, Louis. (2016) Principles of Electronic Communication Systems. 4<sup>th</sup> Edition.