

# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

*FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL*

*CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES*

*COMUNICACIÓN DIGITAL*

Enero 2025 - julio 2025

## Índice de contenido

<b>CAPÍTULO III: CODIFICACIÓN DIGITAL DE SEÑALES ANALÓGICAS .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Familia ASK .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. SEÑAL MODULADORA Y SEÑAL MODULADA .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2. REPRESENTACIÓN FASORIAL DE UNA SEÑAL MASK.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3. Señal BASK.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4. Señal OOK .....</b>	<b>10</b>
<b>1.5. CIRCUITOS MODULADORES .....</b>	<b>10</b>
<b>1.6. CIRCUITOS DEMODULADORES.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Familia FSK.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Análisis de la señal OOK .....</b>	<b>14</b>
<b>3. Familia PSK.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1. CIRCUITOS MODULADORES Y DEMODULADORES .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2. SISTEMA COHERENTE Y DIFERENCIAL.....</b>	<b>25</b>
<b>5. TRANSMISIÓN .....</b>	<b>36</b>
.....	36
<b>5.1. Muestreo.....</b>	<b>37</b>
<b>5.2. Modulador PAM de primer especie.....</b>	<b>44</b>
<b>5.3. Modulador PAM de segunda especie.....</b>	<b>44</b>
<b>5.4. Señal PWM .....</b>	<b>45</b>
<b>5.5. MODULACIÓN PPM Y PFM (Modulación por Pulso de Diferencia) y (Modulación por Posición de fase).....</b>	<b>46</b>
<b>6. CUANTIFICACIÓN.....</b>	<b>46</b>
<b>7. CODIFICACIÓN .....</b>	<b>48</b>
<b>8. Codificación de voz.....</b>	<b>51</b>
<b>9. Bibliografía .....</b>	<b>60</b>

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Modulación .....	5
Ilustración 2: Ejemplo de modulación ASK.....	6
Ilustración 3: Características señal BASK MASK.....	6
Ilustración 4: Señal moduladora y señal modulada ASK.....	7
Ilustración 5: Círculos de indecisión.....	7
Ilustración 6: Representación fasorial de una señal m-aria.....	8
Ilustración 7 Gráfica de una señal modulada en BASK.....	8
Ilustración 8: Índice de modulación .....	10
Ilustración 9 Señal OOK .....	10
Ilustración 10: OOK1 OOK2 .....	14
Ilustración 11: Espectro de frecuencia .....	15
Ilustración 12: Familia PSK .....	18
Ilustración 13: MPSK.....	19
Ilustración 14: Circulo de indecisión MPSK.....	20
Ilustración 15: BPSK.....	20
Ilustración 16: PRK .....	23
Ilustración 17: Sistema diferencial .....	26
Ilustración 18: Transmisión digital .....	36
Ilustración 20: Señal PAM .....	39
Ilustración 21 Muestreo de techo plano .....	42
Ilustración 22: Codificación .....	49
Ilustración 23: Codificadores de voz.....	51
Ilustración 24: Codificador VSelp.....	53
Ilustración 25 Transmisor DPCM .....	56
Ilustración 26 Receptor DPCM .....	57
Ilustración 27 Forma de onda de salida de un canal de banda limitada .....	57
Ilustración 28 Sistema de medición del patrón de ojo.....	59
Ilustración 29 Ejemplo de un diagrama de ojo.....	59

## CAPÍTULO III: CODIFICACIÓN DIGITAL DE SEÑALES ANALÓGICAS

Para transmitir información a través del aire se siguen tres pasos principales:

- Se genera una portadora pura en el transmisor.
- Se modula la portadora con la información a transmitir tal que se produzca un cambio detectable, de manera confiable, en alguna característica de la portadora.
- En el receptor los cambios se detectan y desmodulan.

La modulación digital consiste fundamentalmente en la modificación de los parámetros, (amplitud, frecuencia o la fase, o una combinación de estos) de una señal sinusoidal (la portadora) en función de un tren de datos digitales (la moduladora).

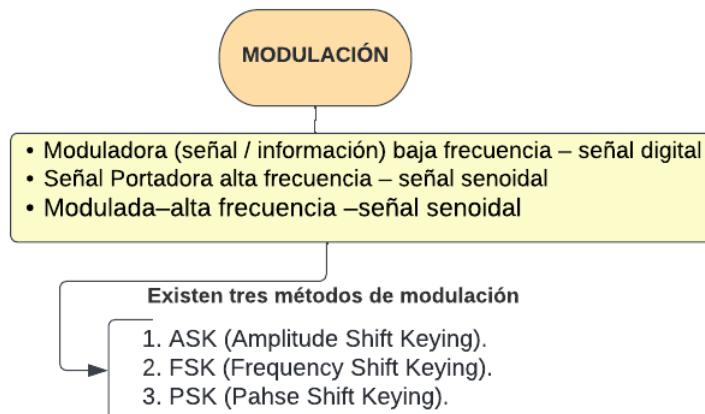
Además de las ventajas de la modulación analógica (posibilidad de radiar, mayor eficiencia en el uso del espectro, etc.), moverse de modulación analógica a modulación digital provee:

- Mayor capacidad de información (por disponer de mayor ancho de banda)
- Compatibilidad con servicios de datos digitales
- Mayor seguridad en los datos
- Mejor calidad en las comunicaciones

Los diseñadores de sistemas de comunicaciones enfrentan estas restricciones:

- Ancho de banda disponible
- Potencia permisible
- Nivel inherente de ruido del sistema

El espectro de radiofrecuencia debe ser compartido por un número cada vez mayor de usuarios a medida que la demanda por servicios de comunicaciones se incrementa. Los esquemas de modulación digital tienen una capacidad más grande de portar grandes cantidades de información que los esquemas análogos de modulación.



$$E_p(t) = E_p \sin(w_p t + \theta)$$



Ilustración 1: Modulación

## 1. Familia ASK

La técnica de modulación digital más sencilla es la modulación digital de amplitud, que no es más que modulación de amplitud con portadora completa y doble banda lateral. La ecuación que describe la modulación digital de amplitud mediante una señal binaria es:

$$V_{am}(t) = [1 + V_{am}(t)] \left[ \frac{A}{2} \cos(w_c t) \right]$$

Donde:

- $V_{am}(t)$ = voltaje de la onda de amplitud modulada
- $A/2$ = amplitud de la portadora no modulada (volts)
- $V_m(t)$ = señal binaria moduladora (volts)
- $w_c$ = frecuencia de la portadora en radianes (radianes por segundo)

ASK es una modulación mediante la cual la amplitud de la señal está dada por la ecuación:

$$A = \begin{cases} A \sin(w_0 t) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases}$$

Este tipo de modulación se puede describir como la multiplicación de la señal de entrada  $f(t)=A$  por la portadora. [1]

### Corrimiento de Amplitud

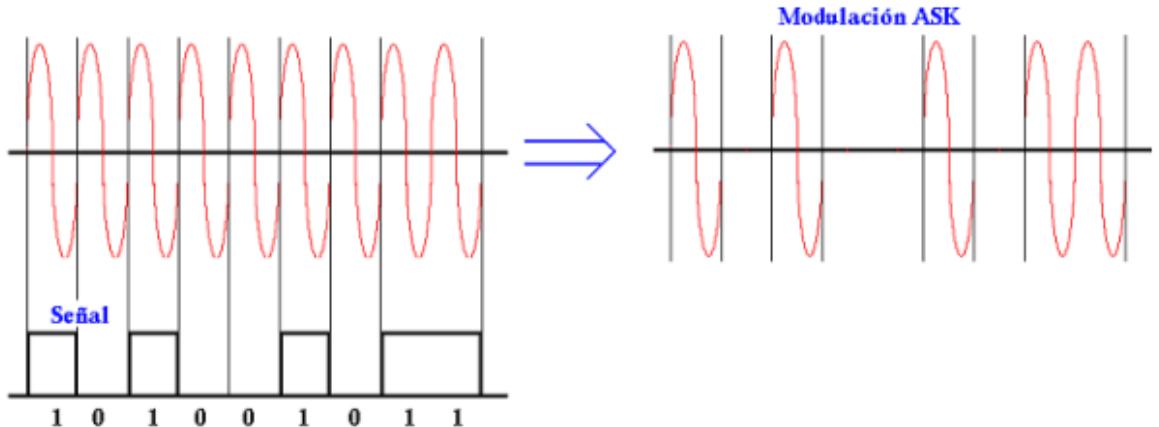


Ilustración 2: Ejemplo de modulación ASK

### Características:

- Permite que cualquier señal digital sea adecuada para ser transmitida en un canal de ancho de banda restringida.
- Al estar en función de una sola frecuencia, es posible controlar o evitar los efectos del ruido sobre la señal mediante un filtro pasabanda.

También permite transmitir más de una señal sobre un mismo canal, al modularlas en frecuencias diferentes. [1]

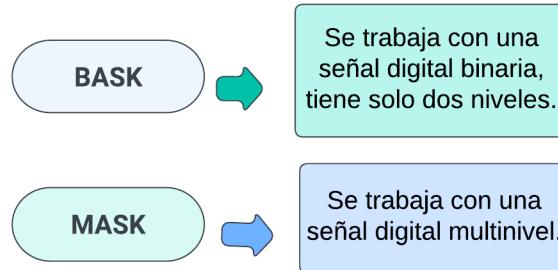


Ilustración 3: Características señal BASK MASK

#### a. Señal MASK

Es una señal M-aria es decir una señal digital con m niveles de amplitud.

$$Apt(t) = Ep(t) = A_{max} \operatorname{Sen}(wt)$$

$$\begin{cases} A_0 = V_1 \sin(wt) \\ A_1 = V_2 \sin(wt) \\ A_2 = V_3 \sin(wt) \\ A_3 = V_4 \sin(wt) \end{cases}$$

Para cada nivel de amplitud se tiene una amplitud de la portadora

Para cada nivel de amplitud se tiene una amplitud de la portadora.

$$\left. \begin{array}{l} A_0 = V_1 \operatorname{Sen} wt \\ A_1 = V_2 \operatorname{Sen} wt \\ A_2 = V_3 \operatorname{Sen} wt \\ A_3 = V_{\max} \operatorname{Sen} wt \end{array} \right\}$$

## 1.1. SEÑAL MODULADORA Y SEÑAL MODULADA ASK

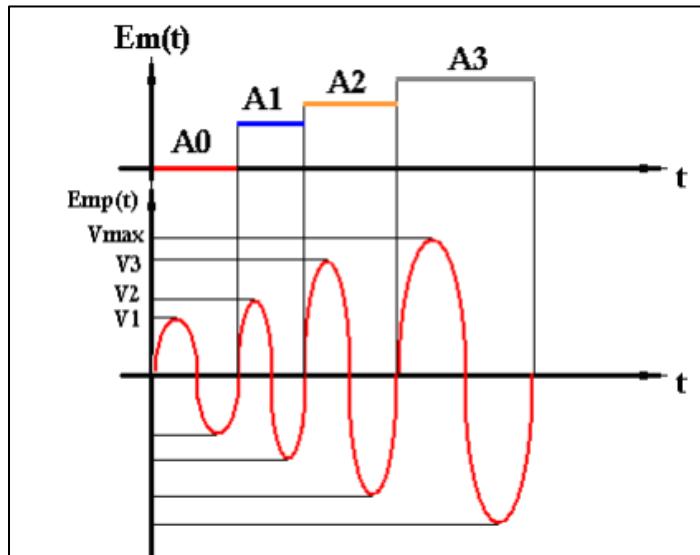


Ilustración 4: Señal moduladora y señal modulada ASK

## 1.2. REPRESENTACIÓN FASORIAL DE UNA SEÑAL MASK

La representación fasorial de una señal m-aria se da mediante círculos de indecisión:

**Círculo de indecisión:** Es el lugar geométrico que delimita dentro de un valor fijo de probabilidad. Si la señal está dentro del círculo de indecisión genera su nivel correspondiente, si esta fuera del círculo no genera nada. Los círculos de decisión no deben ser secantes, ni tampoco tangentes. [1]

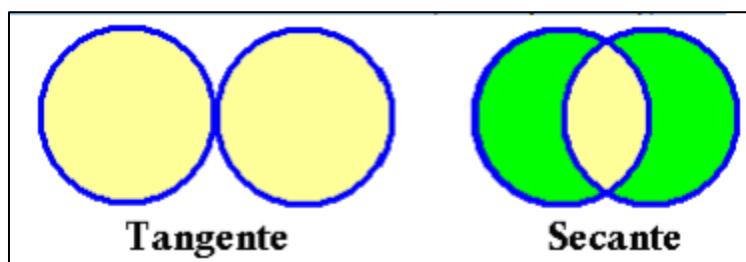


Ilustración 5: Círculos de indecisión

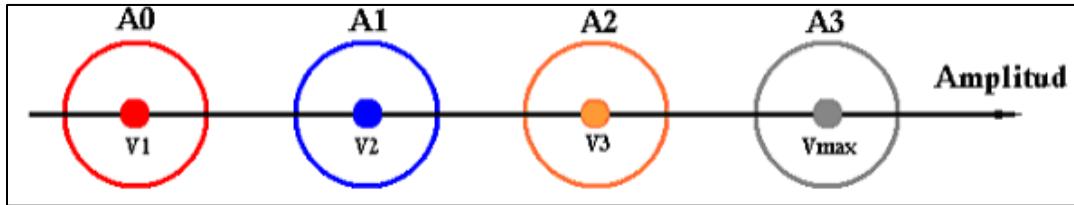


Ilustración 6: Representación fasorial de una señal m-aria

**Señal regular:** es aquella en la que la amplitud entre los niveles es la misma:

$$V_1 = 2V \quad V_2 = 2V \quad V_3 = 2V \quad V_{max} = 2V \rightarrow \text{Regular}$$

$$V_1 = 2V \quad V_2 = 6V \quad V_3 = 14V \quad V_{max} = 16V \rightarrow \text{Irregular}$$

### 1.3. Señal BASK

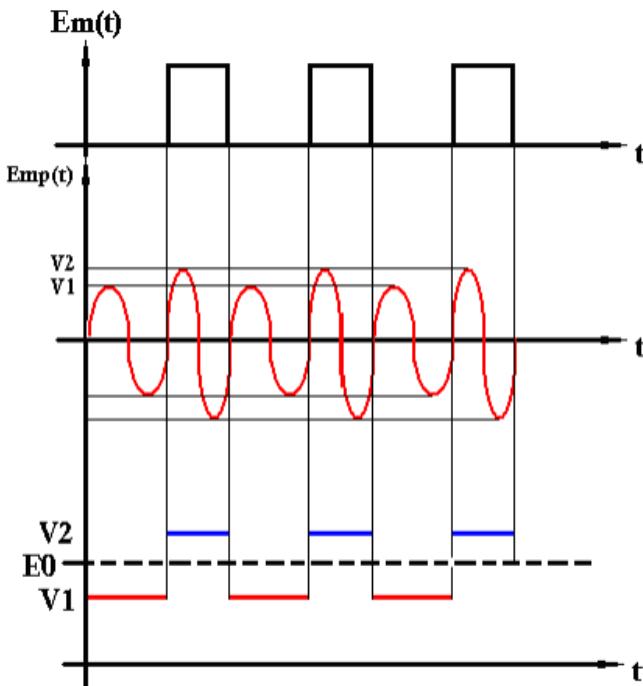
Es una señal digital binaria con dos niveles de amplitud.

$$Apt(t) = Ep(t) = A_{max} \operatorname{Sen}(wt)$$

Para cada nivel de amplitud se tiene una amplitud de portadora diferente:

$$A_0 \rightarrow V_1 \operatorname{Sen} wt$$

$$A_1 \rightarrow V_2 \operatorname{Sen} wt$$



$$W = \frac{2\pi}{T}$$

$$Ep(t) = E_2 \operatorname{Sen} w_0 t$$

$$w_0 \gg w$$

Para que la señal moduladora mantenga una baja frecuencia y la portadora de alta frecuencia.

$$\Delta E = \frac{E_1 + E_2}{2}$$

$$"0" \rightarrow Emp(t) = E_1 \operatorname{Sen} w_0 t$$

$$"1" \rightarrow Emp(t) = E_2 \operatorname{Sen} w_0 t$$

Ilustración 7 Gráfica de una señal modulada en BASK

**Portadora virtual:** No tiene información ni en “1”, ni en “0” ayuda a detectar los equipos de Tx y Rx. [1]

$$EV(t) = E_0 \operatorname{Sen} \omega_0 t$$

$$E_0 = \frac{E_1 + E_2}{2}$$

$$\Delta E = E_2 - E_{0^\circ} = E_0 - E_1$$

$$\Delta E = \frac{E_2 - 1}{2}$$

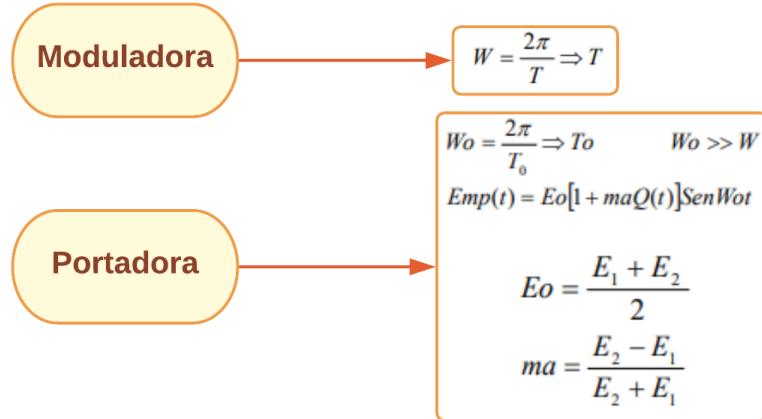
**Índice de modulación (ma):** Profundidad con que se modula la señal.

$$ma = \frac{\Delta E}{E_0}$$

$$ma = \frac{E_2 - E_1}{E_2 + E_1}$$

$$ma = 1 \text{ cuando } E_1 = 0$$

Si  $ma > 1$  tiene sobre modulación entonces la señal se desfasa  $180^\circ$ .



**Q(t)** = Onda cuadrada modulante que varía entre +1 y -1 con periodo T.

Sí

$$\begin{cases} Q(t) = 1 \rightarrow Emp(t) = E_2 \sin w_0 t \\ Q(t) = -1 \rightarrow Emp(t) = E_1 \sin w_0 t \end{cases}$$

$$Emp(t) = E_0 \sin w_0 t + E_0 \cdot ma \cdot Q(t) \sin w_0 t .$$

Ilustración 8: Índice de modulación

#### 1.4. Señal OOK

Señal de encendido y apagado (On, Off)

Cuando la señal de información es  $\begin{cases} 1 \text{ lógico,} \\ 0 \text{ lógico,} \end{cases}$

$$Emp(t) = E_2 \sin w_0 t$$

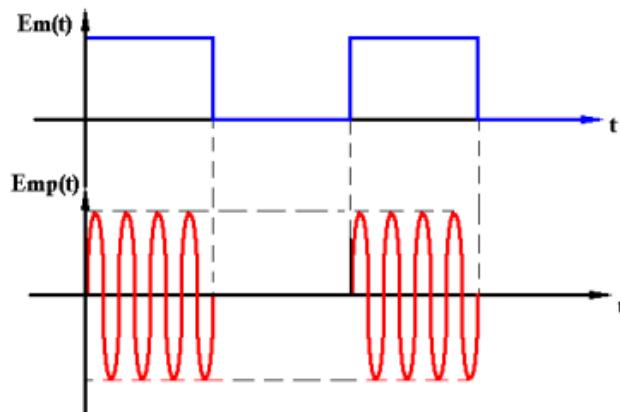
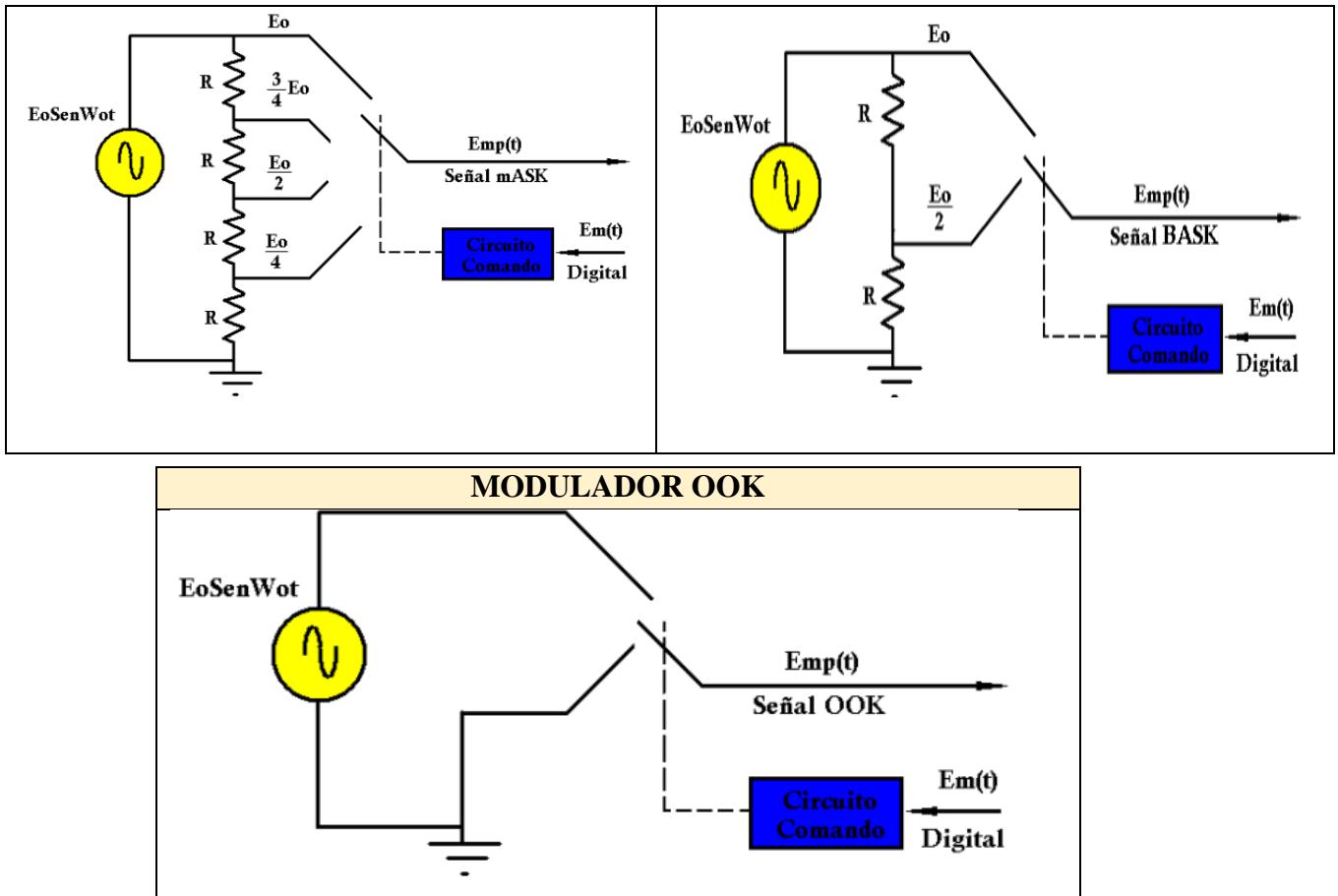
$$Emp(t) = 0$$


Ilustración 9 Señal OOK

#### 1.5. CIRCUITOS MODULADORES

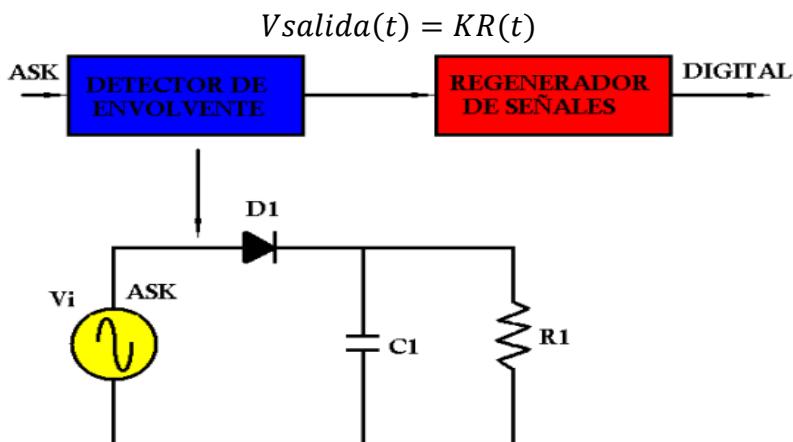
MODULADOR MASK	MODULADOR BASK
----------------	----------------



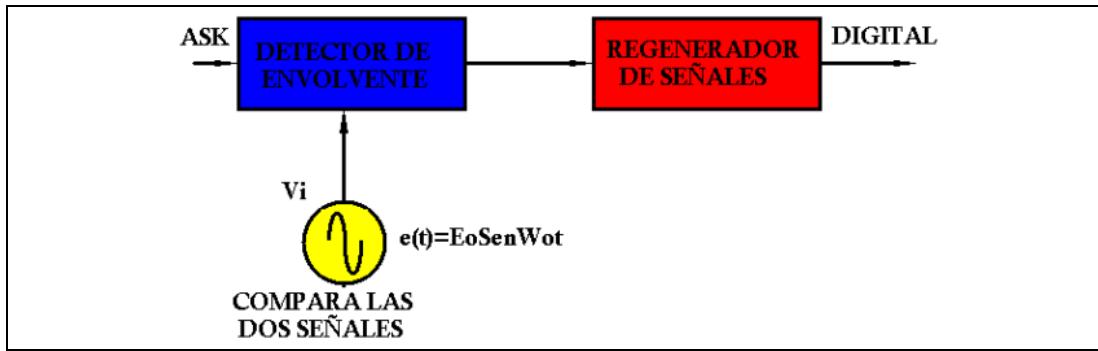
## 1.6. CIRCUITOS DEMODULADORES

### DETECCIÓN DE ENVOLVENTE

El detector de envolvente es un circuito que produce una forma de onda en su salida que proporciona la envolvente real,  $R(t)$ , de su entrada.



### DETECCIÓN SÍNCRONA



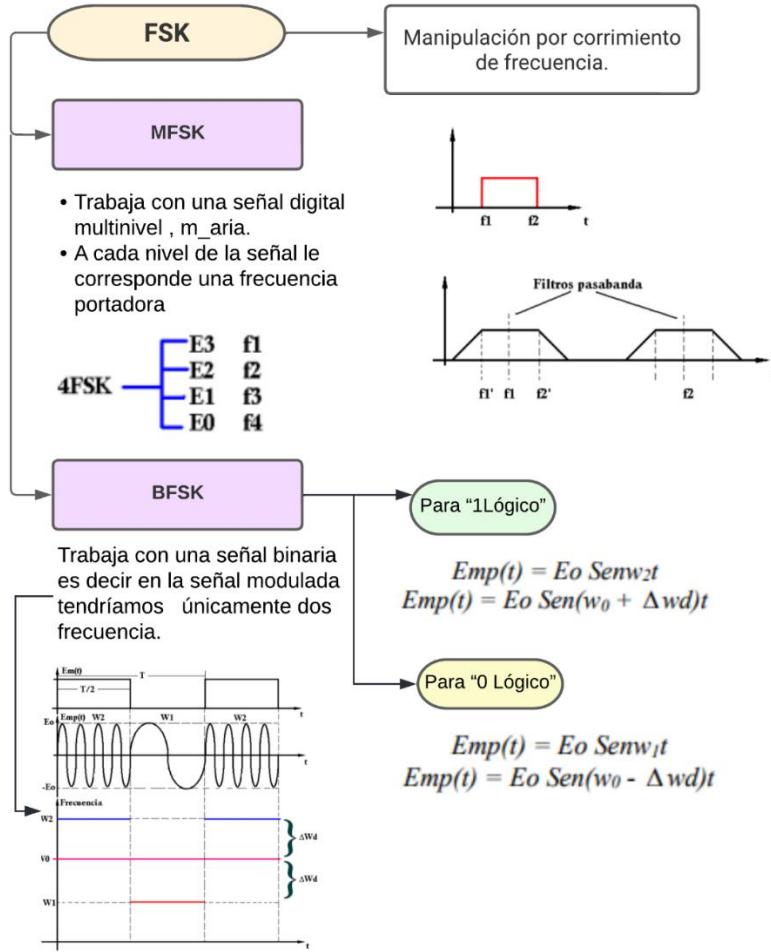
## 2. Familia FSK

La manipulación por desplazamiento de frecuencia (FSK, de frequency-shift keying) es otro tipo relativamente sencillo y de baja eficiencia de modulación digital. La FSK binaria es una forma de modulación de ángulo, de amplitud constante, parecido a la modulación convencional de frecuencia (FM), pero la señal moduladora es una señal binaria que varía entre dos valores discretos de voltaje, y no es una forma de onda analógica que cambie continuamente. La ecuación general de la FSK binaria es:

$$V_{fsk}(t) = V_c \cos\{2\pi[f_c + V_m(t)\Delta f]t\}$$

En donde:

- $V_{fsk}(t)$ = forma de onda binaria FSK.
- $V_c$ = Amplitud de la portadora (volts).
- $f_c$ = frecuencia central de la portadora (Hz).
- $V_m(t)$ = señal moduladora de entrada binaria (+-1).



## ➤ Portadora Virtual

$$E_v(t) = E_0 \operatorname{sen}(w_0 t)$$

$$\Delta wd = w_2 + w_0 = w_0 - w_1$$

$$w_0 = \frac{w_2 + w_1}{2}$$

$$\Delta wd = \frac{w_2 - w_1}{2}$$

$$Emp(t) = E_0 \operatorname{sen} \frac{1}{2} (w_2 + w_1 + w_2 - w_1) t$$

$$Emp(t) = E_0 \operatorname{sen} \frac{1}{2} (2w_2) t$$

$$Emp(t) = E_0 \operatorname{sen} w_2 t$$

$$Emp(t) = E_0 \operatorname{sen} \frac{1}{2} (w_2 + w_1 - w_2 + w_1) t$$

$$Emp(t) = E_0 \operatorname{sen} \frac{1}{2} (2w_1)t$$

$$Emp(t) = E_0 \operatorname{sen} w_1 t$$

## 2.1. Análisis de la señal OOK

Dos señales en contrafase o en forma complementaria.

Sí sumamos las dos señales tenemos:  $\rightarrow BFSK = OOK1 + OOK2$

SEÑAL DE INFORMACIÓN	OOK1	OOK2
“1 Lógico”	$Emp(t) = E_0 \operatorname{sen} w_2 t$	$Emp(t) = 0$
“0 Lógico”	$Emp(t) = 0$	$Emp(t) = E_0 \operatorname{sen} w_1 t$

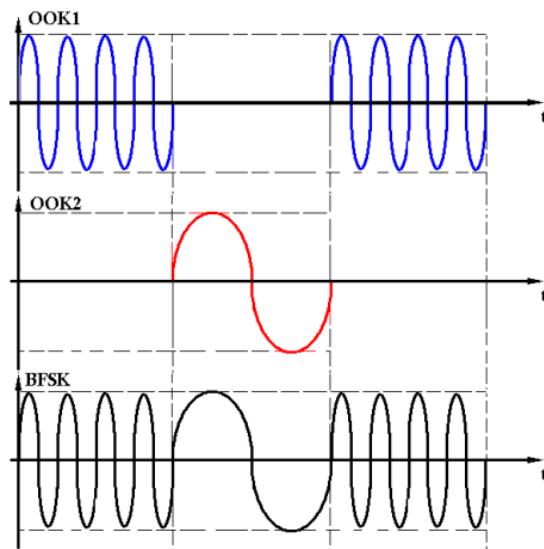


Ilustración 10: OOK1 OOK2

## ➤ Espectro de frecuencia

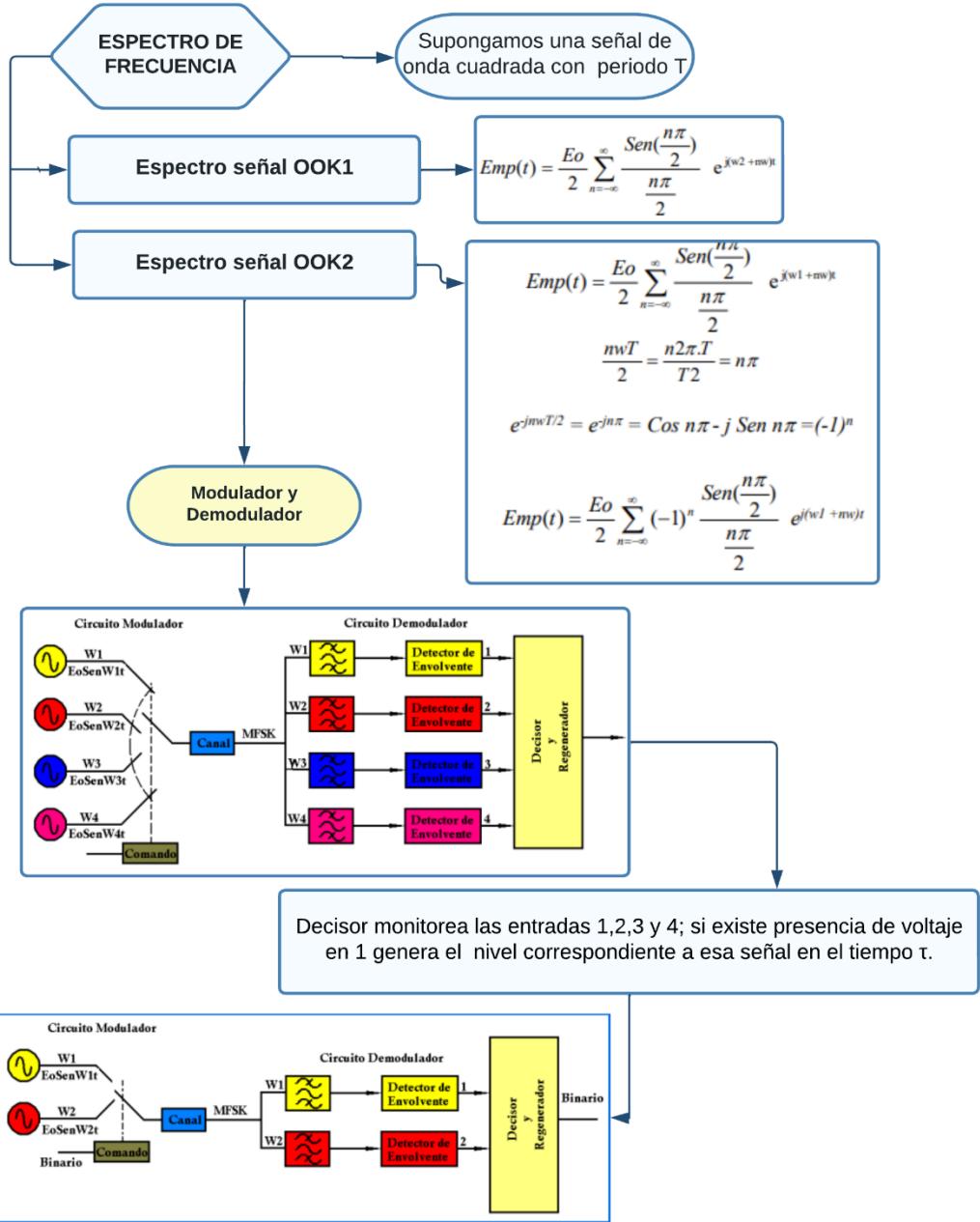
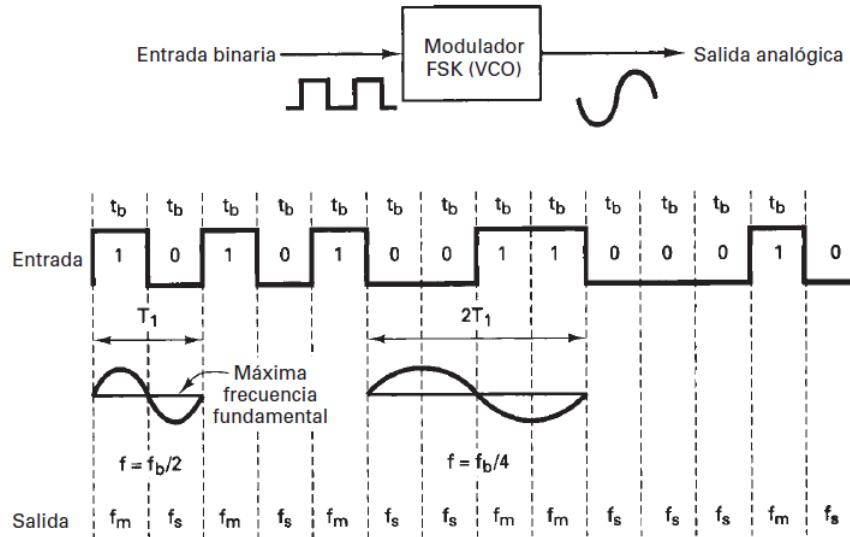


Ilustración 11: Espectro de frecuencia

## Transmisor FSK

La fig. 12-6 muestra un transmisor FSK binario simplificado, que se parece mucho a un modulador convencional de FM, y con mucha frecuencia es un oscilador controlado por voltaje (VCO, de voltage-controlled oscillator). La frecuencia de reposo (o central) de portadora se escoge de tal modo que esté a la mitad entre las frecuencias de marca y de espacio. Un 1 lógico corre a la salida del VCO hasta la frecuencia de marca, y un 0 lógico desplaza la salida del VCO a la frecuencia de espacio. En consecuencia, al cambiar la señal

binaria de entrada, entre las condiciones de 1 lógico y 0 lógico, la salida del VCO se corre o desvía entre las frecuencias de marca y de espacio.



### Consideraciones de FSK respecto del ancho de banda

La salida de un modulador FSK se relaciona con la entrada binaria donde un 0 lógico corresponde a la frecuencia de espacio  $f_s$ , un 1 lógico corresponde a la frecuencia de marca  $f_m$  y  $f_c$  es la frecuencia de portadora. La desviación máxima de frecuencia se determina con:

$$\Delta f = \frac{f_m f_s}{2}$$

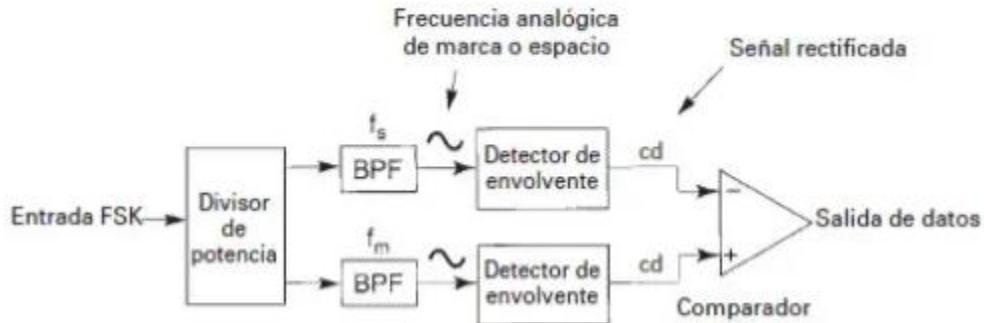
Donde:

- $\Delta f$  = desviación máxima de frecuencia (hertz)
- $f_m$  = frecuencia de marca (hertz)
- $f_s$  = frecuencia de espacio (hertz)

### Receptor FSK

La demodulación FSK es bastante sencilla. La señal de entrada FSK se aplica en forma simultánea a las entradas de los dos filtros pasabanda (BPF) a través de un divisor de potencia. El filtro respectivo sólo pasa la frecuencia de marca o sólo la de espacio a su respectivo detector de envolvente. A su vez, los detectores de envolvente indican la potencia total en cada banda pasante, y el comparador responde a la mayor de las dos potencias. A este tipo de detección FSK se le llama detección no coherente; no hay frecuencia, implicada en el proceso de demodulación, que esté sincronizada en fase, o en frecuencia o en ambas, con la señal FSK que entra.

## Desmodulador FSK no coherente



## Desmodulador FSK Coherente



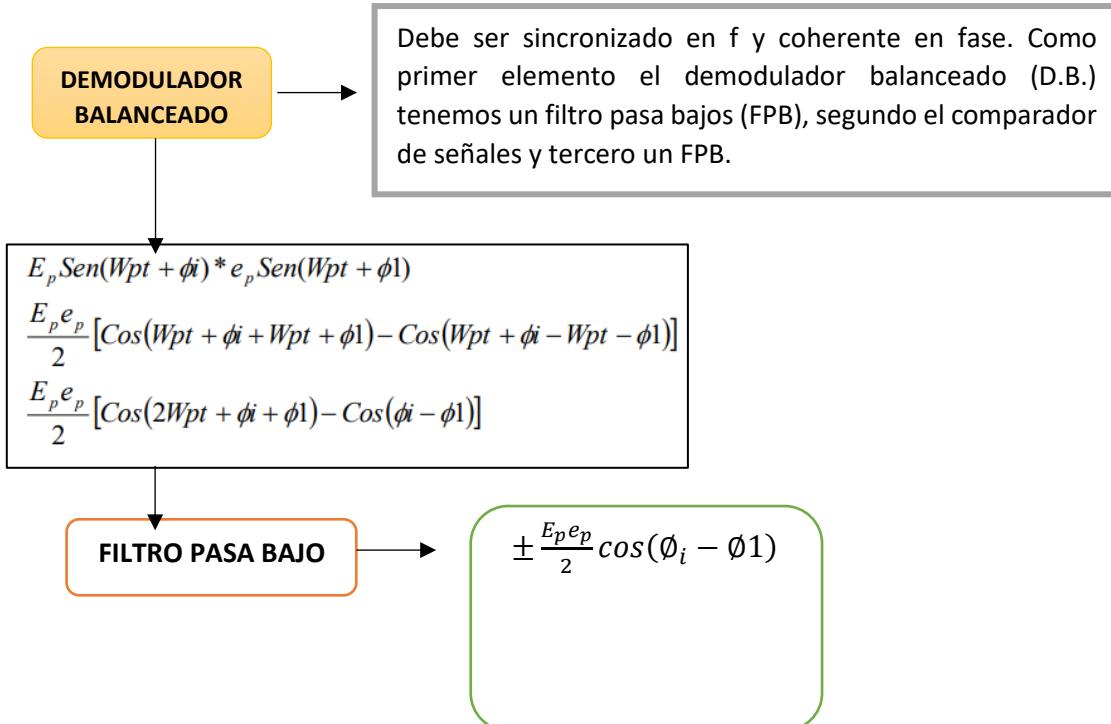
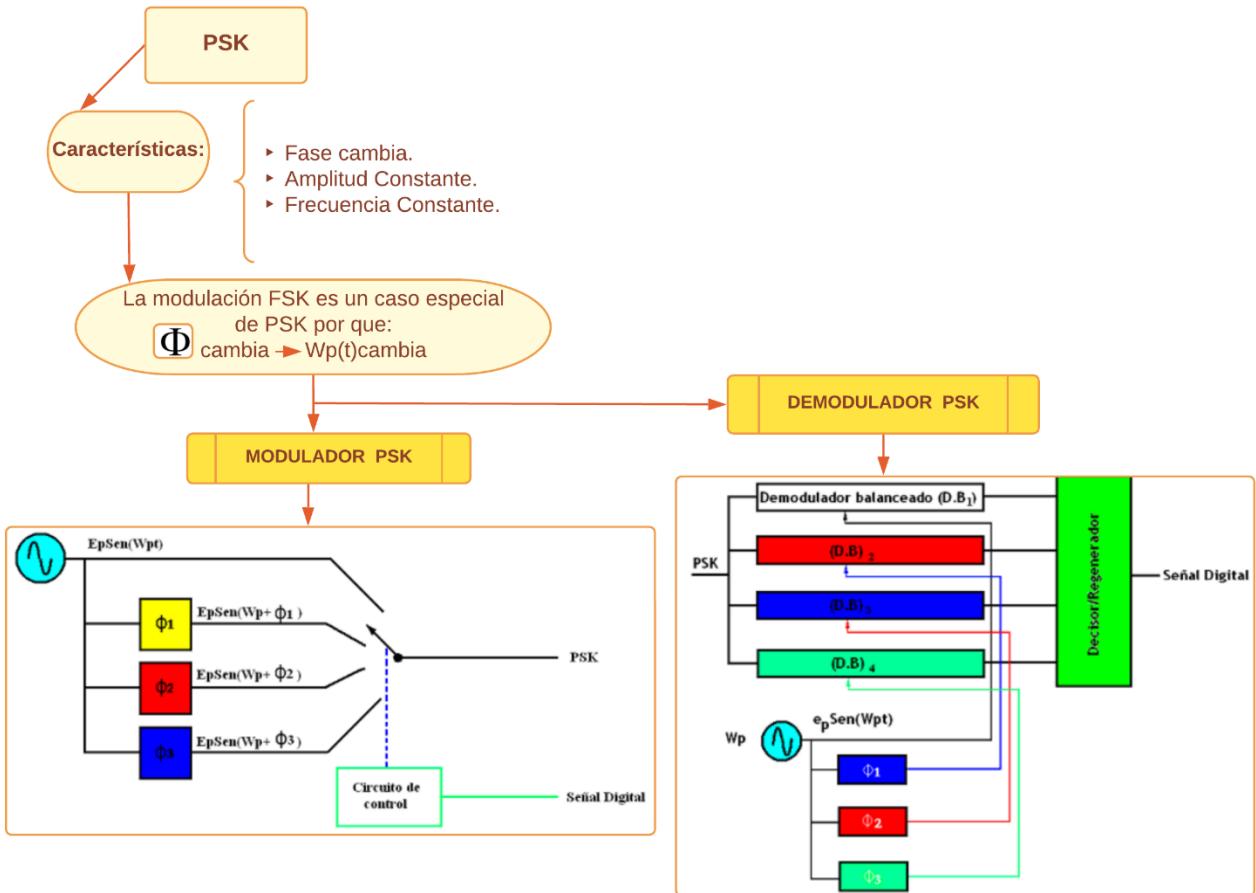
### 3. Familia PSK

La manipulación por desplazamiento de fase (PSK, por phase-shift keying) es otra forma de modulación digital angular de amplitud constante. Se parece a la modulación convencional de fase, excepto que en la PSK la señal de entrada es una señal digital binaria, y es posible tener una cantidad limitada de fases de salida.

#### Manipulación por desplazamiento binario de fase

En la manipulación por desplazamiento binario de fase (BPSK, de binary phase shift keying), son posibles dos fases de salida para una sola frecuencia portadora ("binario" significa "2"). Una fase de salida representa un 1 lógico, y la otra un 0 lógico. Cuando la señal de entrada digital cambia de estado, la fase de la portadora de salida varía entre dos ángulos que están desfasados  $180^\circ$ . Otros nombres del BPSK son manipulación por inversión de fase (PRK, de phase reversal keying) y modulación en

bifase. La BPSK es una forma de modulación de onda cuadrada con portadora suprimida de una señal de onda continua (CW, de continuous wave).



Sí

$$-\frac{E_p e_p}{2} \text{ (Valor máximo)}$$

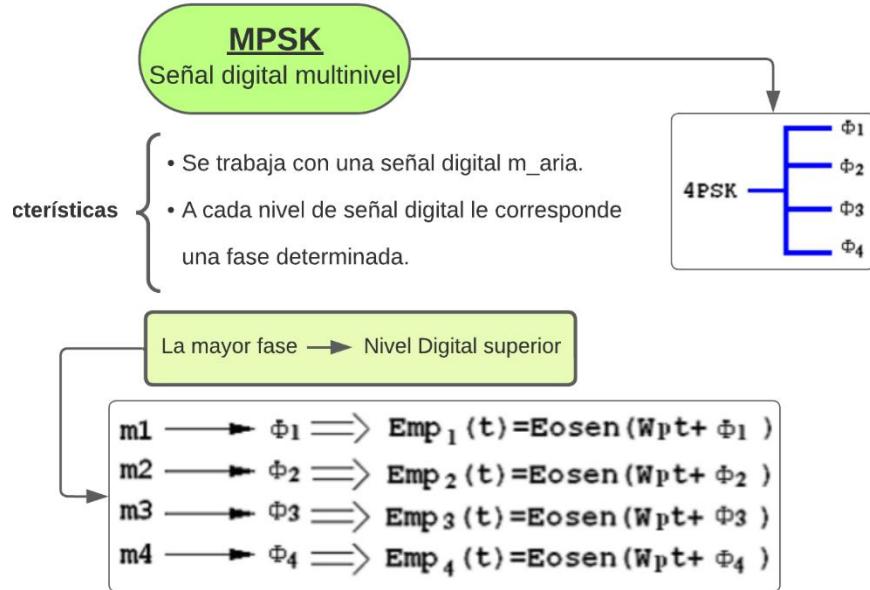


Ilustración 13: MPSK

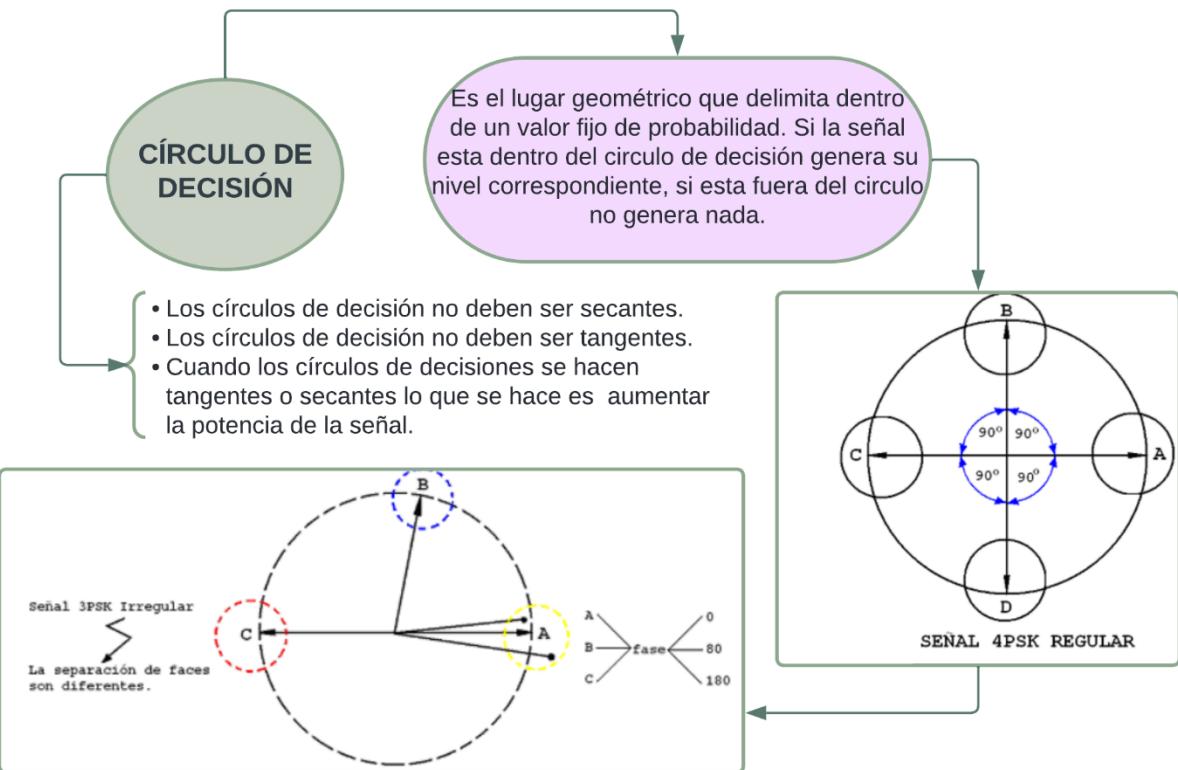


Ilustración 14: Círculo de indecisión MPSK

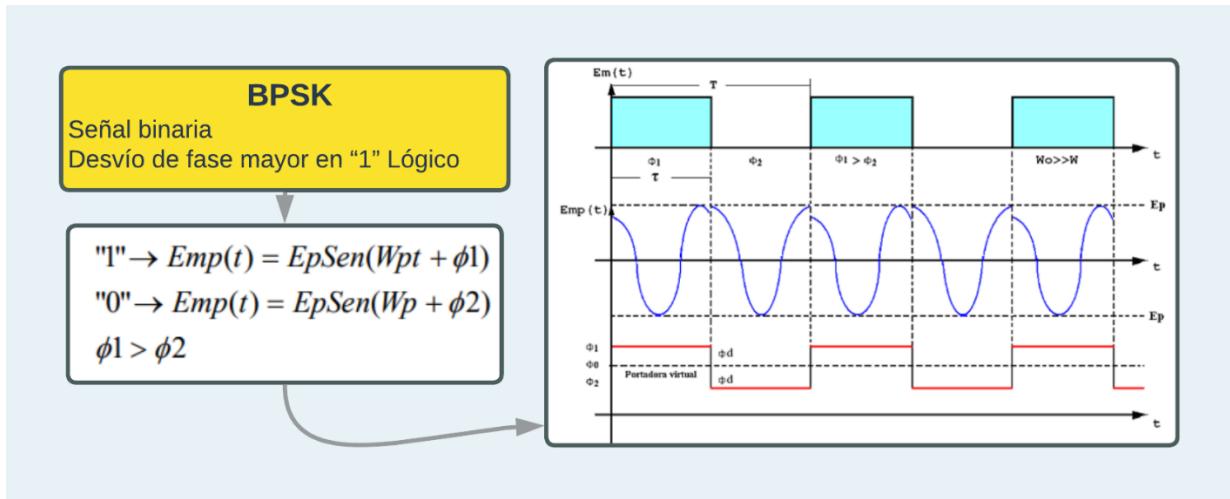


Ilustración 15: BPSK

### ➤ Portadora Virtual

$$E_v(t) = E_o \text{Sen}(Wpt + \phi_0)$$

$$\phi_0 = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \rightarrow Fase - Inicial$$

$$\Delta\phi d = \phi_1 - \phi_2 = \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \rightarrow Desvío - de - fase$$

$$1 \rightarrow E_{m1}(t) = EpSen[(Wpt + \phi_0) + \Delta\phi d] \rightarrow (I)$$

$$0 \rightarrow E_{m2}(t) = EpSen[(Wpt + \phi_0) - \Delta\phi d] \rightarrow (II)$$

### ➤ Espectro

OOK: Módulo en forma complementaria.

	OOK1	OOK2
“1”	I	0
“0”	0	II

$$BPSK = OOK1 + OOK2$$

**Información:**

$$T, W = \frac{2\pi}{T} \quad \frac{C}{señal digital} = \frac{T}{2} \quad Wp \gg W$$

### ➤ Modulación en contrafase

$$Emp(t) = \frac{Eo}{2} e^{j\Phi 1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\text{Sen}(\frac{n\pi}{2})}{\frac{n\pi}{2}} e^{j(Wp+nW)t} + \frac{Eo}{2} e^{j\Phi 2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-jn\pi} \frac{\text{Sen}(\frac{n\pi}{2})}{\frac{n\pi}{2}} e^{j(Wp+nW)t}$$

$$Emp(t) = \frac{Eo}{2} e^{j\Phi 1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{Sa}(\frac{n\pi}{2}) e^{j(Wp+nW)t} + \frac{Eo}{2} e^{j\Phi 2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-jn\pi} \text{Sa}(\frac{n\pi}{2}) e^{j(Wp+nW)t}$$

### ➤ Término de fase

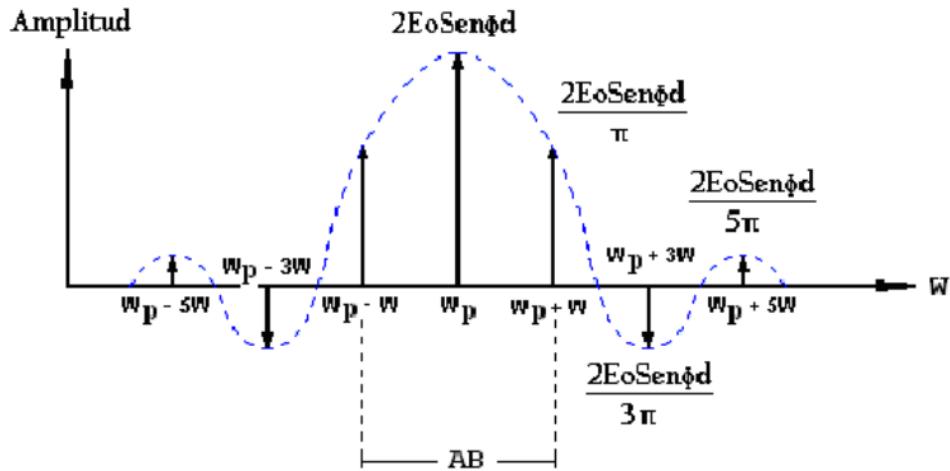
Indica que las señales están moduladas en forma complementaria.

$$e^{-jn\pi} \rightarrow Término de fase$$

### ➤ Serie de Fourier

$$Emp(t) = Eo \cos(\phi d) \times \text{Sen}(Wpt) + Eo \text{Sen}(\phi d) \times \frac{2}{\pi} [\text{sen}(Wp + w)t + \text{sen}(Wp - W)t]$$

$$-Eo \text{Sen}(\phi d) \times \frac{2}{3\pi} [\text{sen}(Wp + 3W)t + \text{sen}(Wp - 3W)t] + \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$$



Ancho de banda mínimo	$AB_{mín} = 2W$
Espectro	$Emp(t) = Ep \cos(\Delta\phi d) \sin(Wpt)$ $+ \frac{2Ep \sin(\Delta\phi d)}{\pi} [\sin(Wp + w)t + \sin(Wp - w)t]$

### ➤ Caso Particular

Cuando  $\phi d = \Delta\phi d = 90^\circ$  ( $\phi_1 - \phi > 180^\circ$ )

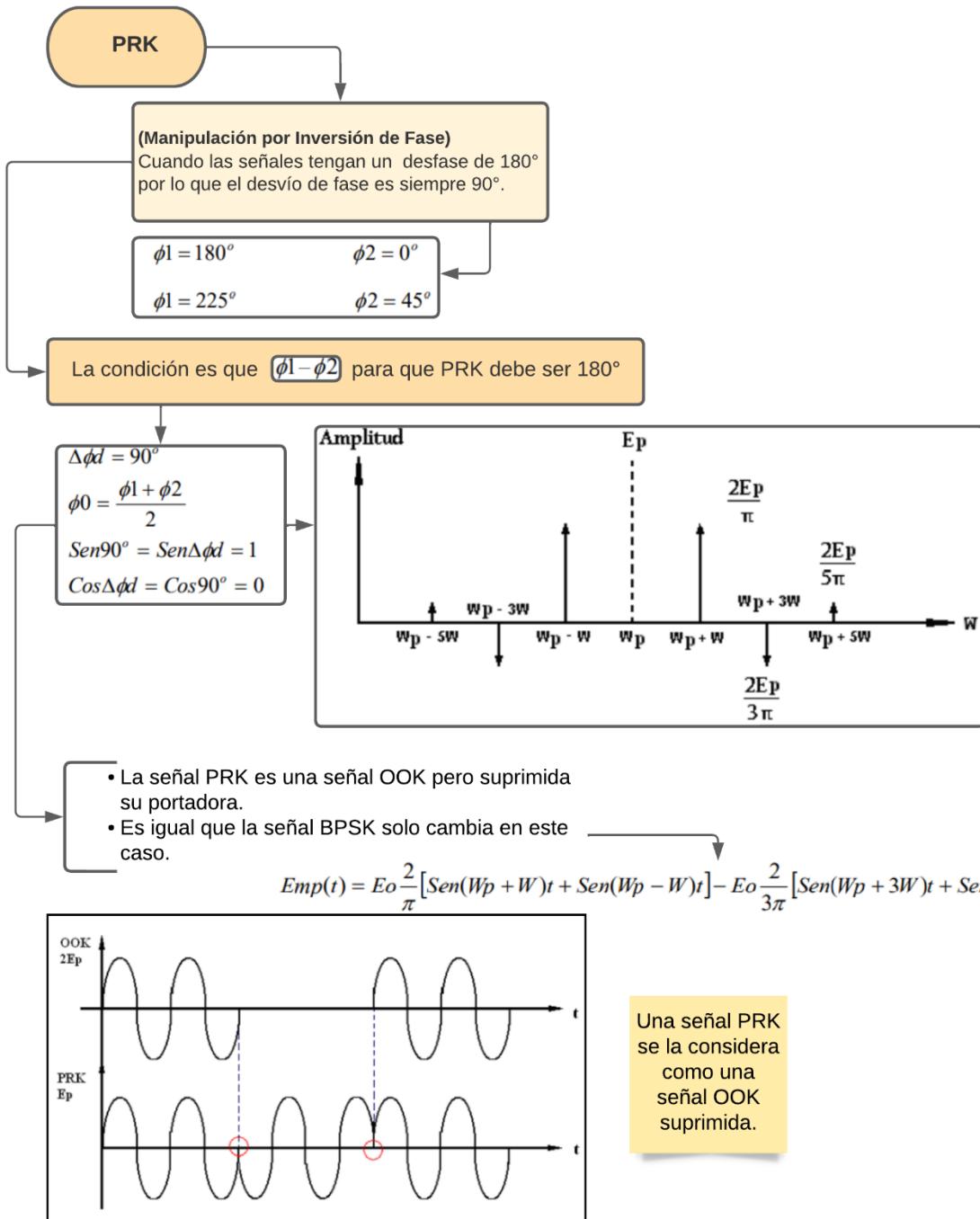
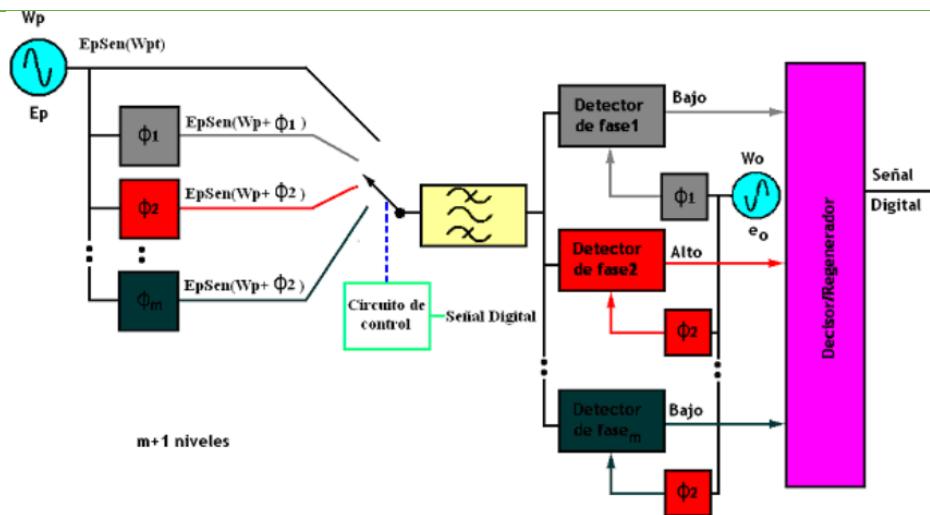


Ilustración 16: PRK

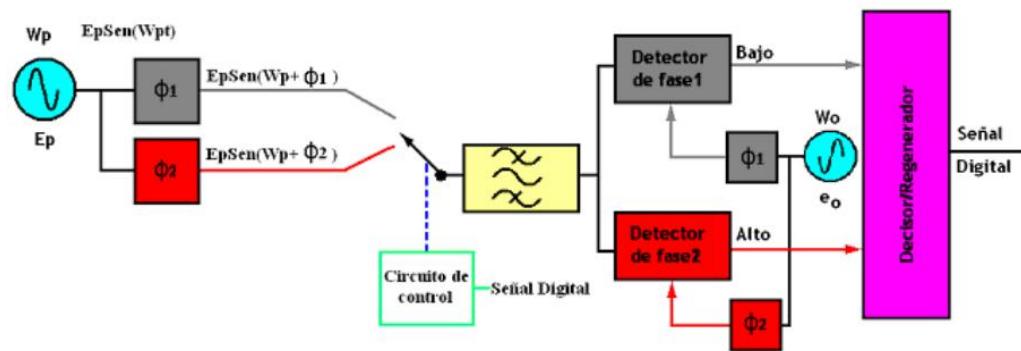
### 3.1. CIRCUITOS MODULADORES Y DEMODULADORES

#### CIRCUITOS MODULADORES

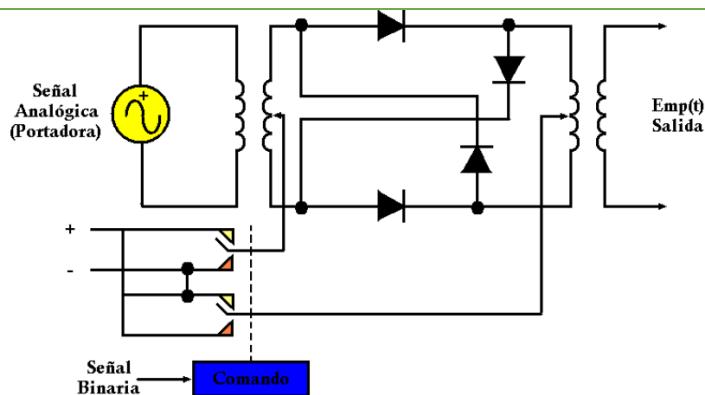
#### SEÑAL MPSK



#### SEÑAL BPSK



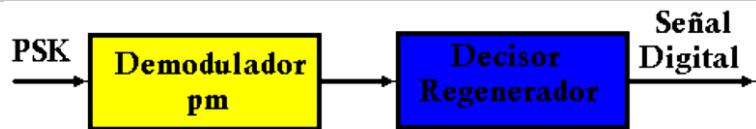
#### SEÑAL PRK



- Para la señal PRK cambia la fase 180°
- La relación entre fase es 180°
- El circuito es el mismo que el BPSK

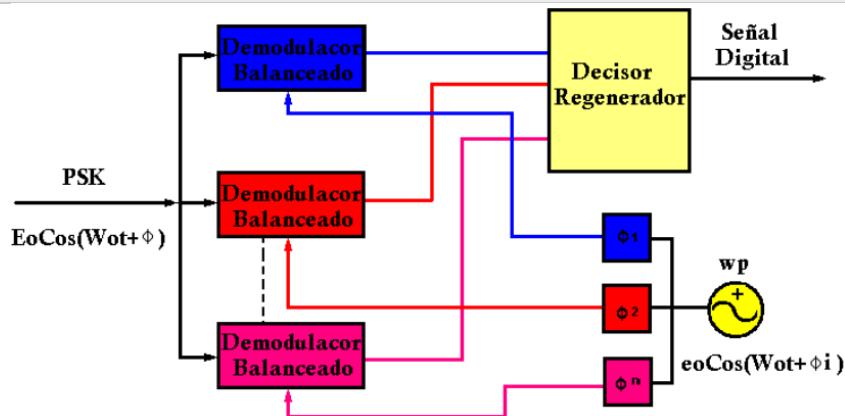
## CIRCUITOS DEMODULADORES

### 1. CONVENCIONAL



- Con señal binaria no hay problemas.
- Con señal multinivel existe problemas.

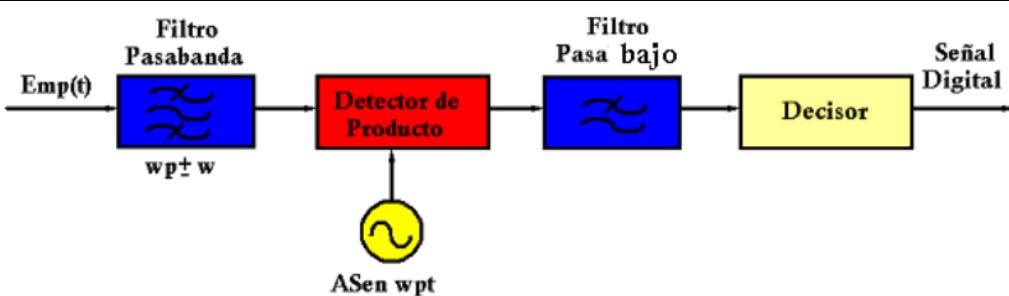
### 2. BALANCEADOS



- Las señales que ingresan al demodulador deben ser síncronas en frecuencia y coherentes en fase (Fases deben mantenerse un tiempo determinado).
- La amplitud puede ser la misma pero no necesariamente.

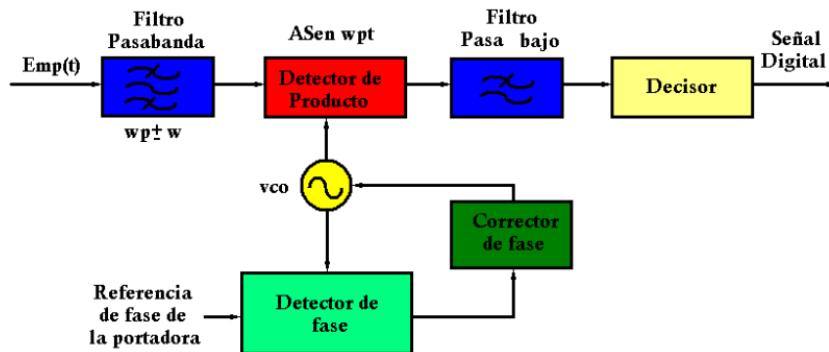
### 3.2. SISTEMA COHERENTE Y DIFERENCIAL

#### 1. Detección síncrona con oscilador libre



Con dos niveles digitales el circuito trabaja correctamente, pero con mas niveles digitales existe problemas por los desfases ya que el decisor no puede identificar a que nivel lógico corresponde la señal (fase).

## 2.- Detección síncrona con fase cerrada (lazo cerrado)



Referencia de fase de la portadora se puede obtener de la señal que esta llegando originalmente o se puede generar localmente.

En el circuito esta tensión de control la tenemos a la salida del corrector de fase. La diferencia de fase es transformada en tensión en el corrector de fase si son iguales las fases la diferencia de fase es 0. La generación de fase se lo hace en forma secuencial

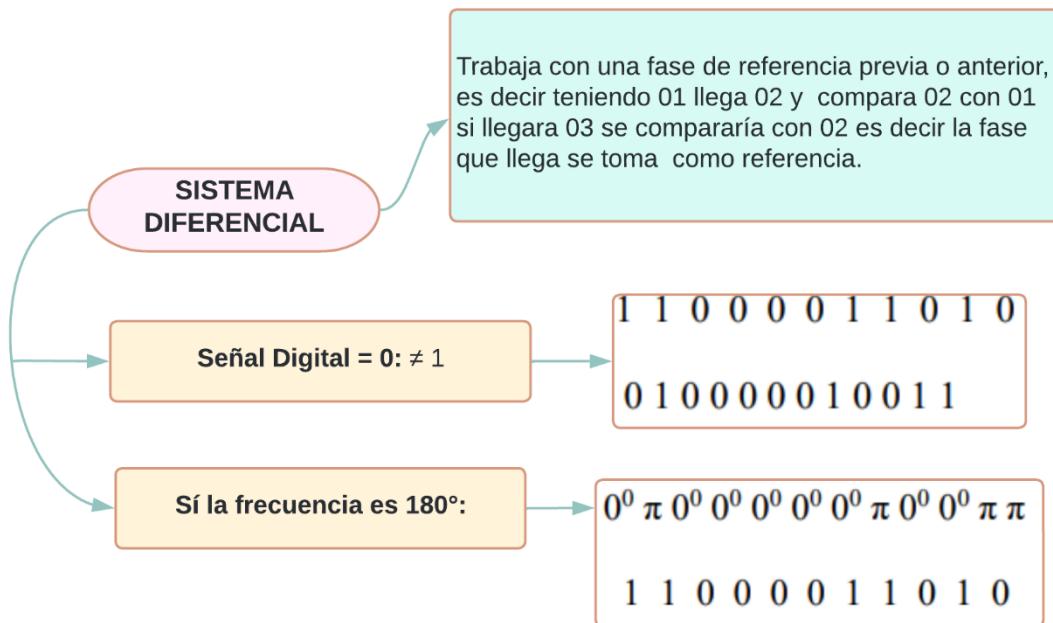


Ilustración 17: Sistema diferencial

### 3.3. Transmisor BPSK

Este modulador balanceado tiene dos entradas: una portadora que está enfasada con el oscilador de referencia, y los datos digitales binarios. Para que funcione bien el modulador balanceado, el voltaje de entrada digital debe ser mucho mayor que el máximo de la portadora. Así se asegura que la entrada digital controle el estado encendido/apagado de los diodos D1 a D4. Si la entrada binaria es un 1 lógico (voltaje positivo), los diodos D1 y D2 tienen polarización directa y están encendidos, mientras que los diodos D3 y D4 tienen polarización inversa y están apagados.

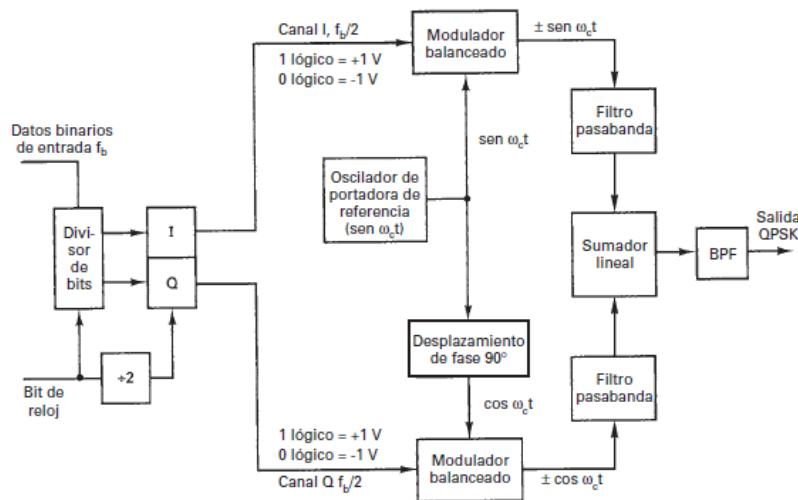


Ilustración 18 Transmisor QPSK

Entrada binaria		Fase de salida QPSK
Q	I	
0	0	-135°
0	1	-45°
1	0	+135°
1	1	+45°

Ilustración 19 Tabla de verdad

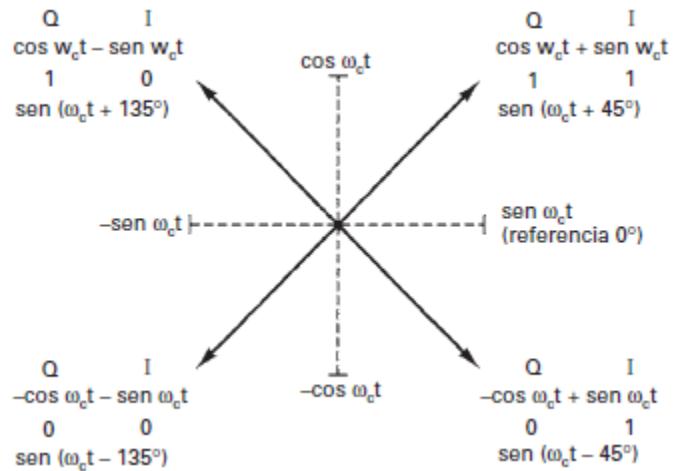


Ilustración 20 Diagrama Fasorial

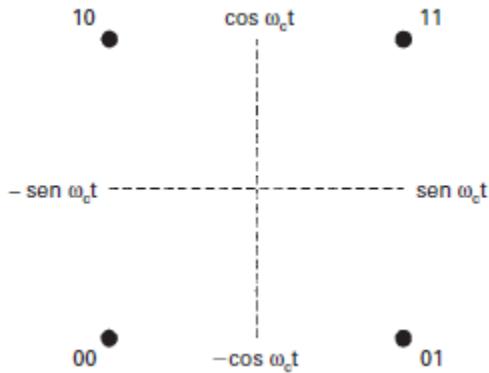


Ilustración 21 Diagrama Constelación

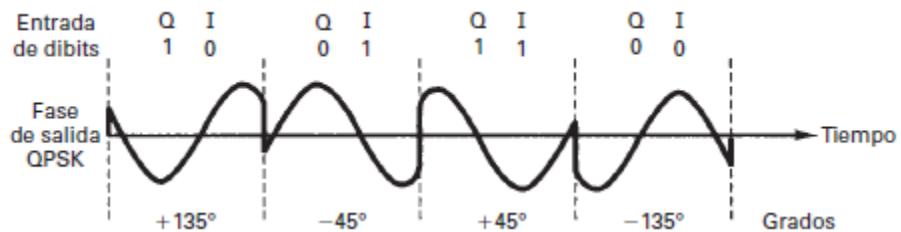


Ilustración 22 Señal modulada QPSK

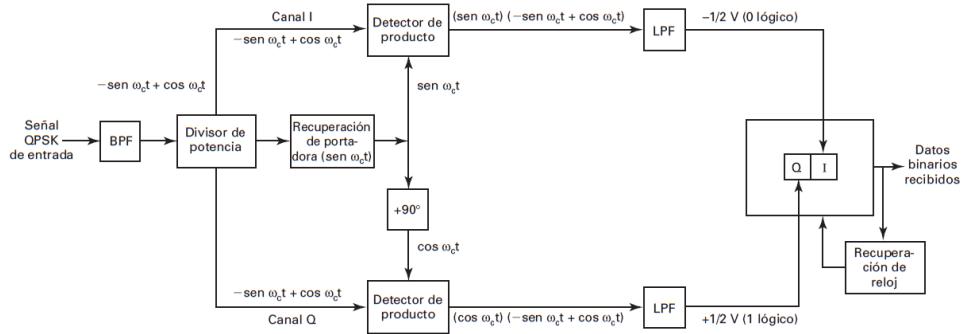


Ilustración 23 Receptor QPSK

### 3.4. Transmisor 8PSK

La corriente de bits en serie que llega entra al divisor de bits, donde se convierte en una salida paralela de tres canales: el canal I o enfasado, el canal Q o en cuadratura, y el canal C o de control. En consecuencia, la rapidez de bits en cada uno de los tres canales es  $f_b/3$ . Los bits de los canales I y C entran al convertidor de 2 a 4 niveles del canal I, y los bits de los canales Q y -C entran al convertidor de 2 a 4 niveles del canal Q. En esencia, los convertidores de 2 a 4 niveles son convertidores digitales a analógicos (DAC, de digital-to-analog converter) de entrada en paralelo. Con dos bits de entrada son posibles cuatro voltajes de salida.

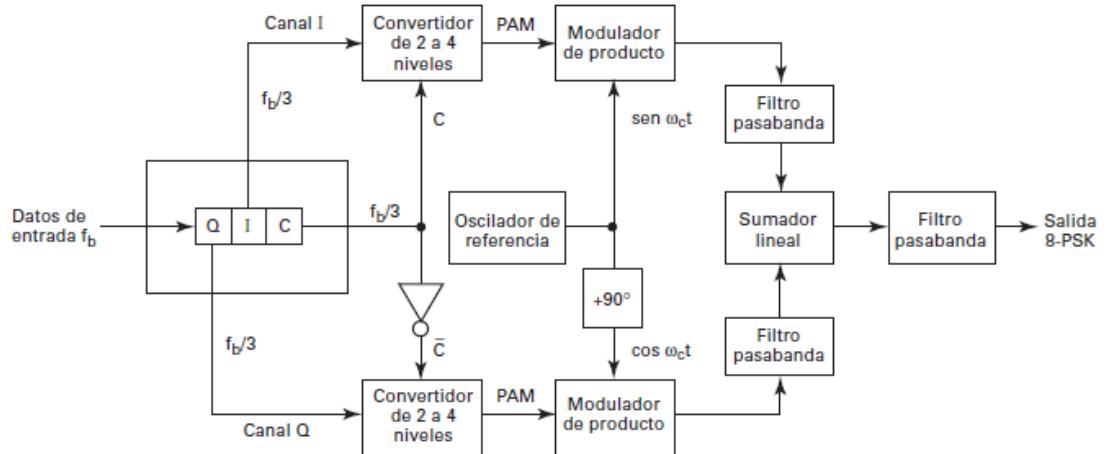


Ilustración 24 Transmisor 8PSK

Entrada binaria	Fase de salida 8-PSK
Q I C	
0 0 0	-112.5°
0 0 1	-157.5°
0 1 0	-67.5°
0 1 1	-22.5°
1 0 0	+112.5°
1 0 1	+157.5°
1 1 0	+67.5°
1 1 1	+22.5°

Ilustración 25 Tabla de verdad 8PSK

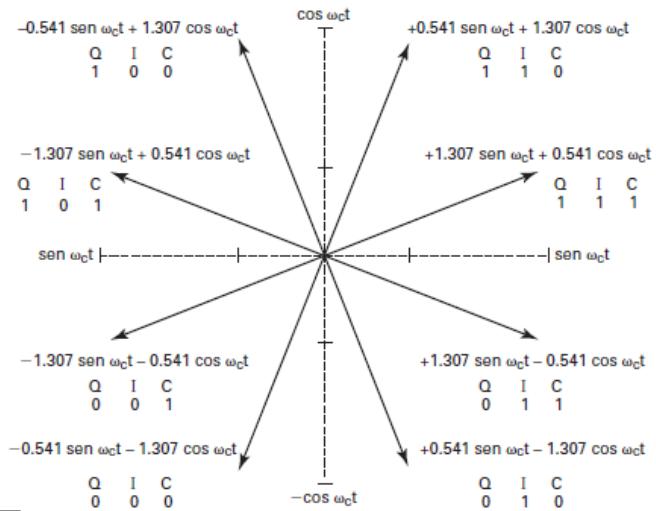


Ilustración 26 Diagrama Fasorial 8PSK

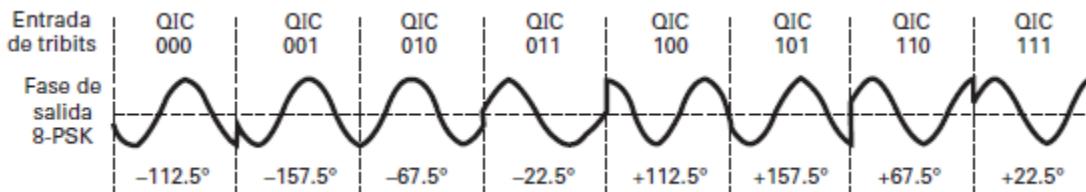


Ilustración 27 Salida 8PSK

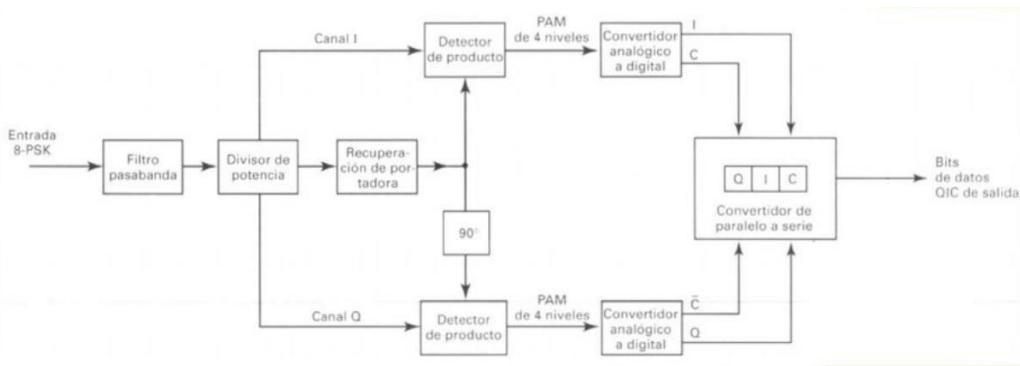


Ilustración 28 Receptor 8PSK

#### 4. Modulación QAM

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

##### 4.1. Ventajas.

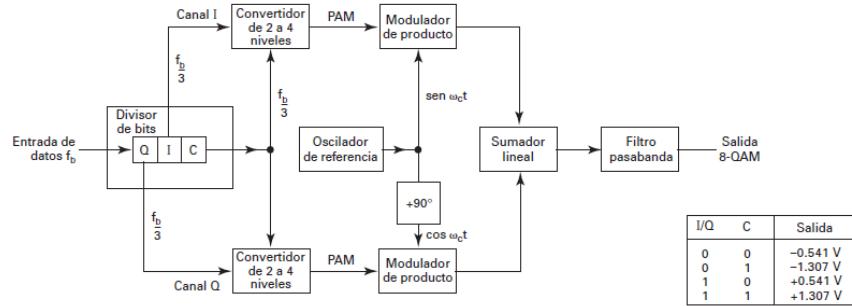
- Mayor inmunidad al Ruido.
- Menor consumo de energía eléctrica.
- Menor costo.
- Mayor capacidad para acarrear grandes cantidades de información respecto a los métodos de modulación analógica.
- Proveen transmisiones de mejor calidad.
- Compatibilidad con servicios digitales de datos.
- Mayor seguridad en la transmisión de información.

##### 4.2. Inmunidad al ruido.

La inmunidad que tiene la señal modulada en cuanto a las perturbaciones y al Ruido de la línea, es mayor cuanto más separados estén los puntos del diagrama de estados. Se trata, pues, de buscar una "constelación" de puntos, en analogía con la astronomía, con unas coordenadas de amplitud y fase que hagan máxima la separación entre ellos.

##### 4.3. Transmisor 8-QAM

Se ve que la única diferencia entre los transmisores 8-QAM y el 8-PSK, es la omisión del inversor entre el canal C y el modulador de producto Q. Como en la 8-PSK, los datos que llegan se dividen en grupos de tres bits (tribits): las corrientes I, Q y C de bits, cada una con rapidez de bits igual a la tercera parte de la rapidez de entrada de datos.



#### 4.4. Consideraciones de ancho de banda con 8-QAM

En el 8-QAM, la rapidez de bits en los canales I y Q es la tercera parte de la rapidez de entrada binaria, igual que en 8-PSK. En consecuencia, la máxima frecuencia moduladora fundamental, y la máxima rapidez de cambio de salida necesaria para 8-QAM es  $f_b/3$ , igual que para 8-PSK.

Entrada binaria			Salida 8-QAM	
Q	I	C	Amplitud	Fase
0	0	0	0.765 V	-135°
0	0	1	1.848 V	-135°
0	1	0	0.765 V	-45°
0	1	1	1.848 V	-45°
1	0	0	0.765 V	+135°
1	0	1	1.848 V	+135°
1	1	0	0.765 V	+45°
1	1	1	1.848 V	+45°

Ilustración 29 Tabla de verdad 8QAM

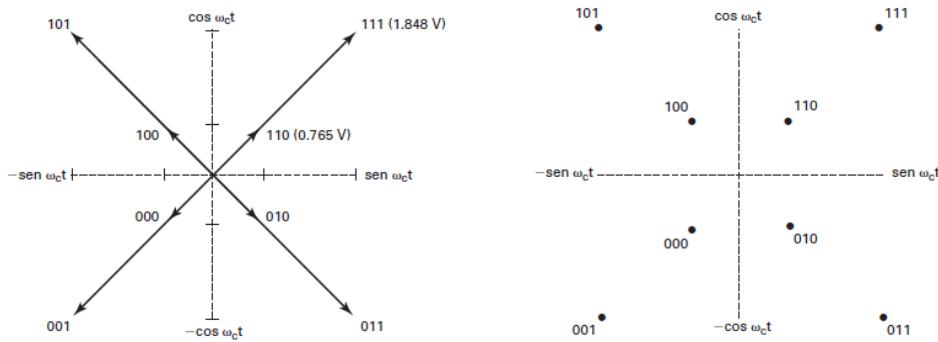


Ilustración 30 Diagrama Fasorial y de constelación

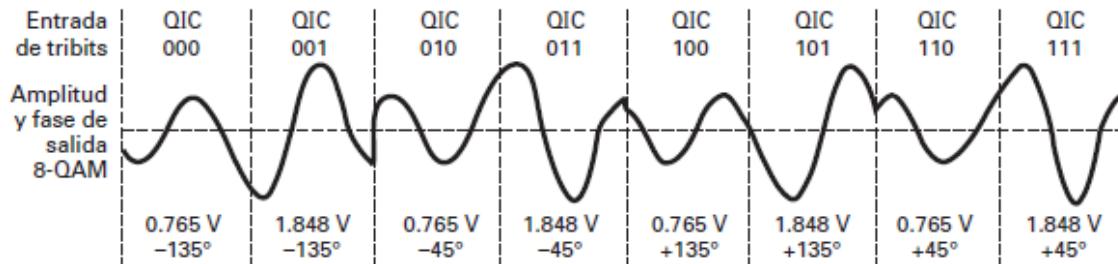


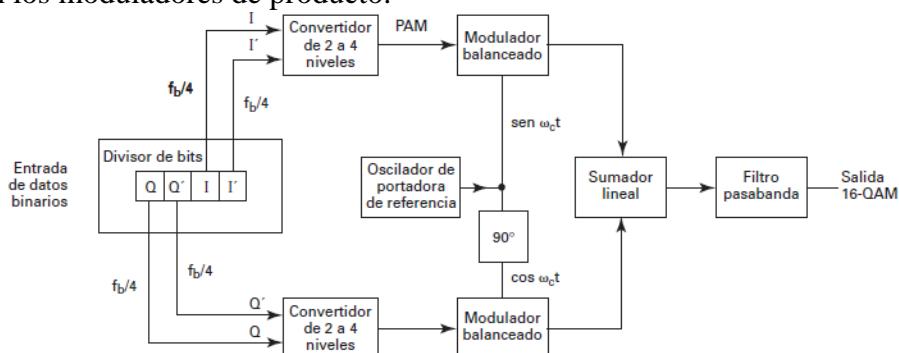
Ilustración 31 Salida 8QAM

#### 4.5. Receptor 8QAM

Un receptor 8-QAM es casi idéntico al receptor 8-PSK. Las diferencias son los niveles de modulación de amplitud de pulso (PAM) en la salida de los detectores de producto y las señales binarias en la salida de los convertidores analógico a digital. Como hay dos amplitudes de transmisión posibles con 8-QAM, que son distintas que las que se obtienen con 8-PSK, los cuatro niveles PAM desmodulados en el 8-QAM son distintos de los de 8-PSK. En consecuencia, el factor de conversión para los convertidores analógico a digital también debe ser distinto. También, en 8-QAM, las señales binarias de salida del convertidor analógico a digital del canal I son los bits I y C, y las señales de salida binaria del convertidor analógico al digital del canal Q son los bits Q y C.

#### 4.6. Transmisor 16QAM

Los datos binarios de entrada se dividen en cuatro canales: I, I', Q y Q'. La rapidez de bits en cada canal es igual a la cuarta parte de la rapidez de entrada de bits ( $f_b/4$ ). Se sincronizan cuatro bits en serie en el divisor de bits; a continuación, salen en forma simultánea y en paralelo con los canales I, I', Q y Q'. Los bits I y Q determinan la polaridad en la salida de los convertidores de 2 a 4 niveles (1 lógico= positivo y 0 lógico= negativo). Los bits I' y Q' determinan la magnitud (1 lógico= 0.821 V y 0 lógico= 0.22 V). En consecuencia, los convertidores de 2 a 4 niveles generan una señal PAM de 4 niveles. Son posibles dos polaridades y dos magnitudes en la salida de cada convertidor de 2 a 4 niveles, que son  $\pm 0.22$  V y  $\pm 0.821$  V. Las señales PAM modulan las portadoras en fase y en cuadratura en los moduladores de producto.



#### 4.7. Consideraciones de ancho de banda con 16-QAM.

En 16-QAM, como los datos de entrada se dividen en cuatro canales, la rapidez de bits en el canal I, I', Q o Q' es igual a la cuarta parte de la rapidez de entrada de datos binarios,  $f_b/4$ , porque el divisor de bits estira los bits I, I', Q y Q hasta cuatro veces su longitud de entrada. También, como esos bits salen en forma simultánea y en paralelo, los convertidores de 2 a 4 niveles ven un cambio en sus entradas y salidas con una rapidez igual a la cuarta parte de la rapidez de entrada

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°

Ilustración 32 Tabla de verdad 16QAM

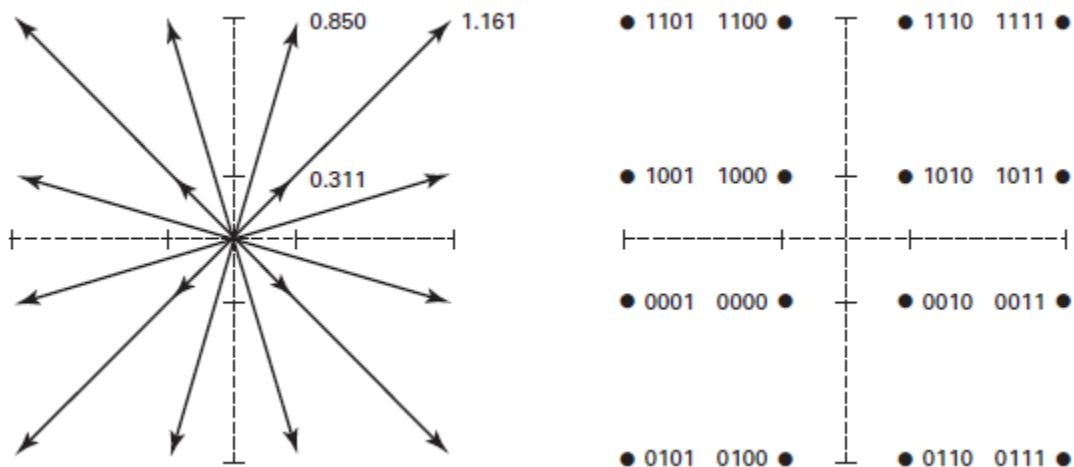


Ilustración 33 Diagrama fasorial y de constelación

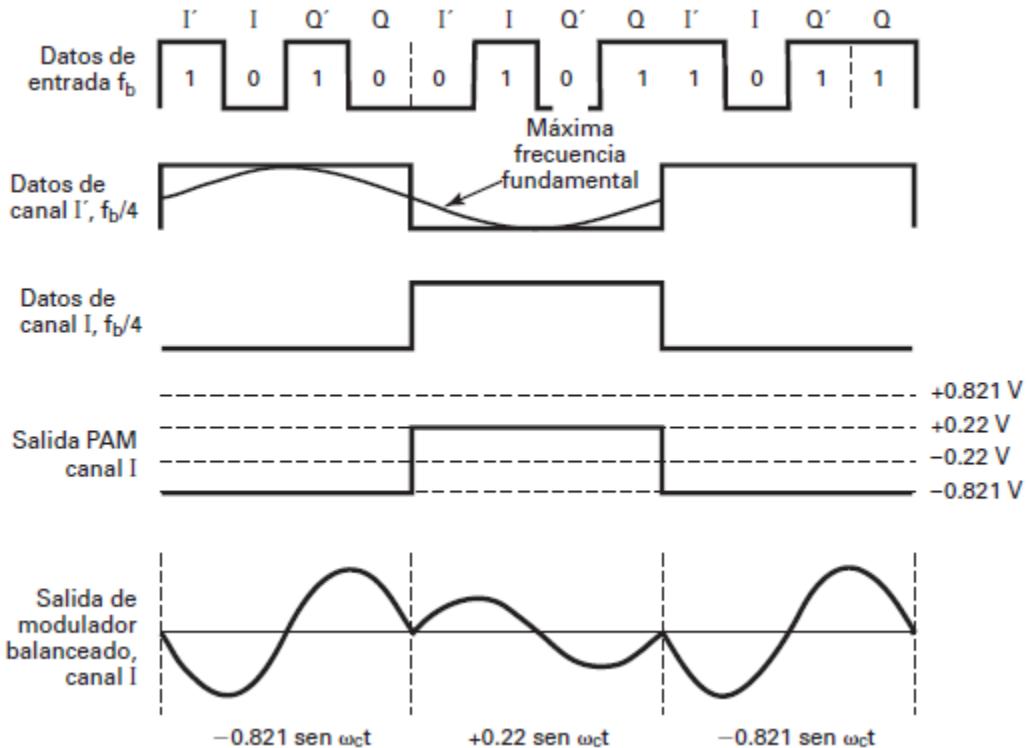


Ilustración 34 Salida de 16QAM

#### 4.8. Eficiencia del ancho de banda

La eficiencia de ancho de banda, o densidad de información, como a veces se le llama, se usa con frecuencia para comparar el funcionamiento de dos técnicas de modulación digital. En esencia, es la relación de rapidez de transmisión de bits entre el ancho mínimo de banda necesario para determinado esquema de modulación. En general, la eficiencia de ancho de banda se normaliza a un ancho de banda de 1 Hz y en consecuencia indica la cantidad de bits que se pueden propagar a través de un medio, por cada hertz de ancho de banda. La definición matemática del ancho de banda es:

$$\text{Eficiencia de AB} = \frac{\text{rapides de transmision (bps)}}{\text{ancho minimo de banda (Hz)}} = \frac{\text{bits/segundo}}{\text{ciclo/segundo}} = \frac{\text{bits}}{\text{ciclo}}$$

#### 4.9. Eficiencia para distintos tipos de modulación

Esquema de modulación	Ancho de banda mínimo (MHz)	Modulación	Codificación	Ancho de banda (Hz)	Baudios	Eficiencia de ancho de banda (bps/Hz)
BPSK	10	FSK	Un bit	$\geq f_b$	$f_b$	$\leq 1$
QPSK	5	BPSK	Un bit	$f_b$	$f_b$	1
8-PSK	3.33	QPSK	Dibit	$f_b/2$	$f_b/2$	2
16-QAM	2.5	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

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

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

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

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

## 5. TRANSMISIÓN

DIGITALIZACIÓN DE SISTEMAS ANÁLOGICOS	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>1. Los impulsos digitales son menos susceptibles a variaciones causadas por ruido que las señales analógicas.</p> <p>2. Las señales digitales se prestan mejor a su procesamiento y multiplexado que las señales analógicas.</p> <p>3. Los sistemas digitales de Tx son más resistentes al ruido que los analógicos.</p> <p>4. Es más fácil medir y evaluar las señales digitales, obtener la eficiencia con capacidades distintas de señalización e información.</p> <p>5. En los sistemas digitales se adaptan más para evaluar el funcionamiento de errores.</p>	<p>1. La Tx de señales analógicas codificadas digitalmente requiere un AB mayor que una señal analógica original.</p> <p>2. Las señales analógicas se deben convertir en códigos digitales antes de su Tx y reconvertearse a la forma original en el receptor teniendo circuitos adicionales como codificador y decodificador.</p> <p>3. La Tx digital requiere sincronización precisa entre los CLK del Tx y Rx, elevados costos de estos equipos.</p> <p>4. Los sistemas digitales son incompatibles en los sistemas analógicos</p>

Ilustración 35: Transmisión digital

### MODULACIÓN EN PORTADORA TREN DE PULSOS (MIC-PCM)

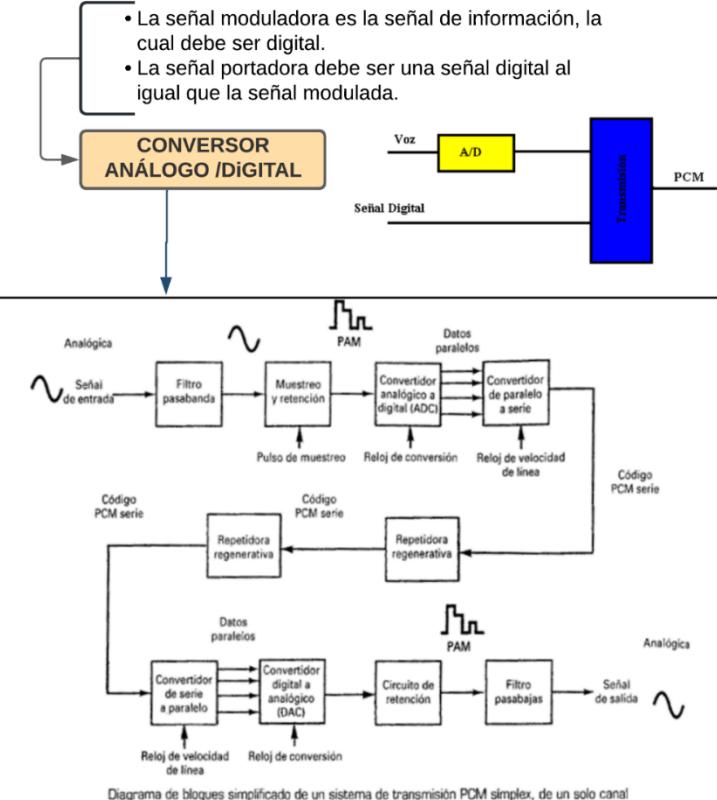
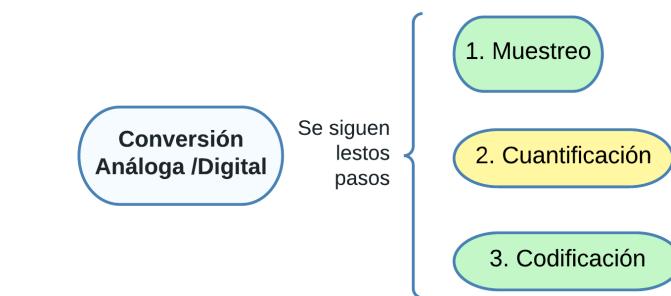
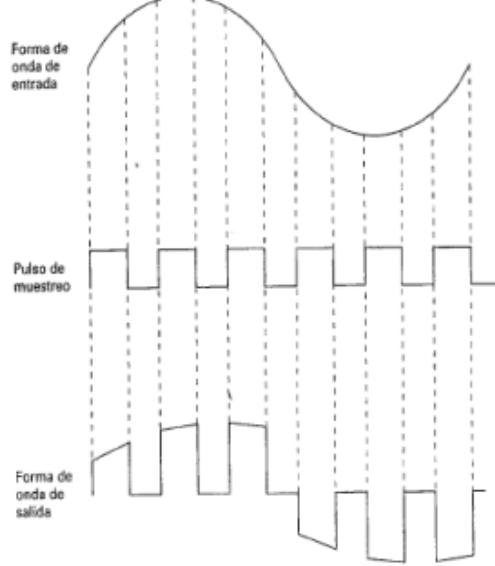
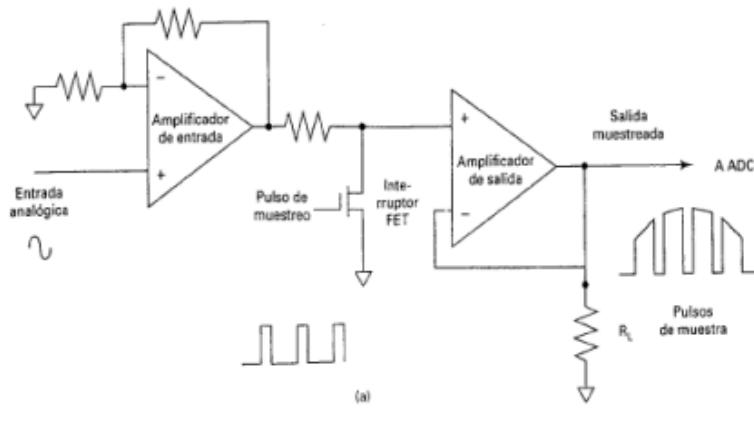


Ilustración 36: Modulación MIC PCM



#### 5.1. Muestreo

Es tomar muestras discretas de una señal continua en el tiempo. La amplitud de los pulsos muestreados debe ser directamente proporcional a la amplitud de la señal analógica en el instante del muestreo.



### ➤ Teorema del muestreo

La frecuencia de muestreo debe ser el doble de la frecuencia máxima presente en la señal.

$$fm \geq 2fs$$

$fm = 2fs \rightarrow$  velocidad de muestreo

$$tm = \frac{1}{fm} \rightarrow$$
 Intercambio de muestreo Nyquist

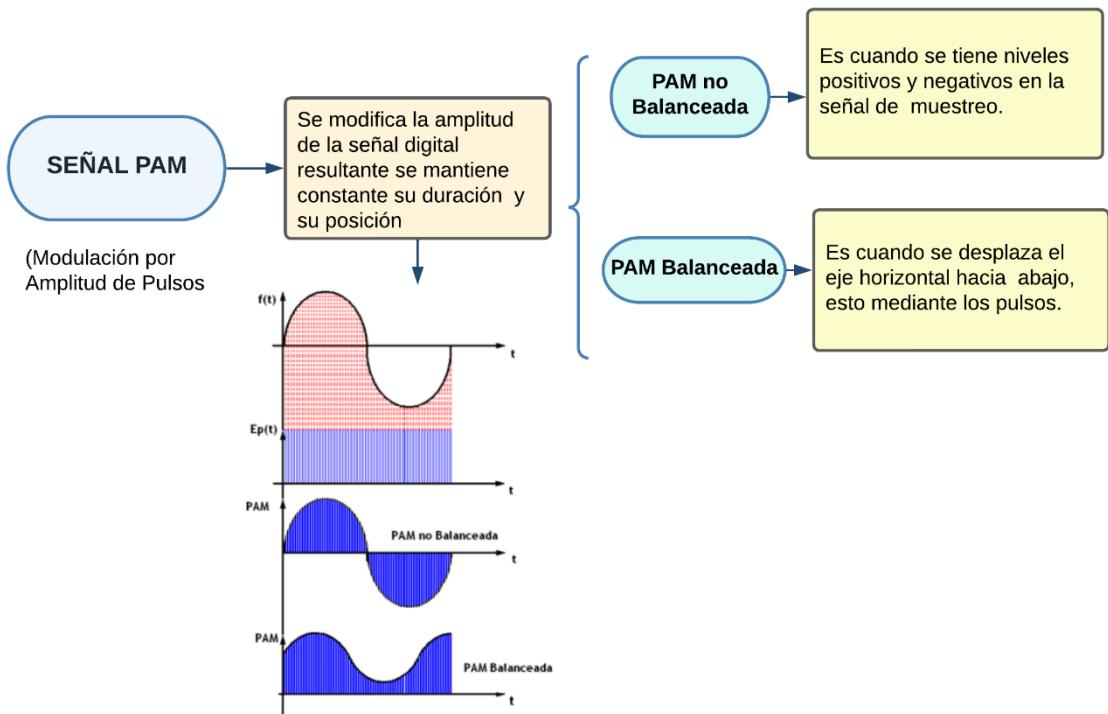


Ilustración 37: Señal PAM

### ➤ Representación matemática

$$Ep(t) = Eo\delta(t)$$

$\delta(t) \rightarrow$  Función unitaria de período T con intervalo de  $\frac{T}{2}$

$$1 \rightarrow \frac{T}{2} \quad 0 \rightarrow \frac{T}{2}$$

$$E_{PAM(No\ balanceda)} = kx(t) \times Eo\delta(t)$$

$k \rightarrow$  factor de escala (general - 1 o > 1)

$$E_{PAM(Balanceada)} = Eo\delta(t) + kx(t) \times Eo\delta(t)$$

$$E_{PAM(Balanceada)} = Eo\delta(t)[1 + kx(t)]$$

$$E_{PAM(Balanceada)} = Eo\delta(t)[1 + kAsenwt]$$

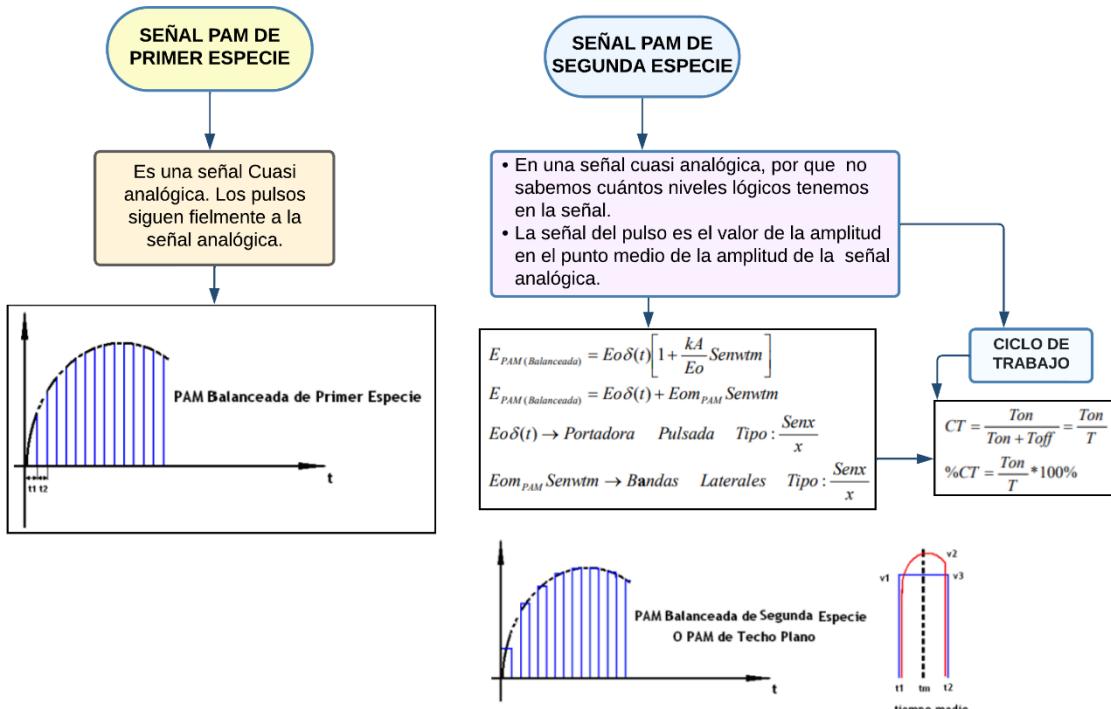
$$E_{PAM(Balanceada)} = Eo\delta(t) \left[ 1 + \frac{kA}{Eo} \operatorname{sen} wt \right] \rightarrow \frac{kA}{Eo}$$

→ Lo dividimos para este término por que no afecta a la función

$$m_{PAM} = \frac{k}{Eo} A \leq 1 \rightarrow \text{Señal PAM Balanceada}$$

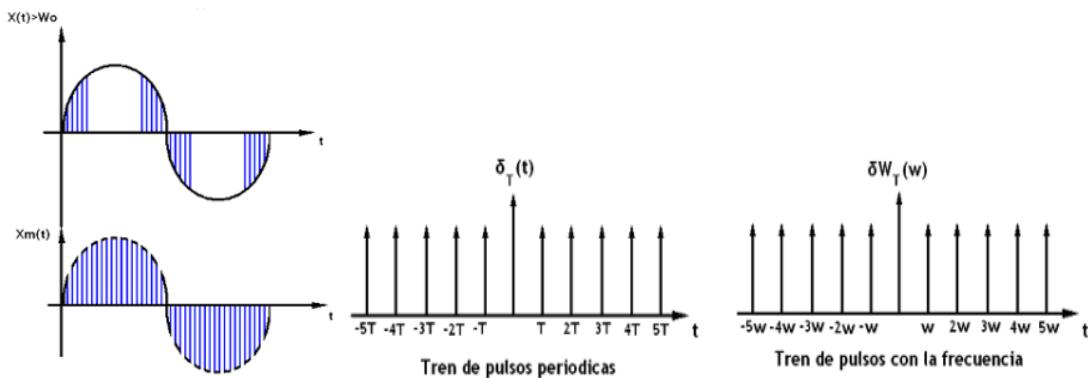
$$\frac{k}{Eo} A = 1$$

$$k = \frac{Eo}{A} // R$$



### ➤ Muestreo ideal

En el muestreo ideal en el instante de muestreo ( $T$ ), tiende a cero es decir se trata de una sucesión de muestras infinitas.



Para obtener  $X_m(t)$  se multiplica la señal periódica  $\delta(t)$

$$Xm(t) = x(t) * \delta(t)$$

$$fm = 2fs$$

$$voz = 4Khz$$

$$fm = 8khz \quad f(x) = \begin{cases} tm = \frac{1}{fm} = \frac{1}{8Khz} \\ tm = 125 \text{ } \mu\text{segundos} \end{cases}$$

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$$

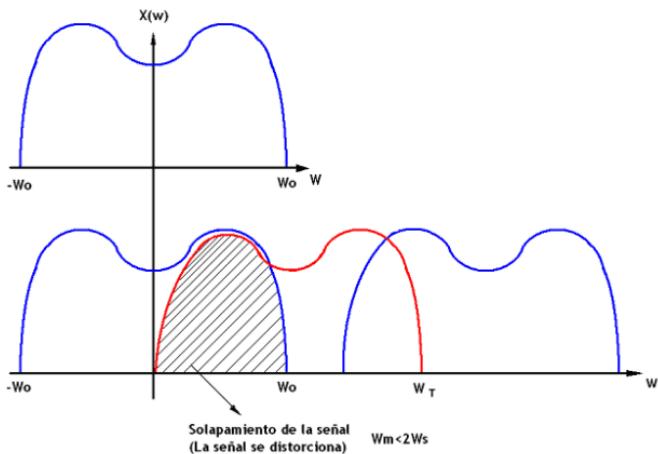
$$x_m(t) = x(t) * \delta_T(t)$$

$$x_m(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta_T(t - nT)$$

$$x_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) * \delta_T(t - nT)$$

$$Xm(f) = f_T X(f) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_T)$$

$$Xm(f) = f_T \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_T)$$



Si la señal tiene impulsos en sus extremos

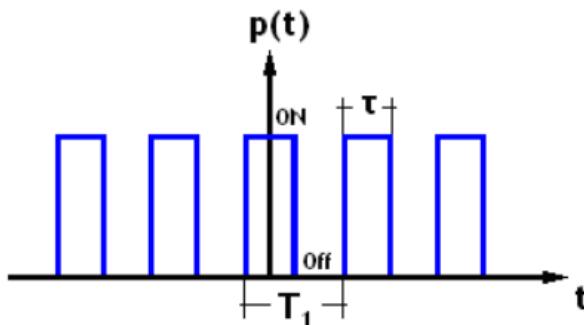
$$fm > 2fs$$

Para recuperar la señal de información se trabaja con filtros pasabajos LPf (Low pass filter) con una frecuencia de corte.  $f_{corte} = fs$  (*frecuencia más alta de la señal*)

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X\left(\frac{n}{2f_s}\right) \text{sinc}(2fot - n)$$

En teoría se debe sumar un número infinito de muestras, esto genera un error de truncamiento, pero en la práctica se suma un número finito de valores muestreados y el resto se elimina.

### ➤ Muestreo uniforme o natural



$$\begin{aligned} CT &= \text{Ciclo de Trabajo} = \frac{\delta(\tau)}{T_1} * 100\% \\ CT &= \text{Ciclo de Trabajo} = \frac{ON}{ON + Off} * 100\% \\ Cn &= CT = \frac{\text{Sen}(n\pi CT)}{n\pi CT} // R \\ x_m(t) &= x(t) * p(t) \\ x_m(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t) Cne^{jn\omega_1 t} \\ Xm(f) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} Cn X(f - nf_1) \end{aligned}$$

El espectro de la señal se repite cada 1 f pero multiplicado por CN. La señal ( ) 1 x t se puede recuperar con un filtro pasa bajos.

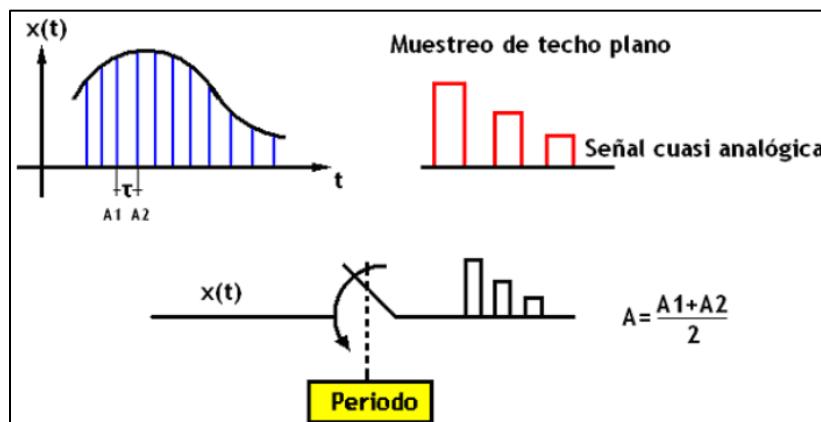


Ilustración 38 Muestreo de techo plano

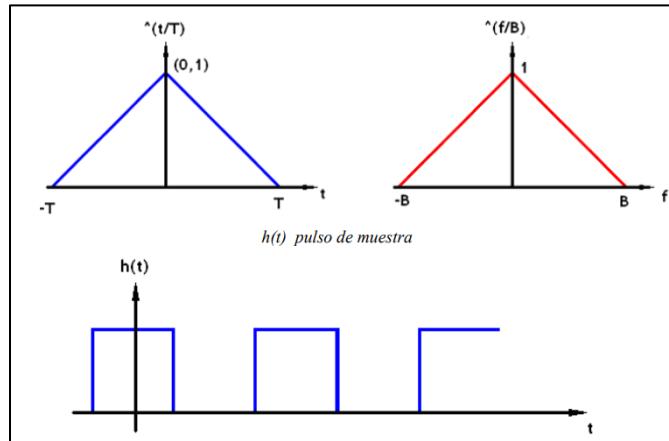
La amplitud es igual al valor de la función evaluada en el tiempo medio del intervalo de tiempo de muestra.

### Ejemplo:

Una forma de onda analógica  $x(t)$  se muestra mediante techo plano con una razón de muestreo de 8Khz y un ancho de pulso de 100μsegundos .

Suponemos que  $X(f) = 2^{\left(\frac{F}{B}\right)}$

$B = 3Khz$



$$h(t) = \begin{cases} 1; & |t| < \frac{\tau}{2}; -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} \\ 0; & |t| > \frac{\tau}{2}; -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} \end{cases}$$

$$x_m(t) = h(t)\delta(t - nt) * x(t)$$

$h(t)\delta(t - nt) \rightarrow$  Pulso de muestra

$$x_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(t)\delta(t - nt) * x(nt) \rightarrow$$
 Convolución

$$Xm(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n x(f - nf_1)$$

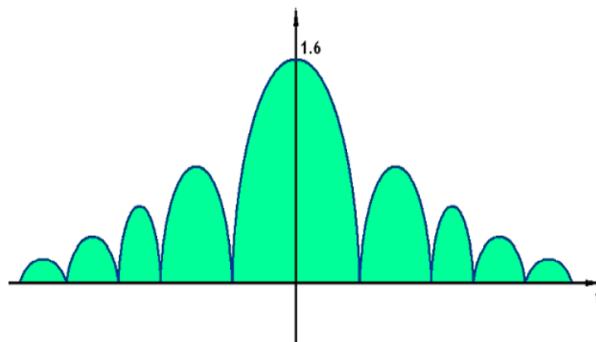
$$Xm(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n x(f - nf_1)$$

$$Xm(f) = \frac{1}{T} H(f) \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_1)$$

$$H(f) = F[h(t)] = \tau \frac{\operatorname{Sen} \pi f \tau}{\pi f \tau}$$

$$\text{Se obtiene: } Xn(f) = \frac{1}{T} \left( \tau \frac{\operatorname{Sen} \pi f \tau}{\pi f \tau} \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2^{\left(\frac{f-nf_1}{B}\right)}$$

Su espectro es:



$$Xm(f) = H(F) \left[ X(f) \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn2\pi fT} \right]$$

$$x(t) = h(t) \cdot x(nT) \delta(t - nT)$$

$\delta(t - nT) \rightarrow$  Para indicar que es una señal periódica

$$Xm(f) = \tau \frac{\operatorname{sen}(\pi f\tau)}{\pi f\tau} \left[ 2\left(\frac{f}{B}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn2\pi fT} \right]$$

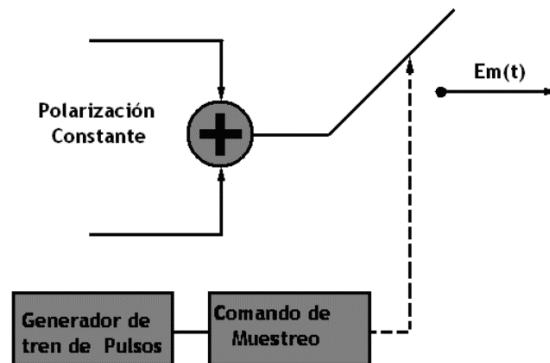
$$Xm(f) = 1.6 * 8Khz * 100\mu seg Sa(\pi f\tau) \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2\left(\frac{f-nf_1}{B}\right)$$

Si  $f=0$

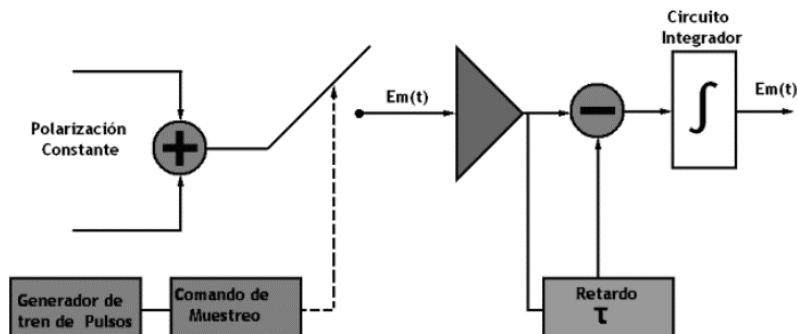
$$Xm(f) = 1.6 * Sa(0) \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2\left(\frac{0}{B}\right)$$

$$Xm(f) = 1.6$$

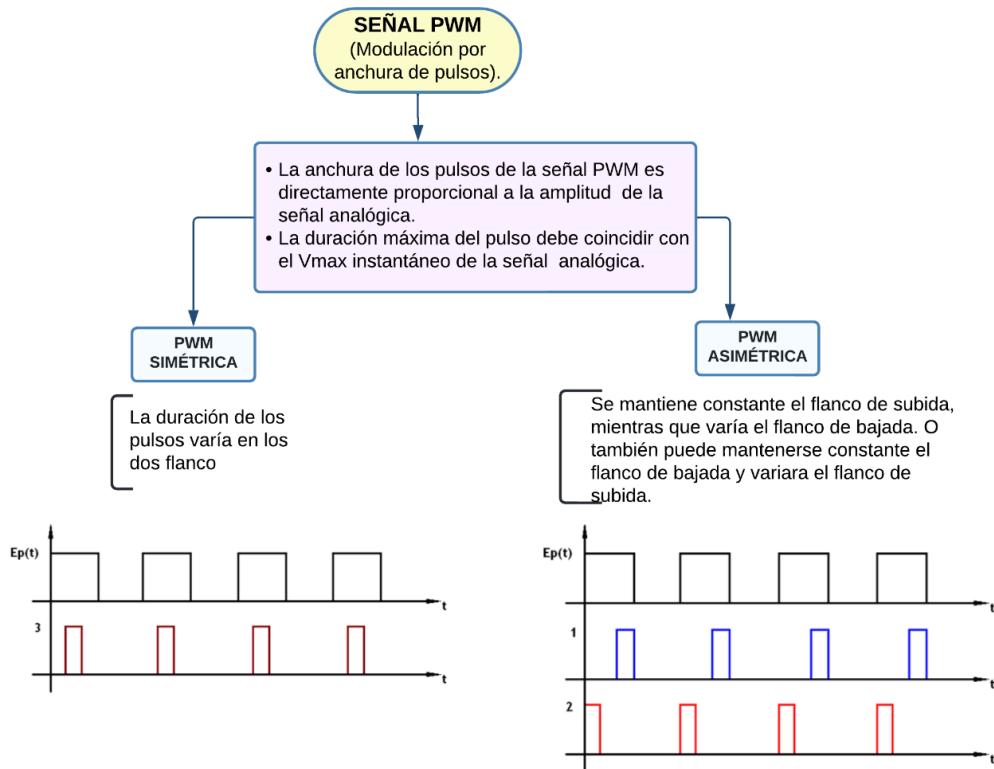
## 5.2. Modulador PAM de primer especie



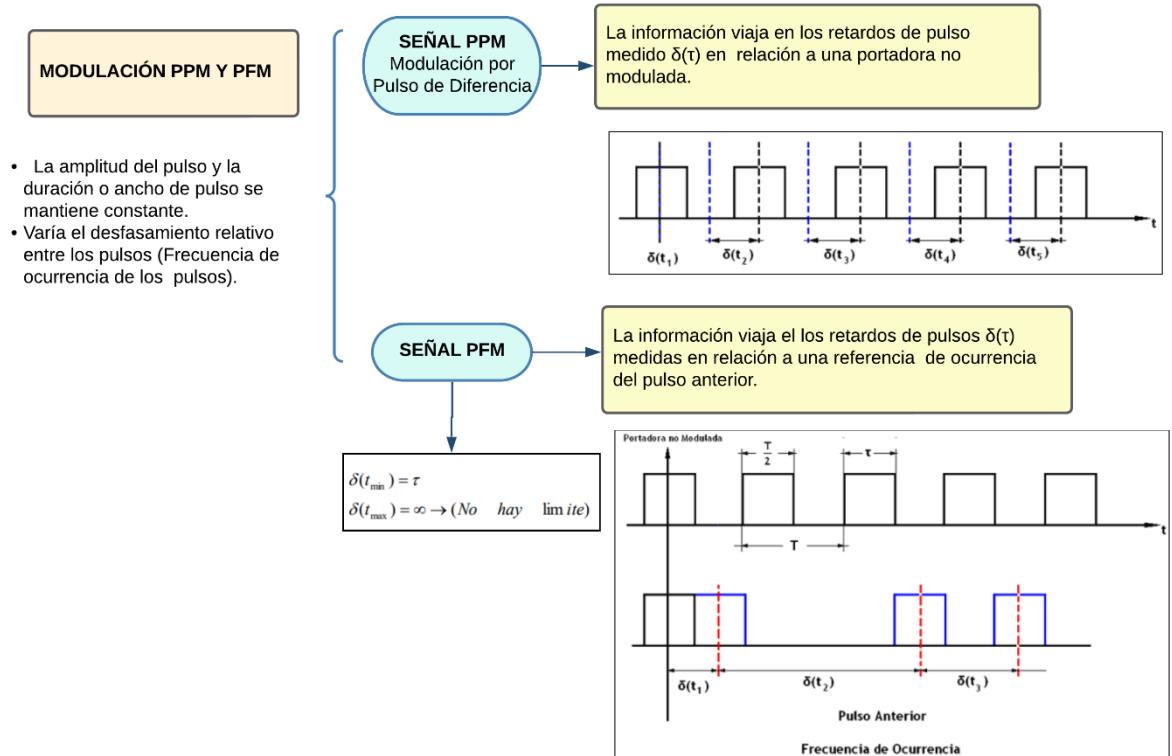
## 5.3. Modulador PAM de segunda especie



## 5.4. Señal PWM

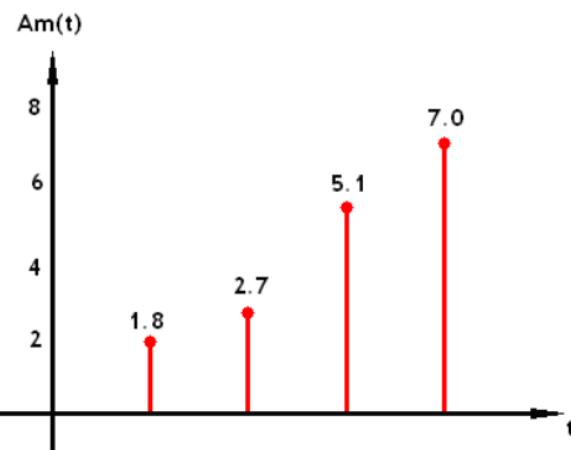


## 5.5. MODULACIÓN PPM Y PFM (Modulación por Pulso de Diferencia) y (Modulación por Posición de fase).



## 6. CUANTIFICACIÓN

**Definición:** Es un proceso de aproximar valores muestreados a niveles de cuantificación (niveles de voltaje predeterminado). La aproximación se realiza matemáticamente.



- Cuando el paso que existe entre los niveles de cuantificación es el mismo, al realizar la cuantificación se produce un error de aproximación llamado ruido de cuantificación (es mayor para amplitudes de las señales bajas) (es menor para amplitudes altas de la señal). Hace que la relación S/R sea diferente.
- Si la relación S/R es baja es difícil de recuperar la señal de información. [1]

### ➤ Ruido de Cuantificación

- En amplitudes altas el ruido de cuantificación es bajo.
- En amplitudes bajas el ruido de cuantificación es alto.

### ➤ Cuantificación Lineal (No Uniforme) (No Homogénea)

Cuando los espaciamientos entre los niveles de cuantificación no son constantes:

0    1    2    6    10    15    17    20

#### Características:

- Gracias a este tipo de cuantificación podemos conseguir que el ruido de cuantificación sea constante.
- A amplitudes altas las comprimimos.
- A amplitudes bajas se las expanden.
- En el transmisor se conoce como compresor y en el receptor como expansor.
- Si aumentamos el número de niveles de cuantificación podemos disminuir el ruido.

[1]

### ➤ Ley a

Se la utiliza en Europa y tiene un sistema que trabaja con 32 canales.

#### FÓRMULAS:

$$y = \frac{A|x|}{1 + \ln A} \quad (0 \leq x \leq \frac{1}{A}) \quad A = 87.6$$

$$y = \frac{1 + \ln|x|}{1 + \ln A}$$

### ➤ Ley u

Se la utiliza en Estados Unidos y en el Japón. Este sistema trabaja con 24 canales.

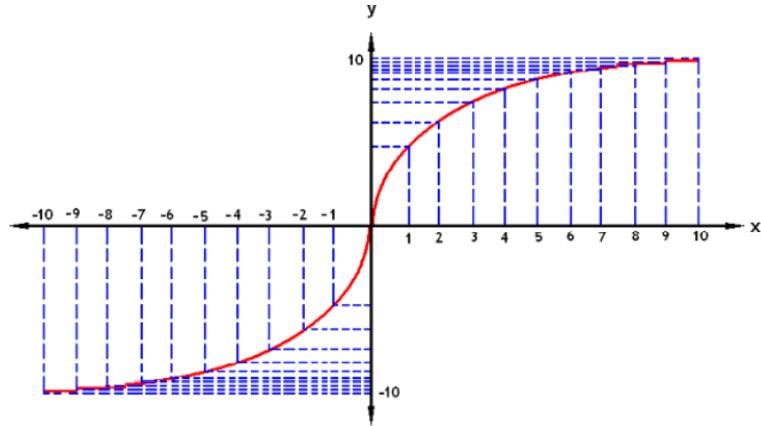
#### FÓRMULAS:

$$y = \frac{\ln(1 + u|x|)}{\ln(1 + \mu)} \rightarrow y = \frac{\log_{10}(1 + u|x|)}{\log_{10}(1 + \mu)}$$

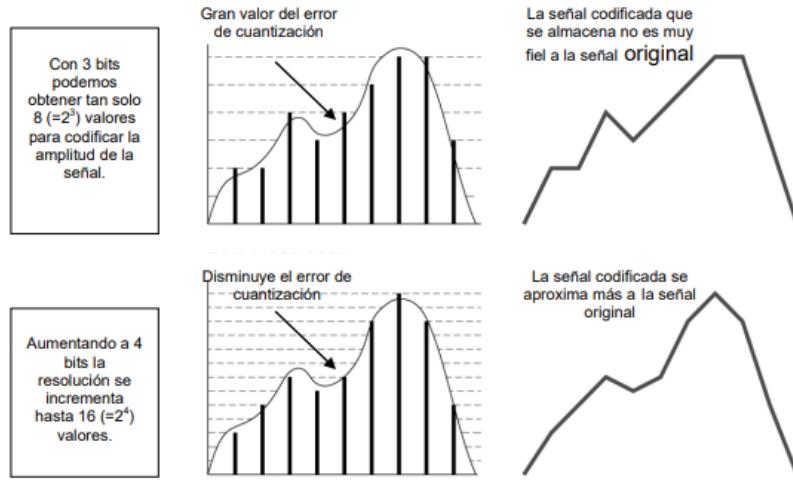
$$(0 \leq x \leq 1) \quad \mu = 255$$

$$x = 0 \rightarrow y = 0$$

$$x = 1 \rightarrow y = 1$$



Un número de bits insuficiente dará lugar a muy pocas combinaciones para codificar los diferentes valores de amplitud y dará lugar a lo que se denomina error de cuantización. Error de cuantización es la diferencia entre el valor de amplitud registrado en la muestra en formato digital y el valor real que tenía dicha amplitud en la señal analógica de partida. Surge de la necesidad de aproximar el valor real de la señal a uno de los que admite el código digital que hayamos establecido:



Se trata por tanto de llegar a un equilibrio. Para conseguir un buen nivel de resolución y minimizar el error de cuantización es conveniente tomar cuantos más bits mejor pero si tomamos demasiados la información de cada muestra ocupará demasiado espacio y la capacidad de almacenamiento del soporte quedará reducida.

## 7. CODIFICACIÓN

La codificación es un proceso por el cual se asignar un conjunto de bits o secuencia de ceros o unos lógicos (binarios) a cada valor cuantificado.

NC = 256 (bits) A cada nivel de cuantificación debemos asignar 8 bits.

$$\begin{cases} NC0 \rightarrow 0000 \\ NC1 \rightarrow 0001 \\ NC2 \rightarrow 0011 \end{cases}$$

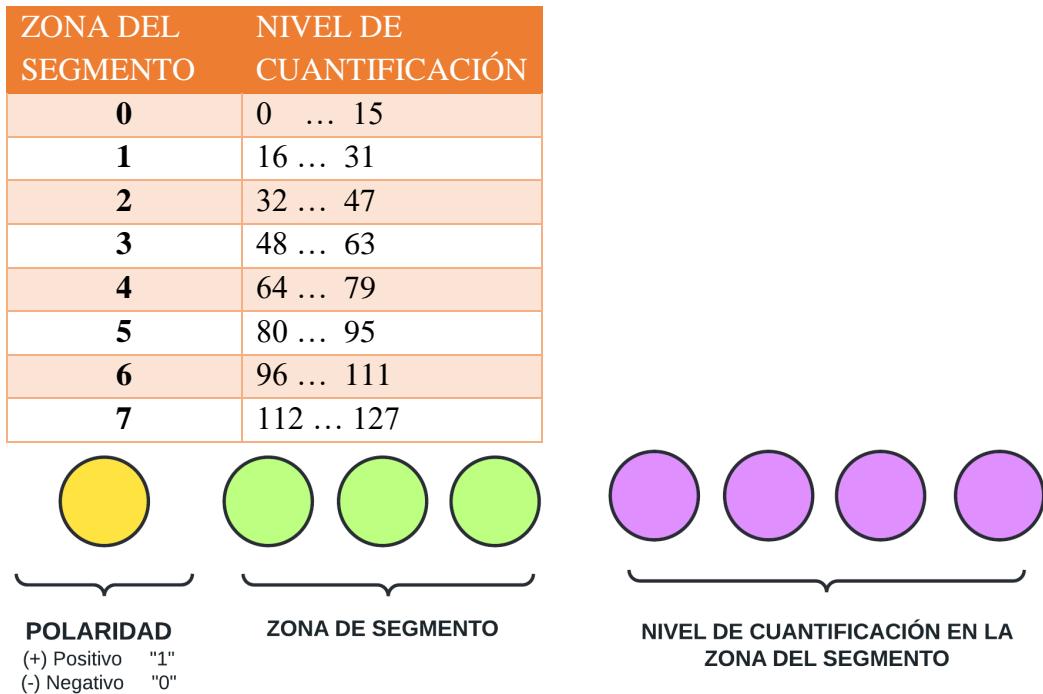


Ilustración 39: Codificación

### Ejemplo:

#### 1) 12.75 Voltios

$$\mu = 255$$

$$V_{m(N)} = x = \frac{V_m}{100} = \frac{12.75}{100} = 0.1275$$

$$y = \frac{\ln(1 + \mu|x|)}{\ln(1 + \mu)}$$

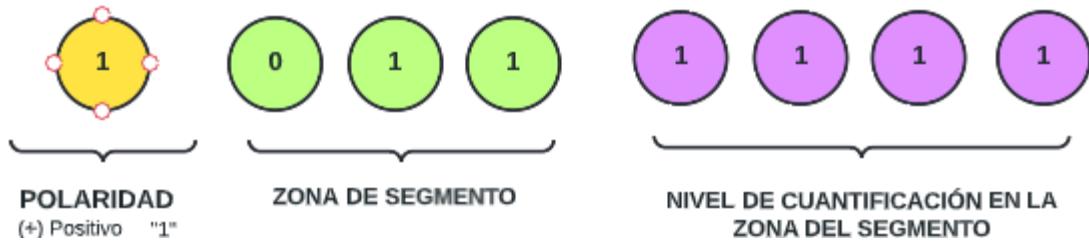
$$y = \frac{\ln(1 + 255|0.1275|)}{\ln(1 + 255)}$$

$$y = 0.63333$$

$$Y_{m(N)} = y * 100$$

$$Y_{m(N)} = 0.63333 * 100$$

$$Y_{m(N)} = 63.33 \cong 63$$



## 2) -44.2 Voltios

$$\mu = 255$$

$$V_{m(N)} = x = \frac{V_m}{100} = \frac{-44.2}{100} = -0.442$$

$$y = \frac{\ln(1 + \mu|x|)}{\ln(1 + \mu)}$$

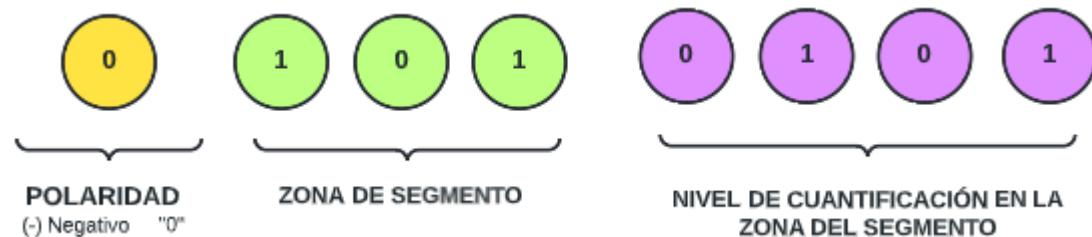
$$y = \frac{\ln(1 + 255|-0.442|)}{\ln(1 + 255)}$$

$$y = 0.8537$$

$$Y_{m(N)} = y * 100$$

$$Y_{m(N)} = 0.8537 * 100$$

$$Y_{m(N)} = 85.37 \cong 85$$



## 8. Codificación de voz

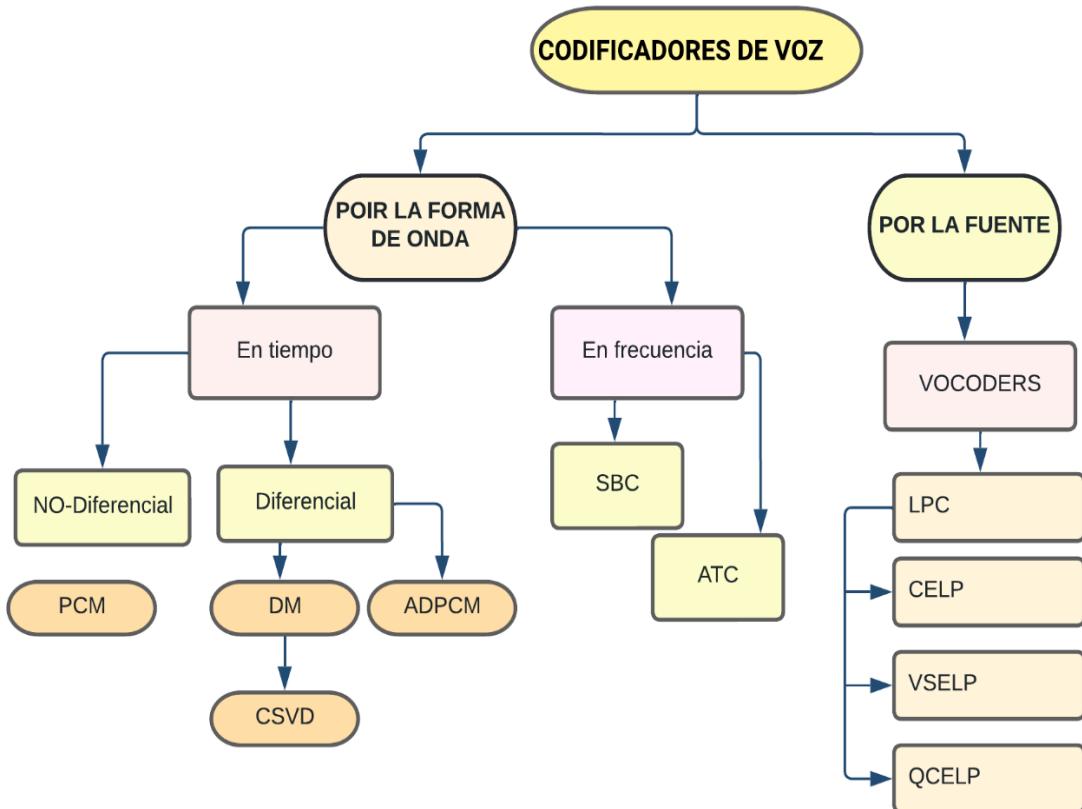


Ilustración 40: Codificadores de voz

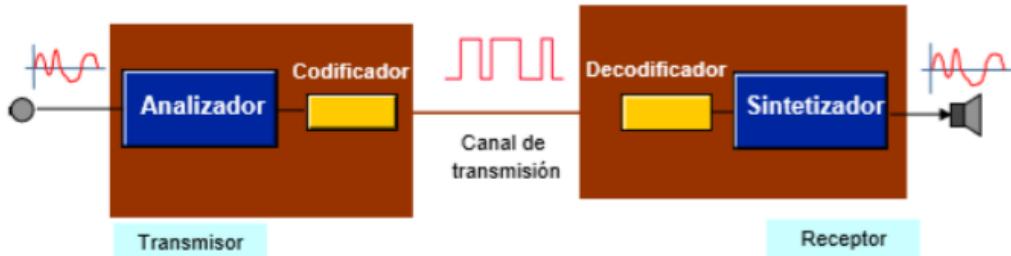
### ➤ Velocidad de codificación y aplicaciones

Algoritmo de codificación	Velocidad Binaria	Aplicación
PCM	64 kbps	Telefonía ,audio
ADPCM	32 kbps	Telefonía,CT2,PACS,DECT,PHS
CELP	Tasa variable 0.8,2,4,8 bps	Telefonía celular digital voz paquetizada.
QCELP	Tasa variable 1.2,2.4,4.8,8,9.6 y 13 Kbps	IS-95
VSELP	4.5,6.7,7.95 y 11.2 kbps	PDC,IS-94
RPE-LTP	13 kbps	DCS-1800,GSM
ACELP	2.4,4.8 y 8kbps	Voz paquetizada,Frame relay

### ➤ Vocoders

Las técnicas de codificación que son diseñadas especialmente para la transmisión de la voz a tasas menores de 20 kbps son conocidas con el nombre de vocoders (voice coders).

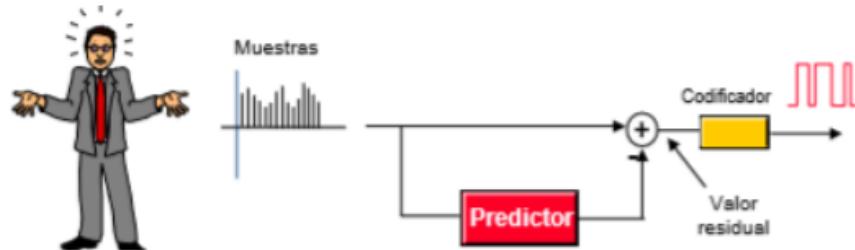
- Un vocoder consiste en un analizador situado en el transmisor que extrae de la señal de voz, factores ganancia y bits de control. Del lado del receptor se encuentra un sintetizador que utiliza los parámetros recibidos y con ellos produce una señal de voz reconstruida



#### ➤ Codificación lineal predictiva

LPC (Linear Predictive Coding), este vocoder emplea un algoritmo que predice el valor de la muestra de entrada, la diferencia que existe entre el valor real y el predicho se le llama valor residual, el cual es codificado y transmitido.

LPC-10 es el estándar establecido por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos en 1977, en él se codifica a 2400 bps. Existen otras aplicaciones operando a 4.8 kbps, por lo general solo se emplean en aplicaciones militares. A estas tasas tan bajas, la voz se escucha sumamente sintetizada y normalmente se requiere entrenamiento para el operador. [1]



#### ➤ Codificador VSELP

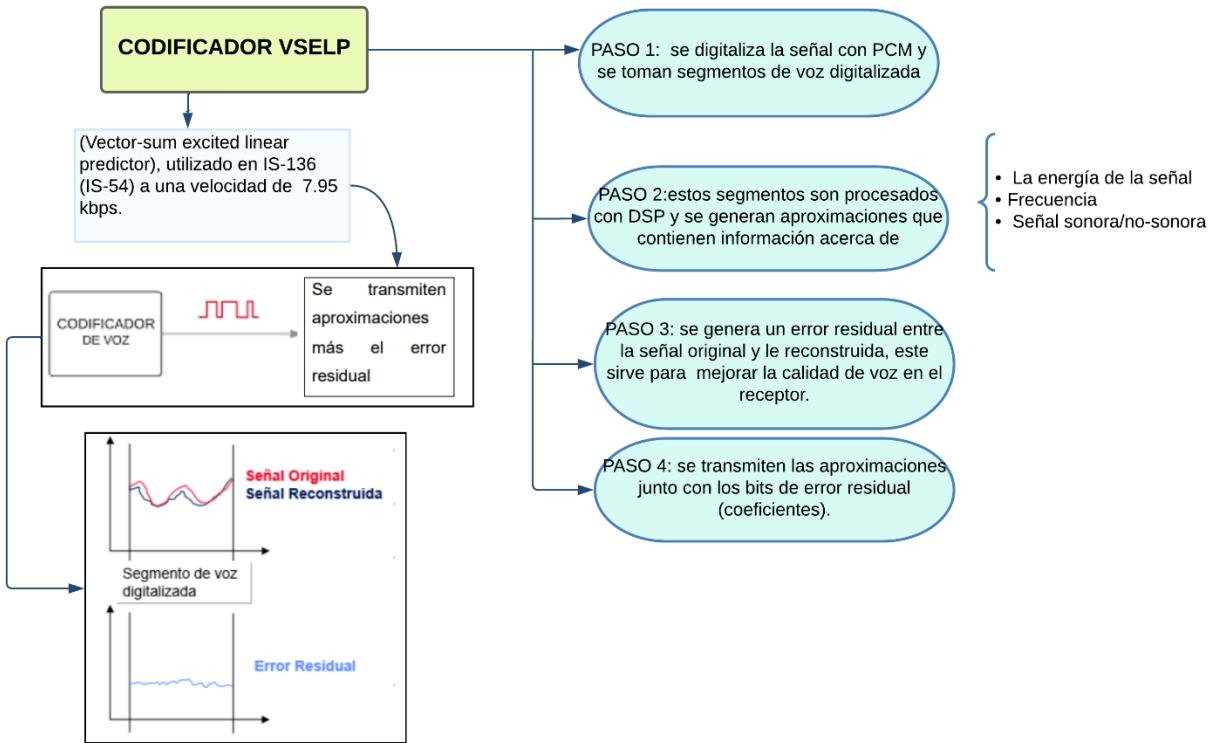
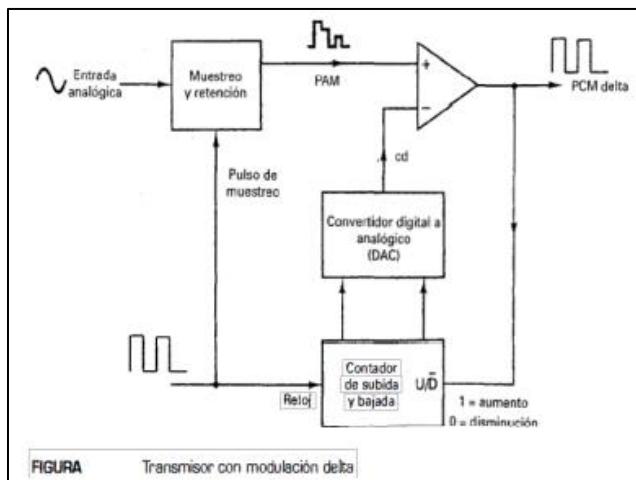


Ilustración 41: Codificador VSelP

## ➤ PCM de modulación DELTA

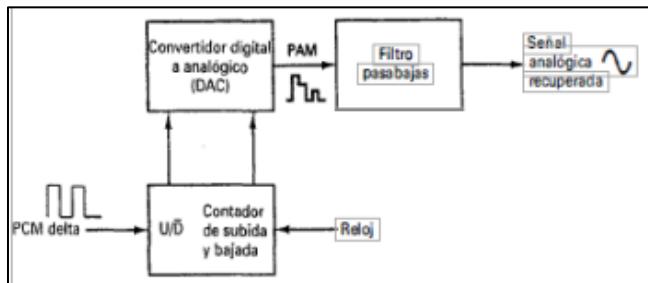
En la modulación delta se usa un código PCM de un solo bit para lograr la transmisión digital de las señales analógicas. En la modulación delta, más que transmitir una representación codificada de la muestra se transmite un solo bit, el cual únicamente indica si la muestra es MAYOR o MENOR que la muestra anterior. El algoritmo indica si la muestra actual es menor que la anterior, se transmite un 0 lógico. Si es mayor que la anterior, se transmite un 1 lógico. [1]

## Transmisor con modulación DELTA



La entrada analógica se muestrea y se convierte en una señal PAM, que se compara con la salida del convertidor DAC. Esta salida es un voltaje igual a la magnitud regenerada de la muestra anterior, que se guardó en el contador de subida y bajada como número binario. Este contador se sincroniza a una frecuencia igual a la de muestreo. Por consiguiente, el contador de subida y bajada se actualiza después de cada comparación. [1]

### Receptor con modulación DELTA



Al recibir los unos y ceros lógicos, el contador se incrementa o decrementa en forma correspondiente. En consecuencia, la salida del DAC del decodificador es idéntica a la del DAC en el transmisor.

La modulación delta tiene dos problemas que no se presentan con la PCM convencional: sobrecarga de pendiente y ruido granular. [1]

**SOBRECARGA DE PENDIENTE**

Cuando una señal de entrada analógica cambia con una rapidez mayor que la que puede sostener el DAC:  
 La pendiente de la señal analógica es mayor que la que puede mantener el modulador delta.  
 Si se aumenta la frecuencia del reloj se reduce la o al aumentar el tamaño del incremento mínimo.

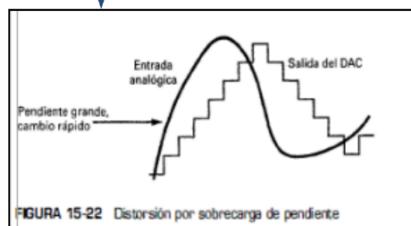


FIGURA 15-22 Distorsión por sobre carga de pendiente

**RUIDO GRANULAR**

Cuando la señal analógica original de entrada tiene una amplitud relativamente constante, la señal reconstruida tiene variaciones que no había en la señal original. A esto se le llama ruido granular. En la modulación delta, el ruido granular es análogo al ruido de cuantización en la PCM convencional.

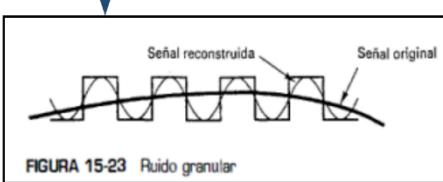


FIGURA 15-23 Ruido granular

### ➤ PCM de modulación DELTA Adaptativa

La modulación delta adaptativa es un sistema de modulación delta en el que el tamaño de escalón del DAC se varía en forma automática, dependiendo de las características de amplitud de la señal analógica de entrada.

Cuando la salida del transmisor es una cadena de unos o ceros consecutivos, indica que la pendiente de la salida DAC es menor que la de la señal analógica, sea en dirección positiva o negativa. [1]

Un algoritmo frecuente para un modulador por delta adaptativo es cuando se presentan tres unos o ceros consecutivos, y se aumenta o disminuye el tamaño del escalón para el DAC, en un factor de 1.5. Se pueden usar varios algoritmos, que dependen de los requisitos

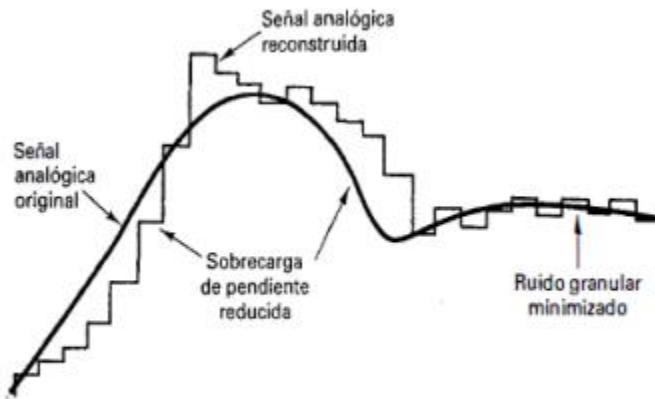


FIGURA 15-24 Modulación delta adaptativa

#### ➤ Modulación por código de impulsos diferencial

En la DPCM, la diferencia en amplitudes de dos muestras sucesivas es la que se transmite, y no la muestra real. Como el intervalo de diferencias entre muestras suele ser menor que el de las muestras individuales, se requieren menos bits para la DPCM que en la PCM convencional. [1]

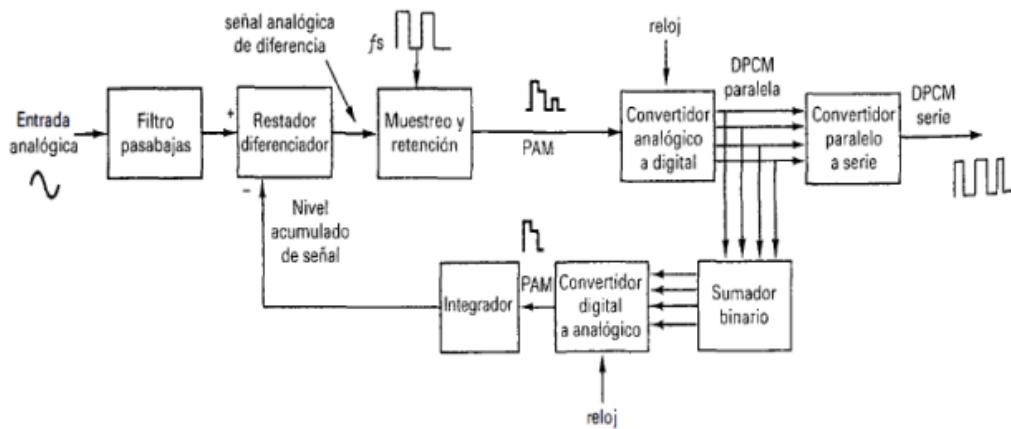


Ilustración 42 Transmisor DPCM

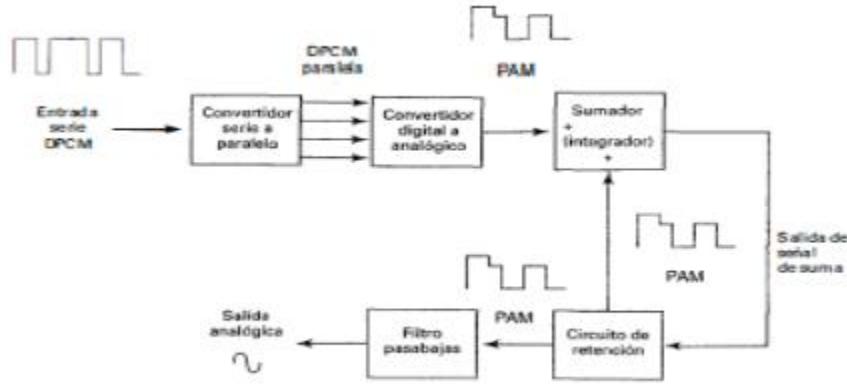


FIGURA 15-26 Receptor DPCM

Ilustración 43 Receptor DPCM

### Transmisión de pulsos

Todos los sistemas de portadora digital implican la transmisión de pulsos a través de un medio, con ancho de banda finita. Un sistema muy selectivo necesitaría una gran cantidad de secciones filtrantes, lo cual es impráctico. En consecuencia, en los sistemas digitales prácticos se usan en general filtros con anchos de banda aproximado de 30% o más, en exceso del ancho de banda de Nyquist. [1]

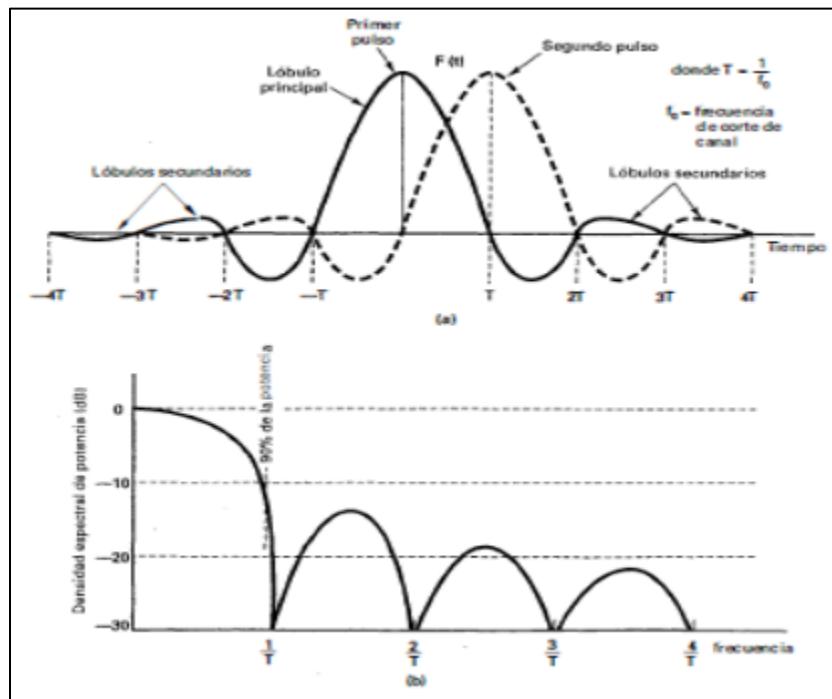


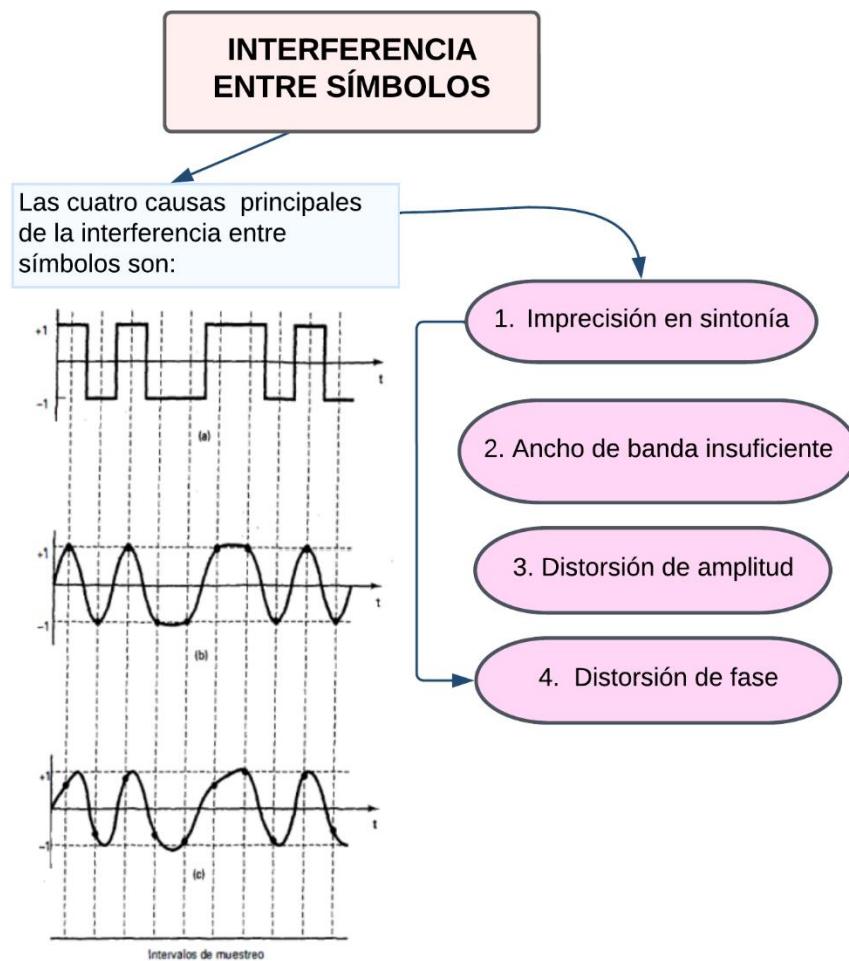
Ilustración 44 Forma de onda de salida de un canal de banda limitada

## Interferencia entre símbolos

En un filtro pasa bajas ideal, de ancho de banda mínimo. Esta señal es una secuencia aleatoria,

binaria, sin regreso a cero (NRZ). La señal de salida llega a su valor total, para cada pulso transmitido, exactamente en el centro de cada intervalo de muestreo.

Sin embargo, si es imperfecto el filtro de paso bajo (es el caso real); en los momentos del muestreo, es decir, al centro de los pulsos, la señal no siempre llega a su valor máximo. Las oscilaciones en los extremos de varios pulsos se han solapado, interfiriendo con el lóbulo principal de pulso. A esta interferencia se le suele llamar interferencia entre símbolos. [1]



### ➤ Patrones de Ojo

Se puede medir la eficiencia de un sistema de transmisión digital mostrando la señal recibida en un osciloscopio, y ajustando la base de tiempo a la velocidad de los datos. Así, todas las combinaciones de formas de onda se sobreponen en intervalos de

señalización adyacentes. A esta presentación se le llama patrón de ojo, figura de ojo o diagrama de ojo.

Un patrón de ojo es una técnica cómoda para determinar los efectos de las degradaciones introducidas en los pulsos, cuando viajan al regenerador.

### Características:

- El patrón de ojo muestra la calidad de forma y de sincronización y permite descubrir cualquier ruido y errores que podrían estar en la igualación de línea.
  - La abertura del ojo, que es el área central del patrón de ojo, define una frontera dentro de la cual no pueden existir trayectorias de onda bajo cualquier condición de patrón de código.
  - El efecto de la degradación de pulsos es una reducción en el tamaño del ojo ideal.
- [1]

#### Fórmula:

$$ISI = 20 \log \frac{h}{H}$$

#### Dónde:

H= abertura vertical ideal (cm)

h= abertura vertical degradada (cm).

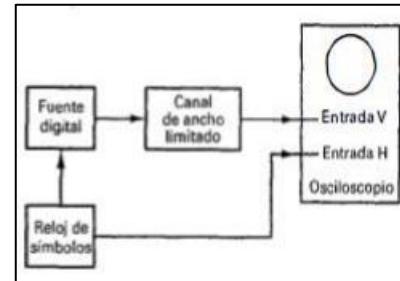


Ilustración 45 Sistema de medición del patrón de ojo

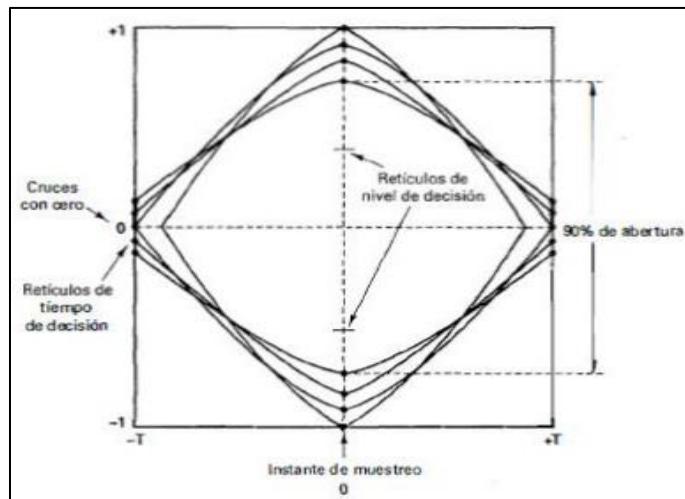


Ilustración 46 Ejemplo de un diagrama de ojo

## **9. Bibliografía**

- [1] «electronicafacil.net,» [En línea]. Available:  
<https://www.electronicafacil.net/tutoriales/MODULACION-DIGITAL-FSK-PSK-QAM.html>. [Último acceso: 10 Enero del 2024].
- [2] Tecnológico Nacional de México, «itq.edu.mx,» [En línea]. Available:  
[http://www.itq.edu.mx/carreras/IngElectronica/archivos\\_contenido/Apuntes%20de%20materias/CDF1202\\_Comm\\_Digitales/6\\_Modulacion\\_PasaBanda.pdf](http://www.itq.edu.mx/carreras/IngElectronica/archivos_contenido/Apuntes%20de%20materias/CDF1202_Comm_Digitales/6_Modulacion_PasaBanda.pdf). [Último acceso: 10 Enero del 2024].
- [3] «MATPIC.COM,» [En línea]. Available:  
[http://www.matpic.com/esp/matlab/modulaciones\\_simulink.html](http://www.matpic.com/esp/matlab/modulaciones_simulink.html). [Último acceso: 10 Enero del 2024].