



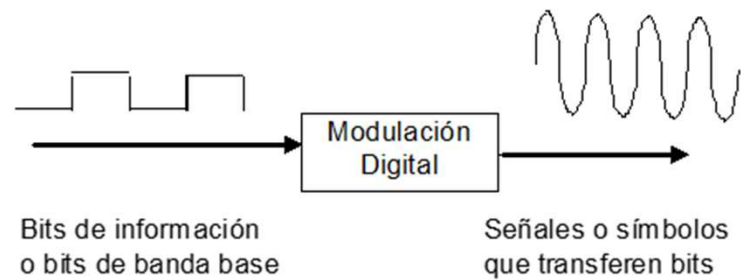
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Haedo
Departamento de Ingeniería Electrónica

SISTEMAS DE COMUNICACIONES

Modulación de pulsos

Basico

Caso particular cuando la modulante toma valores discretos en tiempos discretos. Generalmente valores binarios.



Modulaciones Digitales

Modulación
Digital

ASK: Se modula la amplitud de la portadora en forma discreta.

FSK: Se modula la frecuencia de la portadora en forma discreta.

PSK: Se modula la frecuencia de la portadora en forma discreta.

QAM: Se modula la amplitud y fase (signo) de dos portadoras en cuadratura en forma discreta.

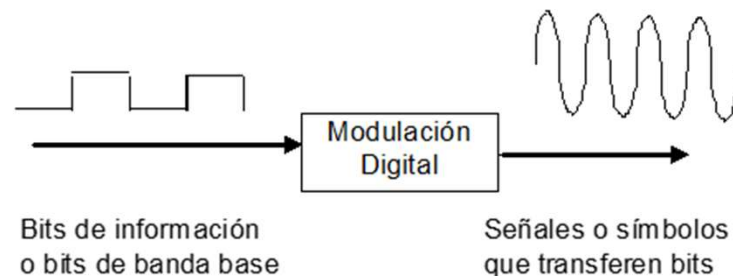
Tasa de Transferencia de Información (Information transfer rate)

Se define como la **velocidad a la cual se transfiere la información binaria (bits)**, desde la fuente al modulador. **Se designa como R** , y su unidad es: bits \ segundo

Tasa de Señalización, o velocidad de transferencia de símbolos

La **tasa de señalización es la velocidad a la que cambia la señal portadora**. También se puede designar más simplemente como la tasa en baudios [Baud=Símbolos/segundo].

En un símbolo se puede codificar más de un bit.



Eficiencia del ancho de banda o eficacia espectral

Es la medida en que para una determinada forma de modulación, se utiliza el ancho de banda disponible.

Se expresa como

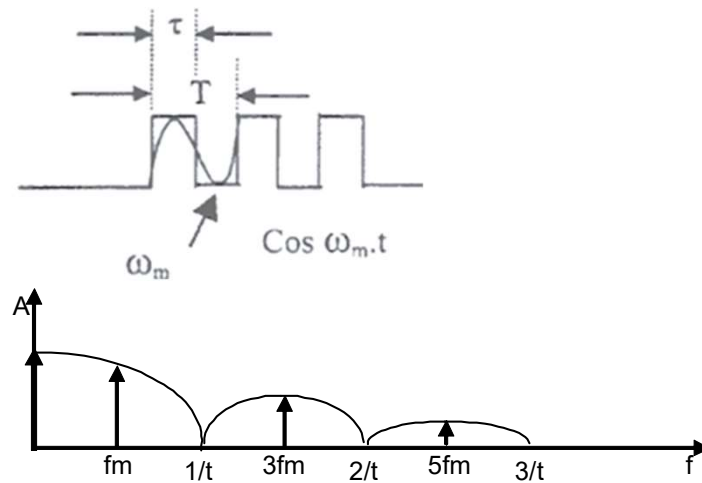
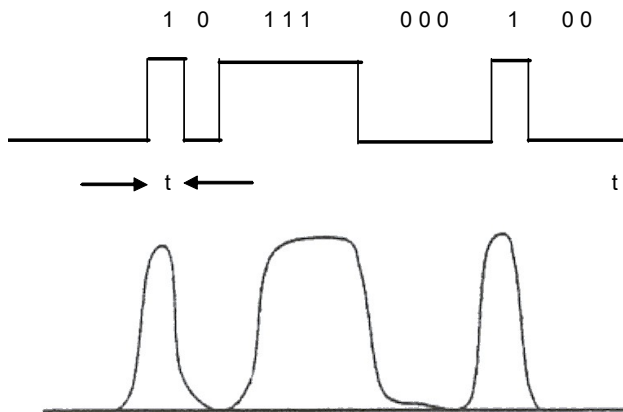
$$\eta = \text{bits} / \text{segundo} / \text{Hz}$$

$$\eta = R / \text{banda..ocupada}$$

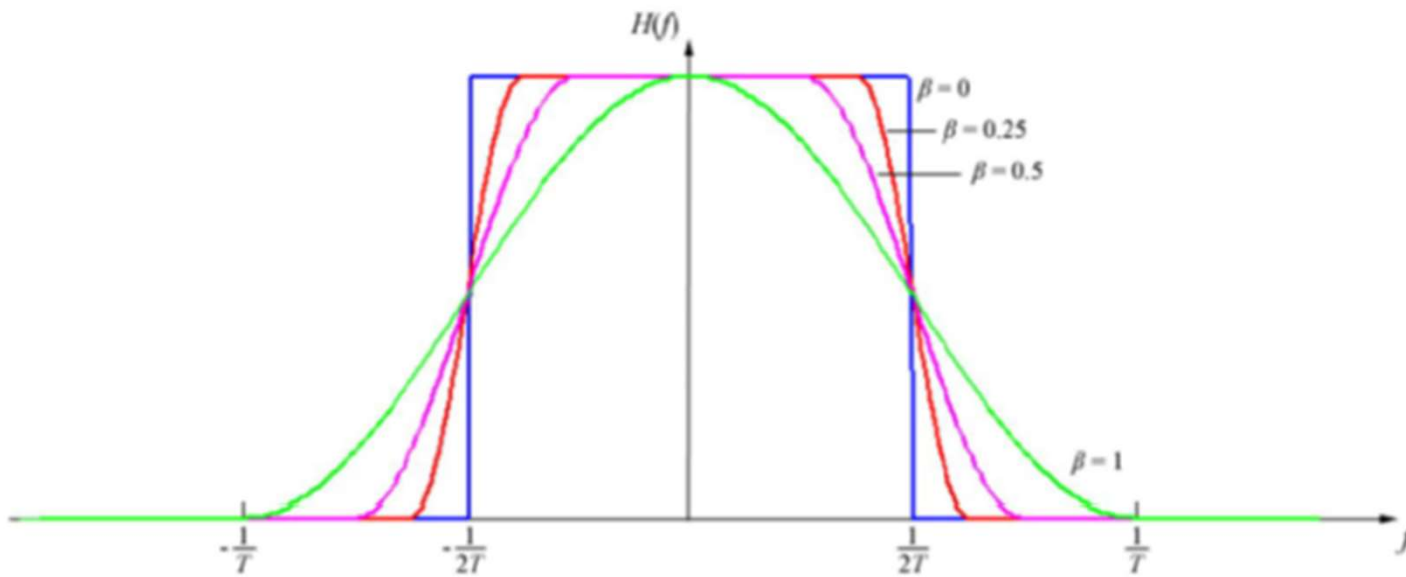
$$2 \leq \eta \leq 8, \dots \text{cuando..mayor..mejor}$$

Espectro y ancho de banda del tren de pulsos de la banda base

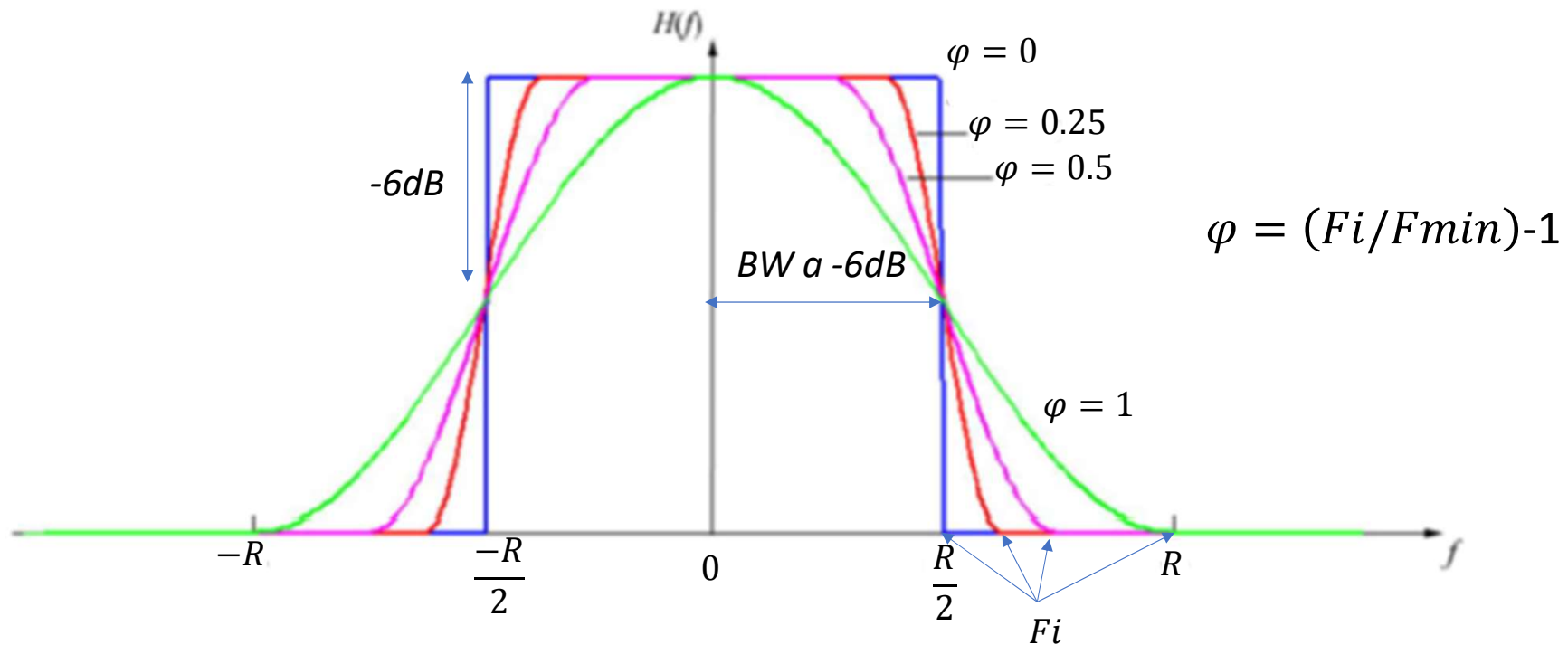
cuando la sucesión de bits sea de 1 y 0 alternados.



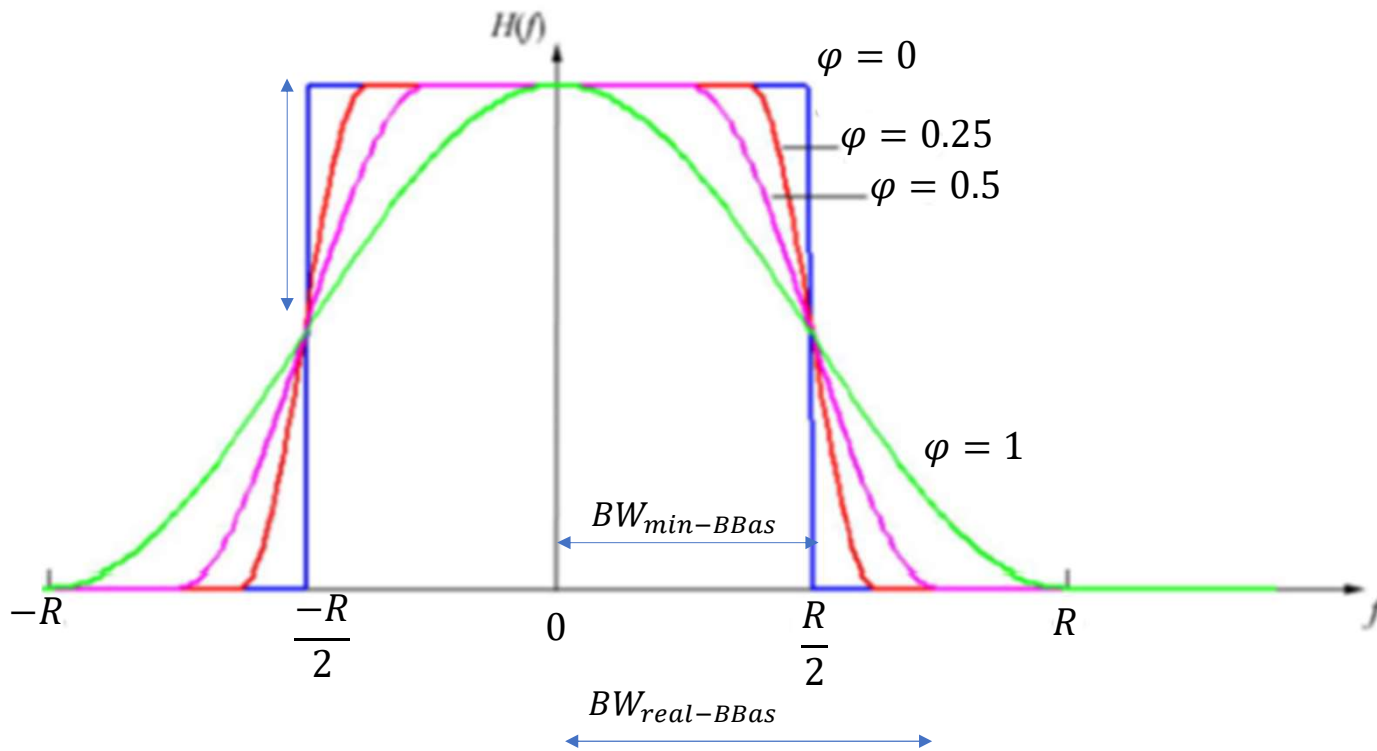
Filtro Coseno Realzado (RRC)



Filtro Coseno Realzado (RRC)



BW en Banda Base (no modulado)



$$BW_{min-BBase} = \frac{R}{2}$$

$$BW_{real-BBas} = \frac{R}{2} \cdot (1 + \varphi)$$

Probabilidad de error $P(e)$ y error de transferencia de bit (B E R)

La probabilidad de error es una expectativa teórica de obtener un determinado resultado en la recepción.

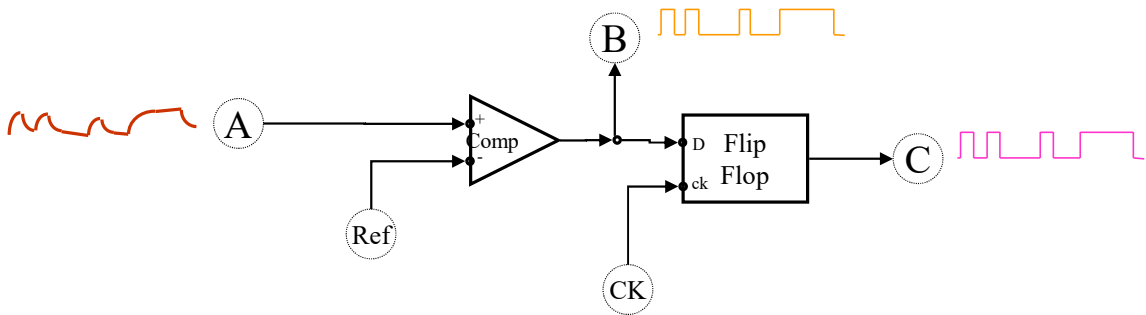
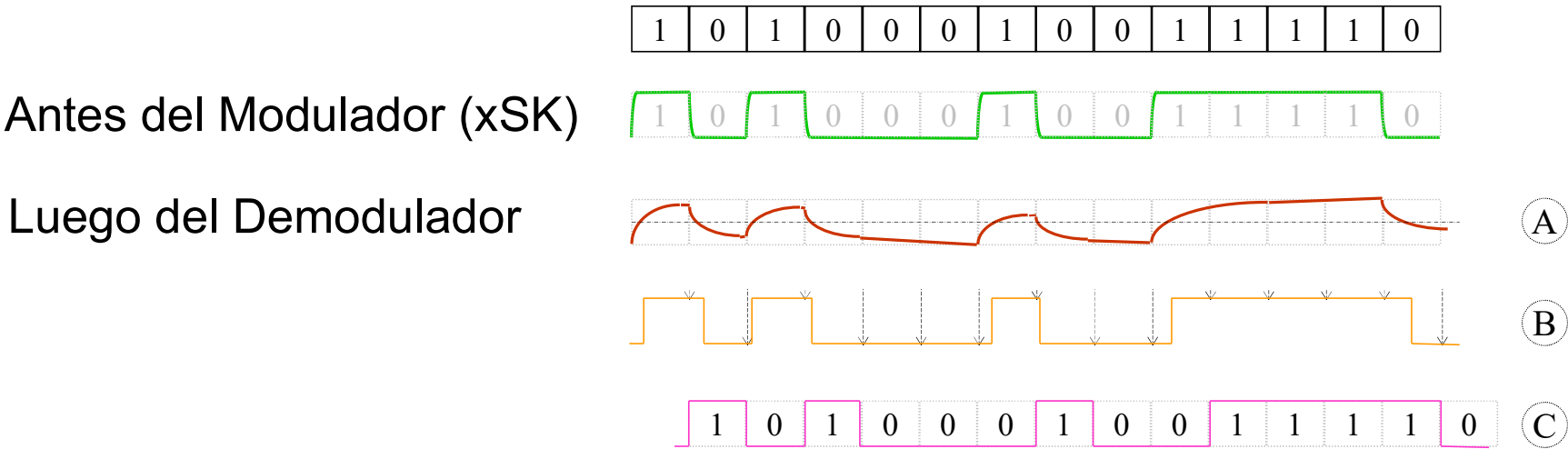
Si se afirma que la $P(e) = 10^{-5}$

Significa que en determinadas condiciones se puede tener un error de 1 bit cada 100.000 transmitidos.

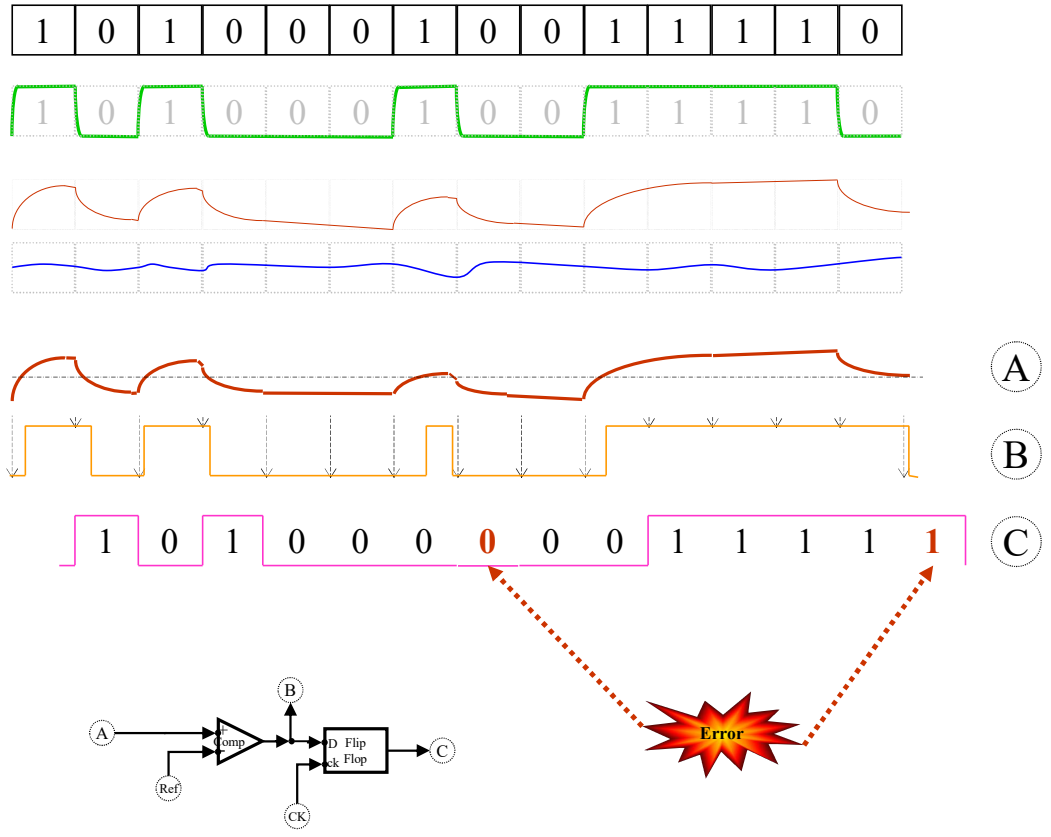
En cambio si se dice que el B.E.R. o el Bit Error Rate es de 10^{-5}

Significa que se ha medido un error de 1 bit en 100.000 transmitidos

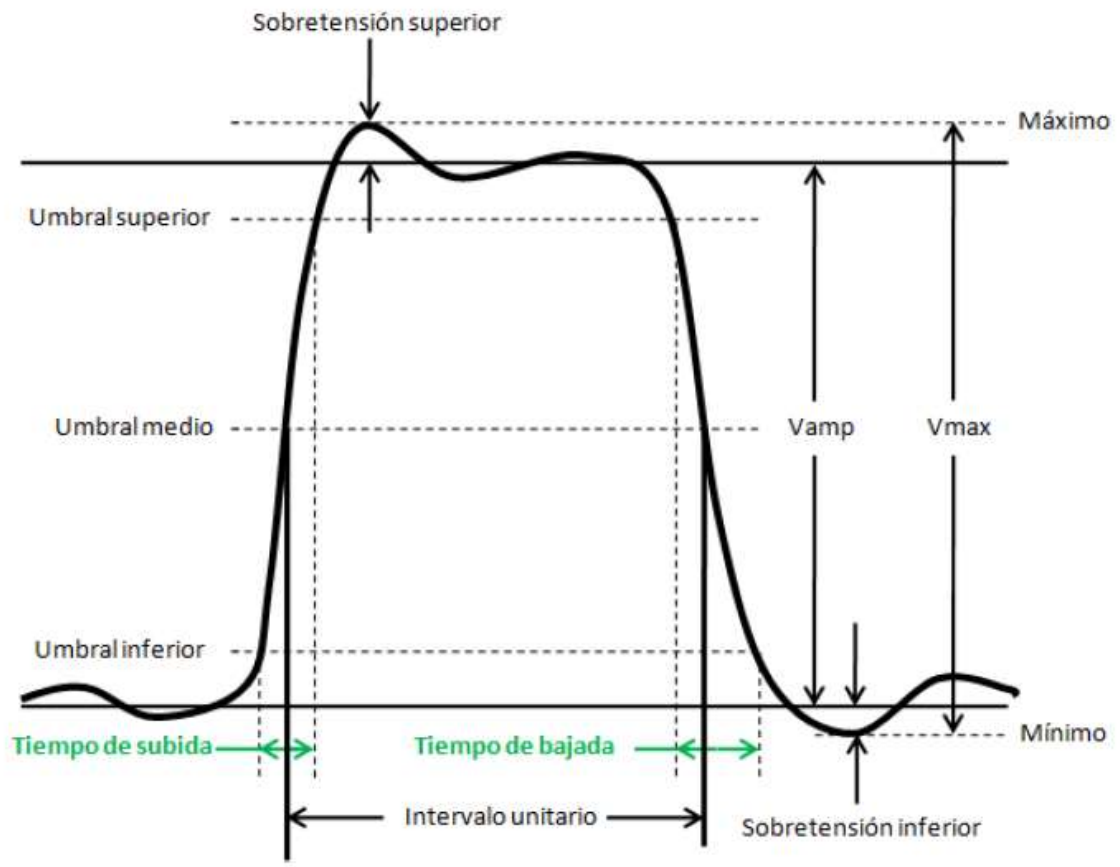
Transmisión y Detección digital



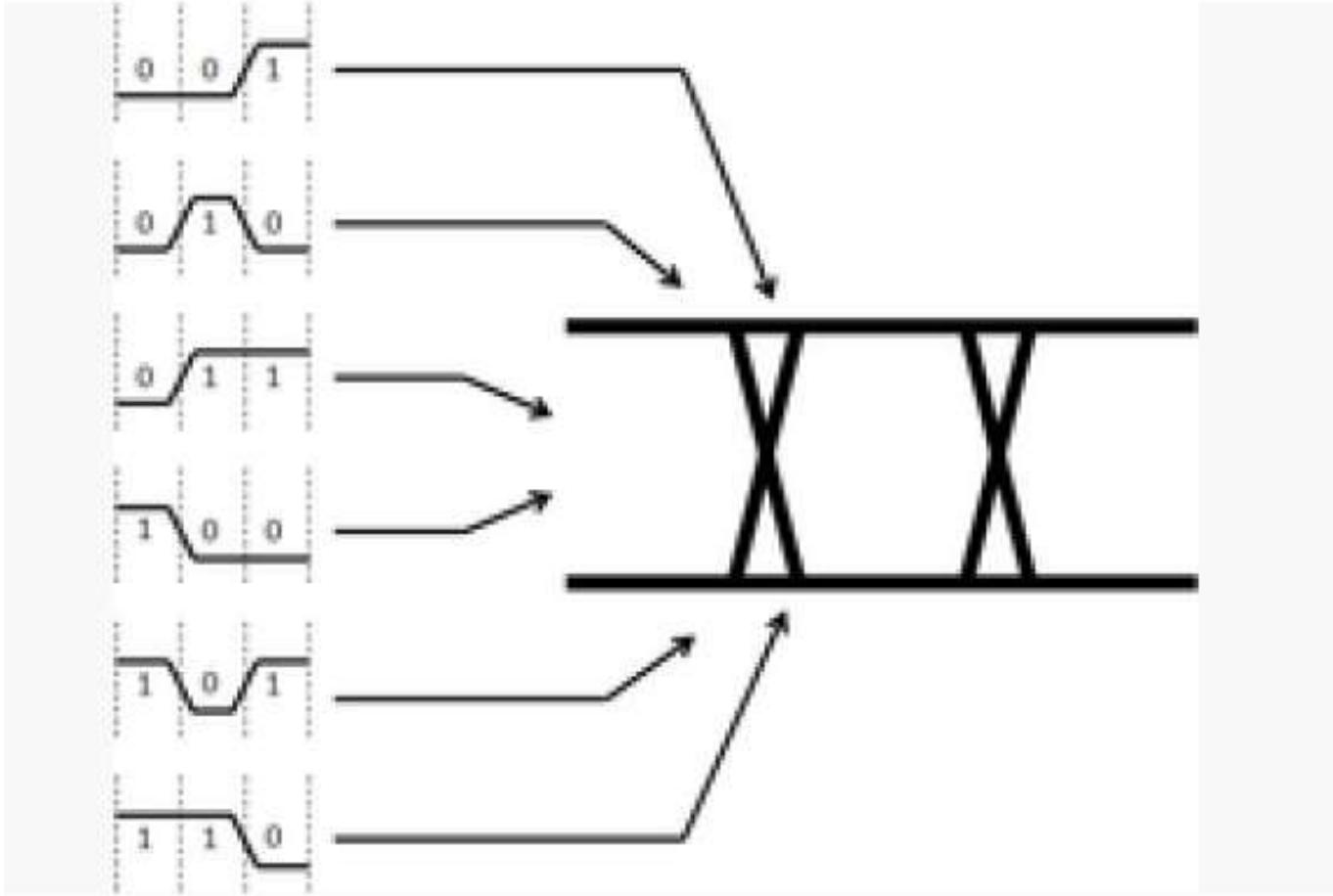
Transmisión y Detección digital con Errores



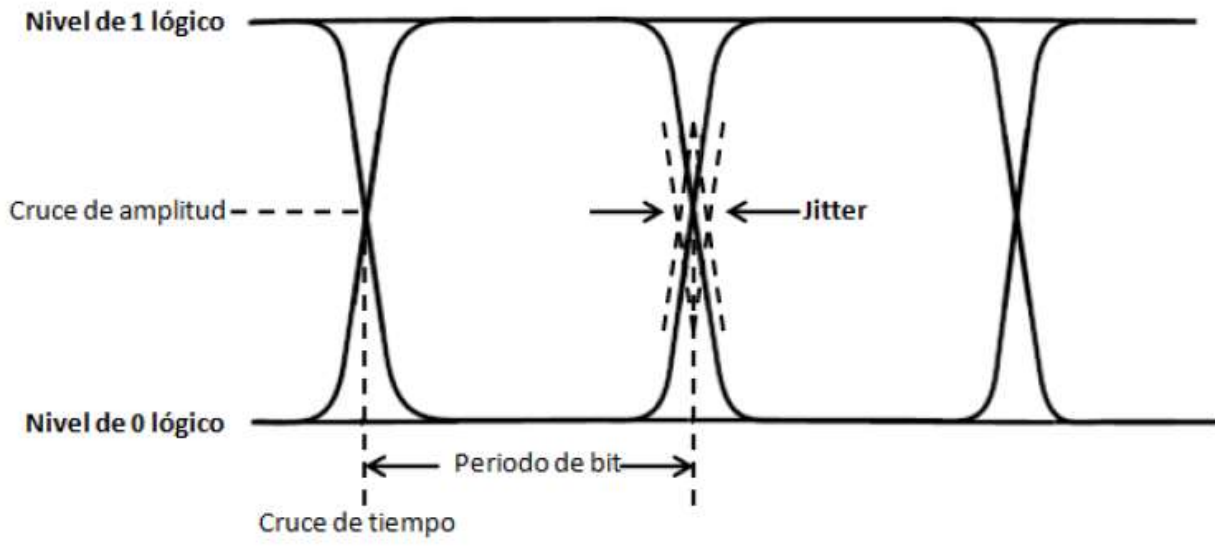
...



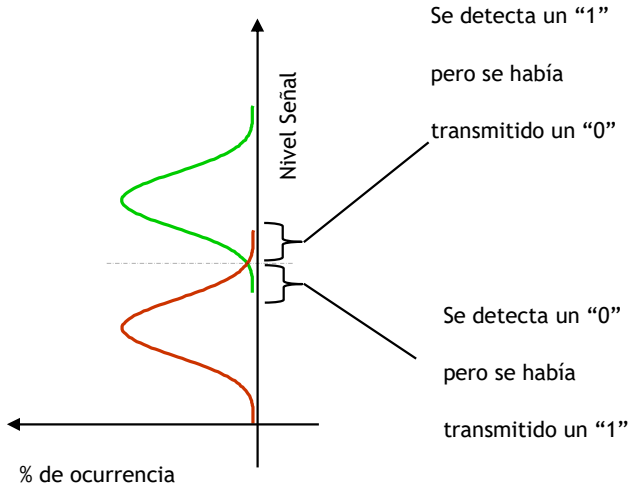
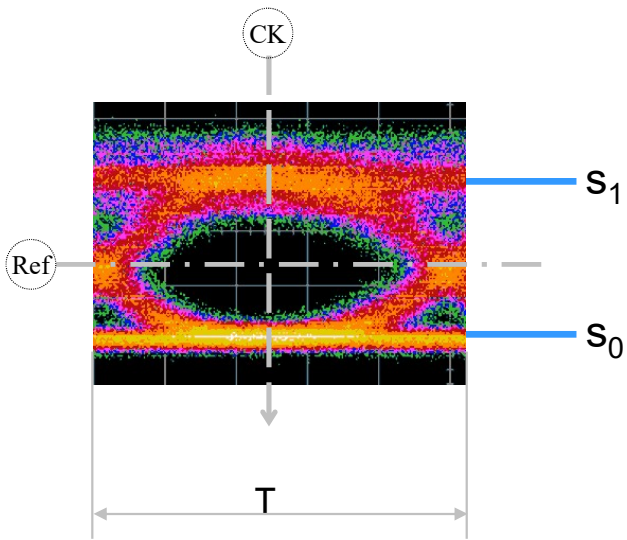
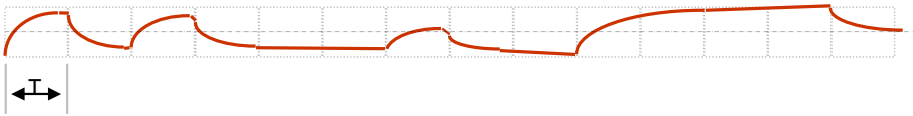
...



...



Apertura diagrama de Ojo



Personick's Q-factor

Widely used tool for

- First-guess performance estimates
- Intuitive explanation of trends:

$$Q = \frac{|s_1 - s_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

- Experiments with $BER < 10^{-10}$:

$$BER = 0.5 \operatorname{erfc}\left(Q / \sqrt{2}\right)$$

$s_{1,0}$... electrical signal, '1'-bit and '0'-bit

$\sigma_{1,0}$... noise standard deviation of '1'-bit and '0'-bit

BER ... bit-error ratio

erfc ... complementary error function
(Gaussian detection statistics !)

Q es función directa de SNR

Ejemplos:

Señal detectada Unipolar

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \approx \frac{I_1}{2\sigma_1} = \frac{1}{2}(\operatorname{SNR})^{1/2}$$

$$I_0 = 0$$

$$\sigma_0 \approx \sigma_1$$

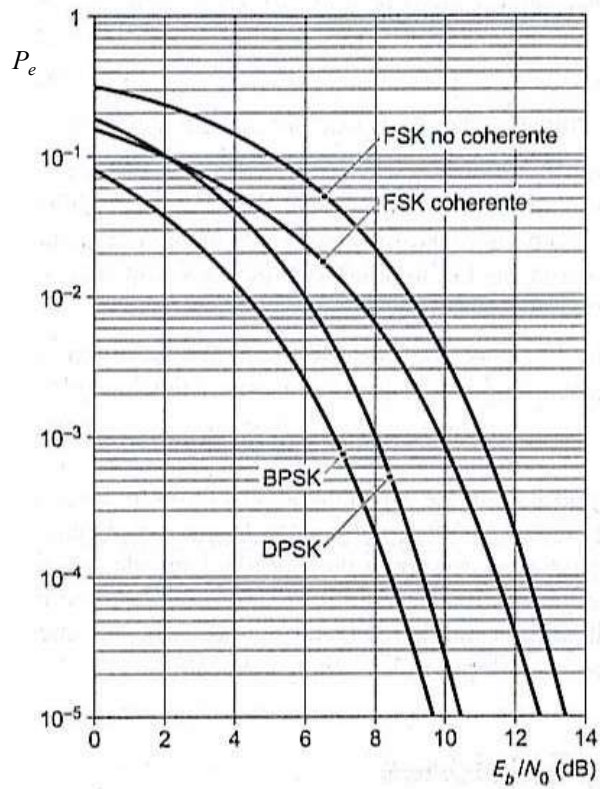
Señal detectada Bipolar

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \approx \frac{2I_1}{2\sigma_1} = (\operatorname{SNR})^{1/2}$$

$$I_0 = -I_1$$

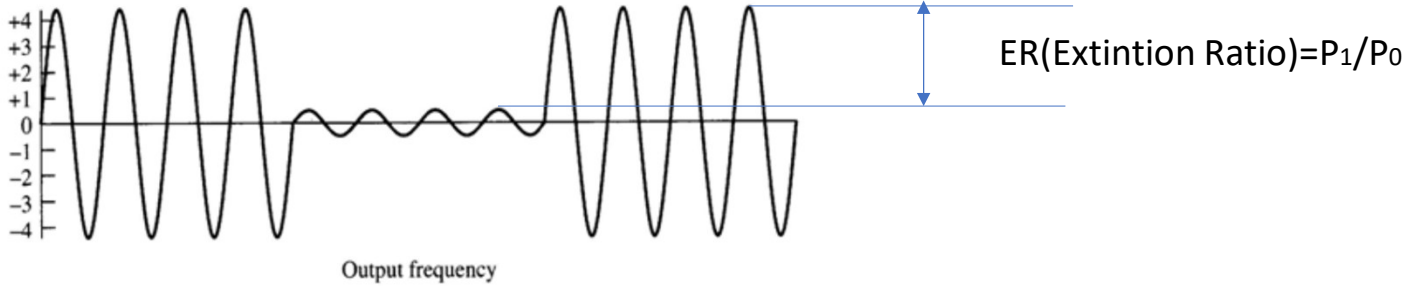
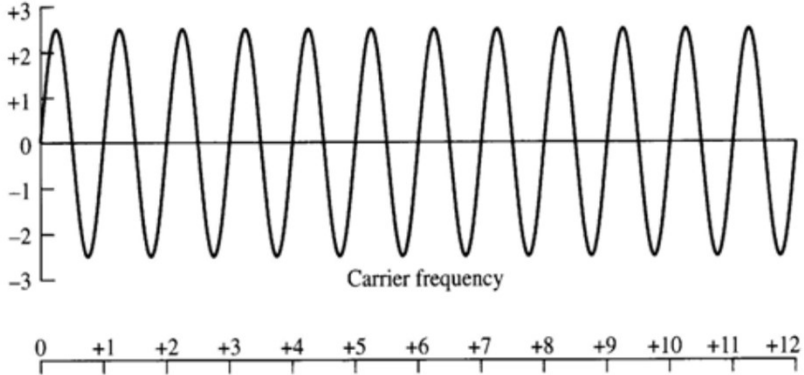
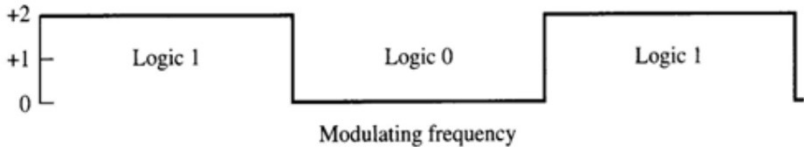
$$\sigma_0 = \sigma_1$$

B.E.R. vs S/N $\rightarrow E_b/N_0$

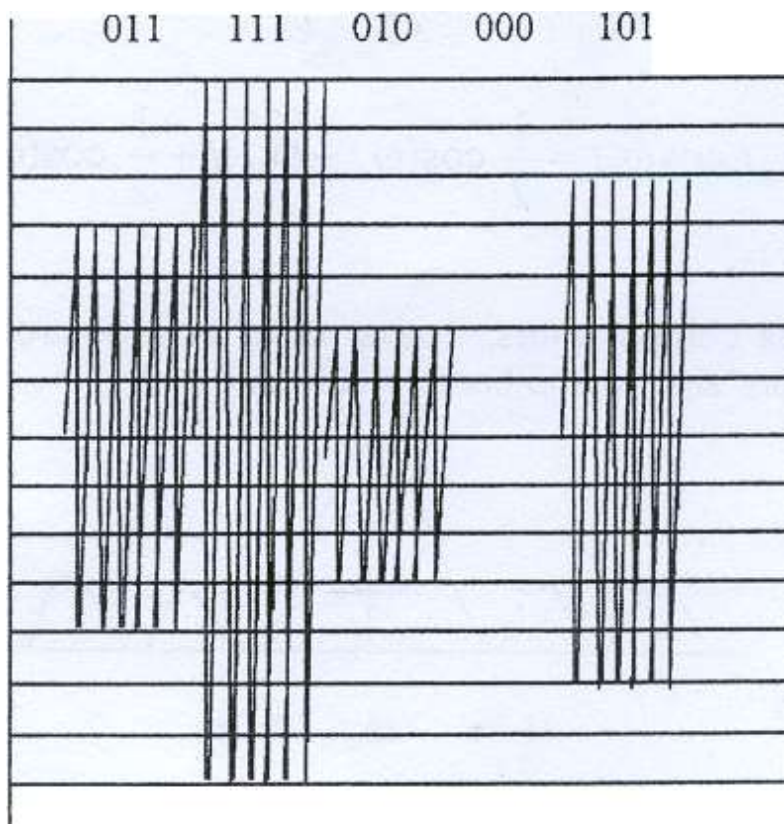


$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S \cdot T_b}{N / B_n} = \frac{S}{N} \cdot \frac{T_b}{1/B_n} = \frac{S}{N} \cdot \frac{B_n}{f_b}$$

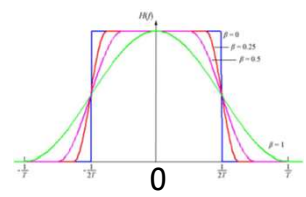
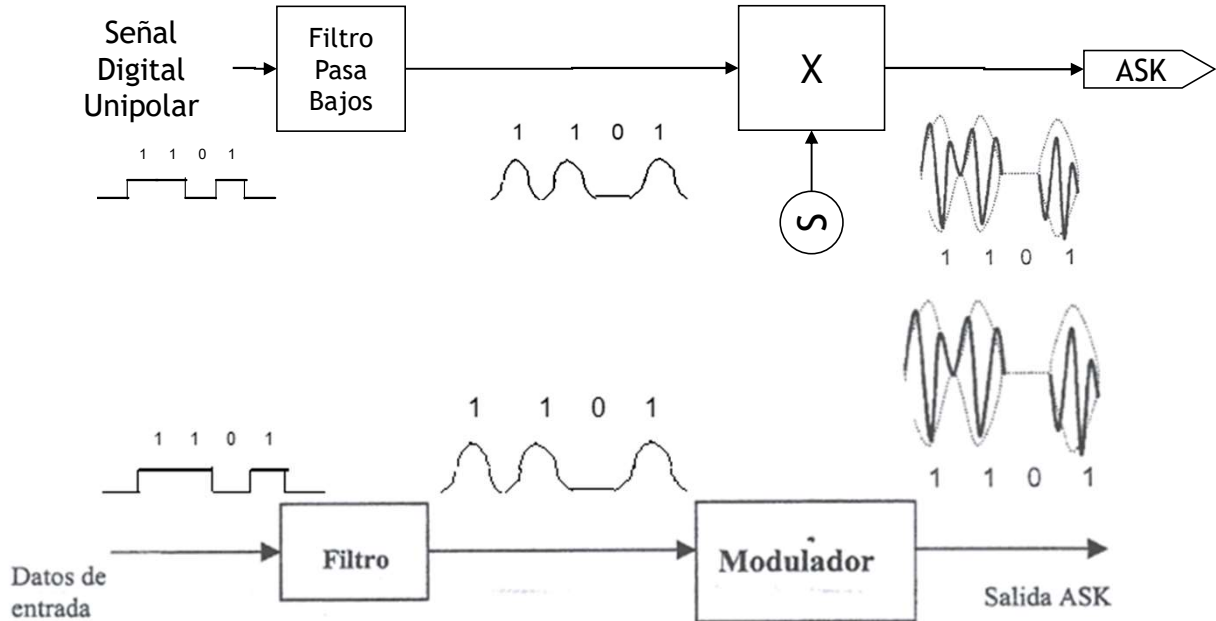
ASK o modulación por desplazamiento de amplitud



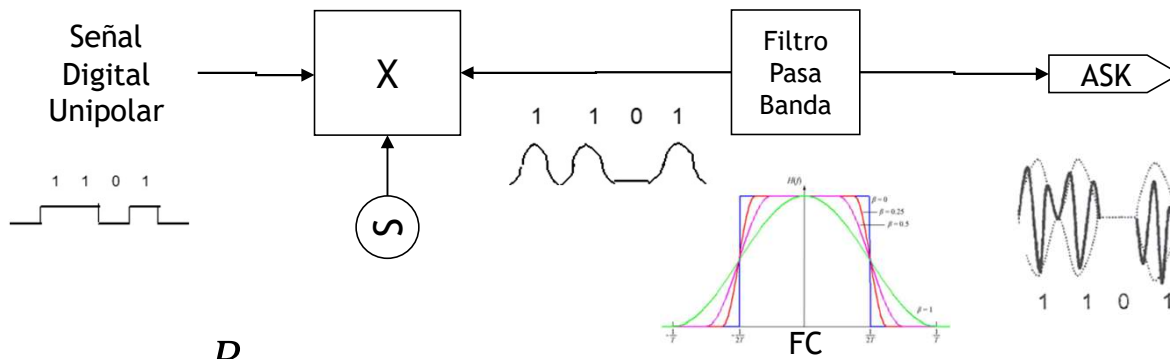
8ASK (PAM8)



Generación ASK



Generación ASK



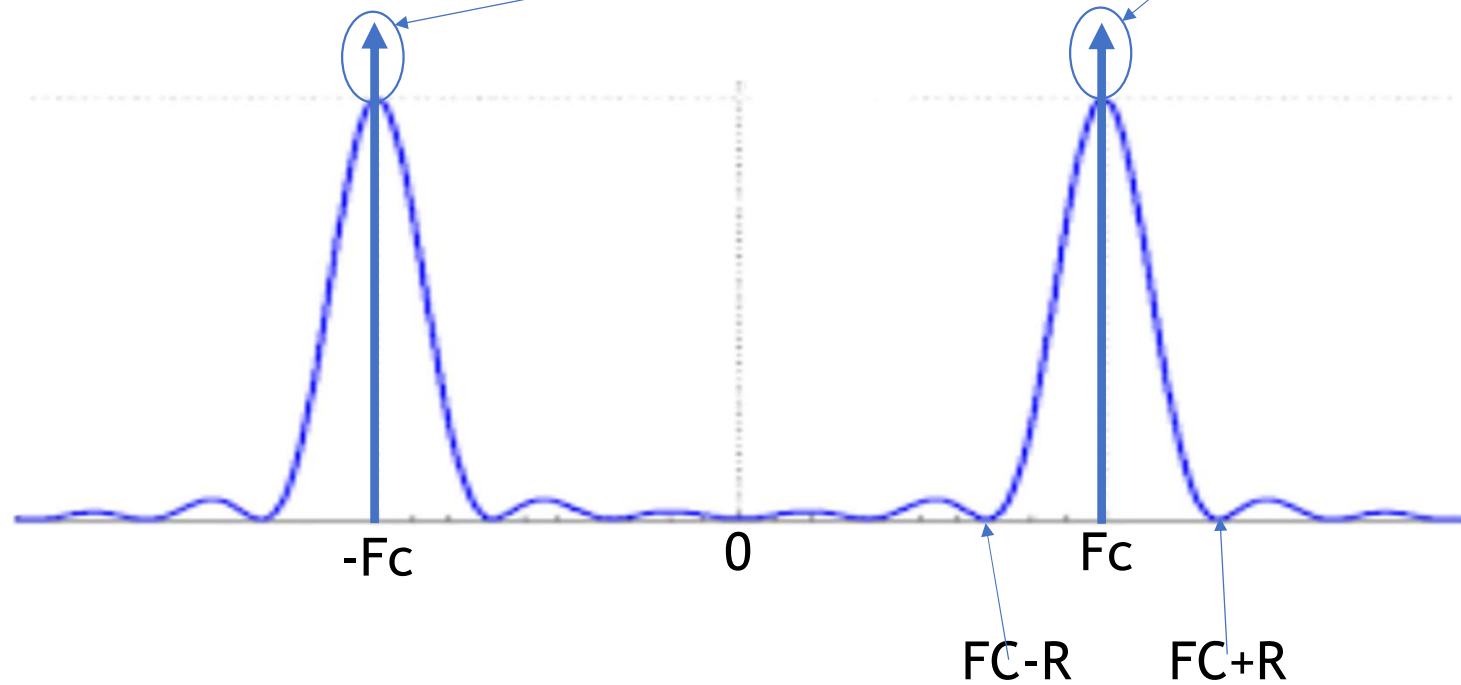
$$BW_{min-BBase} = \frac{R}{2}$$

$$BW_{real-BBase} = \frac{R}{2} \cdot (1 + \varphi)$$

$$BW_{ASK} = 2 \cdot \frac{R}{2} \cdot (1 + \varphi)$$

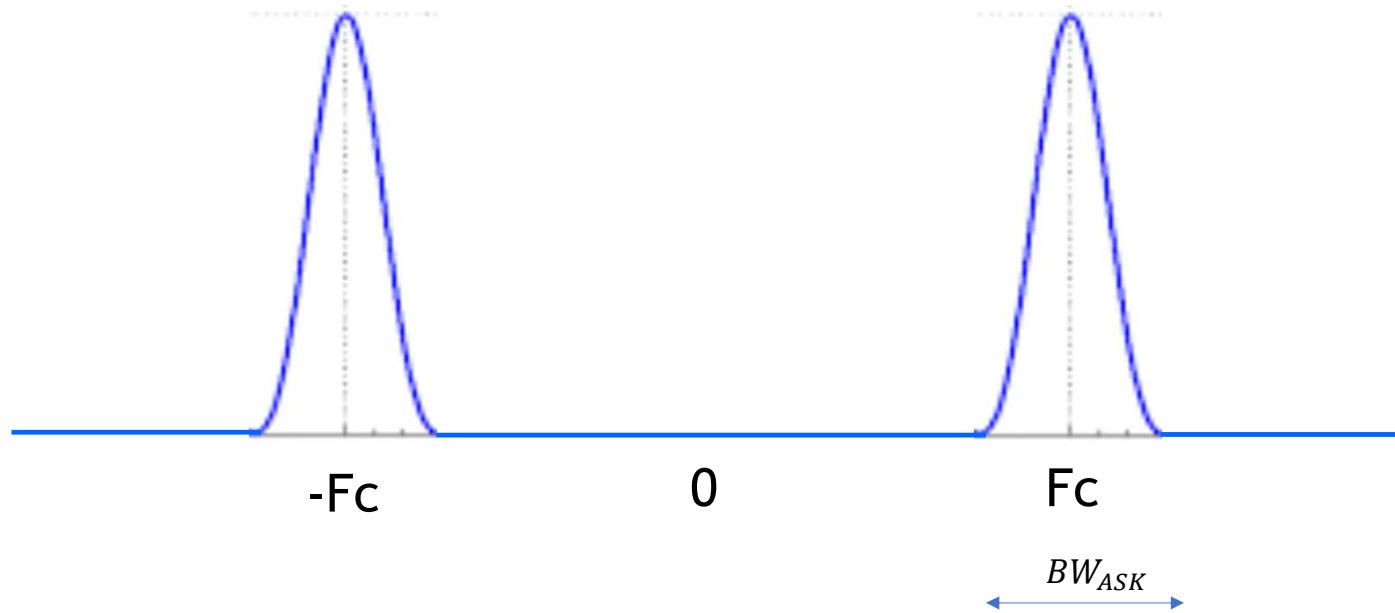
Ancho de Banda en ASK Sin filtrar

Si el ER es elevado, o el analizador de espectro tiene poca resolución, esto no se ve

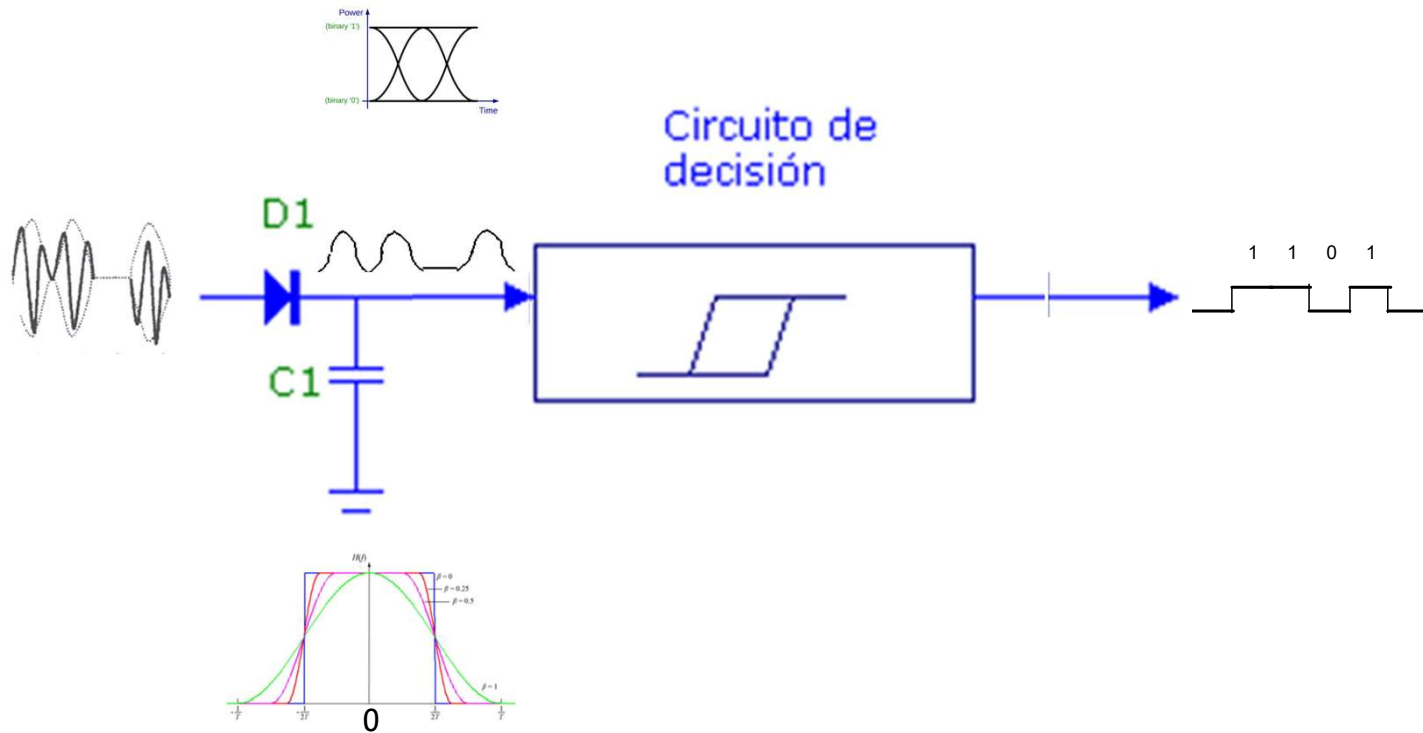


Ancho de Banda en ASK Filtrado

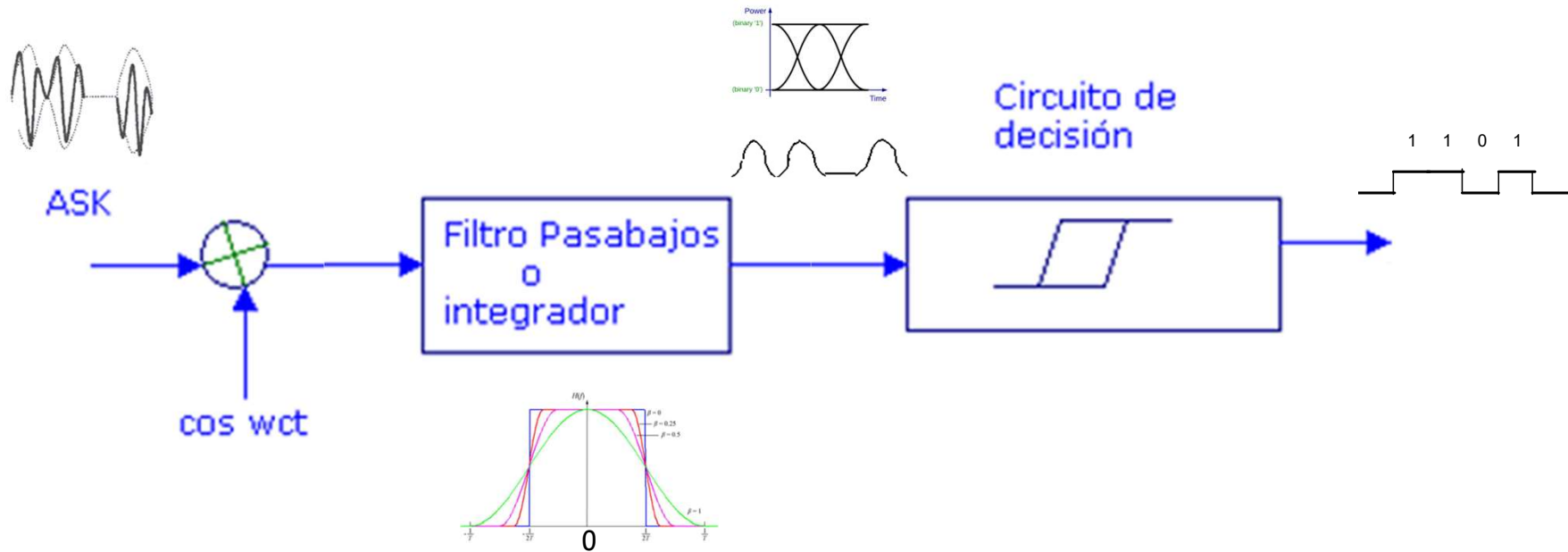
$$BW_{ASK} = 2 \cdot \frac{R}{2} \cdot (1 + \varphi)$$



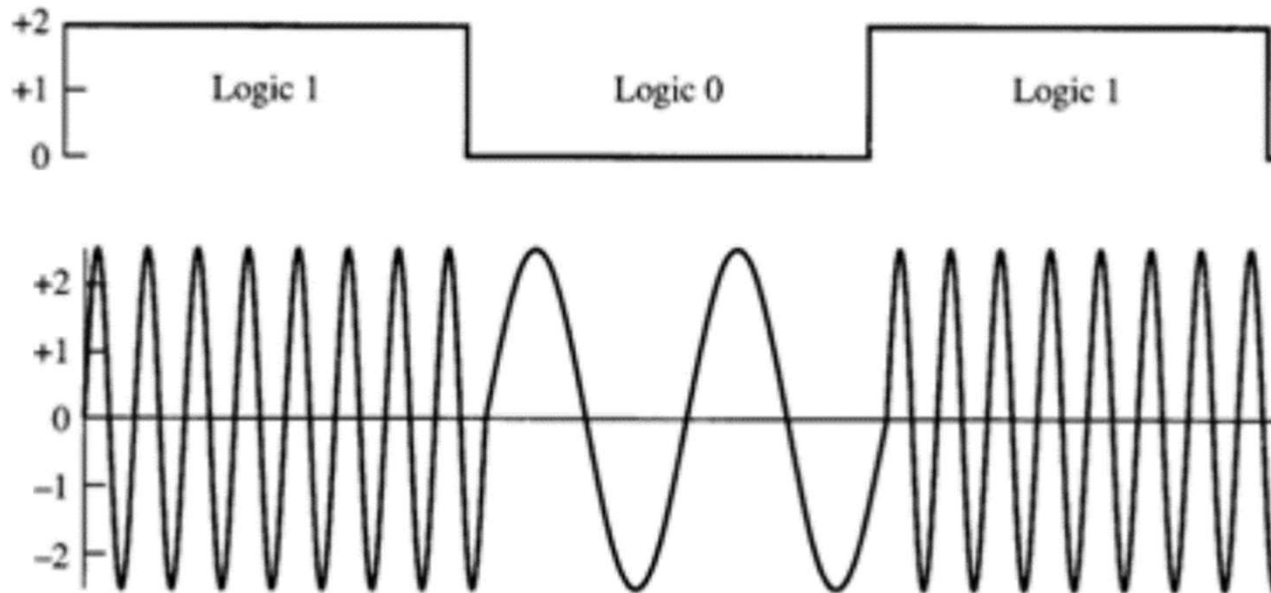
Detección ASK, detector de envolvente



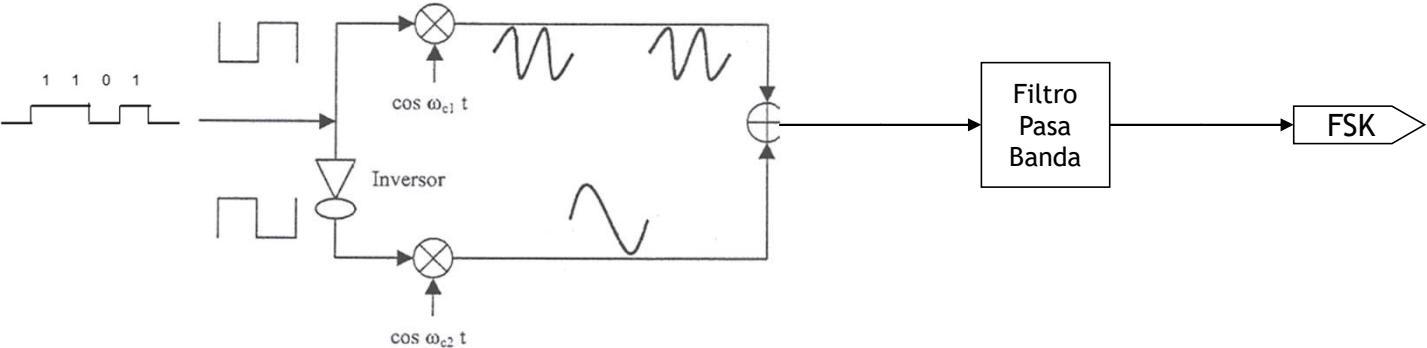
Detección ASK, detector coherente



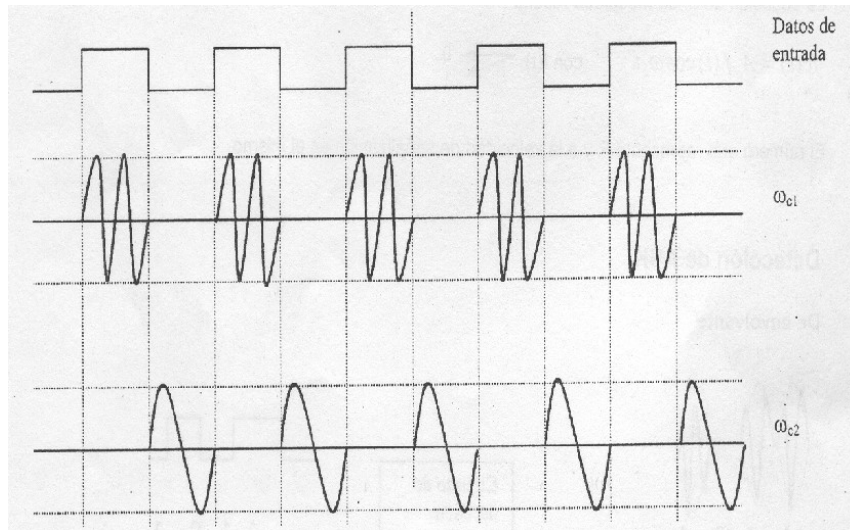
FSK o modulación por desplazamiento de frecuencia



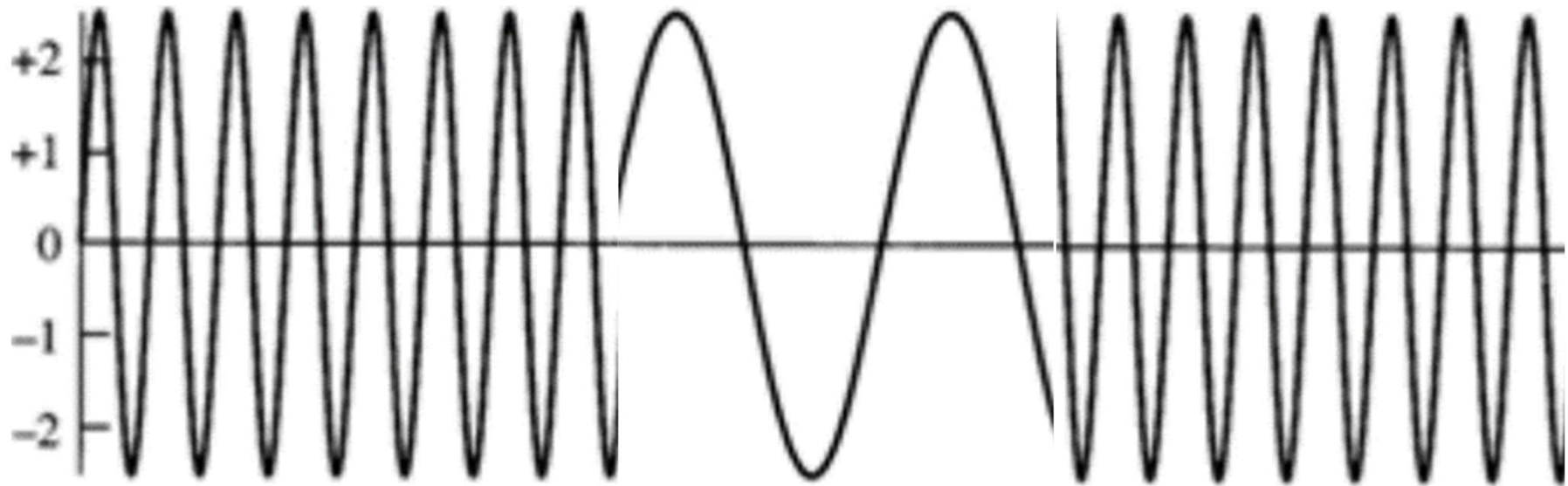
Generación de FSK. Por conmutación



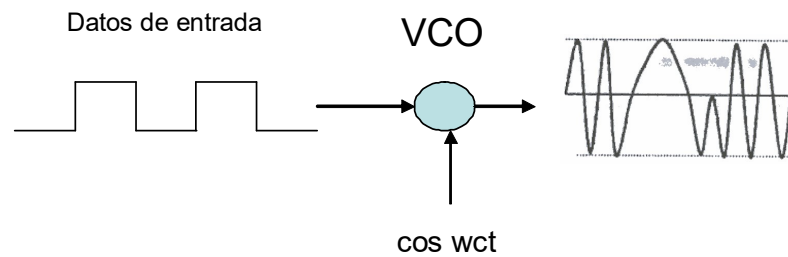
FSK



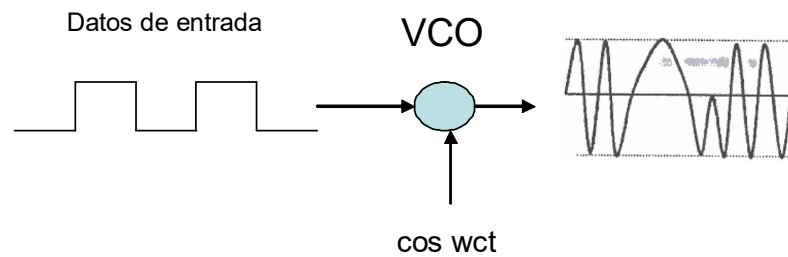
FSK. Saltos de fase



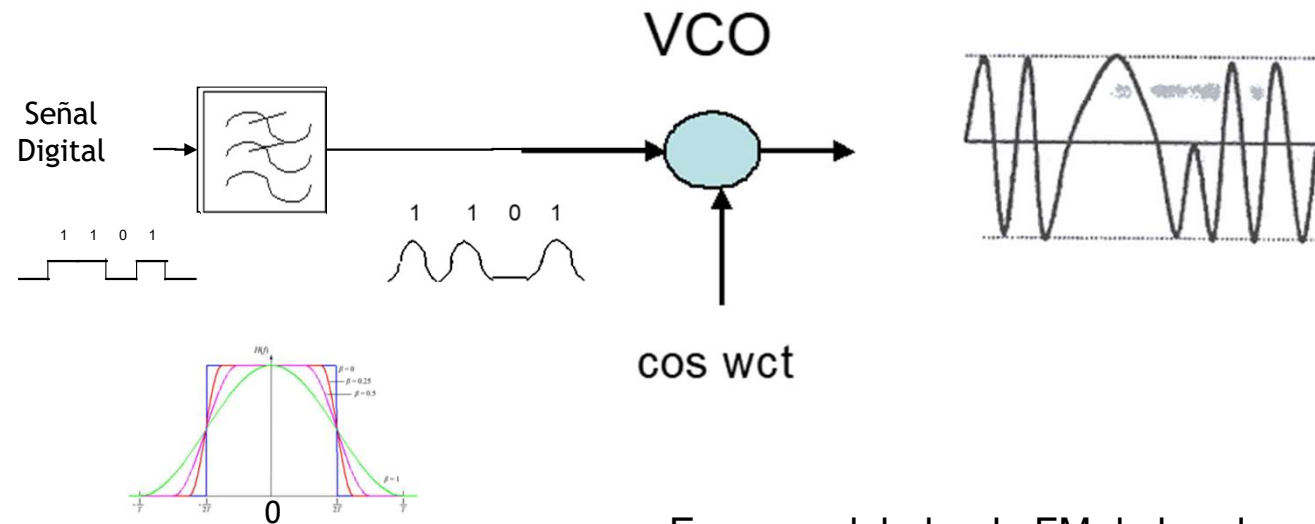
Generación de FSK. Por variación continua



Generación de FSK. Por variación continua

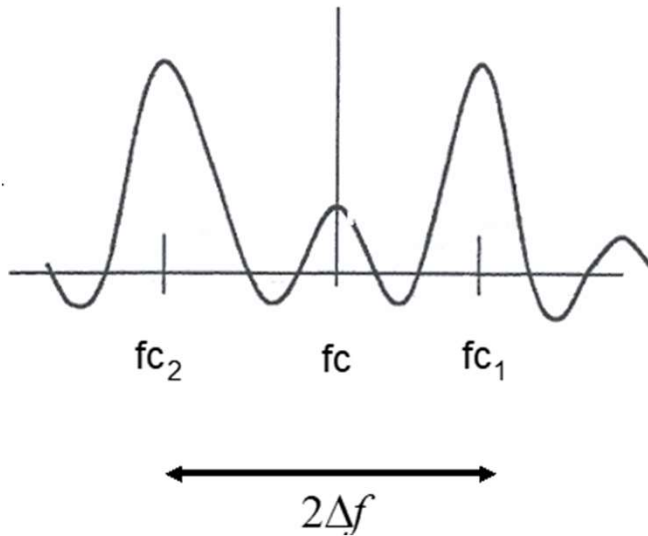


Generación de FSK. Por variación continua



Es un modulador de FM de banda ancha.
La F_{mm} es el BW_{BBase} de la señal digital filtrada

Ancho de Banda en FSK



Si es un modulador de FM de banda ancha.
Podemos aplicar regla de Carson

$$BW_{fm} = 2\Delta F + 2F_{mm}$$

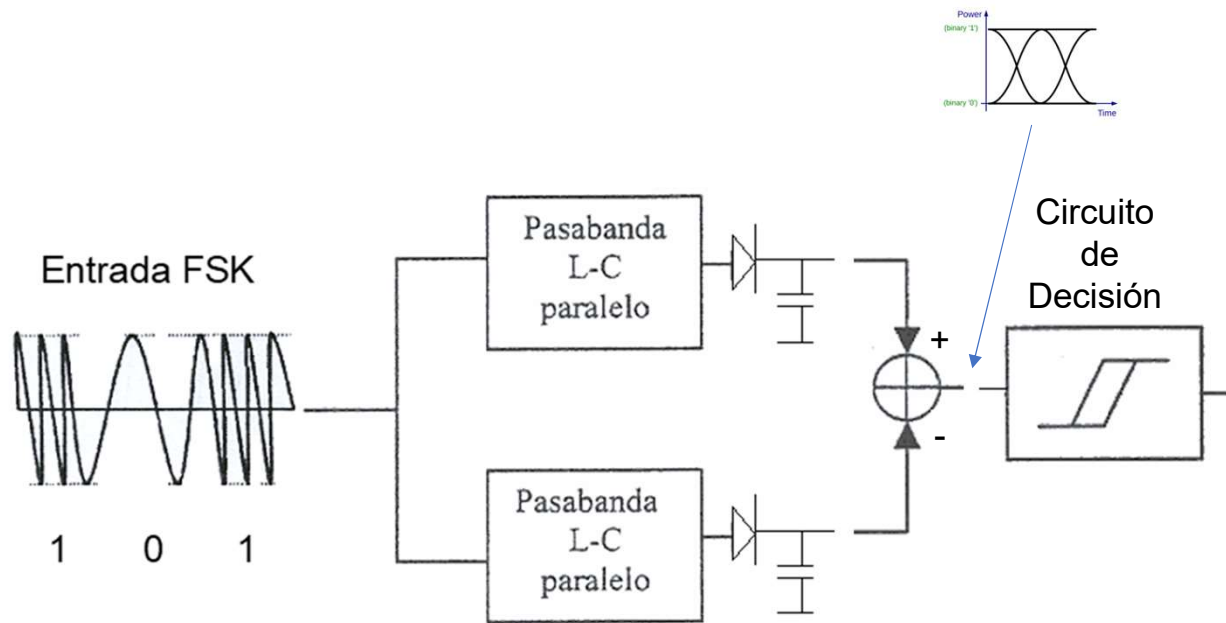
La F_{mm} es el BW_{BBase} de la señal digital filtrada

¡Precaución!

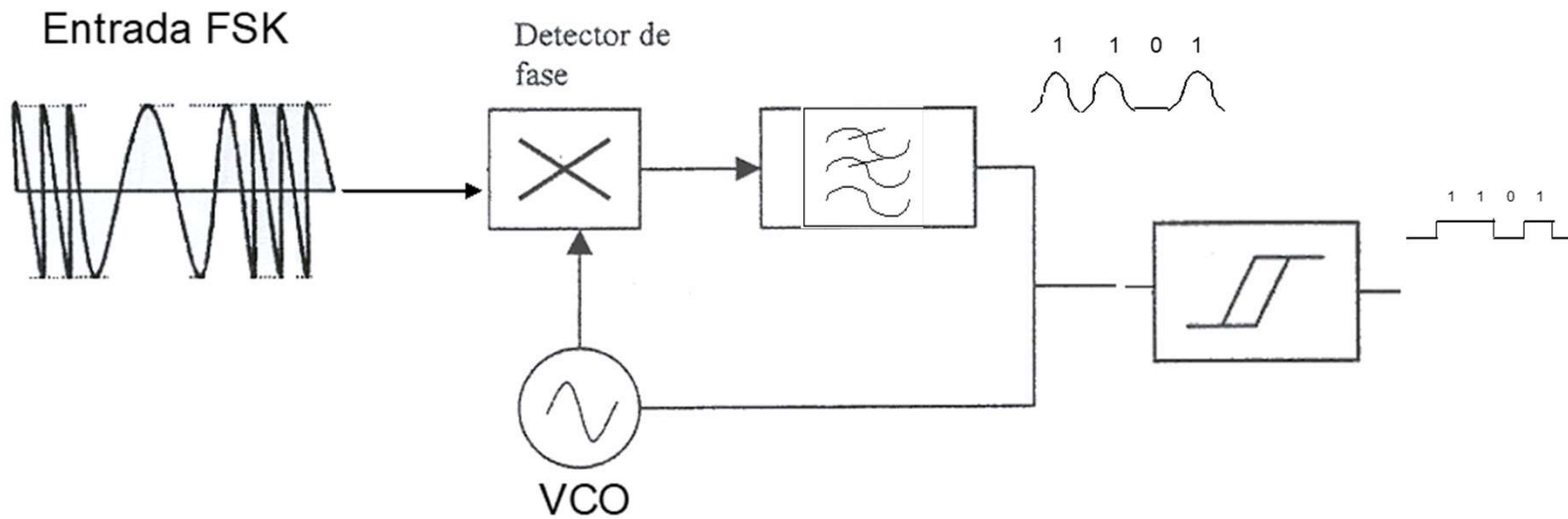
En FM, ΔF es la desviación con respecto a la frecuencia central.

En FSK se suele especificar las frecuencias MAX y MIN. La diferencia entre ella es el DOBLE de ΔF

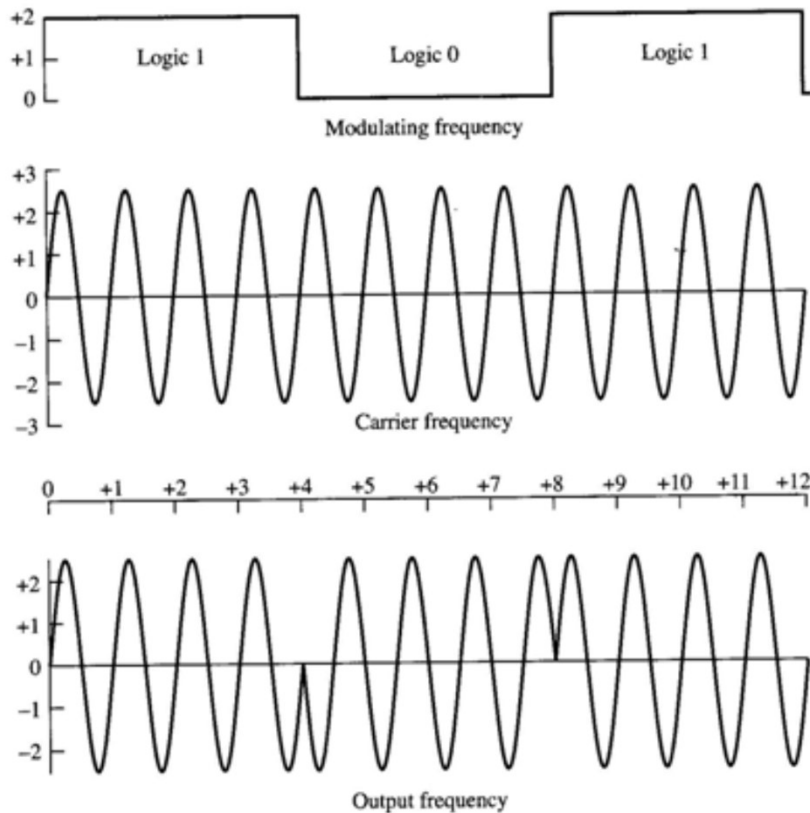
Detección FSK. No coherente. Por envolvente



Detección FSK. No Coherente. Con PLL

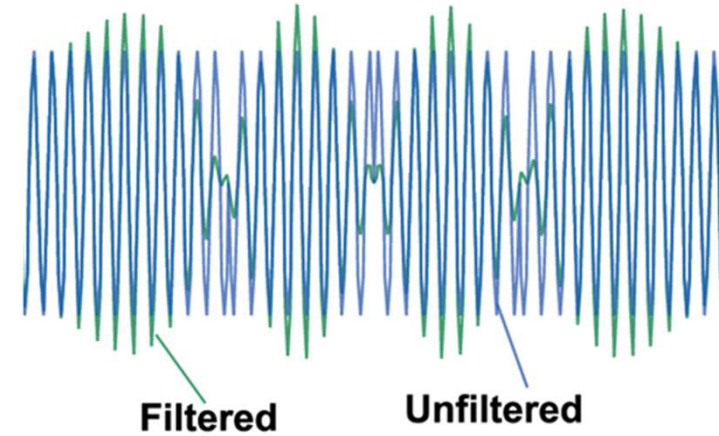
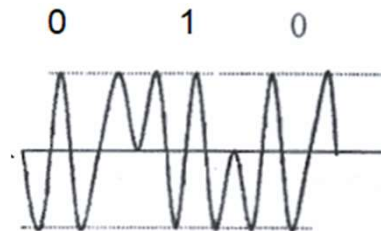
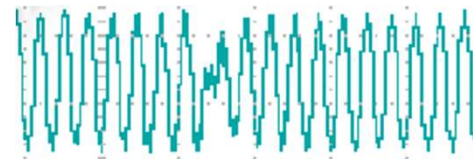
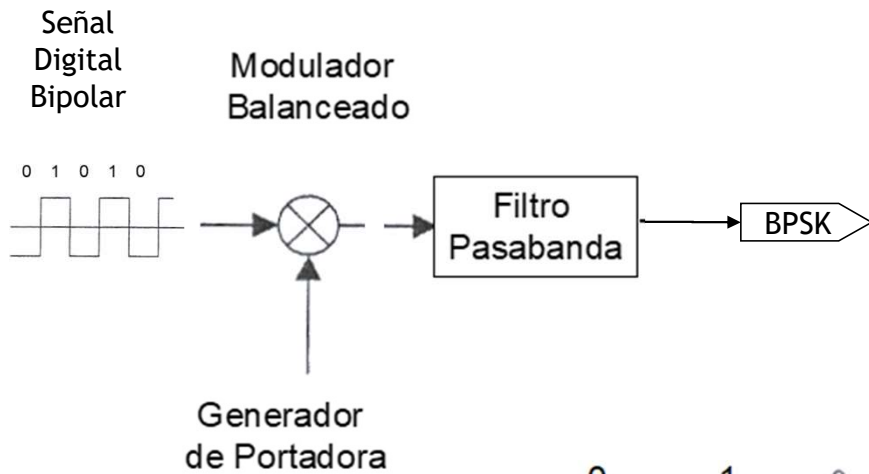


PSK o Modulación por desplazamiento de fase

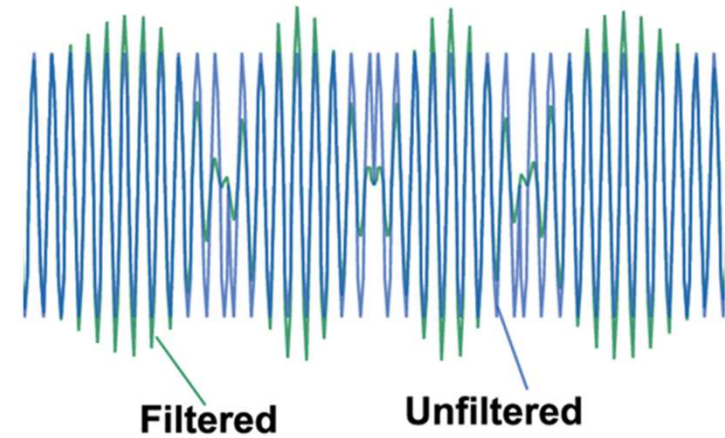
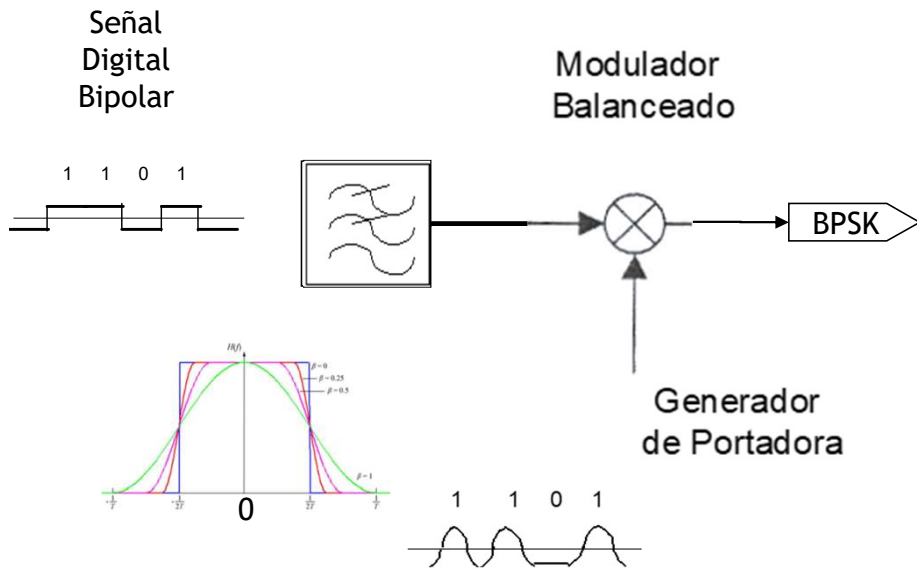


Caso
BPSK (2PSK)

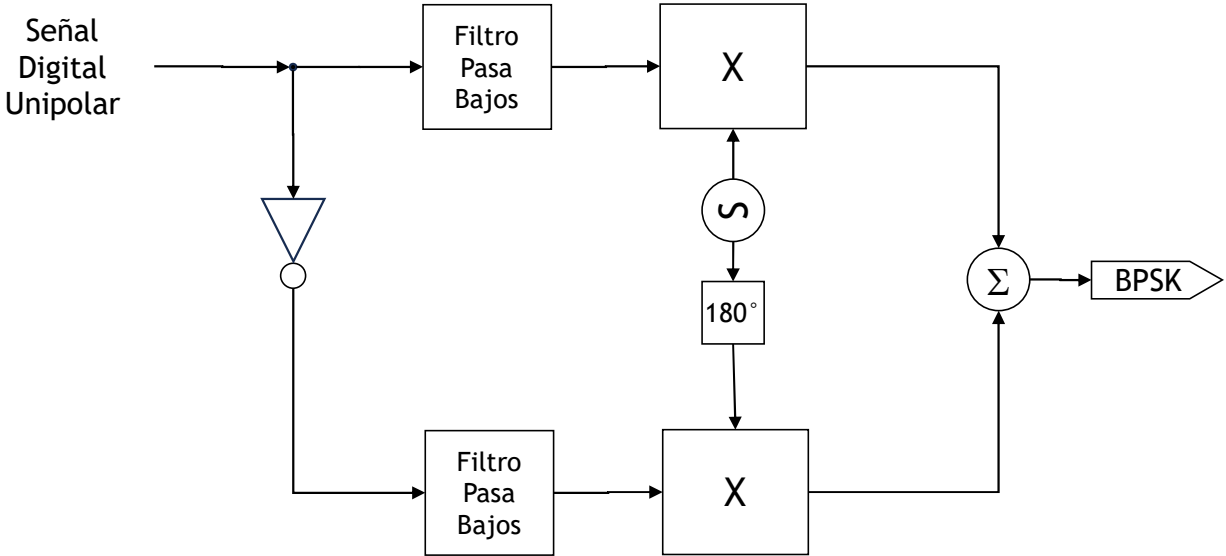
Generación de BPSK



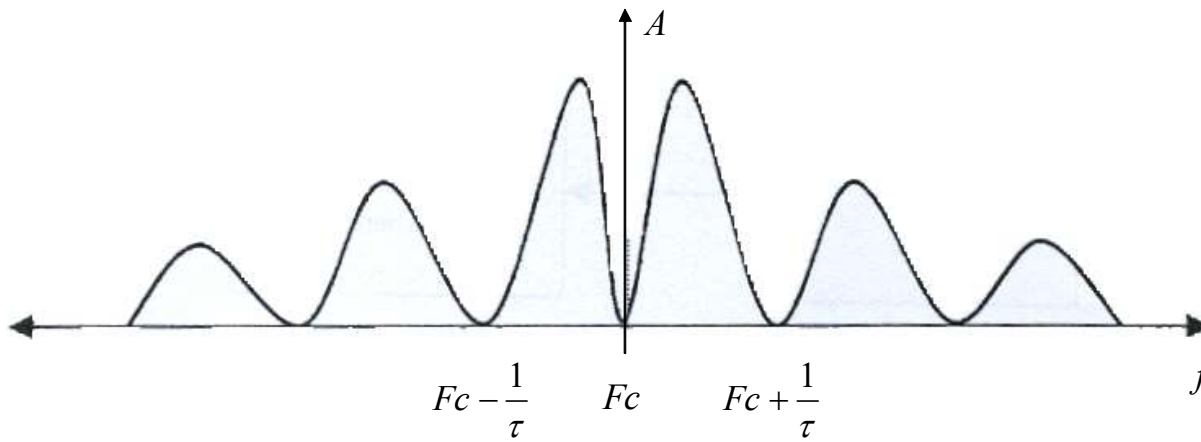
Generación de BPSK



Generación de BPSK



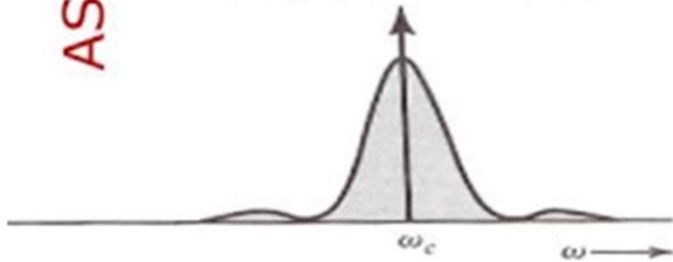
Espectro de BPSK



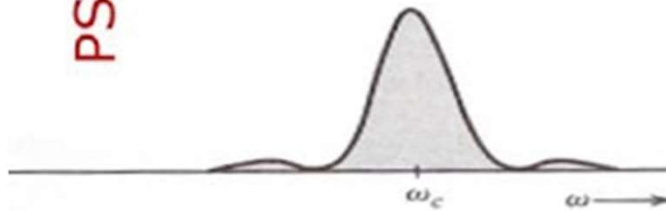
$$BW_{BSK} = 2 \cdot \frac{R}{2} \cdot (1 + \varphi)$$

Espectros de 2SK

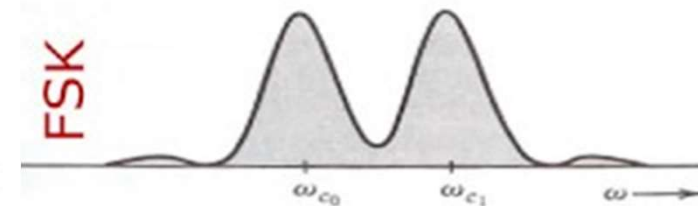
ASK



PSK



FSK

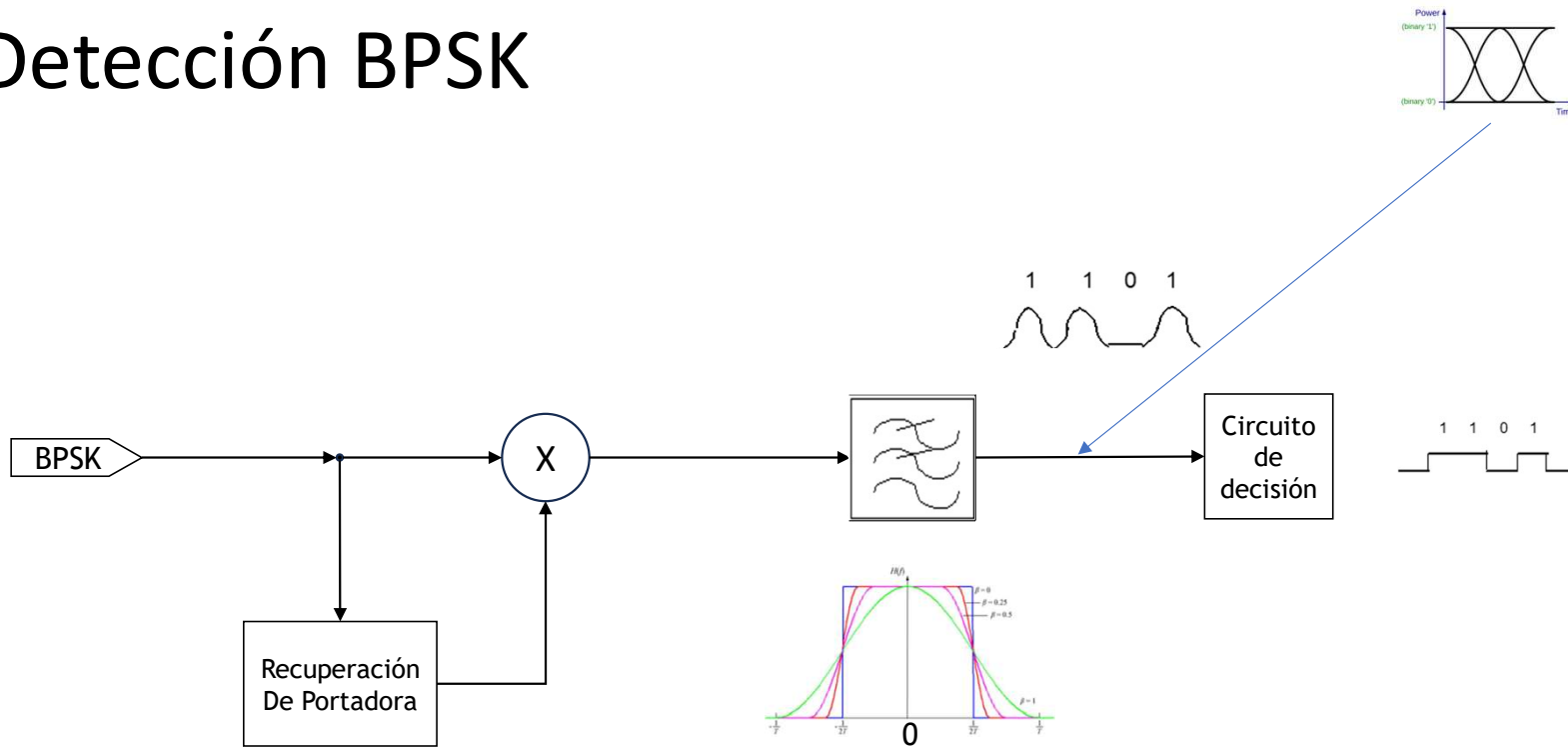


$$BW_{ASK} = 2 \cdot \frac{R}{2} \cdot (1 + \varphi)$$

$$BW_{PSK} = 2 \cdot \frac{R}{2} \cdot (1 + \varphi)$$

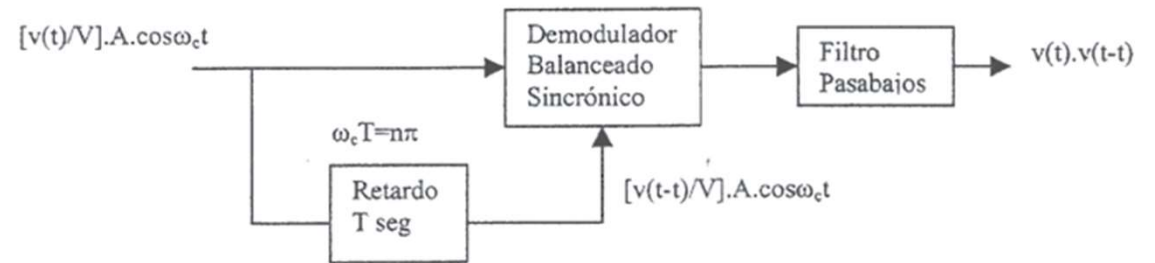
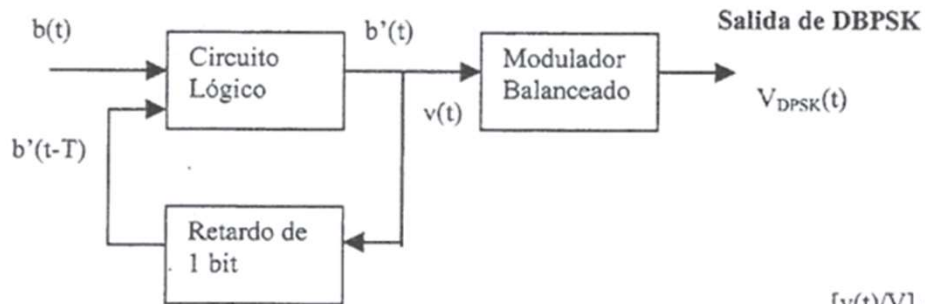
$$BW_{FSK} = 2 \cdot \frac{R}{2} \cdot (1 + \varphi) + (f_{c2} - f_{c1})$$

Detección BPSK

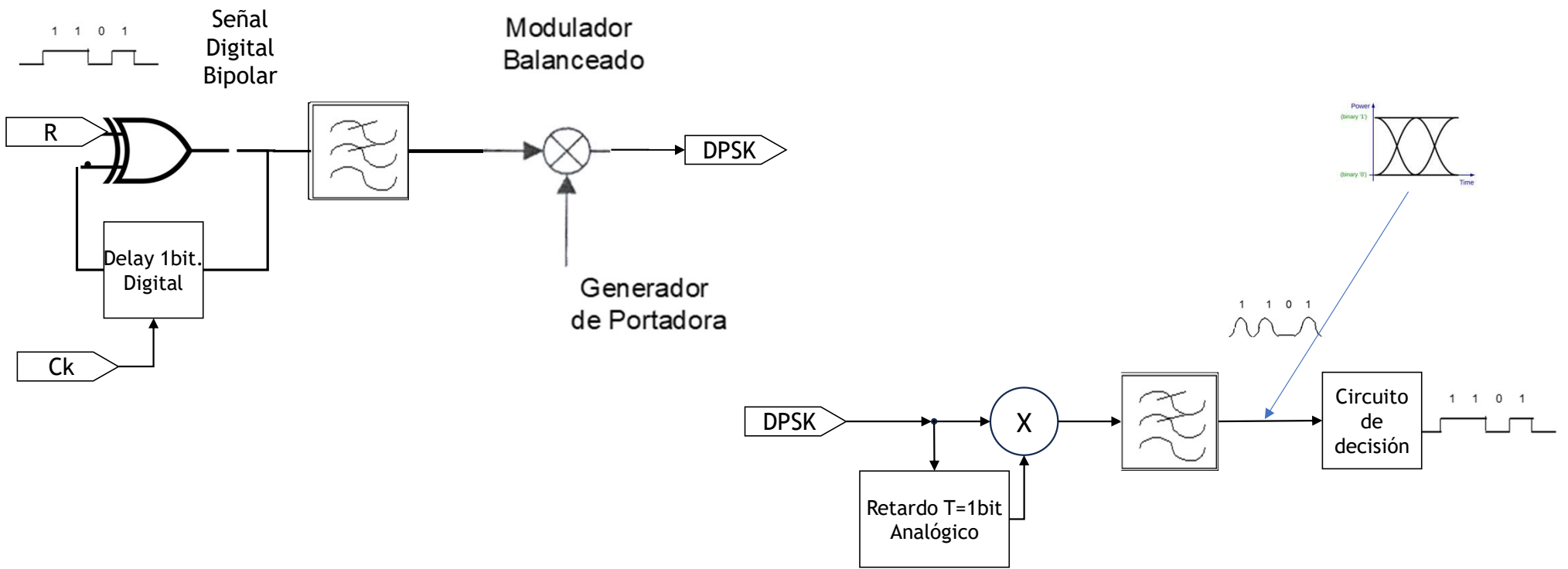


Diferencial PSK

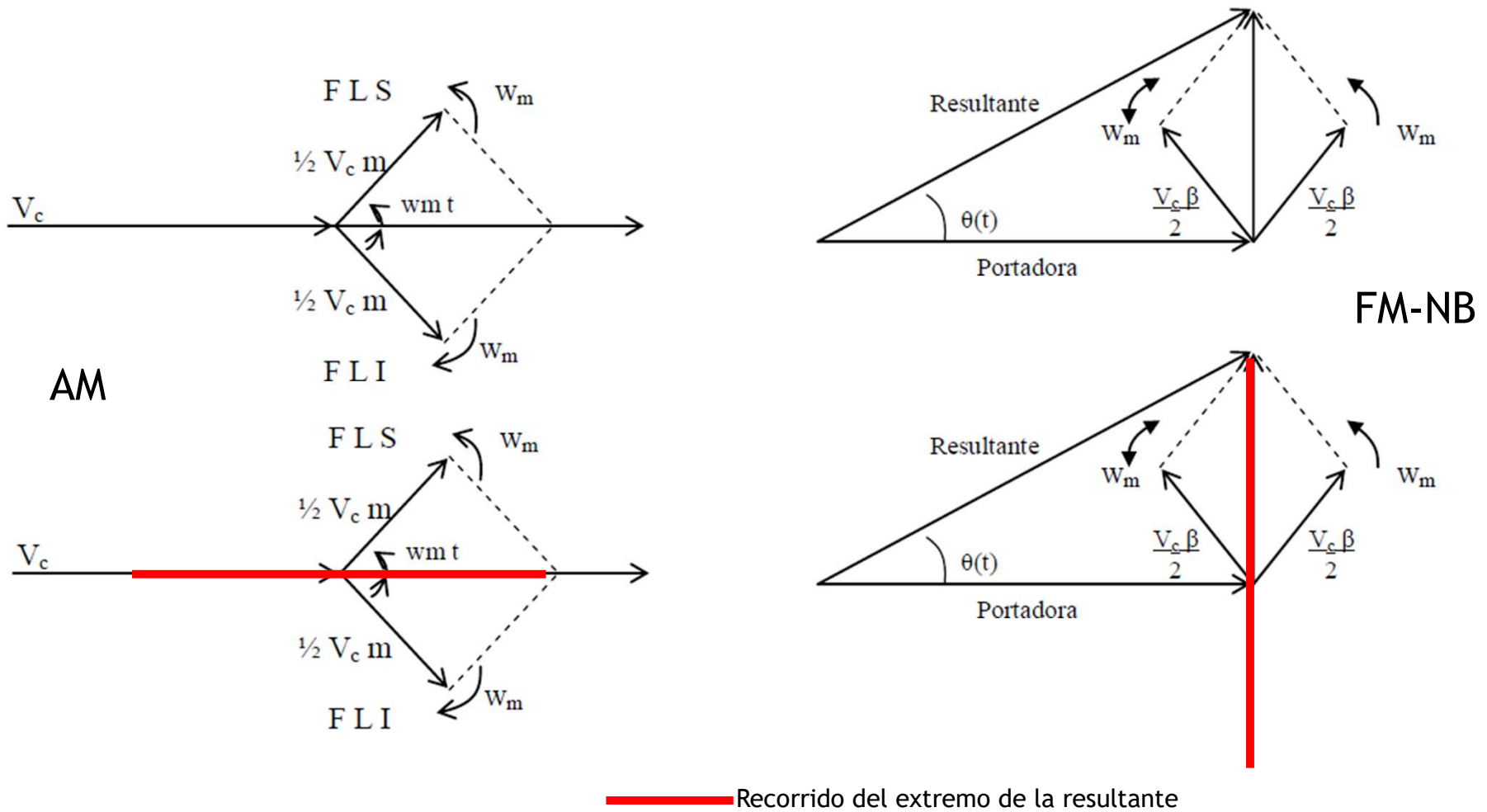
b(t) →		1	0	1	1	0	1	0	0	1
b'(t) →	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1
Fase →	0	0	π	π	π	0	0	π	0	0



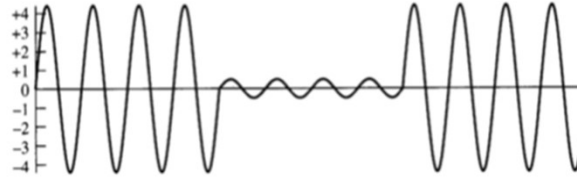
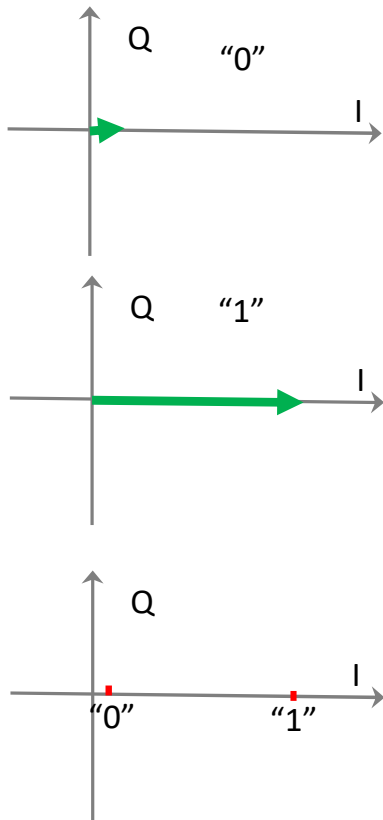
Diferencial PSK



Recordando diagramas fasoriales

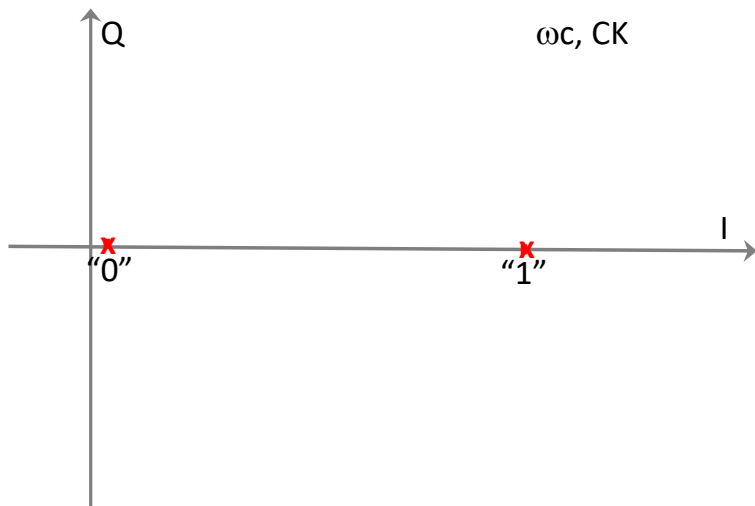


ASK: diagrama fasorial



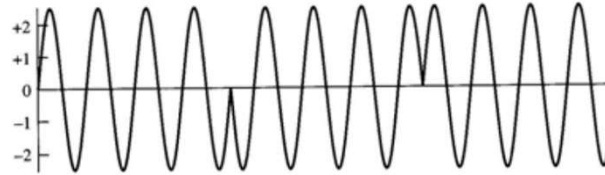
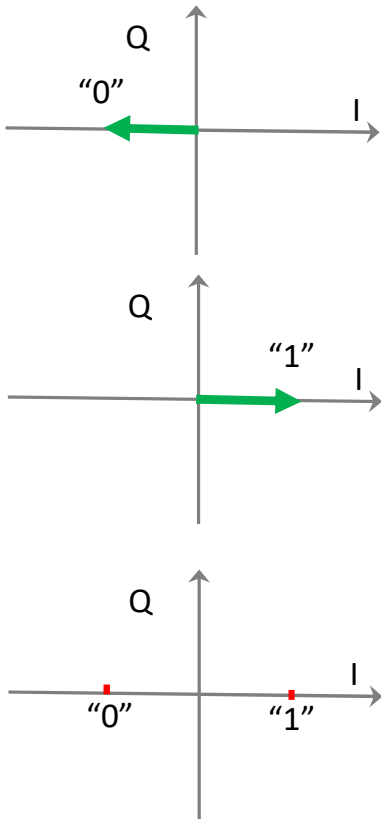
El recorrido del extremo de la resultante no es continuo

ASK: constelación de estados

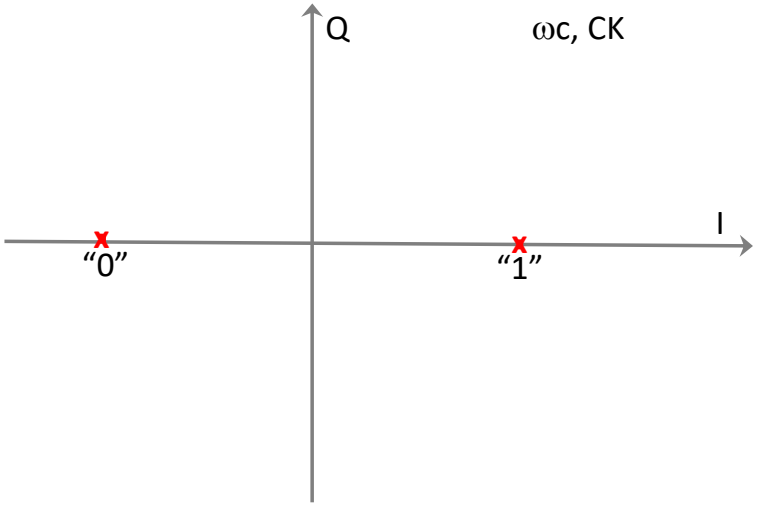


La constelación de estados es una foto del diagrama fasorial al momento de recuperar el símbolo(CK).

BPSK diagrama fasorial

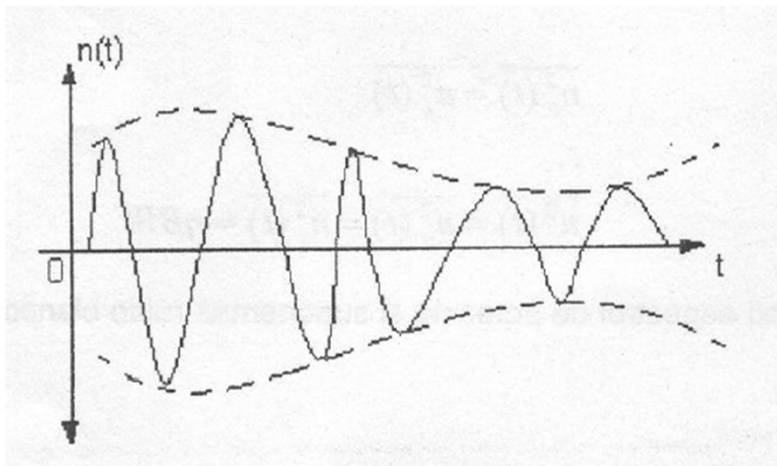


BPSK: constelación de estados



Recordando...ruido en banda angosta

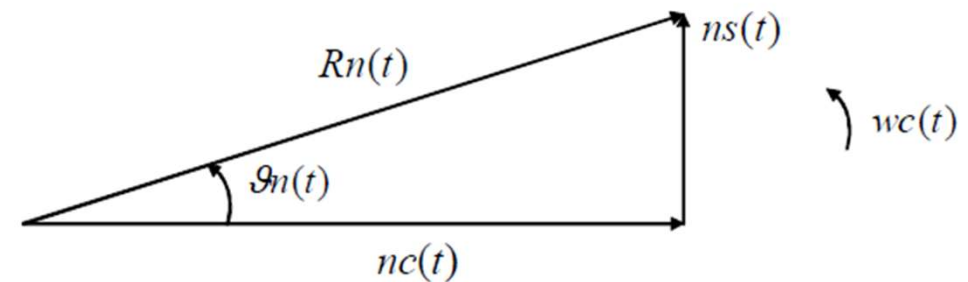
$$n(t) = Rn(t) \cos[\omega c t + \mathcal{G}n(t)] =$$



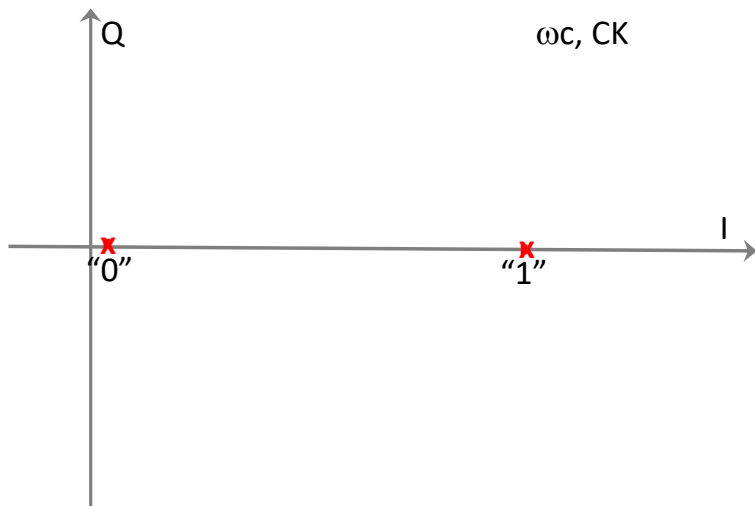
Llamando $Rn(t) \cos \mathcal{G}n(t) = nc(t)$ y $-Rn(t) \text{sen} \mathcal{G}n(t) = ns(t)$

Entonces el ruido lo podemos representar en forma fasorial como:

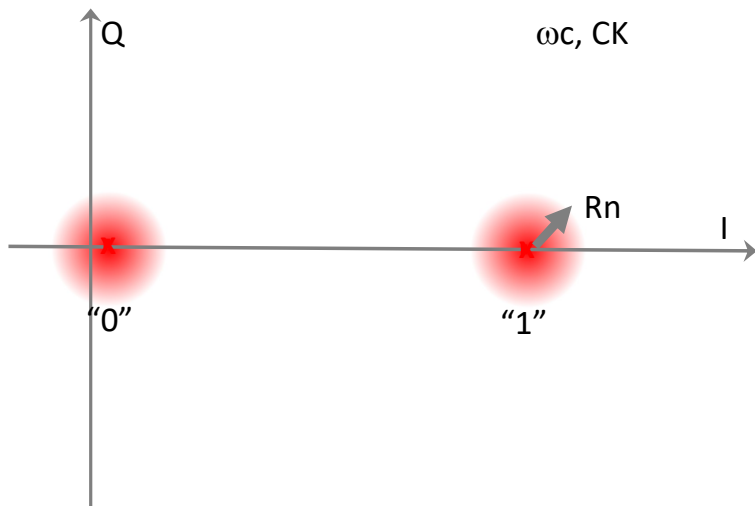
$$n(t) = nc(t) \cos \omega c t + ns(t) \text{sen} \omega c t$$



ASK: constelación de estados

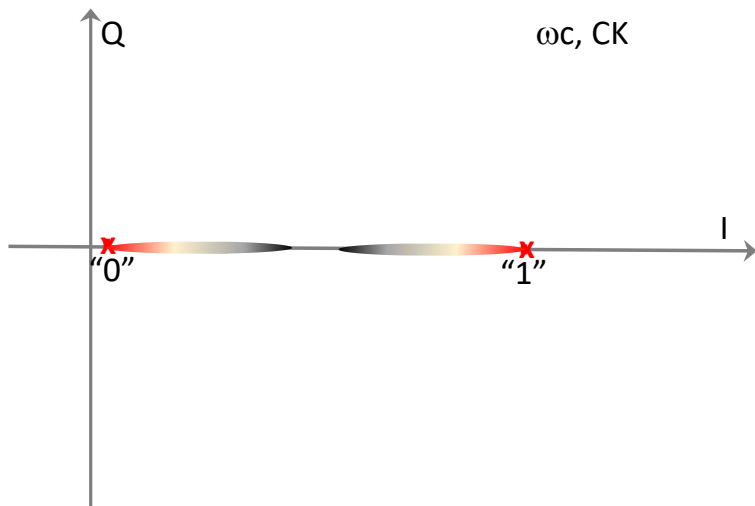


ASK: constelación de estados con AGWN



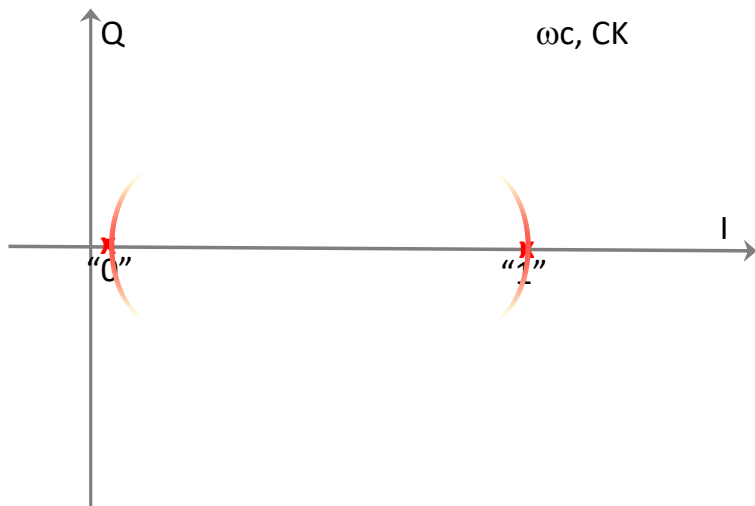
El fasor de ruido provoca la dispersión por igual en todas las direcciones

ASK: constelación de estados con ISI



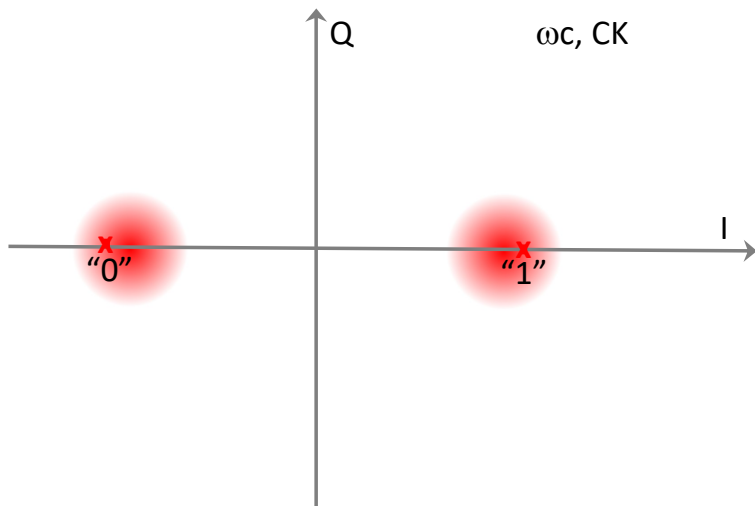
La ISI provoca dispersión en dirección a los otros símbolos

ASK: constelación de estados con Ruido de fase



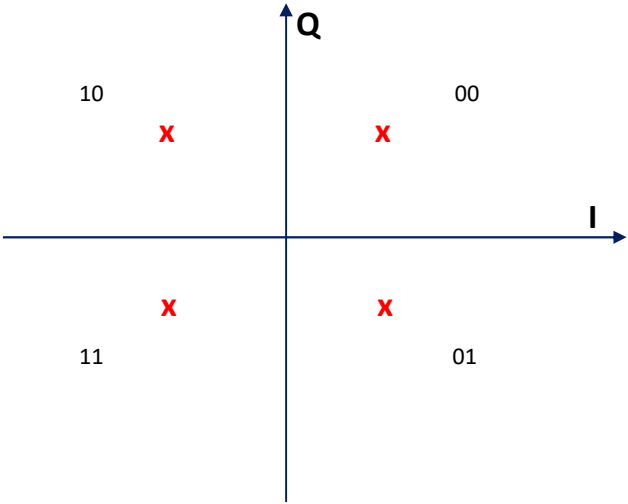
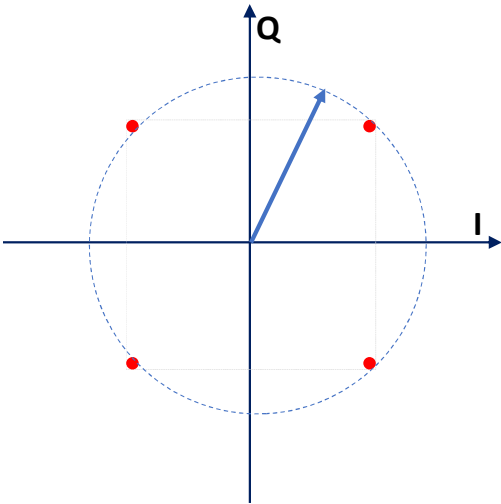
El ruido de fase provoca la dispersión en forma radial al centro de símbolos

BPSK: constelación de estados+AWGN+ISI

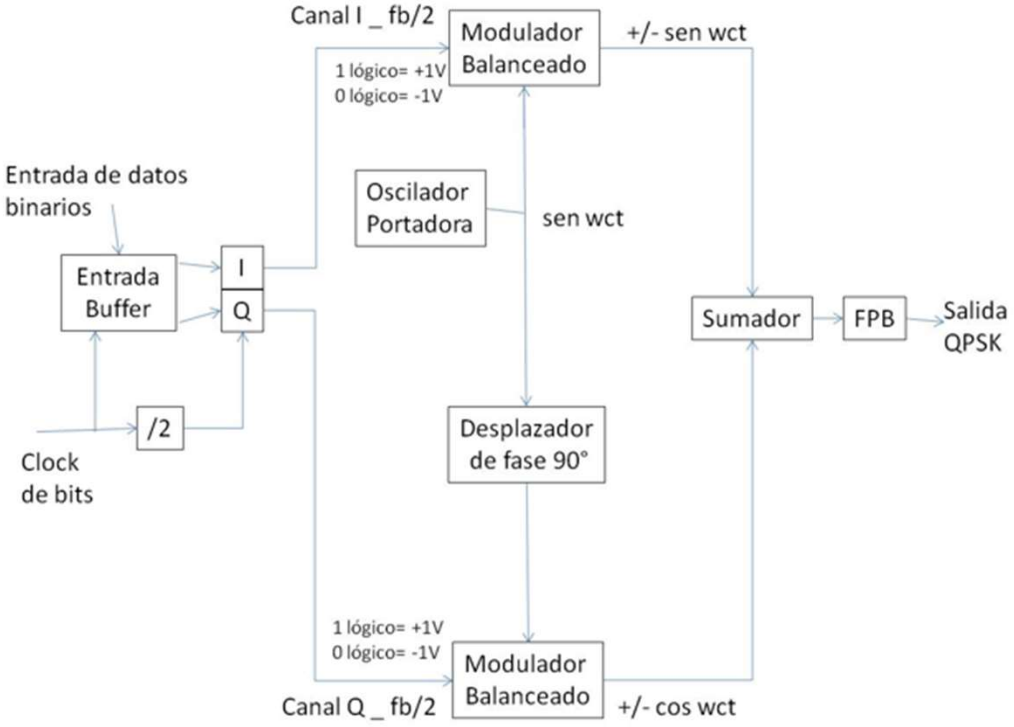


Con ruido+ISI queda una dispersión en todas direcciones, pero desplazada hacia el otro símbolo

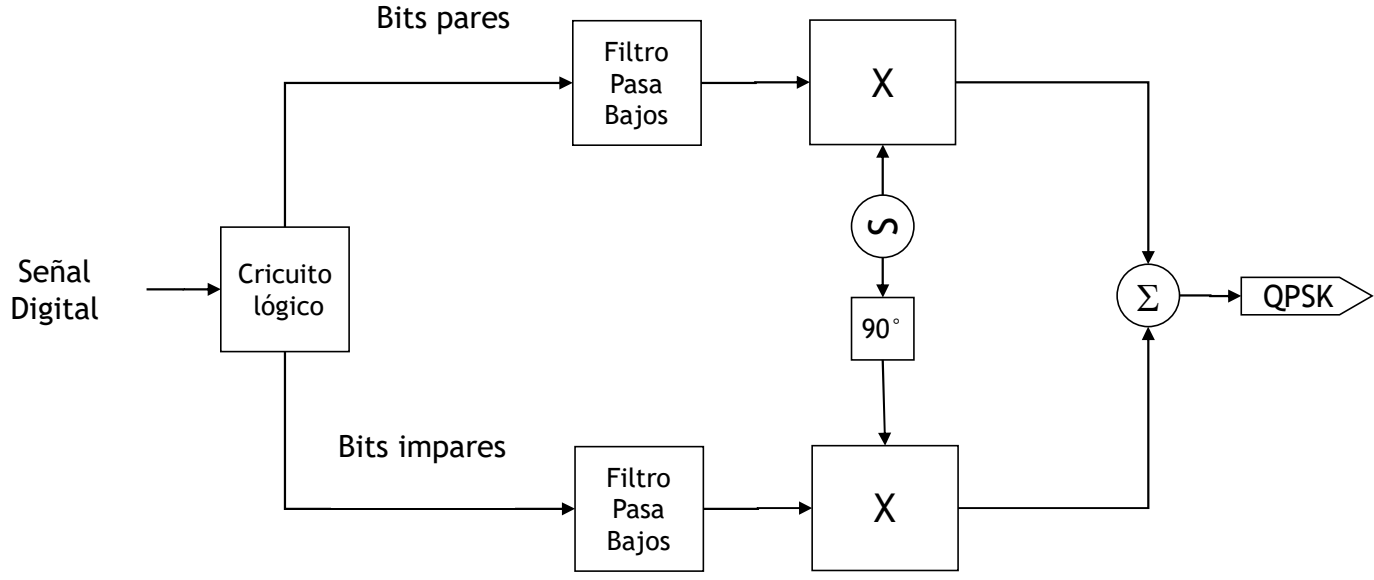
QPSK/4QAM



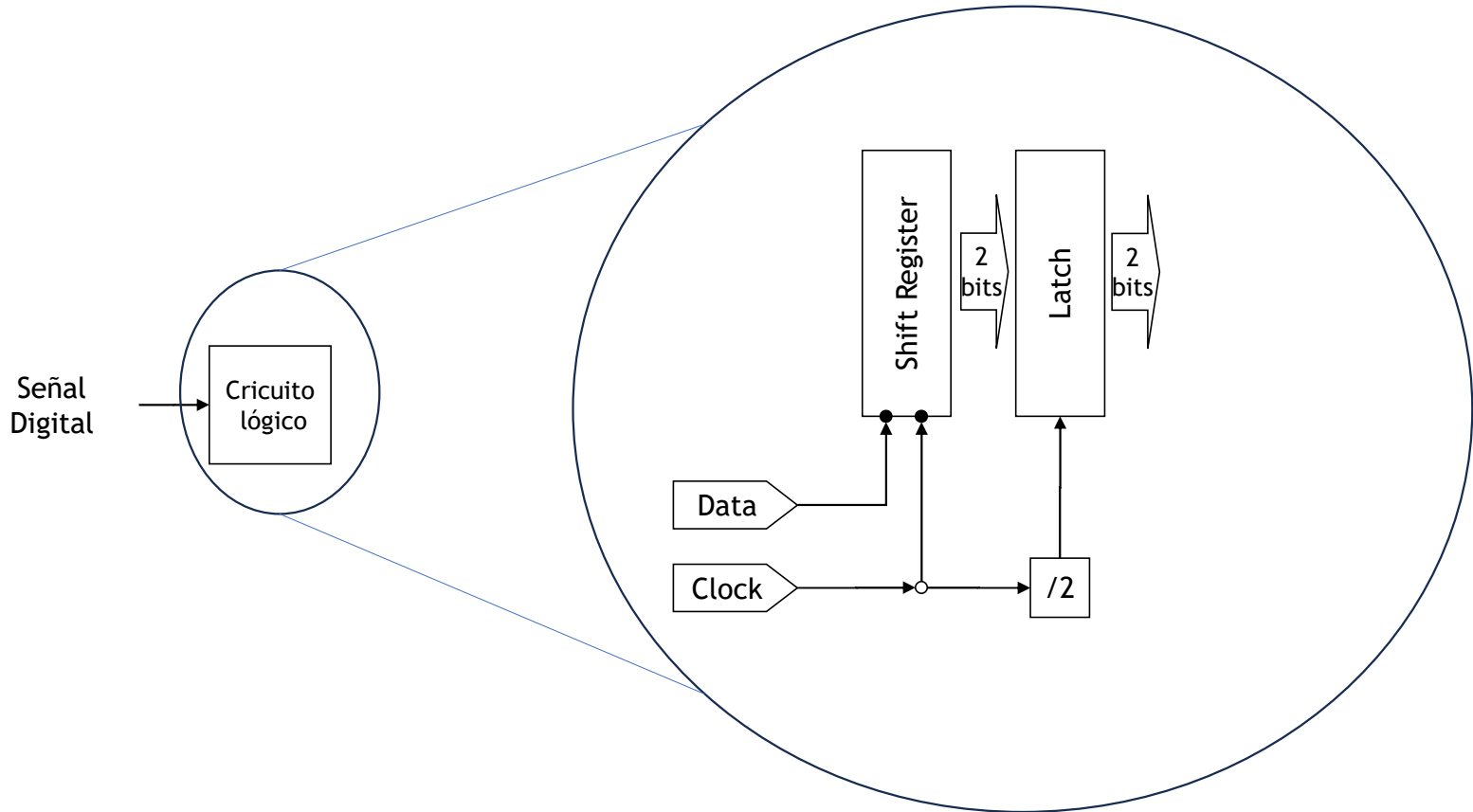
Generación QPSK/4QAM



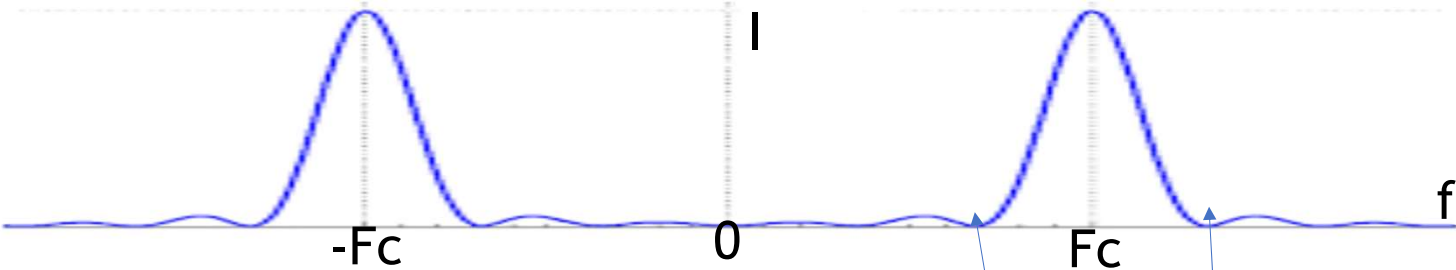
Generación QPSK/4QAM



Generación QPSK/4QAM

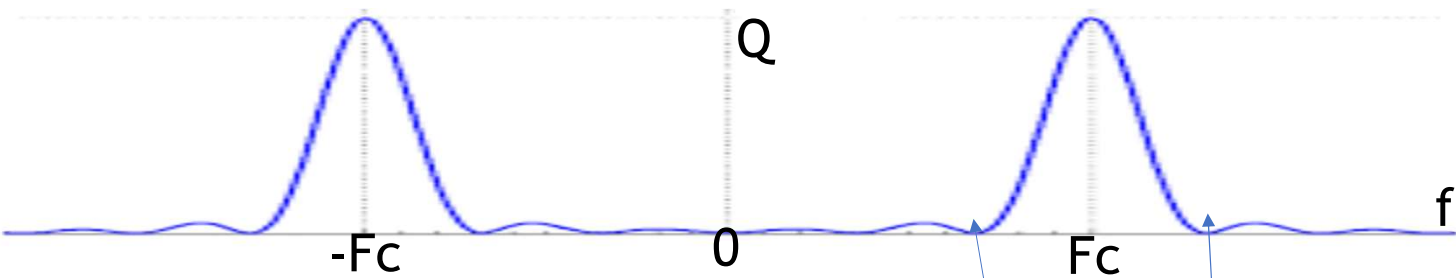


Ancho de banda en QPSK



$F_c - R/2$ $F_c + R/2$

Esto es el Baudrate= R/n ,
bitrate/(bits por símbolo)
El BW se achica cuanto
más bit por símbolo. O, a
igual BW se aumenta la
cantidad de Info que se
transmite



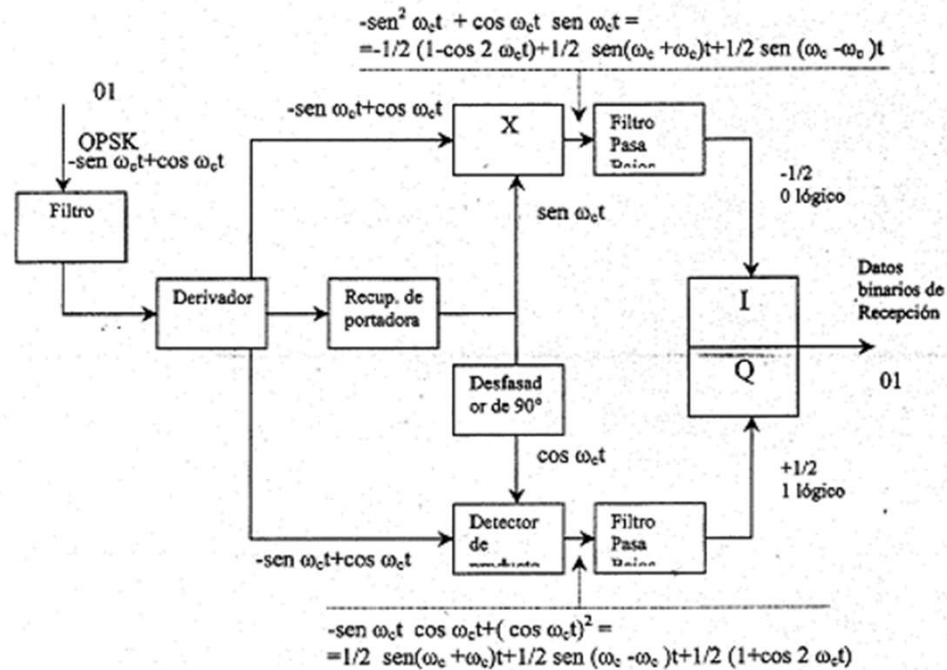
$F_c - R/2$ $F_c + R/2$

Ancho de banda en QPSK

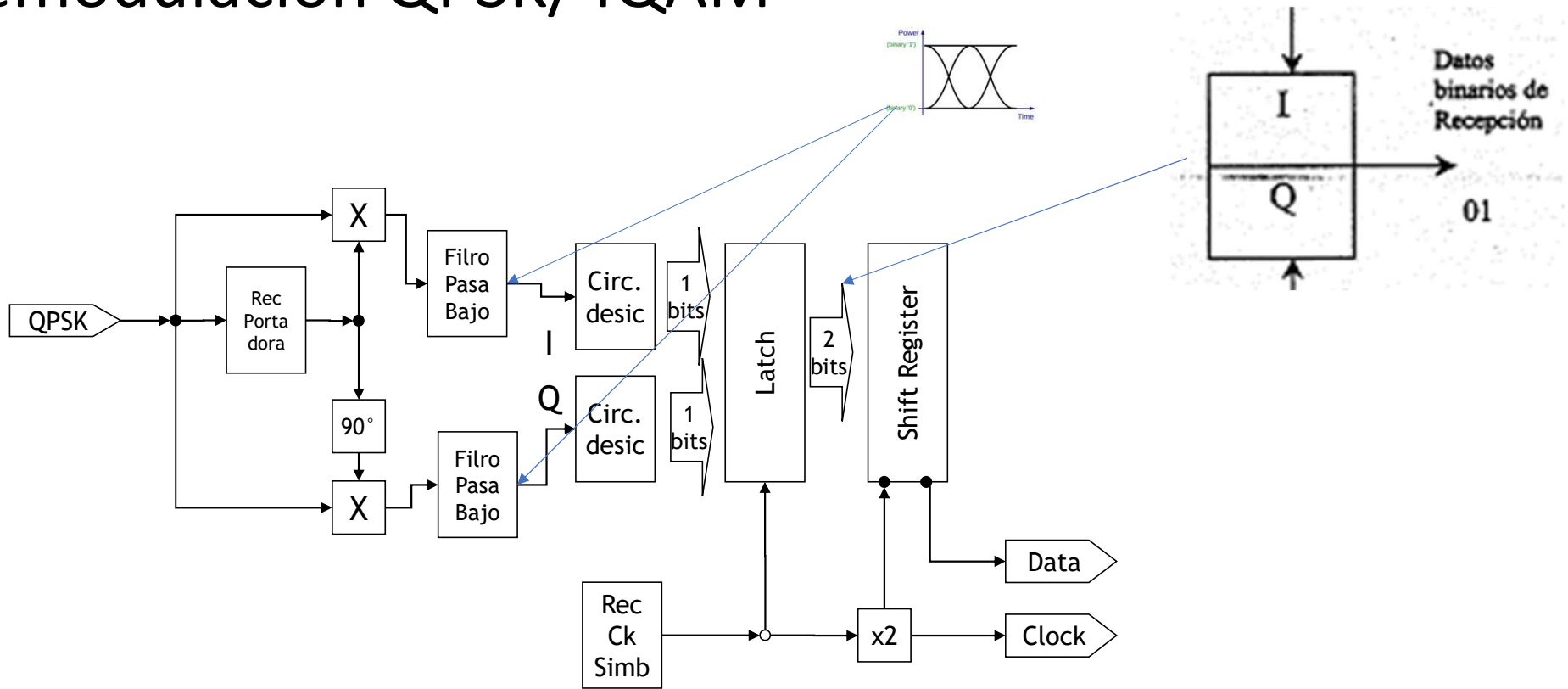
$$BW_{BPSK} = 2 \cdot \frac{R}{2} \cdot (1 + \varphi)$$

$$BW_{QPSK} = 2 \cdot \frac{R/2}{2} \cdot (1 + \varphi)$$

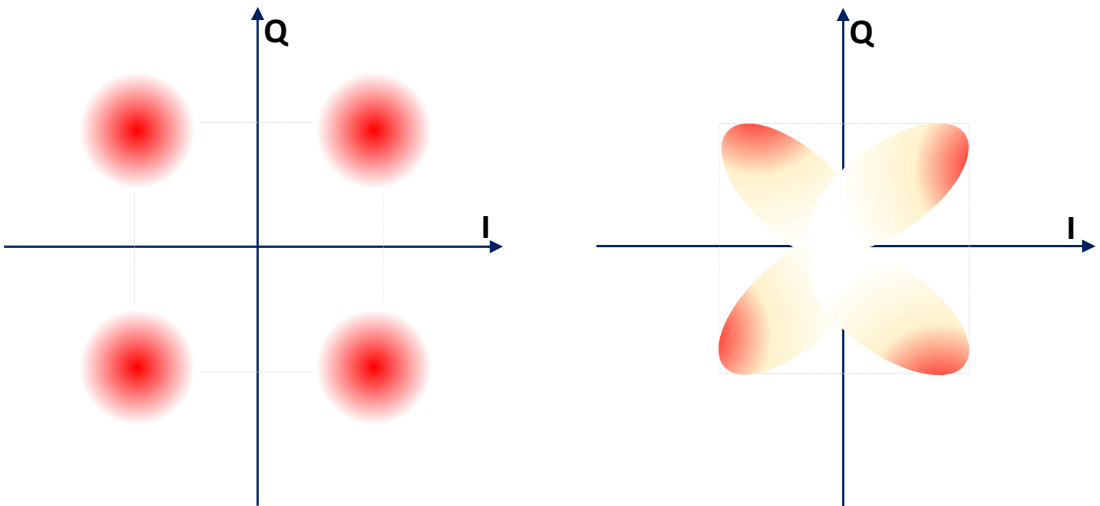
Demodulación QPSK/4QAM



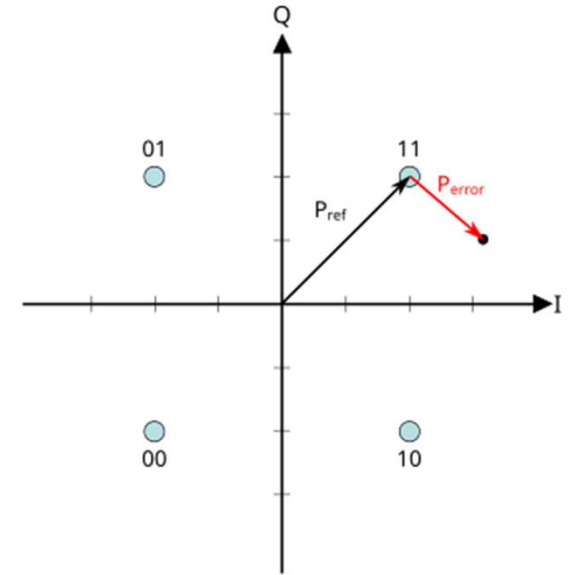
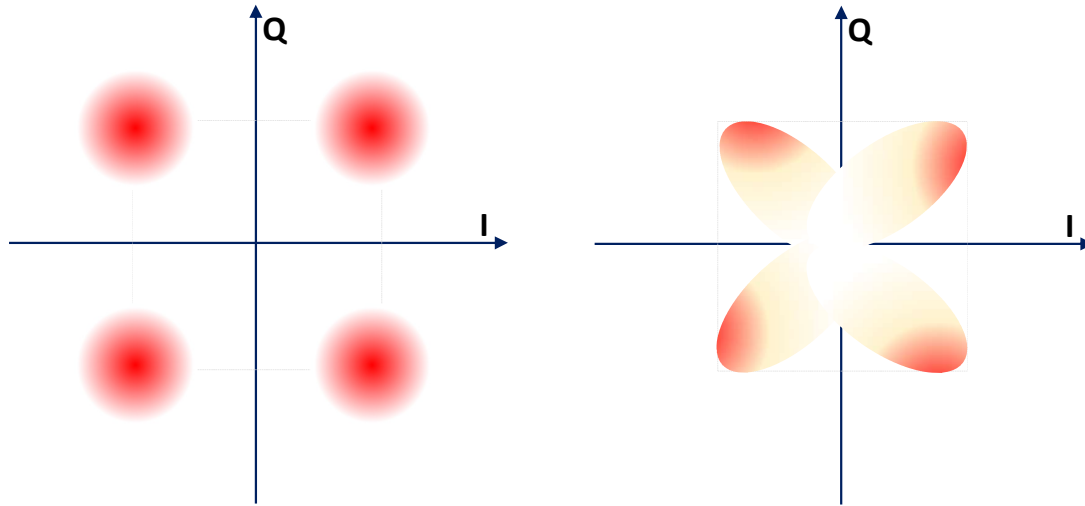
Demodulación QPSK/4QAM



Ruido+ISI en QPSK/4QAM



Ruido+ISI en QPSK/4QAM, EVM

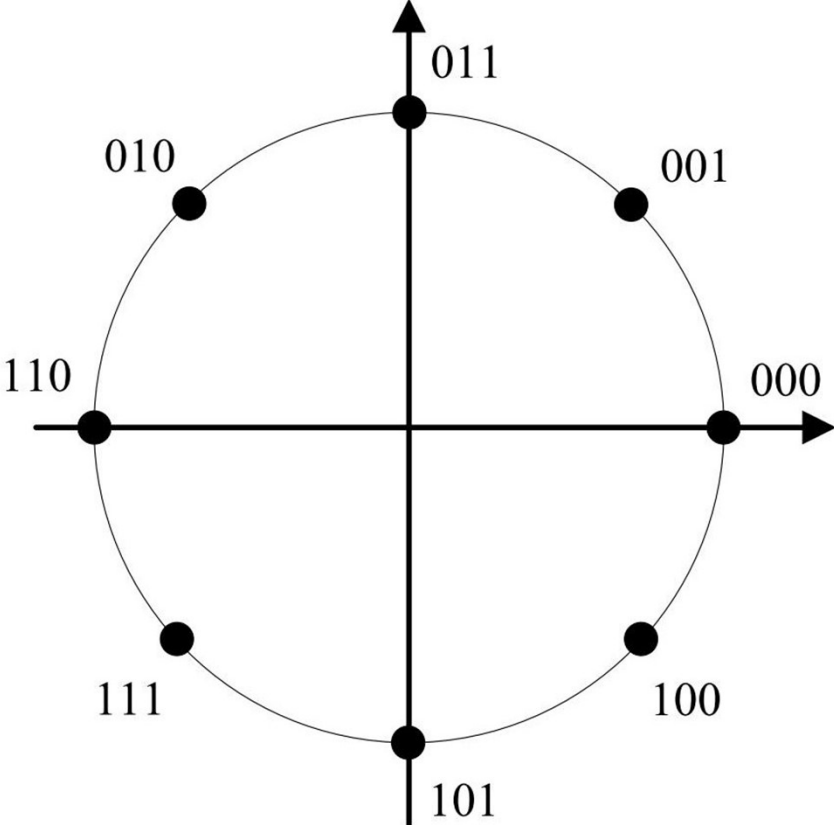


$$\% \text{ EVM} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \text{Ierr}[n]^2 + \text{Qerr}[n]^2}}{\text{EVM Normalization Reference}} \times 100\%$$

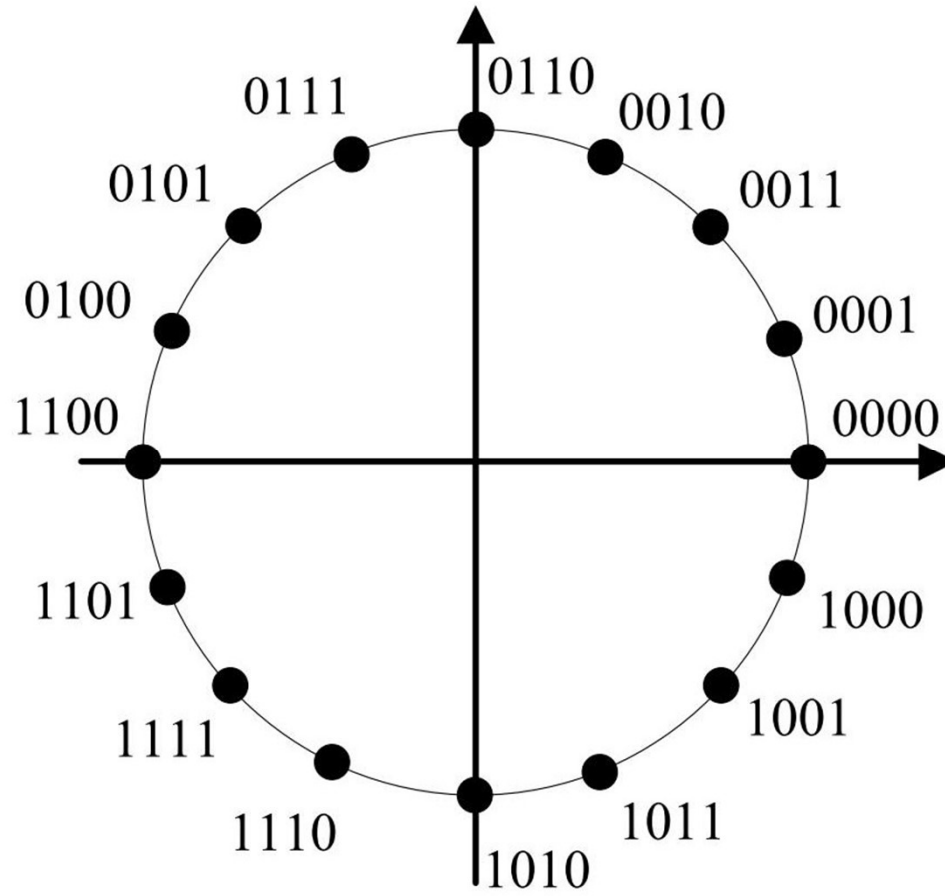
where:
n = symbol index
N = number of symbols
Ierr = I Ref - I Meas
Qerr = Q Ref - Q Meas

EVM=Error Vector Magnitude
Vale para todas las modulaciones

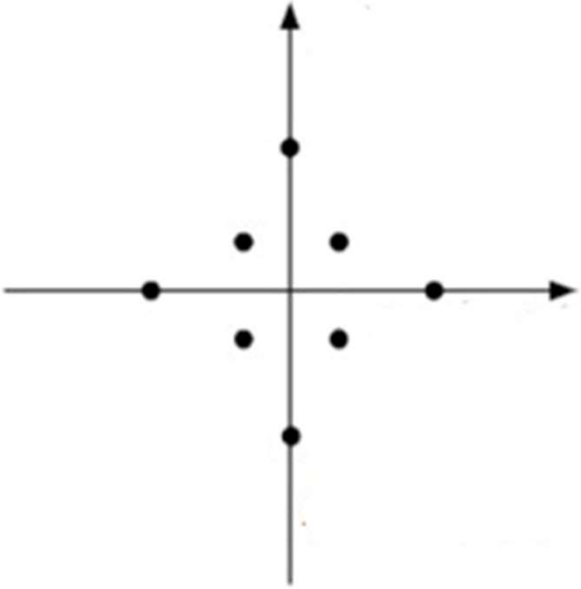
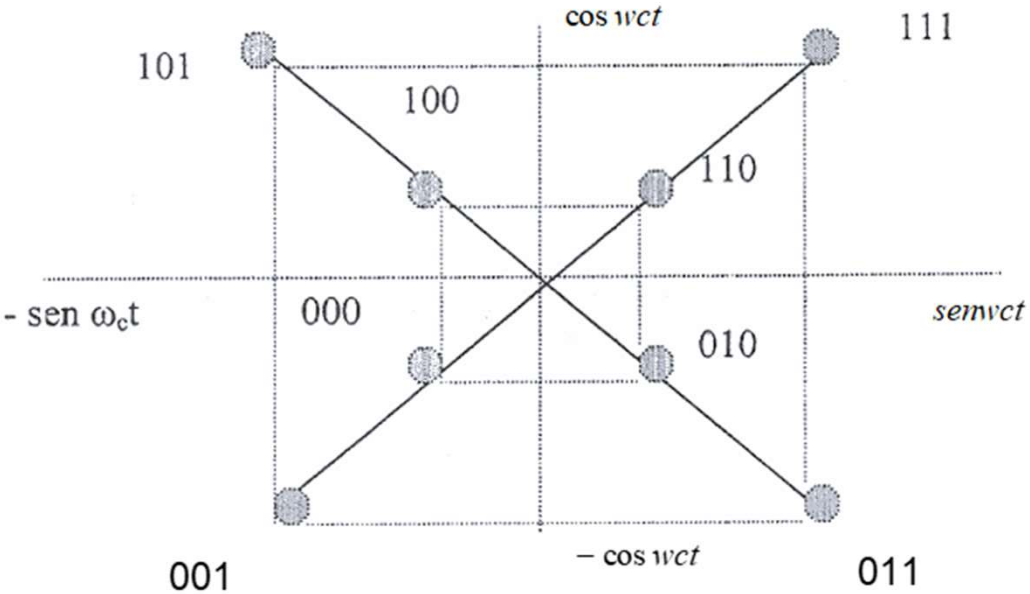
8PSK



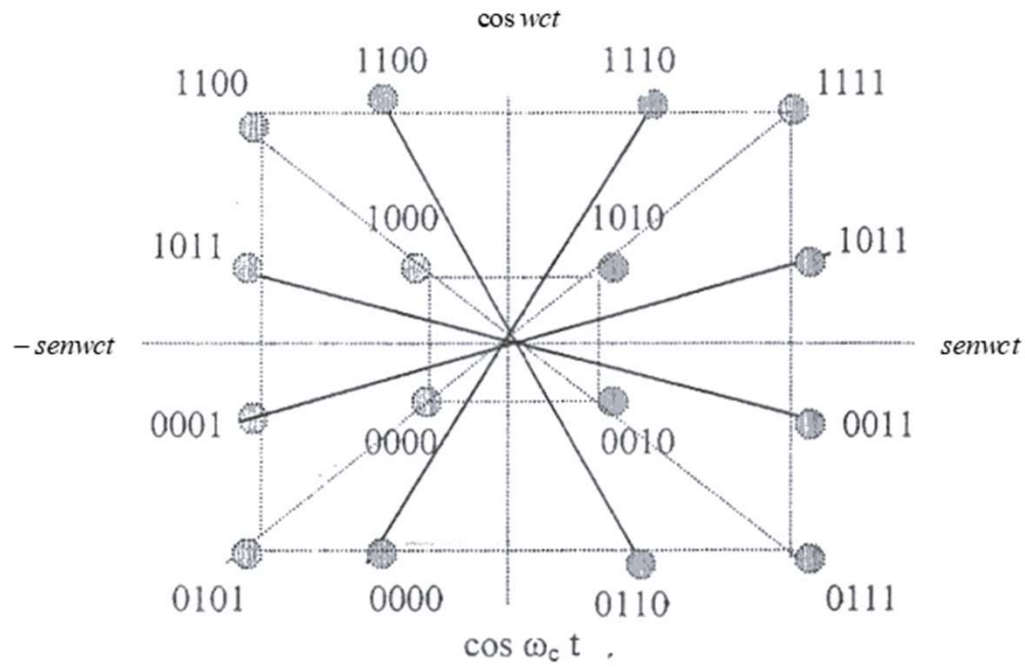
16PSK



8QAM



16QAM



Potencia media

$$P_{med} = \sum P_i \cdot p_i$$

$$P_{med-normalizada} = \sum (A_i^2) / 2 \cdot p_i$$

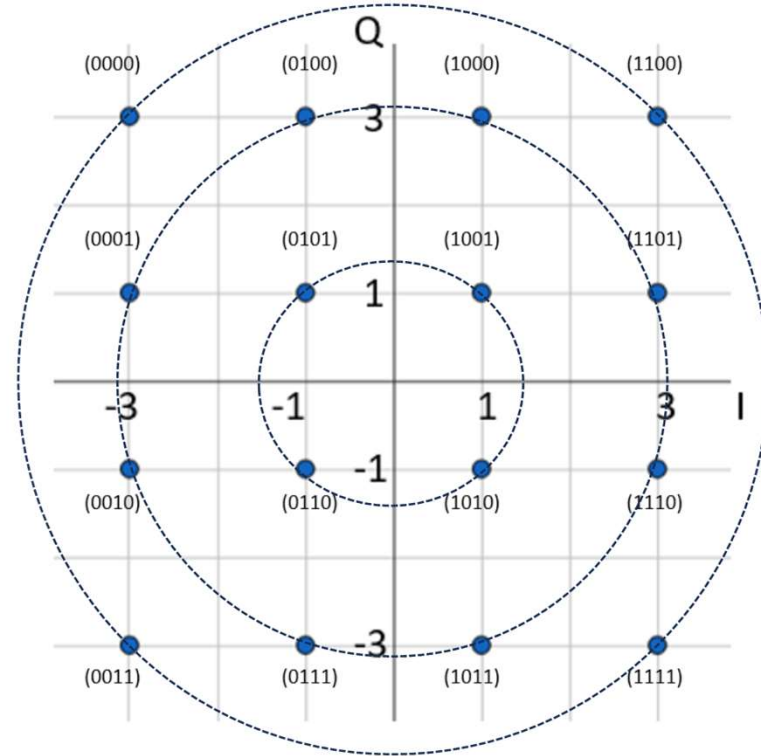
A1^2	1+1	2
A2^2	1+3^2	10
A3^2	3^2+3^2	18

$$P_{mtot} = \frac{4}{2 \cdot 16} A_1^2 + \frac{8}{2 \cdot 16} A_2^2 + \frac{4}{2 \cdot 16} A_3^2$$

$$P_{mtot} = \frac{A_1^2}{8} + \frac{A_2^2}{4} + \frac{A_3^2}{8}$$

$$P_{mtot} = 0.25 + 2.5 + 4.5$$

$$P_{mtot} = 7.25$$



Modulador mQAM/mPSK Generalizado

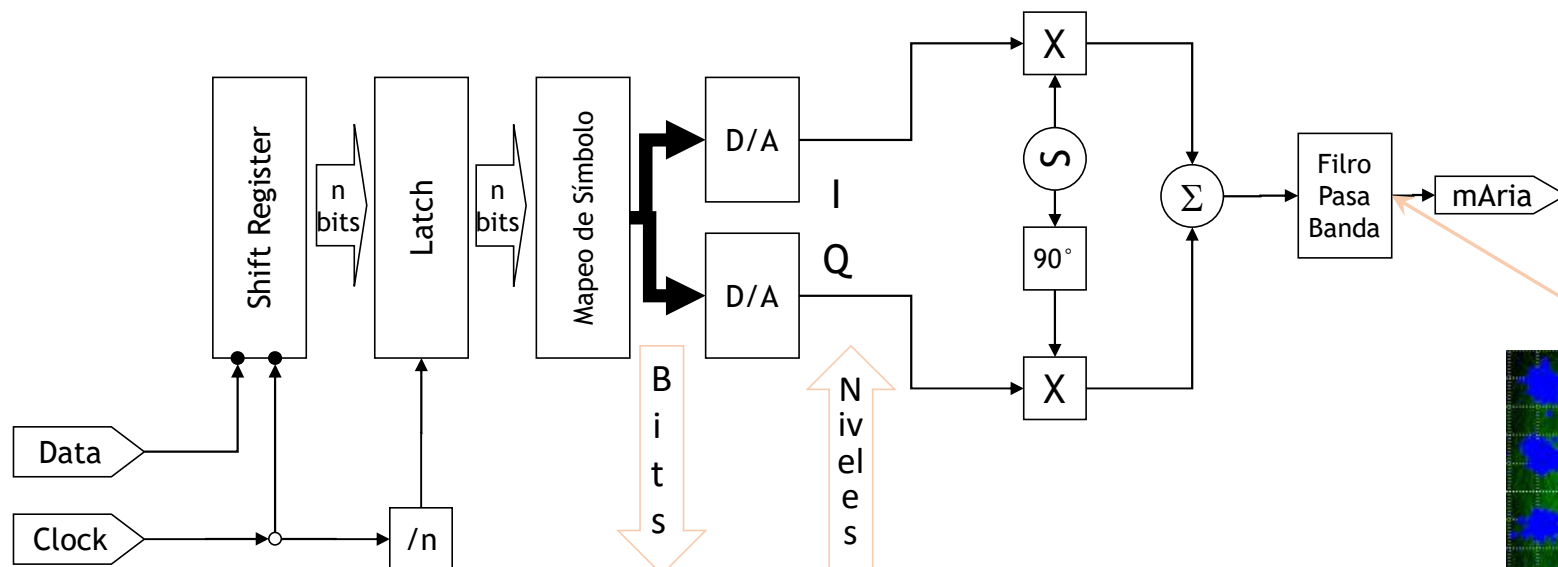
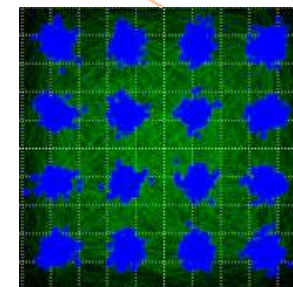


Tabla de Conversión Tx									
Bits de Símbolo							Intesidades		
b1	b2	b3	...	bi	...	bn	I	Q	
0	0	0	...	0	...	0	x1 V	y1 V	
0	0	0	...	0	...	1	x2 V	y2 V	
.	
.	
.	
1	1	1	...	1	...	1	xm V	ym V	



Demodulador mQAM/mPSK Generalizado

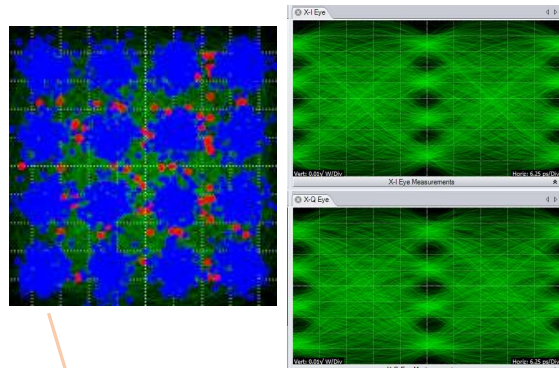
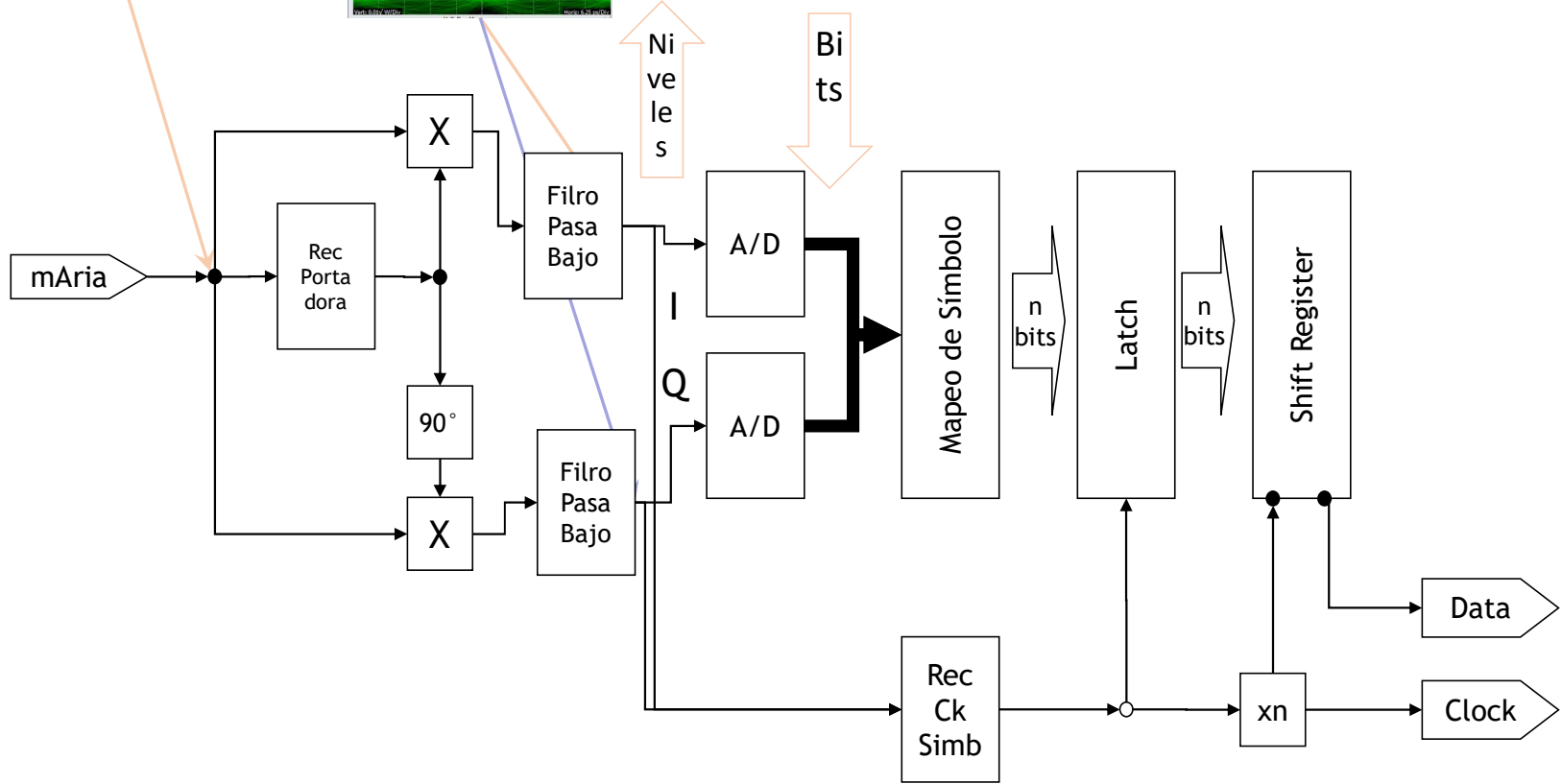


Tabla de Conversión Rx								
Intensidades		Bits de Símbolo						
I	Q	b1	b2	b3	...	bi	...	bn
x1 V	y1 V	0	0	0		0		0
x2 V	y2 V	0	0	0		0		1
.
.
.
.
xm V	ym V	1	1	1	...	1	...	1



Niveles
Bits

BW m-arias

$$Bw_{m-aria} = 2 \cdot \frac{R}{2n} \cdot (1 + \varphi)$$

Comparación de BW y Eficiencia de la Modulación Digital

MODULACIÓN	CODIFICACION	BW en Hz	EFICIENCIA de BW Bits/Hz
FSK	BIT UNICO	$>F_s$	1
BPSK	BIT UNICO	F_s	1
QPSK	DIBIT	$F_b/2$	2
8 PSK	TRIBIT	$F_b/3$	3
8 QAM	TRIBIT	$F_b/3$	3
16 PSK	QUADBIT	$F_b/4$	4
16 QAM	QUADBIT	$F_b/4$	4