

**Maestría en
Sistemas Embebidos**

Sistemas Digitales
para las
Comunicaciones



Capa física

Esquemas de modulación y sincronización.

Cronograma

- Clase 0
- Clase 1
- Clase 2
- Clase 3
- Clase 4
- Clase 5
- Clase 6
- Clase 7
- Clase 8

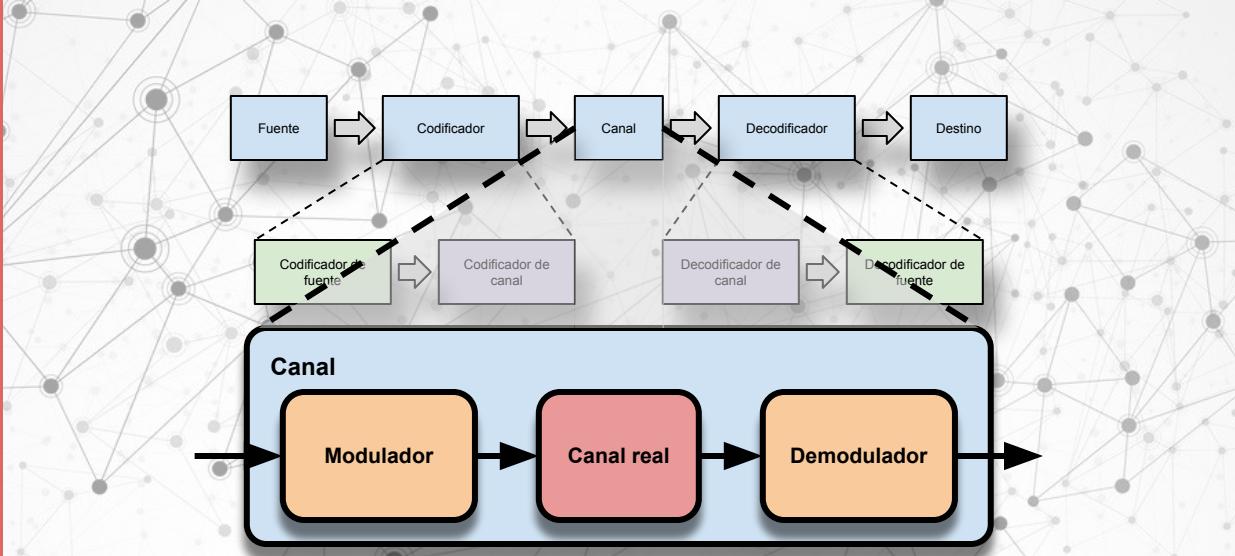
Clase 2: Capa Física: Esquemas de modulación y sincronización.

- Canal:
 - Canal real, características y modelos de canal.
- Esquemas de modulación digital.
 - Banda base y banda pasante.
 - Interferencia inter-símbolo.
- Demodulador:
 - Filtro adaptado y muestreo.
 - Ecualización.
 - Sincronización de portadora y de símbolo.
- Modelo equivalente de banda base.
- Conversión analógica-digital y digital-analógica.
- Sistemas sincrónicos y asincrónicos

Canales:

- **Canal real**

- Ejemplos
- Características
- Modelos

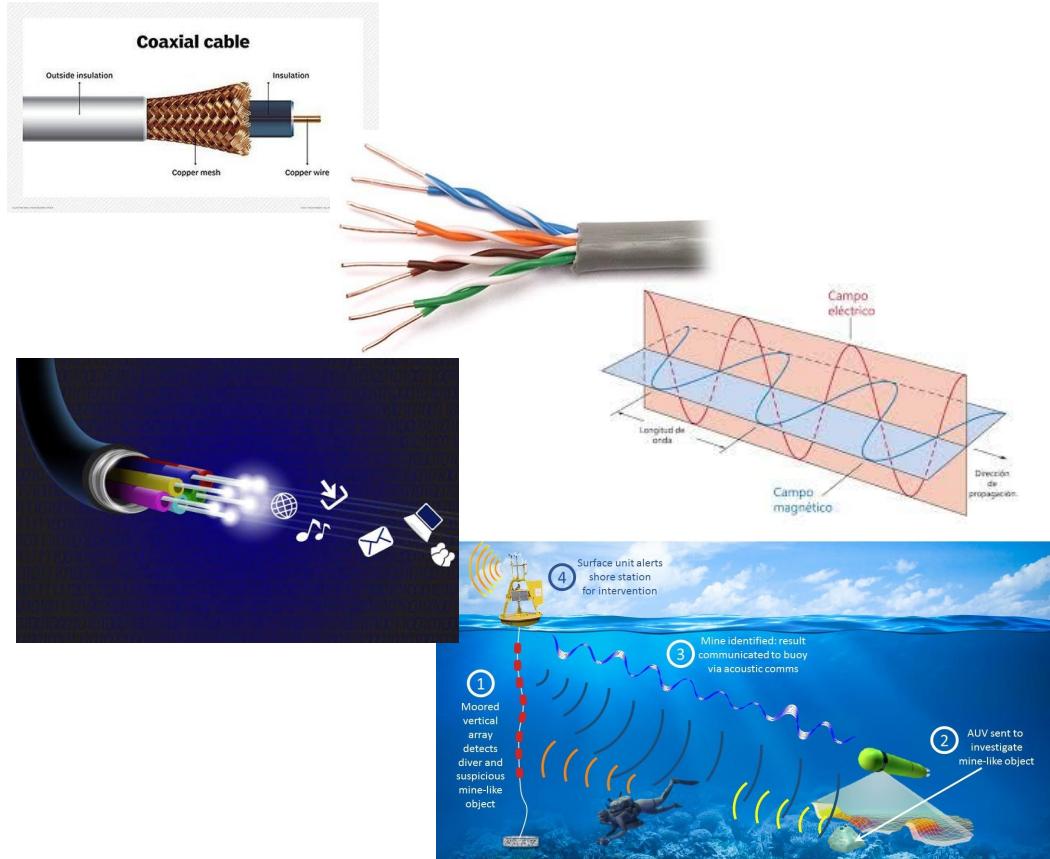


Canales

Ejemplos

Los canales pueden clasificarse en:

- Cableados
- Ópticos
 - Fibra óptica
 - En el espacio
- Inalámbricos (Electro-magnéticos)
- Acústicos
 - Acuáticos
 - En el aire
- Dispositivos de almacenamiento



Canales

Características y modelos

Para caracterizar los canales
matemáticamente consideramos:

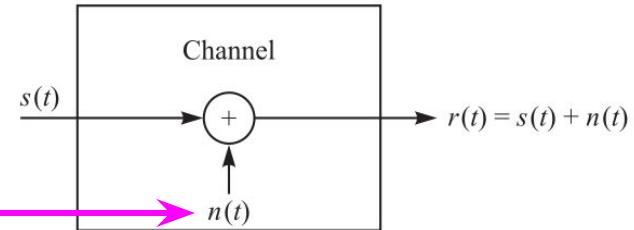
- Ruido

Canales

Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

- Ruido

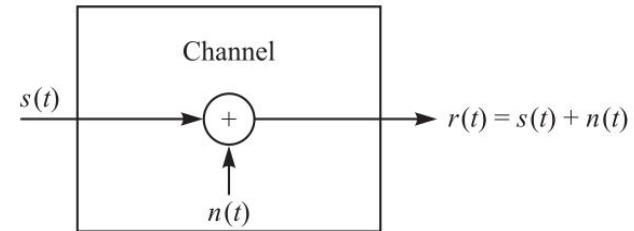


Canales

Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

- Ruido
- Respuesta en frecuencia
- Atenuación

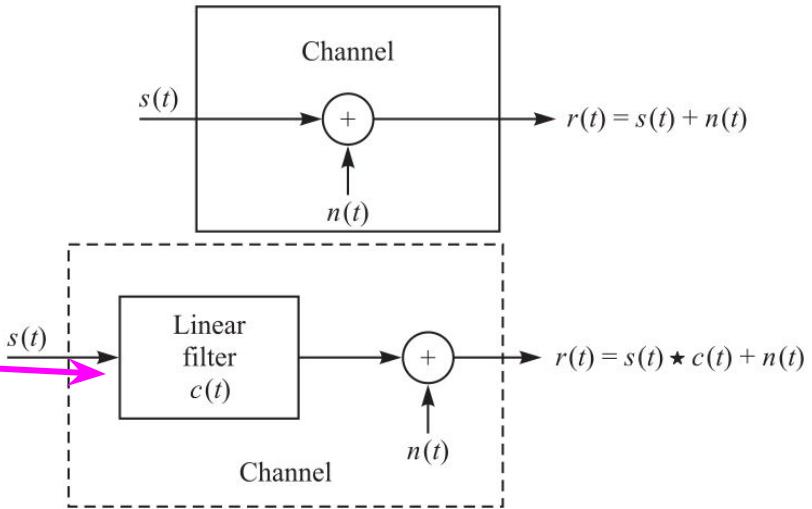


Canales

Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

- Ruido
- Respuesta en frecuencia
- Atenuación

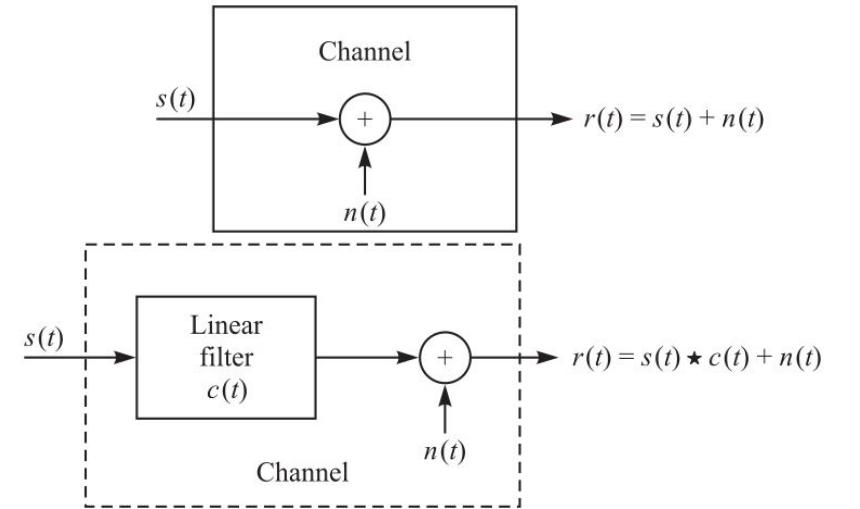


Canales

Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

- Ruido
- Respuesta en frecuencia
- Atenuación
- Dinámica



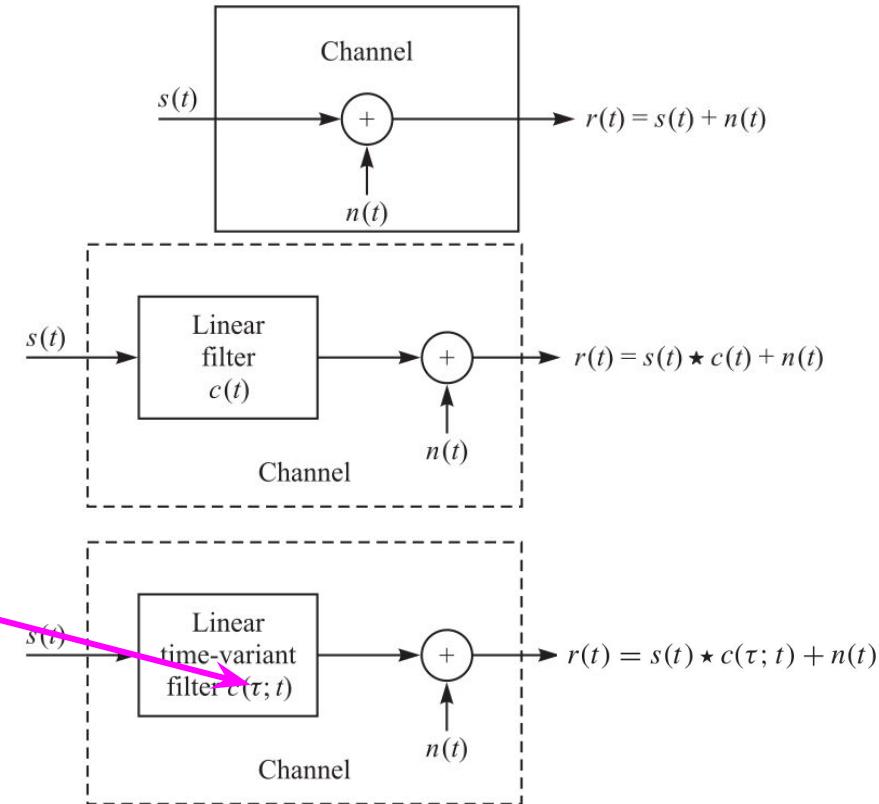
$$r(t) = s(t) \star c(\tau; t) + n(t)$$

Canales

Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

- Ruido
- Respuesta en frecuencia
- Atenuación
- Dinámica

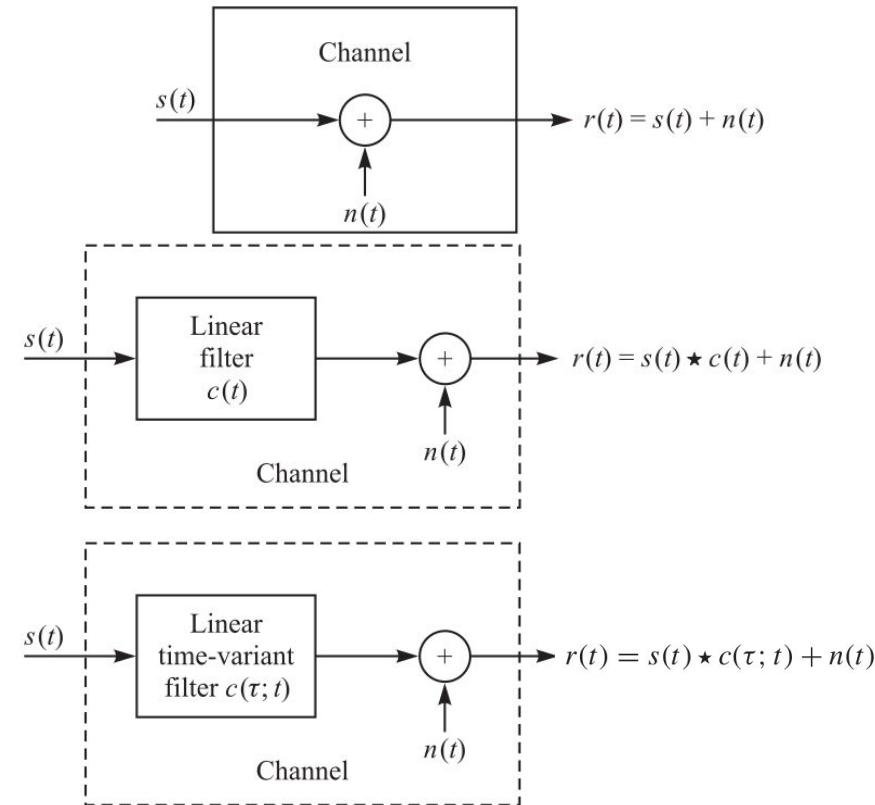


Canales

Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

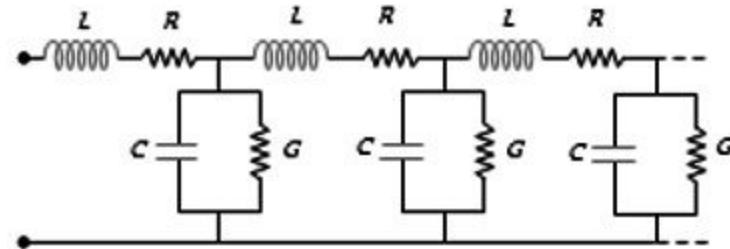
- Ruido
- Respuesta en frecuencia
- Atenuación
- Dinámica
- Memoria
- Efectos no lineales



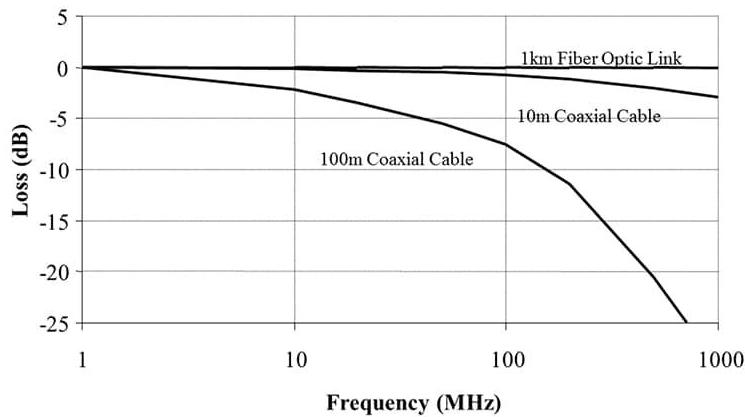
Canales

Características y modelos

Respuesta en frecuencia:



Loss v Frequency Comparison for Fiber & Coaxial Cable



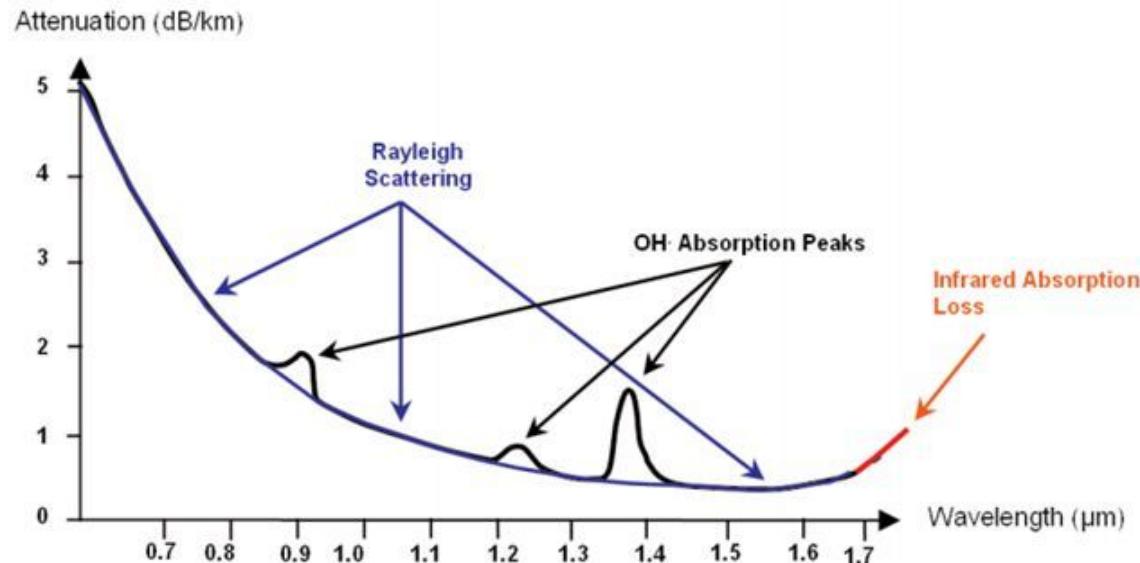
	Frequency Range	Typical Attenuation	Typical Delay	Repeater Spacing
Twisted pair (with loading)	0 to 3.5 kHz	0.2 dB/km @ 1 kHz	50 μ s/km	2 km
Twisted pairs (multi-pair cables)	0 to 1 MHz	0.7 dB/km @ 1 kHz	5 μ s/km	2 km
Coaxial cable	0 to 500 MHz	7 dB/km @ 10 MHz	4 μ s/km	1 to 9 km
Optical fiber	186 to 370 THz	0.2 to 0.5 dB/km	5 μ s/km	40 km

Canales

Características y modelos

Respuesta en frecuencia:

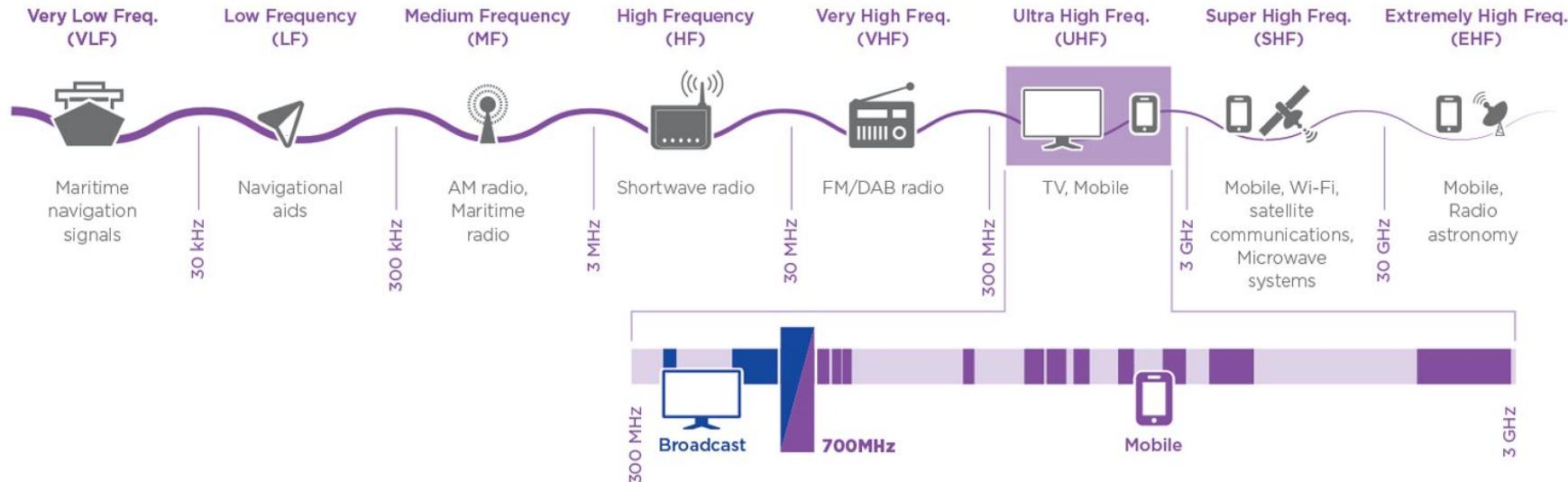
Ejemplo para fibra óptica



Canales

Características y modelos

Espectro de radio:

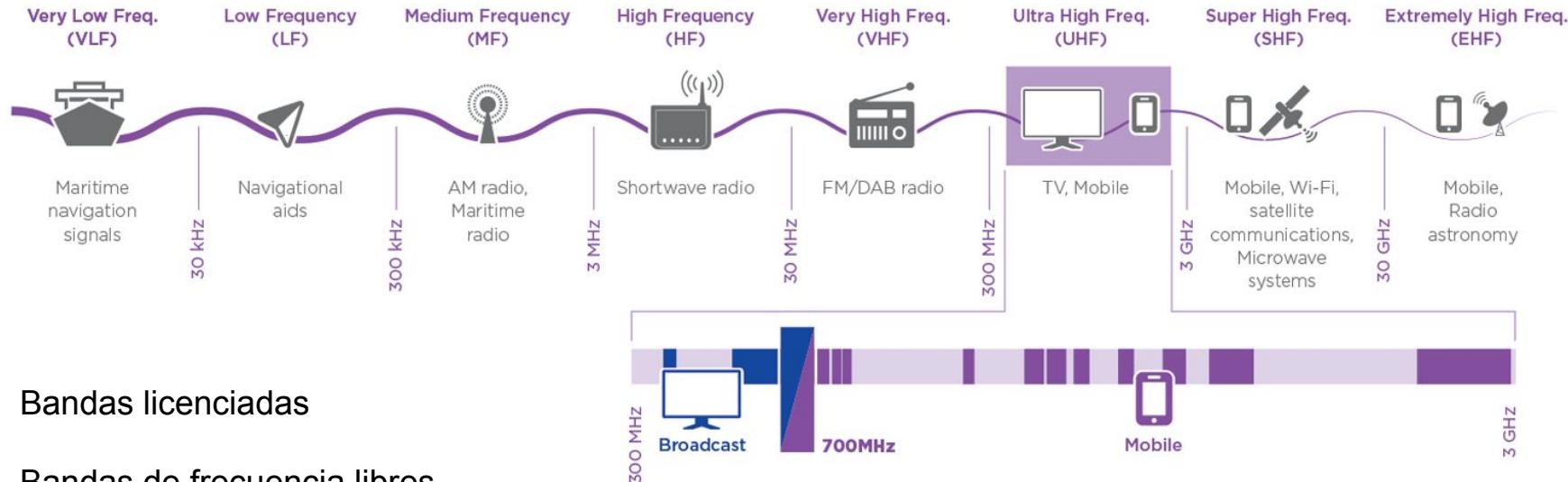


The UHF band (470 to 862 MHz) is critical to the delivery of broadcast services, and is the only frequency range that can be used for TV broadcasting. Parts of the UHF band have already been freed up for mobile use, and there is increasing pressure from mobile operators to open the 700MHz band.

Canales

Características y modelos

Espectro de radio:



Bandas licenciadas

Bandas de frecuencia libres

The UHF band (470 to 862 MHz) is critical to the delivery of broadcast services, and is the only frequency range that can be used for TV broadcasting. Parts of the UHF band have already been freed up for mobile use, and there is increasing pressure from mobile operators to open the 700MHz band.

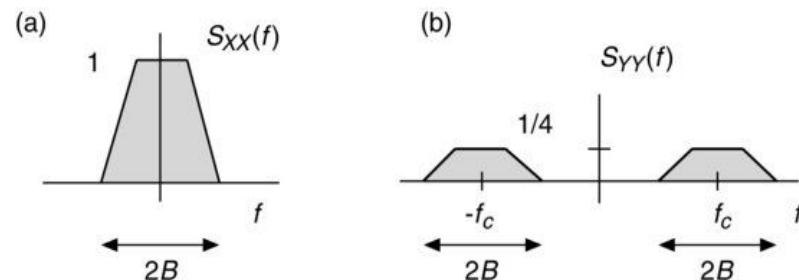
Canales

Características y modelos

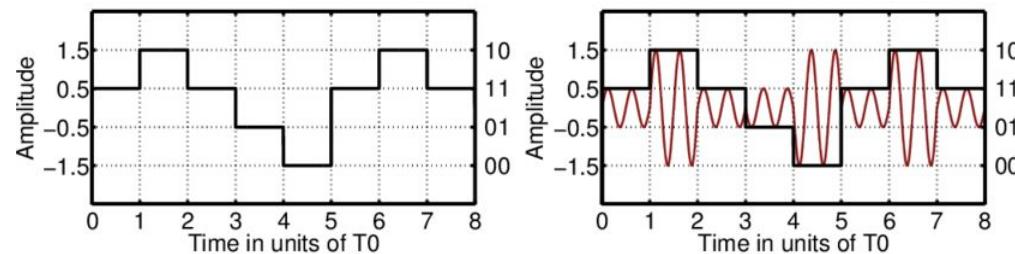
O bien por la respuesta en frecuencia u alguna otra necesidad en ocasiones se debe transmitir en un rango determinado de frecuencias.

Hay dos grandes grupos de canales:

- **Pasa bajos (a)**
- **Banda pasante (b)**

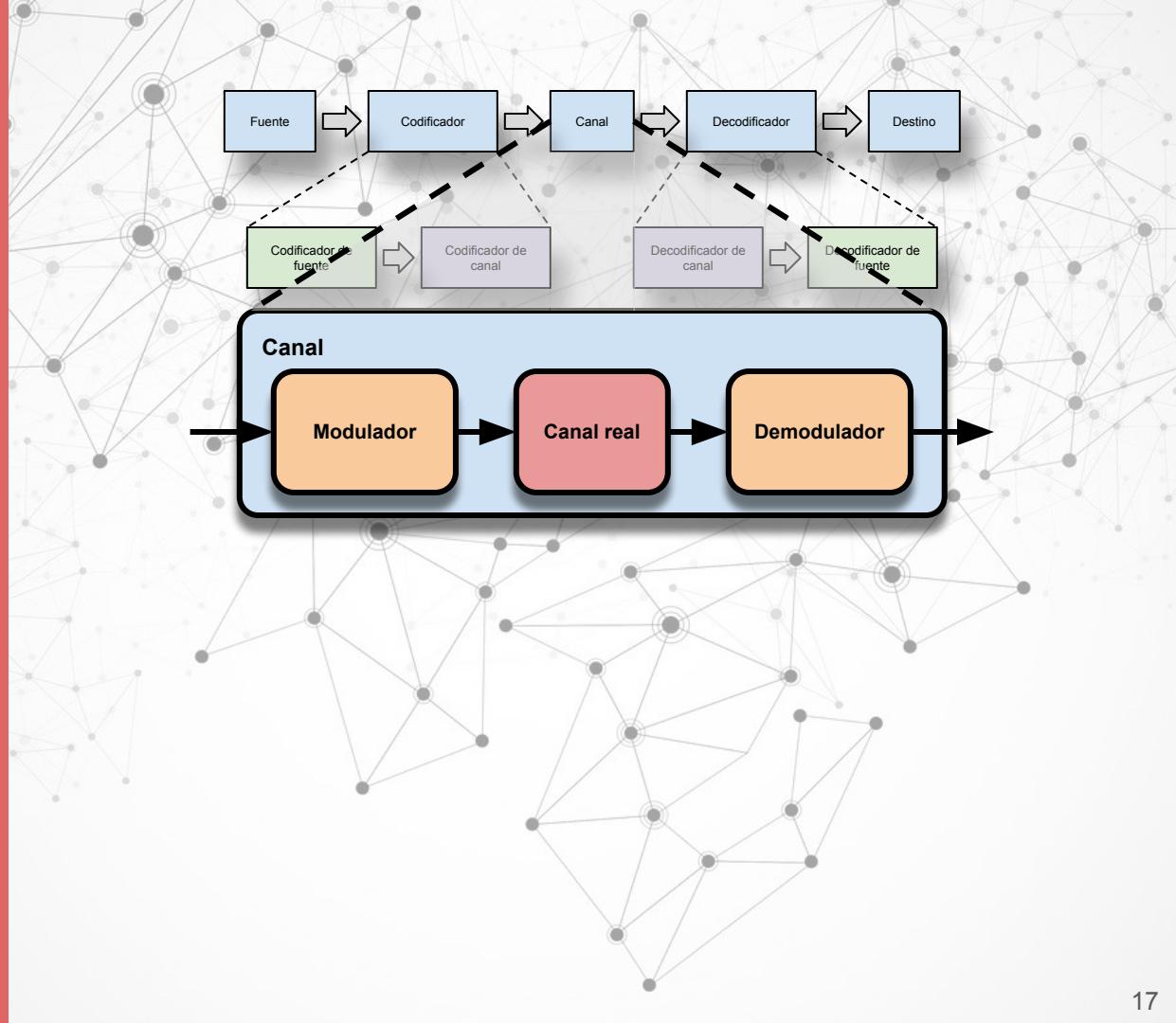


Esto afecta al modulador y demodulador.



Esquemas de modulación digital:

- Objetivos
- Modulador
 - Ejemplos
 - Más ejemplo
- Interferencia ISI
 - ISI
 - Criterio de Nyquist
 - Filtros para pulse shaping
- Resumen



Esquemas de modulación digital

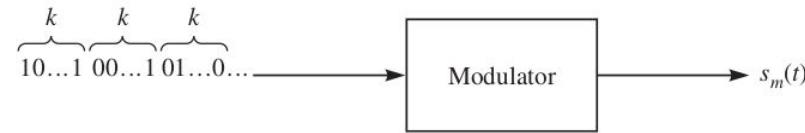
Objetivos

Objetivos:

Transformar una **secuencia de bits** en señales temporales continuas que sean **aptas para atravesar el canal.**

La modulación puede tener o no **memoria**.

En el ejemplo de la figura se ven que el modulador toma **k bits** y los transforma en una de **las 2^k señales posibles**.



Parámetros del modulador:

$M = 2^k$: Mensajes posibles

T_s : Periodo de símbolo

$R_s = 1/T_s$: Tasa de símbolos

E_s : Energía prom. por simb.

$T_b = T_s/k$: "Periodo" de bit

$R_b = k R_s$: Tasa de bits

$E_b = E_s/k$: Energía prom. por bit

$P = E_b R$: Pot. media de transm.

Esquemas de modulación digital

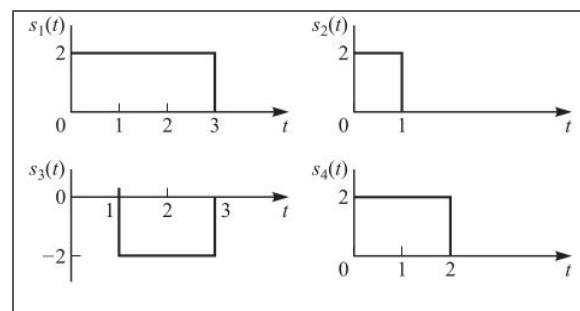
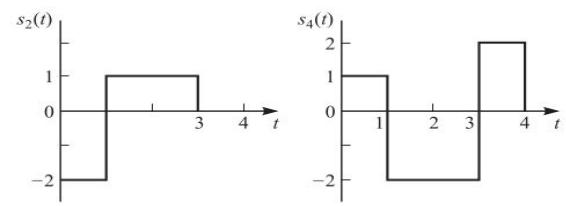
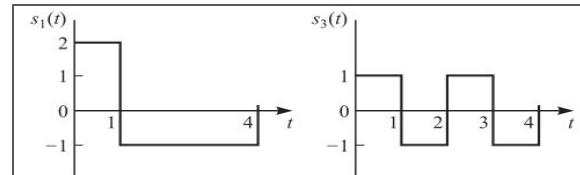
Objetivos

Objetivos:

Transformar una **secuencia de bits** en señales temporales continuas que sean **aptas para atravesar el canal.**

La modulación puede tener o no **memoria**.

En el ejemplo de la figura se ven que el modulador toma **k bits** y los transforma en una de **las 2^k señales posibles.**

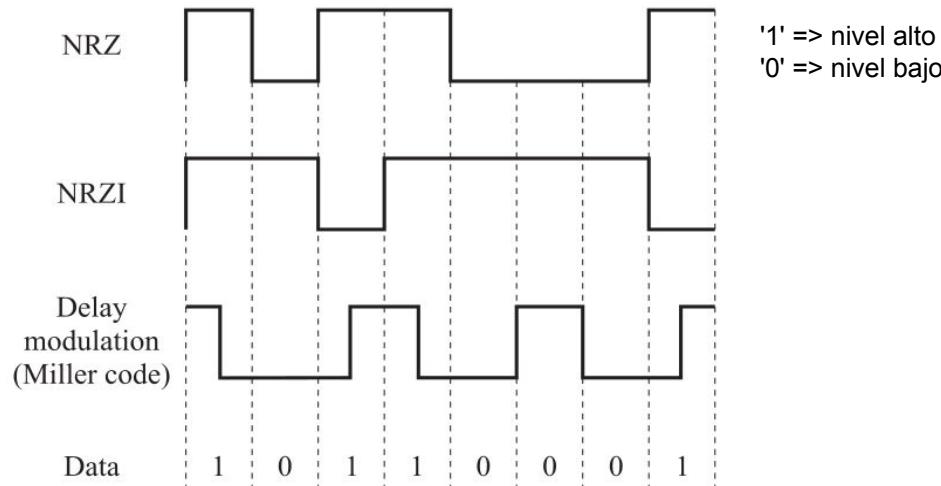
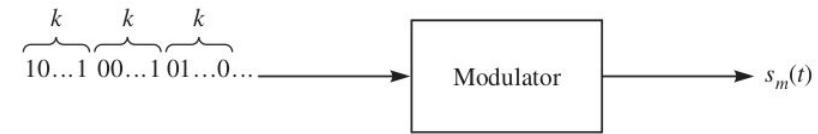


Esquemas de modulación digital

Modulador

Ejemplo:

Modulación con y sin memoria en banda base.

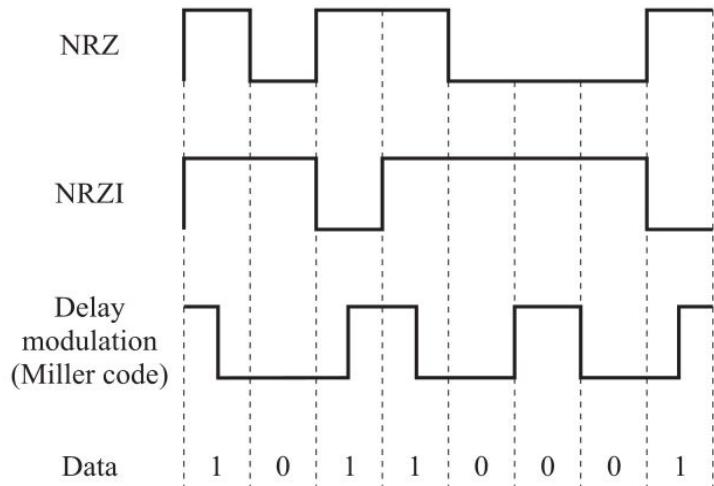
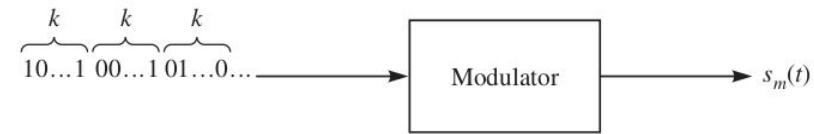


Esquemas de modulación digital

Modulador

Ejemplo:

Modulación con y sin memoria en banda base.



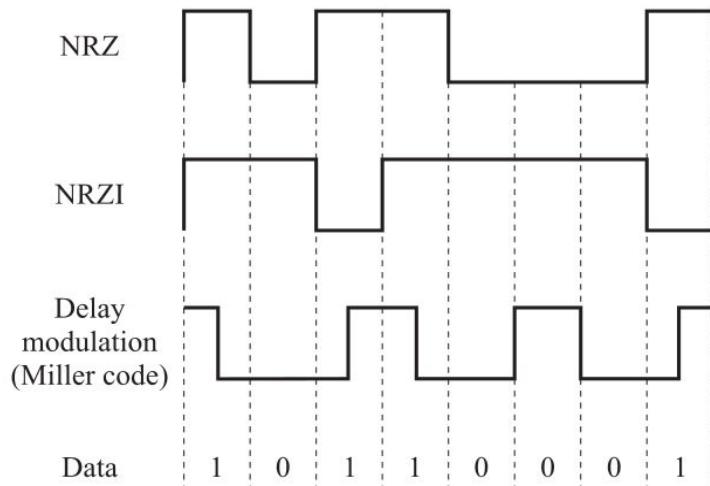
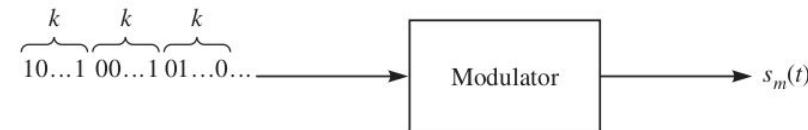
Distinto al anterior => '1', sino '0'.

Esquemas de modulación digital

Modulador

Ejemplo:

Modulación con y sin memoria en banda base.



Las reglas del código de Miller:

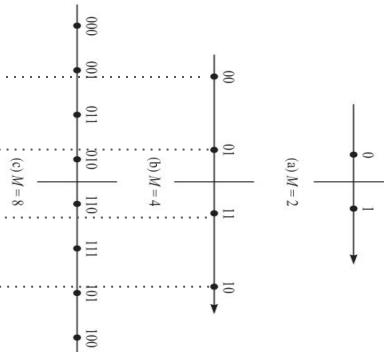
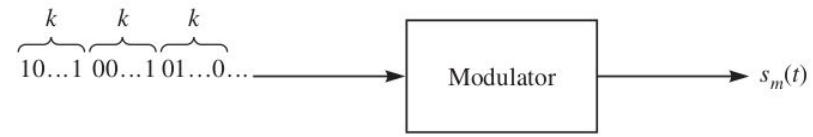
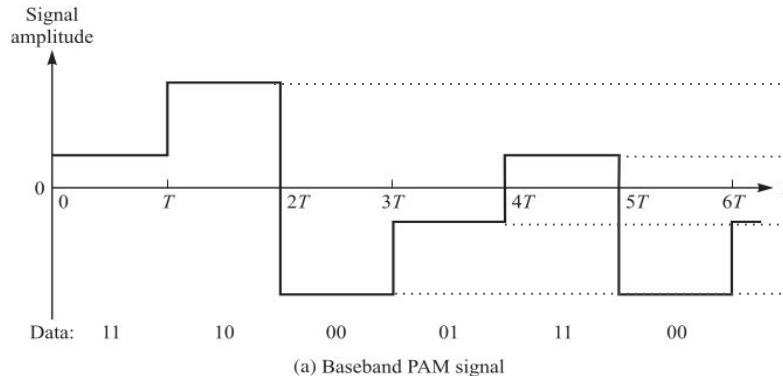
- '0' y anterior '1' => no invertir la señal.
- '0' y anterior '0' => invertir la señal en el borde del símbolo.
- '1' => invertir la señal en la mitad del símbolo.

Ahorra ancho de banda.

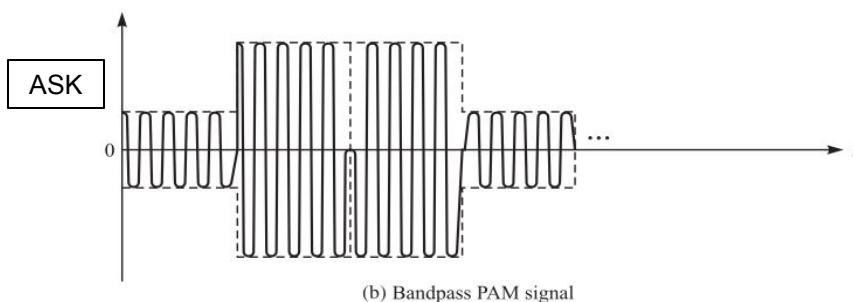
Esquemas de modulación digital

Modulador

Modulación de amplitud de pulsos (PAM):



$M=8$ $M=4$ $M=2$

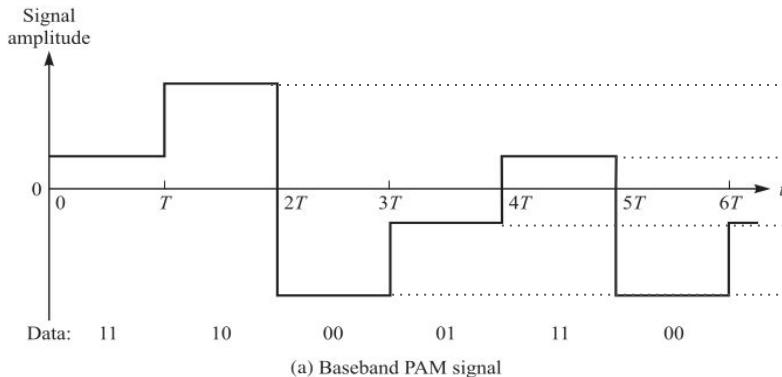


- a) Banda base (pulso constante)
- b) Banda pasante (pulso senoidal)

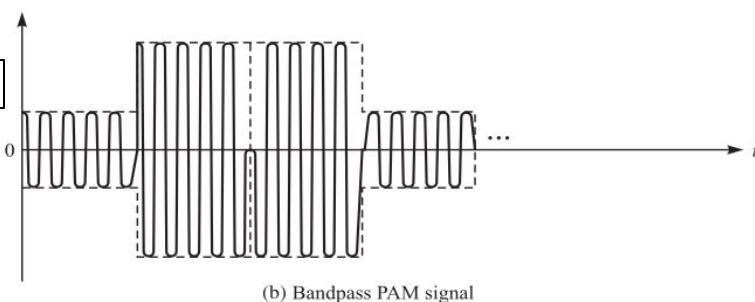
Esquemas de modulación digital

Modulador

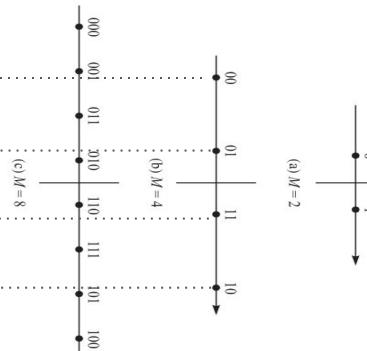
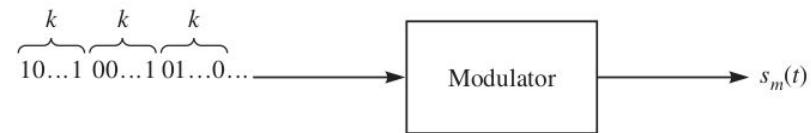
Modulación de amplitud de pulsos (PAM):



(a) Baseband PAM signal



(b) Bandpass PAM signal



M=8 M=4 M=2

Constelación

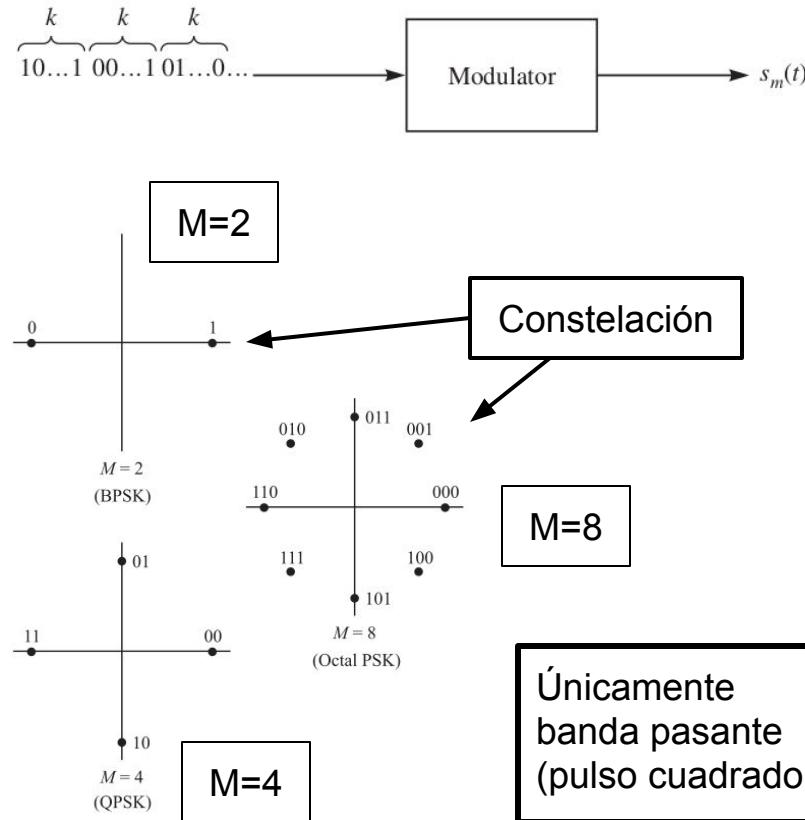
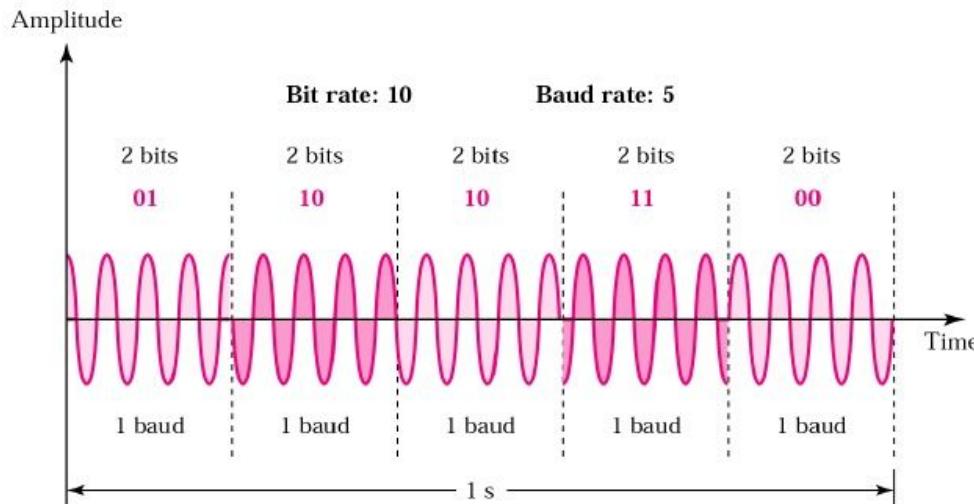
La misma para BB y
BP.

- a) Banda base (pulso constante)
- b) Banda pasante (pulso senoidal)

Esquemas de modulación digital

Modulador

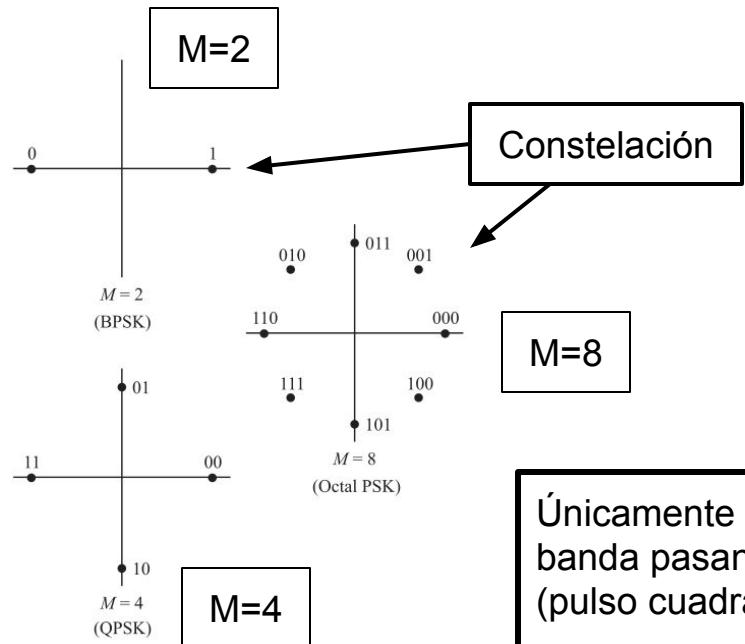
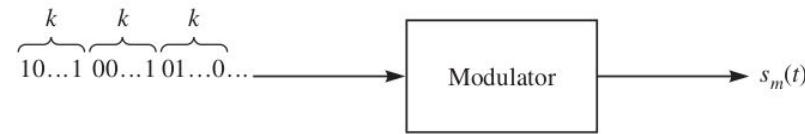
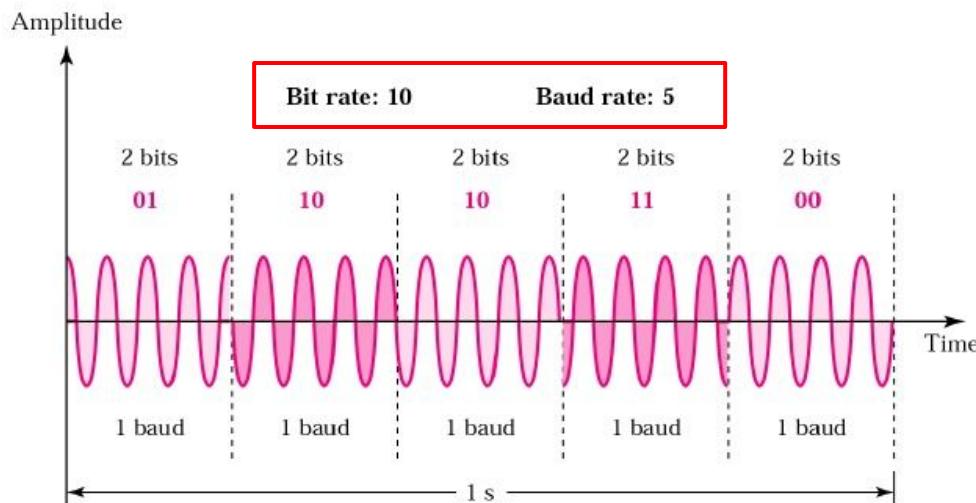
Modulación de fase (PSK):



Esquemas de modulación digital

Modulador

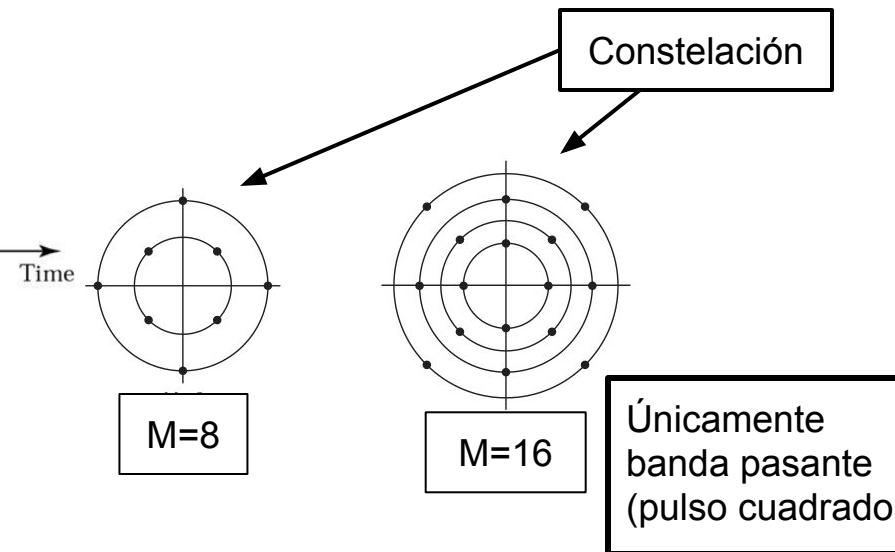
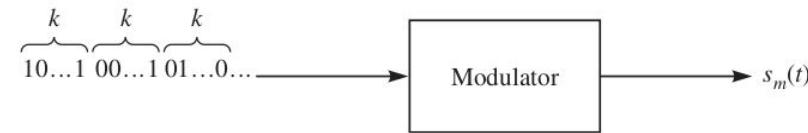
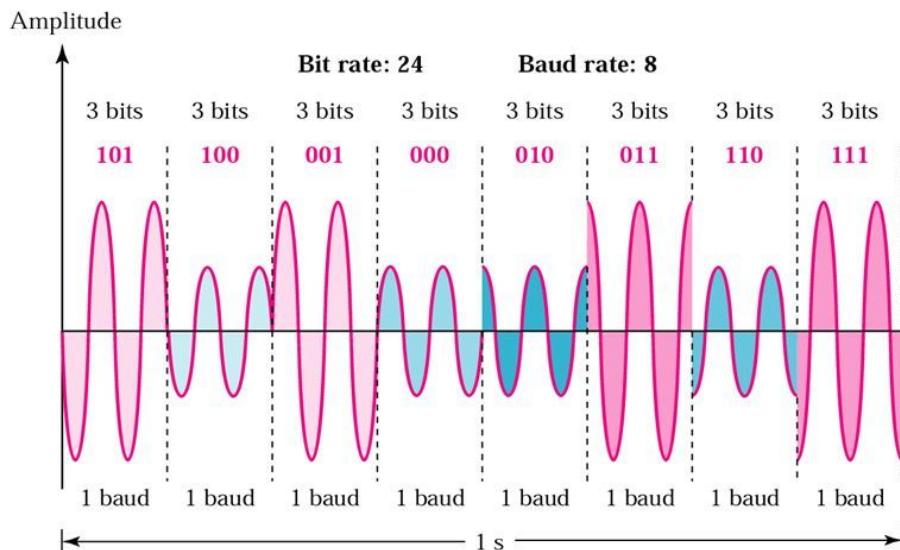
Modulación de fase (PSK):



Esquemas de modulación digital

Modulador

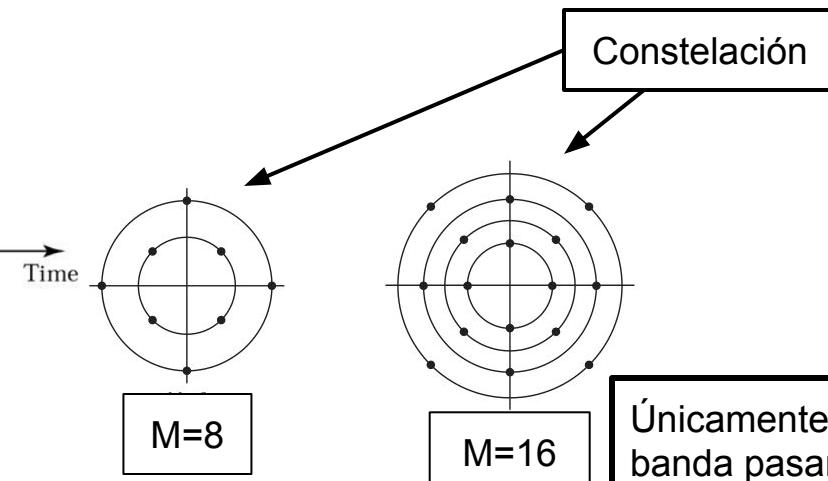
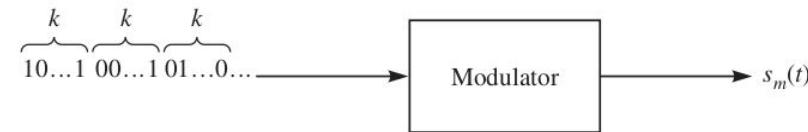
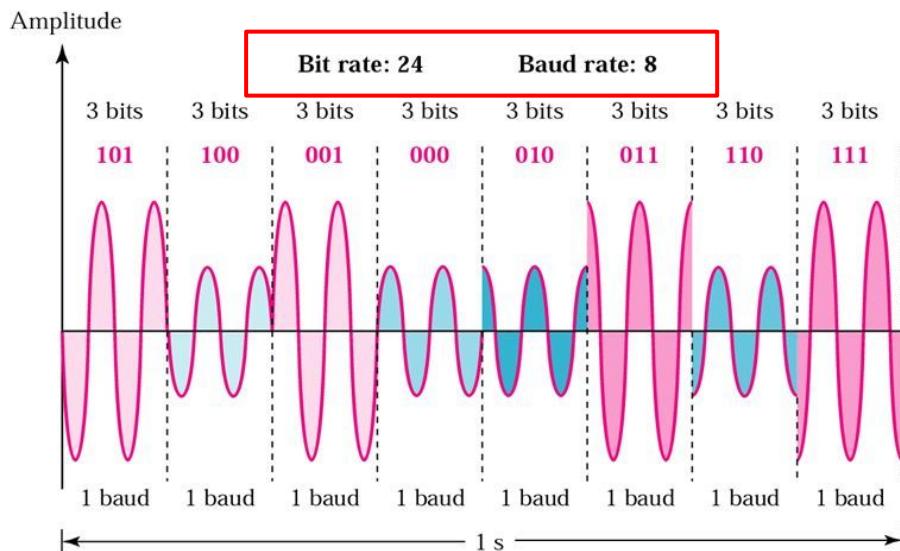
Modulación de fase y amplitud (APSK):



Esquemas de modulación digital

Modulador

Modulación de fase y amplitud (APSK):



Únicamente
banda pasante
(pulso cuadrado)

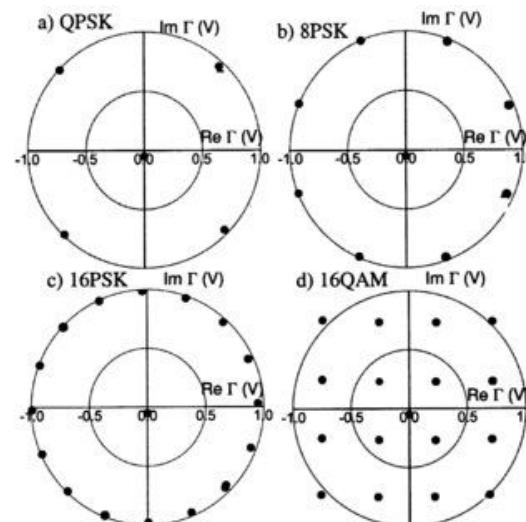
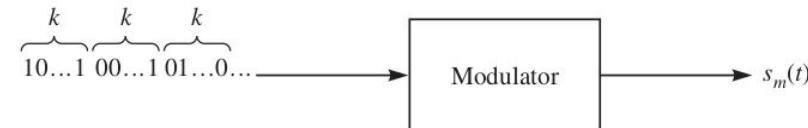
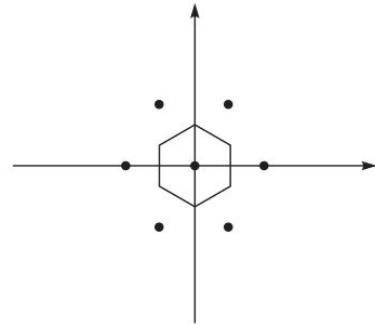
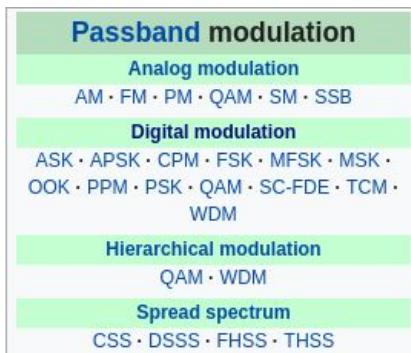
Esquemas de modulación digital

Modulador

Otros ejemplos:

Existen mucho esquemas de modulación digital diferentes, cada uno con ventajas y desventajas.

La idea de fondo es siempre la misma **mapear k bits en 2^k señales temporales distintas.**

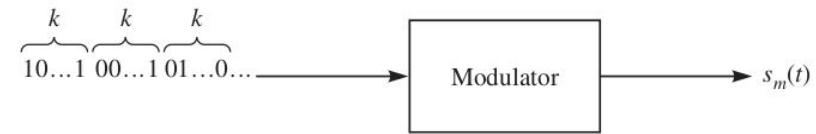


Esquemas de modulación digital

Modulador

Otros ejemplos:

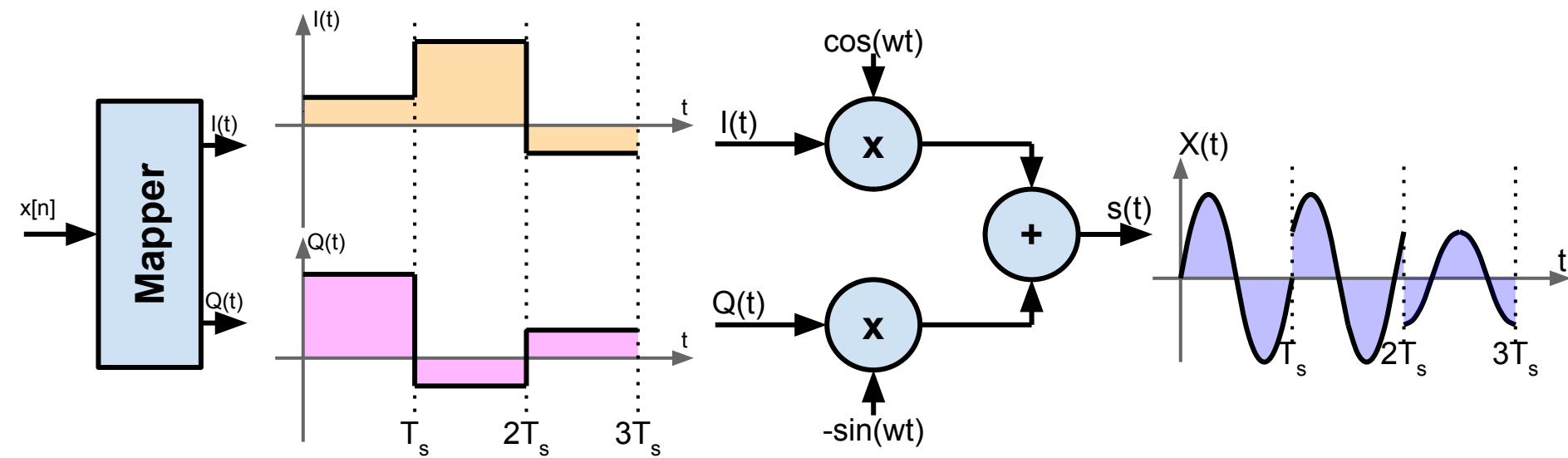
- Spread Spectrum: Se utiliza para comunicaciones de baja tasa de transferencia y poco presupuesto energético:
 - DSSS
 - FHSS
 - CSS (LoRa)
- OFDM: Se utiliza para sistemas de alta tasa de transferencia (WiFi, ADSL, ISDB-T, etc.)



Esquemas de modulación digital

Modulador

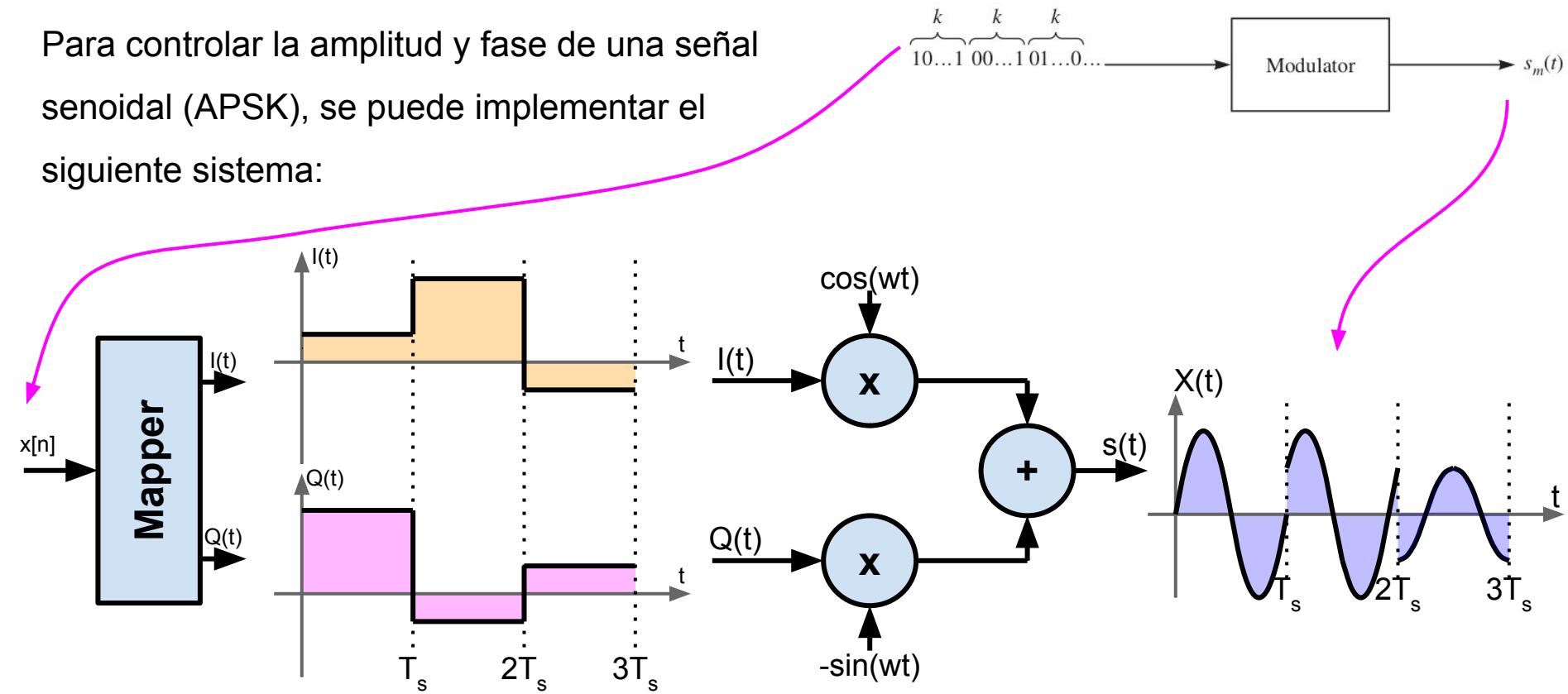
Para controlar la amplitud y fase de una señal senoidal (APSK), se puede implementar el siguiente sistema:



Esquemas de modulación digital

Modulador

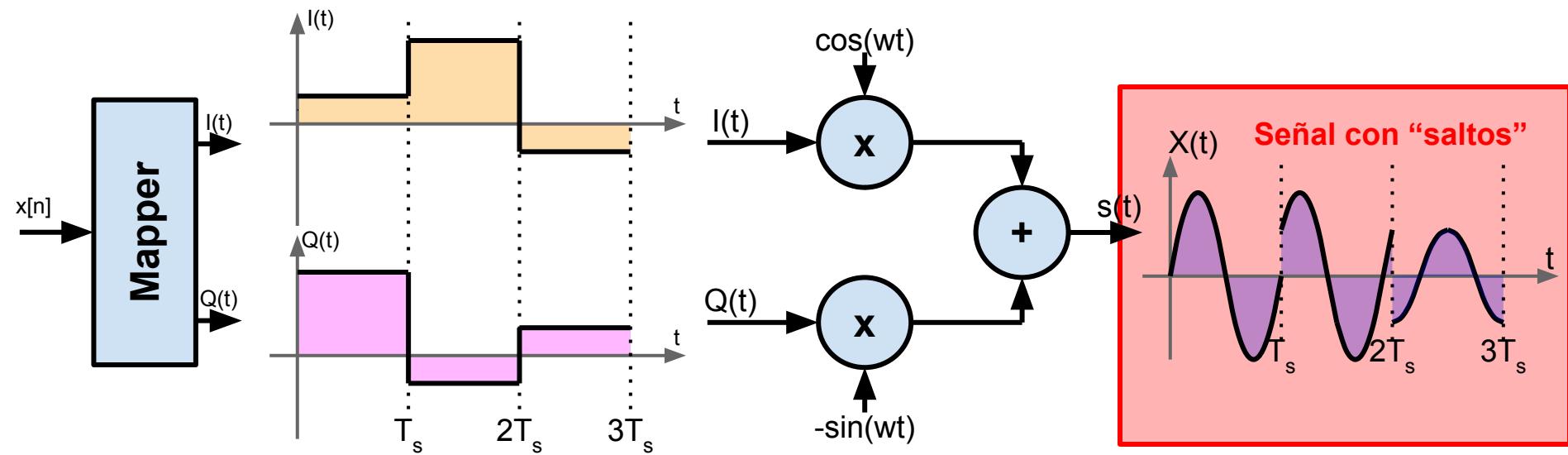
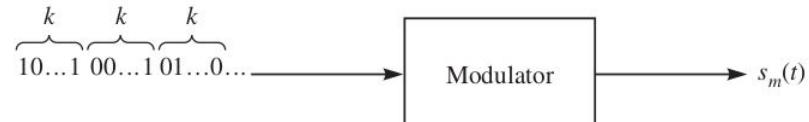
Para controlar la amplitud y fase de una señal senoidal (APSK), se puede implementar el siguiente sistema:



Esquemas de modulación digital

Modulador

Para controlar la amplitud y fase de una señal senoidal (APSK), se puede implementar el siguiente sistema:



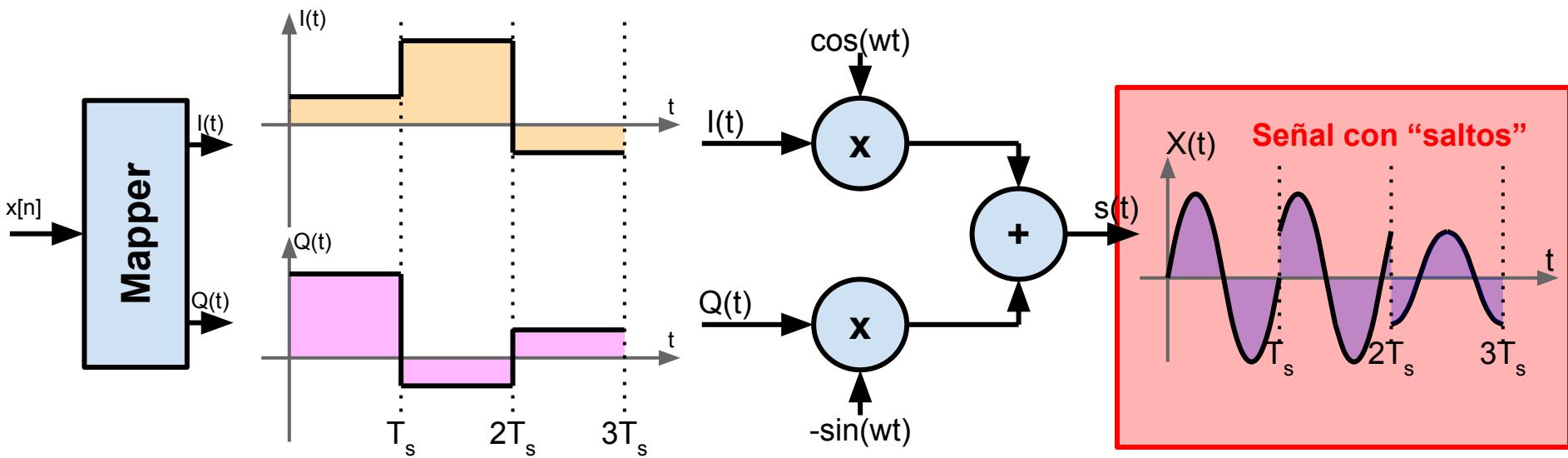
Esquemas de modulación digital

Modulador

Para controlar la amplitud de la señal senoidal (APSK), se propone el siguiente sistema:

¿Se puede mejorar?

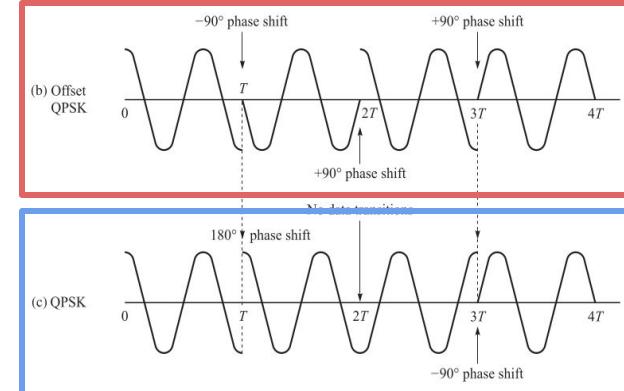
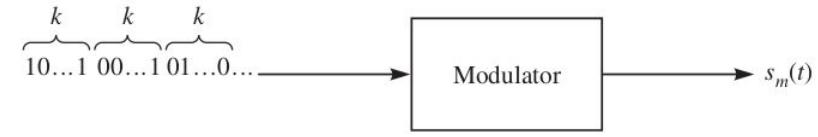
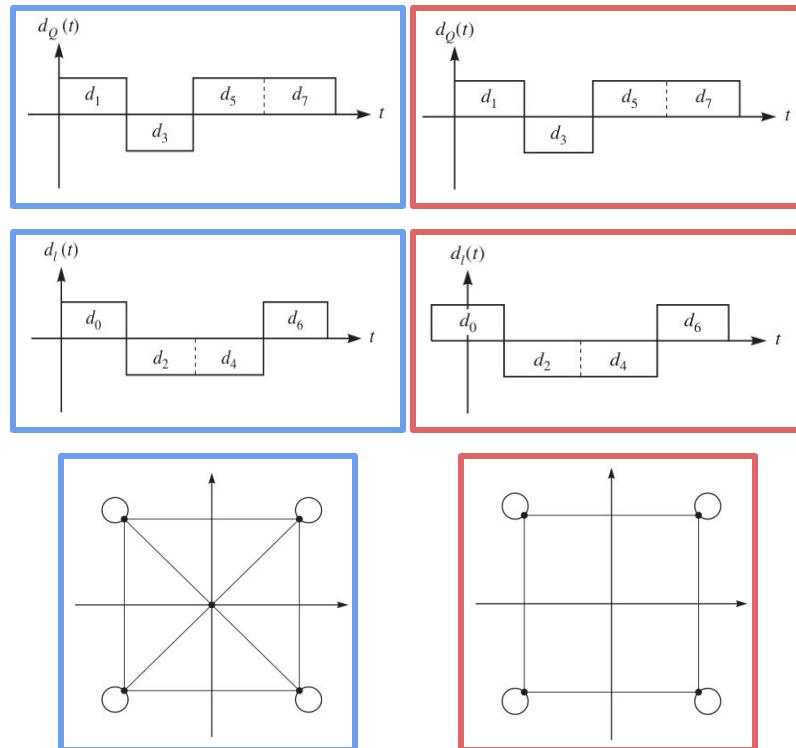
Modulator



Esquemas de modulación digital

Modulador

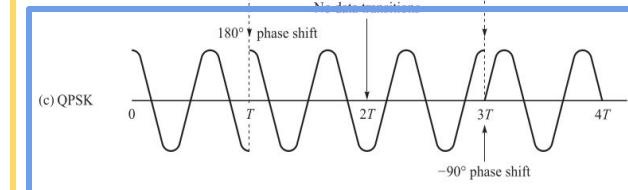
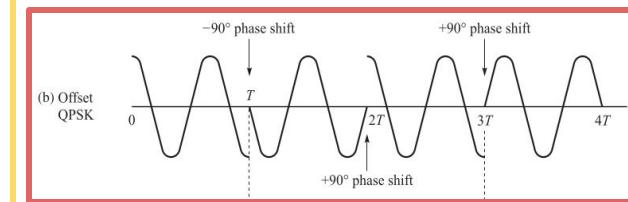
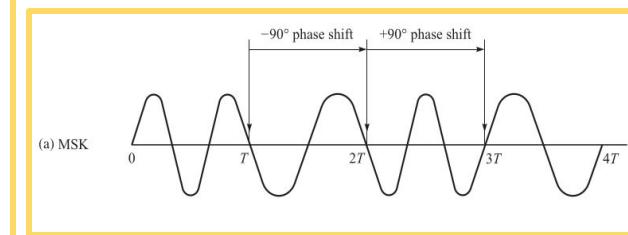
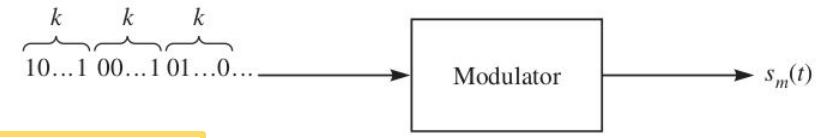
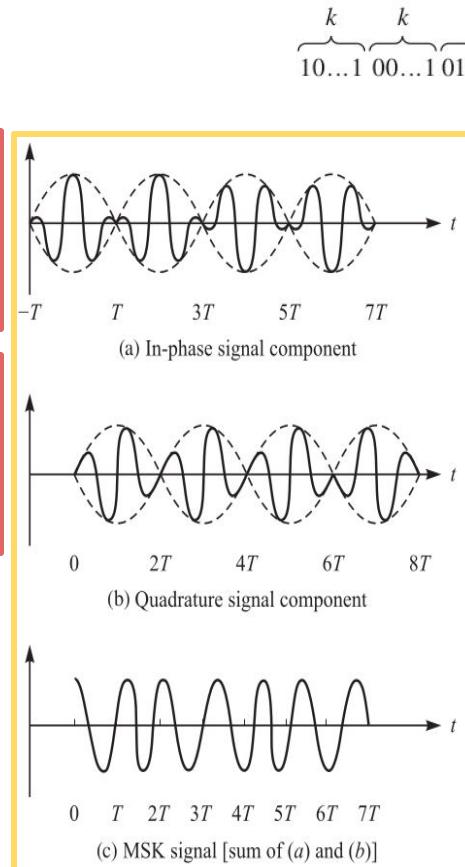
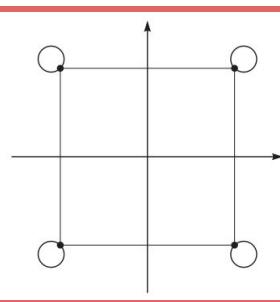
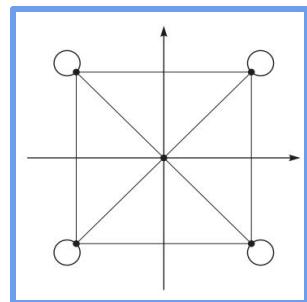
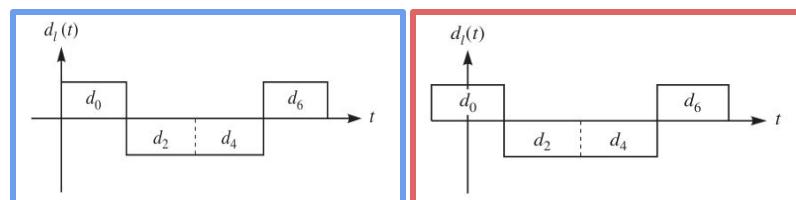
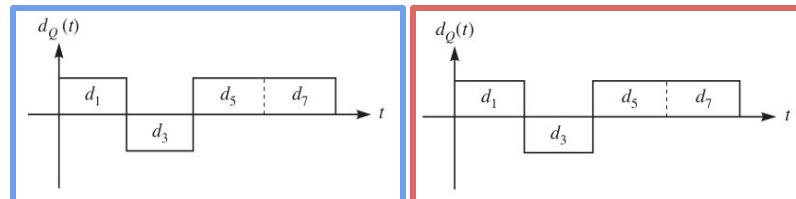
Ejemplo: QPSK, OQPSK y MSK



Esquemas de modulación digital

Modulador

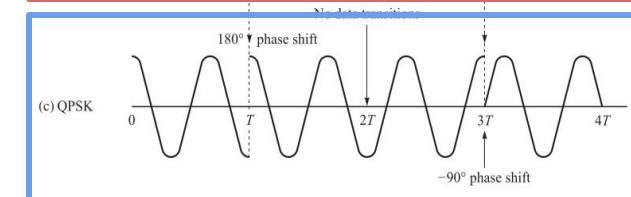
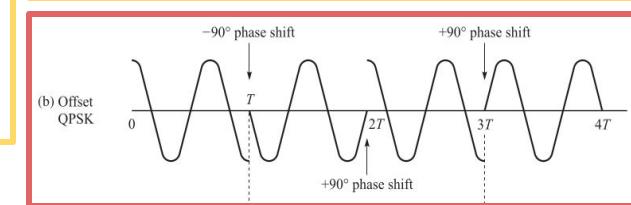
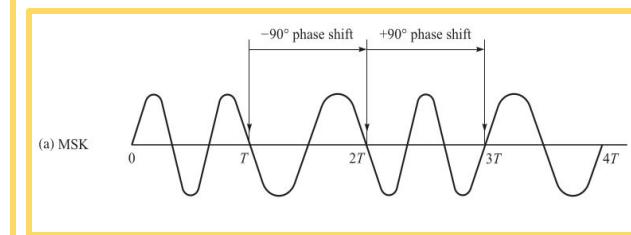
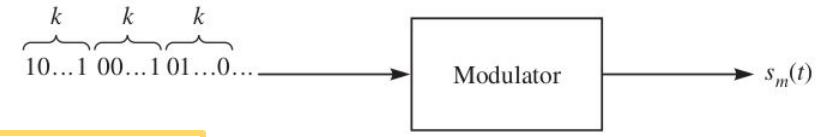
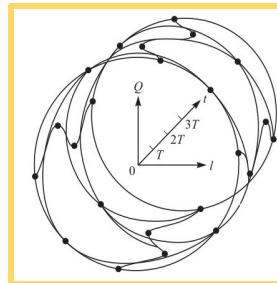
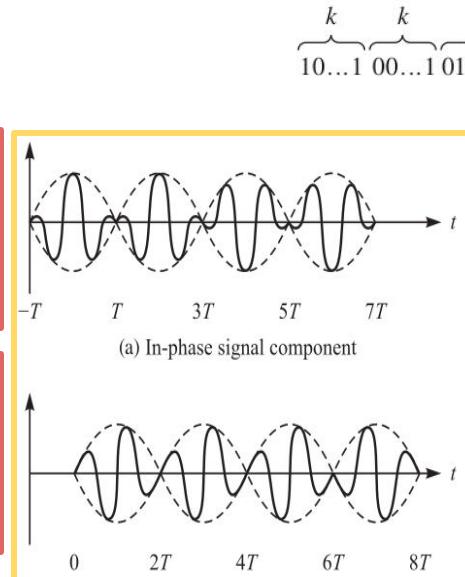
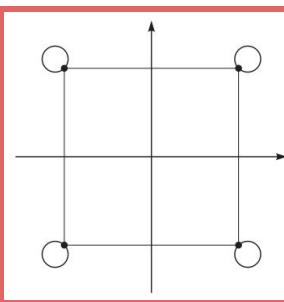
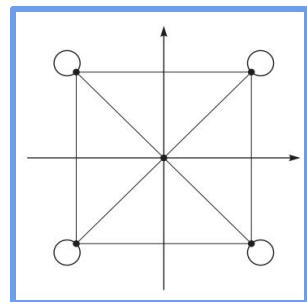
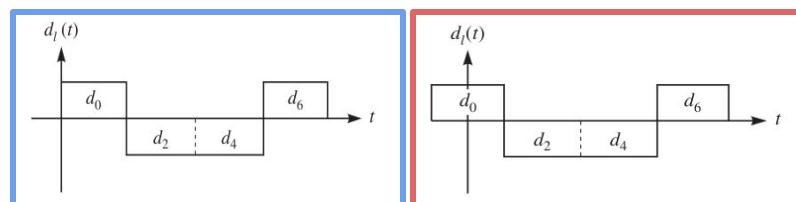
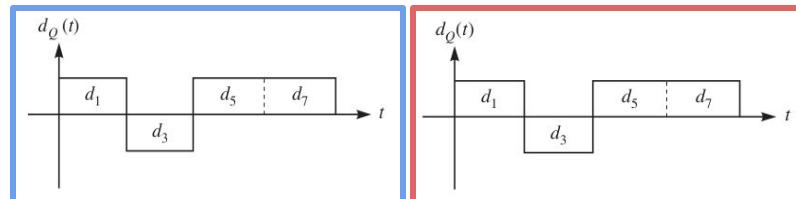
Ejemplo: QPSK, OQPSK y MSK



Esquemas de modulación digital

Modulador

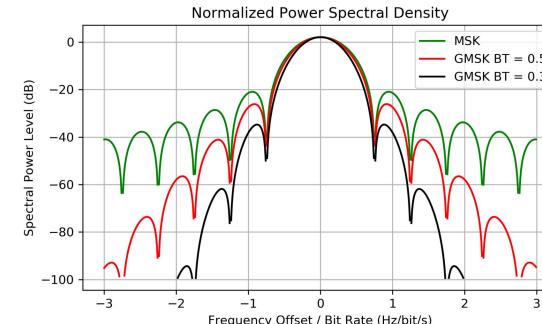
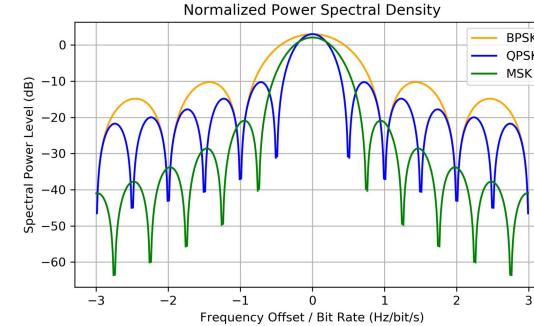
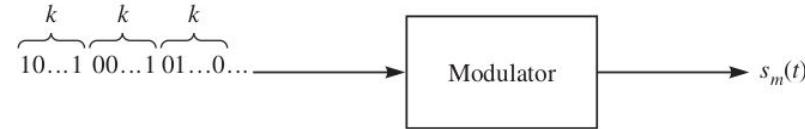
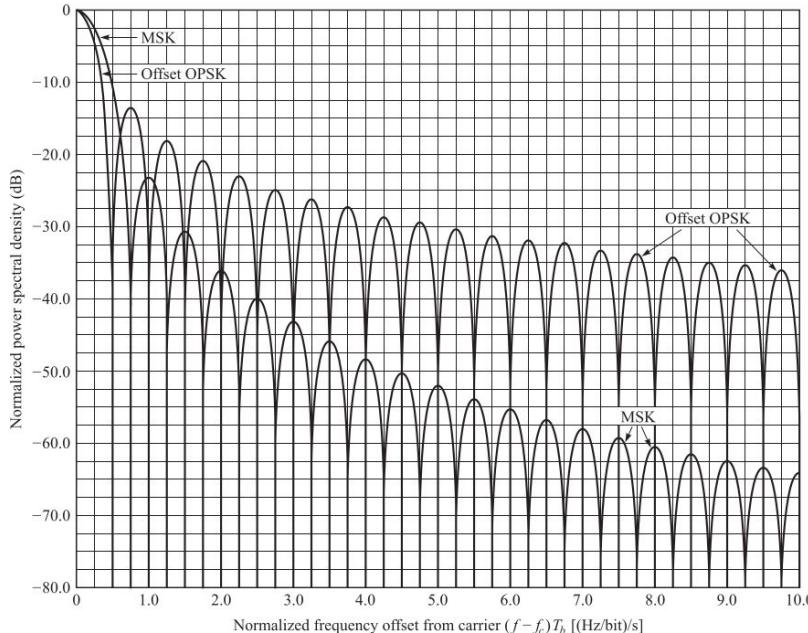
Ejemplo: QPSK, OQPSK y MSK



Esquemas de modulación digital

Modulador

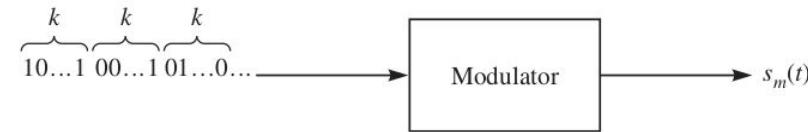
Ejemplo: QPSK, OQPSK y MSK



Esquemas de modulación digital

Interferencia inter-símbolo

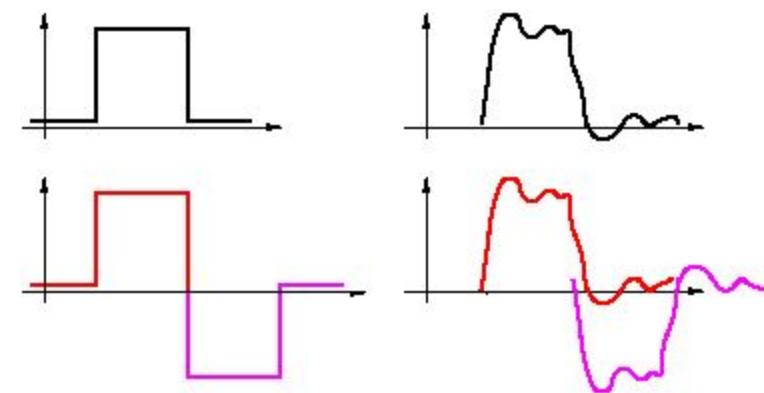
Interferencia Inter-Símbolo (ISI):



Es un tipo de **distorsión** que ocurre cuando un **símbolo afecta a los subsiguientes**.

Está causada por la respuesta en frecuencia del canal:

- **Caminos múltiples** de la señal
- Canales de **ancho de banda limitado**
- Efectos no lineales
- Desincronización del receptor



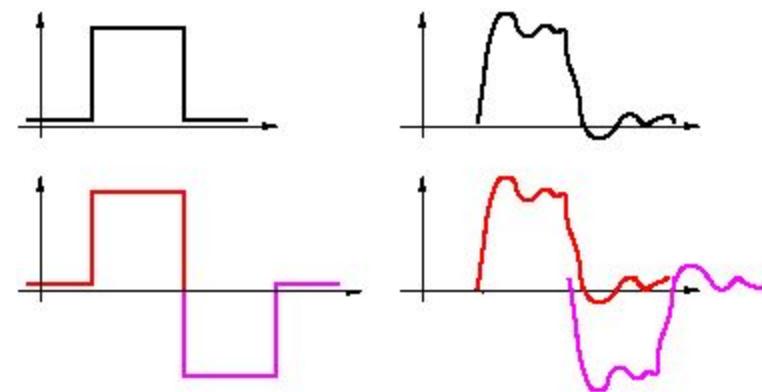
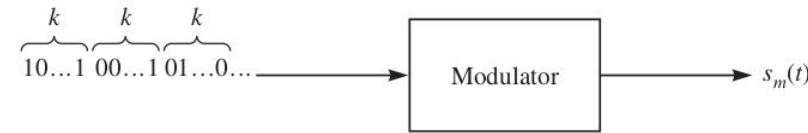
Esquemas de modulación digital

Interferencia inter-símbolo

Interferencia Inter-Símbolo (ISI):

Se puede **mitigar** con:

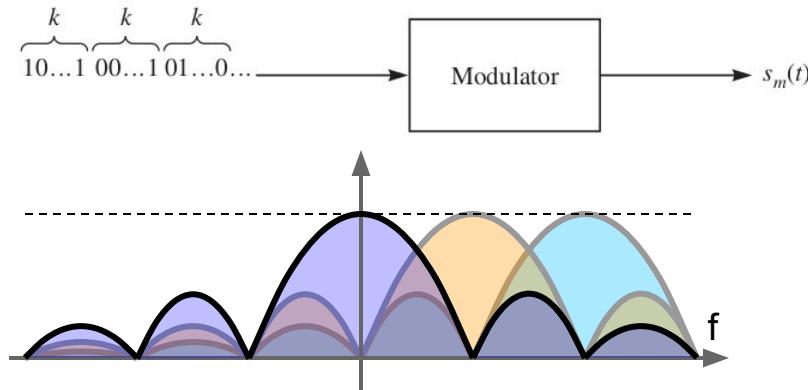
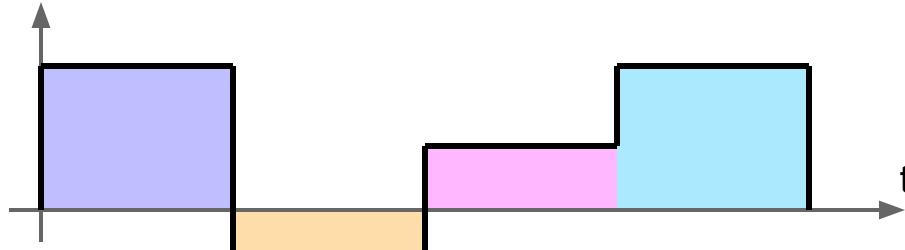
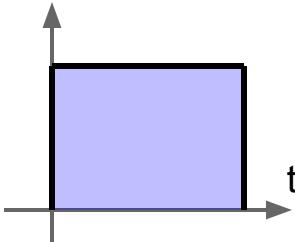
- Separación de los símbolos
- **Diseño de pulsos** que propaguen poca energía a los símbolos subsiguientes
- Ecualizadores
- Codificación de canal



Esquemas de modulación digital

Interferencia inter-símbolo

Criterio de Nyquist:

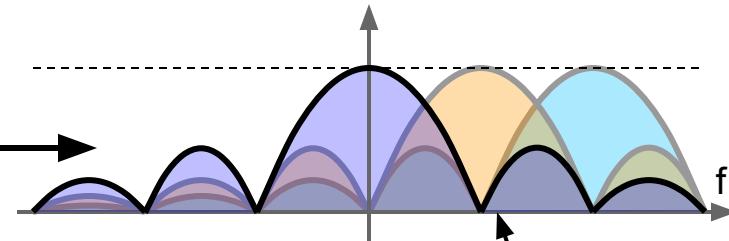
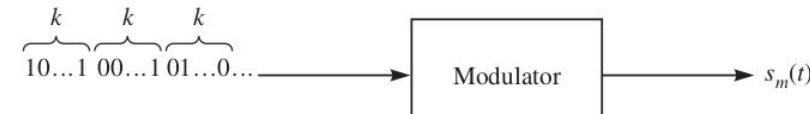
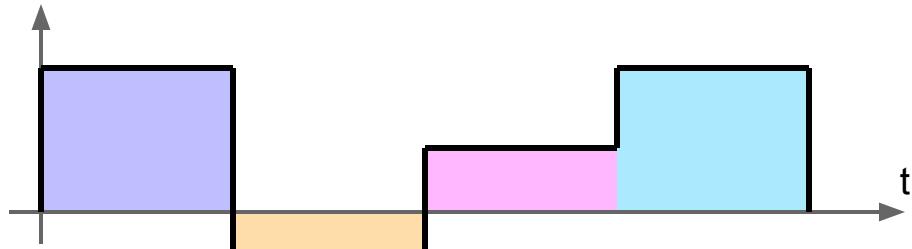
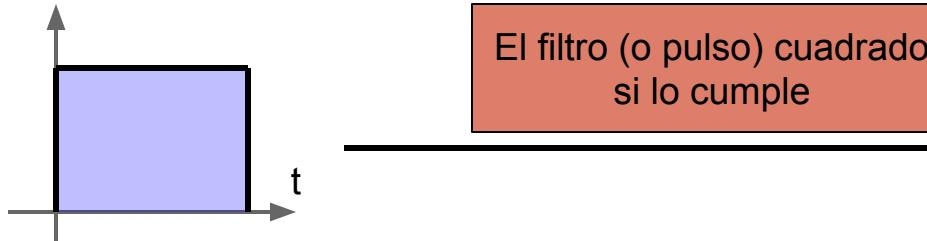


$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} X(f + m/T) = T$$

Esquemas de modulación digital

Interferencia inter-símbolo

Criterio de Nyquist:



$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} X(f + m/T) = T$$

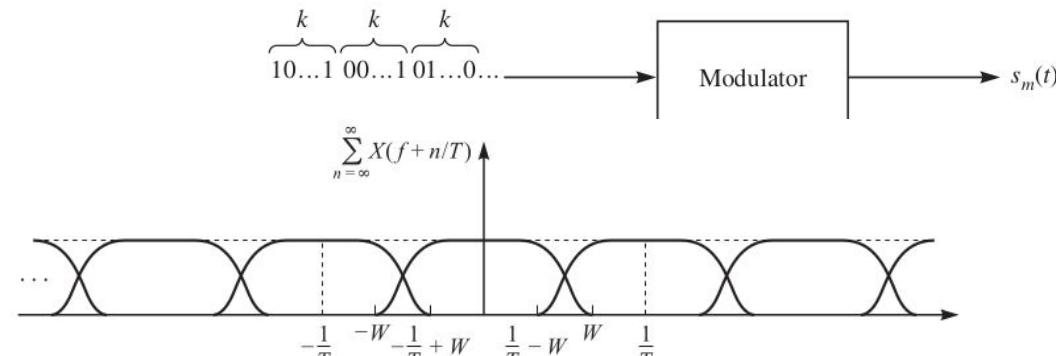
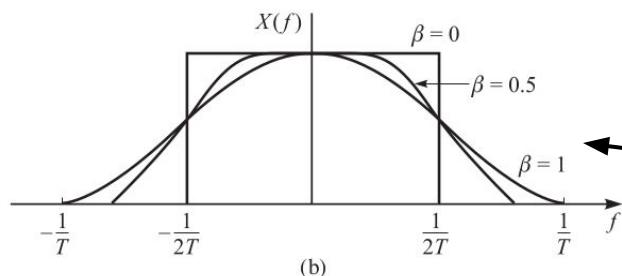
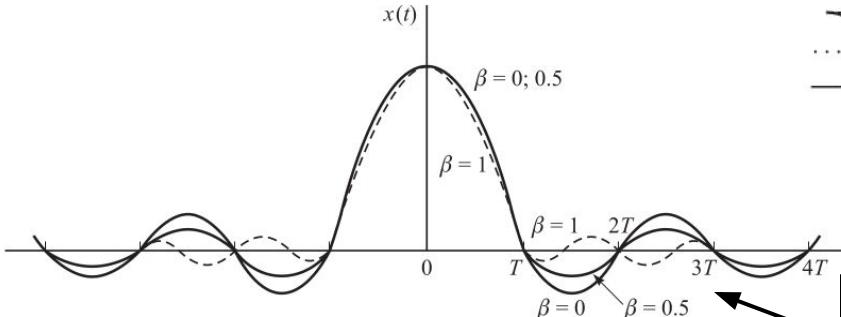
El filtro Gausiano no lo cumple

Esquemas de modulación digital

Interferencia inter-símbolo

Criterio de Nyquist:

- Filtro sinc
- Filtro coseno elevado



$$h(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{4T} \operatorname{sinc}\left(\frac{t}{2\beta}\right), & t = \pm \frac{T}{2\beta} \\ \frac{1}{T} \operatorname{sinc}\left(\frac{t}{T}\right) \frac{\cos\left(\frac{\pi\beta t}{T}\right)}{1 - \left(\frac{2\beta t}{T}\right)^2}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} X(f + m/T) = T$$

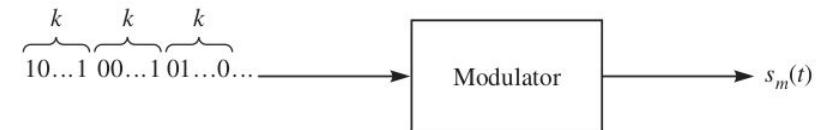
$$H(f) = \begin{cases} 1, & |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi T}{\beta} \left[|f| - \frac{1-\beta}{2T} \right] \right) \right], & \frac{1-\beta}{2T} < |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Esquemas de modulación digital

Resumen

¿Cuál es el mejor método de modulación?:

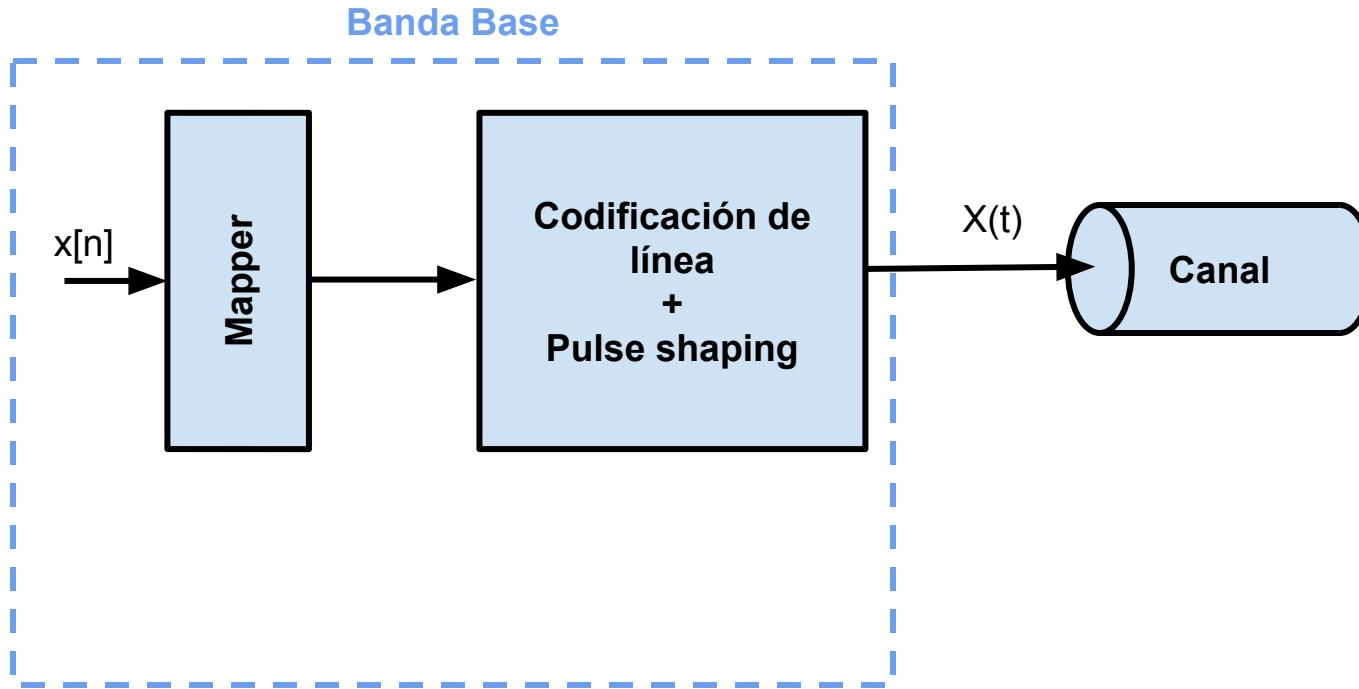
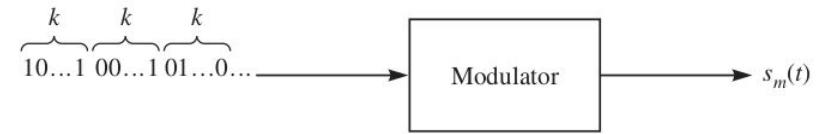
- Depende principalmente del canal
 - Alámbrico, inalámbrico, óptico
 - Ruido
 - Respuesta en frecuencia o banda asignada
 - Indoor, outdoor, rural, ciudad, espacio abierto, etc.
 - Otras posibles fuentes de distorsión (dinámico, por ejemplo)
- Depende de características del sistema
 - Consumo
 - Costo
 - Peso



Esquemas de modulación digital

Resumen

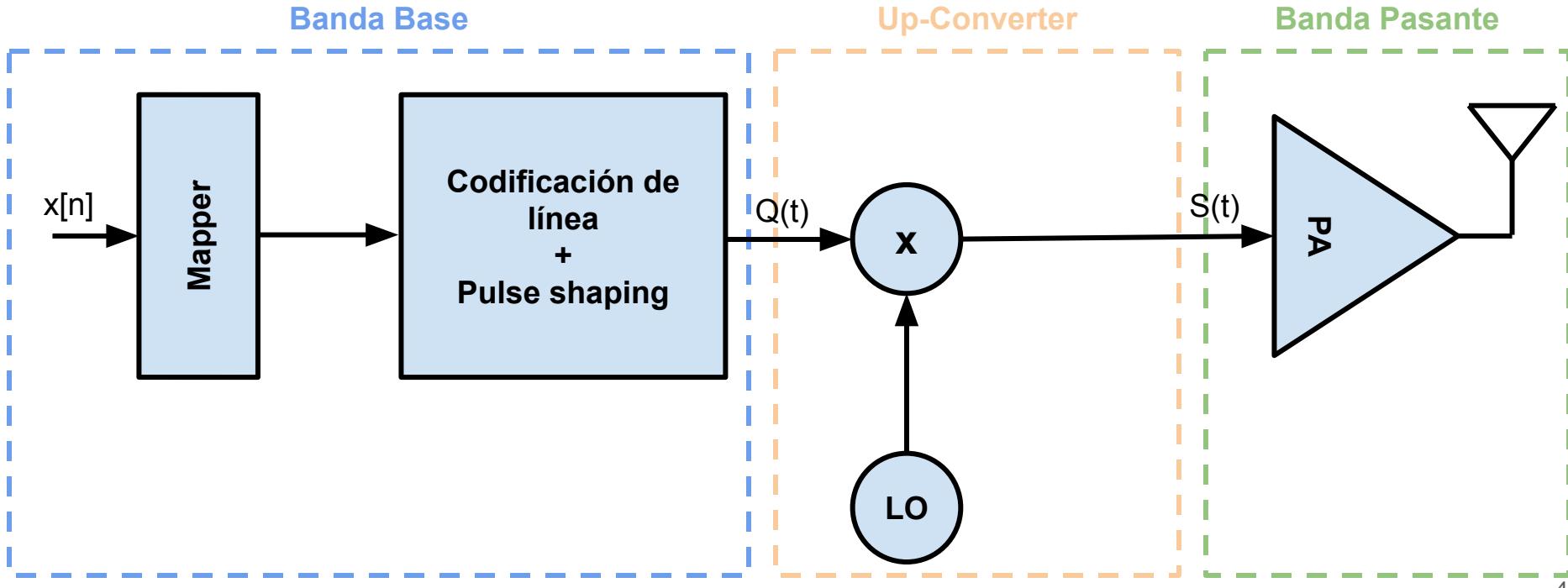
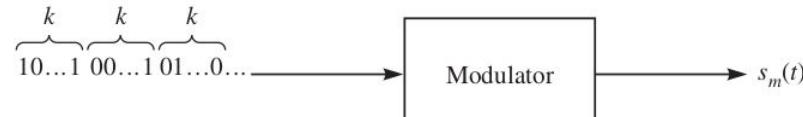
Ejemplo de un modulador de **banda base**.



Esquemas de modulación digital

Resumen

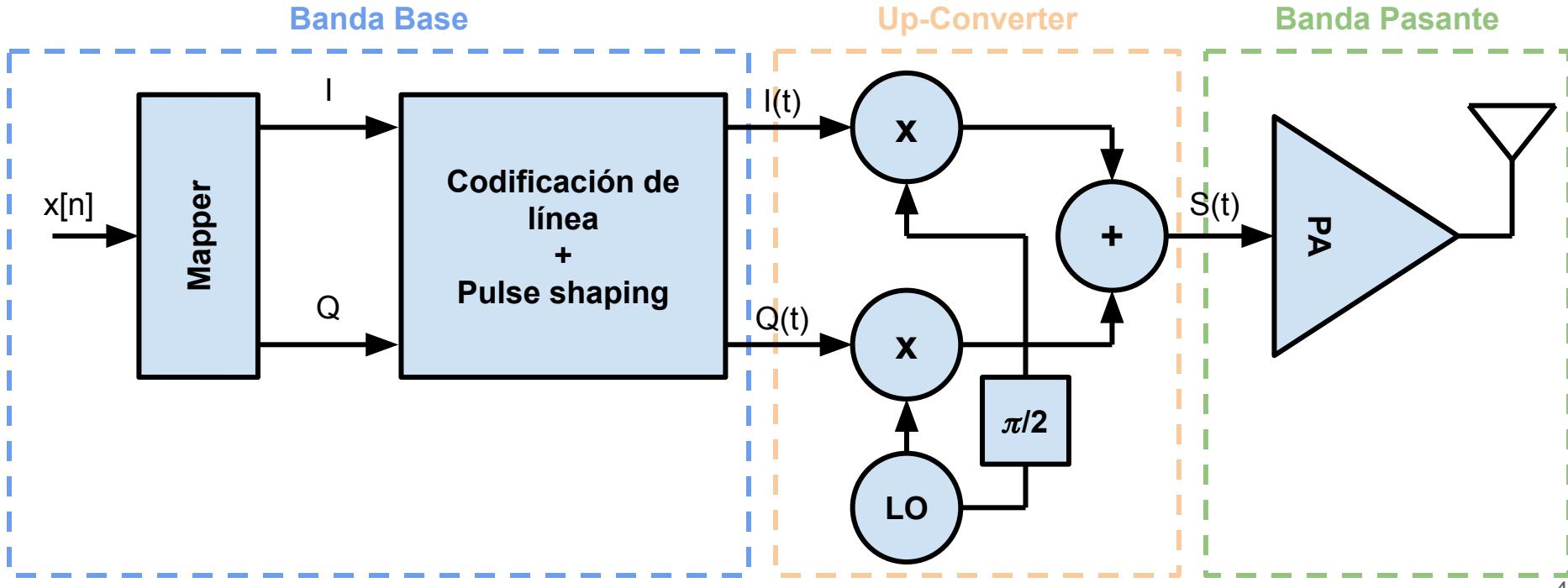
Ejemplo de un modulador de **banda pasante**.



Esquemas de modulación digital

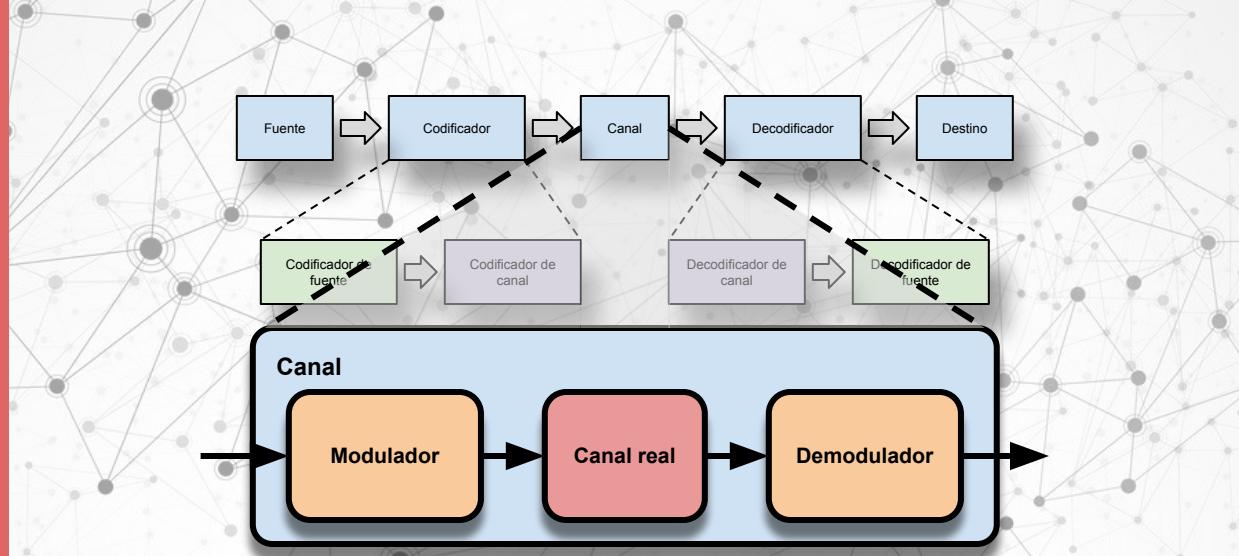
Resumen

Ejemplo de un modulador de **banda pasante**.



Demodulador:

- **Objetivos**
- **Banda base**
 - Filtro adaptado
 - Detector
 - Ecualizador
 - Sincronizador de símbolo
- **Banda pasante**
 - Down-converter
 - Sincronización con portadora
- **Resumen**



Demodulador

Objetivos

Objetivos:

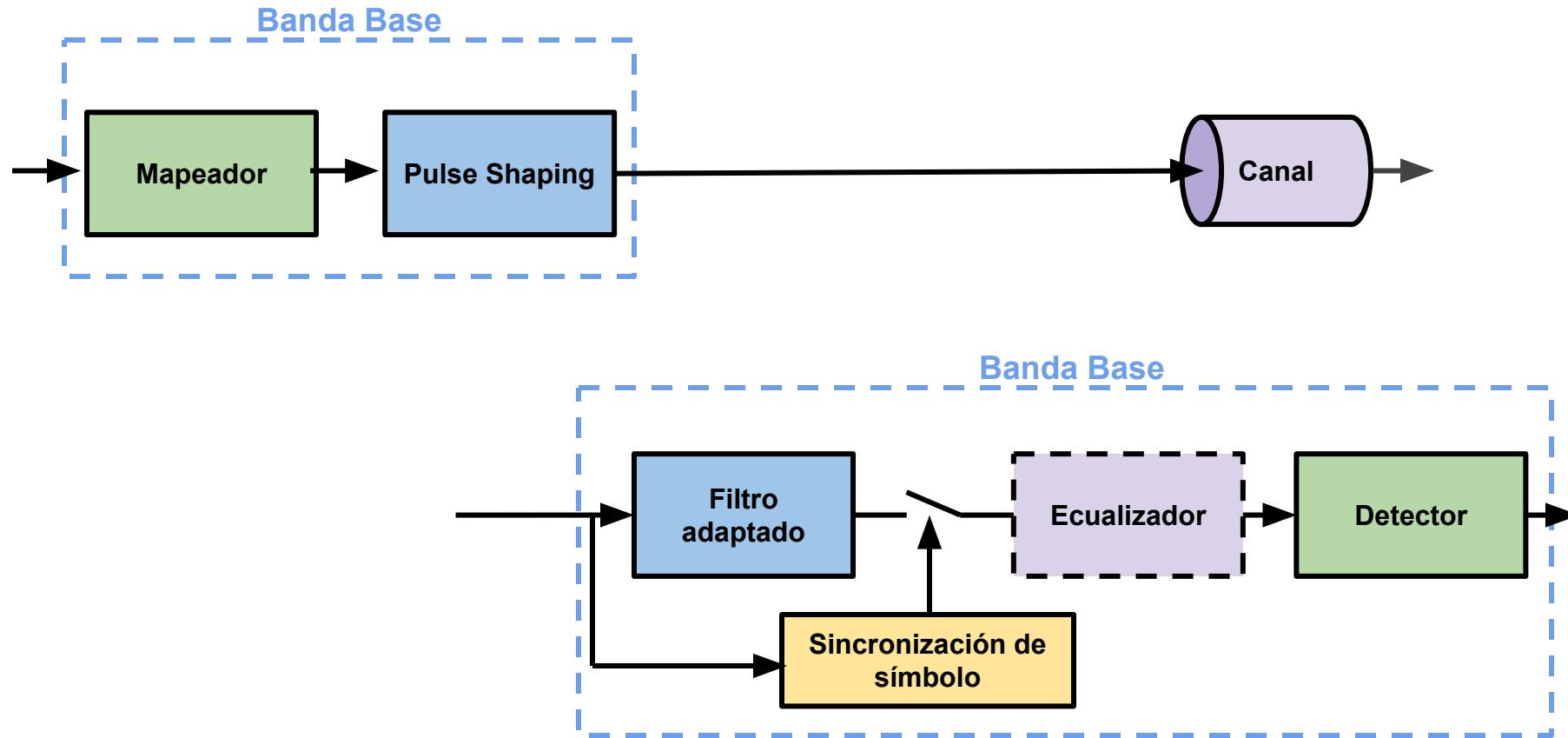
Transformar una las señales recibidas a través del canal, en una **secuencia de bits**.

Las **señales** recibidas fueron **distorsionadas** por el canal, por eso no es trivial la reconstrucción de la secuencia bits original.

El modulador debe revertir los efectos del canal, es decir **estimar la secuencia de bits original** lo mejor posible.

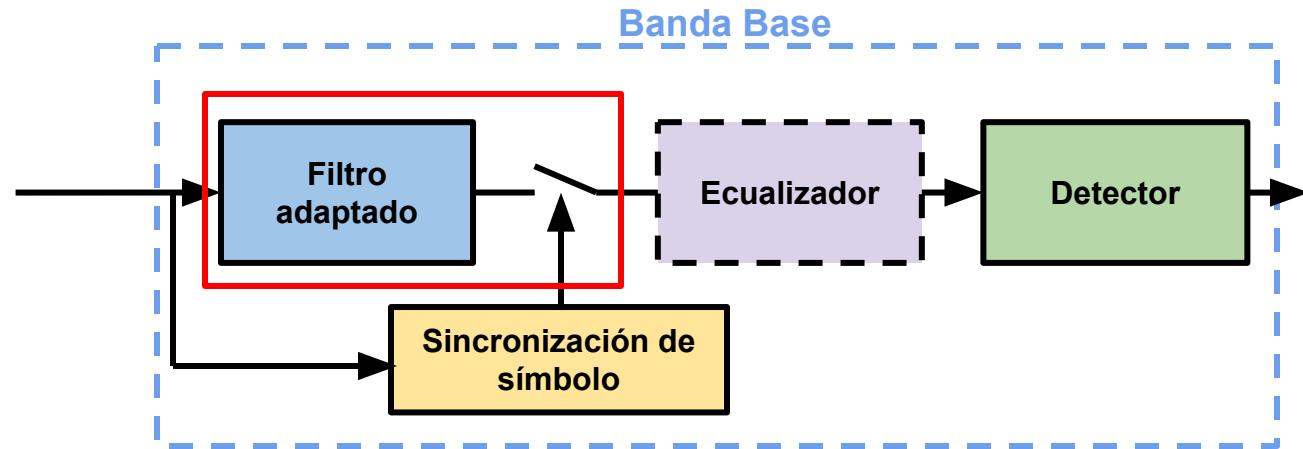
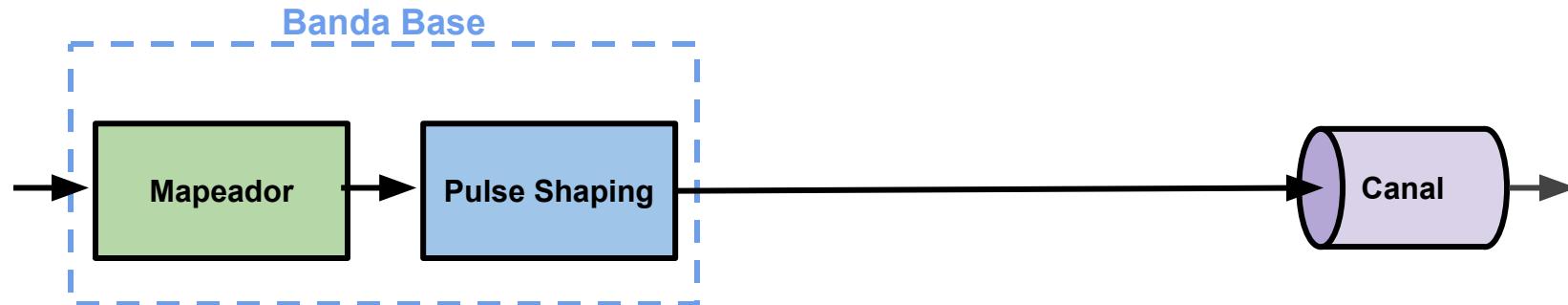
Demodulador

Demodulador en banda base



Demodulador

Filtro adaptado y muestreo



Demodulador

Filtro adaptado y muestreo

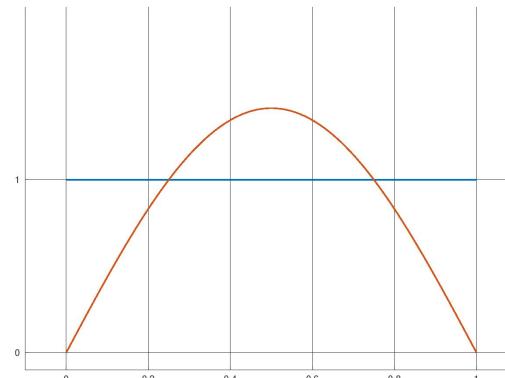
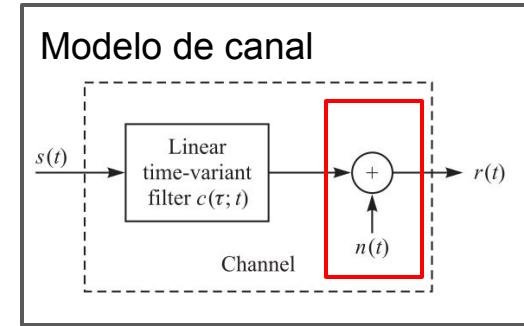
El objetivo del filtro es **minimizar la SNR**, o de manera equivalente, reducir los efectos del **ruido** introducidos por el canal.

Se alcanza utilizando un filtro con la **misma forma que el pulso** elegido:

$$h(t) = x(T-t) = p(t)$$

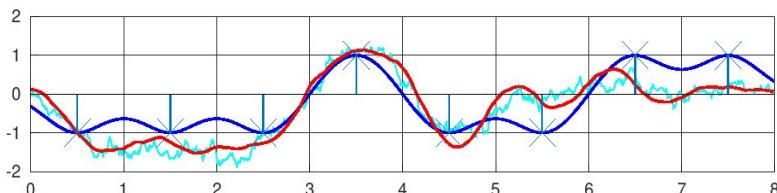
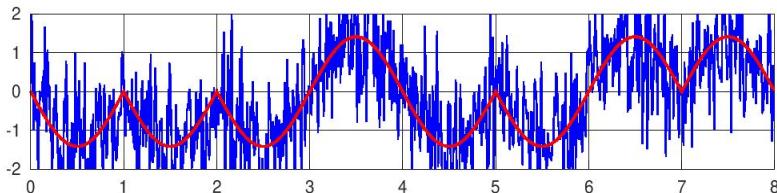
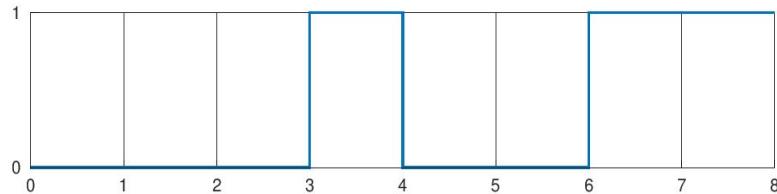
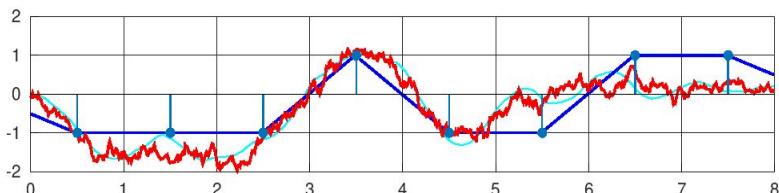
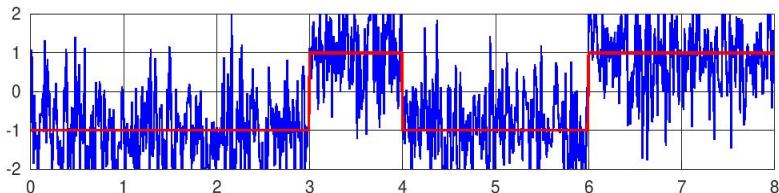
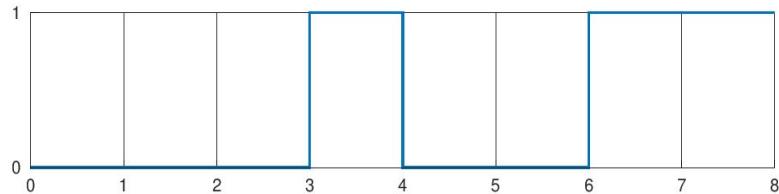
Se debe **muestrear** la señal filtrada en el **momento exacto** donde $t=kT$.

La entrada es la señal recibida, la salida una única muestra por cada símbolo.



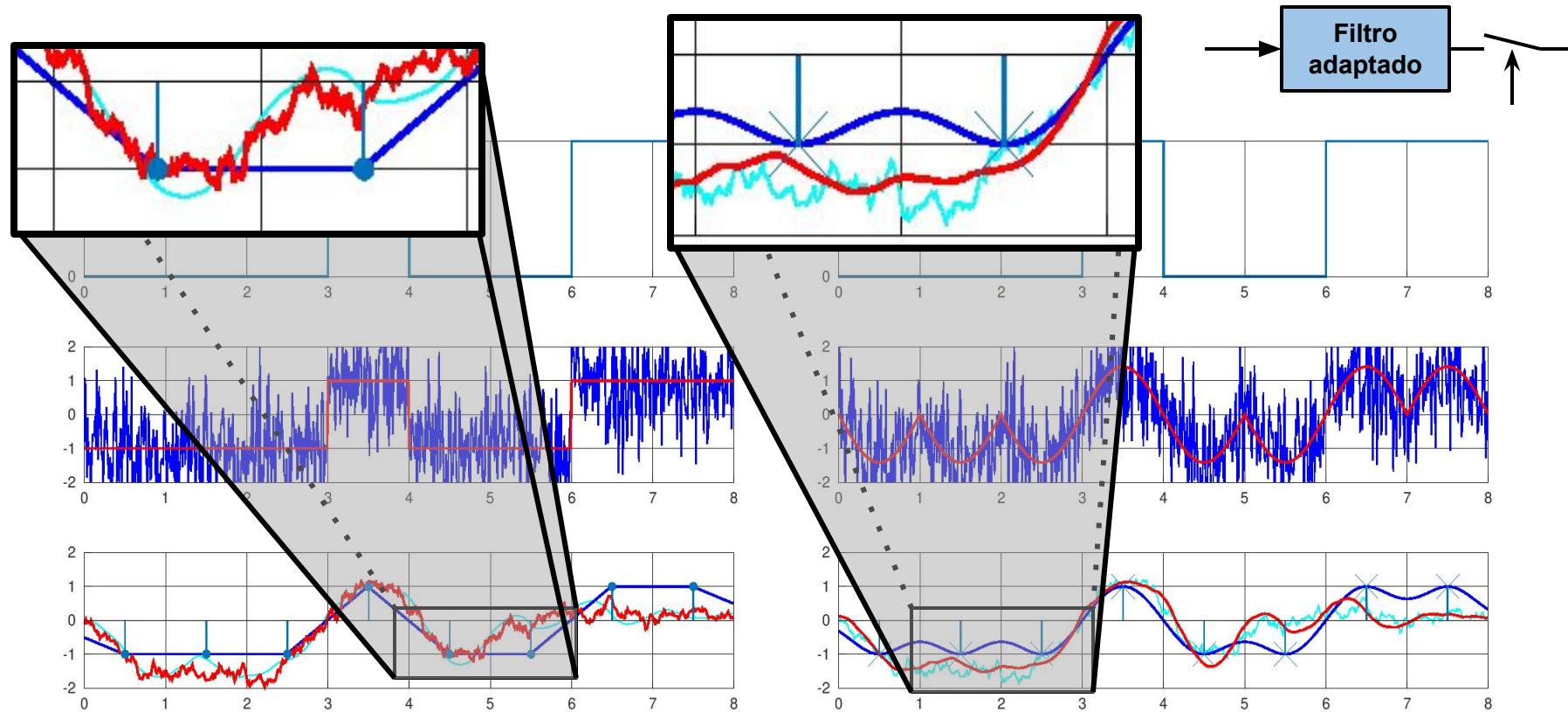
Demodulador

Filtro adaptado y muestreo



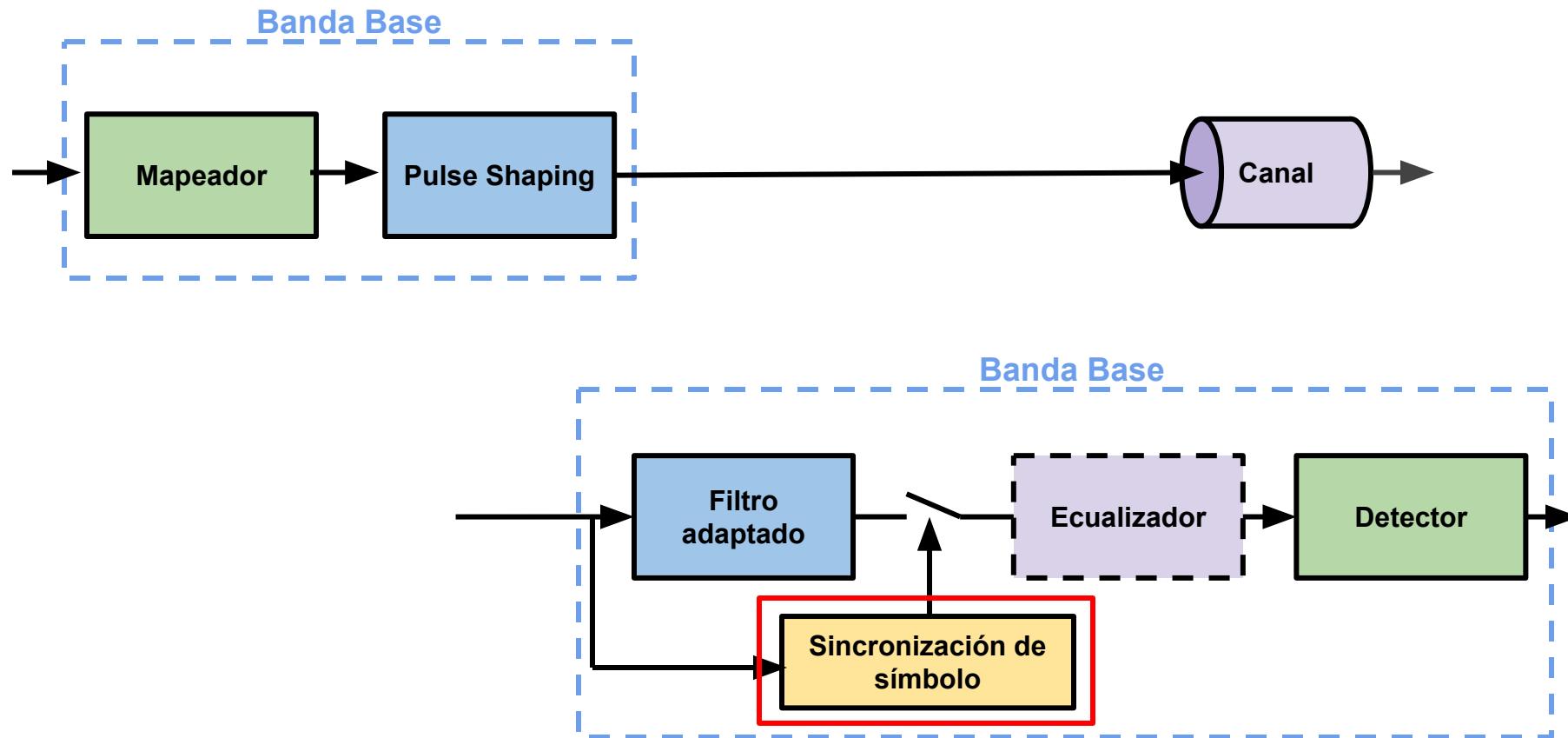
Demodulador

Filtro adaptado y muestreo



Demodulador

Sincronización de símbolo



Demodulador

Sincronización de símbolo

El objetivo del filtro es detectar **el comienzo y el fin del pulso** recibido, para poder **muestrear la señal momento exacto** donde $t=kT$.

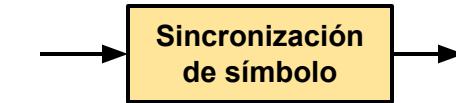
También se conoce como:

Clock recovery

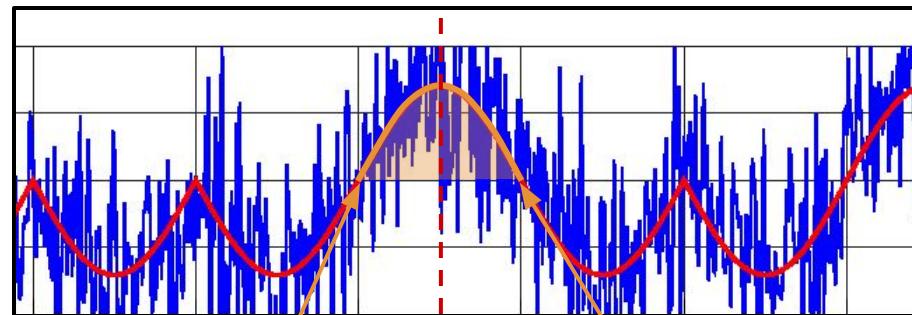
Symbol timing recovery

Existen diversas técnicas para sincronizar el pulso.

La entrada es generalmente la señal recibida, la salida es una señal periódica alineada con el símbolo.



Señal
antes del
filtro
adaptado



Inicio del
pulso

Fin del
pulso

$t = kT$

Demodulador

Sincronización de símbolo

El objetivo del filtro es detectar **el comienzo y el fin del pulso** recibido, para poder **muestrear la señal momento exacto** donde $t=kT$.

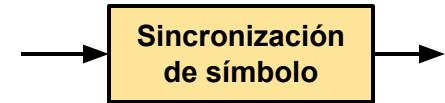
También se conoce como:

Clock recovery

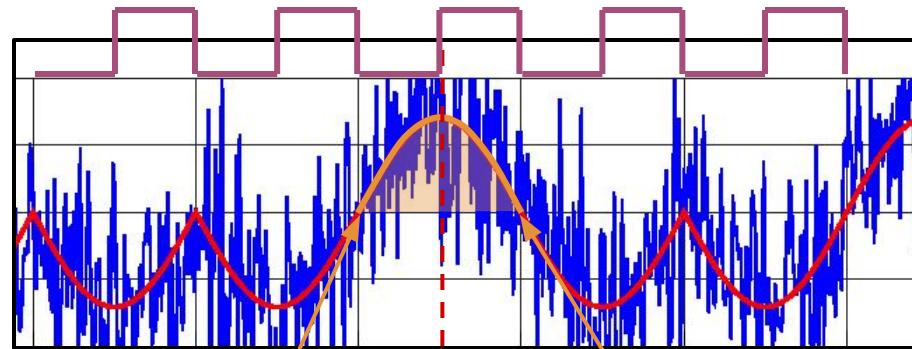
Symbol timing recovery

Existen diversas técnicas para sincronizar el pulso.

La entrada es generalmente la señal recibida, la salida es una señal periódica alineada con el símbolo.



Señal
antes del
filtro
adaptado



Inicio del
pulso

$t = kT$

Fin del
pulso

Demodulador

Sincronización de símbolo

El objetivo del filtro es detectar **el comienzo y el fin del pulso** recibido, para poder **muestrear la señal momento exacto** donde $t=kT$.

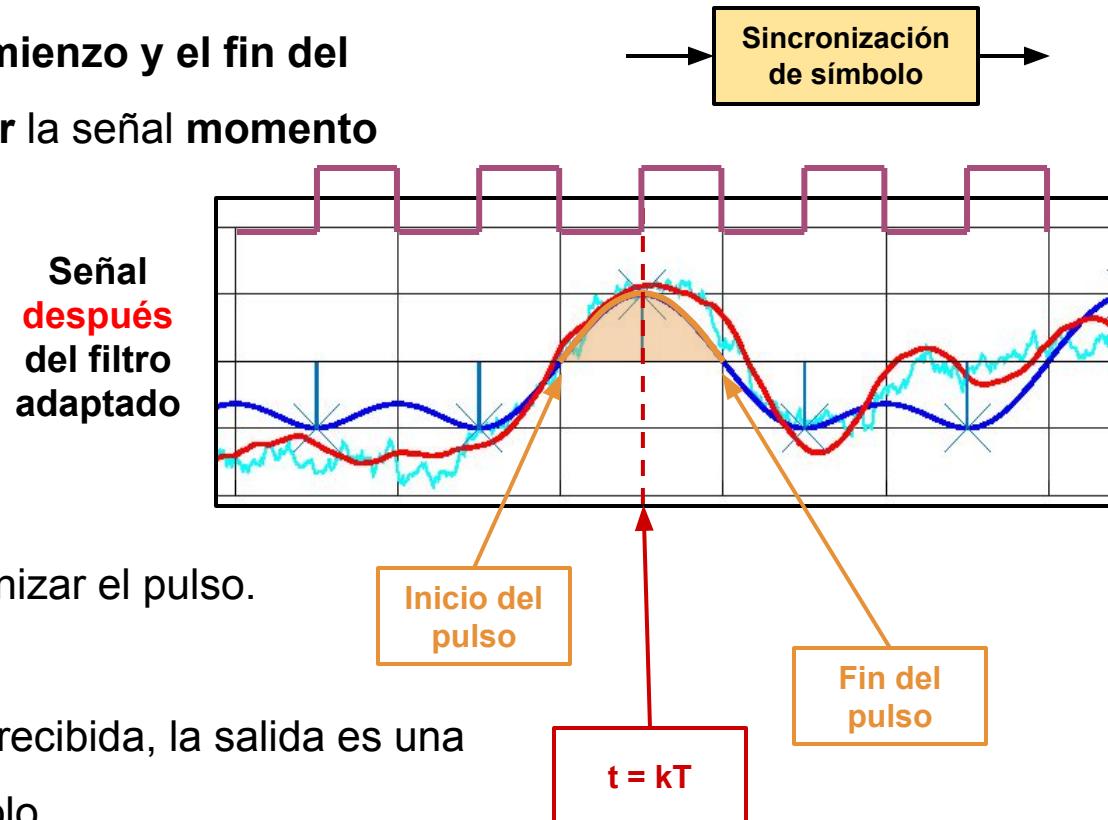
También se conoce como:

Clock recovery

Symbol timing recovery

Existen diversas técnicas para sincronizar el pulso.

La entrada es generalmente la señal recibida, la salida es una señal periódica alineada con el símbolo.



Demodulador

Sincronización de símbolo

Ejemplo de sincronizador Early-Late:

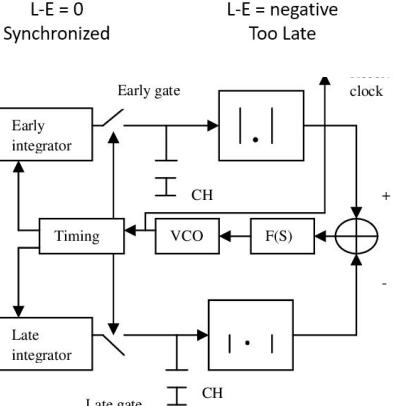
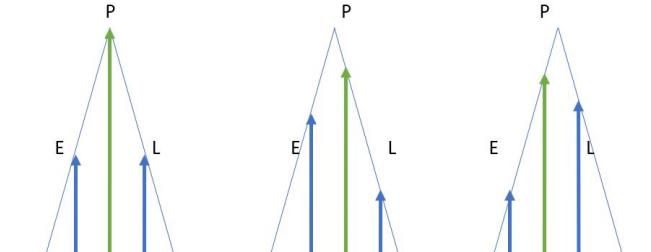
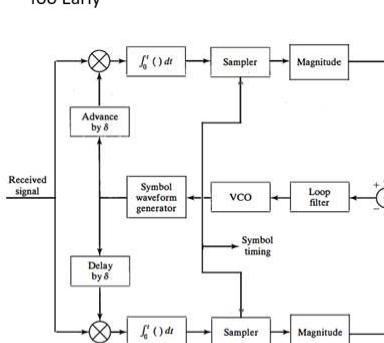


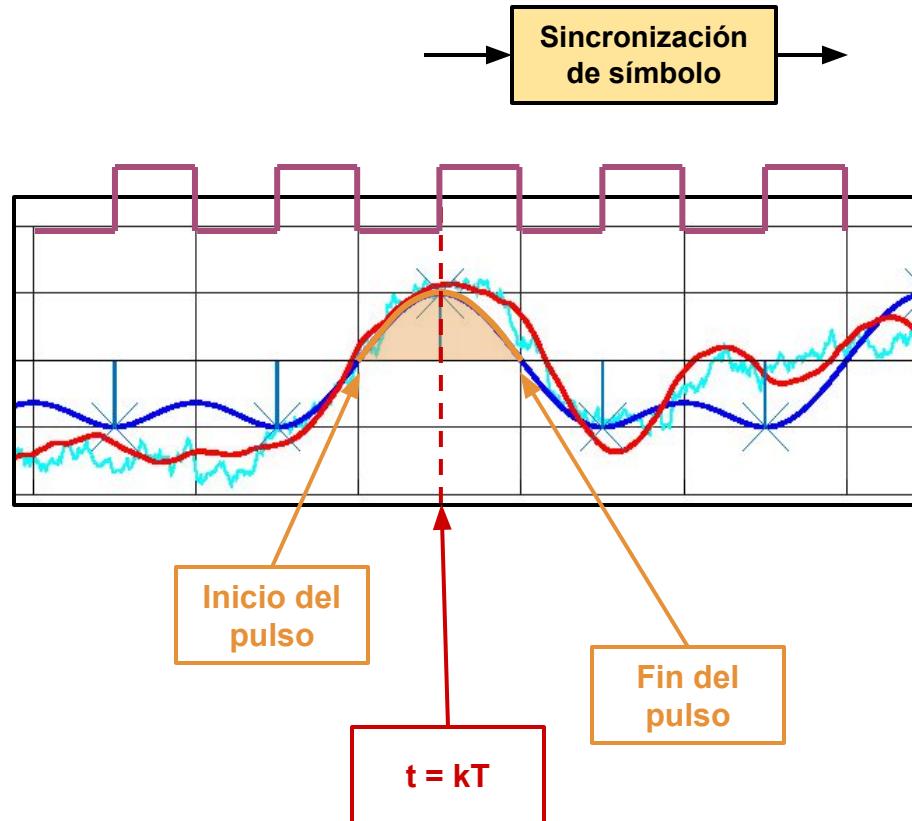
Figure 8.80 Block diagram of early-late synchronizer.

Versión digital



Versión analógica

Señal
después
del filtro
adaptado



Demodulador

Sincronización de símbolo

Ejemplo de sincronizador con PLL: Open-loop

$$y^2(t) = \left[\sum_m x_m p(t - mT) + n(t) \right]^2$$

$$\begin{aligned} E\{y^2(t)\} &= \sum_m \sum_n \mathcal{E}_x \cdot \delta_{mn} \cdot p(t - mT) \cdot p(t - nT) + \sigma_n^2 \\ &= \mathcal{E}_x \cdot \sum_m p^2(t - mT) + \sigma_n^2 , \quad \text{Señal periódica (T)} \end{aligned}$$

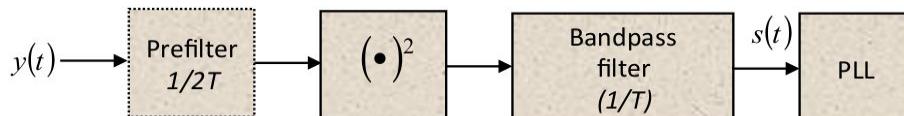
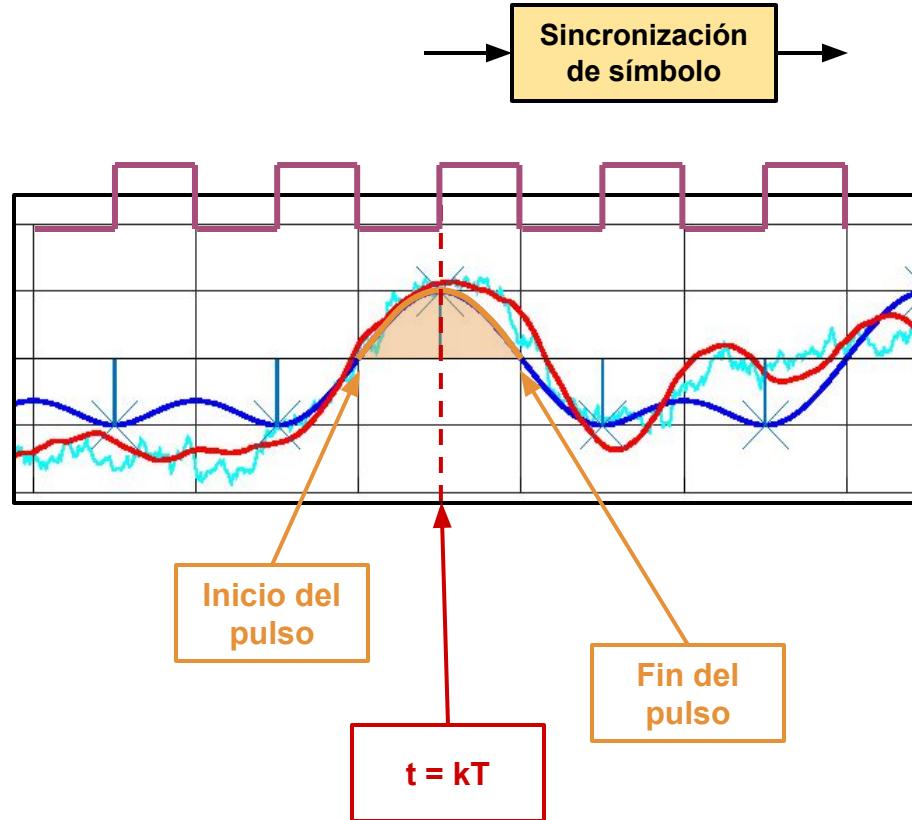
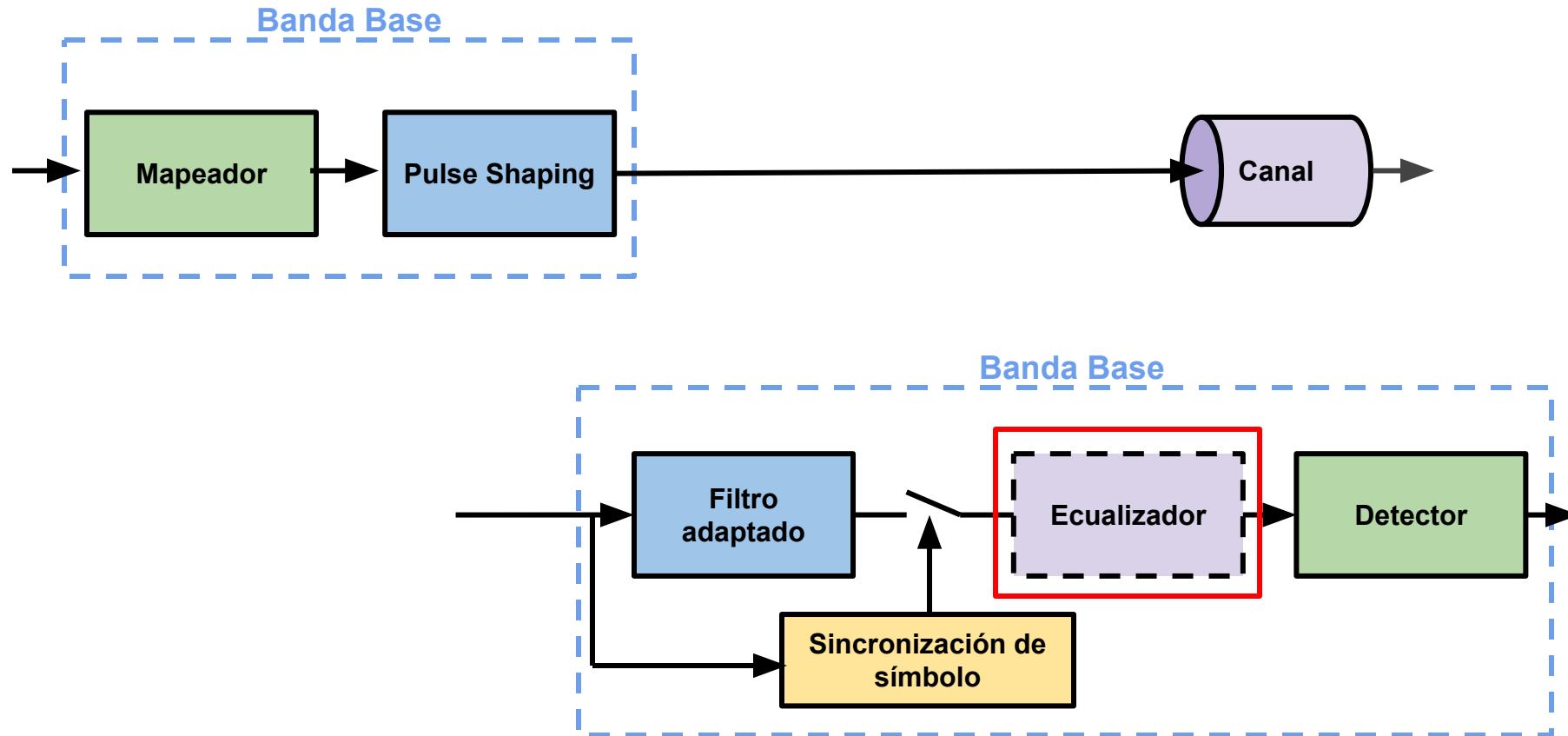


Figure 6.10: Square-law timing recovery.



Demodulador

Ecuilizador



Demodulador

Ecuilizador

El objetivo del ecualizador es revertir los efectos dispersivos introducidos sobre el pulso por el canal, es decir su respuesta en frecuencia o la ISI.

Existen diversas técnicas para sincronizar el pulso:

Lineales (no tienen realimentación):

- Ecuilización Zero-forcing
- Ecuilización MMSE

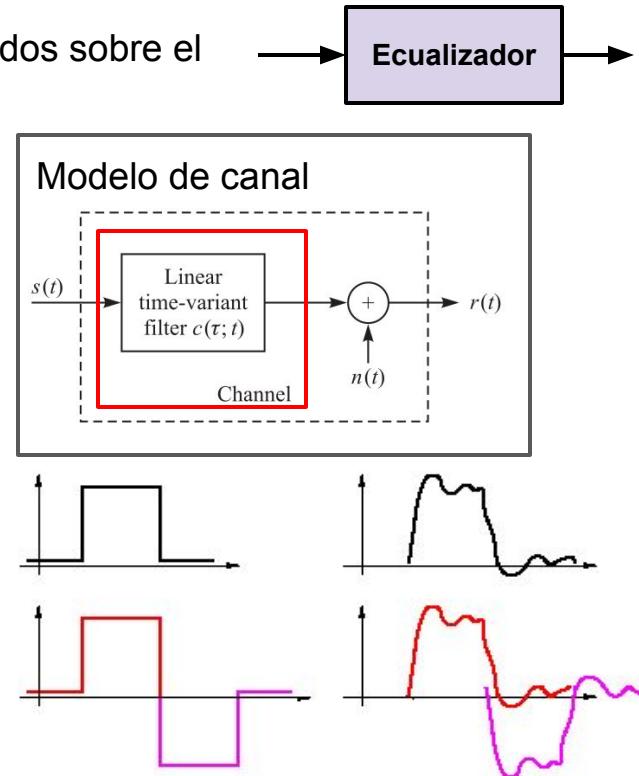
No lineales (tienen realimentación, son adaptativos):

- Decision Feedback Equalization (DFE)
- Maximum Likelihood Symbol Detection
- Maximum Likelihood Sequence Estimator (MLSE)

La entrada puede ser la **salida del filtro adaptado**

o la **salida del filtro adaptado muestreada**.

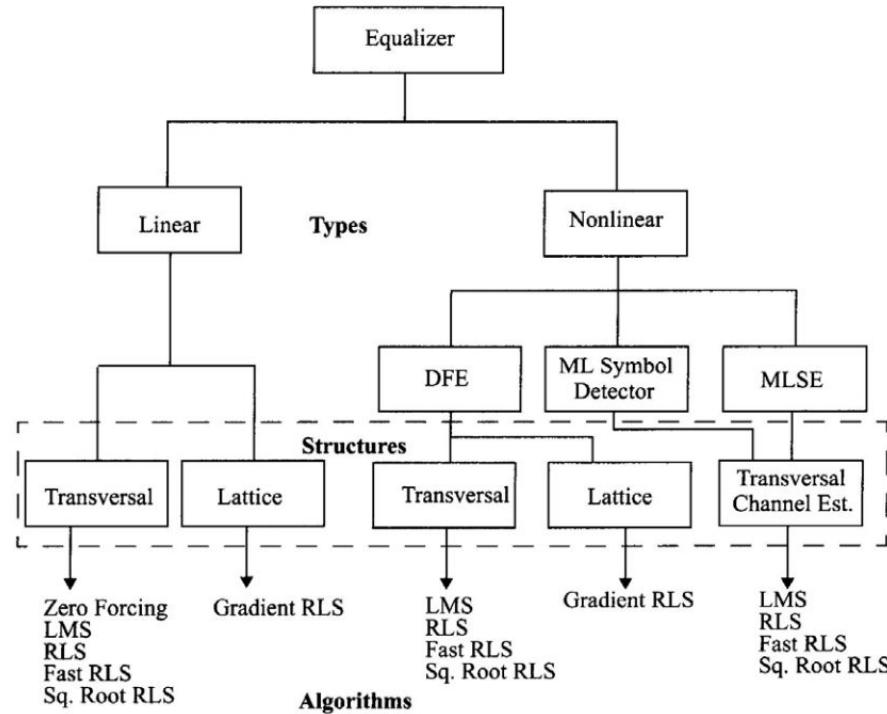
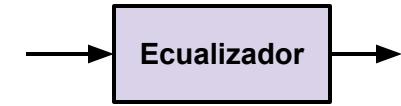
La salida es la señal correspondiente, ecualizada.



Demodulador

Ecuilizador

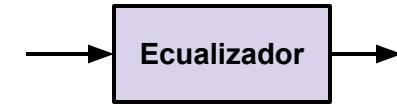
Clasificación de ecualizadores:



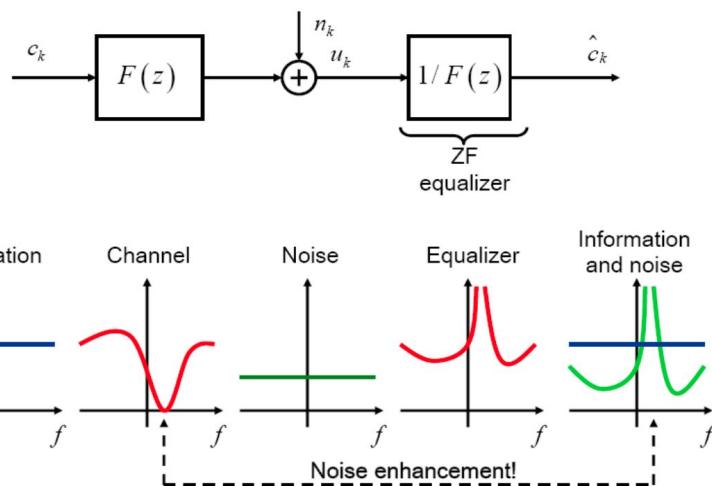
Demodulador

Ecualizador

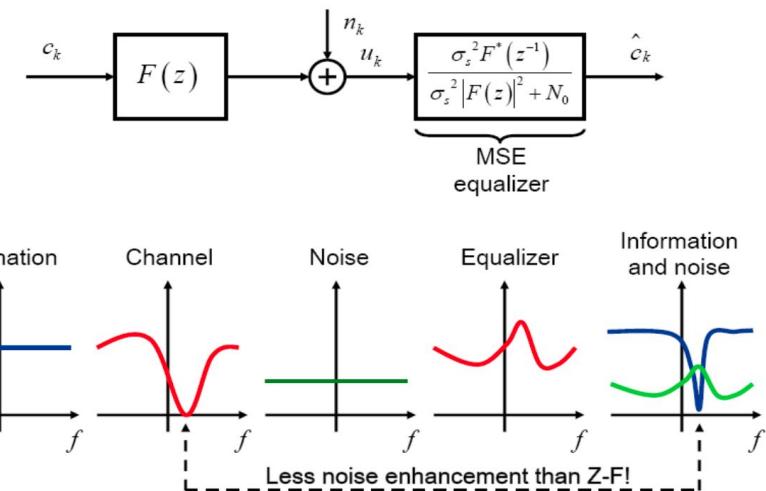
Ejemplos de ecualizadores lineales:



Ecualizador Zero-forcing



Ecualizador MMSE

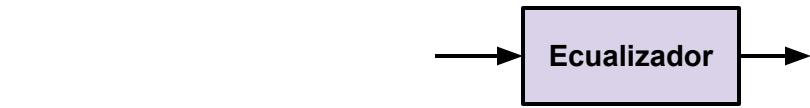
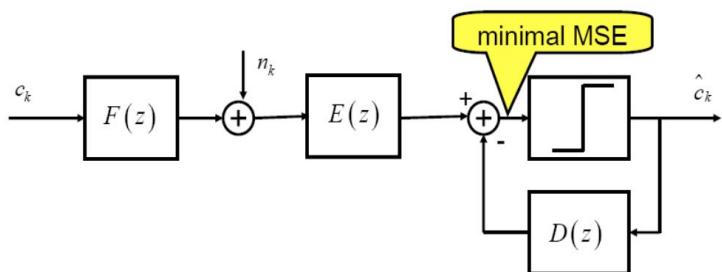
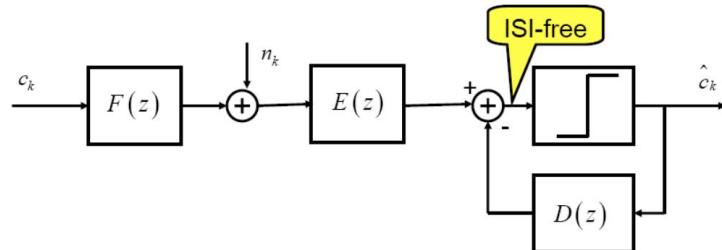


Demodulador

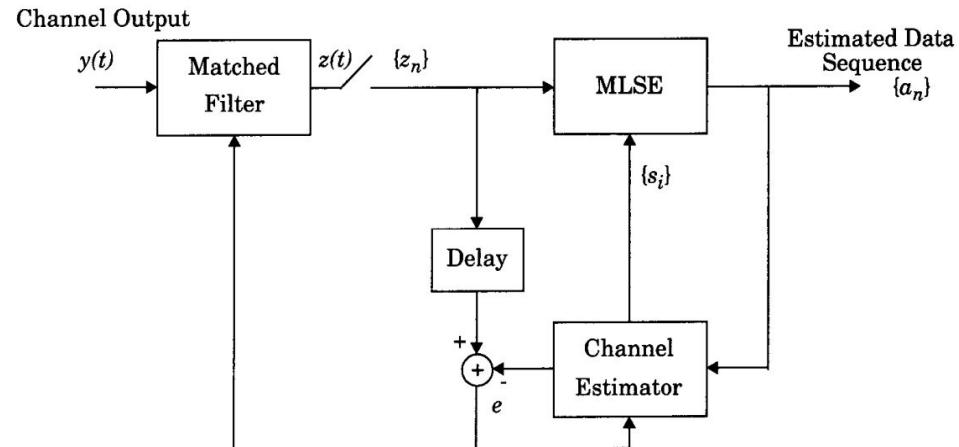
Ecuilizador

Ejemplos de ecualizadores no lineales:

Ecuilizador Decision-Feedback (DFE)



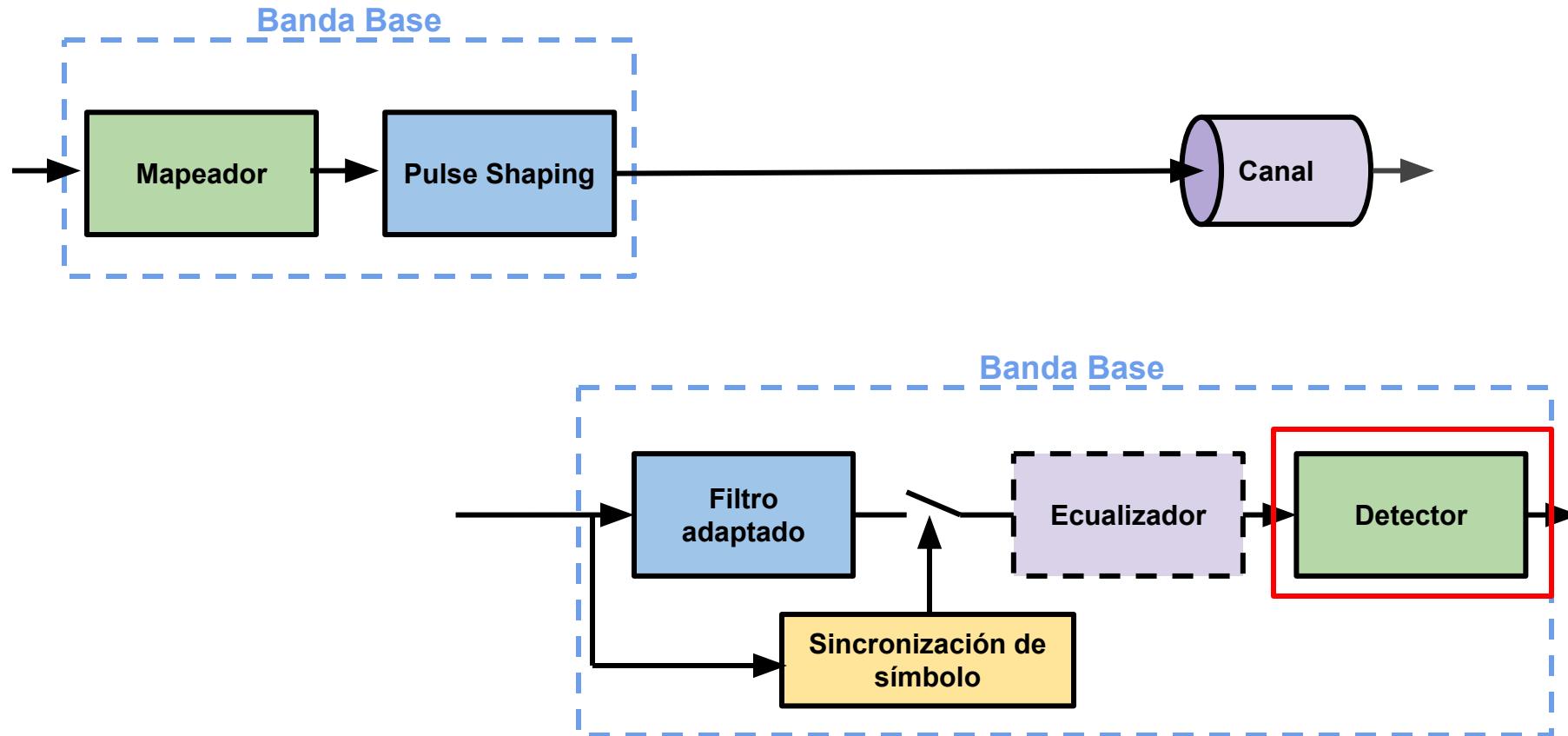
Ecuilizador de Estimación de Secuencia
de Máxima Verosimilitud (MLSE)



Para estimar la secuencia de ML se utiliza el algoritmo de Viterbi.

Demodulador

Detector



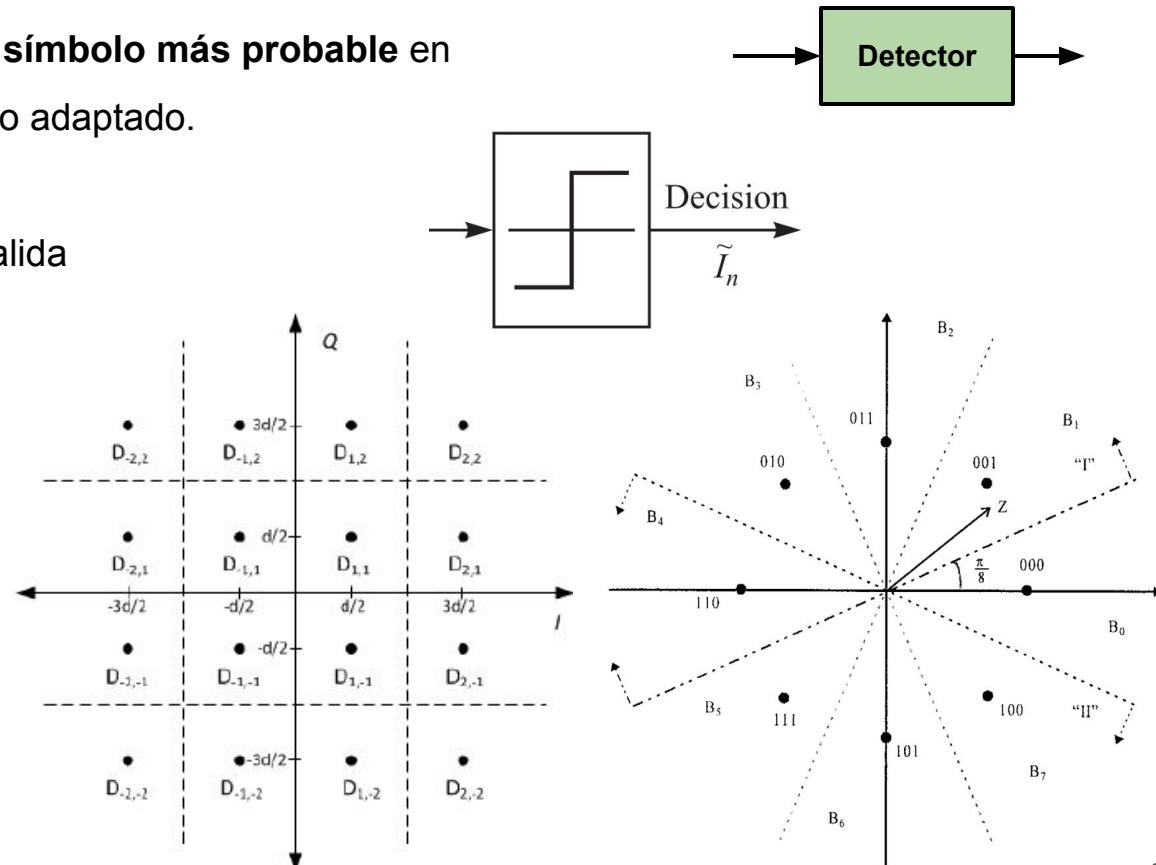
Demodulador

Detector

El objetivo del detector es seleccionar el **símbolo más probable** en base a la salida del ecualizador o del filtro adaptado.

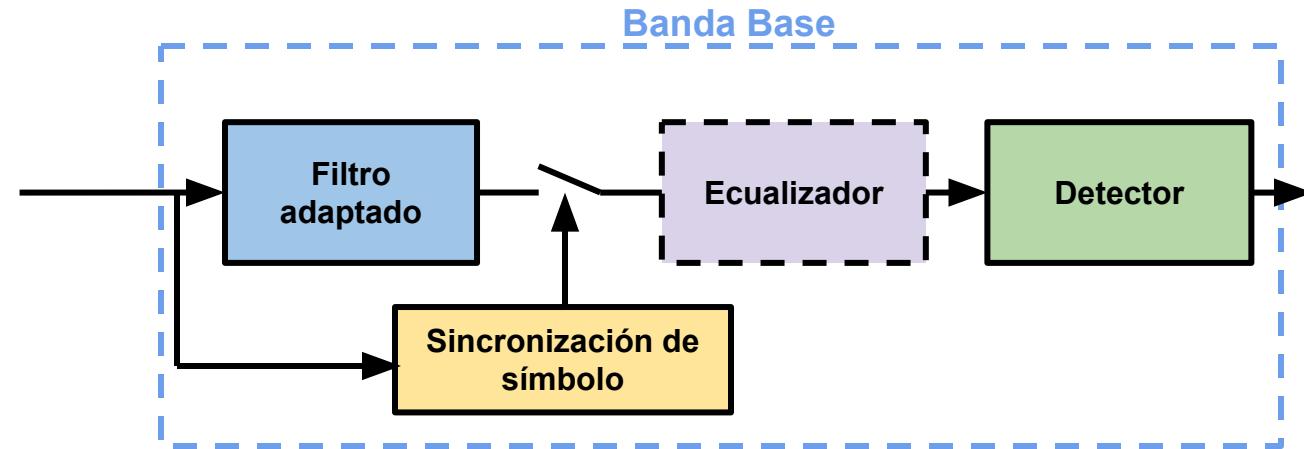
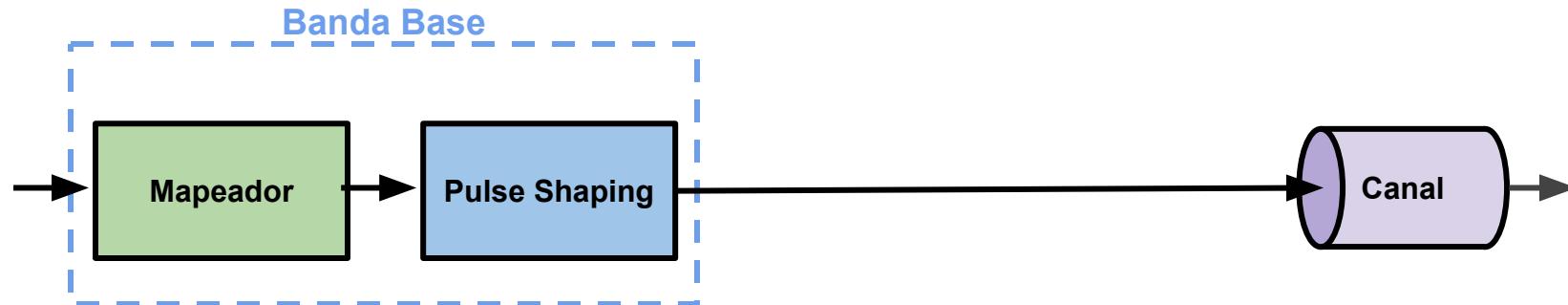
En muchos ecualizadores se utiliza su salida como realimentación para adaptar los coeficientes de los filtros ecualizadores.

Se pueden definir las **regiones de decisión** en base al símbolo más cercano.



Demodulador

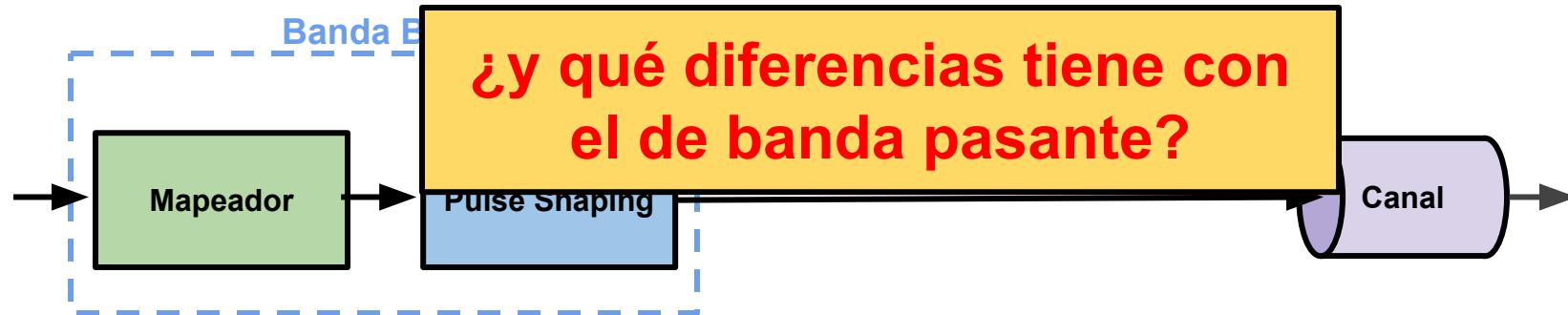
Modulador y demodulador en banda base



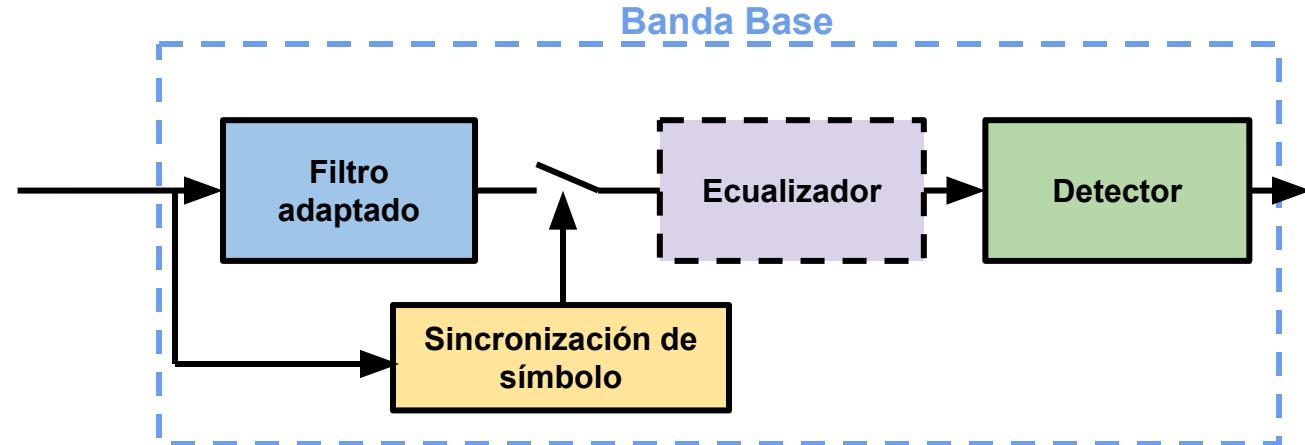
Volvemos a mostrar
el diagrama en
bloques completo

Demodulador

Modulador y demodulador en banda base

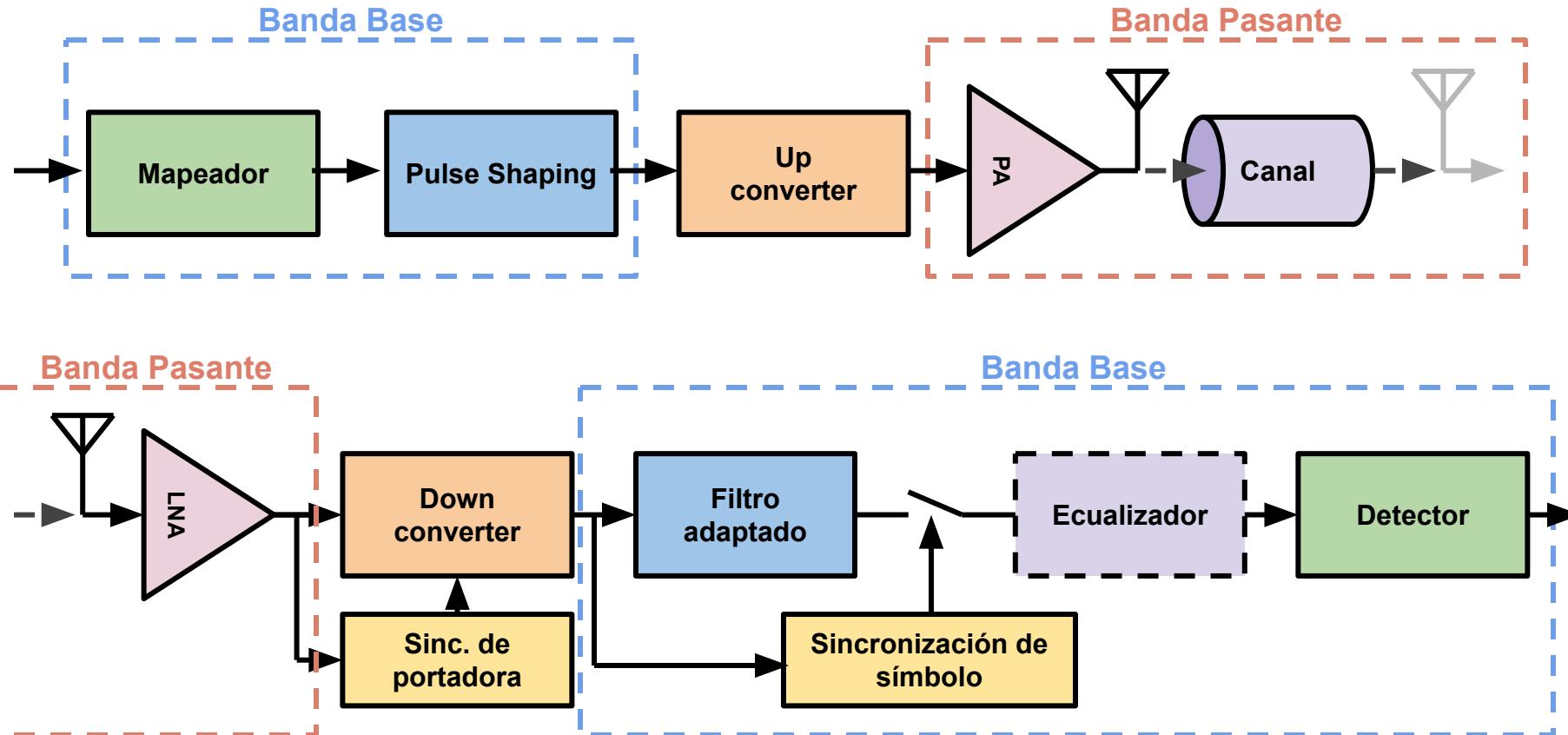


¿y qué diferencias tiene con el de banda pasante?



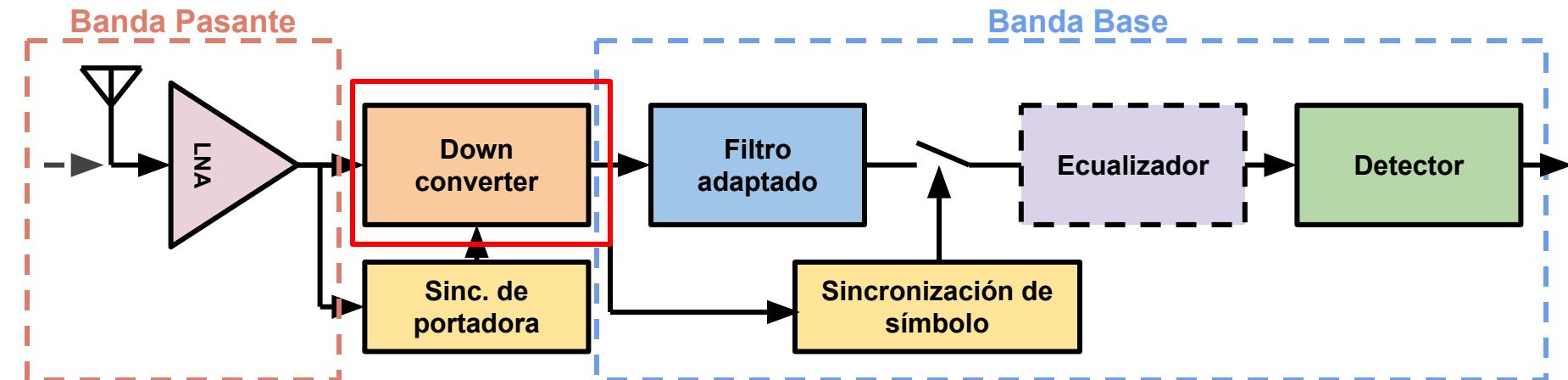
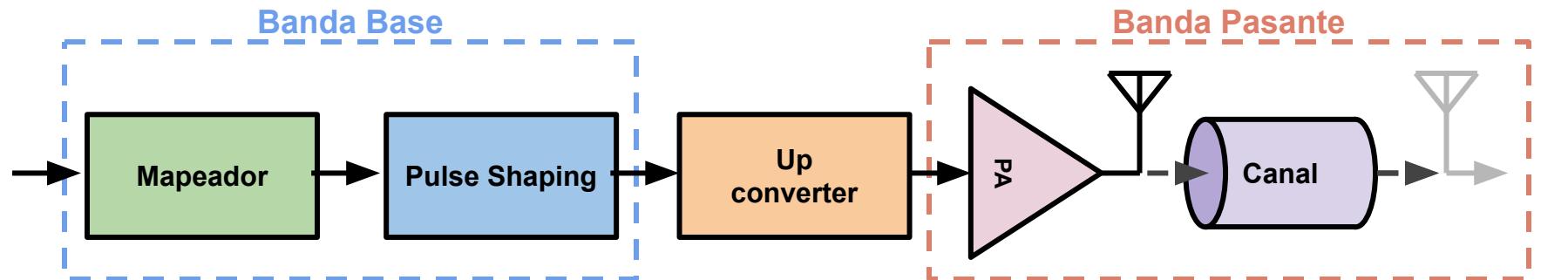
Demodulador

Modulador y demodulador en banda pasante



Demodulador

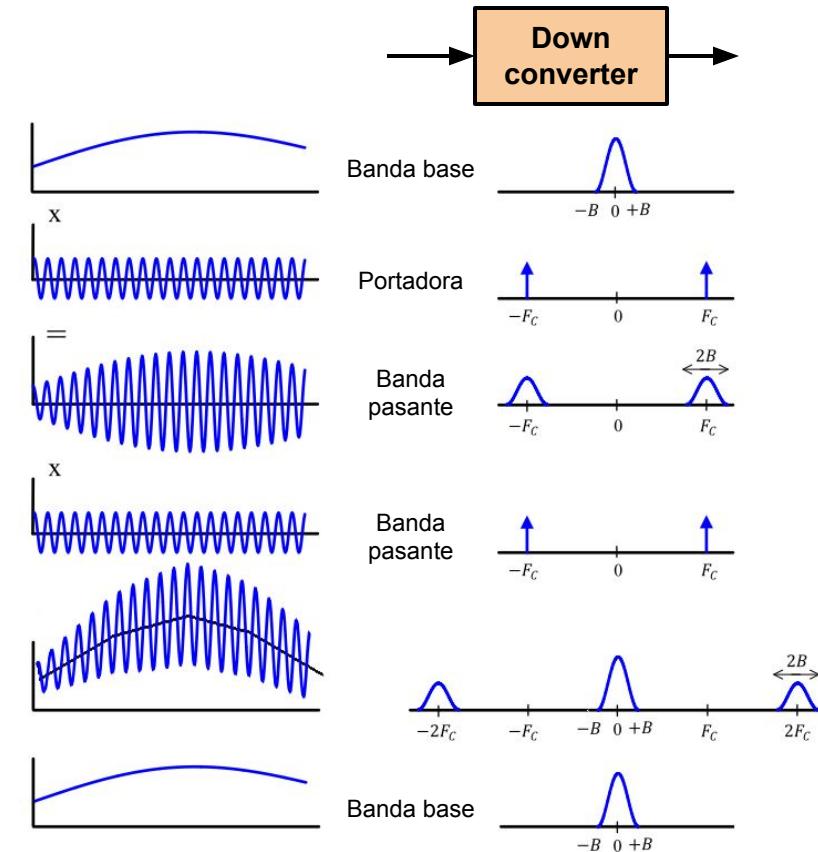
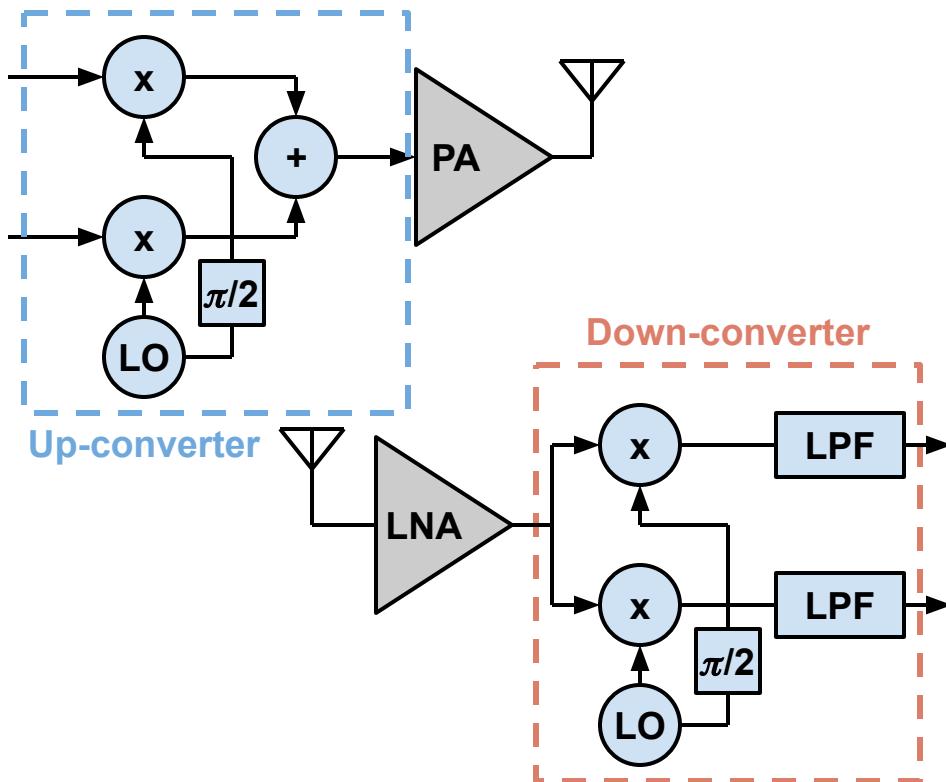
Down converter



Demodulador

Down converter

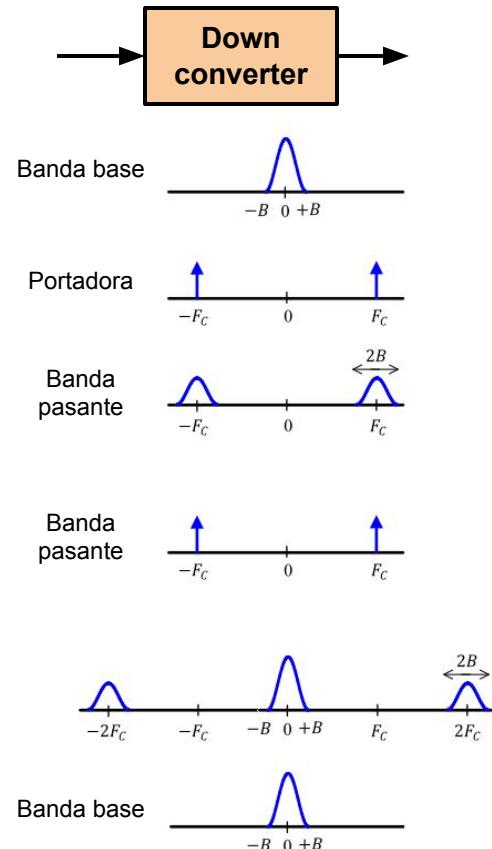
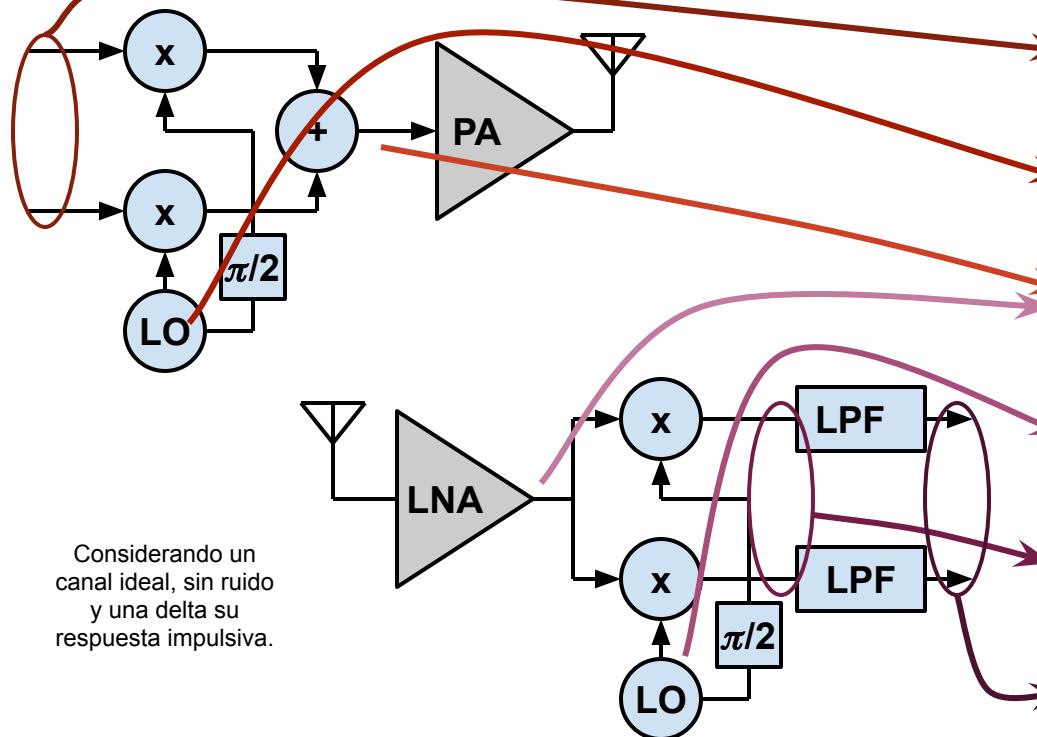
El objetivo del down-converter es **recuperar la señal de BB.**



Demodulador

Down converter

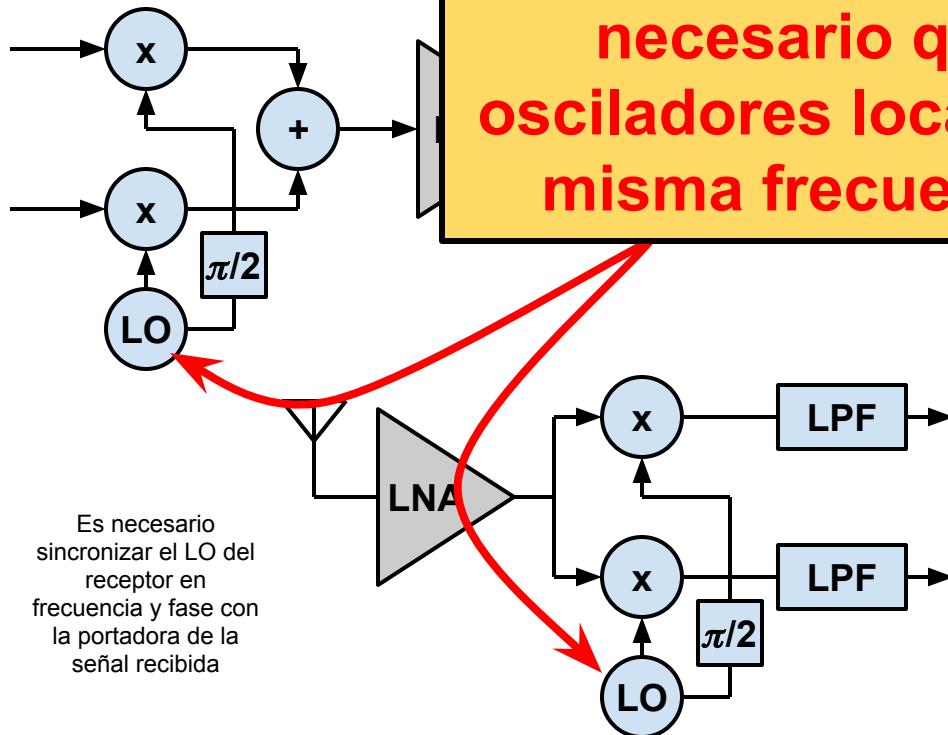
El objetivo del down-converter es **recuperar la señal de BB.**



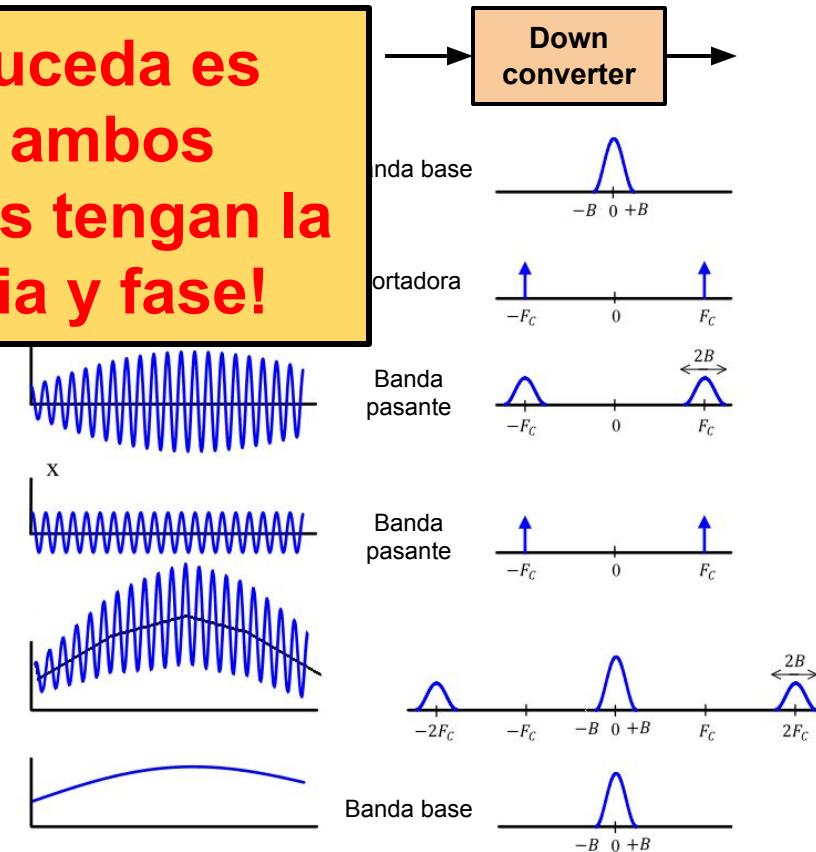
Demodulador

Down converter

El objetivo del down-conver

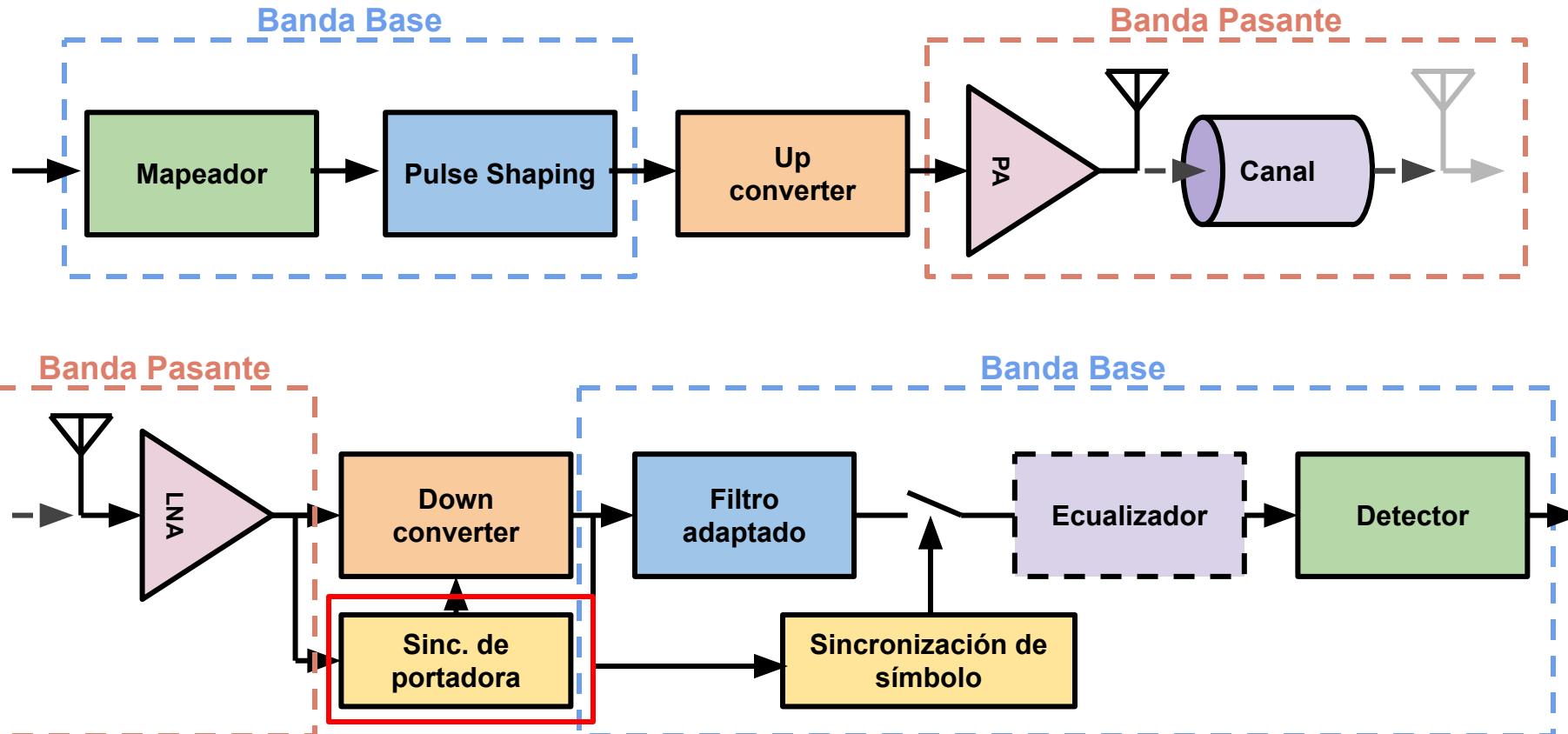


Para que esto suceda es necesario que ambos osciladores locales tengan la misma frecuencia y fase!



Demodulador

Sincronización de portadora



Demodulador

Sincronización de portadora

El objetivo de este bloque es **extraer la frecuencia y la fase** de la portadora, a partir de la señal recibida, de manera que el Oscilador Local (LO) del receptor esté sincronizado con el del transmisor, y así poder obtener nuevamente la señal de banda base mediante la down-conversion y el filtro pasa bajos.



Existen diferentes esquemas y a su vez diferentes métodos para realizar esta tarea. Todos incluyen un PLL. Podemos clasificarlos en dos grandes grupos:

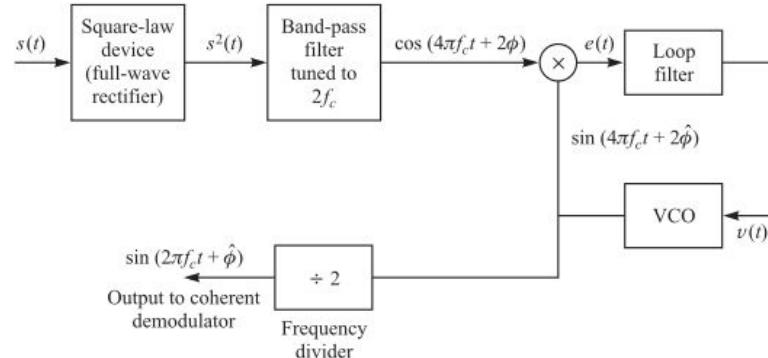
- Decision-directed
- Non-decision-directed

La entrada es la señal recibida, la salida debe ser una señal de igual frecuencia [y fase] que la del LO del transmisor (aunque existen otros esquemas que veremos más adelante).

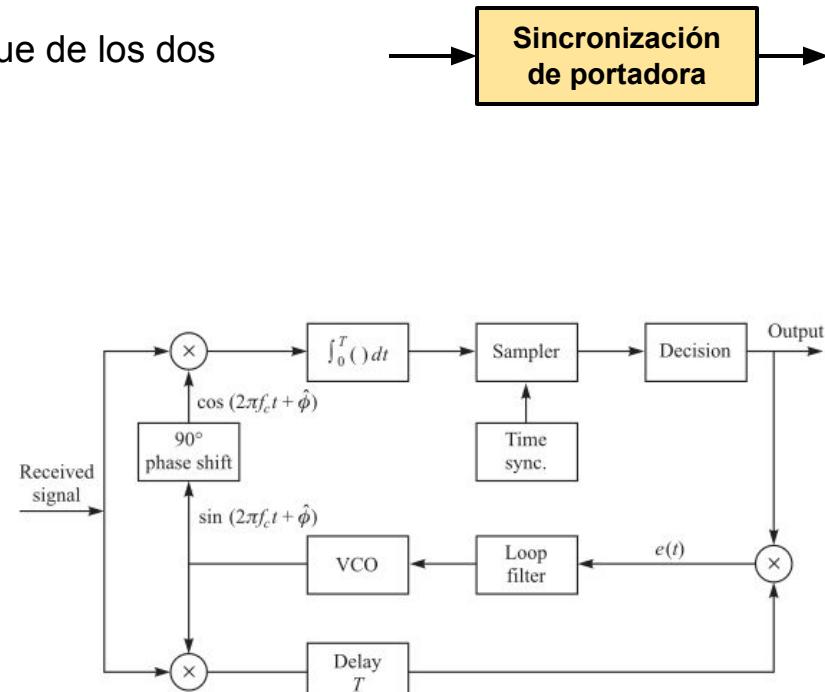
Demodulador

Sincronización de portadora

A modo de ejemplo mostramos unos diagramas en bloque de los dos tipos de sincronizadores:



Non-decision-directed



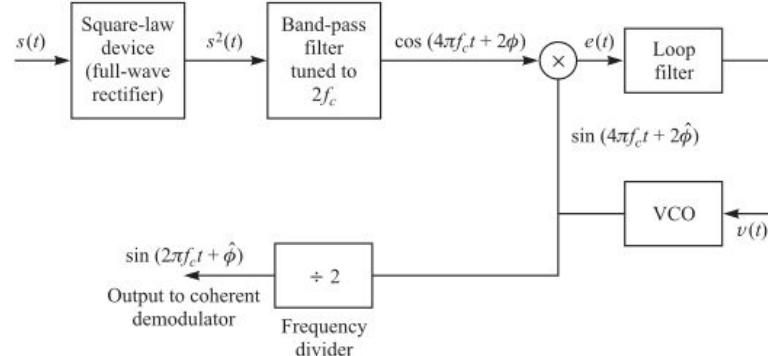
Decision-directed

Sincronización
de portadora

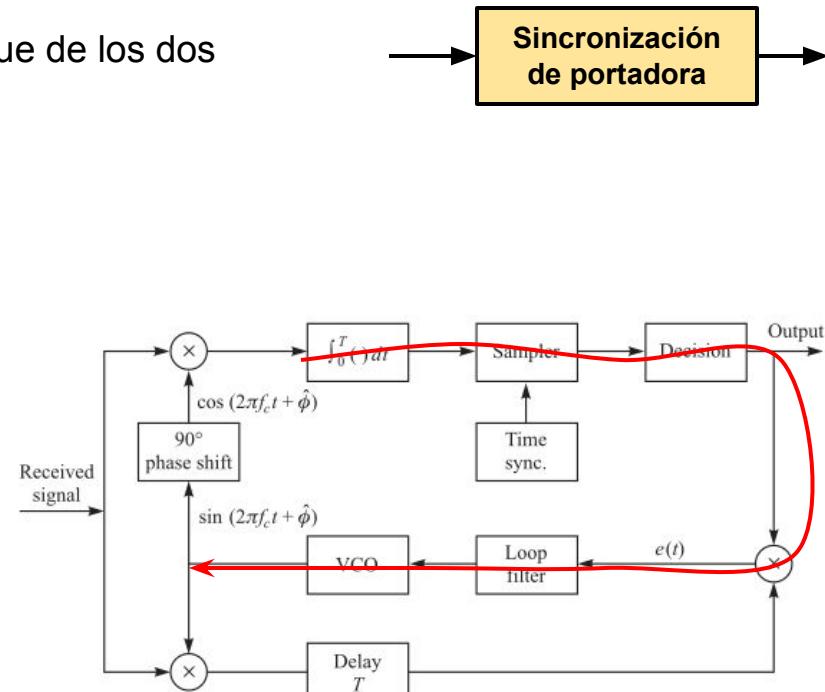
Demodulador

Sincronización de portadora

A modo de ejemplo mostramos unos diagramas en bloque de los dos tipos de sincronizadores:



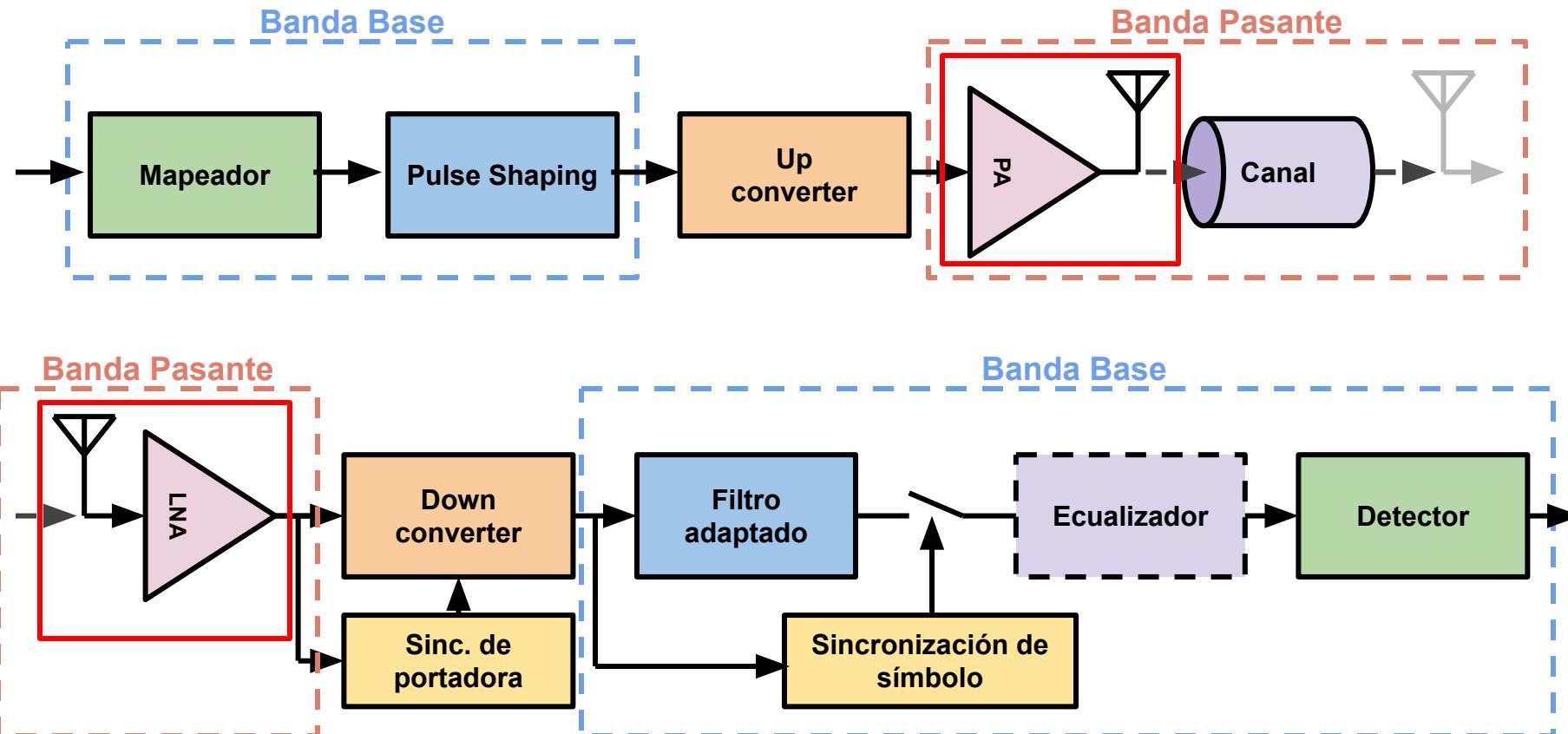
Non-decision-directed



Decision-directed

Demodulador

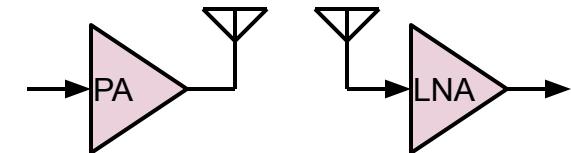
Amplificadores de RF y antenas



Demodulador

Amplificadores de RF y antenas

El amplificador del transmisor debe **aumentar la potencia** de la señal para combatir (junto con las antenas) la **atenuación** introducida por el canal.



El amplificador del receptor debe **amplificar la señal recibida** para poder procesarla más cómodamente, pero teniendo especial cuidado en **mantener un nivel de ruido muy bajo**, ya que la señal recibida suele tener una potencia muy baja.

Estos componentes son puramente analógicos en todos los casos y trabajan en frecuencias de portadora, es decir RF.

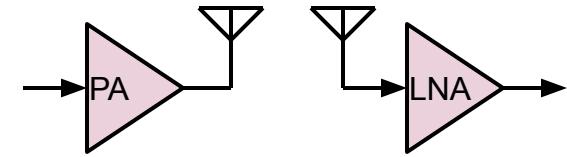
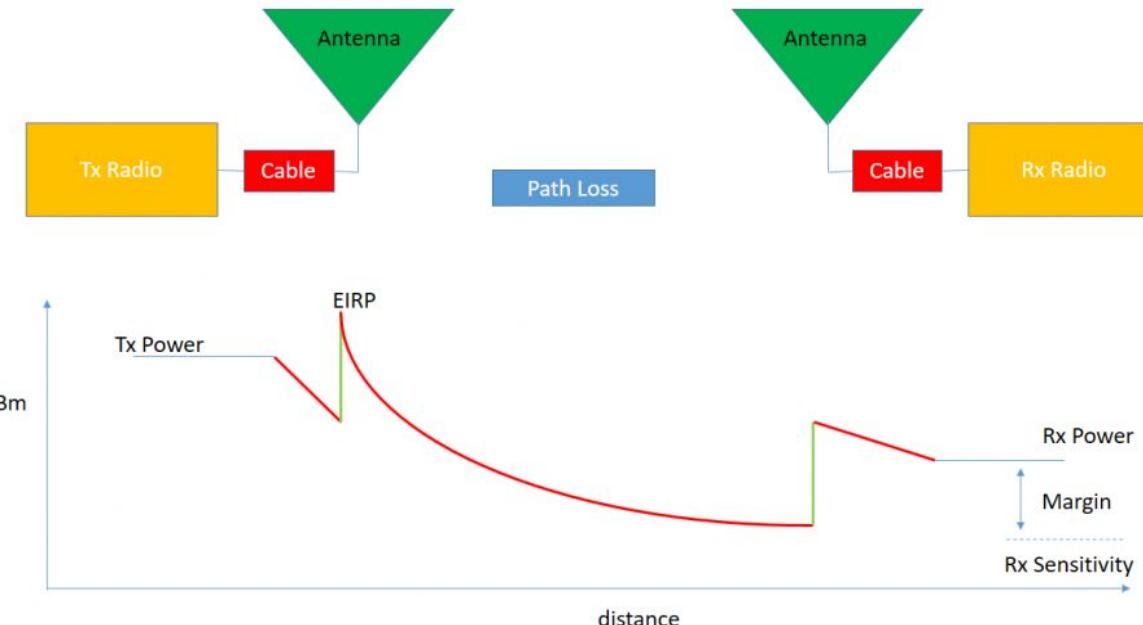
Por suerte para todos no nos vamos a meter en éste área.

Demodulador

Amplificadores de RF y antenas

Margen de potencia del link y presupuesto del link:

Mejor conocido como “*Link Margin*” y “*Link Budget*”.

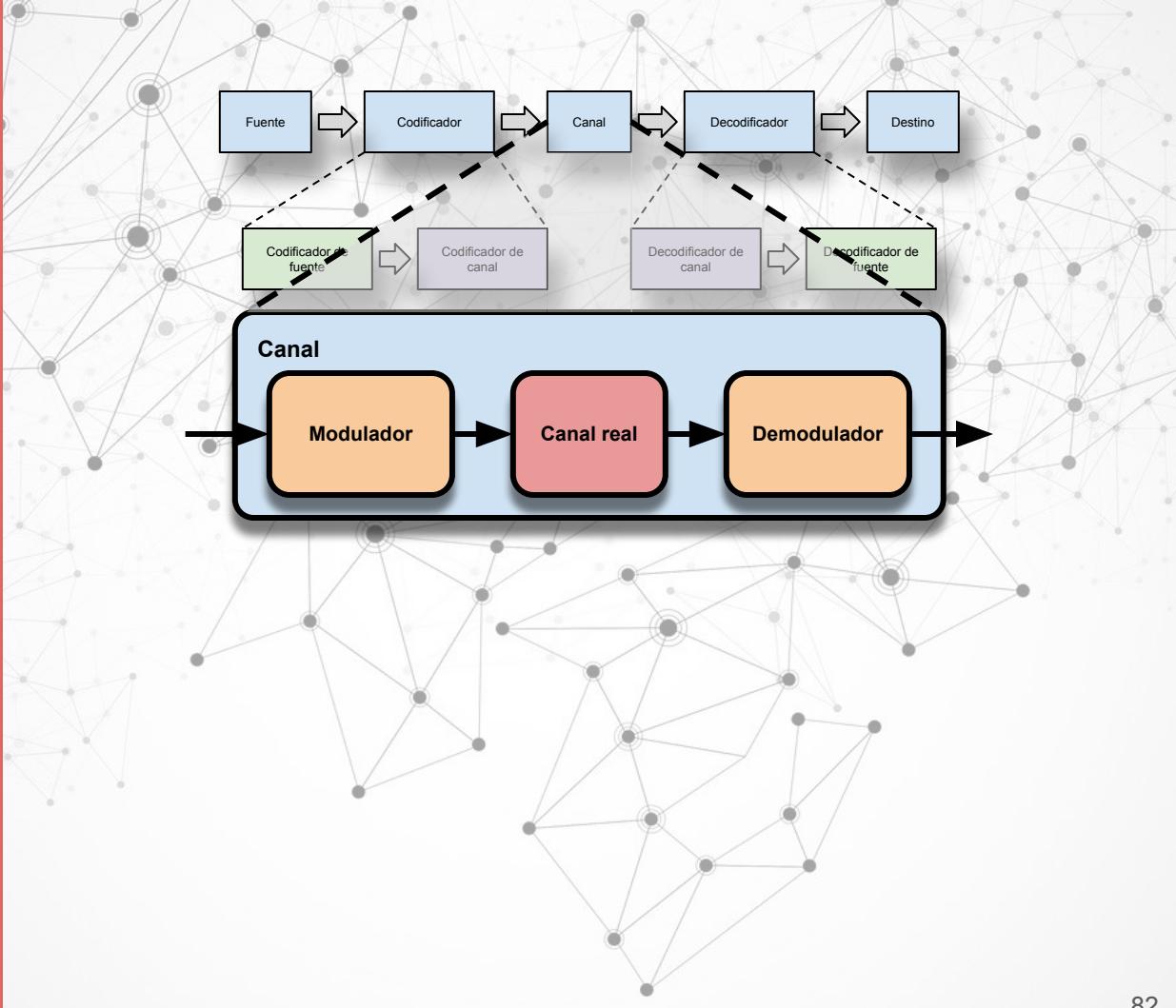


Parámetros:

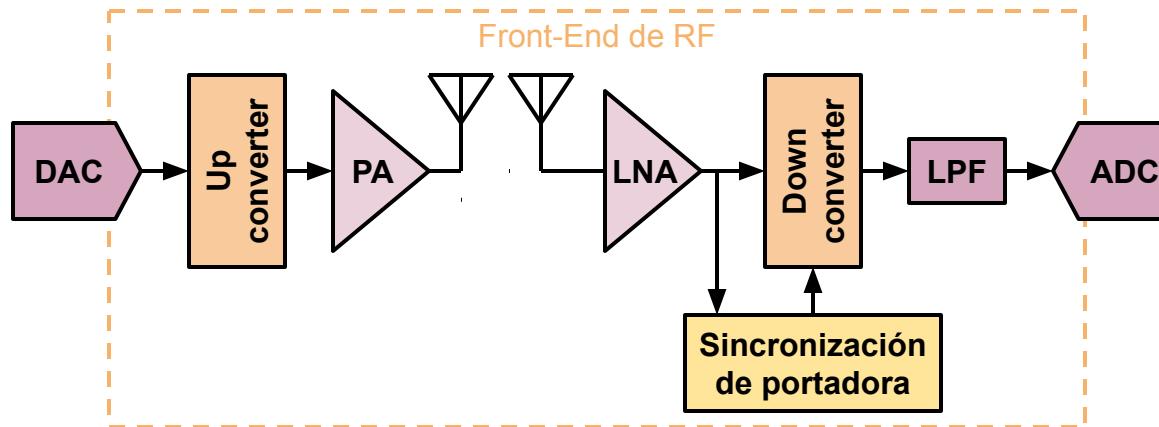
- Potencia de transmisión
- Ganancia de antena TX
- Ganancia de antena RX
- Pérdida de conectores
- Pérdida de cables
- Pérdida en el canal (modelo)
- Sensibilidad del receptor
- Potencia de ruido
- Ancho de banda del ruido

Para cada canal existen diferentes modelos según las condiciones, por ejemplo para RF en espacio abierto o en ciudad.

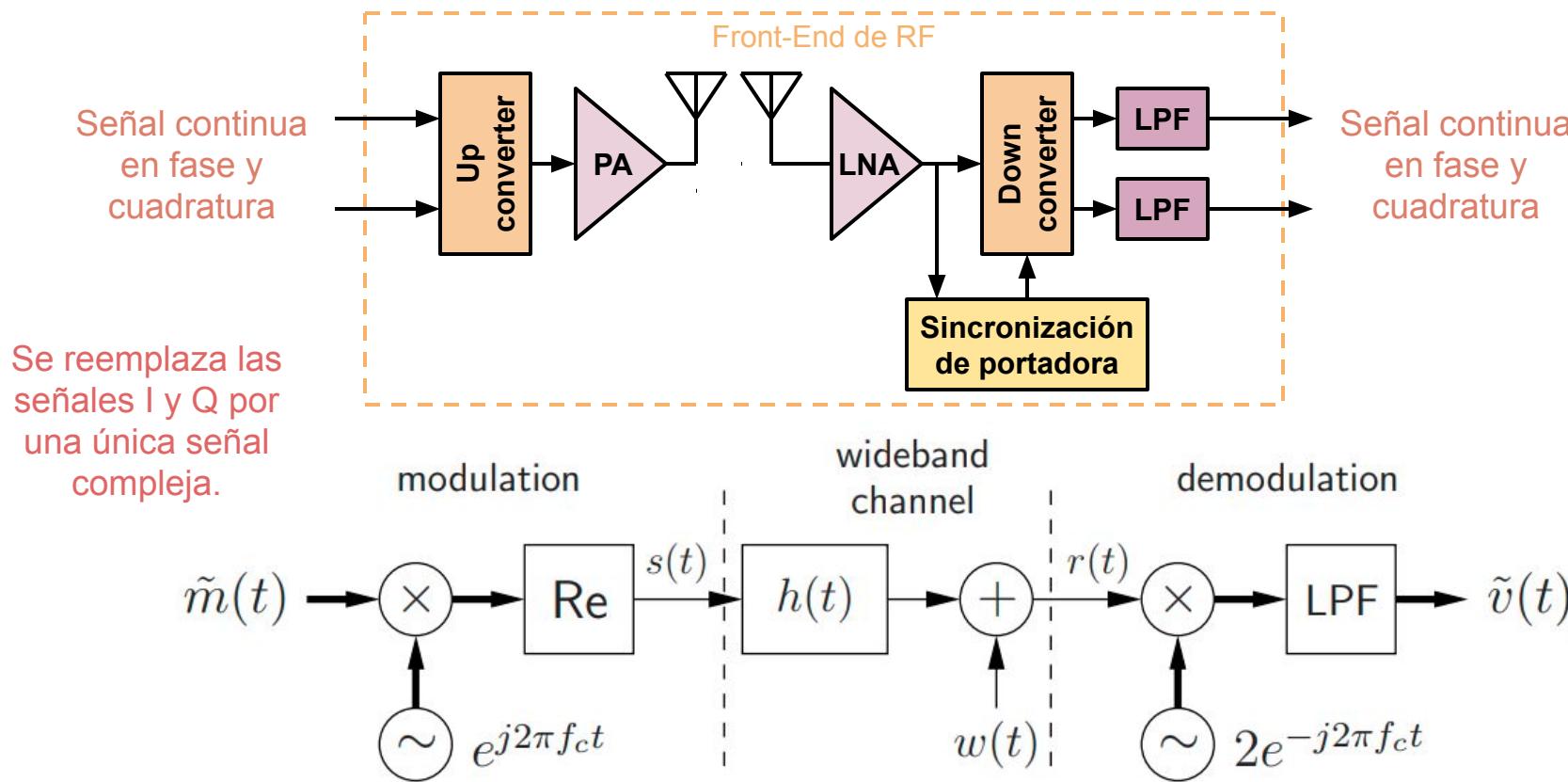
Modelo equivalente de banda base



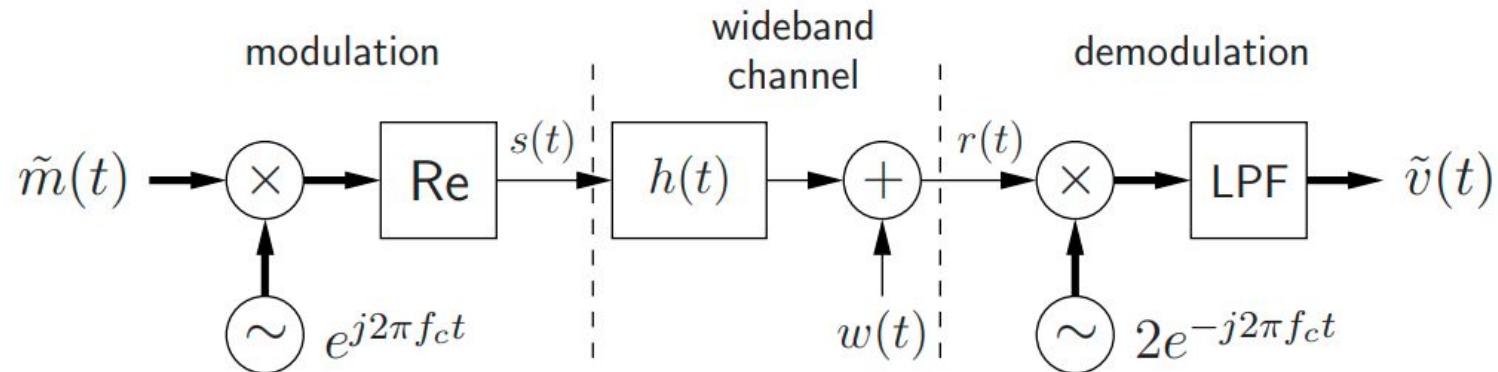
Modelo equivalente de banda base



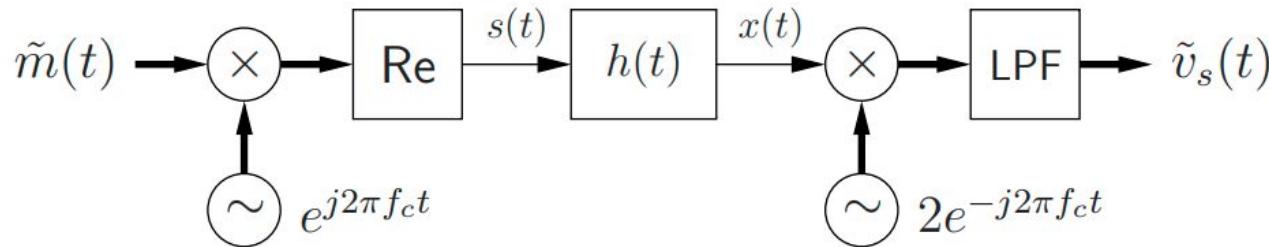
Modelo equivalente de banda base



Modelo equivalente de banda base

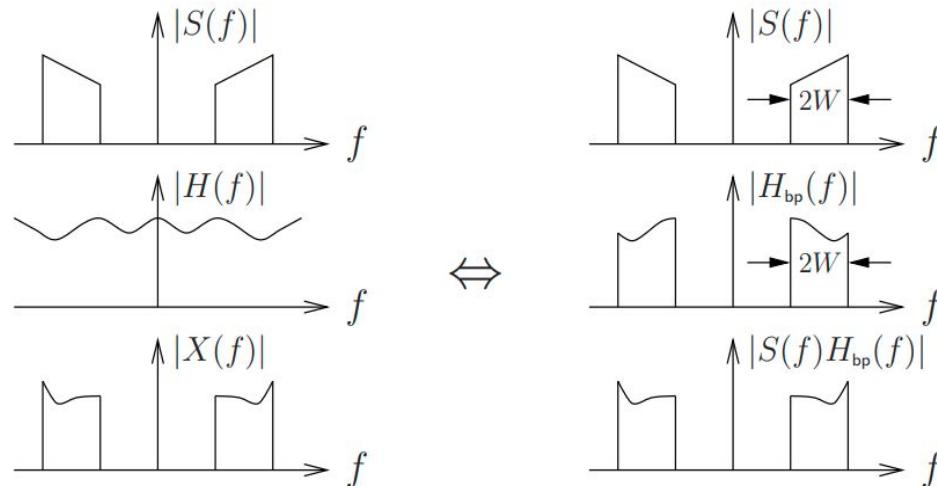


Modelo equivalente de banda base

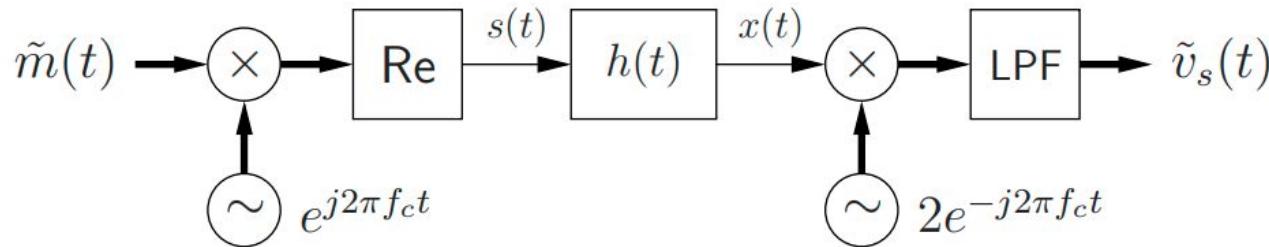


Se quita el ruido aditivo y vemos que ...

...because filtering $s(t)$ with $h(t)$ is equivalent to filtering $s(t)$ with $h_{bp}(t)$:



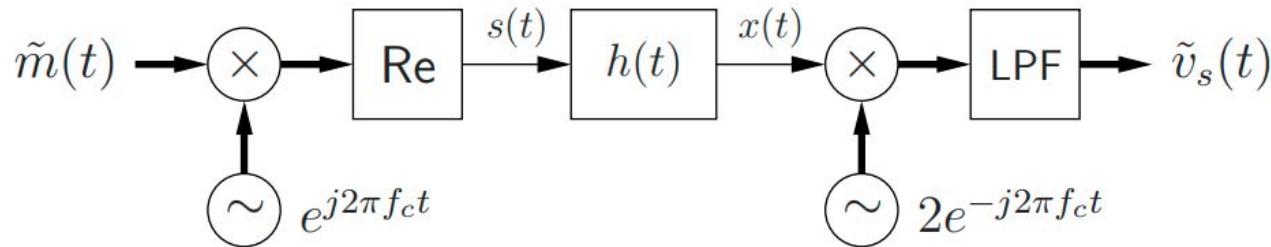
Modelo equivalente de banda base



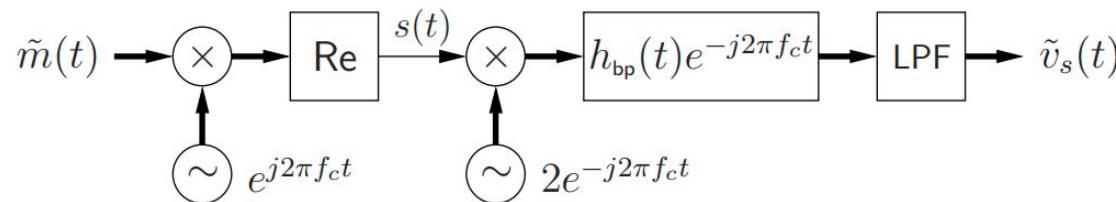
Luego vemos que
vale ...

$$\begin{aligned}[s(t) * h_{\text{bp}}(t)] 2e^{-j2\pi f_c t} &= \int s(\tau) h_{\text{bp}}(t - \tau) d\tau \cdot 2e^{-j2\pi f_c t} \\ &= \int s(\tau) 2e^{-j2\pi f_c \tau} h_{\text{bp}}(t - \tau) e^{-j2\pi f_c (t - \tau)} d\tau \\ &= [s(t) 2e^{-j2\pi f_c t}] * [h_{\text{bp}}(t) e^{-j2\pi f_c t}],\end{aligned}$$

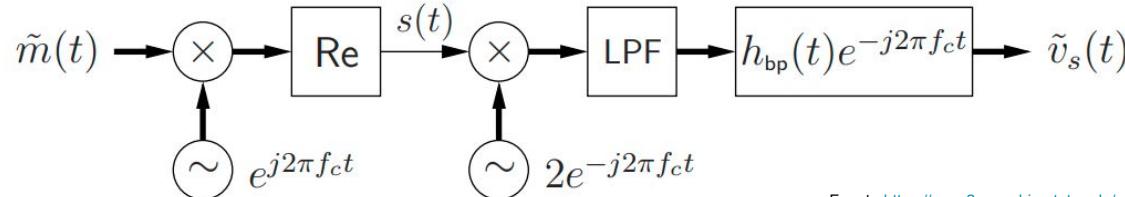
Modelo equivalente de banda base



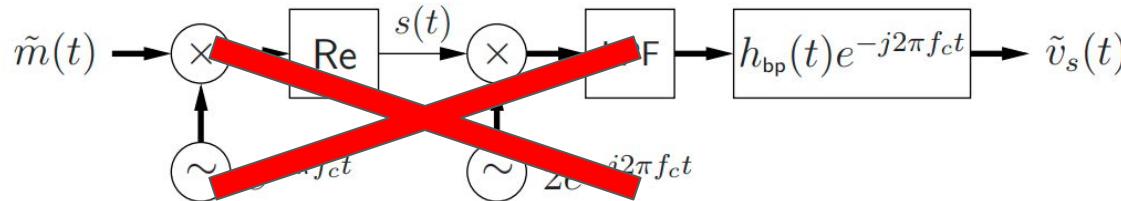
Lo cual significa
que ...



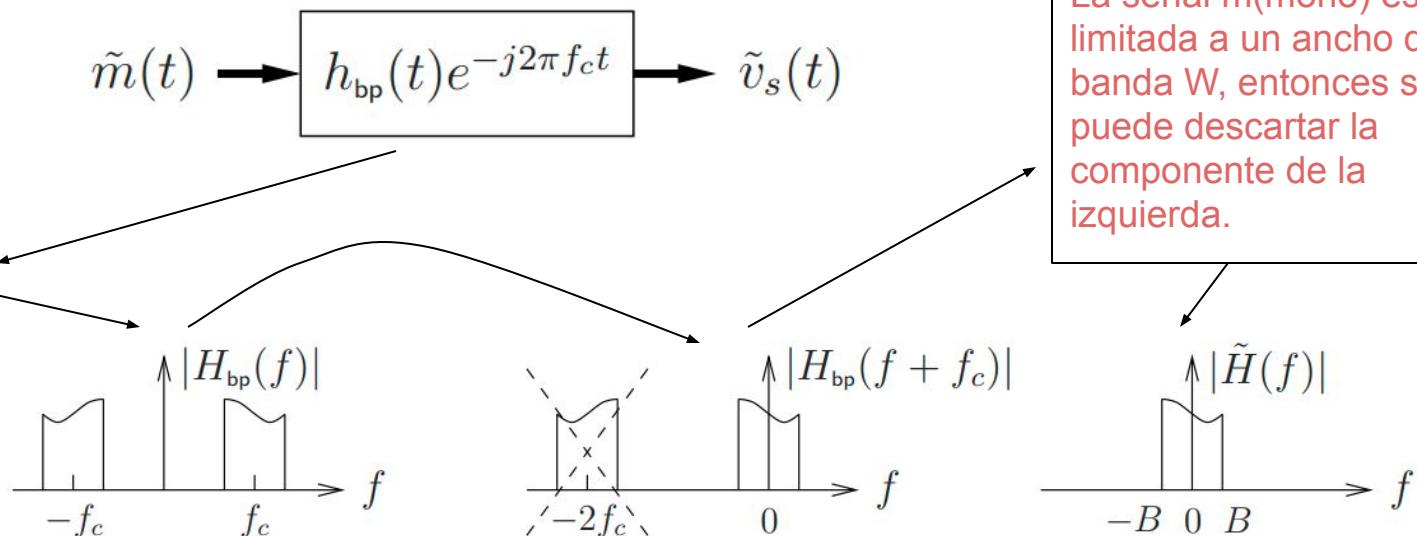
y por ser LTI
también vale ...



Modelo equivalente de banda base

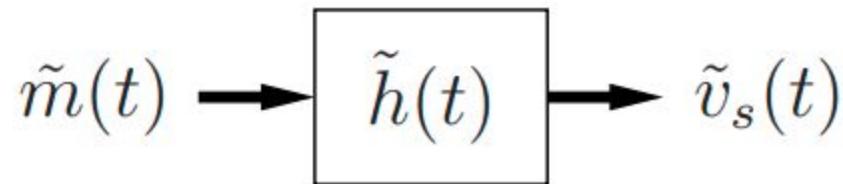


Luego, el up y down conversion se “cancelan” y se obtiene ...



Modelo equivalente de banda base

Finalmente se obtiene

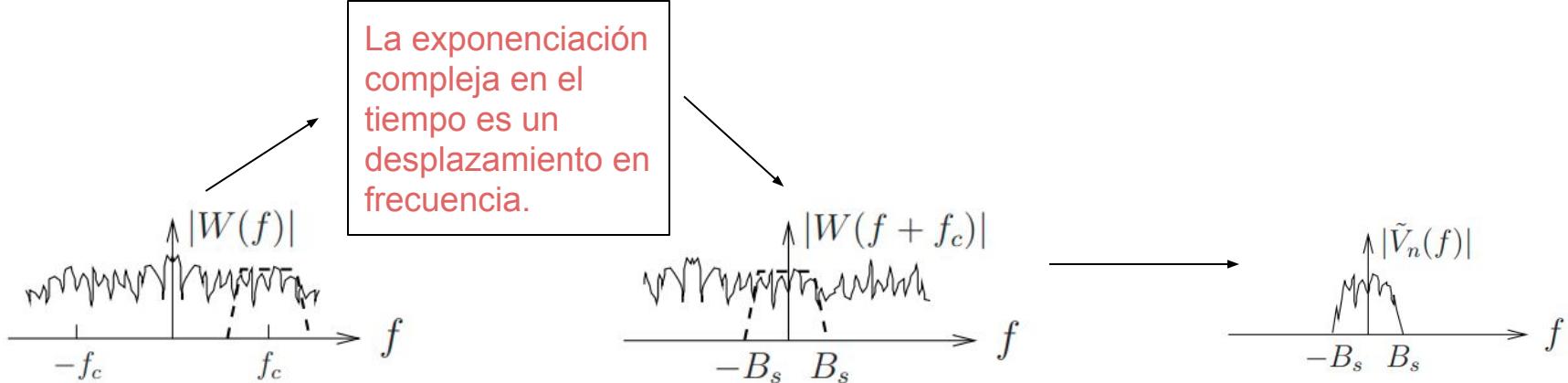
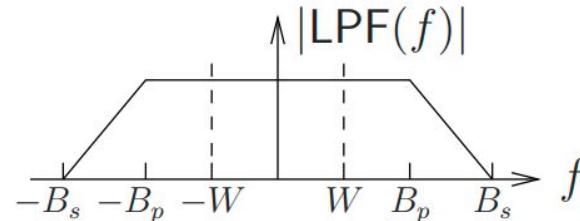
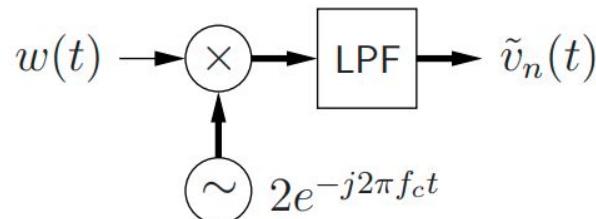


$$\tilde{h}(t) \equiv h_{\text{bp}}(t)e^{-j2\pi f_c t}$$

$$h_{\text{bp}}(t) = \text{Re}\{\tilde{h}(t) \cdot 2e^{j2\pi f_c t}\}$$

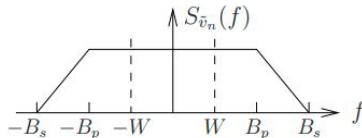
Modelo equivalente de banda base

Ahora consideremos el ruido:



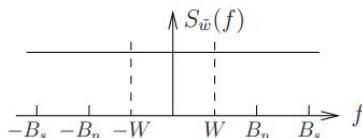
Modelo equivalente de banda base

Say that $w(t)$ is real-valued white noise with power spectral density (PSD) $S_w(f) = N_0$. Since $S_w(f)$ is constant over all f , the PSD of the complex noise $\tilde{v}_n(t)$ will be constant over the LPF passband, i.e., $f \in [-B_p, B_p]$:



A well-designed communications receiver will suppress all energy outside the signal bandwidth W , since it is purely noise. Given that the noise spectrum outside $f \in [-W, W]$ will get totally **suppressed**, *it doesn't matter how we model it!*

Thus, we choose to replace the lowpass complex noise $\tilde{v}_n(t)$ with something simpler to describe: *white complex noise* $\tilde{w}(t)$ with PSD $S_{\tilde{w}}(f) = N_0$:



We'll refer to $\tilde{w}(t)$ as "complex baseband equivalent" noise.

Todo lo que esté por fuera de $+W$ o $-W$ será filtrado, entonces no interesa como lo modelamos.

Podemos entonces reemplazarlo por un ruido w (moño) constante, para que sea más simple su tratamiento.

Modelo equivalente de banda base

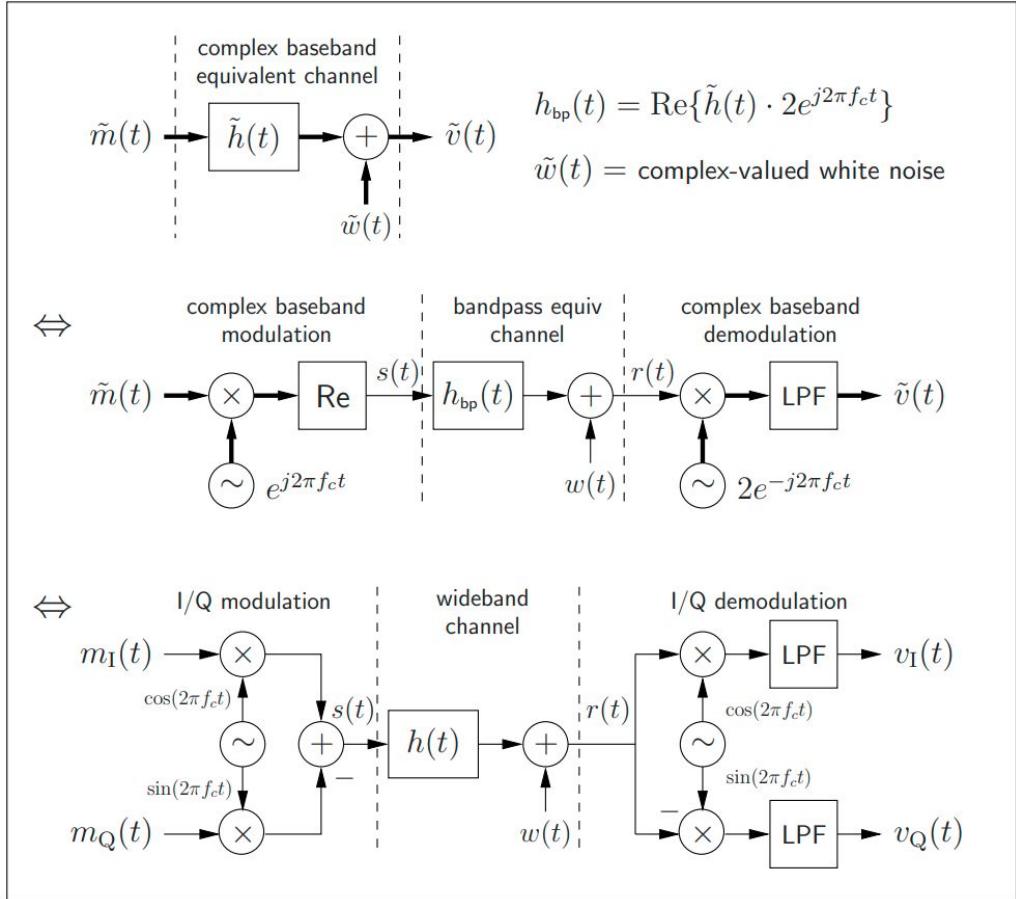
Resumen

Complejidad del modelo

Modelo con señales complejas en banda base.

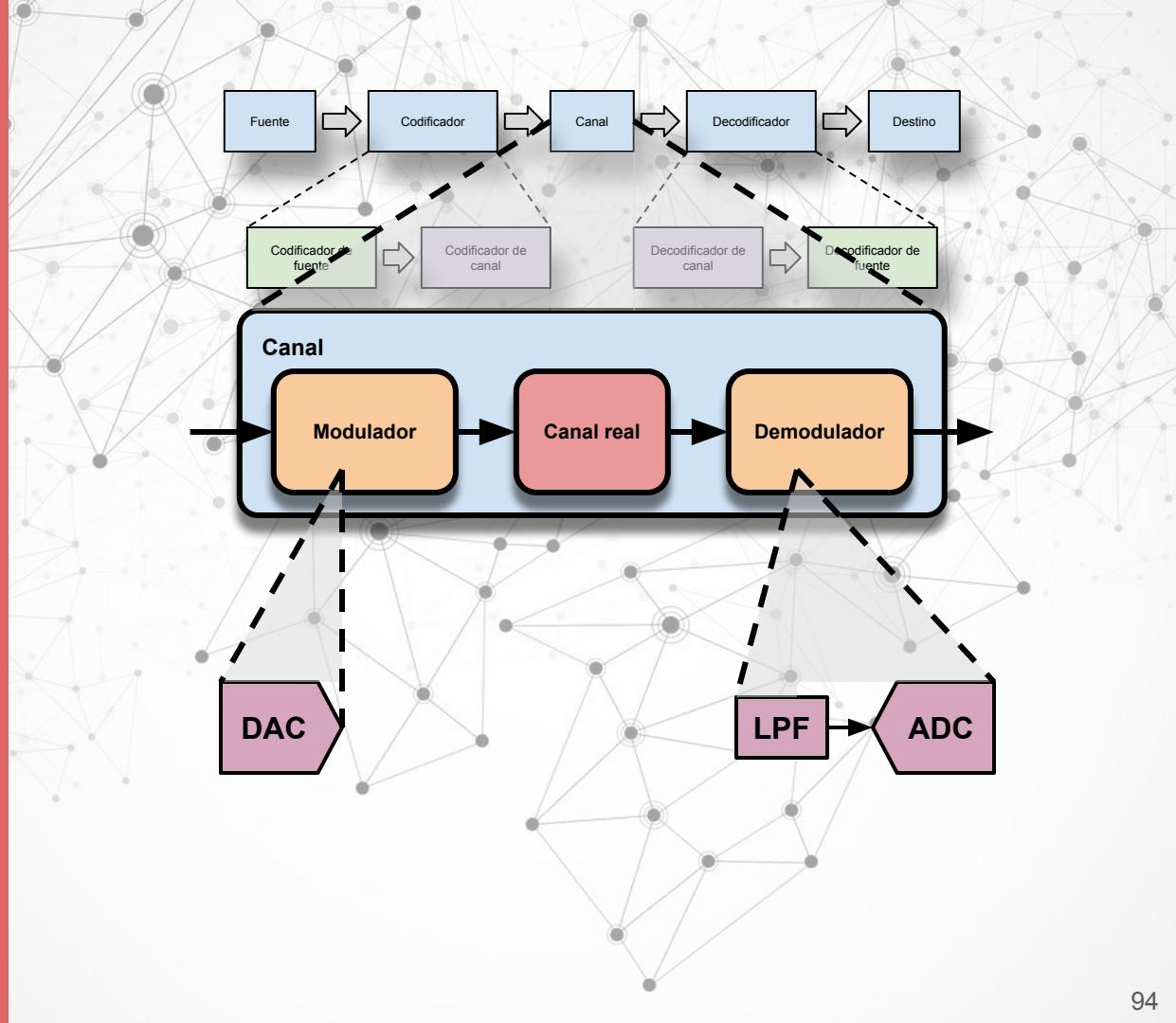
Modelo con señales reales en banda base y señales reales en banda pasante.

Modelo con señales reales en banda base y banda pasante.



Conversión entre señales analógicas y digitales:

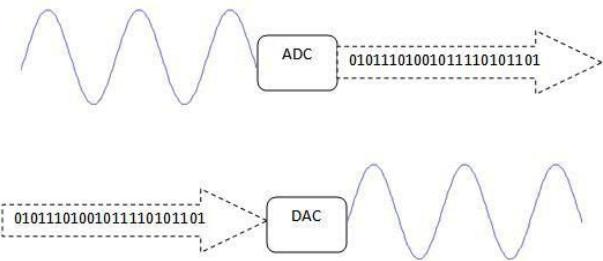
- ADC y DAC
- Dominios continuo y discreto
- Configuraciones típicas
 - Banda base
 - Front-End analógico de RF
 - Sintetizador Digital Directo (DDS)
 - Muestreo directo



Conversión entre señales analógicas y digitales

ADC y DAC

Tanto el ADC como el DAC son componentes no lineales los cuales son siempre más complicados de analizar.



Cuestiones a tener en cuenta del DAC:

- Se utilizan filtro reconstructores para conseguir una señal suave.

En el caso de ADC:

- Considerar **frecuencia de Nyquist**.
- Se debe utilizar un **filtro antialiasing** antes de un ADC.
- Se puede considerar como un **elemento lineal**, el cual introduce un **ruido blanco aditivo**.

Parámetros:

- Rango
- Frecuencia (o período) de muestreo F_s (T_s)
- Número de bits, b
- Linealidad
- Jitter

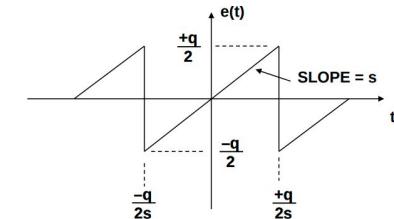
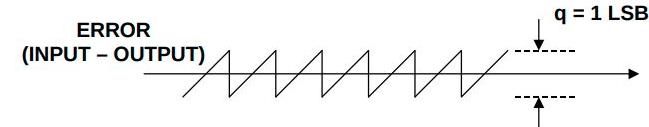
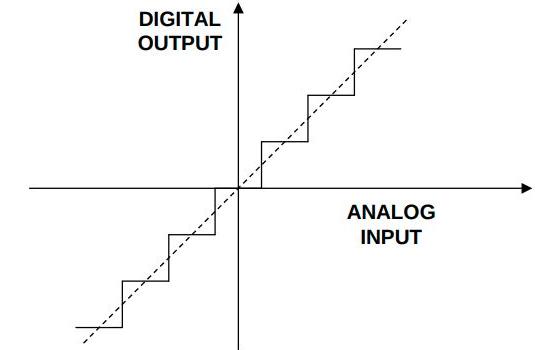
Conversión entre señales analógicas y digitales

ADC y DAC

Modelo lineal del ADC:

- Entrada **analógica** y salida **digital**, entonces existe un **error**.
- Consideramos una señal **senoidal** que ocupe **todo el rango** del ADC
- Si consideramos una señal de 0 a $F_s/2$

$$\text{SNR} = 6.02N + 1.76\text{dB},$$



Fuente: https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-001.pdf.php?title=Link_Budget&mobileaction=toggle_view_desktop

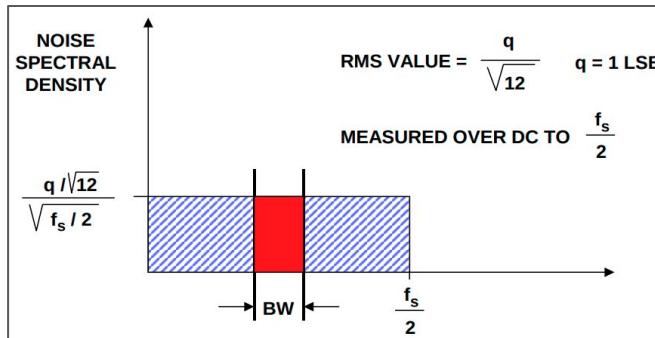
Conversión entre señales analógicas y digitales

ADC y DAC

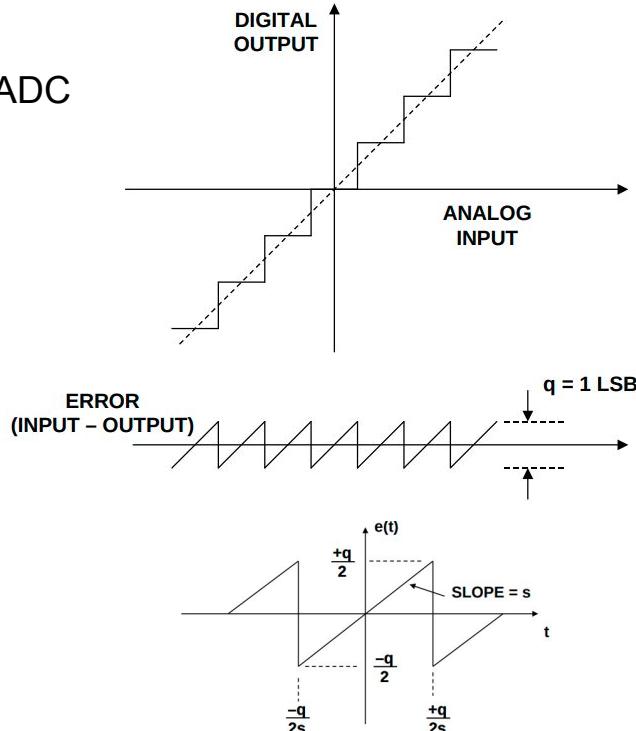
Modelo lineal del ADC:

- Entrada **analógica** y salida **digital**, entonces existe un **error**.
- Consideramos una señal **senoidal** que ocupe **todo el rango** del ADC
- Si consideramos una señal de 0 a $F_s/2$
$$\text{SNR} = 6.02N + 1.76\text{dB},$$
- Si consideramos una señal con ancho de banda BW

$$\text{SNR} = 6.02N + 1.76 \text{ dB} + 10 \log_{10} \frac{f_s}{2 \cdot BW}$$



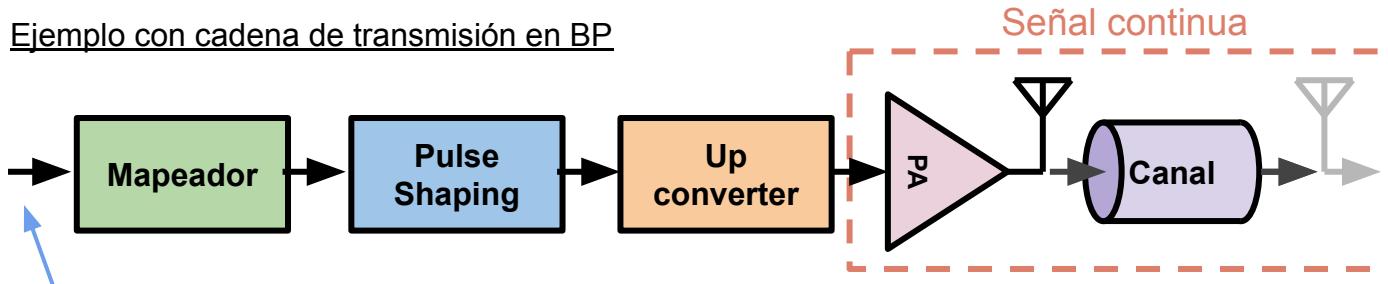
Fuente: https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-001.pdf.php?title=Link_Budget&mobileaction=toggle_view_desktop



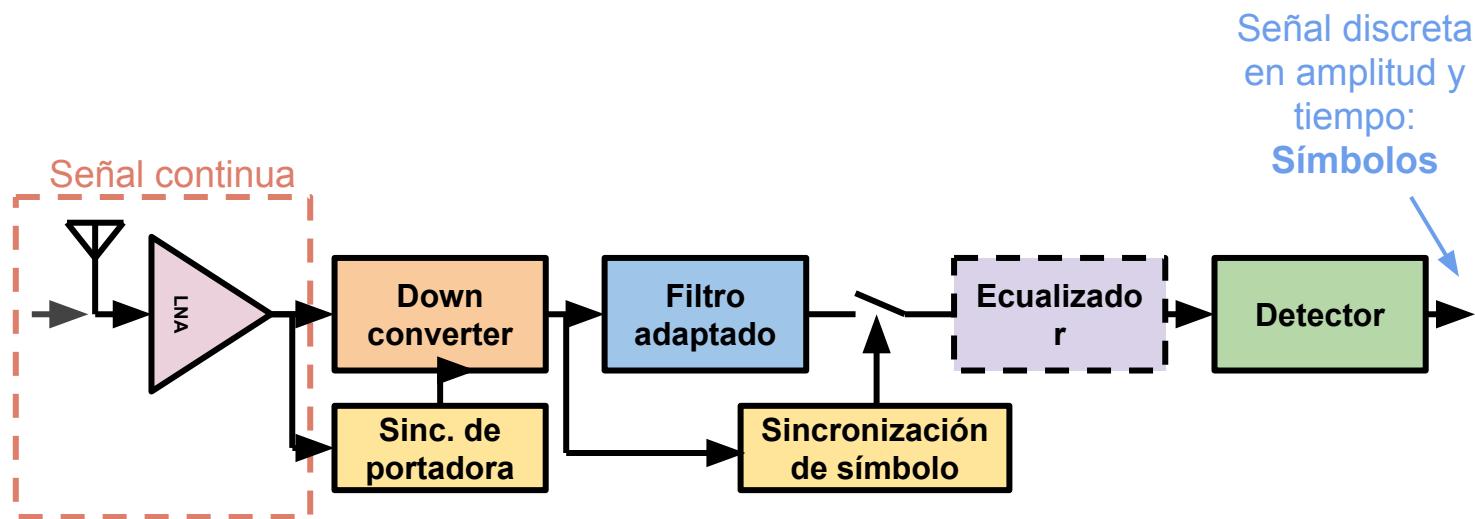
Conversión entre señales analógicas y digitales

Dominio continuo y discreto

Ejemplo con cadena de transmisión en BP



Señal discreta
en amplitud y
tiempo:
Símbolos

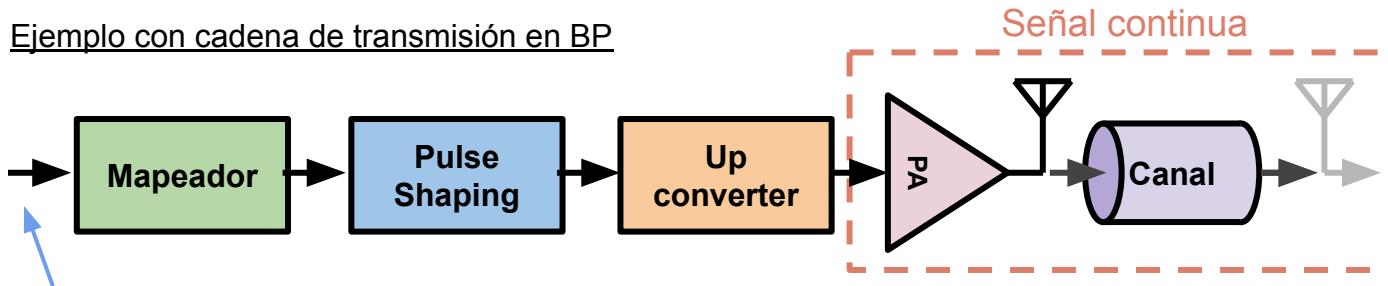


Señal discreta
en amplitud y
tiempo:
Símbolos

Conversión entre señales analógicas y digitales

Dominio continuo y discreto

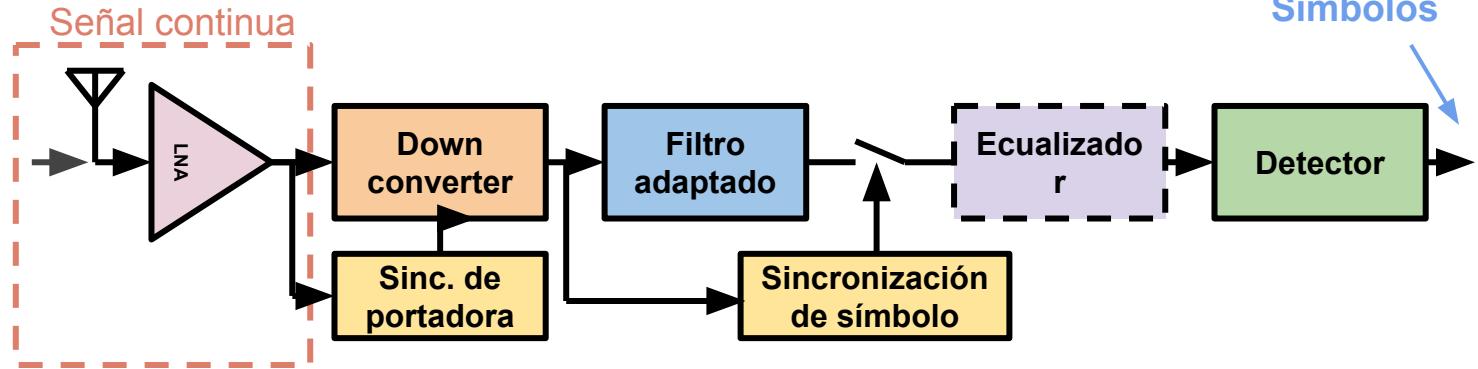
Ejemplo con cadena de transmisión en BP



Señal discreta
en amplitud y
tiempo:
Símbolos

¿y el resto?

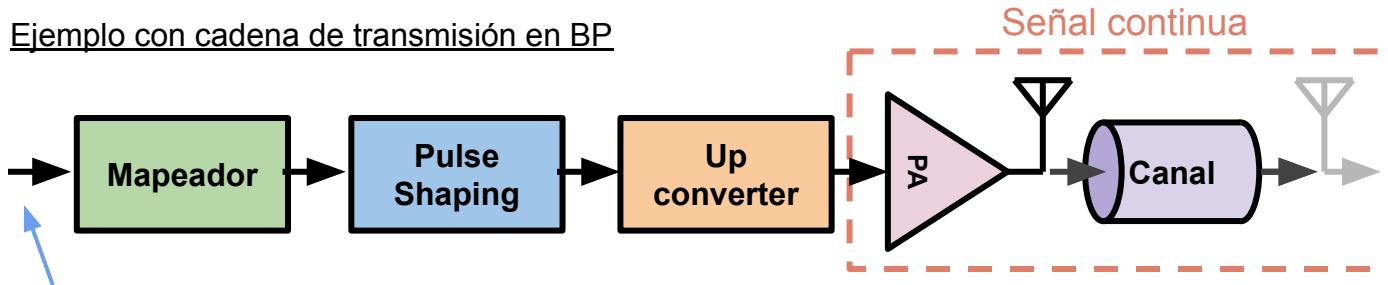
Señal discreta
en amplitud y
tiempo:
Símbolos



Conversión entre señales analógicas y digitales

Dominio continuo y discreto

Ejemplo con cadena de transmisión en BP

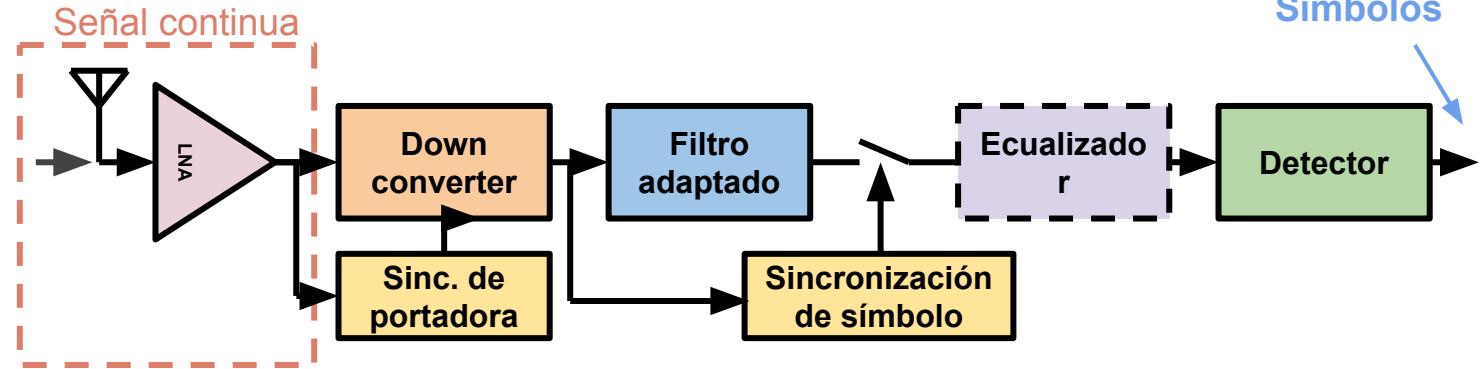


Señal discreta
en amplitud y
tiempo:
Símbolos

La conversión entre analógico y digital puede realizarse en **cualquier parte de la cadena** de TX y RX. Va a depender del sistema que se implemente.

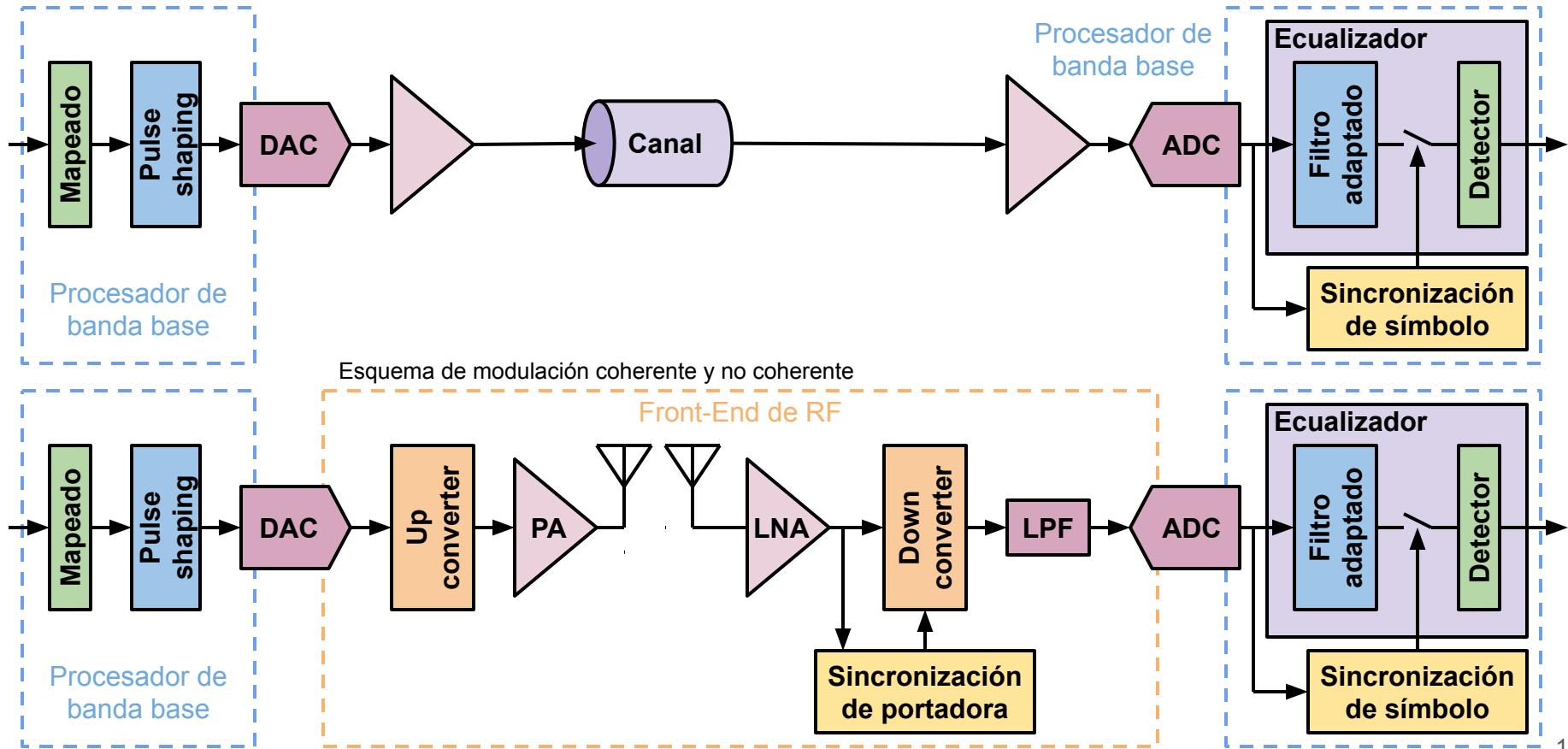
¿y el resto?

Señal discreta
en amplitud y
tiempo:
Símbolos



Conversión entre señales analógicas y digitales

Configuraciones típicas



Conversión entre señales analógicas y digitales

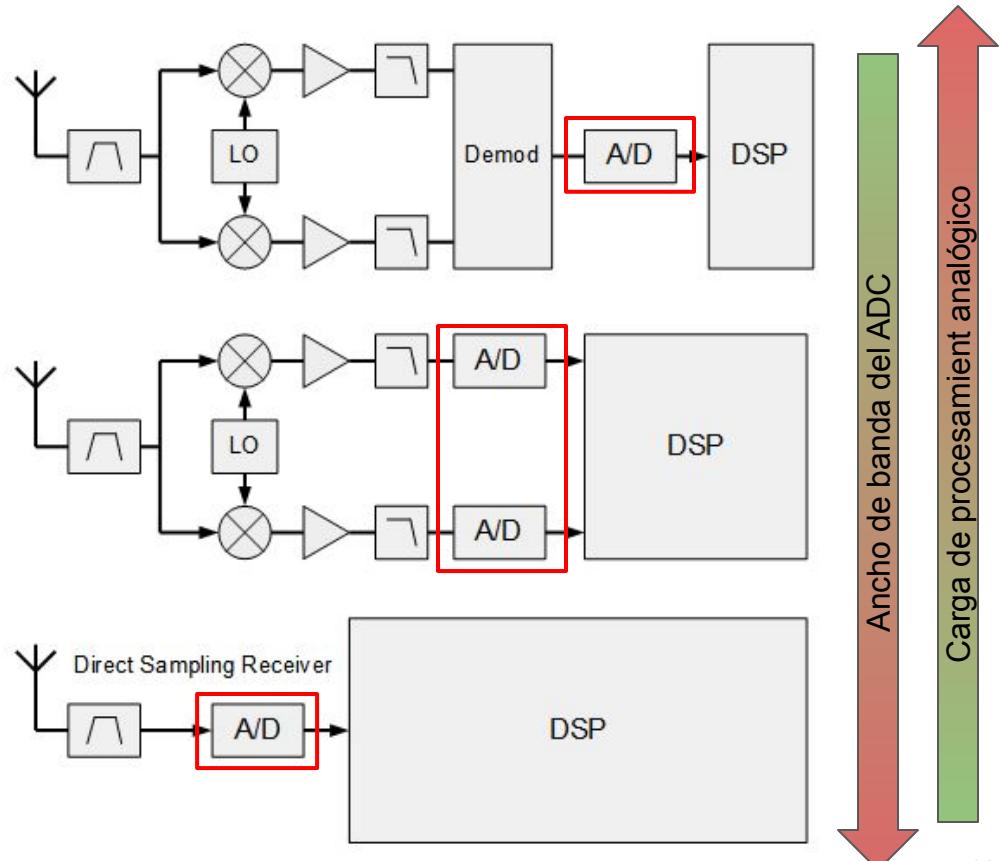
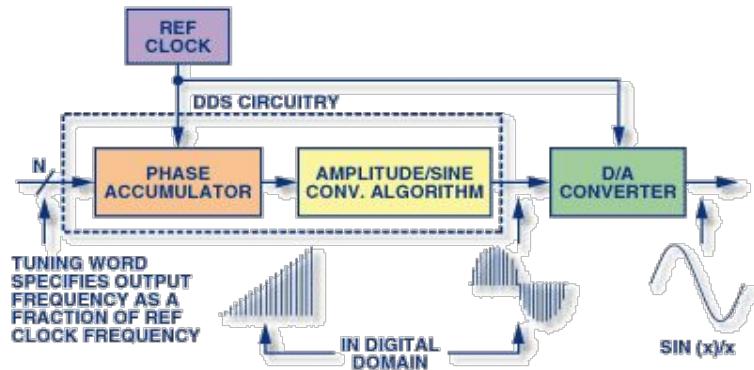
Configuraciones típicas

Otras configuraciones para el transmisor:

- DDS

Otras configuraciones para el receptor:

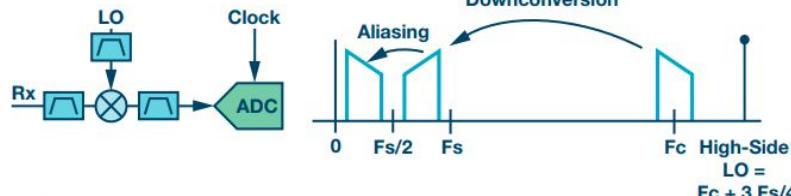
- Demodulación analógica
- Conversión directa
- Muestreo directo



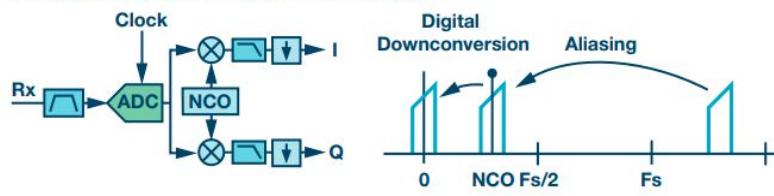
Conversión entre señales analógicas y digitales

Configuraciones típicas

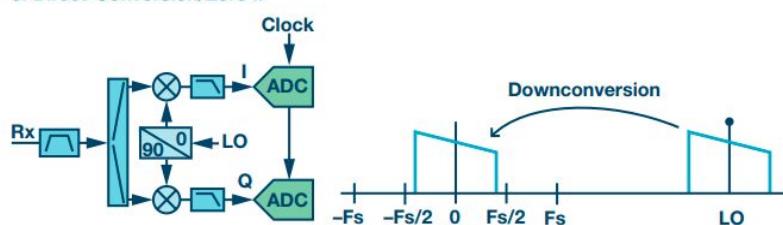
a. Heterodyne with 2nd Nyquist IF Sampling



b. Direct Sampling with Digital Downconversion

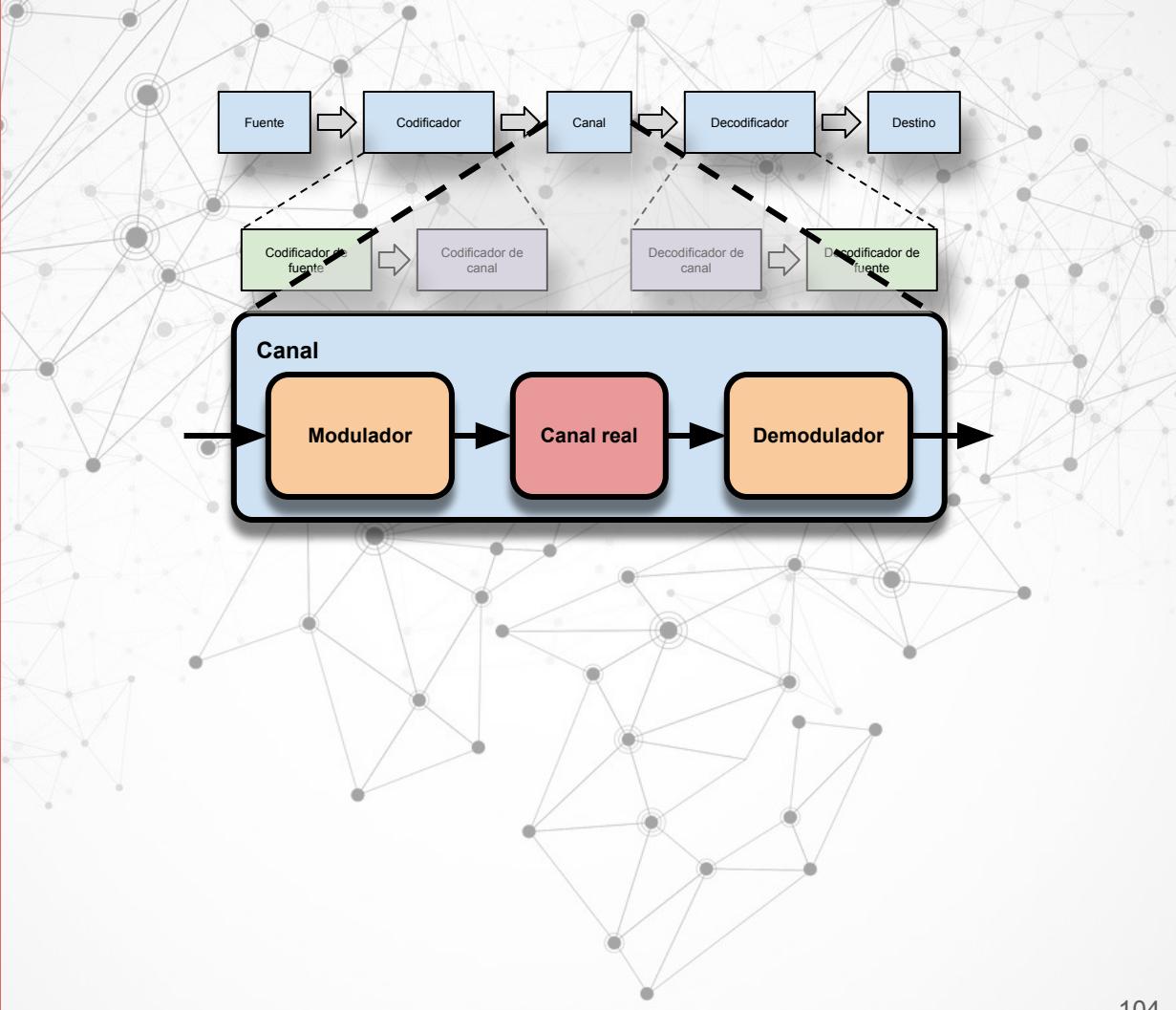


c. Direct-Conversion/Zero IF



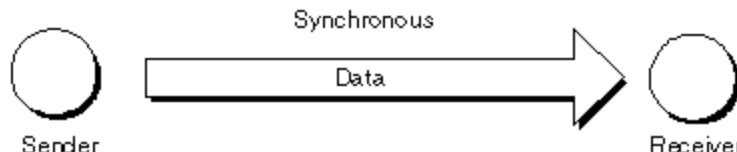
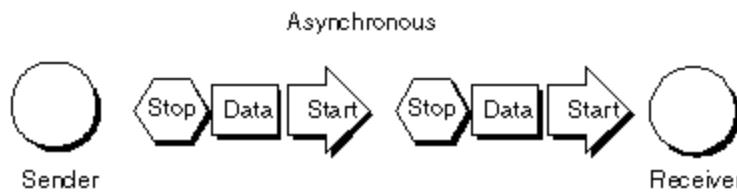
Type	Configuration	Benefits	Challenges
Heterodyne		<ul style="list-style-type: none">Proven trustedHigh performanceOptimum spurious noiseHigh dynamic rangeEMI immunity	<ul style="list-style-type: none">SWaPMany filters
Direct Sampling		<ul style="list-style-type: none">No mixingPractical at L-, S-band	<ul style="list-style-type: none">ADC input bandwidthGain not distributed across frequency
Direct-Conversion		<ul style="list-style-type: none">Maximum ADC bandwidthSimplest wideband option	<ul style="list-style-type: none">Image rejection<ul style="list-style-type: none">I/Q balanceIn-band IF harmonicsLO radiationEMI immunity (IP2)DC and 1/f noise

Sistemas de comunicación sincrónicos y asincrónicos



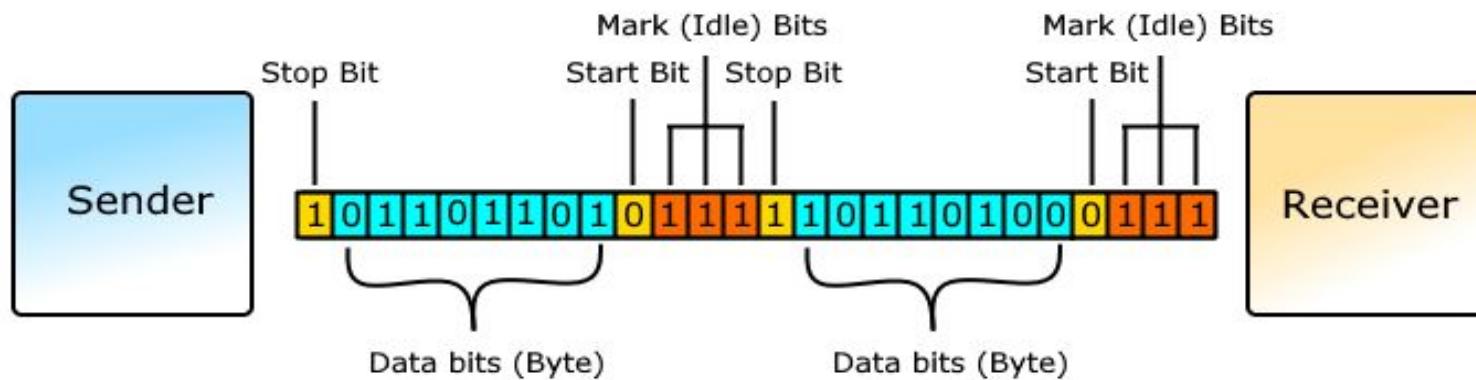
Sistemas de comunicación sincrónicos y asincrónicos

Sincrónico	Asincrónico
Mayor tasa de transmisión	Menor tasa de transmisión
Reloj común a TX y RX, o compartido	Sin reloj común
Tiempo de inicialización alto	Tiempo de inicialización bajo, se puede transmitir en cualquier momento



Sistemas de comunicación sincrónicos y asincrónicos

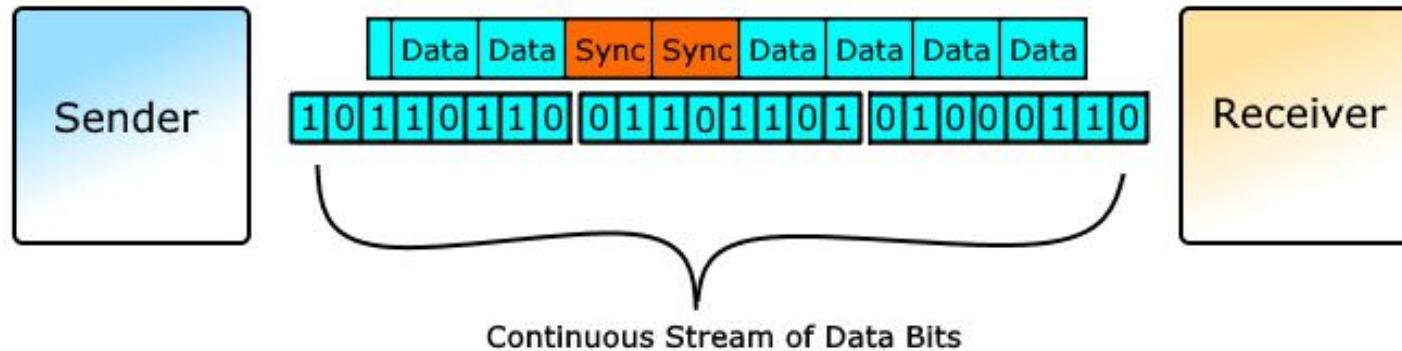
Asincrónico



Asynchronous Transmission

Sistemas de comunicación sincrónicos y asincrónicos

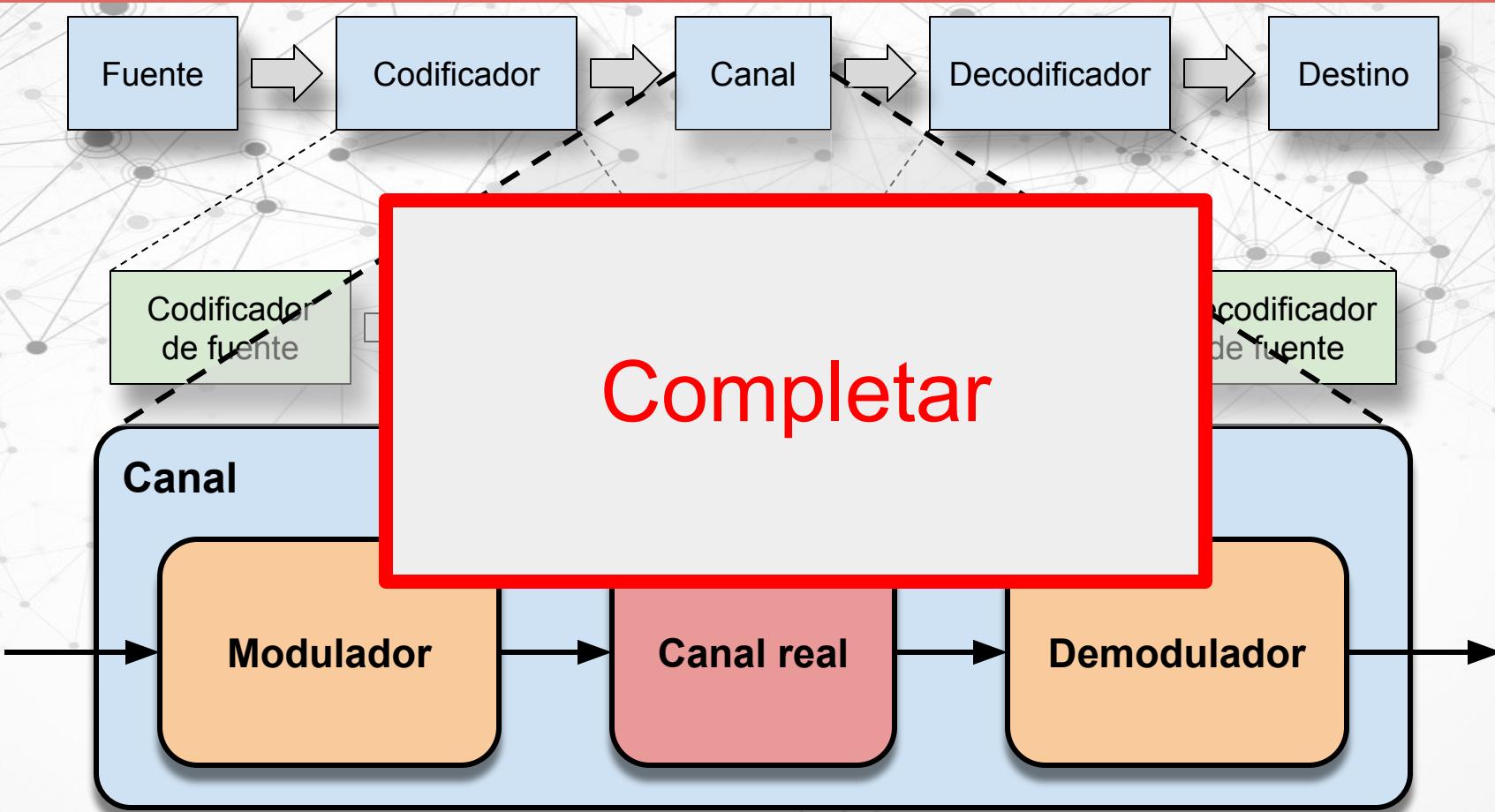
Sincrónico



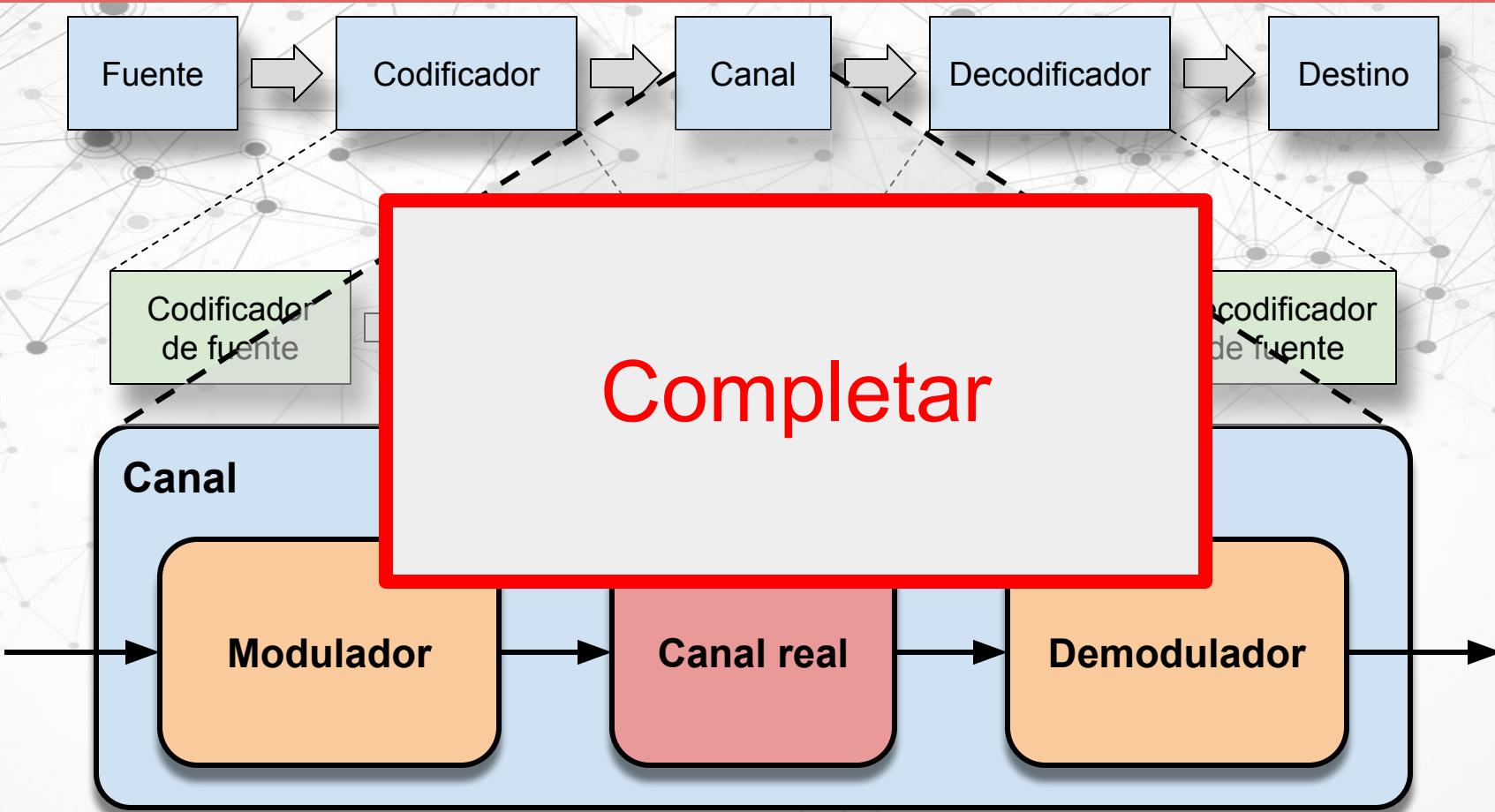
Synchronous Transmission

Si no hay datos para transmitir se transmiten paquetes vacíos, para no perder la sincronización.

Resumen y siguientes pasos



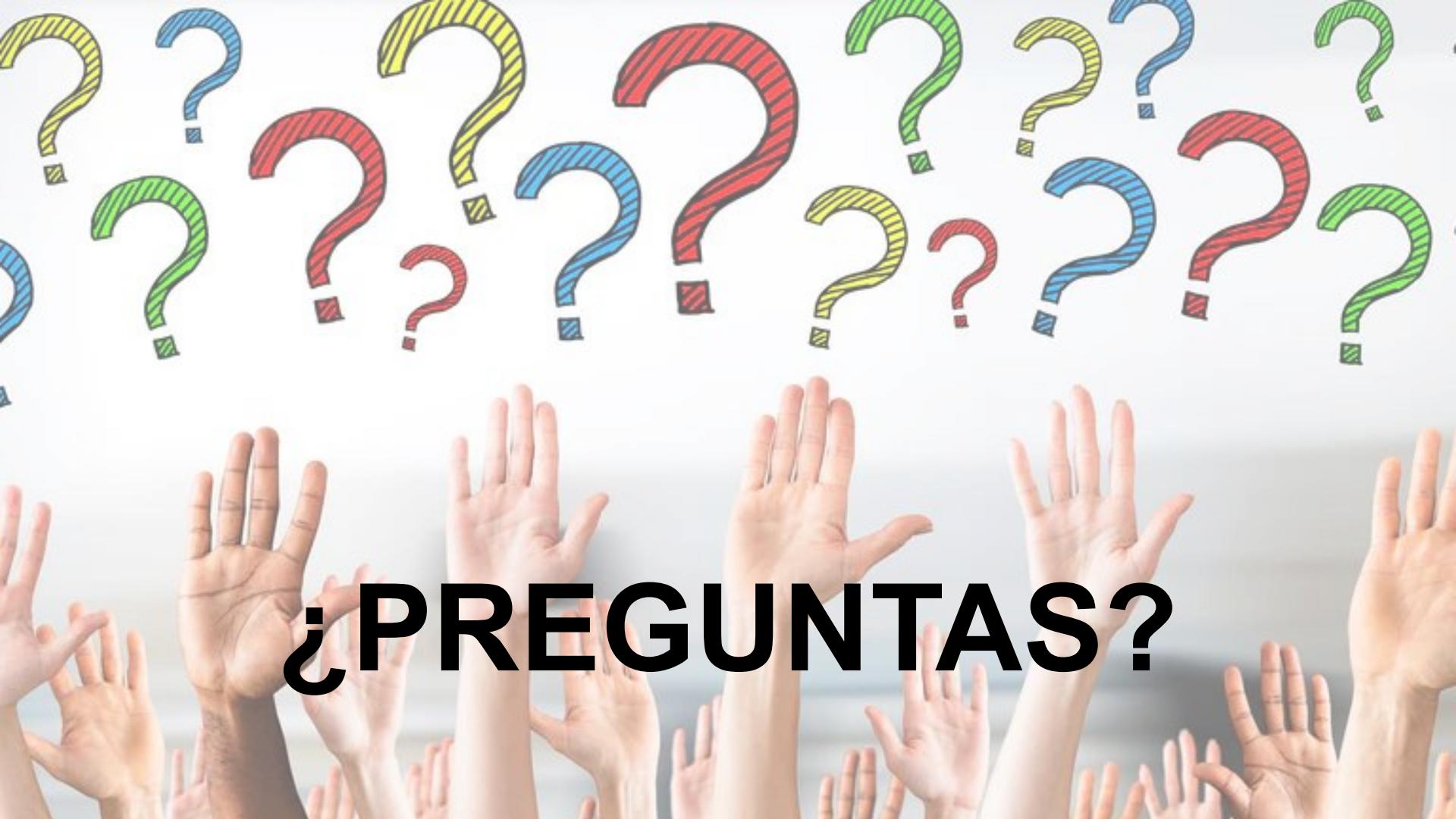
Resumen y siguientes pasos



Bibliografía y fuentes

Bibliografía:

- “*Digital Communication*”, John G. Proakis, Masoud Salehi, 5th edition.
- B. P. Lathi. 1998. “*Modern Digital and Analog Communication Systems 3e Osece*” (3rd. ed.). Oxford University Press, Inc., USA.
- Ecualización. SRM University, “Linear and non-linear equalizers”, clase online:
https://webstor.srmist.edu.in/web_assets/srm_mainsite/files/files/Linear&nonlinearequalizers.pdf
- Bernard Sklar. 1988. “*Digital communications: fundamentals and applications*”. Prentice-Hall, Inc., USA.
- John M. Cioffi. Libro Online: <https://cioffi-group.stanford.edu/doc/book/>
- Presupuesto del link: Ermanno Pietrosemoli, Marco Zennaro, ICTP, “*Link Budget Calculation*”
<https://www.internetsociety.org/wp-content/uploads/2017/10/Link-Budget-Calculation.pdf>
- Peter Delos, “*A Review of Wideband RF Receiver Architecture Options*”, Analog Devices Inc.,
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/Review-of-Wideband-RF-Receiver-Architecture-Options.pdf>
- Modelo equivalente de band base: Phil Schniter, “*Complex-Baseband Equivalent Channel*”,
https://www2.ece.ohio-state.edu/~schniter/ee501/handouts/slides_cmplxbb.pdf



¿PREGUNTAS?



¡Gracias!