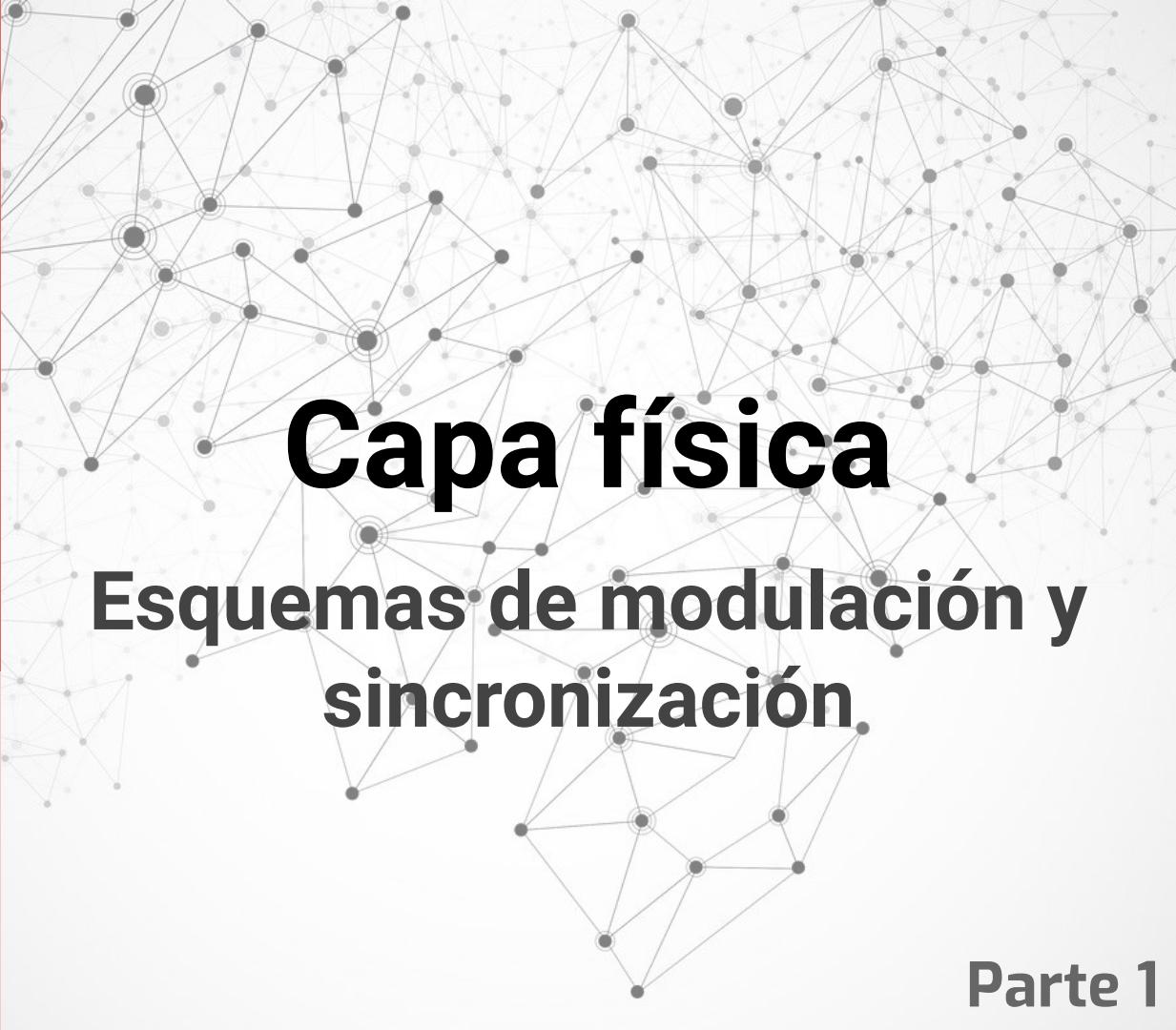


**Maestría en  
Sistemas Embebidos**

Sistemas Digitales  
para las  
Comunicaciones



# **Capa física**

## **Esquemas de modulación y sincronización.**

# Cronograma

Parte 0

Parte 1

Parte 2

Parte 3

Parte 4

Parte 5

Parte 6

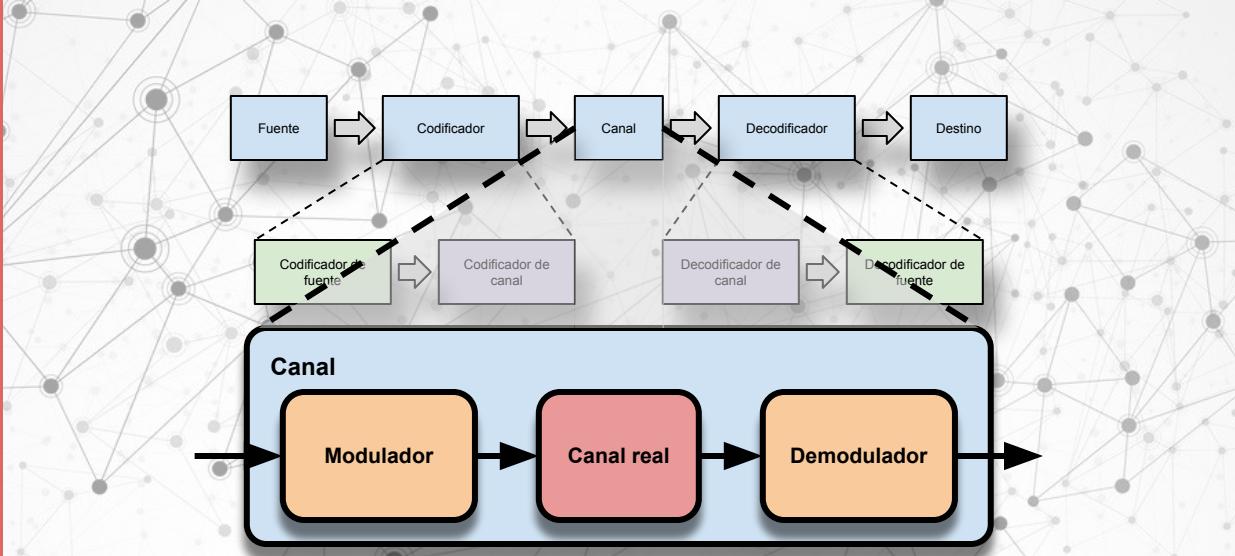
## Parte 1: Capa física - Esquemas de modulación y sincronización.

- 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.
- Conversión analógica-digital y digital-analógica.
- Modelo equivalente de banda base.

# Canales:

- **Canal real**

- Ejemplos
- Características
- Modelos

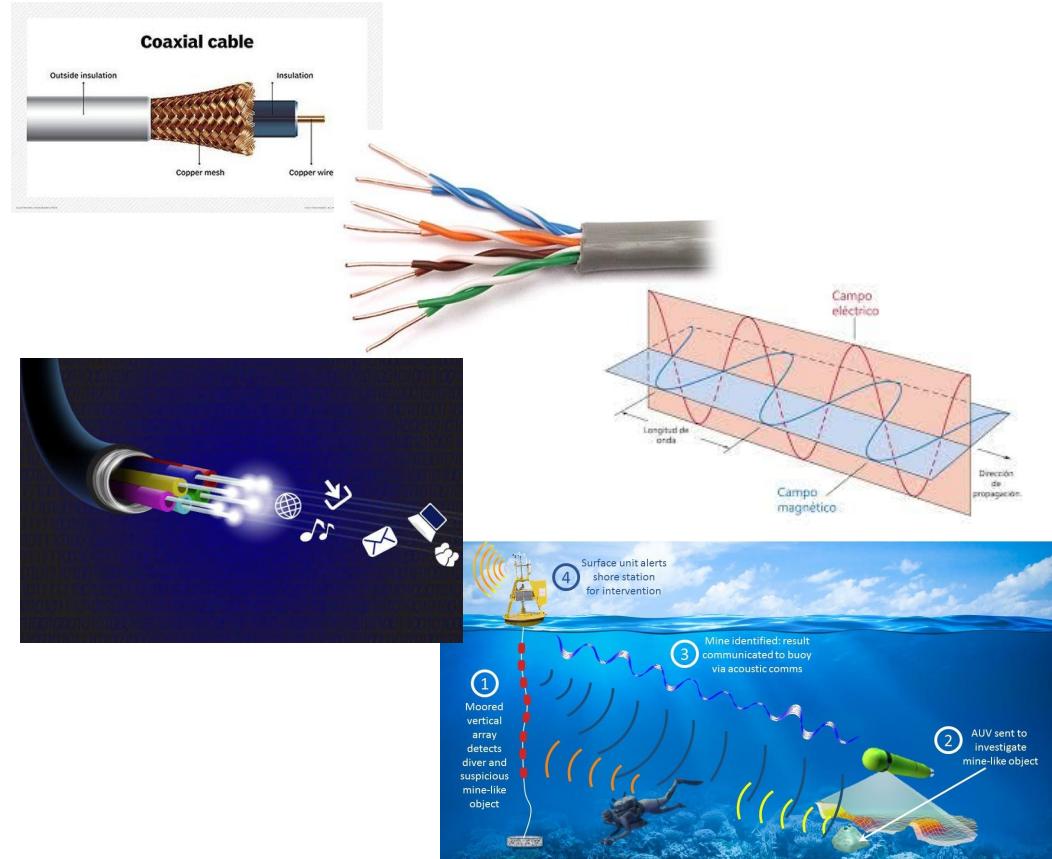


# Canales

## Ejemplos

Los canales pueden clasificarse en:

- Cableados
- Ópticos
  - Fibra óptica
  - En el espacio
- Inalámbricos (Electromagnéticos)
- Acústicos (mecánicos):
  - Acuáticos
  - A través del aire
- Dispositivos de almacenamiento



# Canales

## Características y modelos

Para caracterizar los canales  
matemáticamente consideramos:

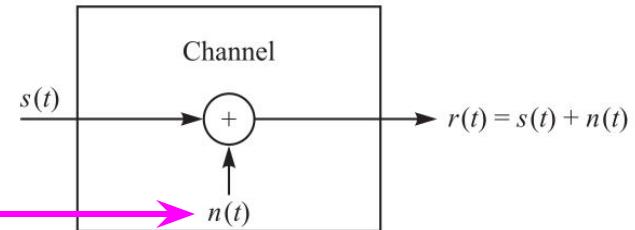
- Ruido

# Canales

## Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

- Ruido

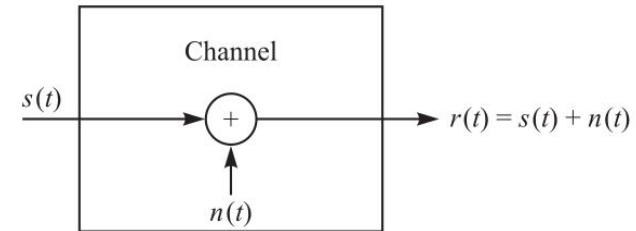


# Canales

## Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

- Ruido
- Respuesta en frecuencia
- Atenuación

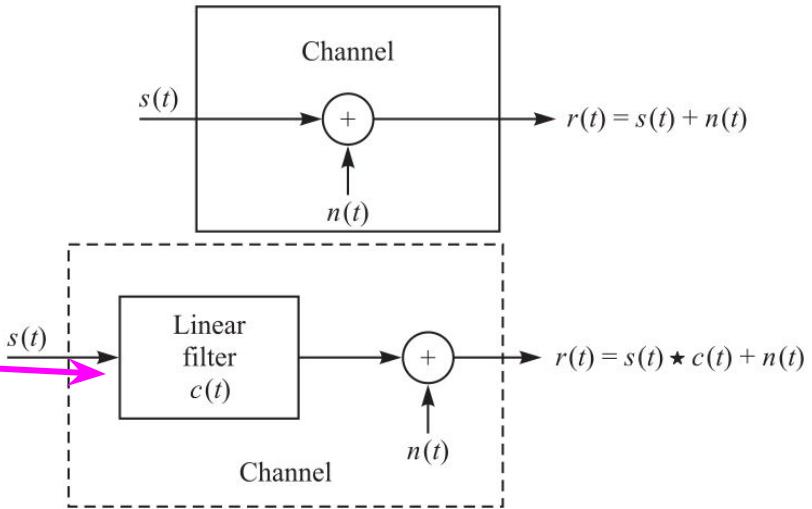


# Canales

## Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

- Ruido
- Respuesta en frecuencia
- Atenuación

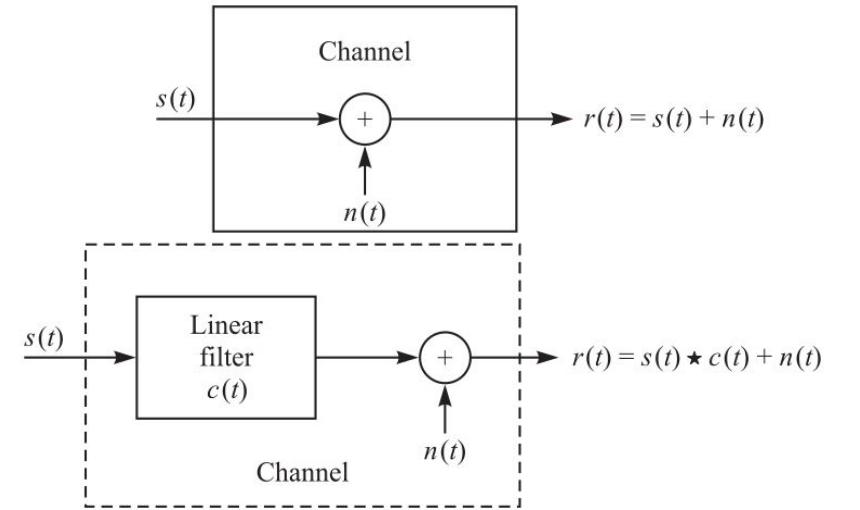


# Canales

## Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

- Ruido
- Respuesta en frecuencia
- Atenuación
- Dinámica



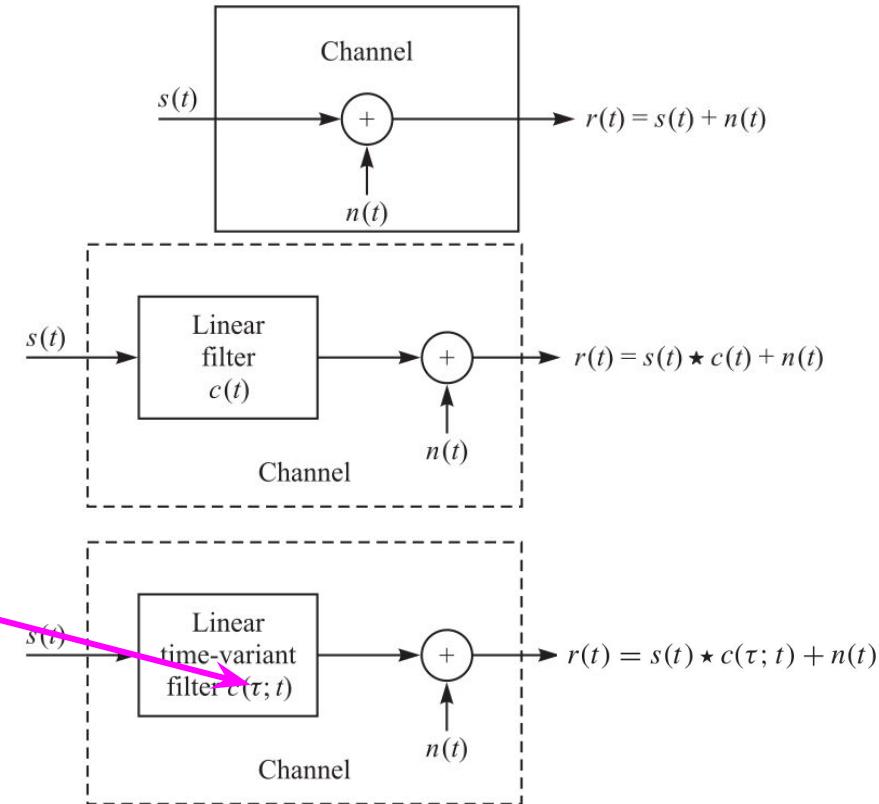
$$r(t) = s(t) \star c(\tau; t) + n(t)$$

# Canales

## Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

- Ruido
- Respuesta en frecuencia
- Atenuación
- Dinámica

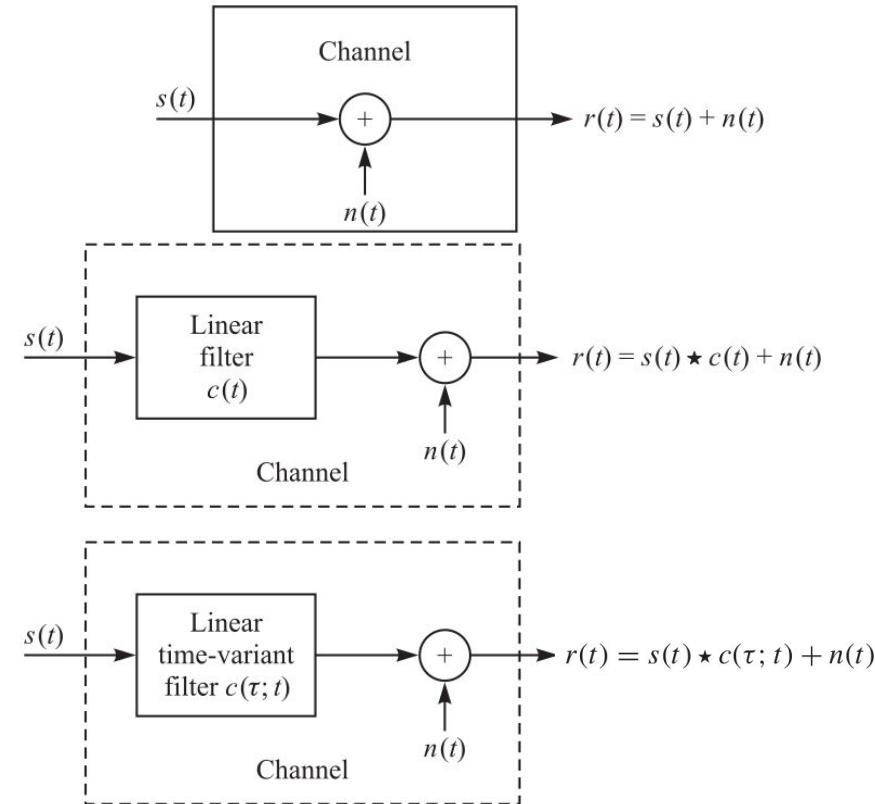


# Canales

## Características y modelos

Para caracterizar los canales matemáticamente consideramos:

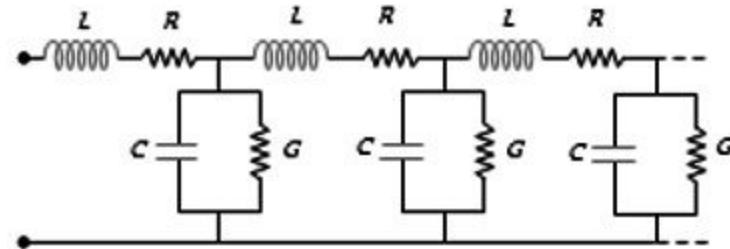
- Ruido
- Respuesta en frecuencia
- Atenuación
- Dinámica
- Memoria (realimentación)
- Efectos no lineales



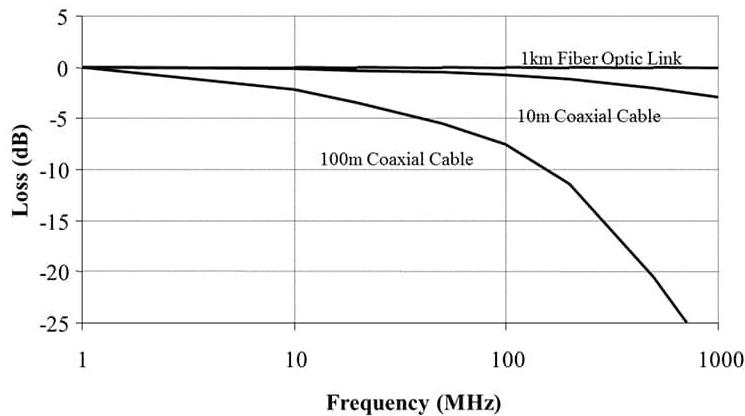
# Canales

## Características y modelos

Respuesta en frecuencia:



*Loss v Frequency Comparison for Fiber & Coaxial Cable*



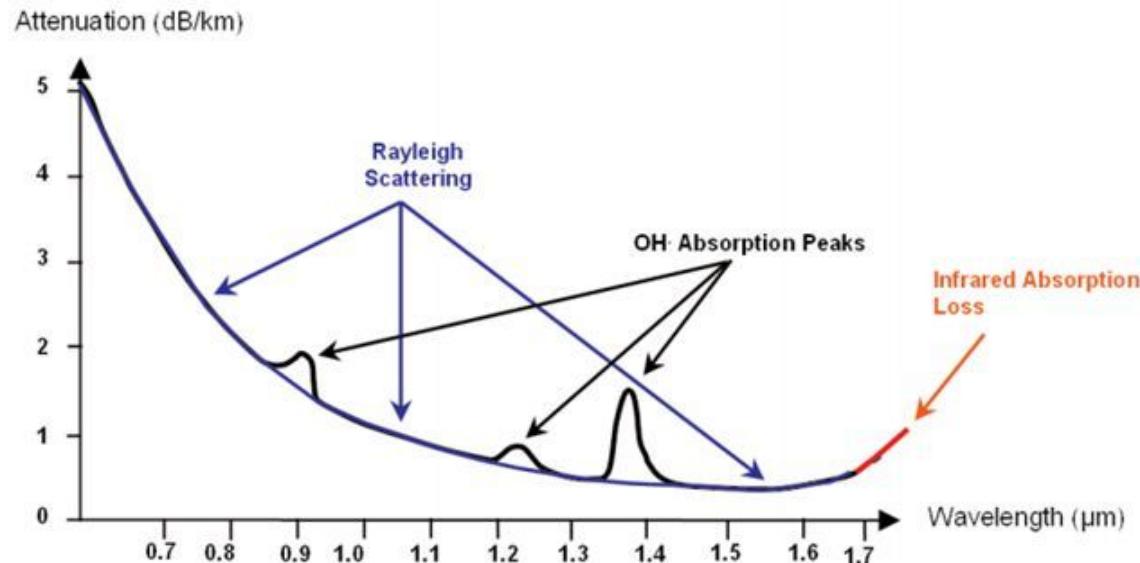
	Frequency Range	Typical Attenuation	Typical Delay	Repeater Spacing
Twisted pair (with loading)	0 to 3.5 kHz	0.2 dB/km @ 1 kHz	50 $\mu$ s/km	2 km
Twisted pairs (multi-pair cables)	0 to 1 MHz	0.7 dB/km @ 1 kHz	5 $\mu$ s/km	2 km
Coaxial cable	0 to 500 MHz	7 dB/km @ 10 MHz	4 $\mu$ s/km	1 to 9 km
Optical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

# Canales

## Características y modelos

### Respuesta en frecuencia:

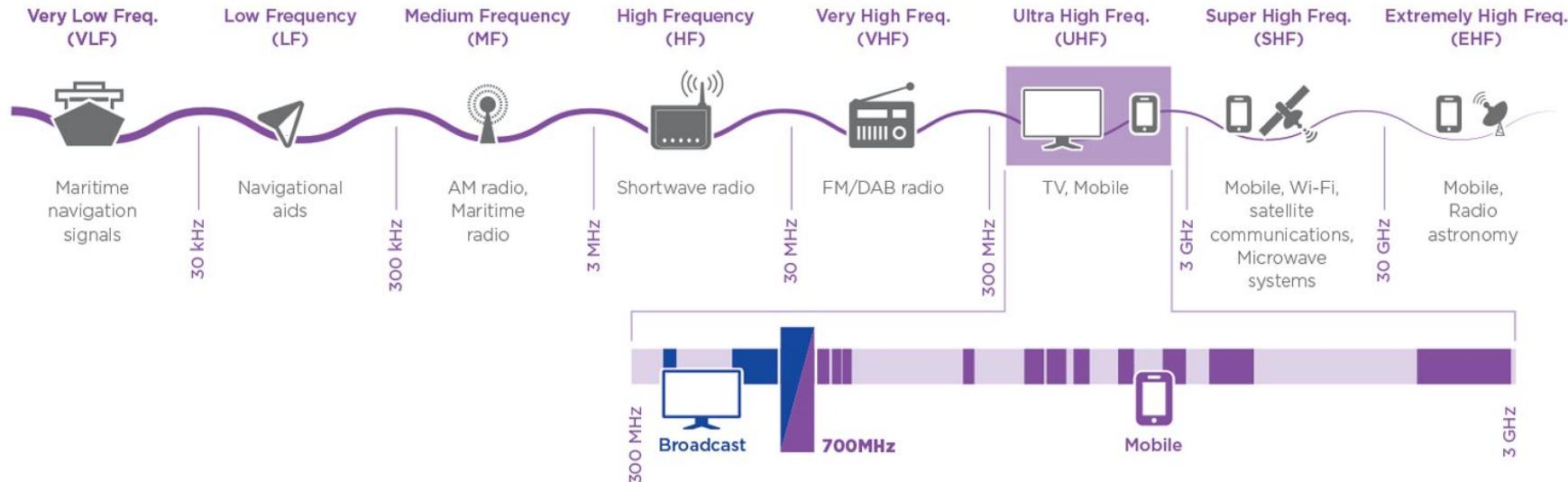
Ejemplo para fibra óptica



# Canales

## Características y modelos

### Espectro de radio:

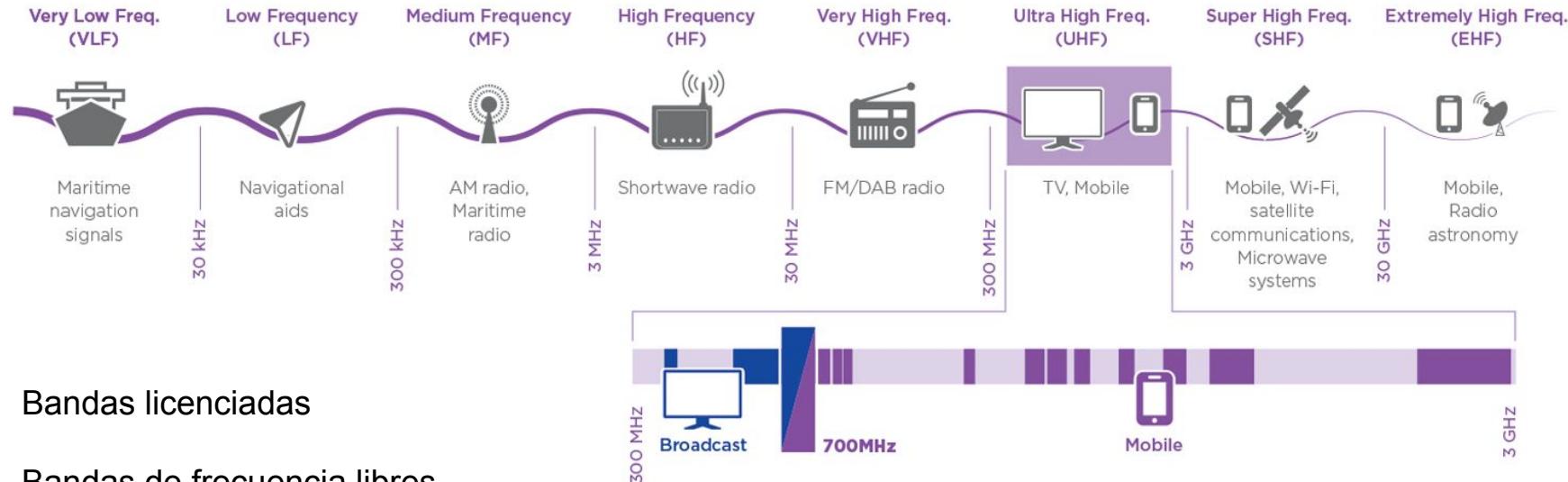


The UHF band (470 to 862 MHz) is critical to the delivery of broadcast services, and is the only frequency range that can be used for TV broadcasting. Parts of the UHF band have already been freed up for mobile use, and there is increasing pressure from mobile operators to open the 700MHz band.

# 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.

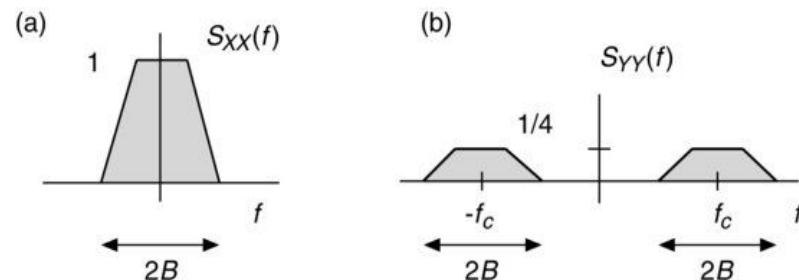
# Canales

## Características y modelos

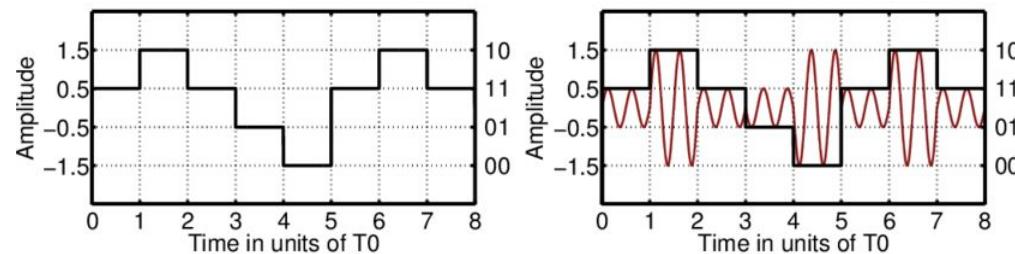
O bien por la respuesta en frecuencia u alguna otra necesidad en ocasiones se debe transmitir en un rango determinado de frecuencias.

Hay dos grandes grupos de canales:

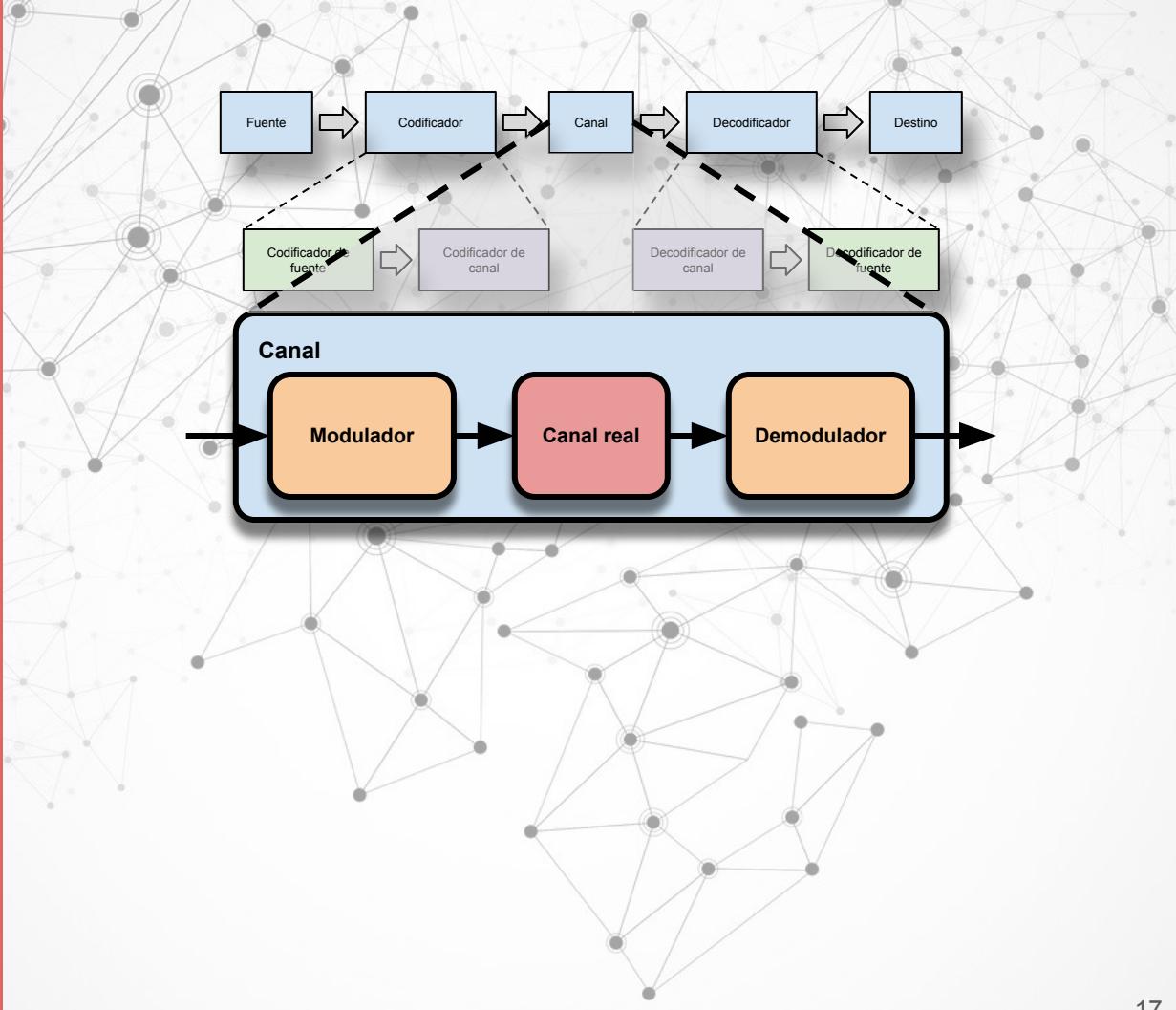
- **Pasa bajos (a)**
- **Banda pasante (b)**



Esto afecta al modulador y demodulador.



## Ejercicio 2



# Ejercicio 2

## Enunciado



main · MSE-SDC-base\_repo / ejercicios / ej02 /

colorete87 EJERCICIOS: Ej02 cambios menores · e16b586 on 11 Nov 2021 · History

..

entrega	EJERCICIOS->02: Actualizado	12 months ago
README.md	EJERCICIOS: Ej02 cambios menores	11 months ago

README.md

### Enunciado Trabajo Práctico 2

Discusión sobre el concepto de modulación.

#### Objetivo

Obtener el concepto que tienen los alumnos respecto del concepto de modulación y generar una idea unificada del mismo.

#### Descripción

Este ejercicio se realiza de manera interactiva durante la clase.

Se discuten los distintos sobre algunos temas:

- ¿Qué se entiende por *Modulador*?
- ¿Qué tipo de modulaciones conocen?
- Modulación analógica vs digital.

Utilizamos un [jamboard](#) para dejar plasmados los conceptos.

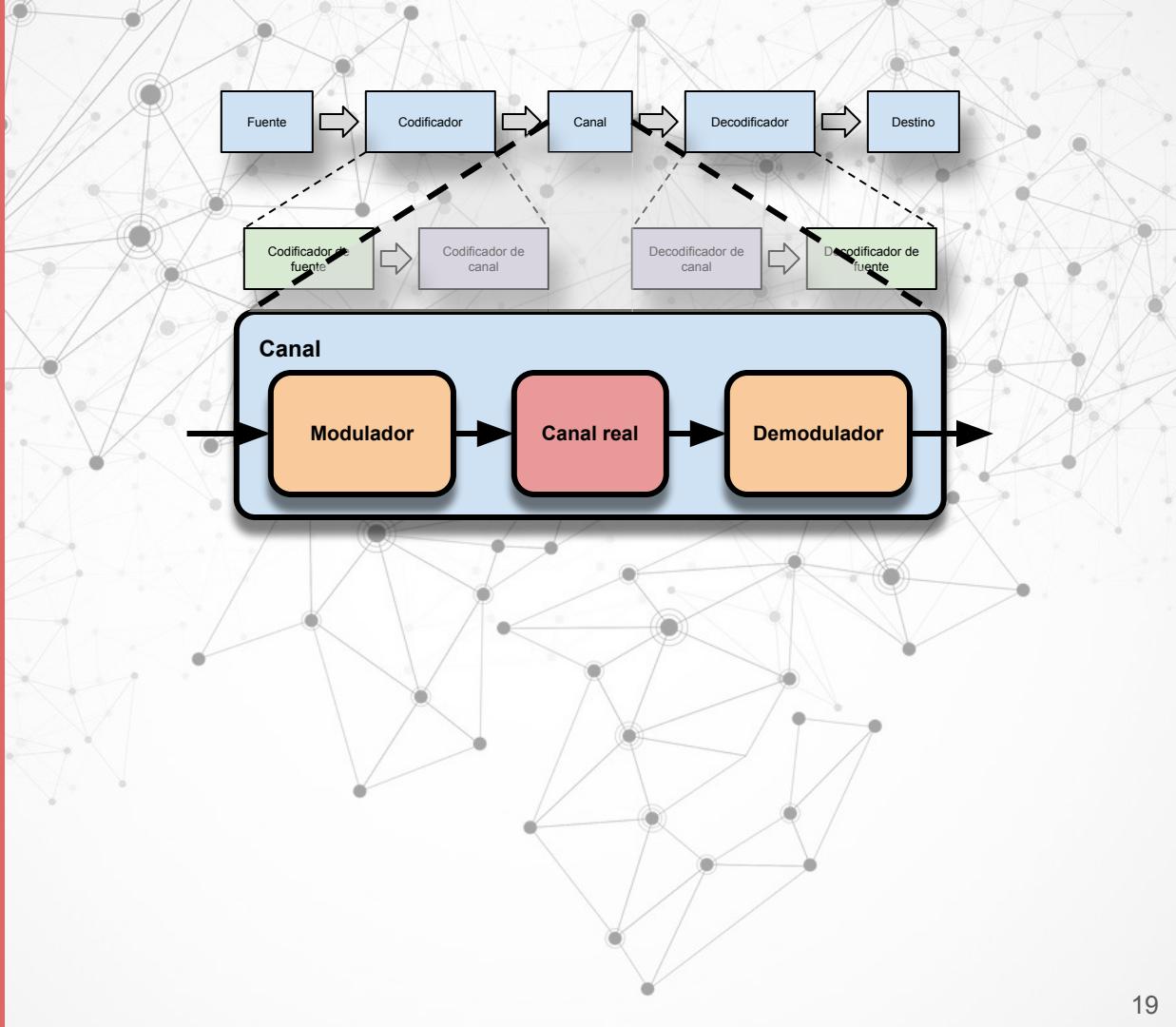
#### Entrega

Se debe actualizar el archivo `README.md` de la entrega de alguna de las siguientes maneras:

Continuar leyendo el enunciado en GitHub

# Esquemas de modulación digital:

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



# Esquemas de modulación digital

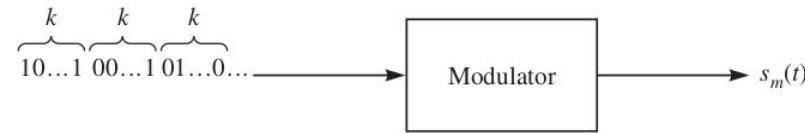
## Objetivos

### 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

$T_s$  : Período 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

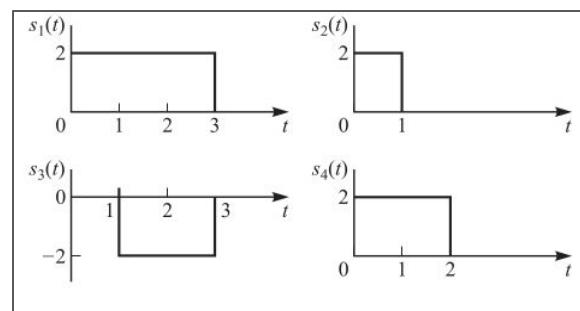
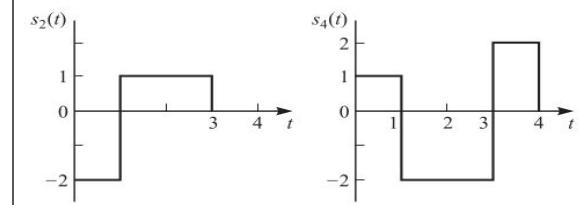
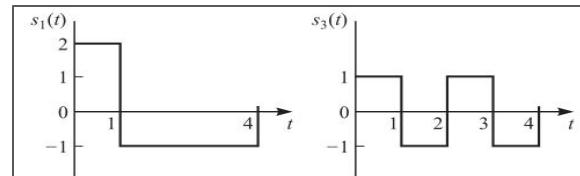
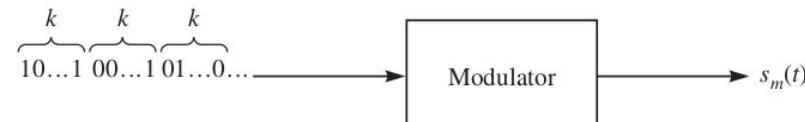
## Objetivos

### 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 observa que el modulador toma **k bits** y los transforma en una de **las  $2^k$  señales**.

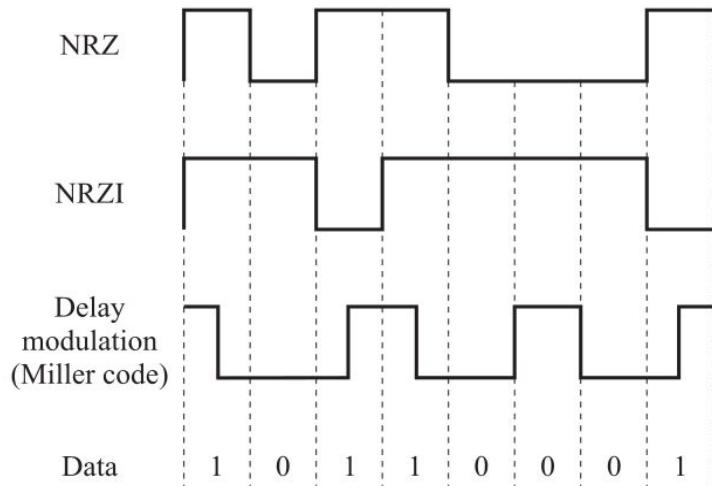
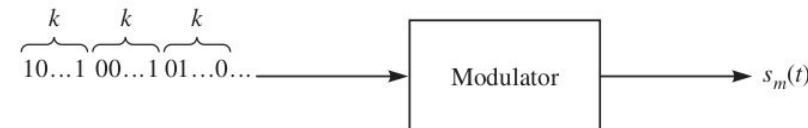


# Esquemas de modulación digital

## Modulador

Ejemplo:

Modulación con y sin memoria en banda base  
(codificación de línea).

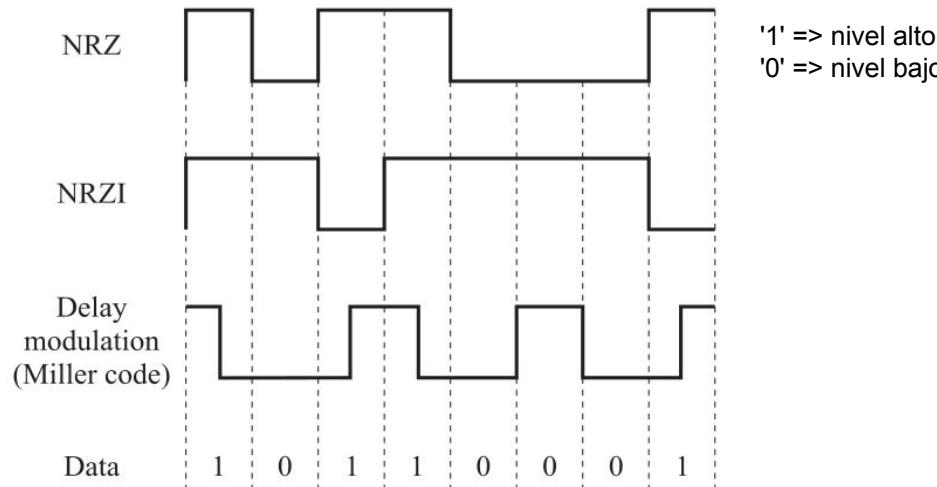
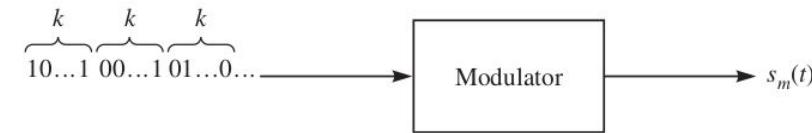


# Esquemas de modulación digital

## Modulador

Ejemplo:

Modulación con y sin memoria en banda base  
(codificación de línea).

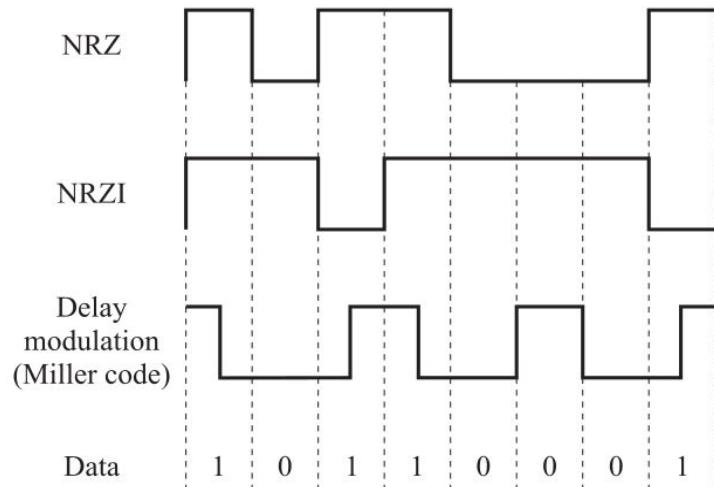
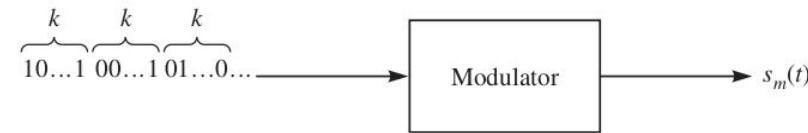


# Esquemas de modulación digital

## Modulador

Ejemplo:

Modulación con y sin memoria en banda base  
(codificación de línea).



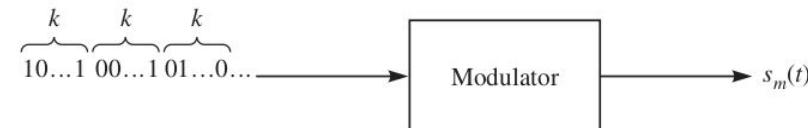
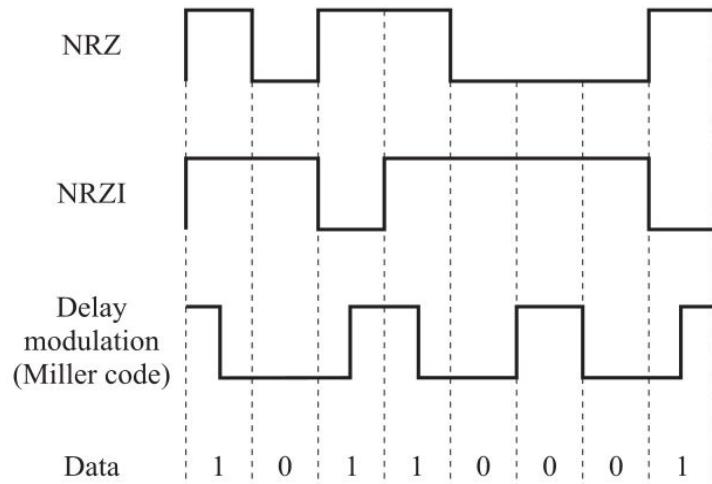
Distinto al anterior => '1', sino '0'.

# Esquemas de modulación digital

## Modulador

Ejemplo:

Modulación con y sin memoria en banda base  
(codificación de línea).



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.

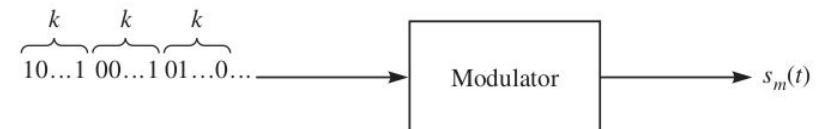
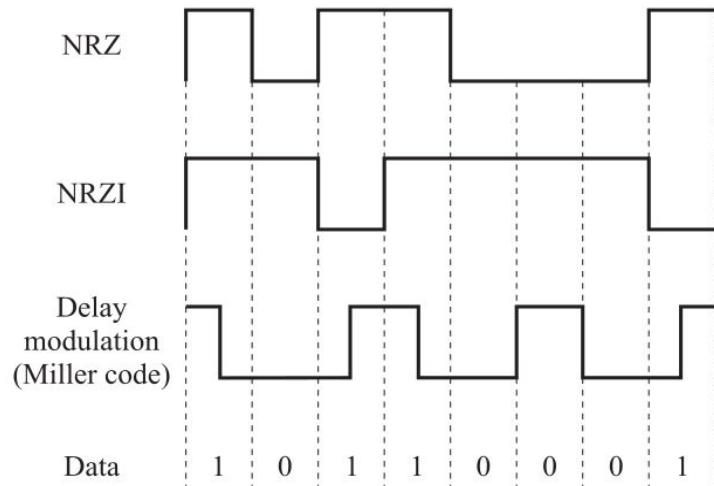
Ahorra ancho de banda.

# Esquemas de modulación digital

## Modulador

Ejemplo:

Modulación con y sin memoria en banda base  
(codificación de línea).

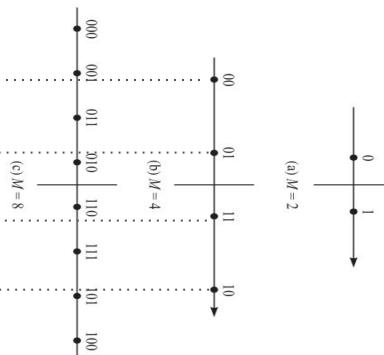
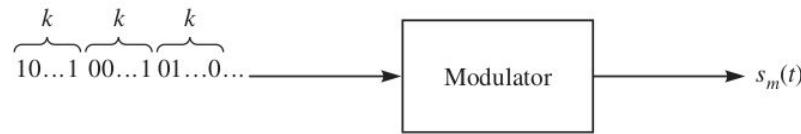
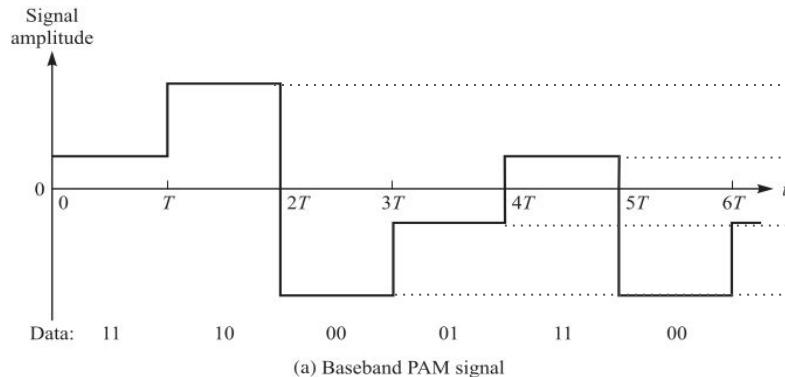


¿Cuáles tienen memoria?

# Esquemas de modulación digital

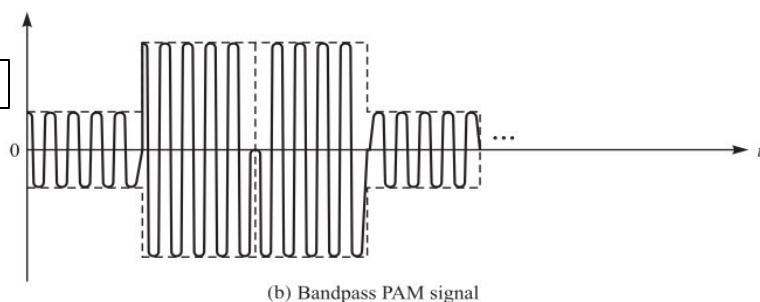
## Modulador

### Modulación de amplitud de pulsos (PAM):



**ASK**

$M=8$      $M=4$      $M=2$

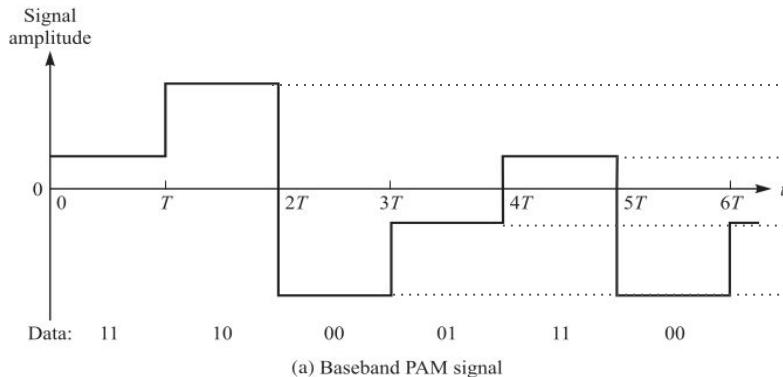


- a) Banda base (pulso constante)
- b) Banda pasante (pulso senoidal)

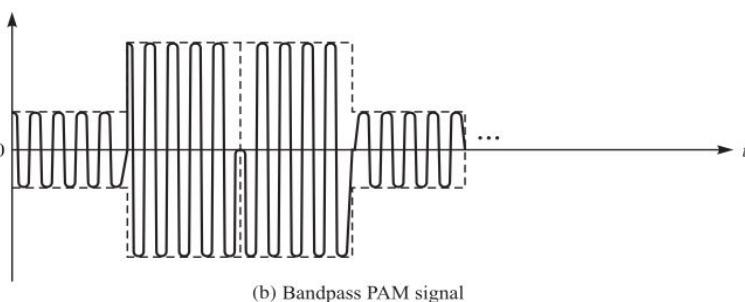
# Esquemas de modulación digital

## Modulador

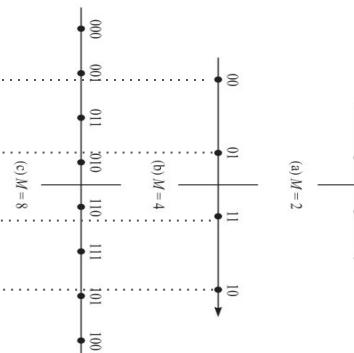
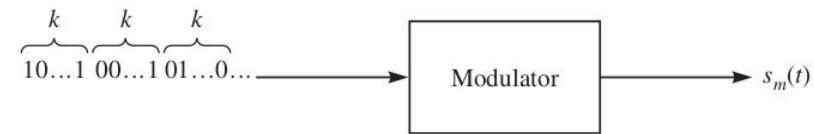
### Modulación de amplitud de pulsos (PAM):



(a) Baseband PAM signal



(b) Bandpass PAM signal



**M=8**    **M=4**    **M=2**

Constelación

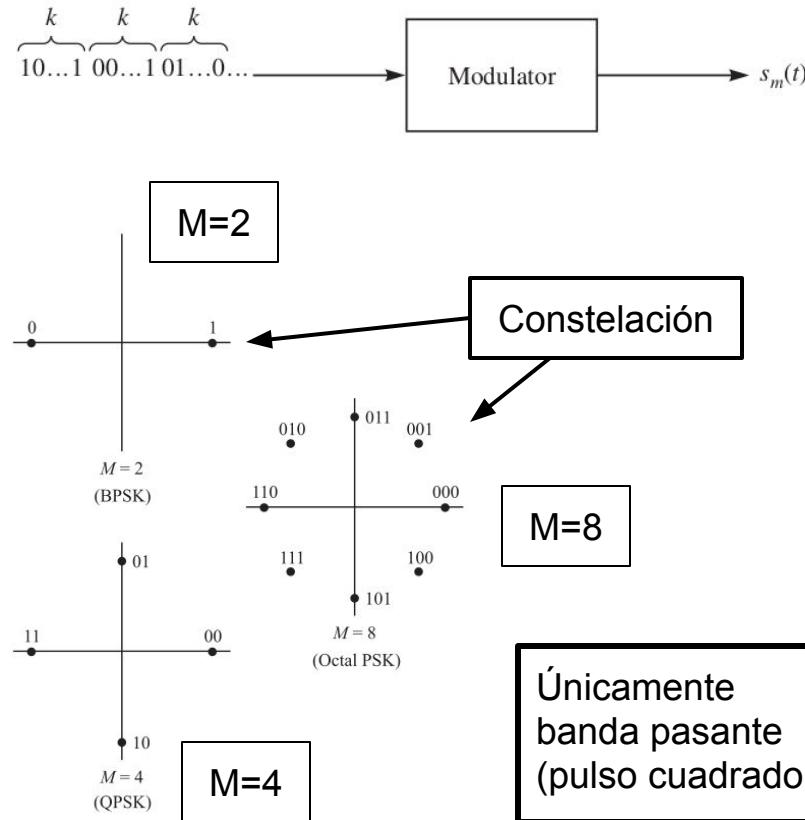
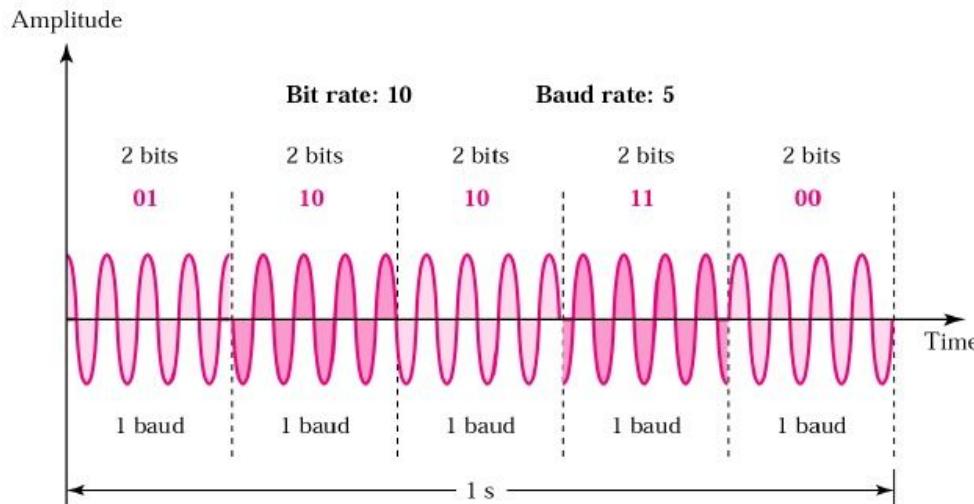
La misma para BB y  
BP.

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

# Esquemas de modulación digital

## Modulador

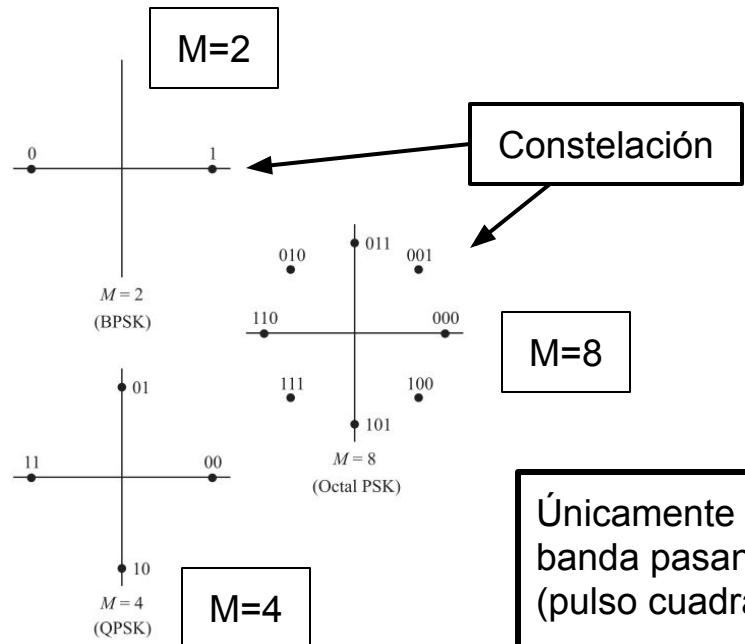
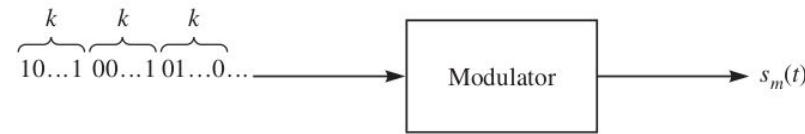
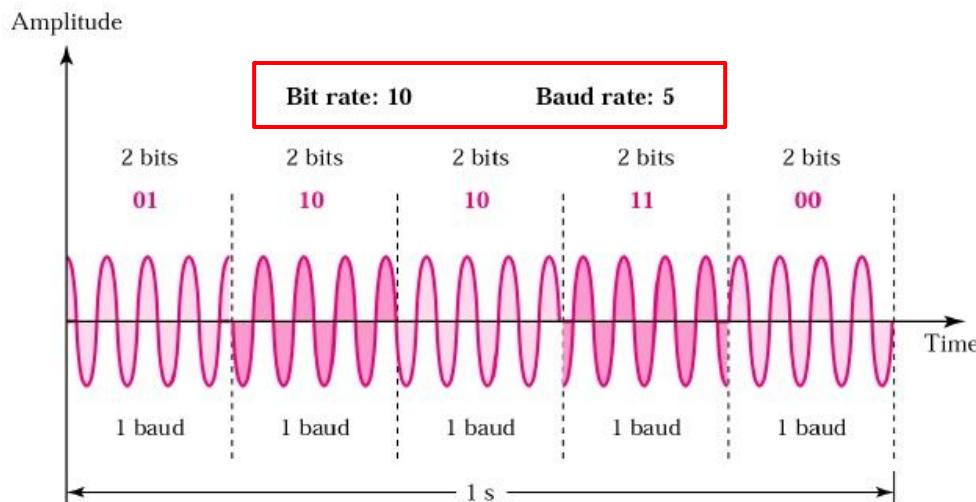
### Modulación de fase (PSK):



# Esquemas de modulación digital

## Modulador

### Modulación de fase (PSK):

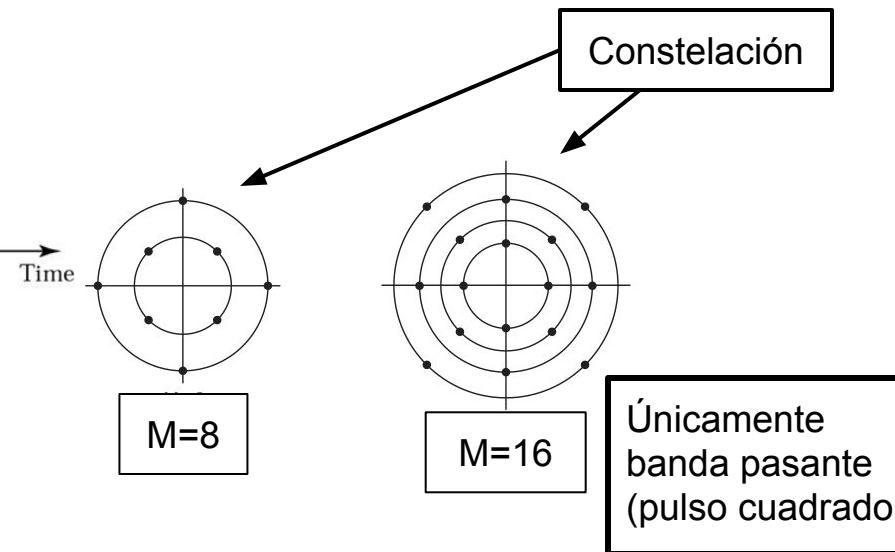
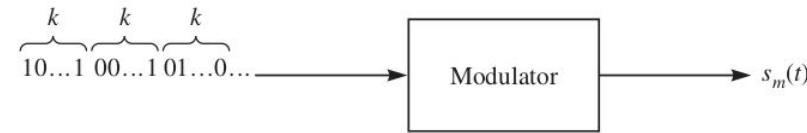
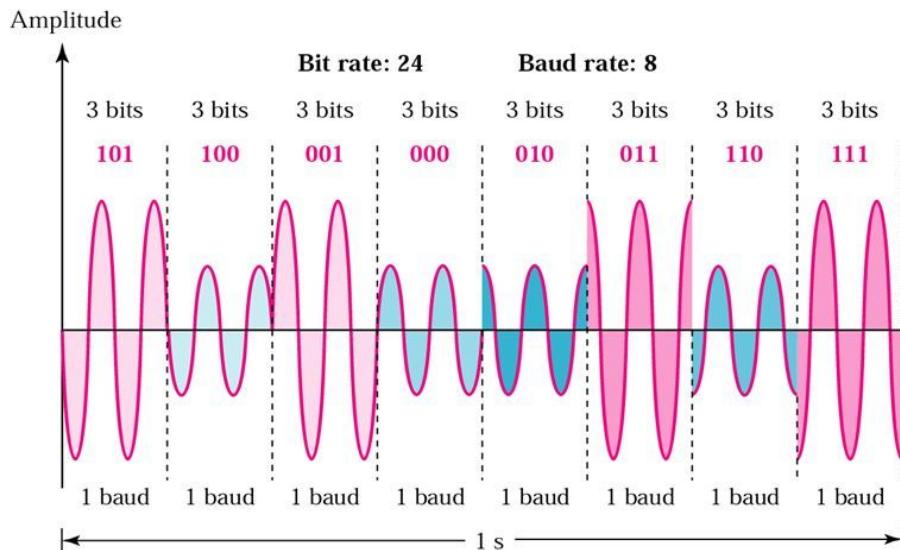


Únicamente  
banda pasante  
(pulso cuadrado)

# Esquemas de modulación digital

## Modulador

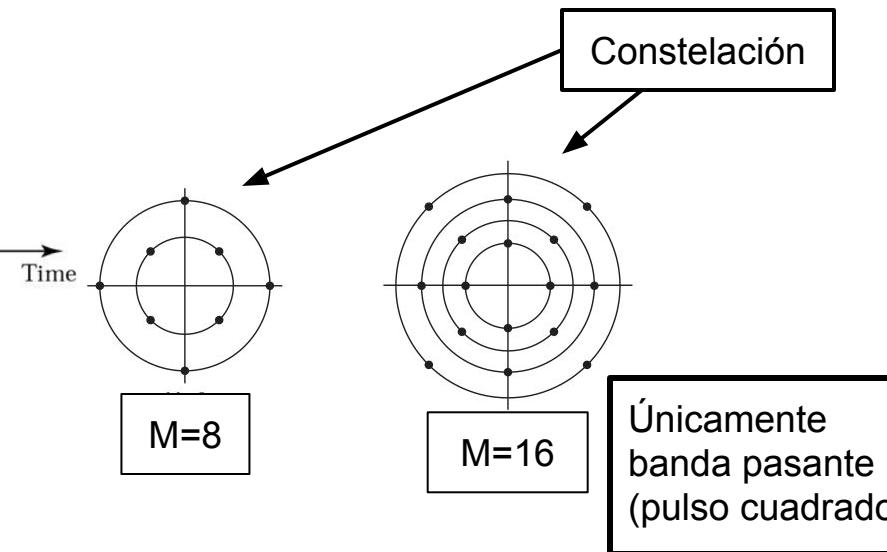
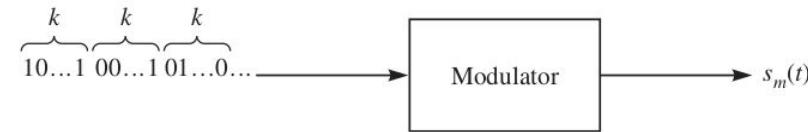
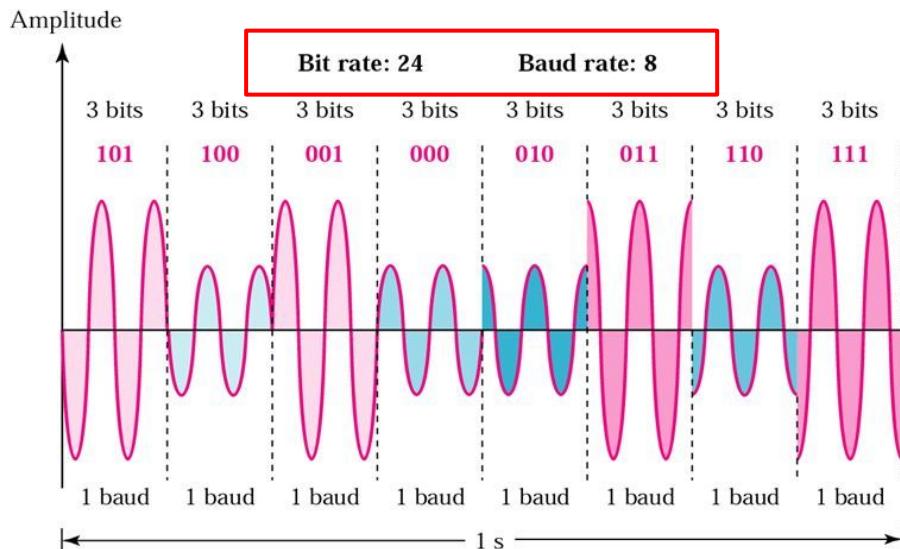
### Modulación de fase y amplitud (APSK):



# Esquemas de modulación digital

## Modulador

### Modulación de fase y amplitud (APSK):



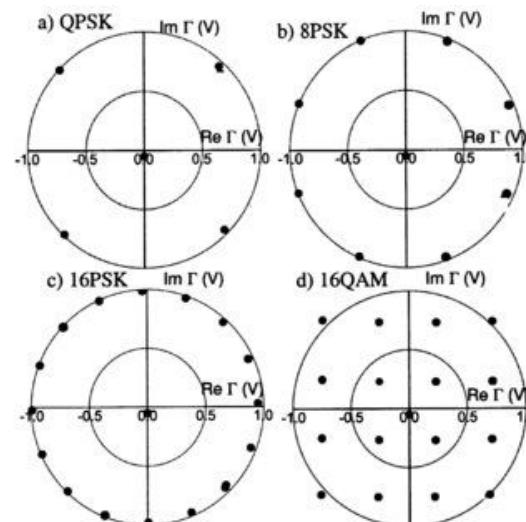
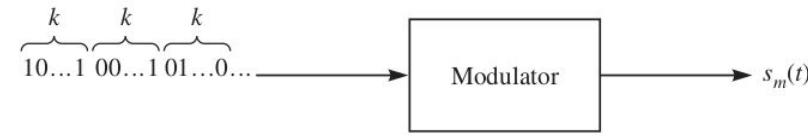
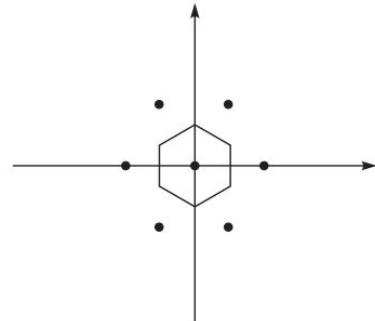
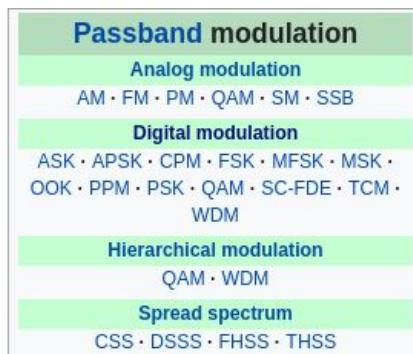
# Esquemas de modulación digital

## Modulador

### Otros ejemplos:

Existen muchos 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.**

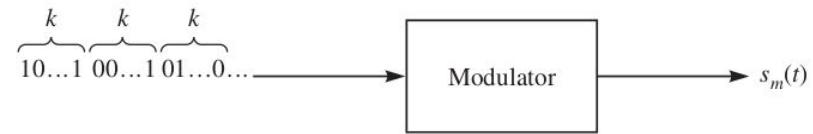


# Esquemas de modulación digital

## Modulador

### Otros ejemplos:

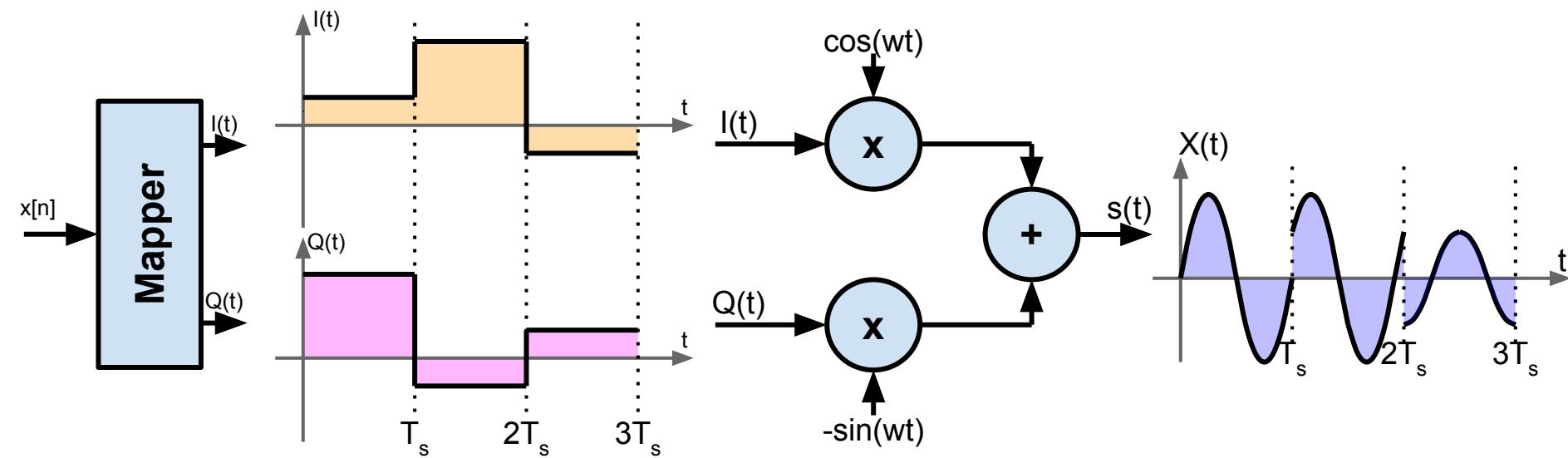
- Spread Spectrum: Se utiliza para comunicaciones de baja tasa de transferencia y poco presupuesto energético:
  - DSSS
  - FHSS
  - CSS (LoRa)
- OFDM: Se utiliza para sistemas de alta tasa de transferencia (WiFi, ADSL, ISDB-T, etc.)



# Esquemas de modulación digital

## Modulador

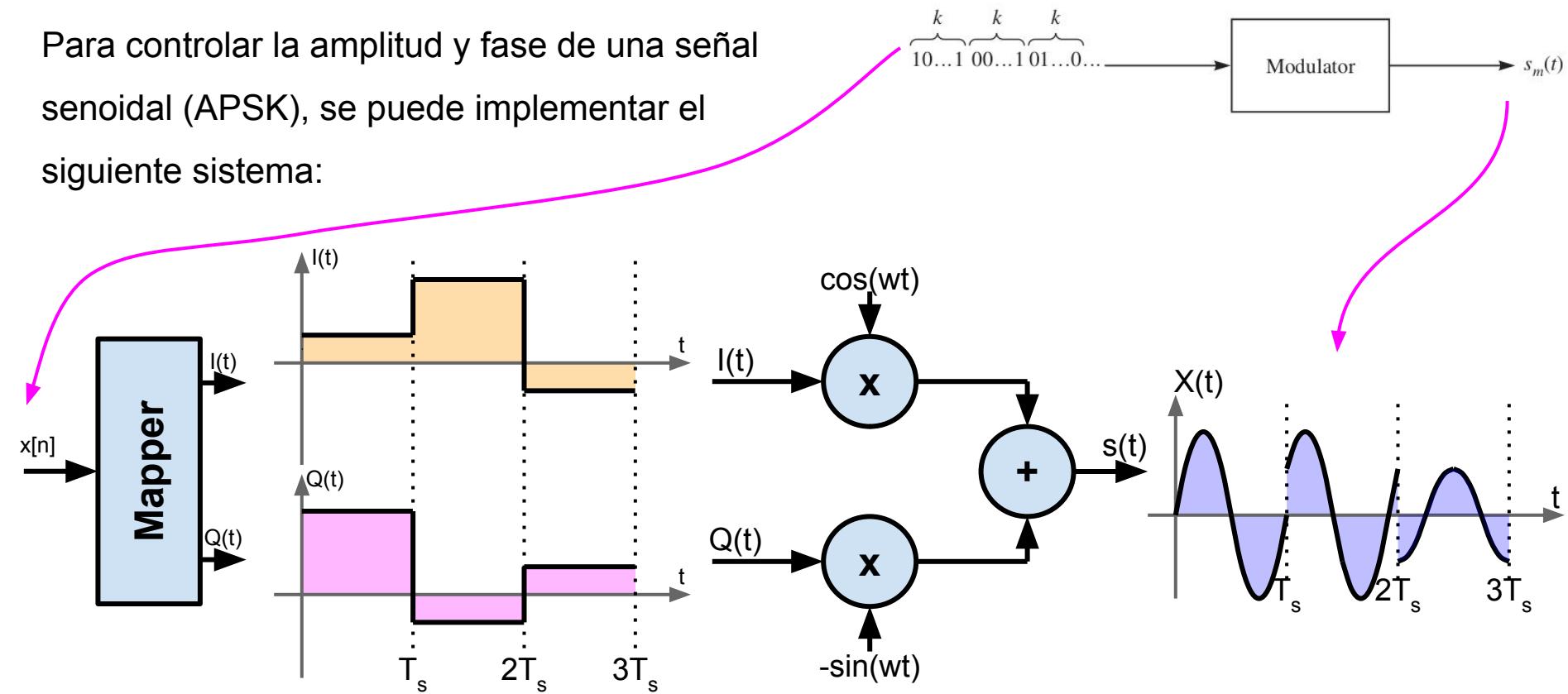
Para controlar la amplitud y fase de una señal senoidal (APSK), se puede implementar el siguiente sistema:



# Esquemas de modulación digital

## Modulador

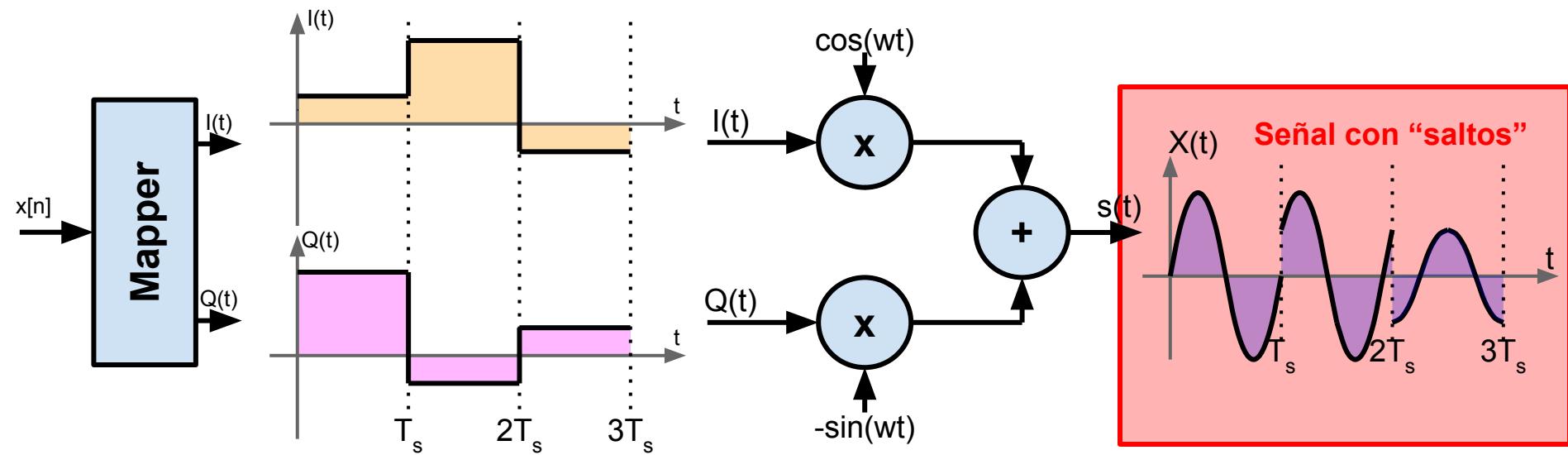
Para controlar la amplitud y fase de una señal senoidal (APSK), se puede implementar el siguiente sistema:



# Esquemas de modulación digital

## Modulador

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



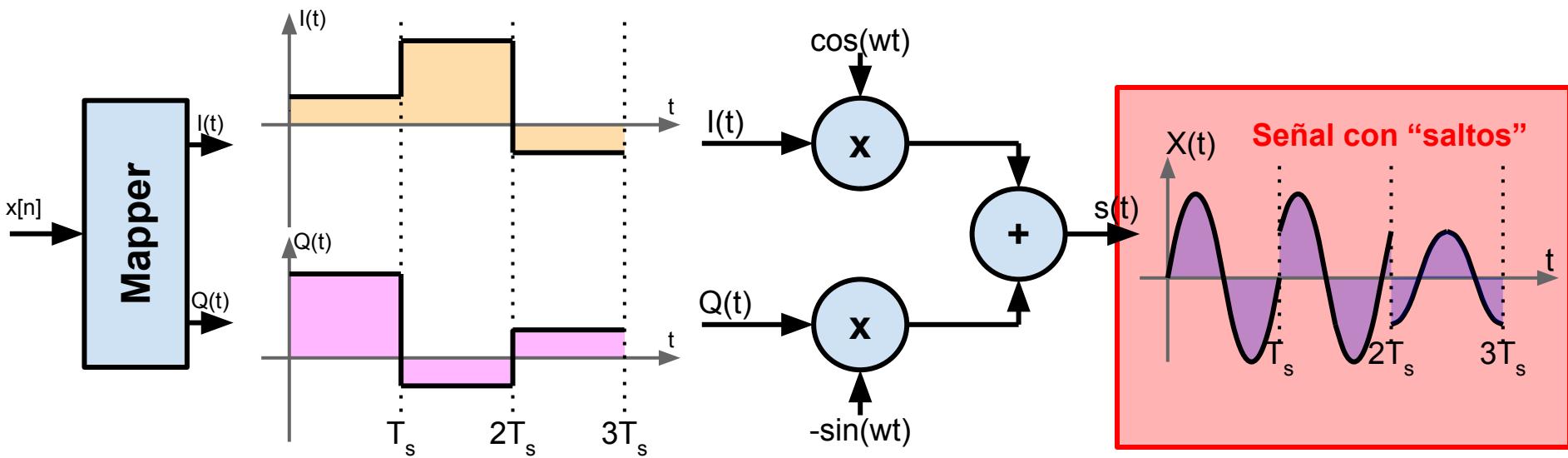
# Esquemas de modulación digital

## Modulador

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

¿Se puede mejorar?

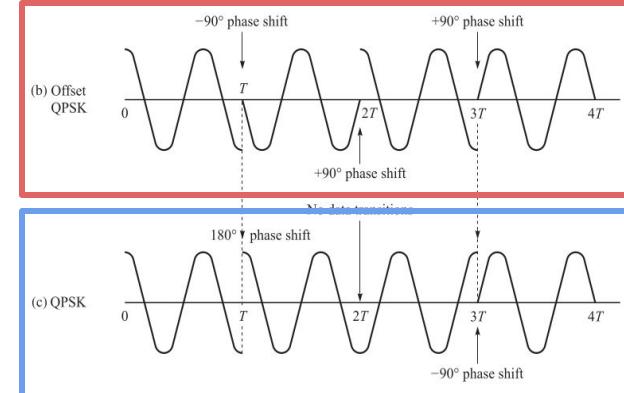
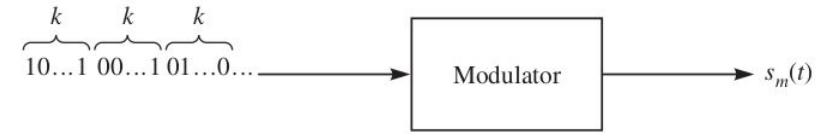
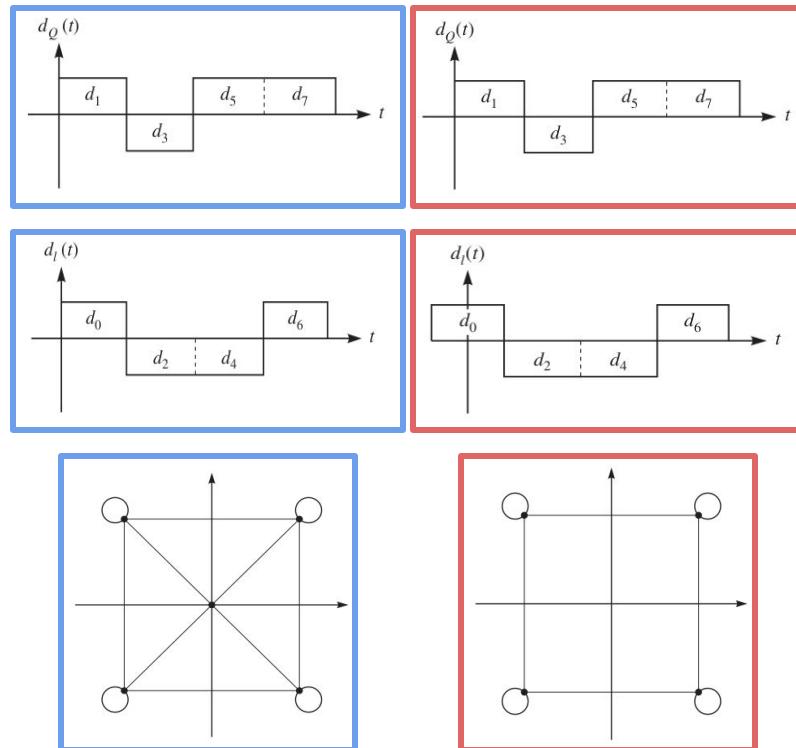
Modulator



# Esquemas de modulación digital

## Modulador

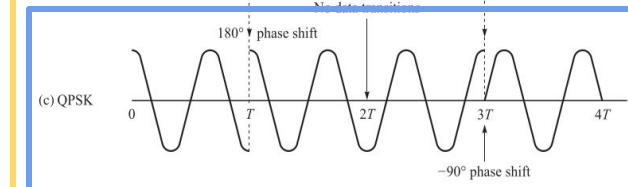
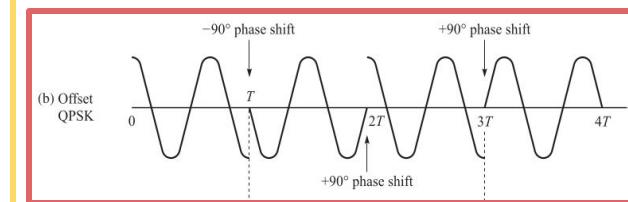
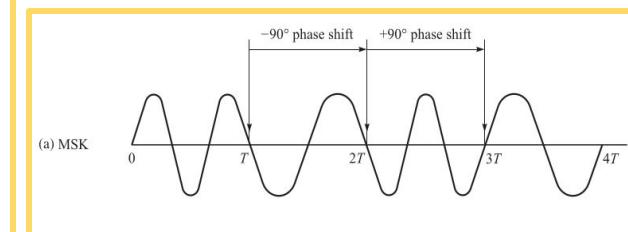
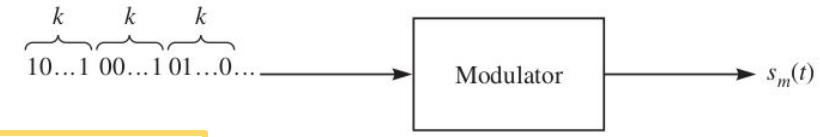
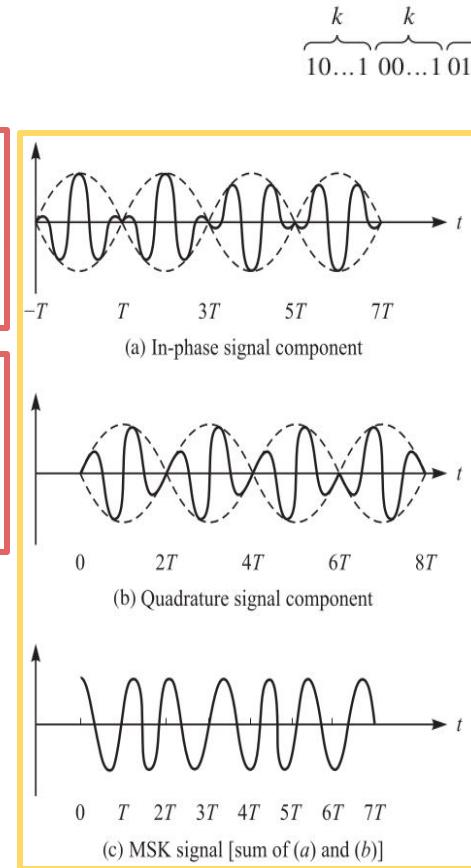
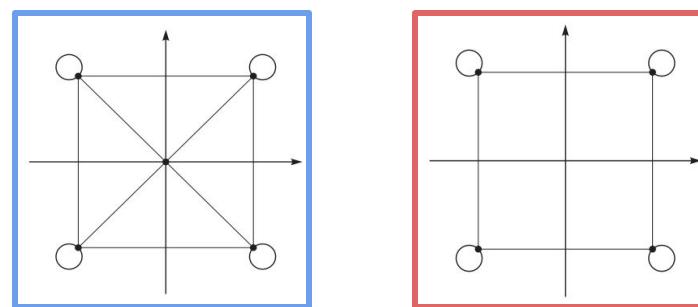
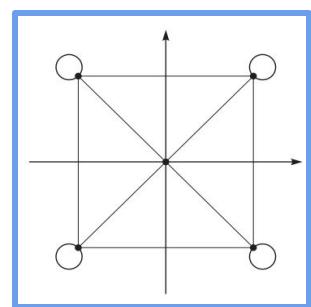
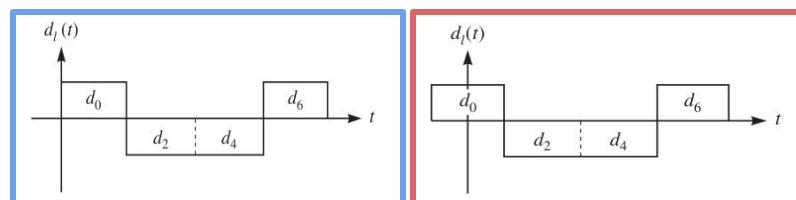
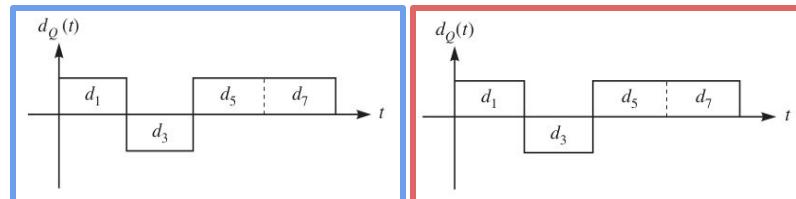
### Ejemplo: QPSK, OQPSK y MSK



# Esquemas de modulación digital

## Modulador

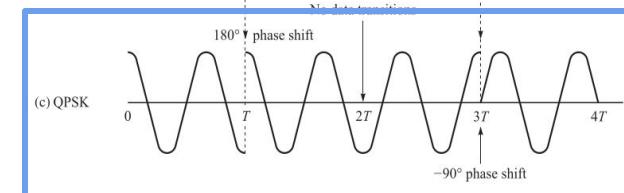
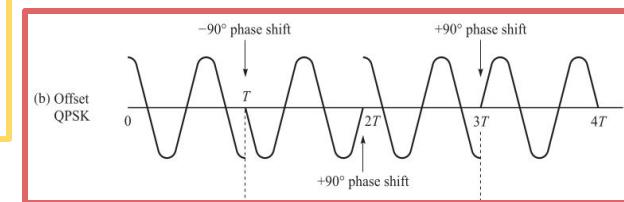
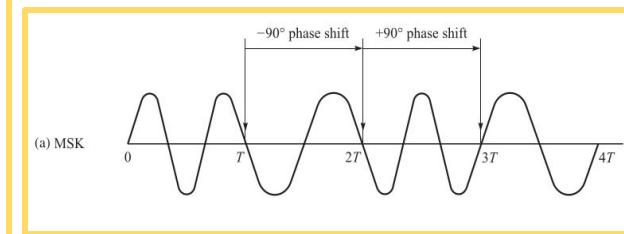
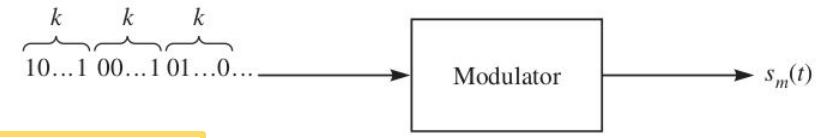
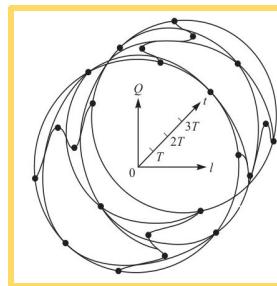
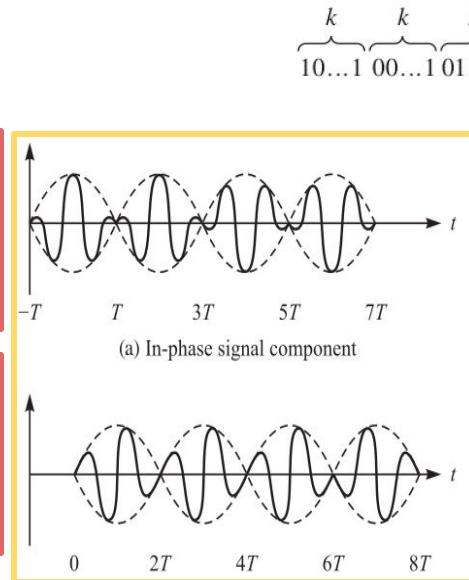
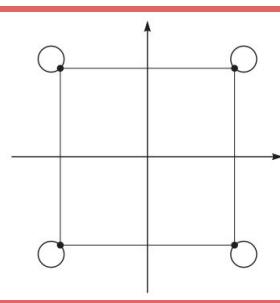
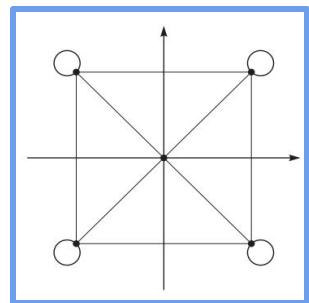
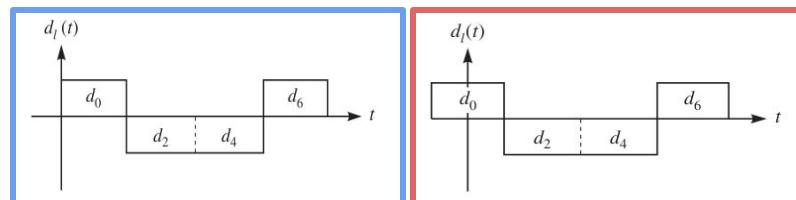
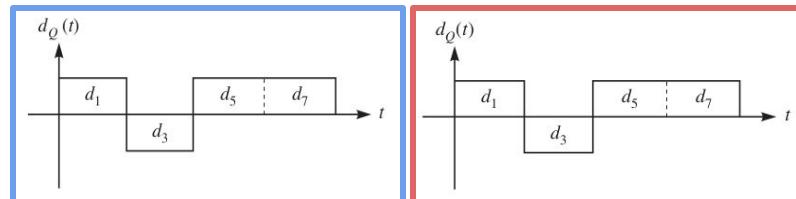
### Ejemplo: QPSK, OQPSK y MSK



# Esquemas de modulación digital

## Modulador

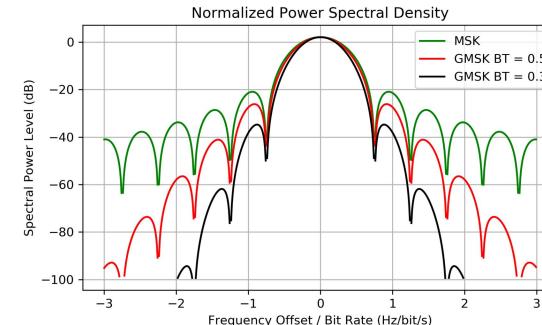
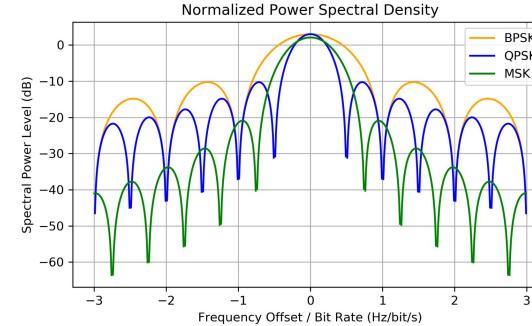
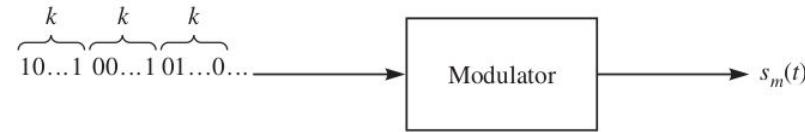
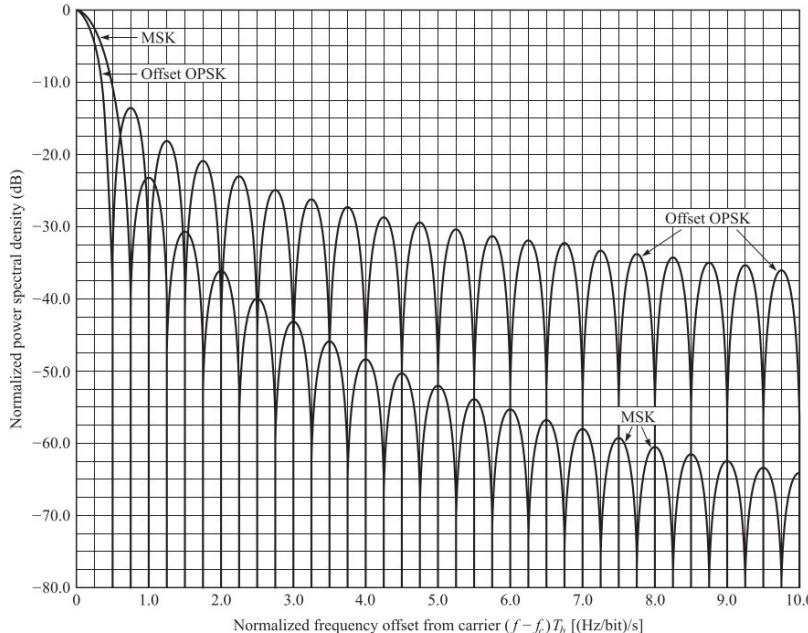
### Ejemplo: QPSK, OQPSK y MSK



# Esquemas de modulación digital

## Modulador

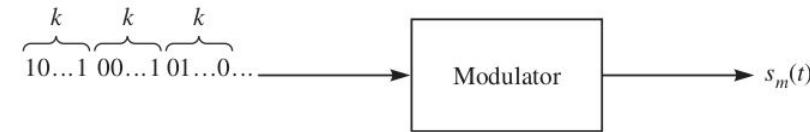
### Ejemplo: QPSK, OQPSK y MSK



# Esquemas de modulación digital

## Interferencia inter-símbolo

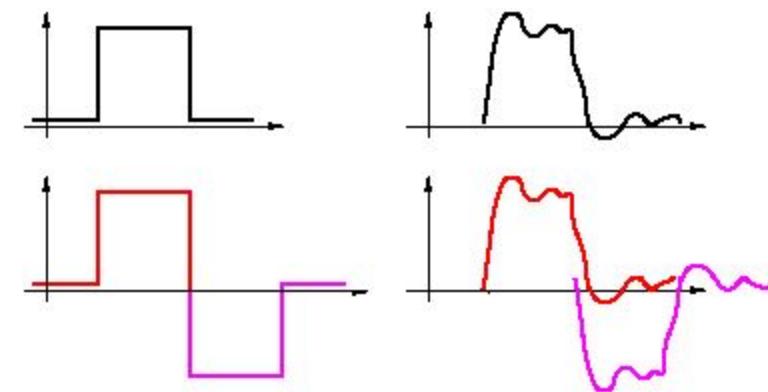
### Interferencia Inter-Símbolo (ISI):



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
- Forma del pulso (no por respuesta del canal)



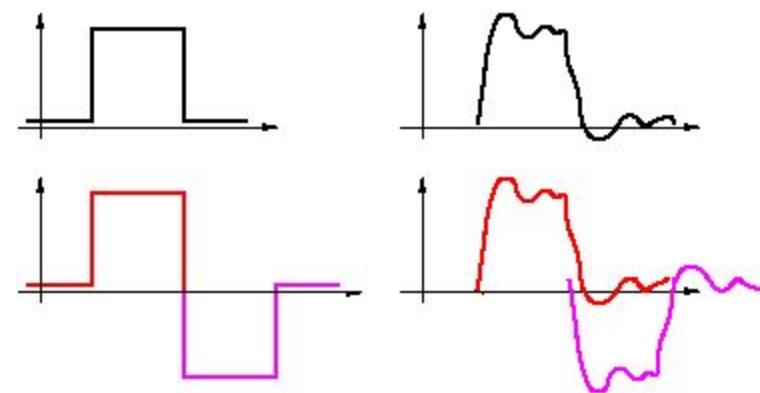
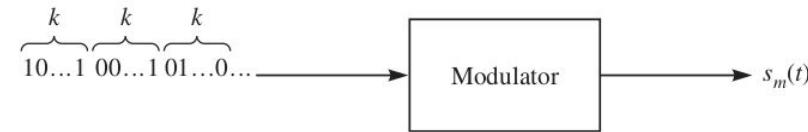
# Esquemas de modulación digital

## Interferencia inter-símbolo

### Interferencia Inter-Símbolo (ISI):

Se puede **mitigar** con:

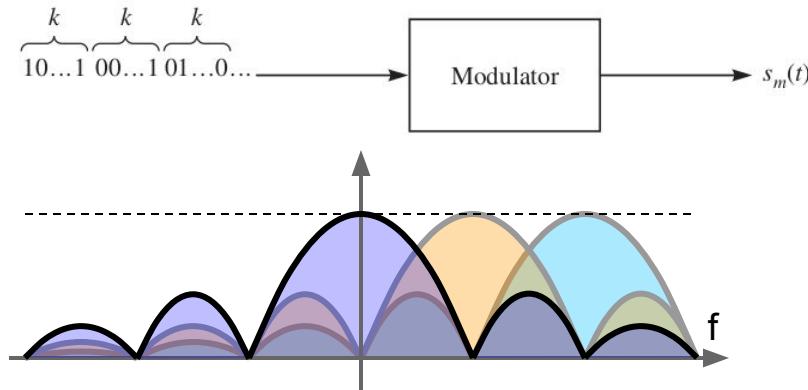
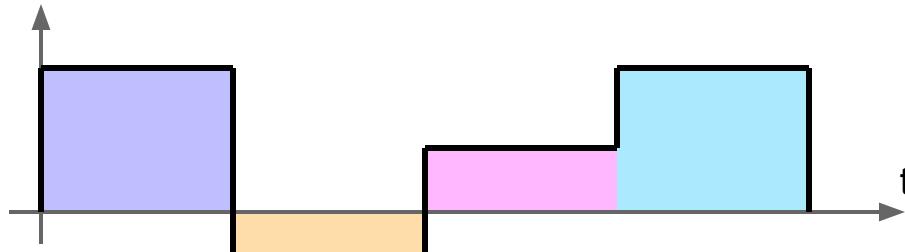
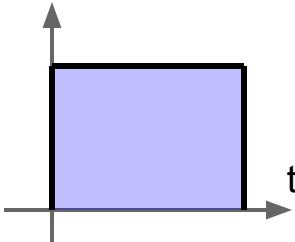
- Separación de los símbolos
- **Diseño de pulsos** que propaguen poca energía a los símbolos subsiguientes
- Ecualizadores
- Codificación de canal



# Esquemas de modulación digital

## Interferencia inter-símbolo

Criterio de Nyquist:

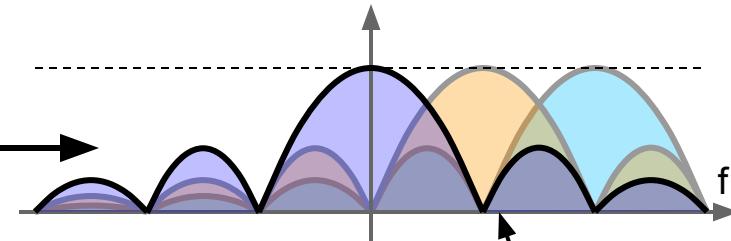
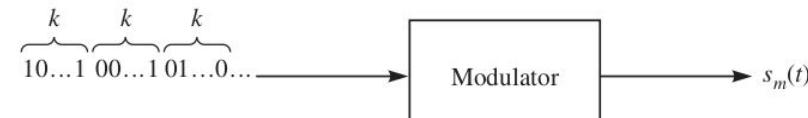
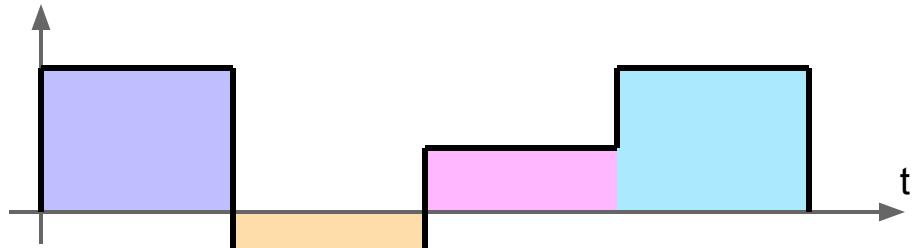
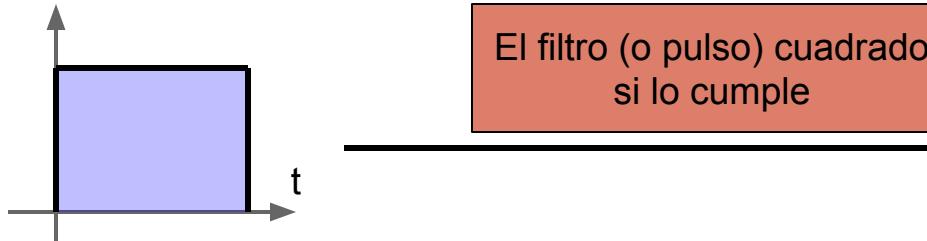


$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} X(f + m/T) = T$$

# Esquemas de modulación digital

## Interferencia inter-símbolo

Criterio de Nyquist:



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

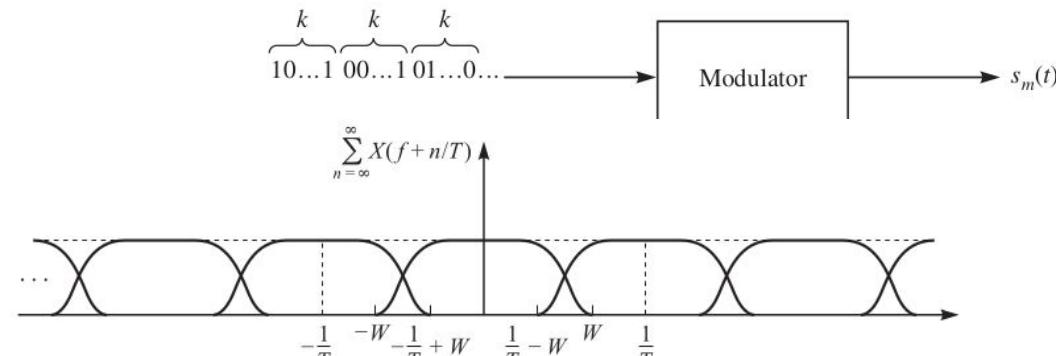
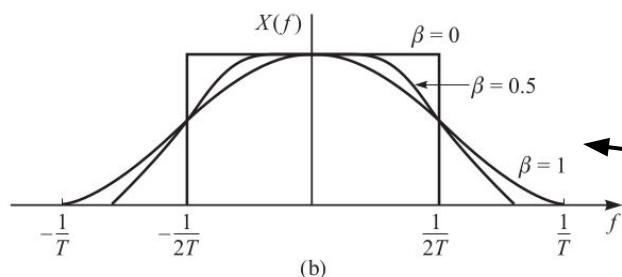
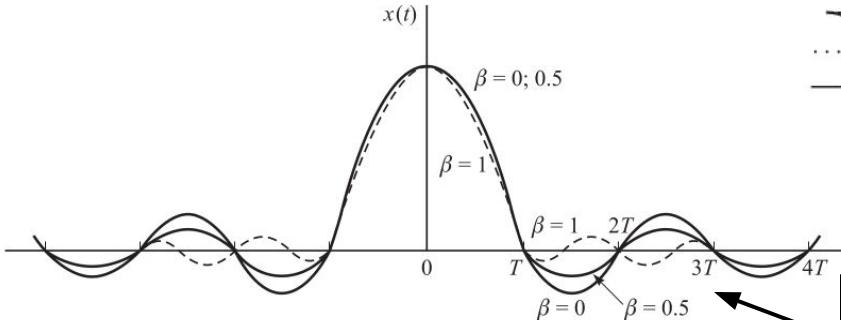
El filtro Gausiano no lo cumple

# Esquemas de modulación digital

## Interferencia inter-símbolo

### Criterio de Nyquist:

- Filtro sinc
- Filtro coseno elevado



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

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

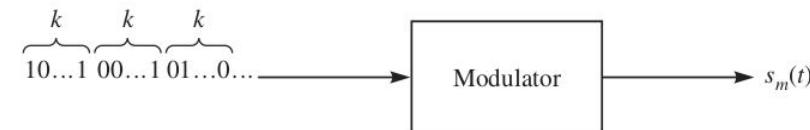
$$H(f) = \begin{cases} 1, & |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi T}{\beta} \left[ |f| - \frac{1-\beta}{2T} \right] \right) \right], & \frac{1-\beta}{2T} < |f| \leq \frac{1+\beta}{2T} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

# Esquemas de modulación digital

## Resumen

¿Cuál es el mejor método de modulación?:

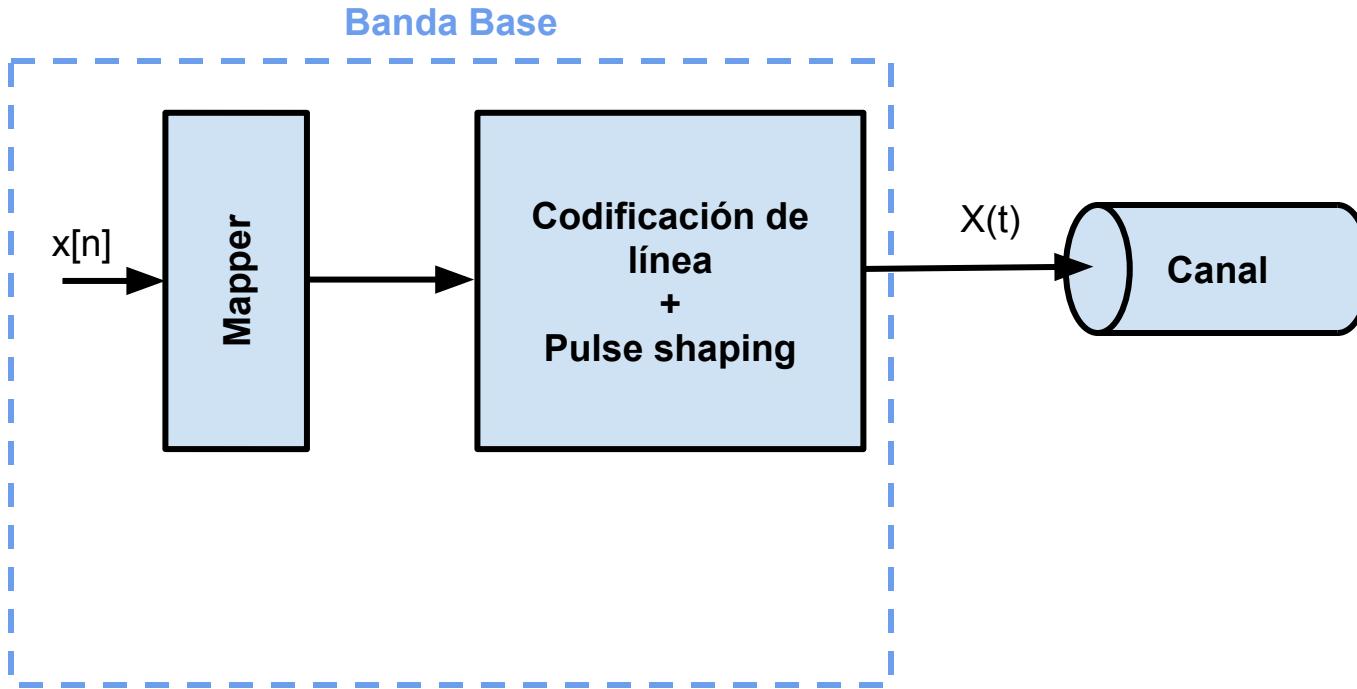
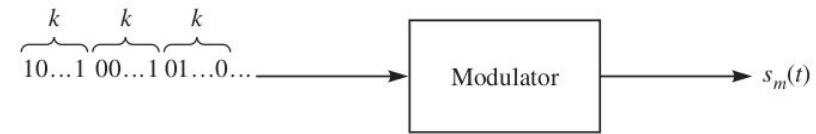
- Depende principalmente del canal
  - Alámbrico, inalámbrico, óptico
  - Ruido
  - Respuesta en frecuencia (ancho de banda) o banda asignada
  - Indoor, outdoor, rural, ciudad, espacio abierto, etc.
  - Otras posibles fuentes de distorsión (dinámico, por ejemplo)
- Depende de características del sistema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



# Esquemas de modulación digital

## Resumen

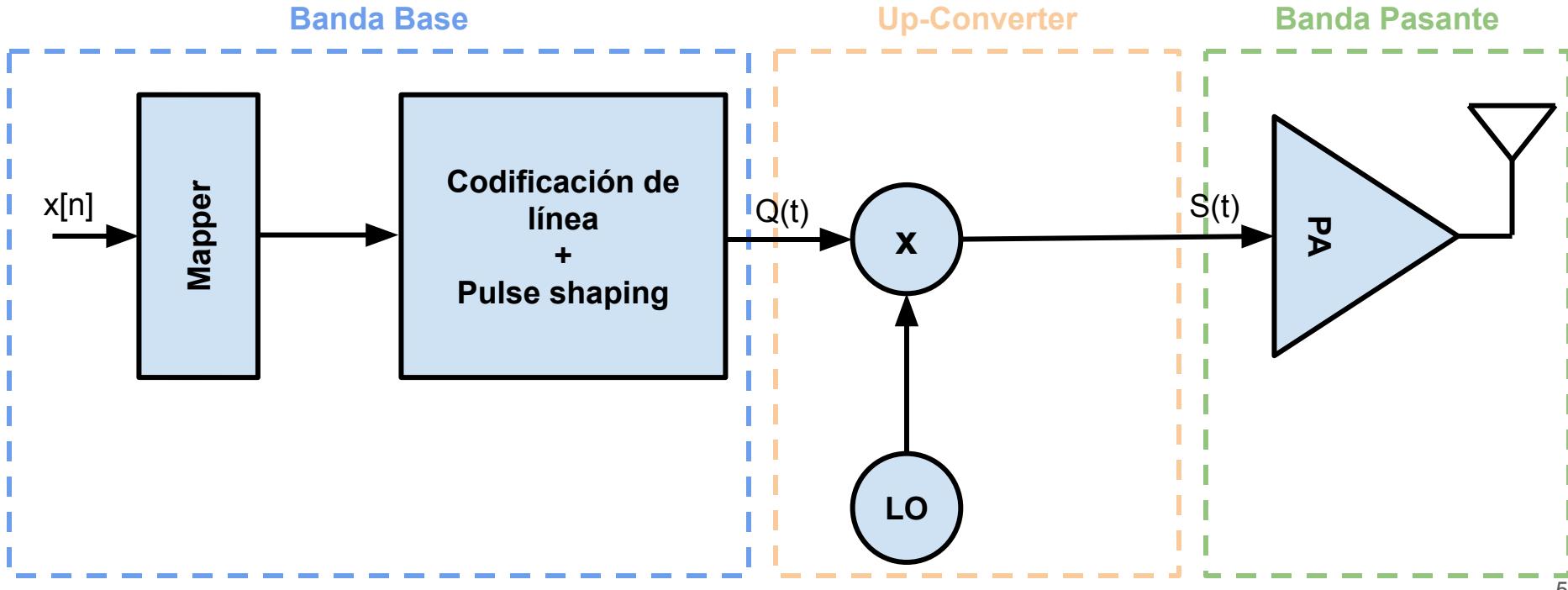
Ejemplo de un modulador de **banda base**.



# Esquemas de modulación digital

## Resumen

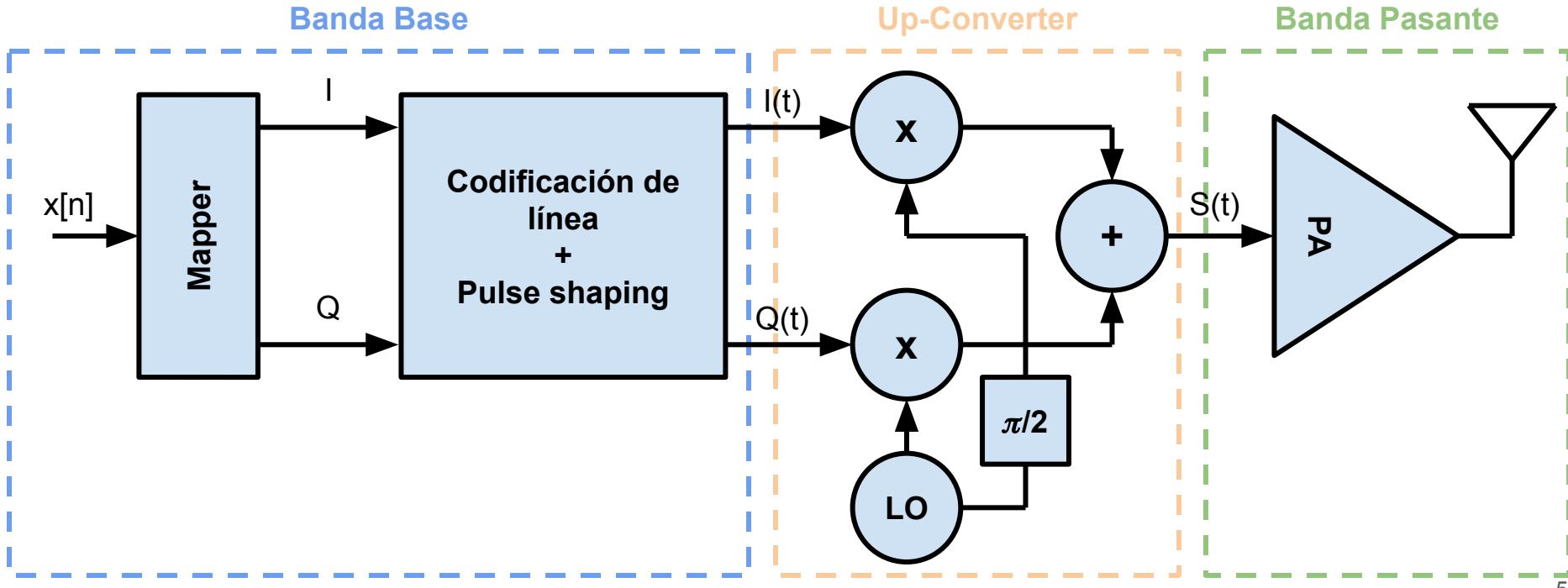
Ejemplo de un modulador de **banda pasante**.



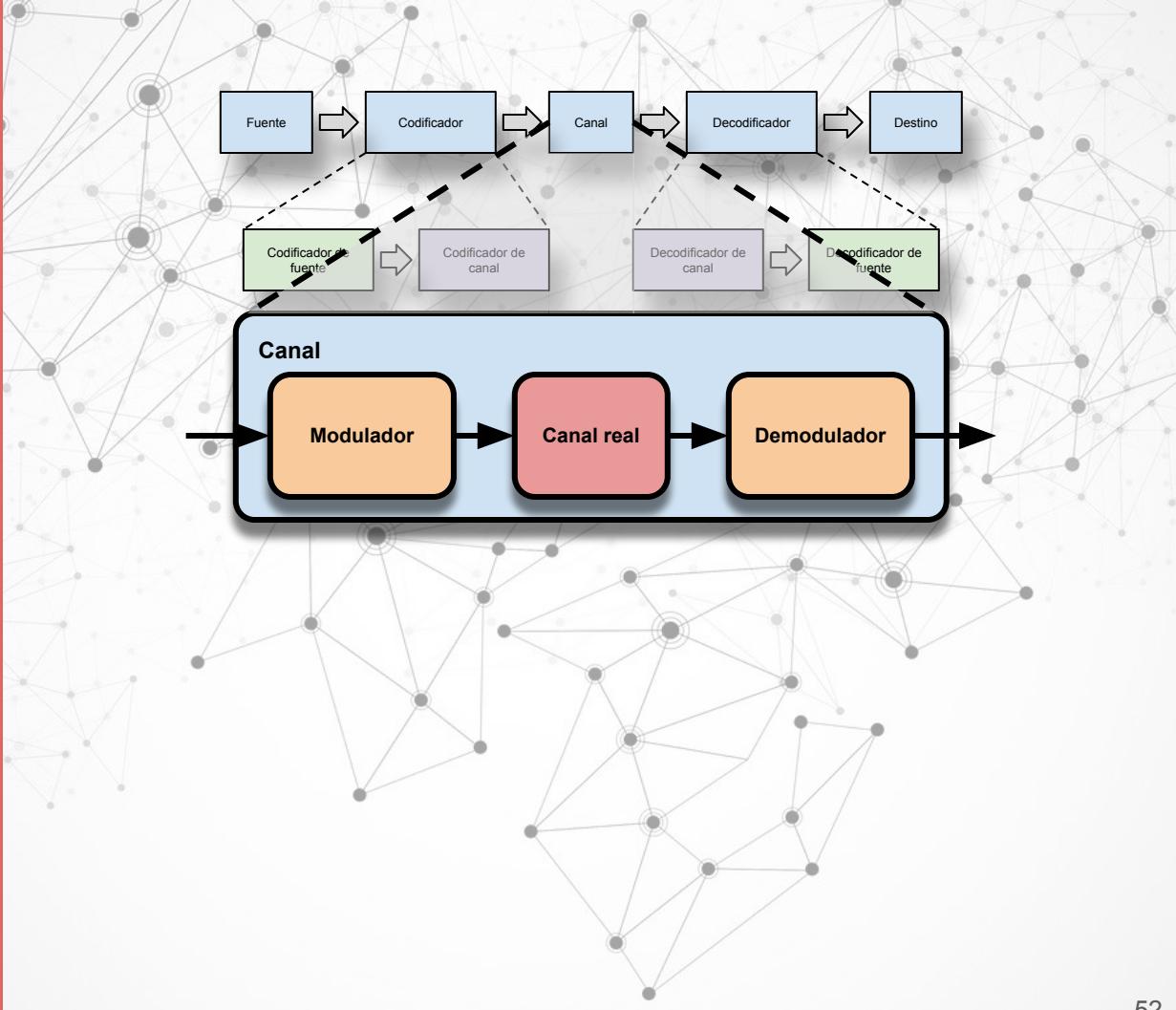
# Esquemas de modulación digital

## Resumen

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



# Ejercicio 3



# Ejercicio 3

## Enunciado



MSE-SDC-base\_repo / ejercicios / ej03 /

colorete87 MODEM & EJERCICIOS: Se actualizan los enunciados los tests

c2c492f on 11 Nov 2021 History

..

entrega EJERCICIOS->ENTREGAS: Readme replaced by gitignore 12 months ago

images EJERCICIOS: Se agrega enunciado ej05 y otros cambios menores 12 months ago

README.md MODEM & EJERCICIOS: Se actualizan los enunciados los tests 11 months ago

raised\_cosine.m EJERCICIOS: Se actualizan los ejjs 3 y 4 12 months ago

**README.md**

### Enunciado Trabajo Práctico 3

Simulación del modulador en banda base y el canal.

#### Objetivo

Familiarizarse con las tareas que realiza el modulador de banda base y con el modelo del canal y sus características.

#### Descripción

Se tiene el siguiente sistema:

```
graph LR; PRBS[PRBS] -- b[n] --> M1[M1]; M1 -- d[k] --> FIR[FIR p[k]]; FIR -- x[k] --> Canal[Canal]; Canal -- h[k] --> Sum(( )); Sum -- r[n] --> n[n]; n[n] -- n[k] --> Sum; Sum -- c[k] --> Out[ ];
```

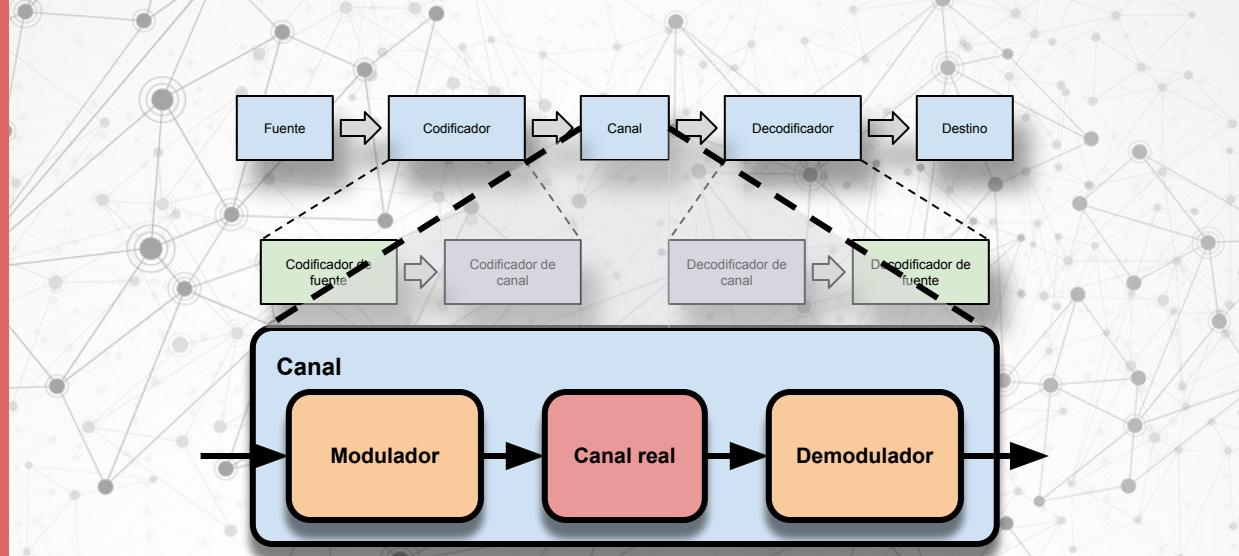
Consideré un periodo de muestreo de  $T_s = \frac{1}{16} \mu s$  y un tiempo de símbolo  $T_{\text{symb}}$  de 16 veces  $T_s$ .

1. Generar un script de *octave*, *python*, *matlab*, o cualquier otro lenguaje similar que implemente el sistema.

**Continuar leyendo el enunciado en GitHub**

# Demodulador:

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



# Demodulador

## Objetivos

### Objetivos:

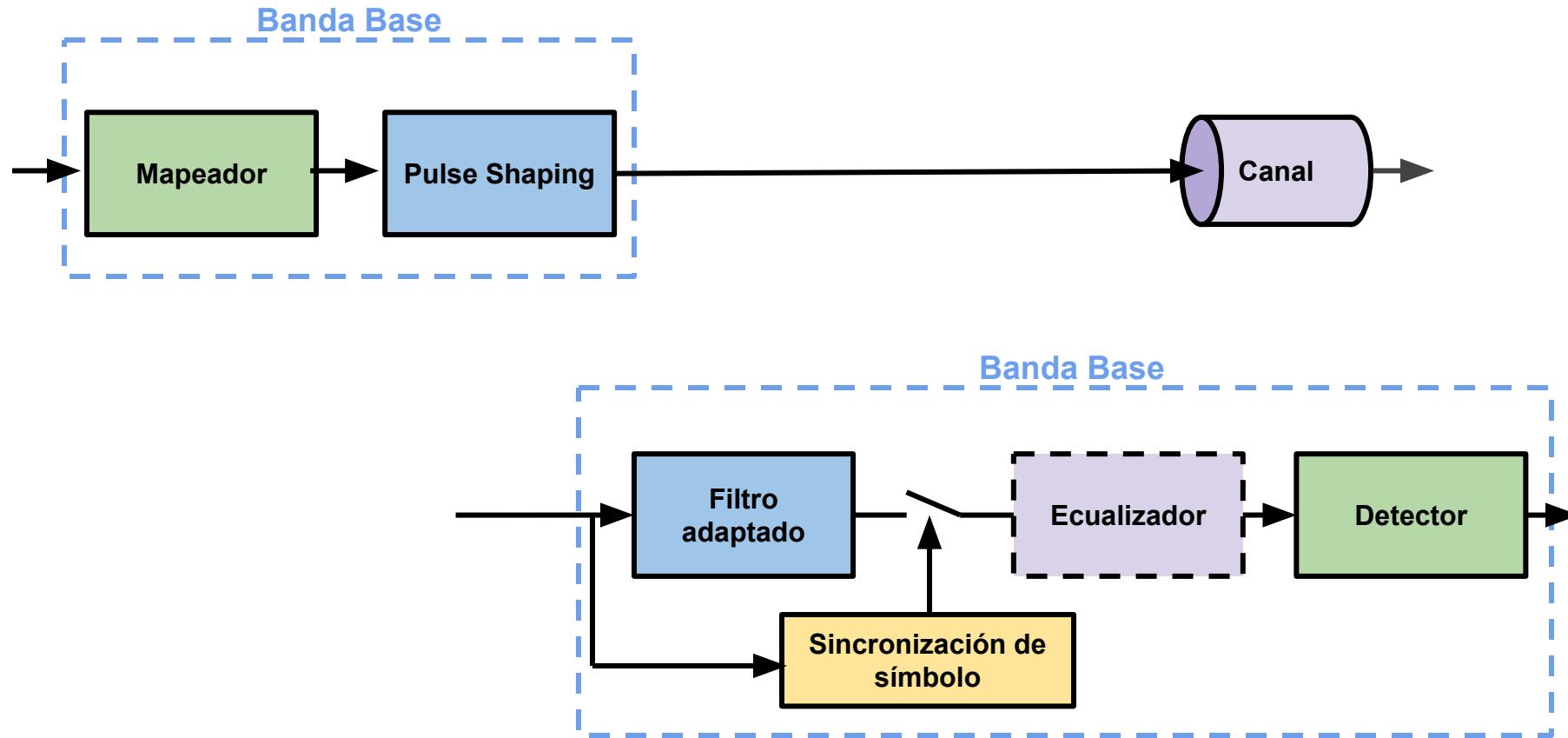
Transformar una las señales recibidas a través del canal, en una **secuencia de bits**.

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.

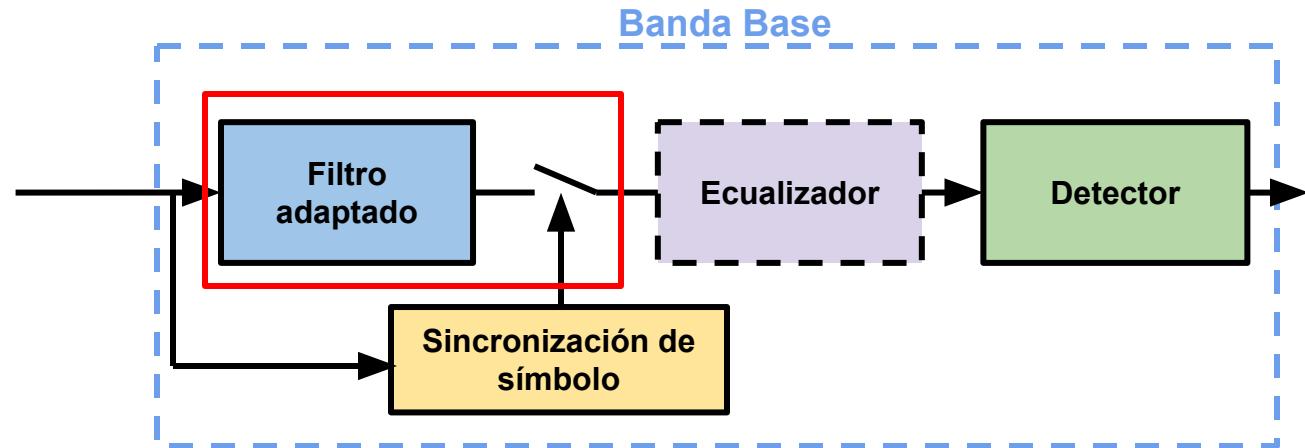
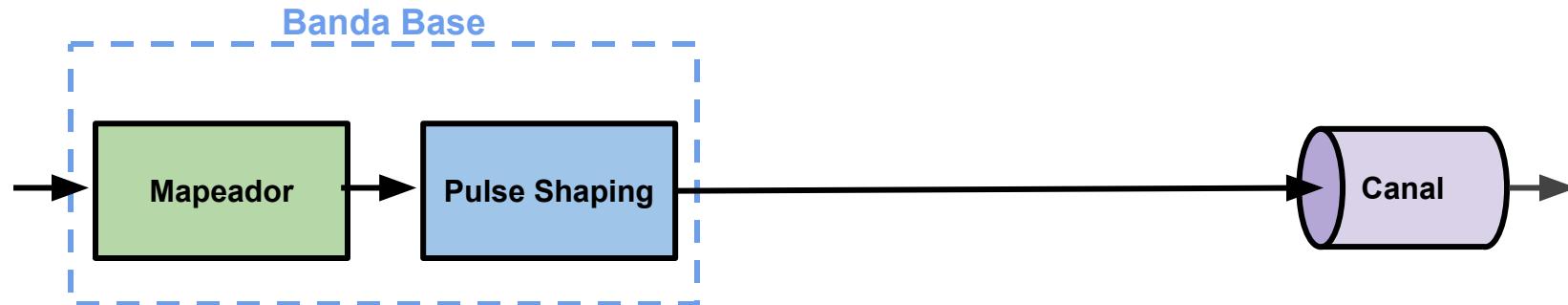
# Demodulador

## Demodulador en banda base



# Demodulador

Filtro adaptado y muestreo



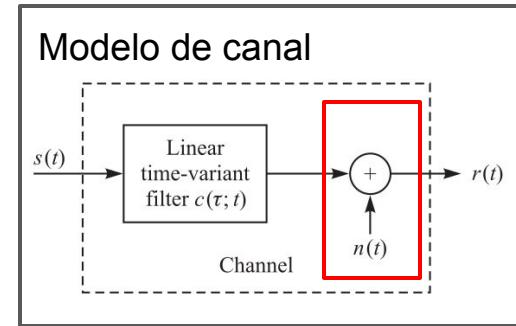
# Demodulador

## 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.

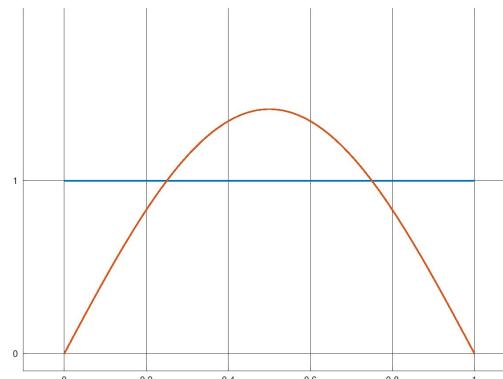
Se alcanza utilizando un filtro con la **misma forma que el pulso** elegido:

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



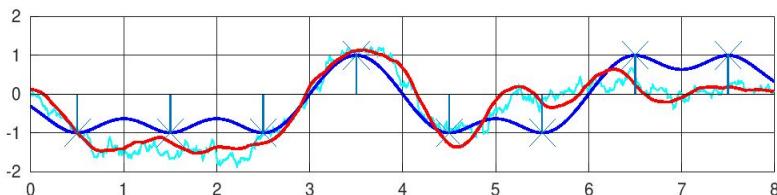
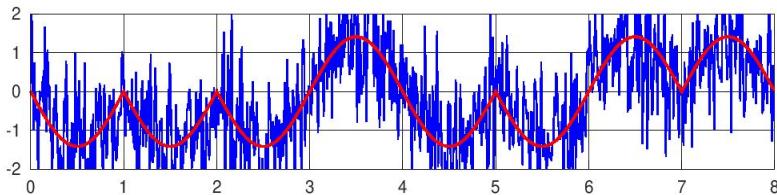
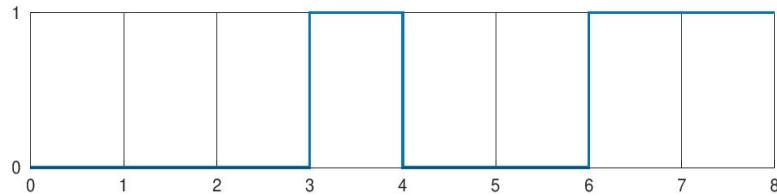
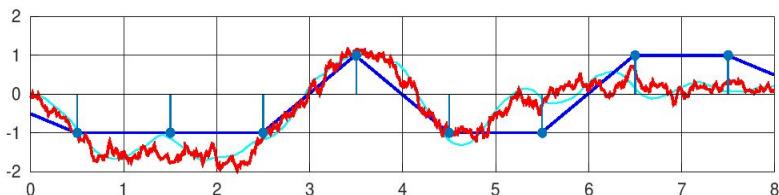
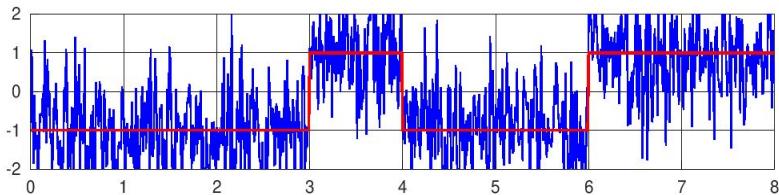
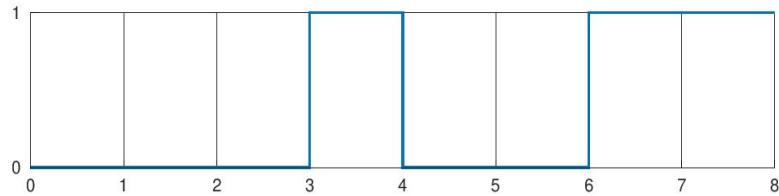
Se debe **muestrear** la señal filtrada en el **momento exacto** donde  $t=kT$ .

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



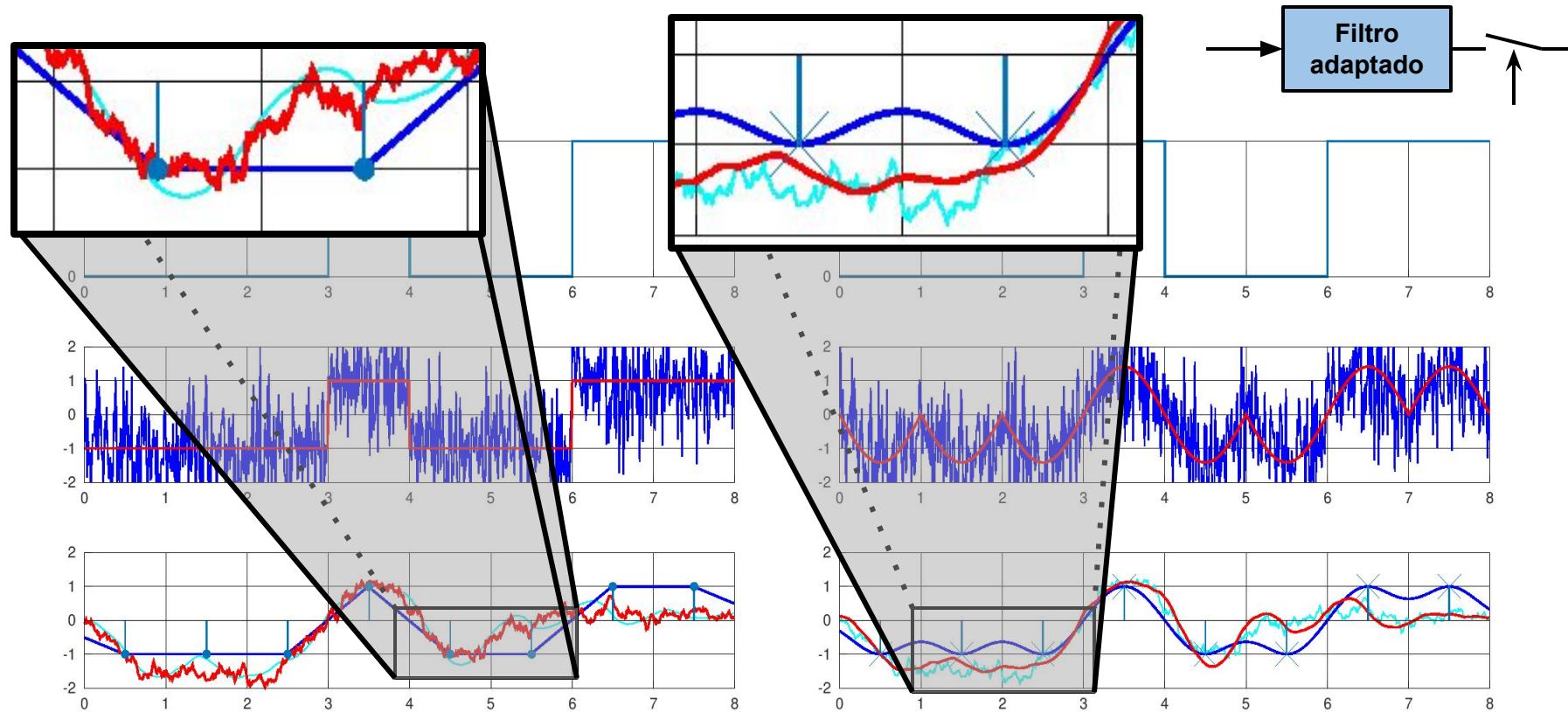
# Demodulador

## Filtro adaptado y muestreo



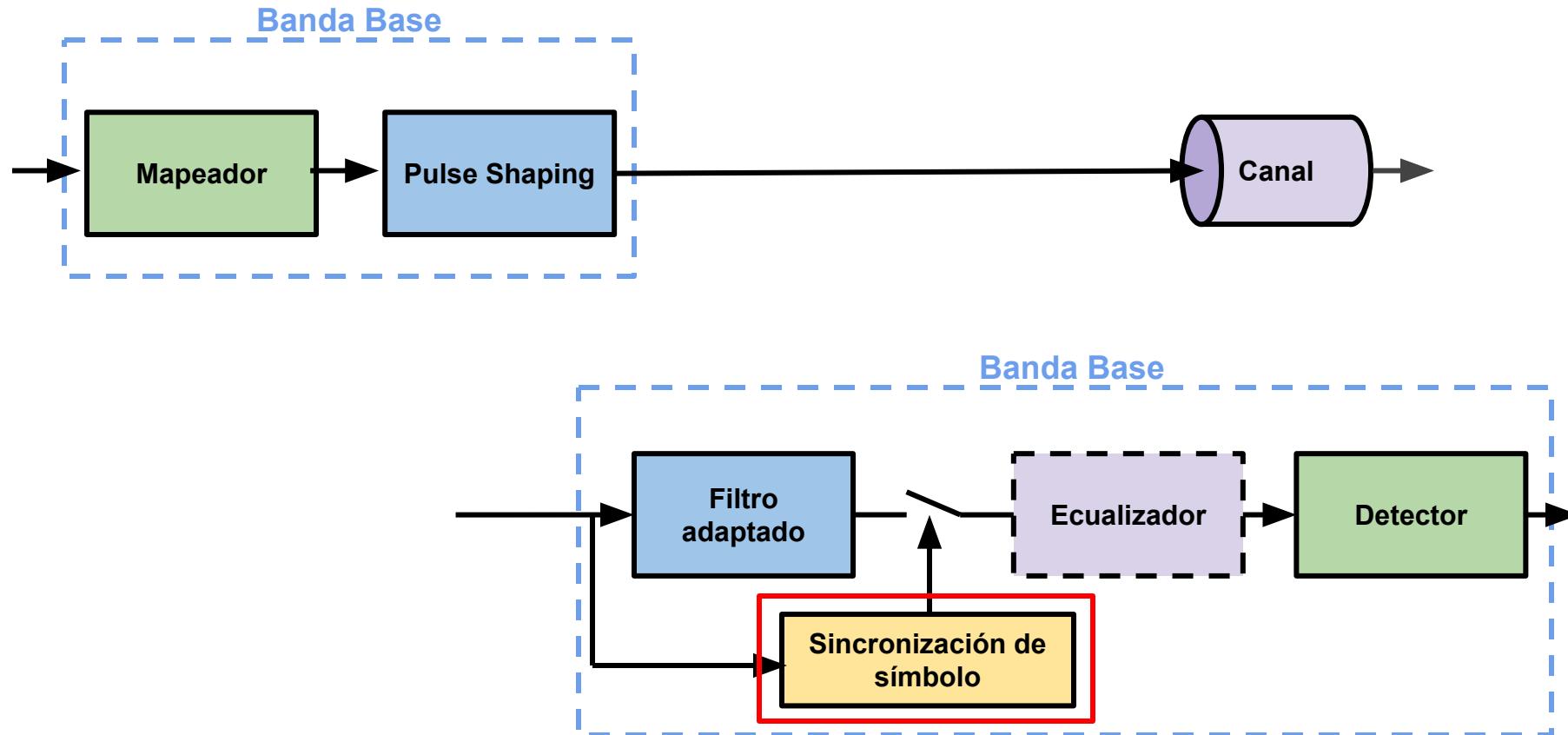
# Demodulador

## 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  $t=kT$ .

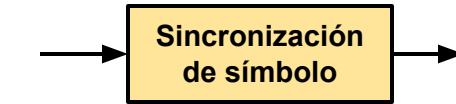
También se conoce como:

*Clock recovery*

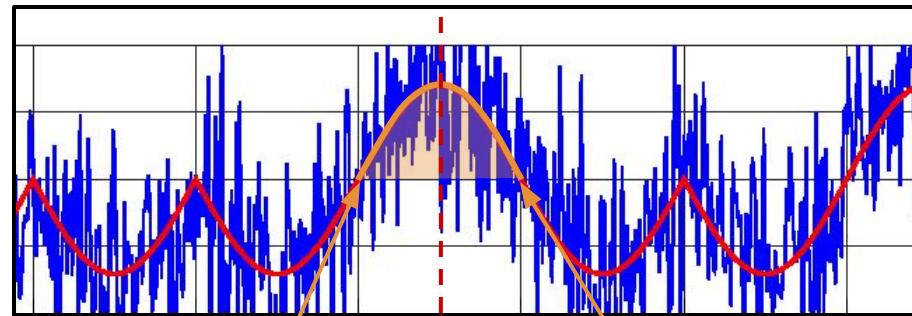
*Symbol timing recovery*

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

$t = kT$

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  $t=kT$ .

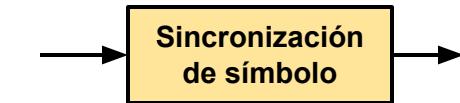
También se conoce como:

*Clock recovery*

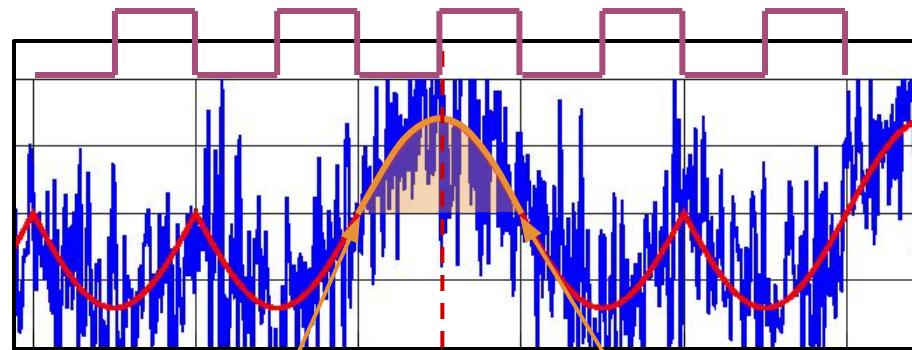
*Symbol timing recovery*

Existen diversas técnicas para sincronizar el pulso.

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



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  $t=kT$ .

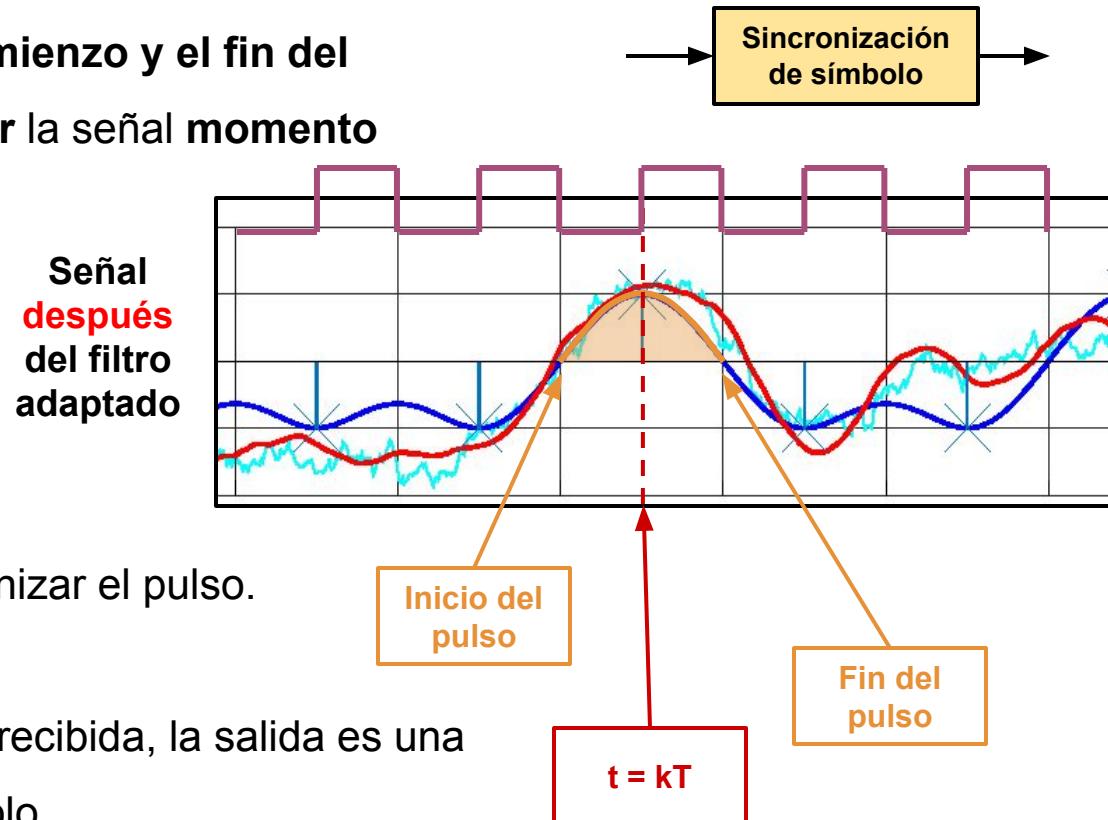
También se conoce como:

*Clock recovery*

*Symbol timing recovery*

Existen diversas técnicas para sincronizar el pulso.

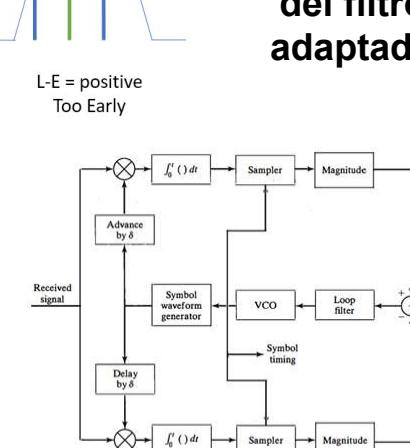
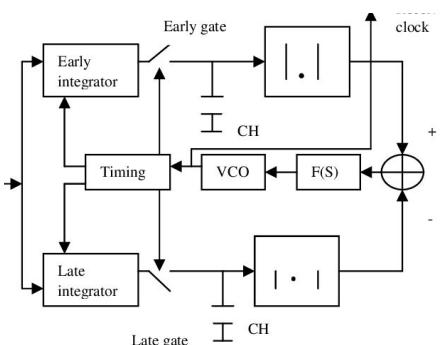
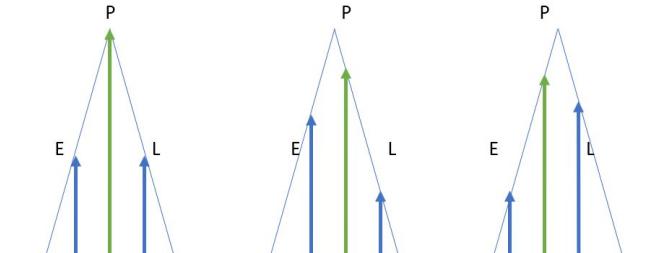
La entrada es generalmente la señal recibida, la salida es una señal periódica alineada con el símbolo.



# Demodulador

## Sincronización de símbolo

### Ejemplo de sincronizador Early-Late:



Señal  
después  
del filtro  
adaptado

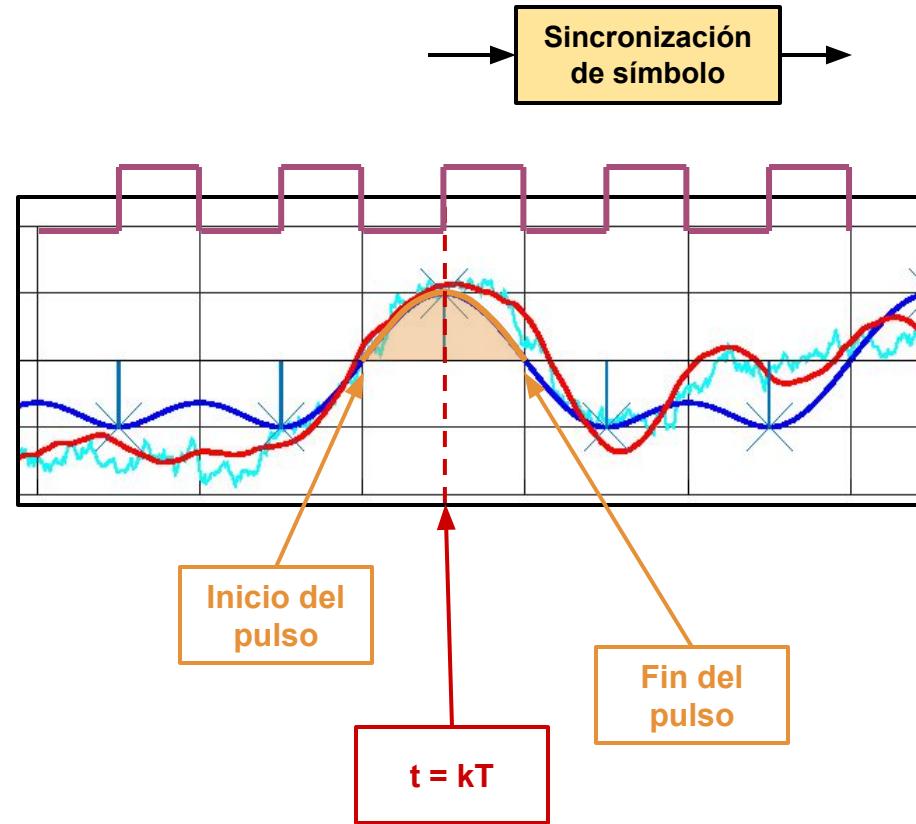


Figure 8.80 Block diagram of early-late gate synchronizer.

# Demodulador

## Sincronización de símbolo

Ejemplo de sincronizador con PLL: Open-loop

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

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

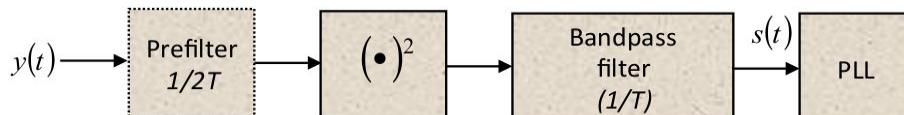
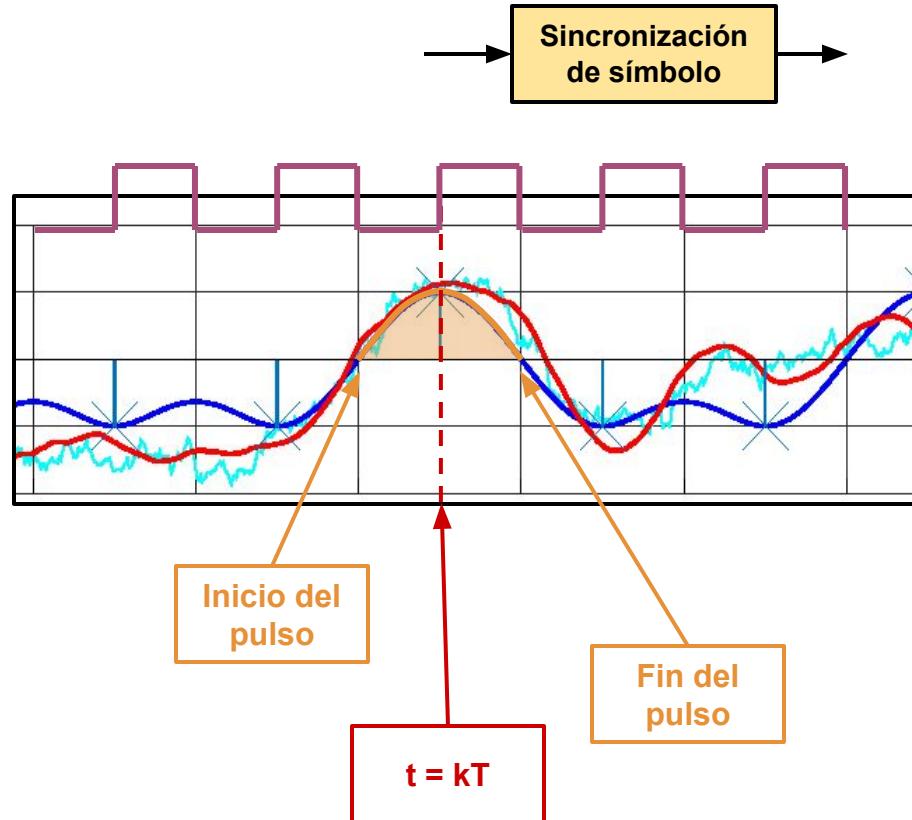
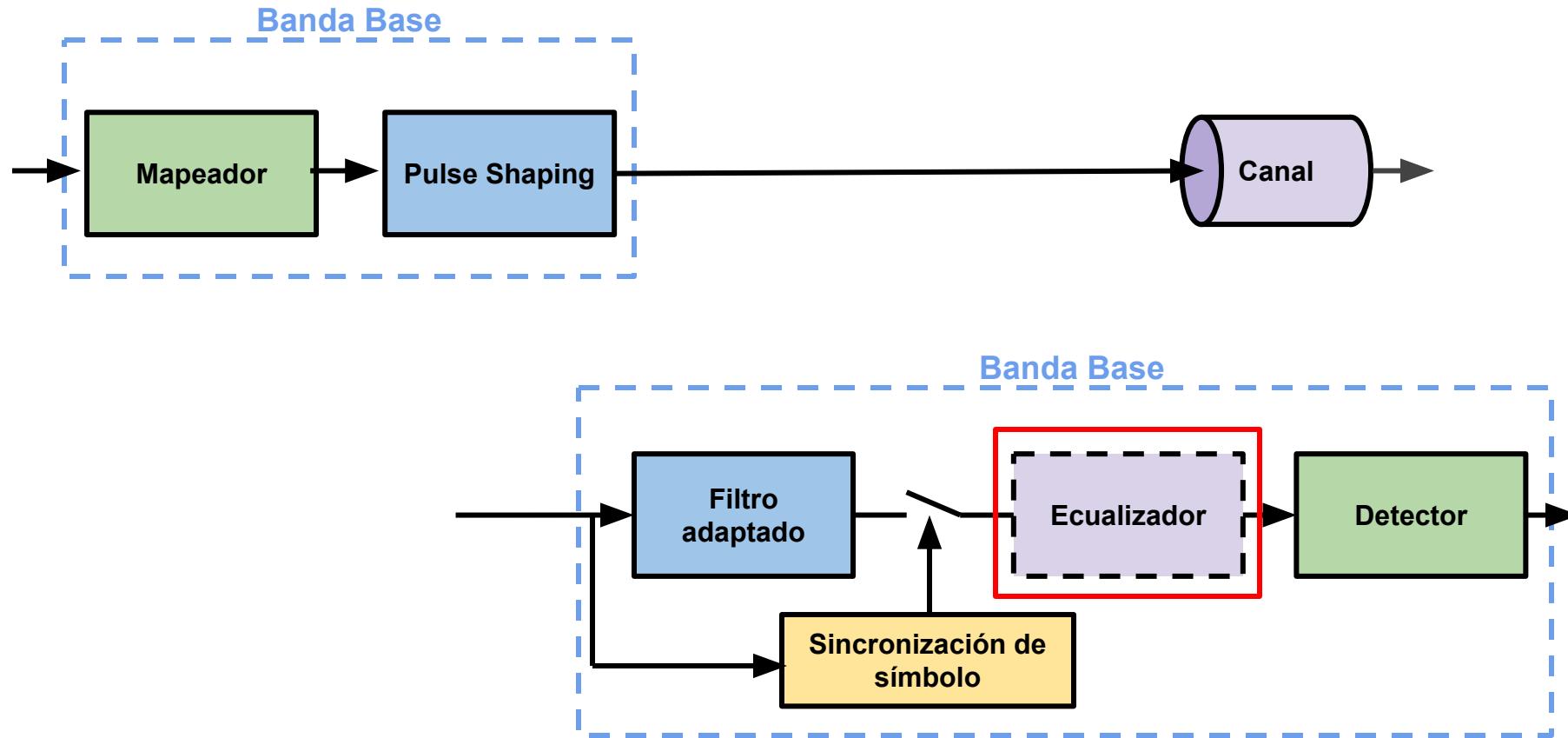


Figure 6.10: Square-law timing recovery.



# 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

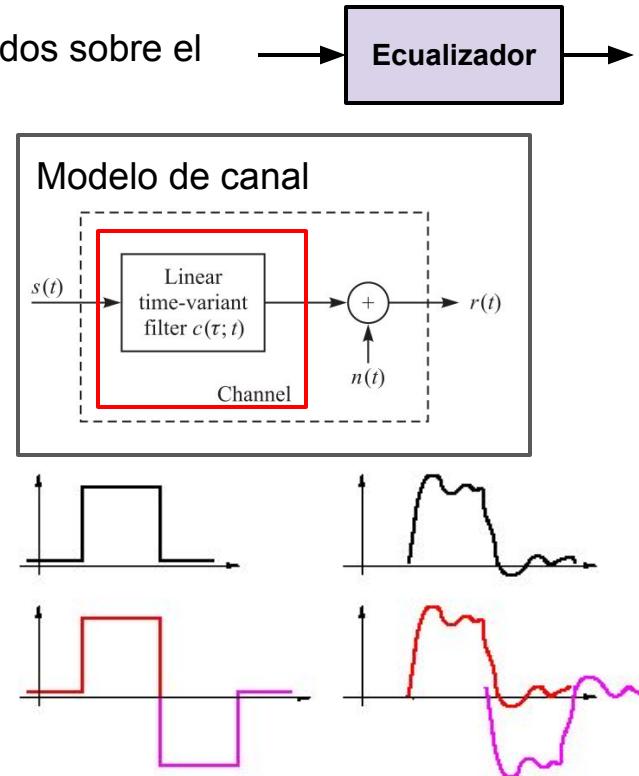
**No lineales** (tienen realimentación, son adaptativos):

- 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**.

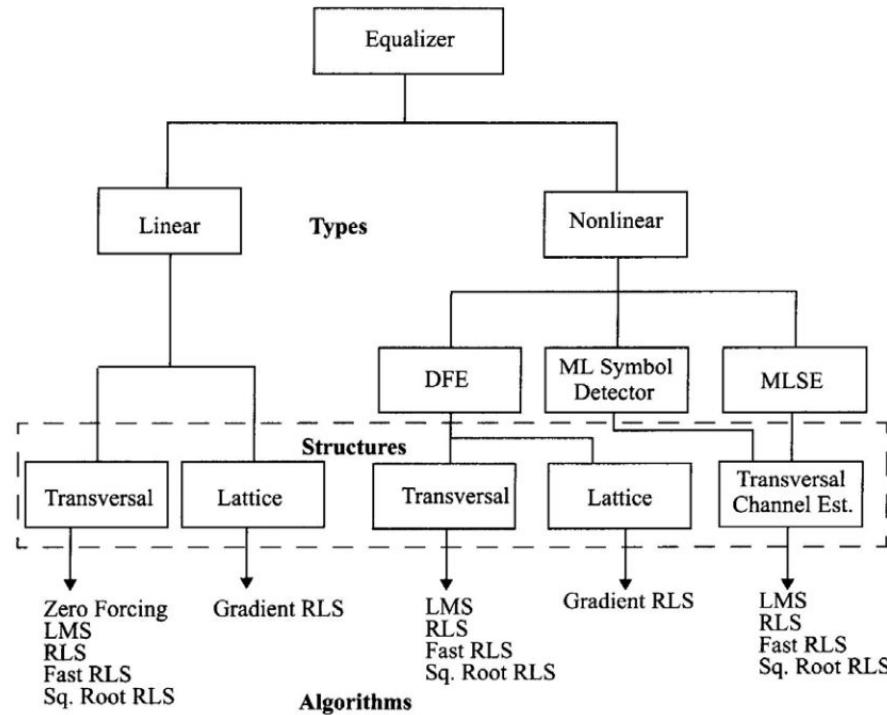
La salida es la señal correspondiente, ecualizada.



# Demodulador

## Ecualizador

### Clasificación de ecualizadores:



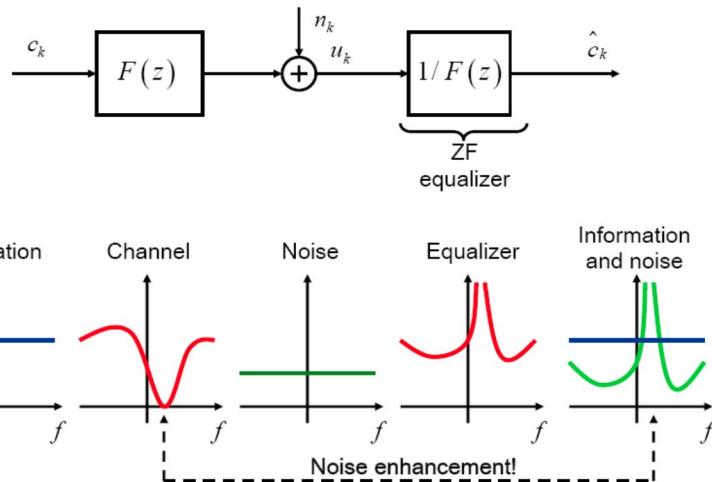
# Demodulador

## Ecualizador

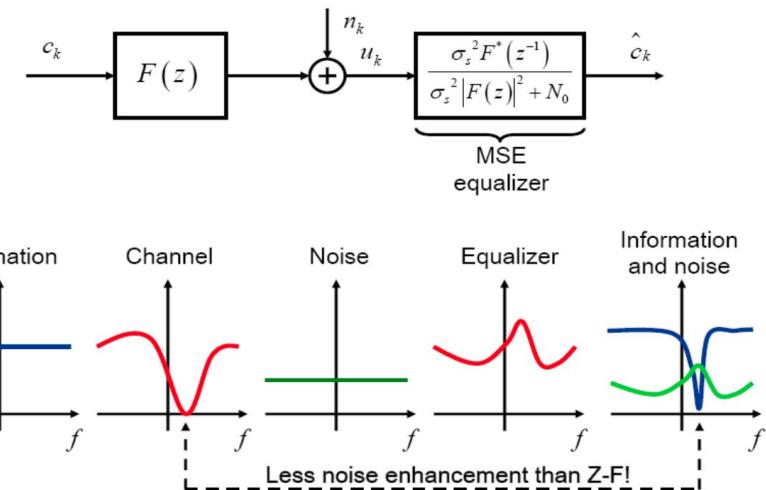
Ejemplos de ecualizadores lineales:



Ecualizador Zero-forcing



Ecualizador MMSE

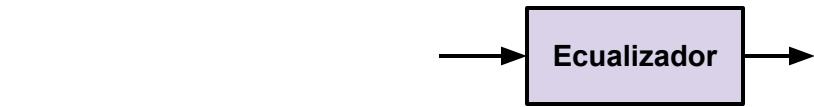
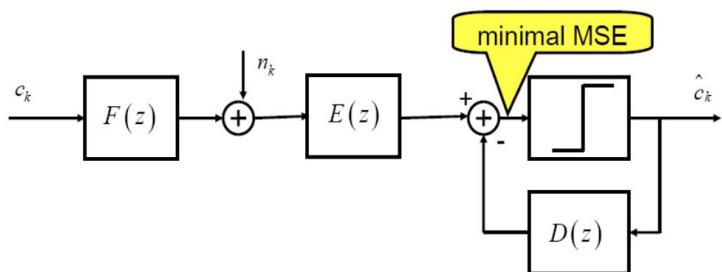
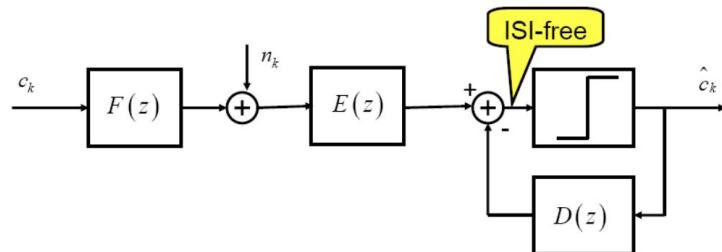


# Demodulador

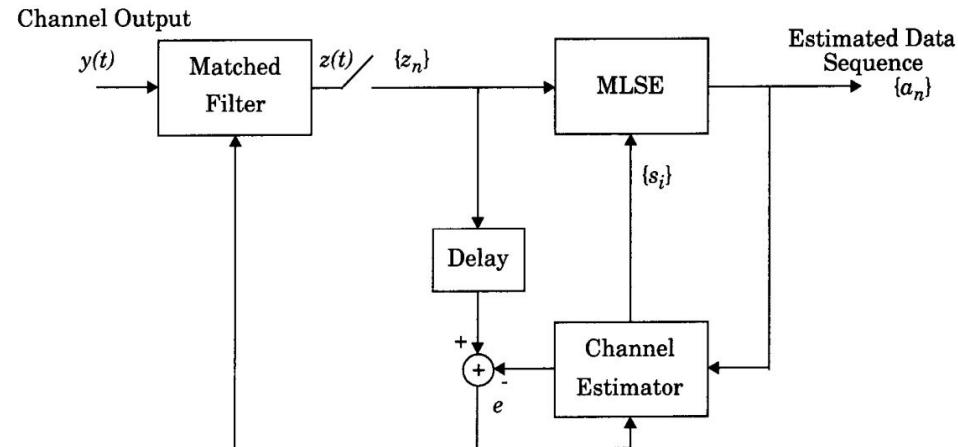
## Ecuilizador

Ejemplos de ecualizadores no lineales:

Ecuilizador Decision-Feedback (DFE)



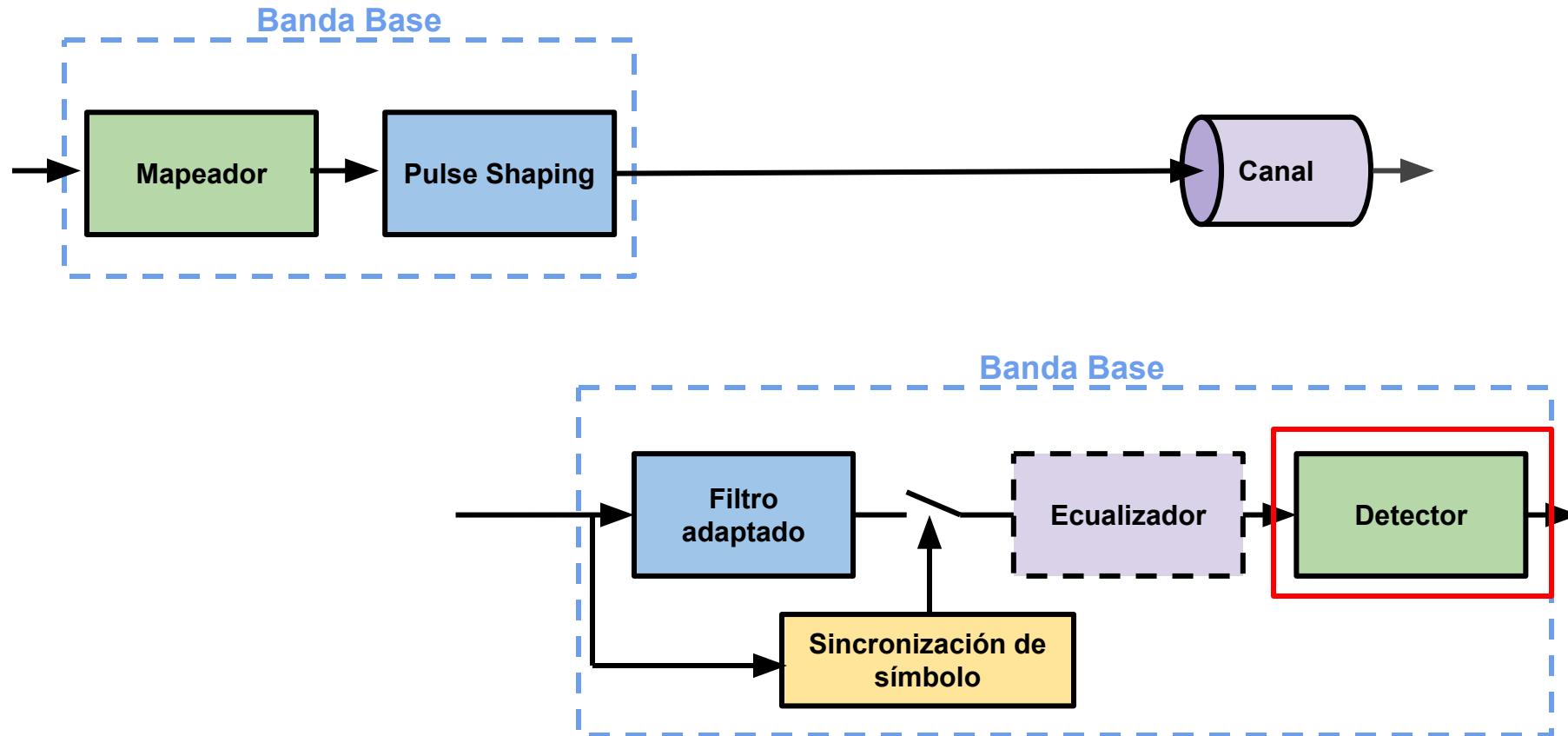
Ecuilizador de Estimación de Secuencia  
de Máxima Verosimilitud (MLSE)



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

# Demodulador

## Detector



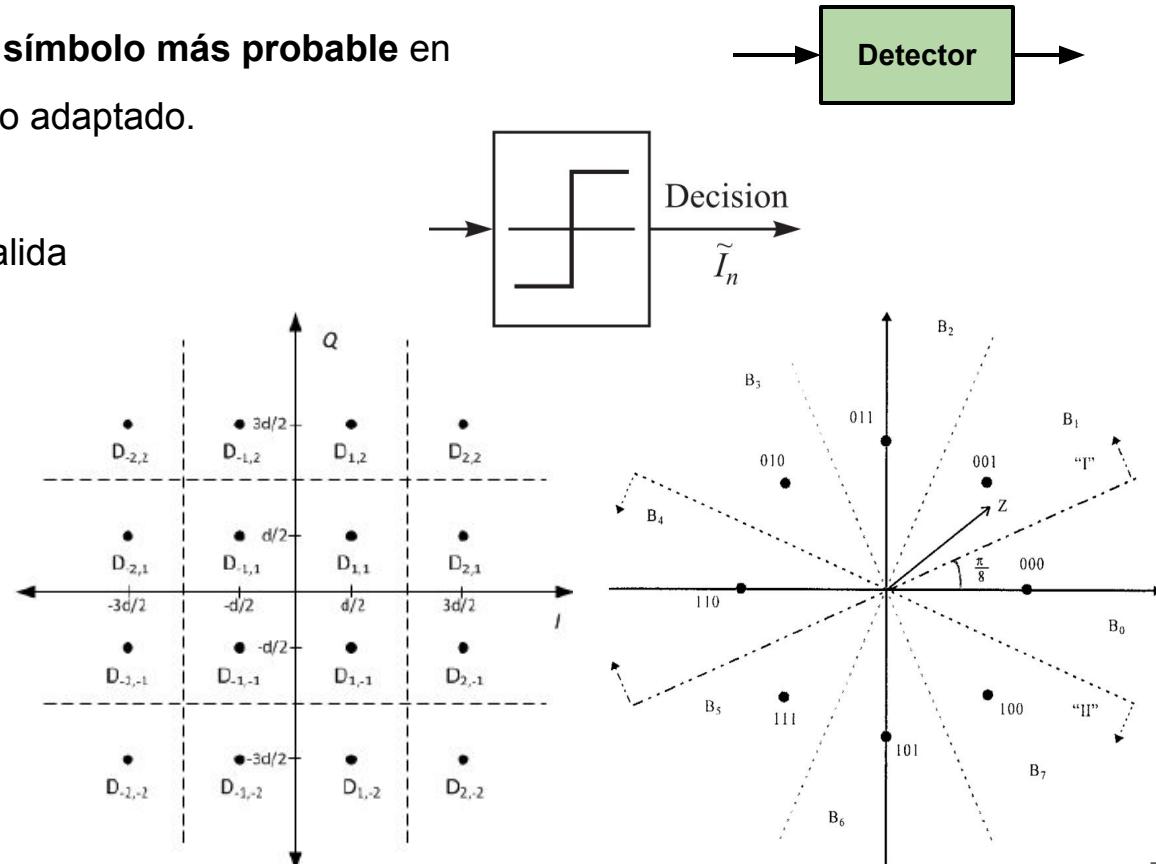
# Demodulador

## Detector

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

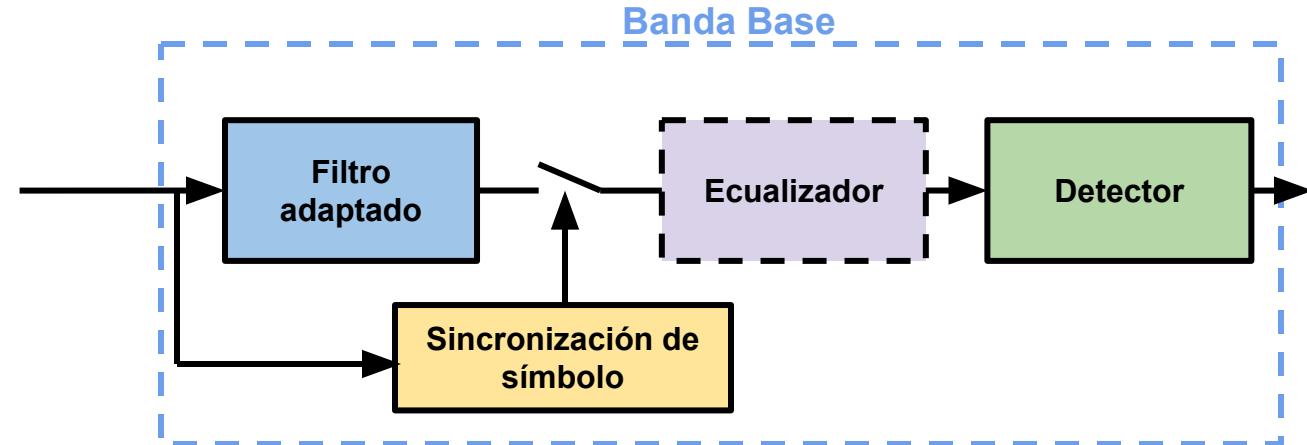
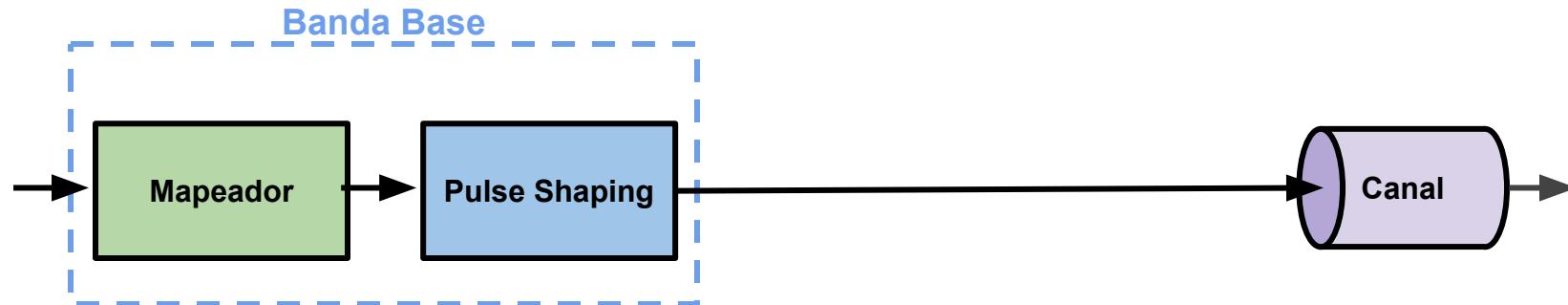
En muchos ecualizadores se utiliza su salida como realimentación para adaptar los coeficientes de los filtros ecualizadores.

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



# Demodulador

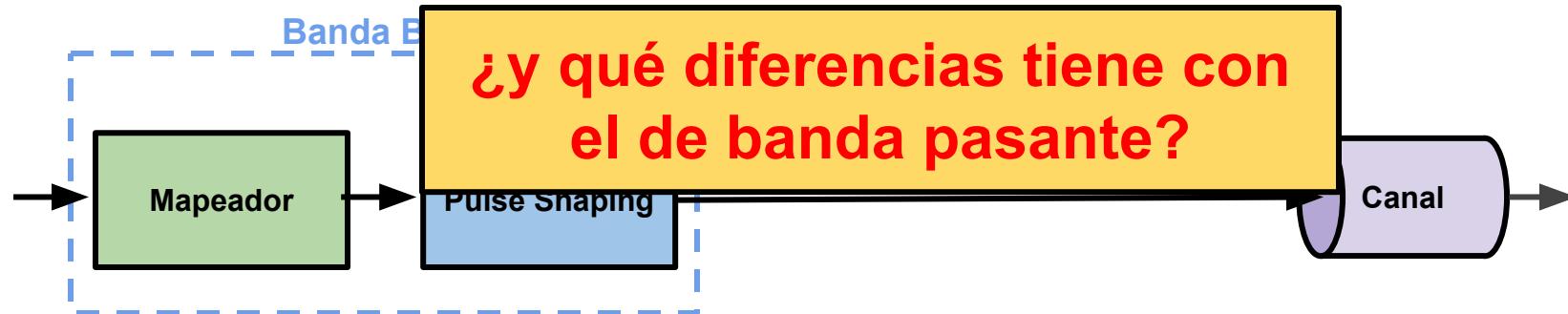
Modulador y demodulador en banda base



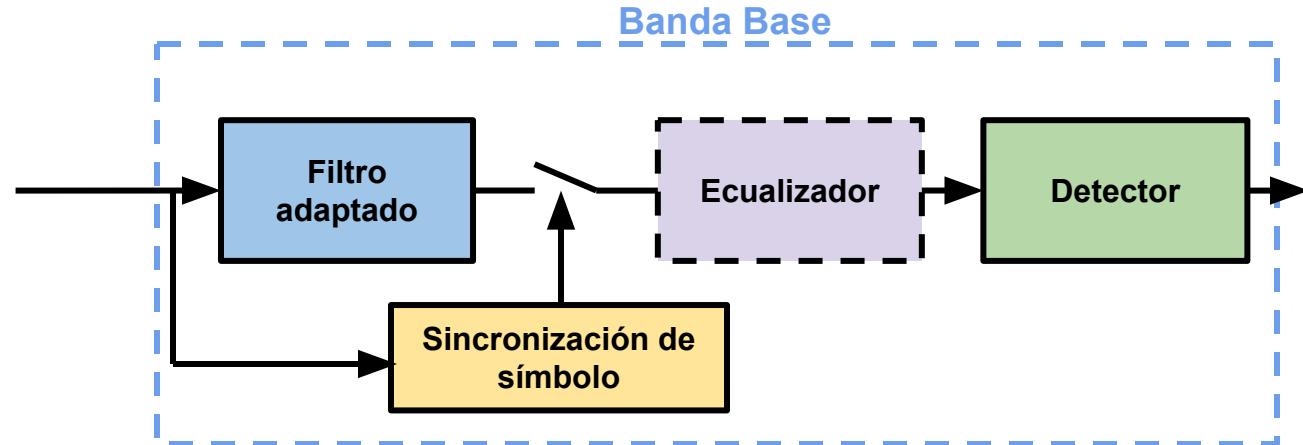
Volvemos a mostrar  
el diagrama en  
bloques completo

# Demodulador

Modulador y demodulador en banda base

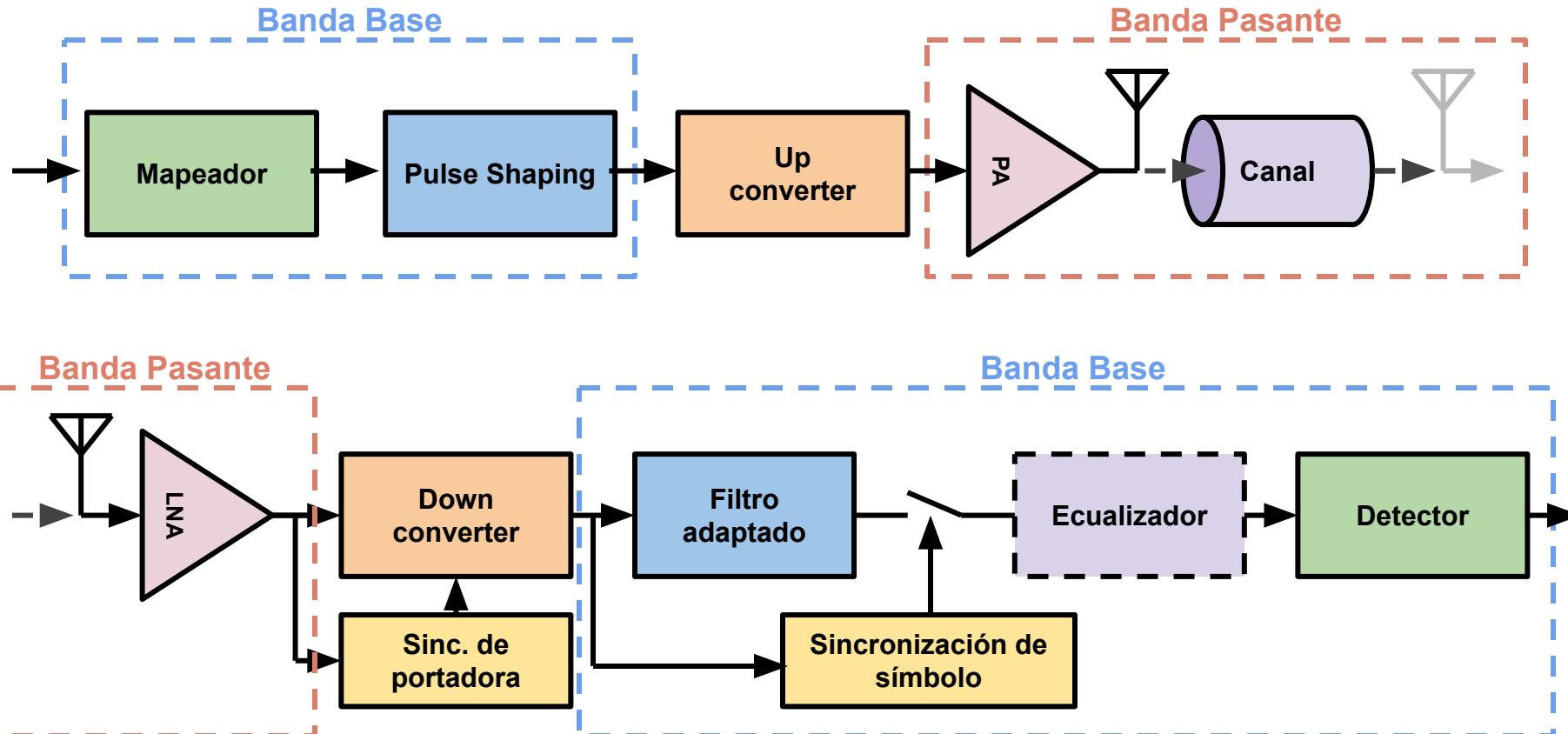


¿y qué diferencias tiene con el de banda pasante?



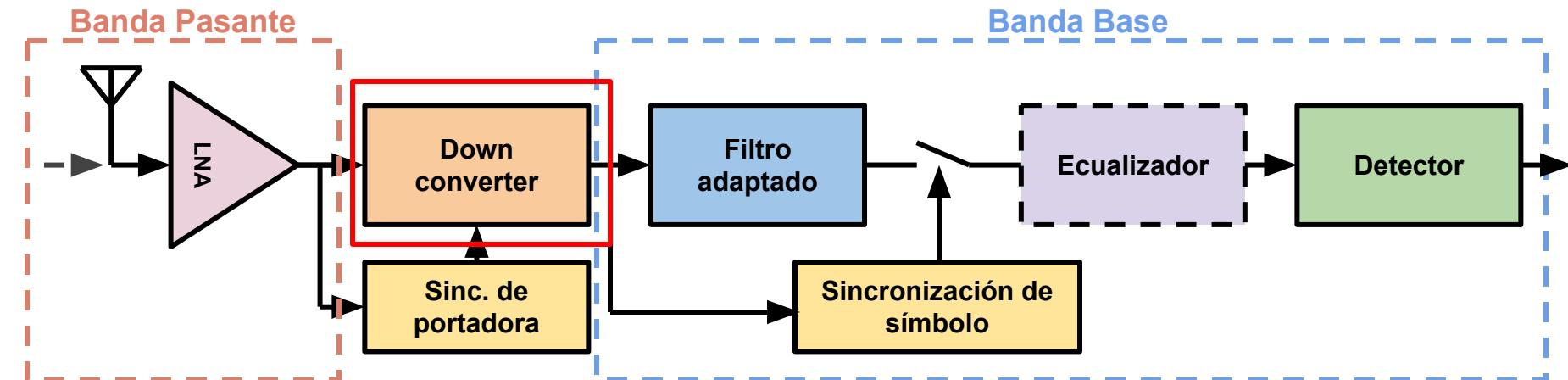
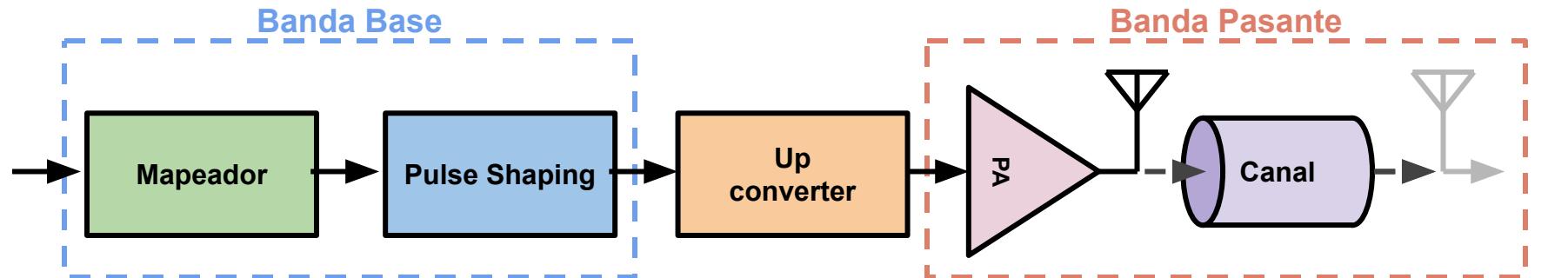
# Demodulador

Modulador y demodulador en banda pasante



# Demodulador

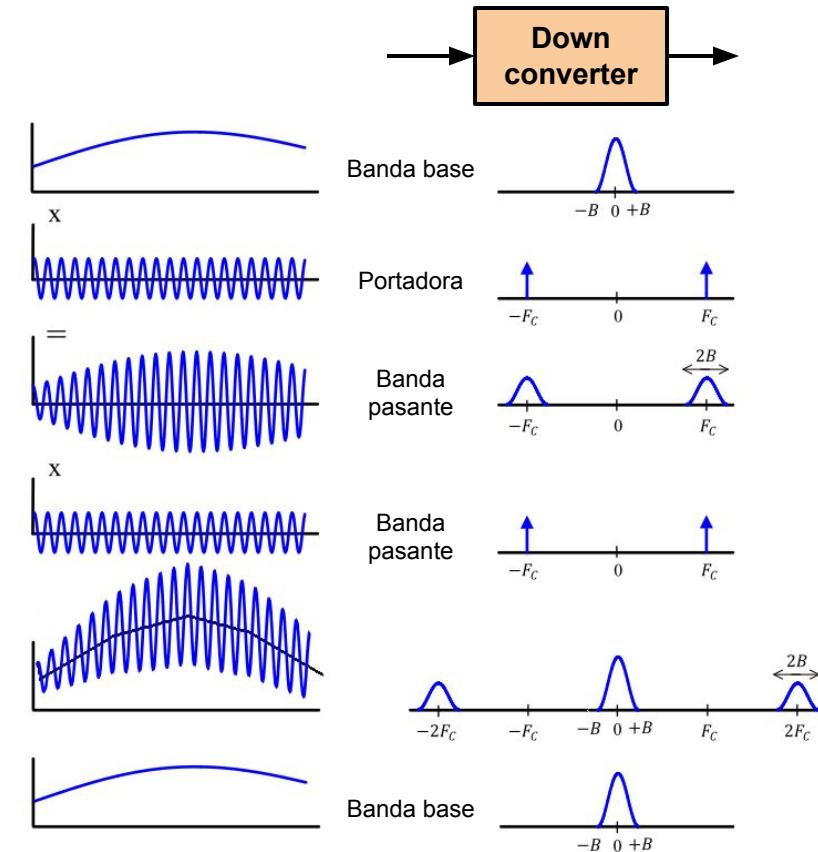
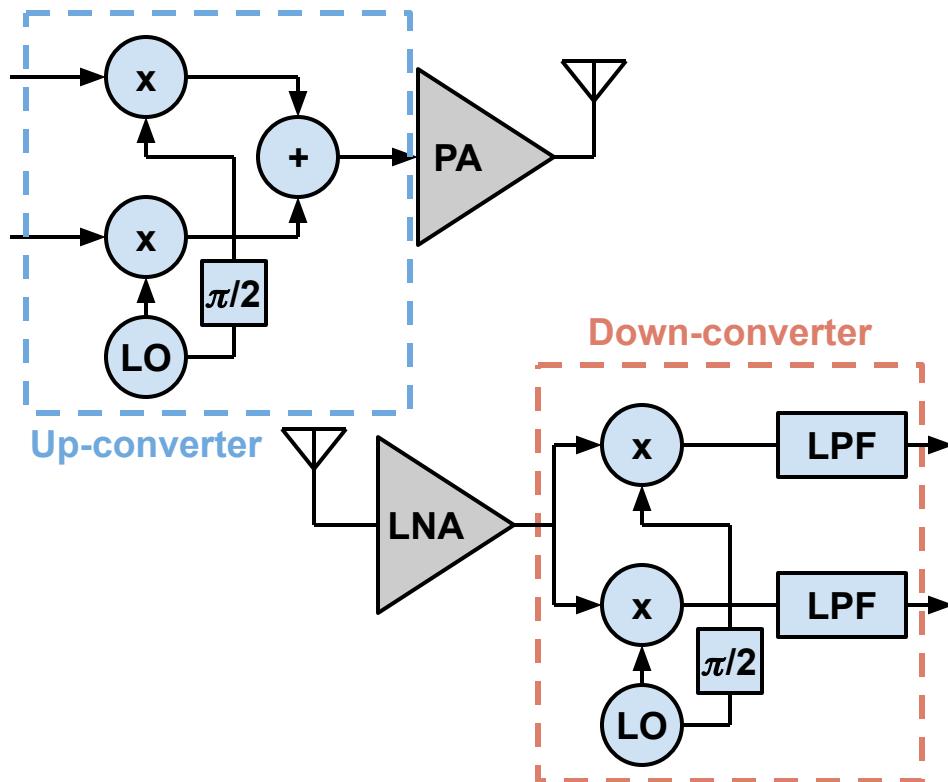
## Down converter



# Demodulador

## Down converter

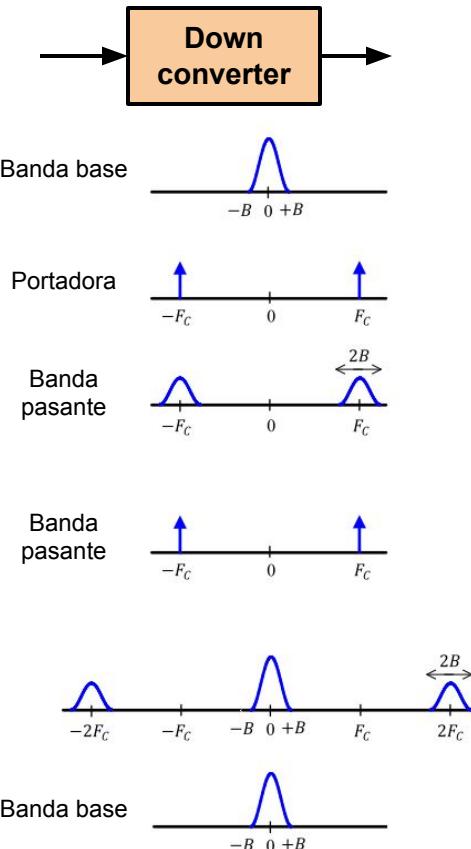
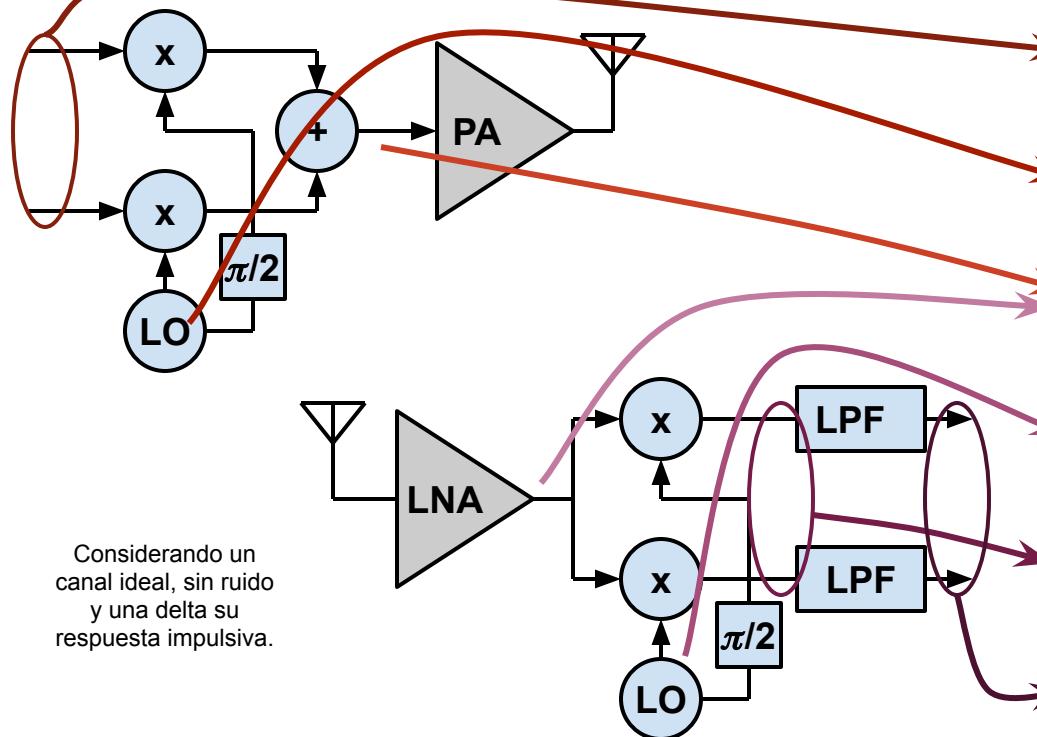
El objetivo del down-converter es **recuperar la señal de BB.**



# Demodulador

## Down converter

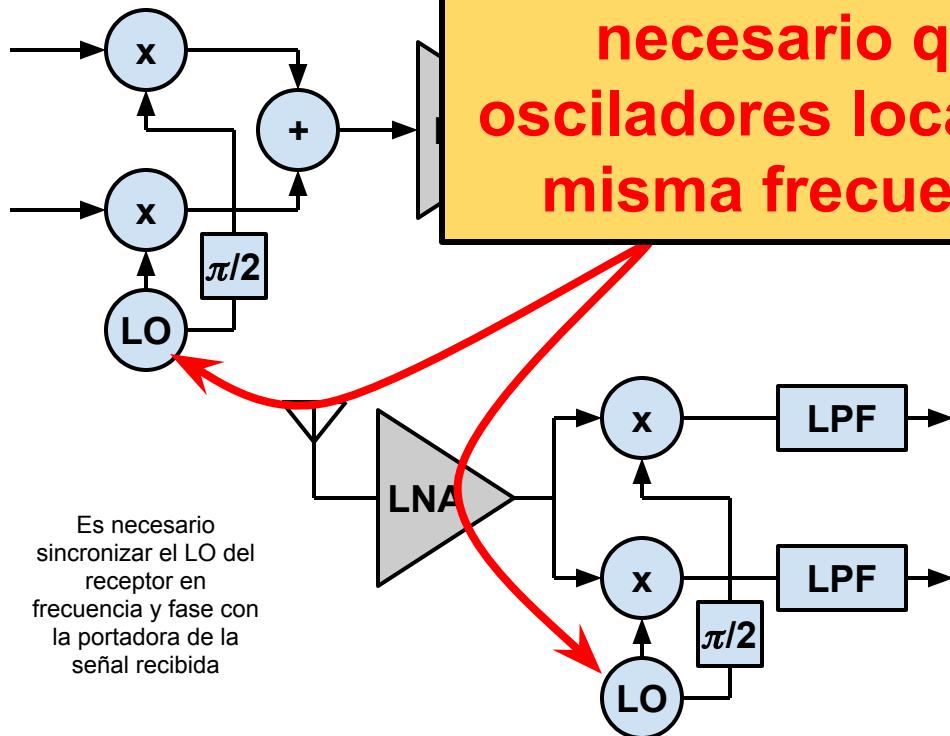
El objetivo del down-converter es **recuperar la señal de BB.**



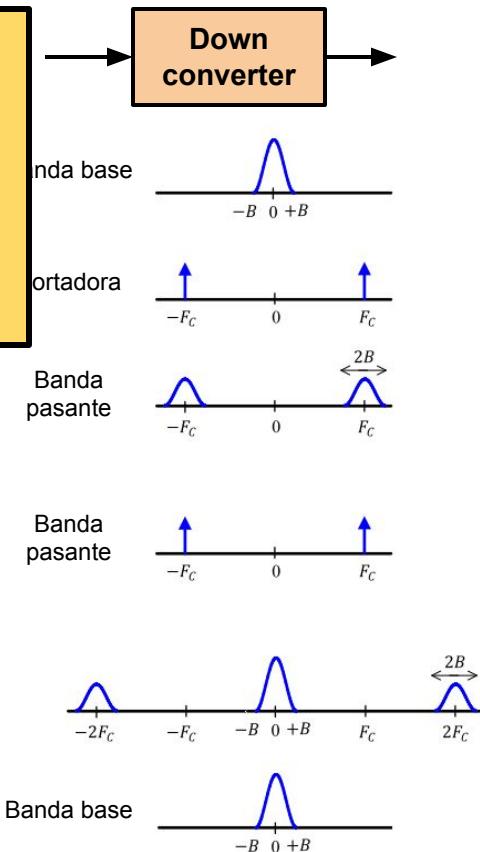
# Demodulador

## Down converter

El objetivo del down-conver-

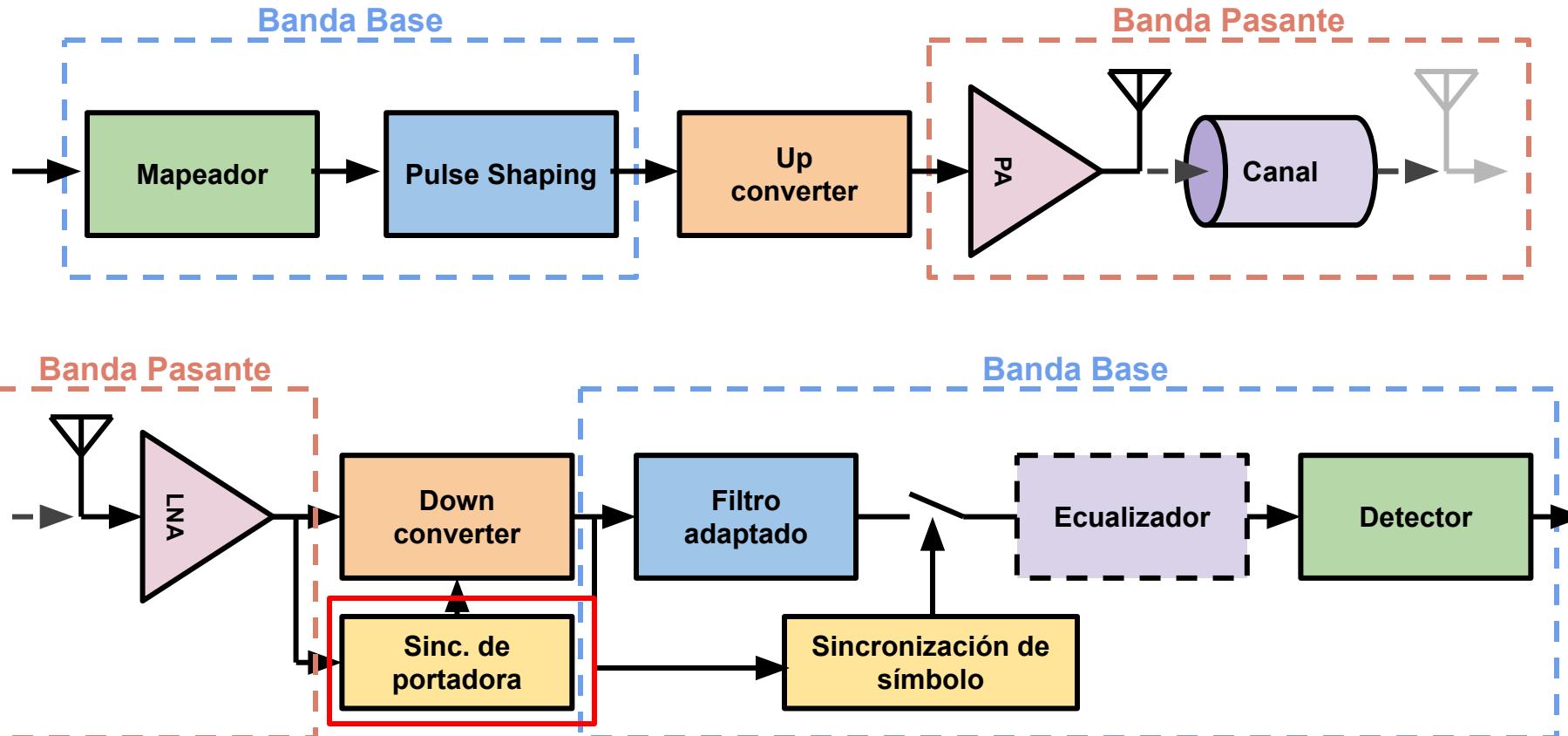


Para que esto suceda es necesario que ambos osciladores locales tengan la misma frecuencia y fase!



# 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:

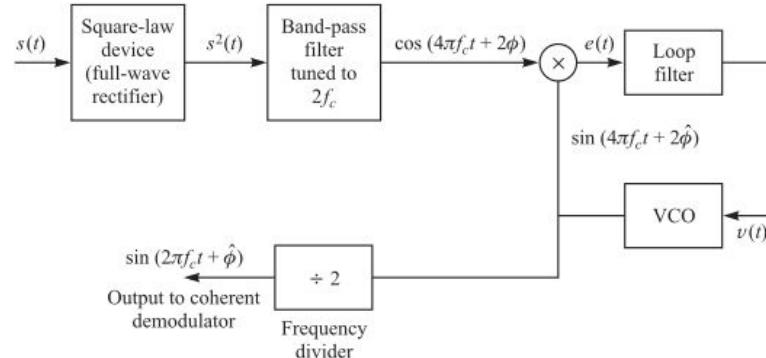
- Decision-directed
- Non-decision-directed

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).

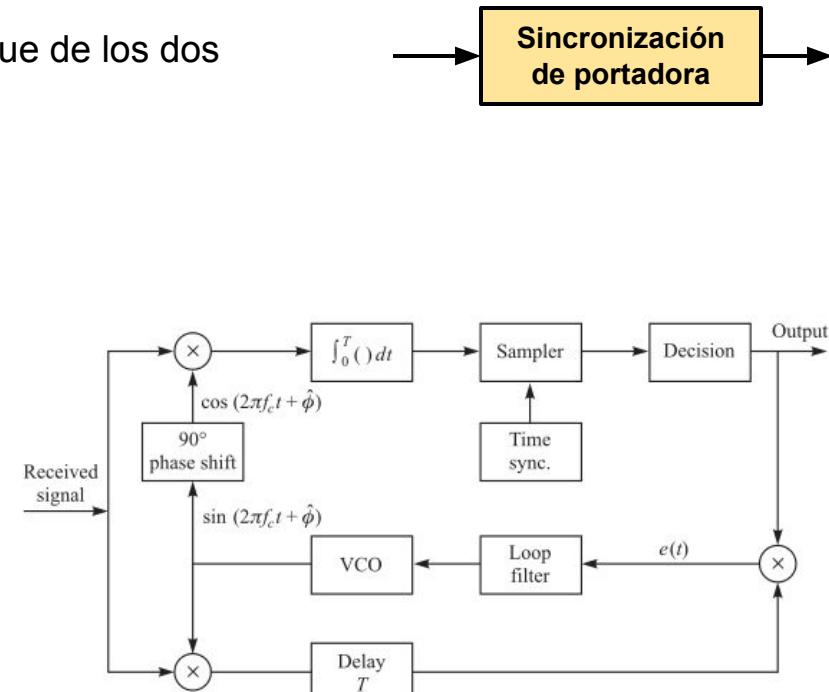
# Demodulador

## Sincronización de portadora

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



Non-decision-directed

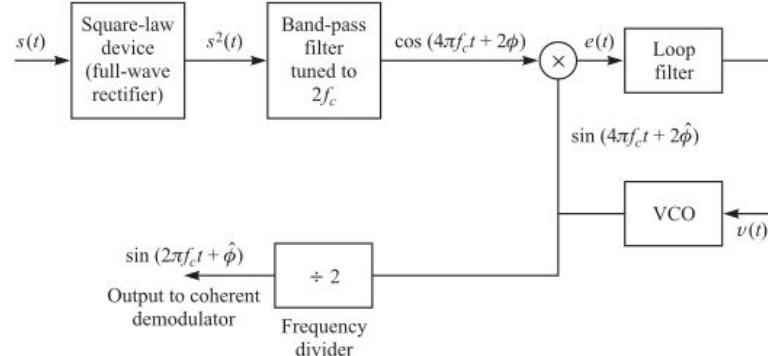


Decision-directed

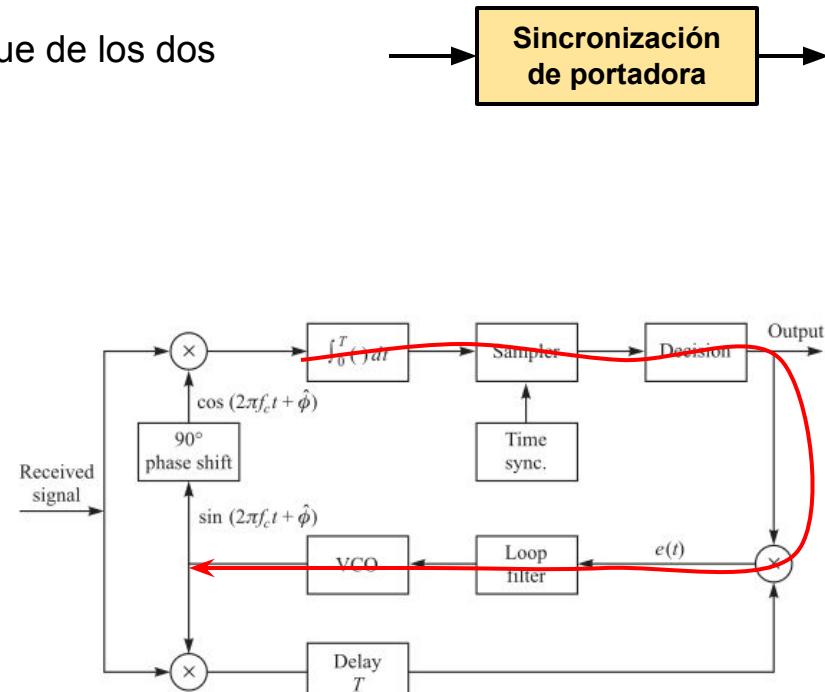
# Demodulador

## Sincronización de portadora

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



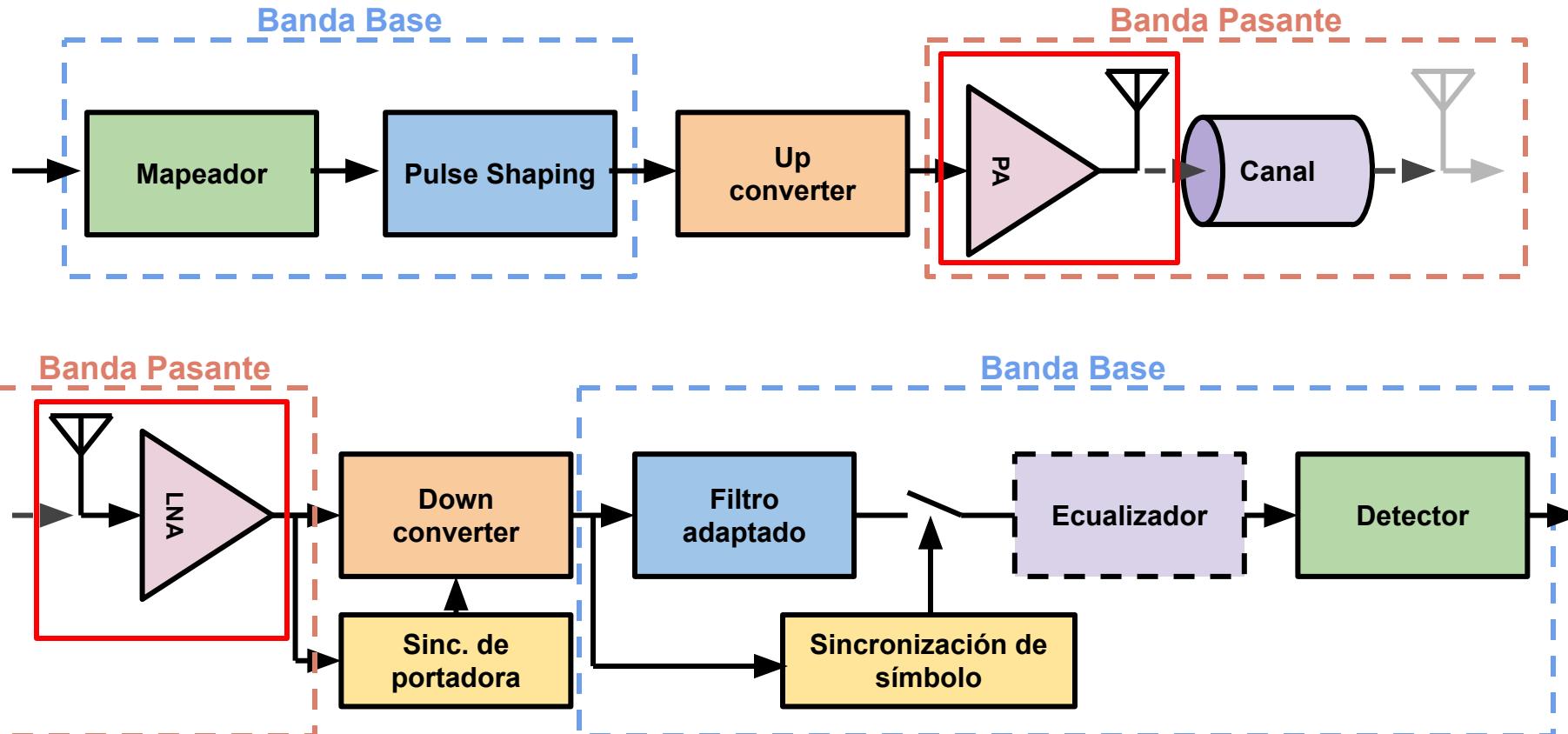
Non-decision-directed



Decision-directed

# Demodulador

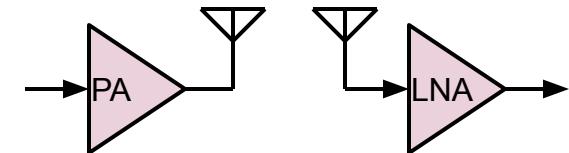
Amplificadores de RF y antenas



# 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.

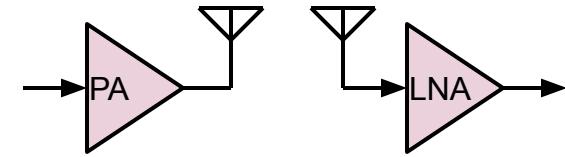
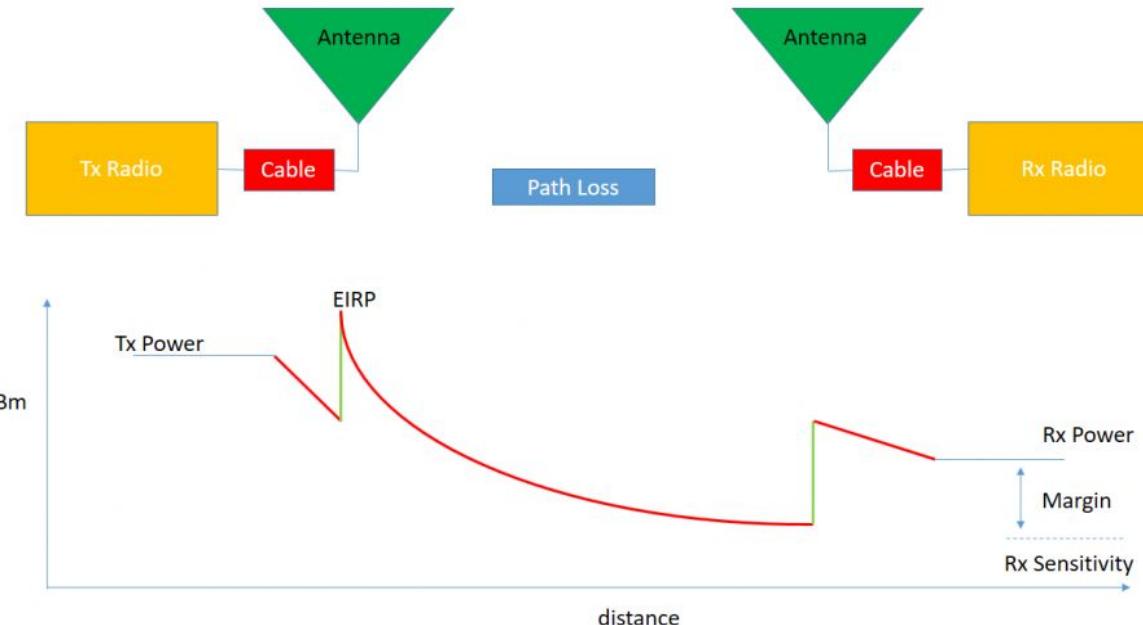
Por suerte para todos no nos vamos a meter en éste área.

# Demodulador

## Amplificadores de RF y antenas

Margen de potencia del link y presupuesto del link:

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

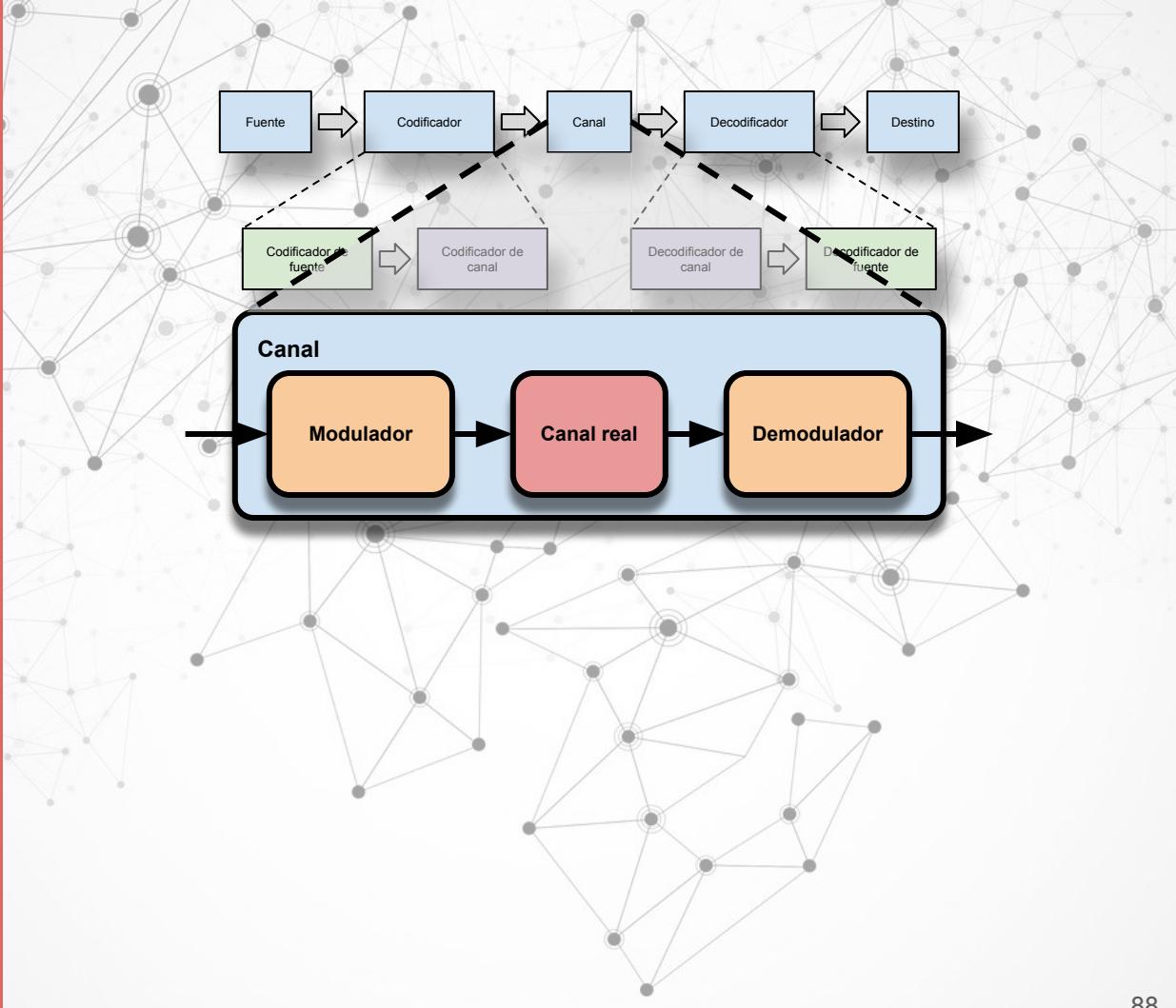


### Parámetros:

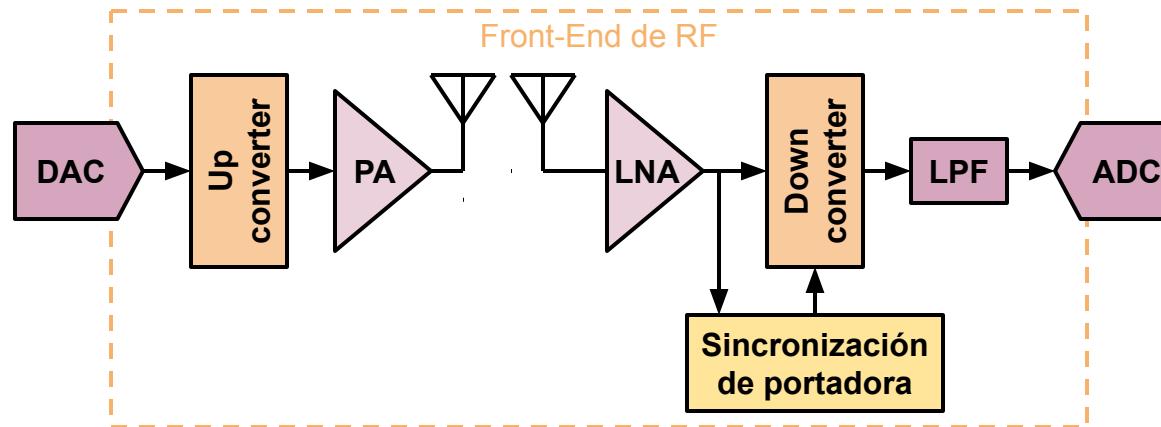
- Potencia de transmisión
- Ganancia de antena TX
- Ganancia de antena RX
- Pérdida de conectores
- Pérdida de cables
- Pérdida en el canal (modelo)
- Sensibilidad del receptor
- Potencia de ruido
- Ancho de banda del ruido

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

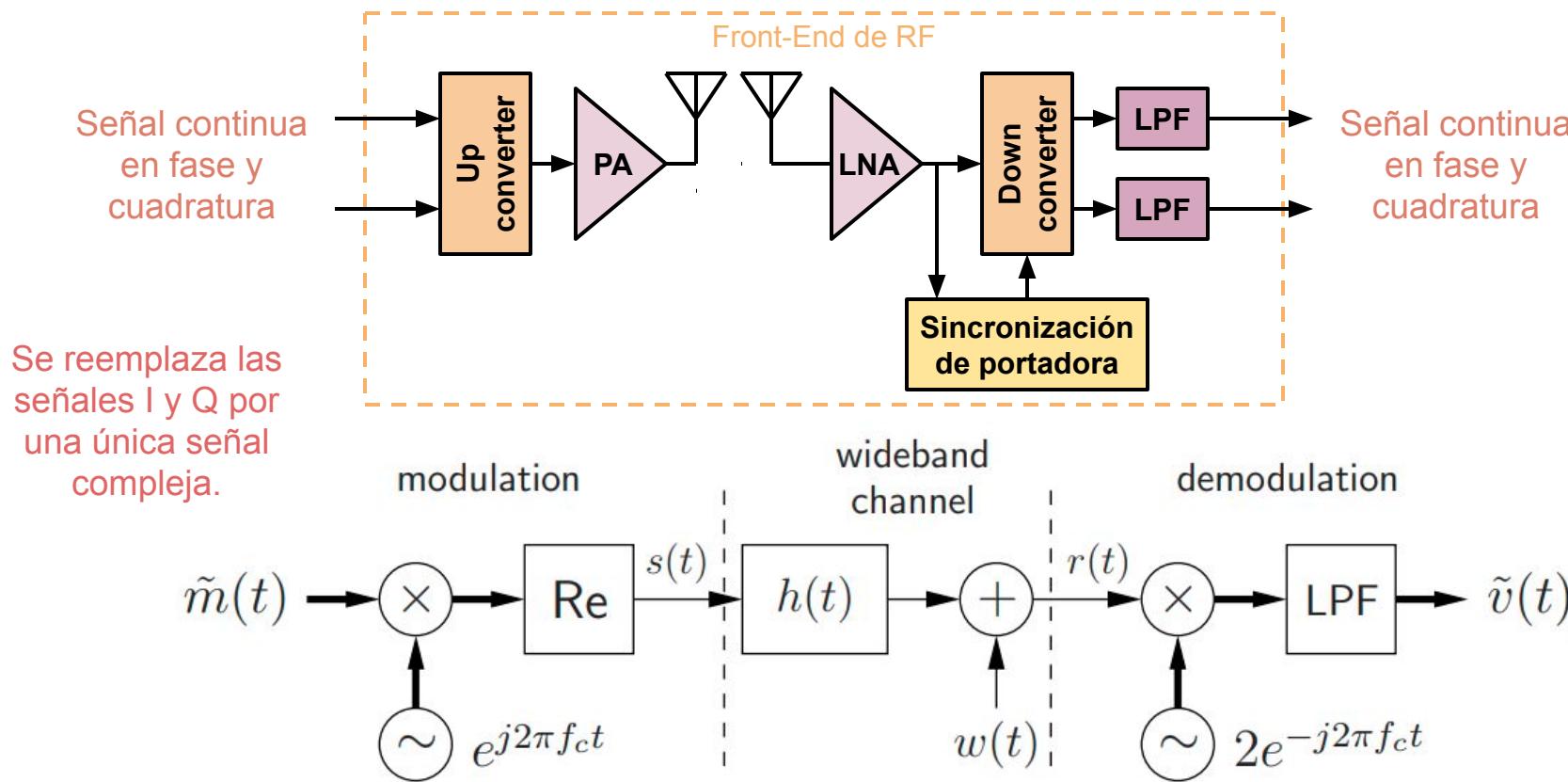
# Modelo equivalente de banda base



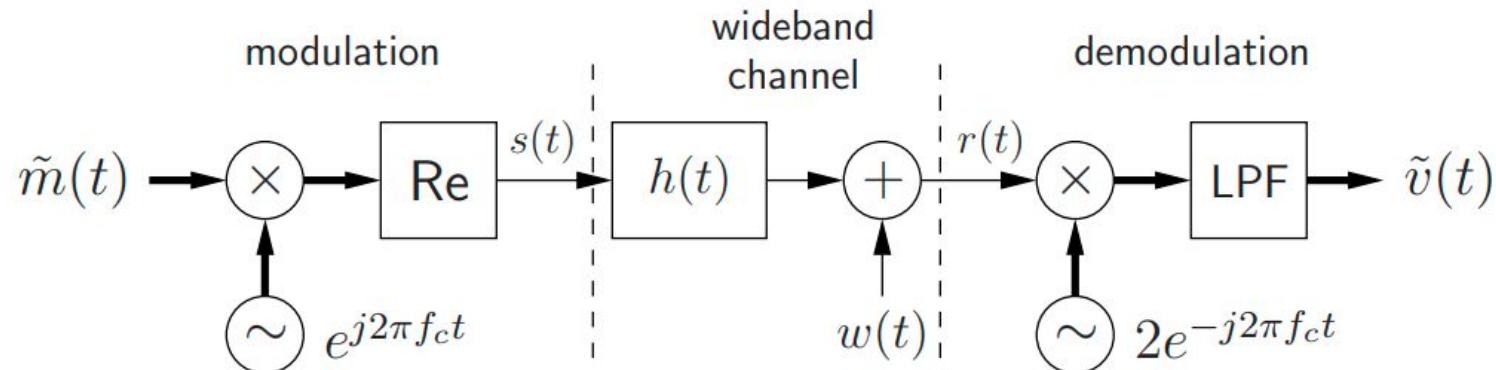
# Modelo equivalente de banda base



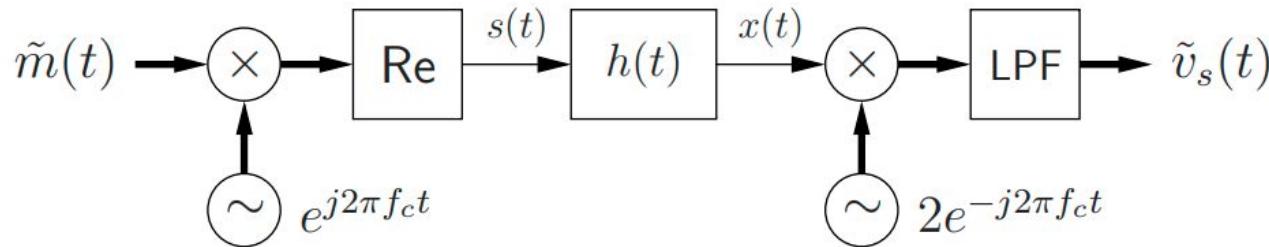
# Modelo equivalente de banda base



# Modelo equivalente de banda base

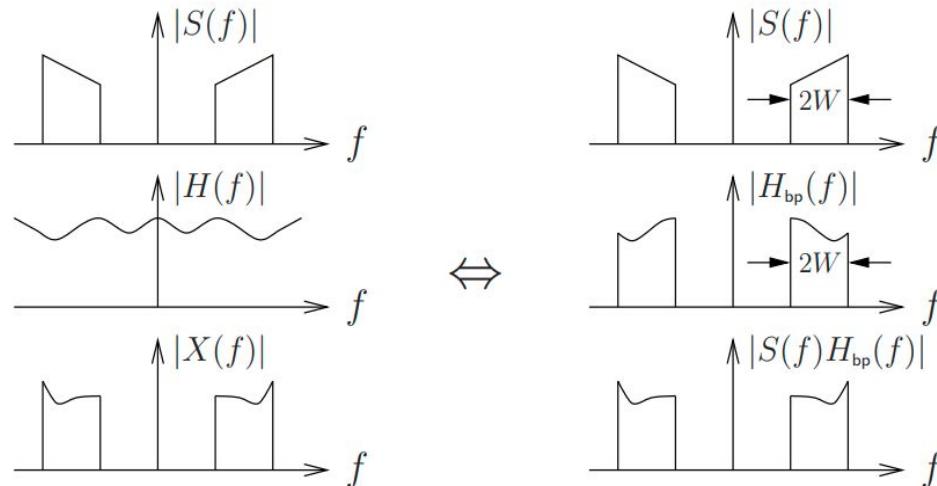


# Modelo equivalente de banda base

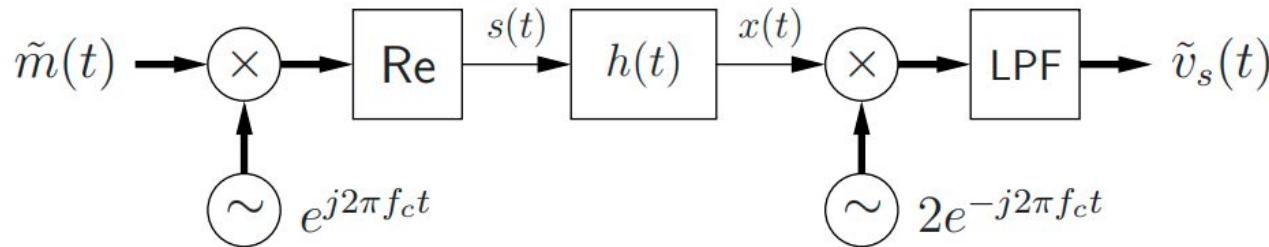


Se quita el ruido aditivo y vemos que ...

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



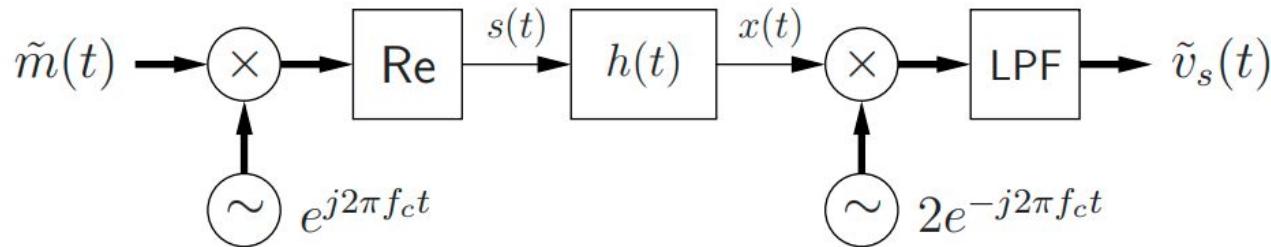
# Modelo equivalente de banda base



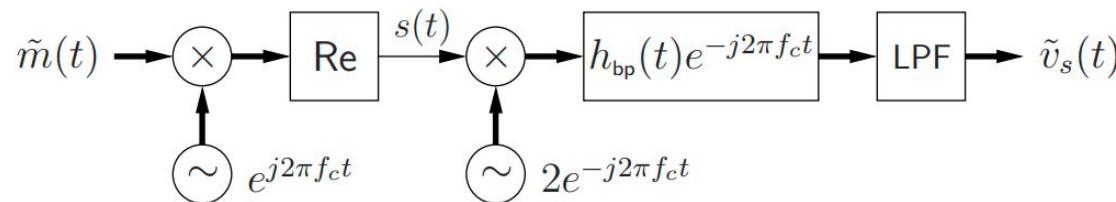
Luego vemos que  
vale ...

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

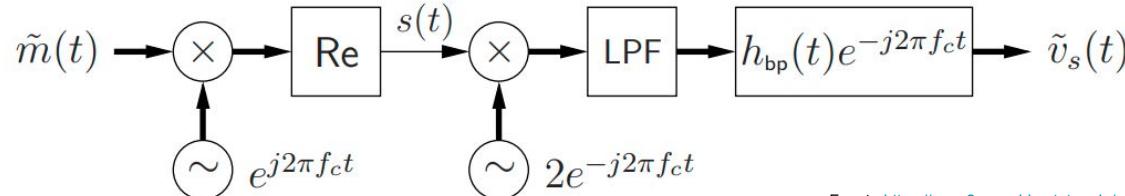
# Modelo equivalente de banda base



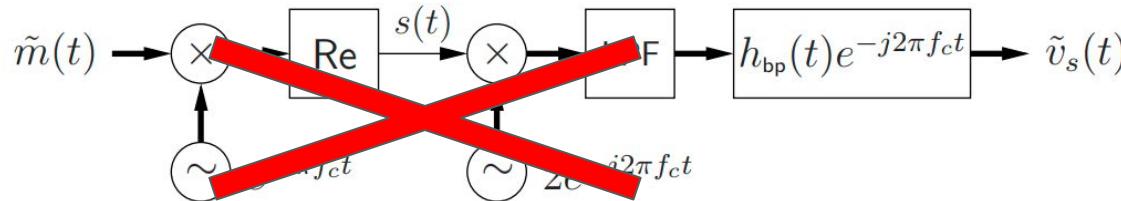
Lo cual significa  
que ...



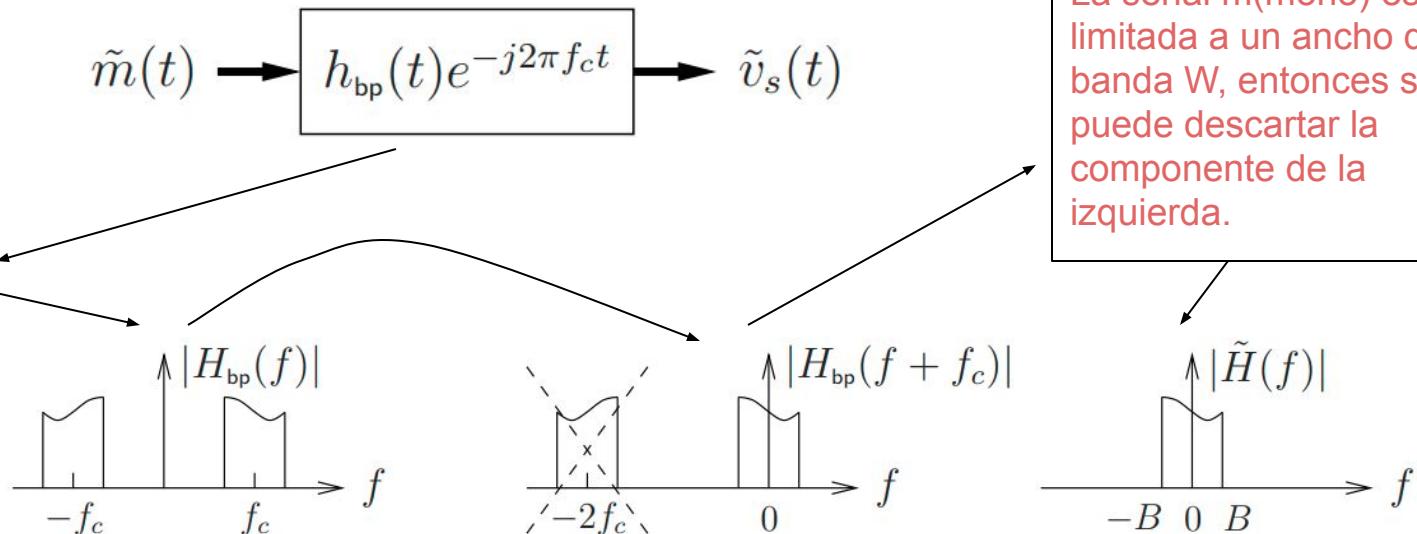
y por ser LTI  
también vale ...



# Modelo equivalente de banda base

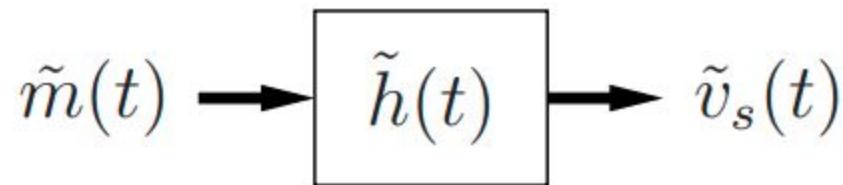


Luego, el up y down conversion se “cancelan” y se obtiene ...



# Modelo equivalente de banda base

Finalmente se obtiene ....

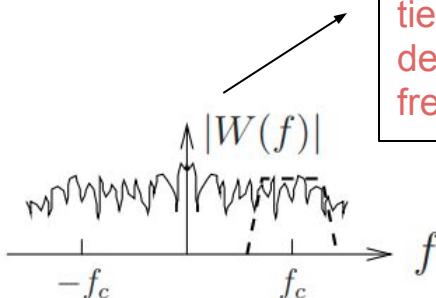
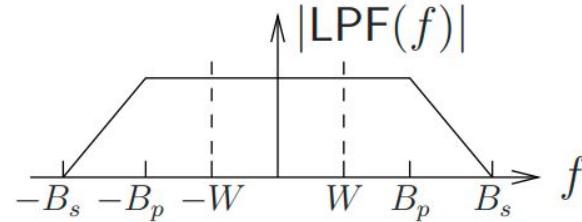
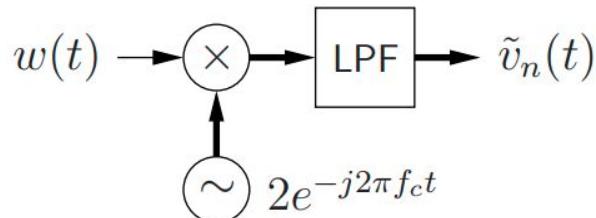


$$\tilde{h}(t) \equiv h_{\text{bp}}(t)e^{-j2\pi f_c t}$$

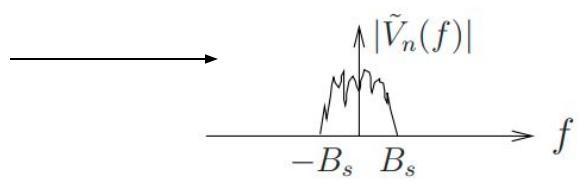
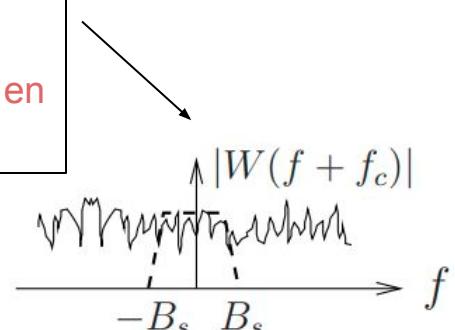
$$h_{\text{bp}}(t) = \text{Re}\{\tilde{h}(t) \cdot 2e^{j2\pi f_c t}\}$$

# Modelo equivalente de banda base

Ahora consideremos el ruido:

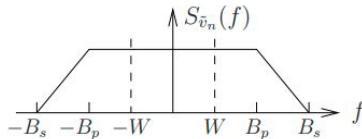


La exponenciación compleja en el tiempo es un desplazamiento en frecuencia.



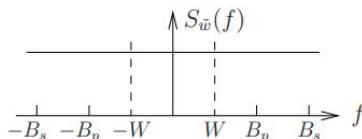
# Modelo equivalente de banda base

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

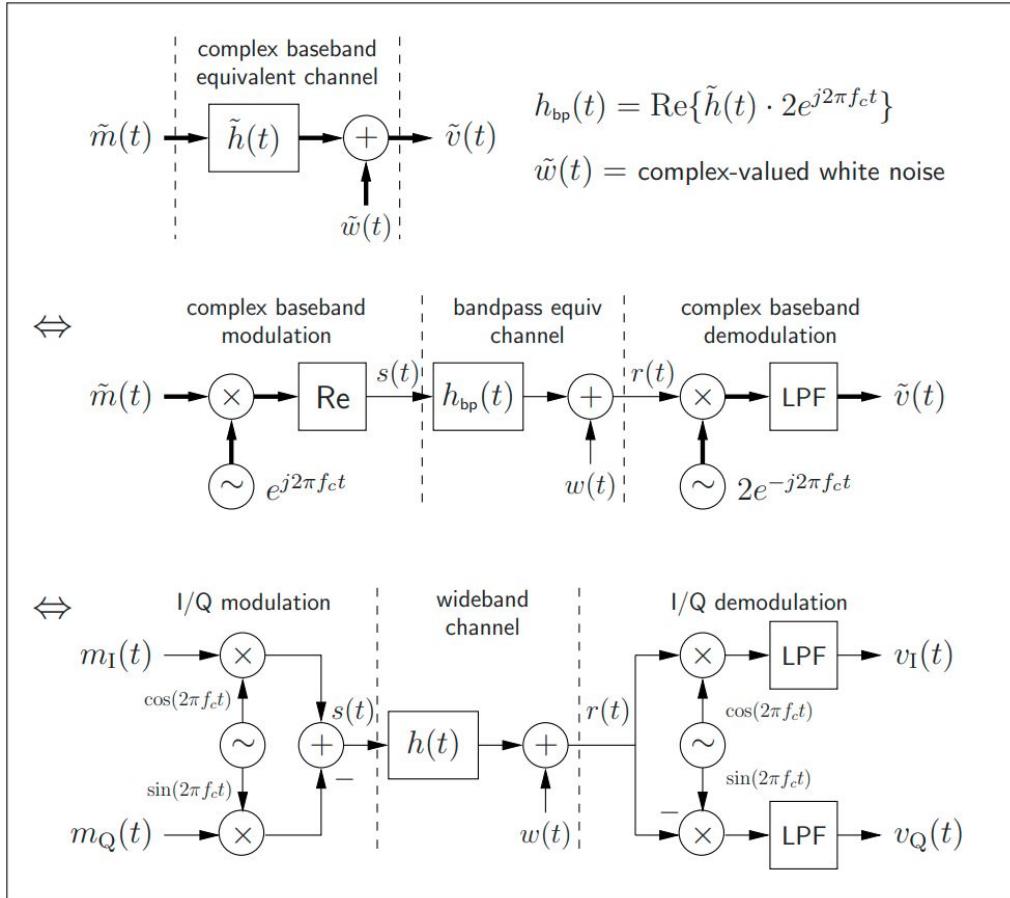
## Resumen

Complejidad del modelo

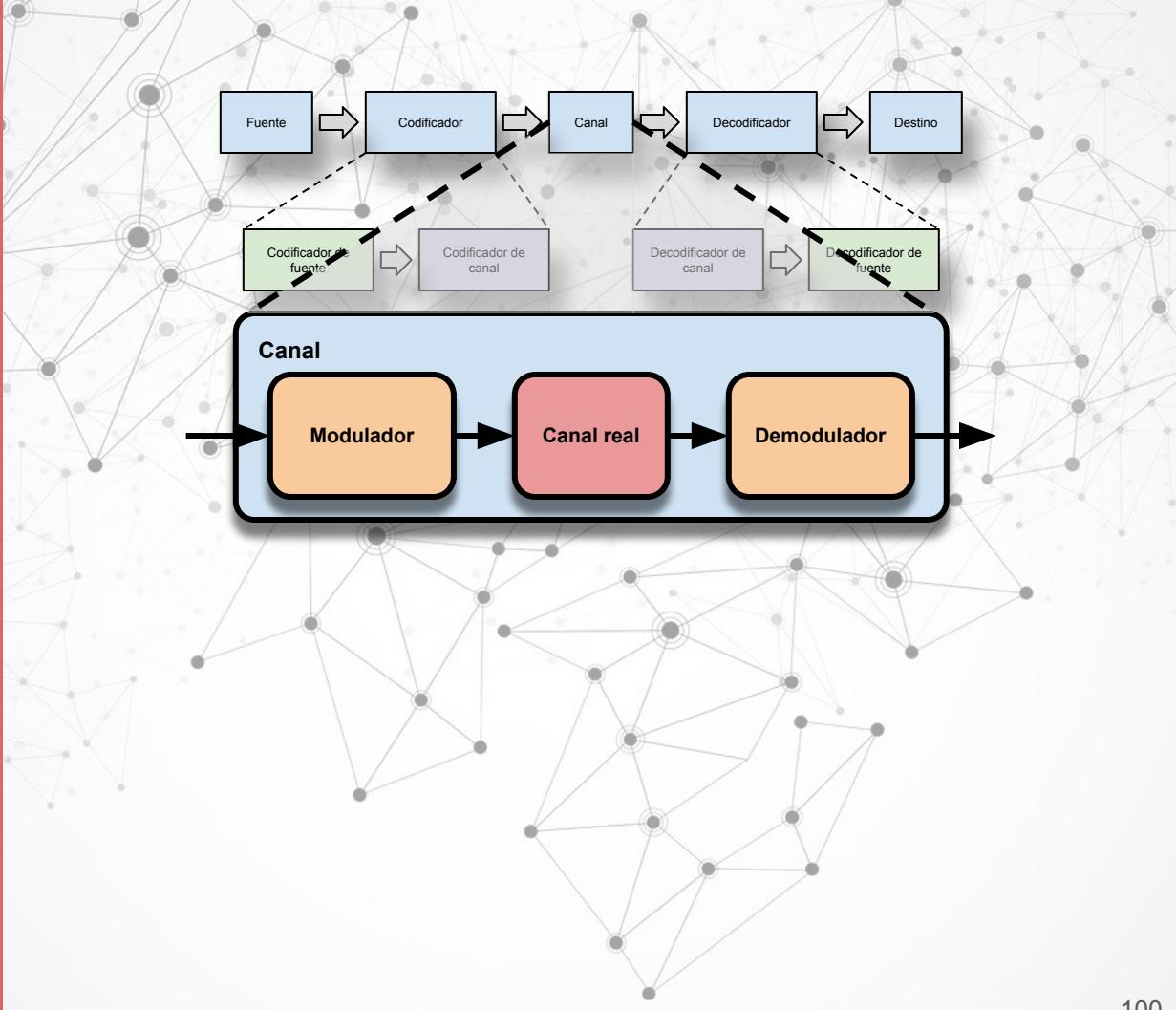
Modelo con señales complejas en banda base.

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

Modelo con señales reales en banda base y banda pasante.



# Ejercicio 4



# Ejercicio 4

## Enunciado



MSE-SDC-base\_repo / ejercicios / ej04 /

Go to file Add file ...

colorete87 MODEM & EJERCICIOS: Se actualizan los enunciados los tests c2c492f on 11 Nov 2021 History

..

entrega EJERCICIOS->ENTREGAS: Readme replaced by gitignore 12 months ago

README.md MODEM & EJERCICIOS: Se actualizan los enunciados los tests 11 months ago

README.md

### Enunciado Trabajo Práctico 4

Efectos distorsivos del canal y de otros bloques analógicos.

#### Objetivo

Familiarizarse con las fuentes de distorsión de las señales transmitidas y sus efectos.

#### Descripción

Este ejercicio se realiza de manera interactiva durante la clase.

Se discuten los distintos tipos de efectos distorsivos que pueden afectar a las señales y a los símbolos recibidos, y cómo éstos pueden ser observados en las constelaciones.

Utilizamos un [jamboard](#) para dejar plasmados los conceptos.

#### Entrega

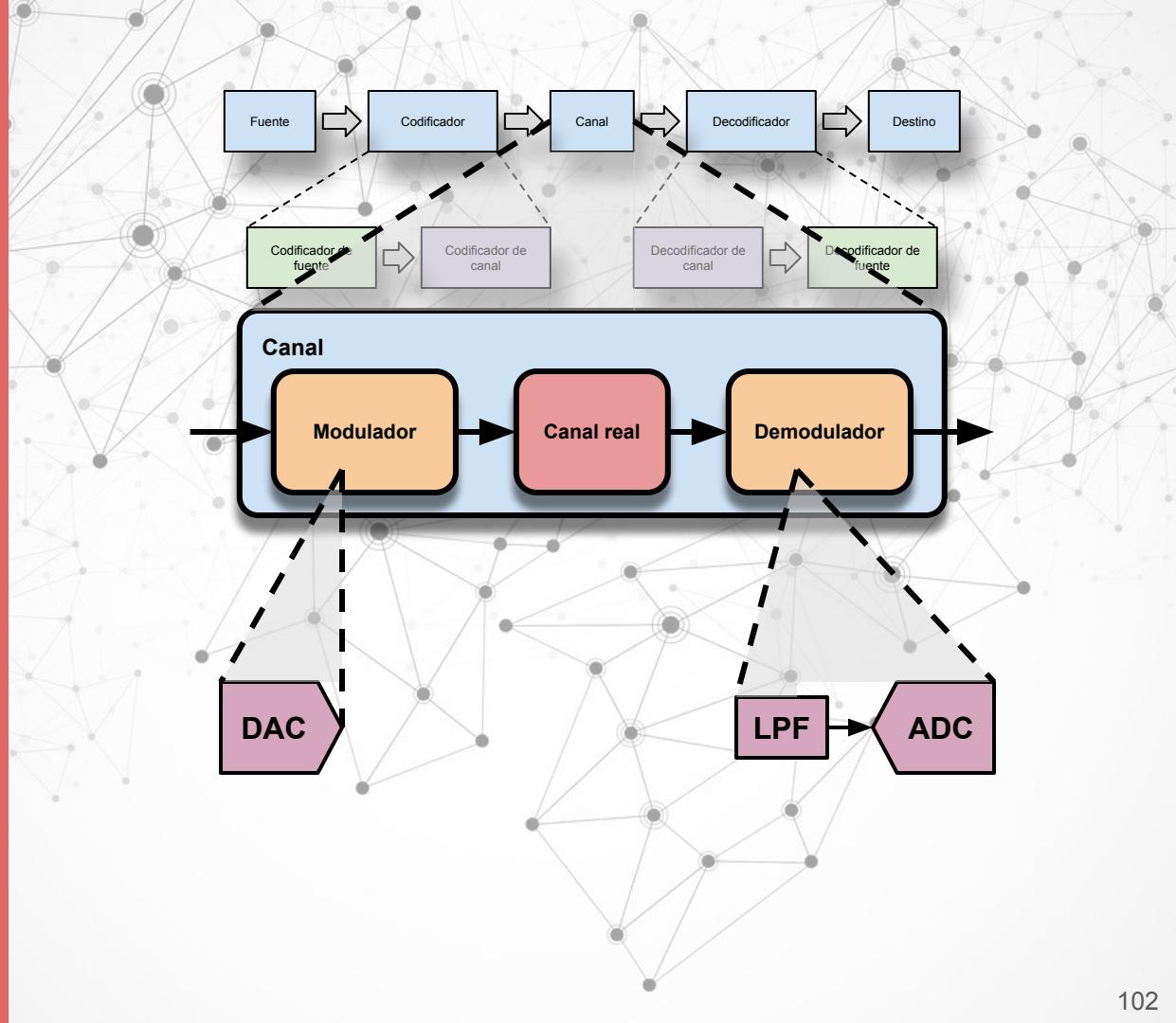
Se debe actualizar el archivo `README.md` de la entrega de alguna de las siguientes maneras:

- Archivo `pdf`:
  - Se debe exportar el jamboard a archivo `pdf`.
  - Se debe subir el archivo al repositorio.
  - Se debe insertar un link en el archivo Markdown de la entrega.

Continuar leyendo el enunciado en GitHub

# Conversión entre señales analógicas y digitales:

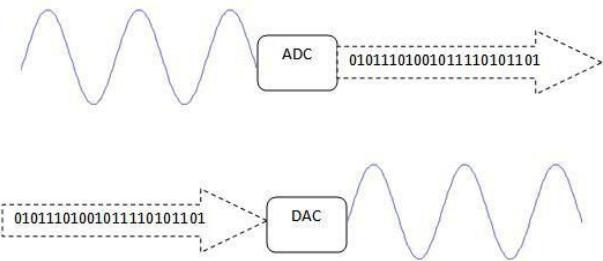
- ADC y DAC
- Dominios continuo y discreto
- Configuraciones típicas
  - Banda base
  - Front-End analógico de RF
  - Sintetizador Digital Directo (DDS)
  - Muestreo directo



# 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

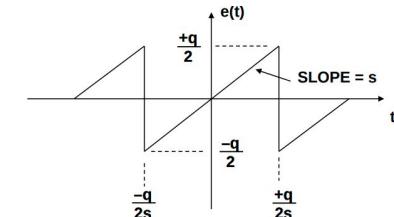
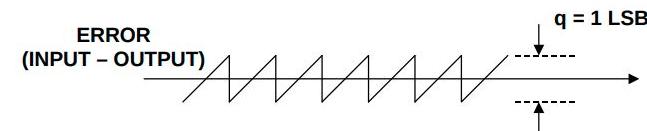
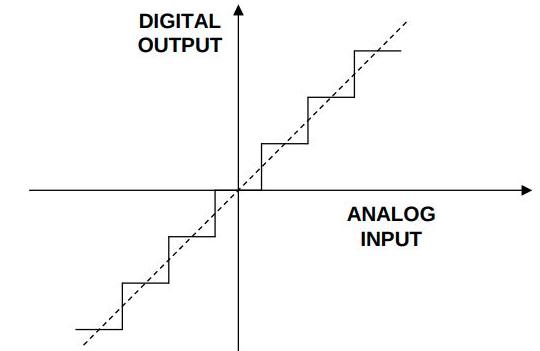
# Conversión entre señales analógicas y digitales

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

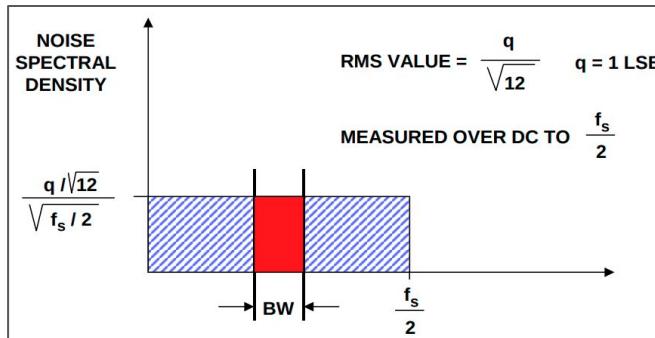
# Conversión entre señales analógicas y digitales

## ADC y DAC

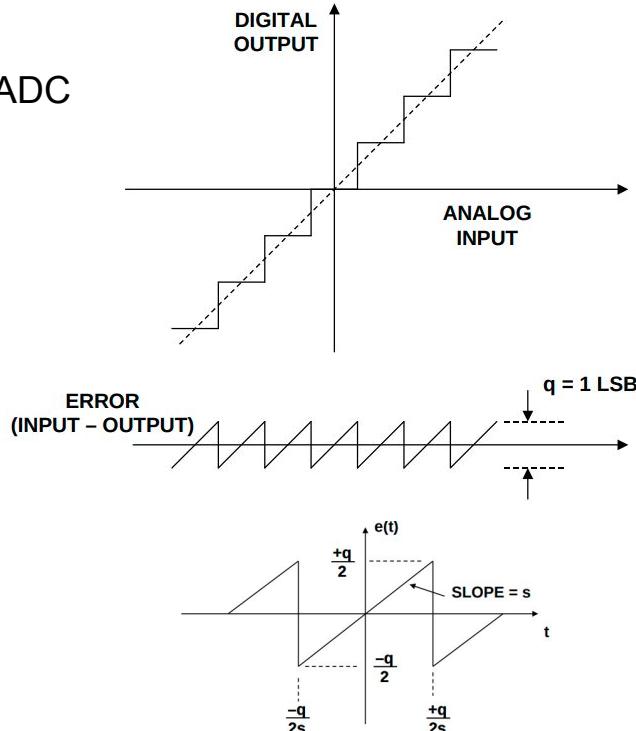
### Modelo lineal del ADC:

- 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  $BW$

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



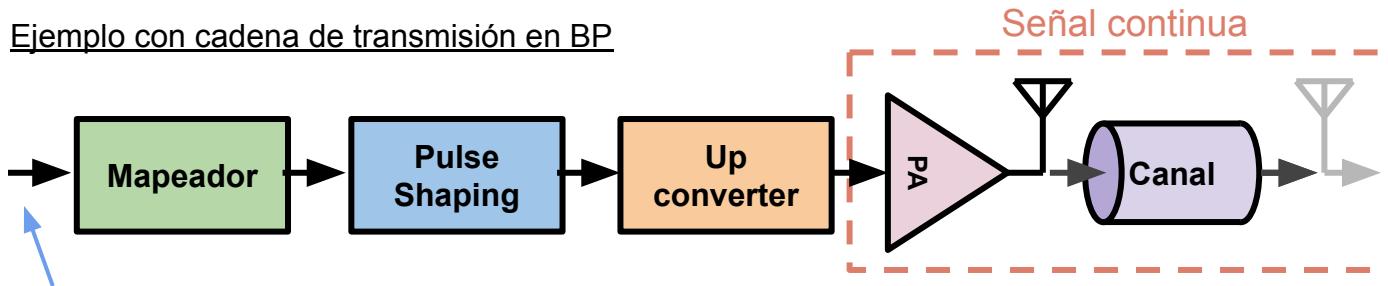
Fuente: [https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-001.pdf.php?title=Link\\_Budget&mobileaction=toggle\\_view\\_desktop](https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-001.pdf.php?title=Link_Budget&mobileaction=toggle_view_desktop)



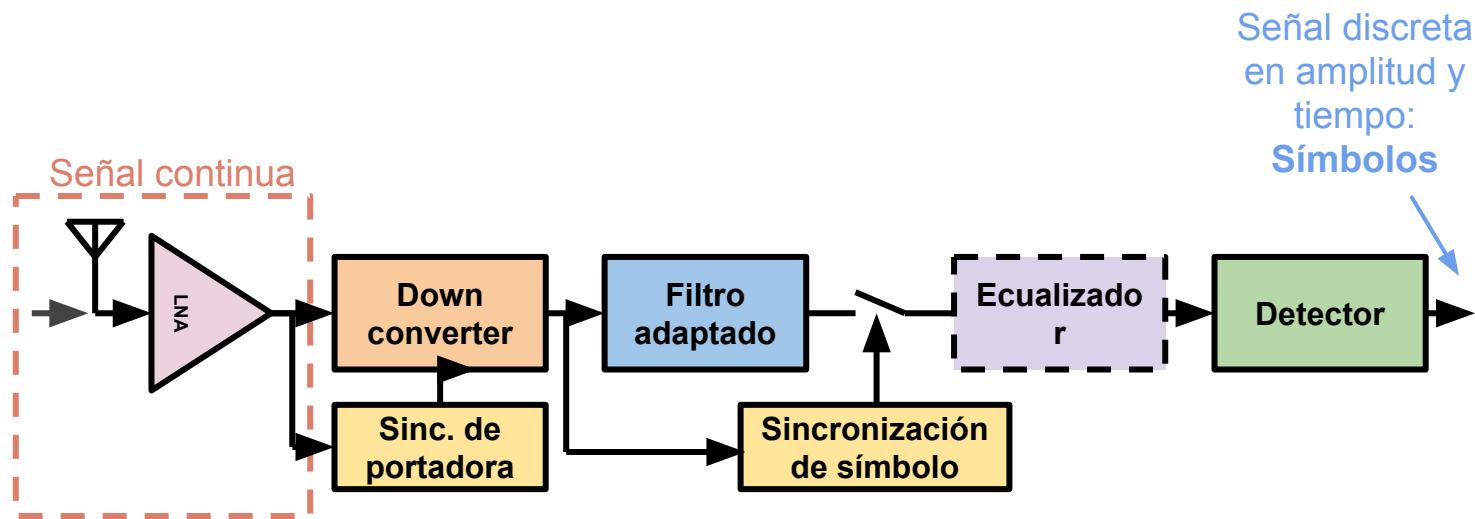
# Conversión entre señales analógicas y digitales

## Dominio continuo y discreto

Ejemplo con cadena de transmisión en BP



Señal discreta  
en amplitud y  
tiempo:  
**Símbolos**

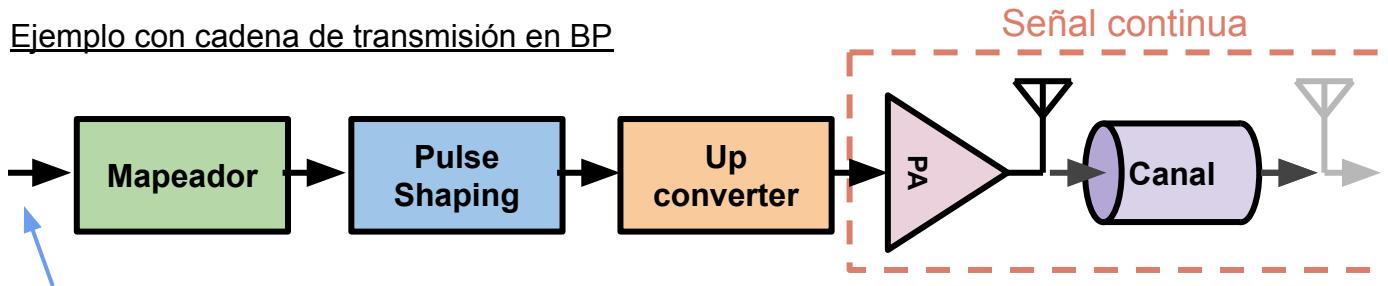


Señal discreta  
en amplitud y  
tiempo:  
**Símbolos**

# Conversión entre señales analógicas y digitales

## Dominio continuo y discreto

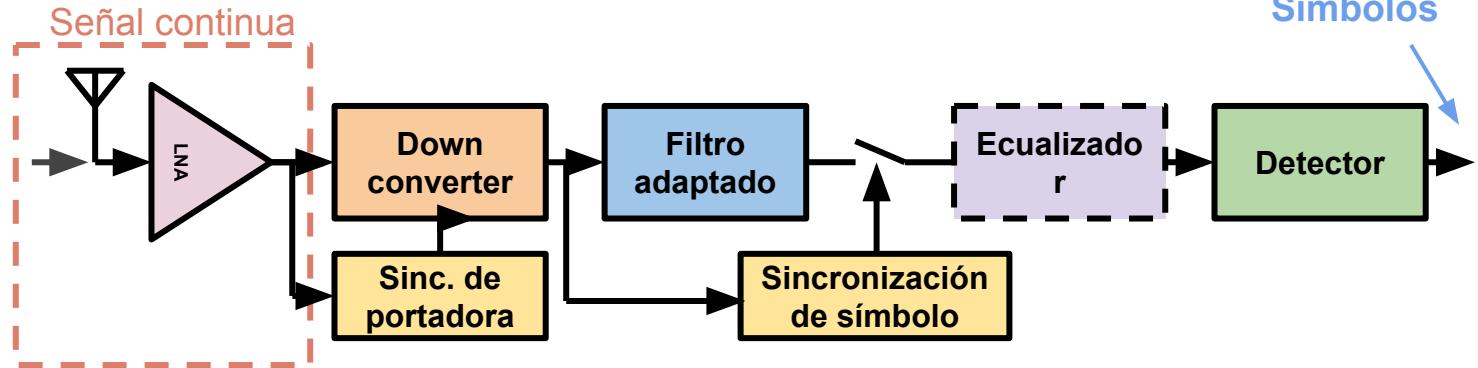
Ejemplo con cadena de transmisión en BP



Señal discreta  
en amplitud y  
tiempo:  
Símbolos

¿y el resto?

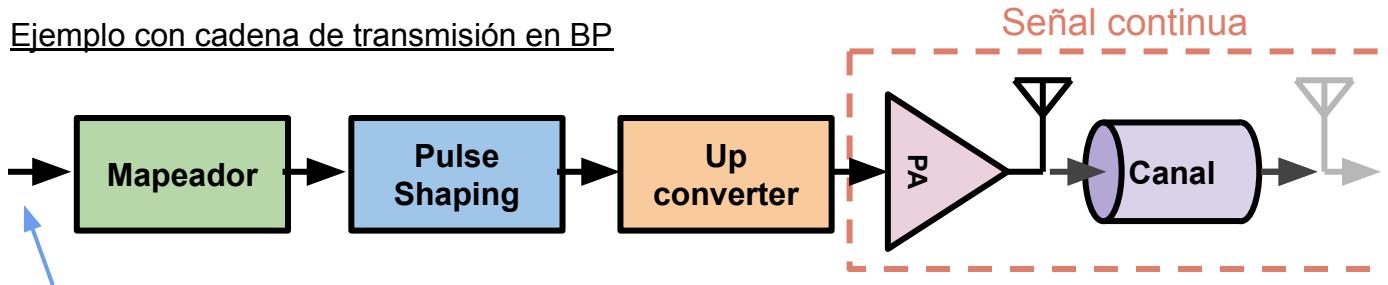
Señal discreta  
en amplitud y  
tiempo:  
Símbolos



# Conversión entre señales analógicas y digitales

## Dominio continuo y discreto

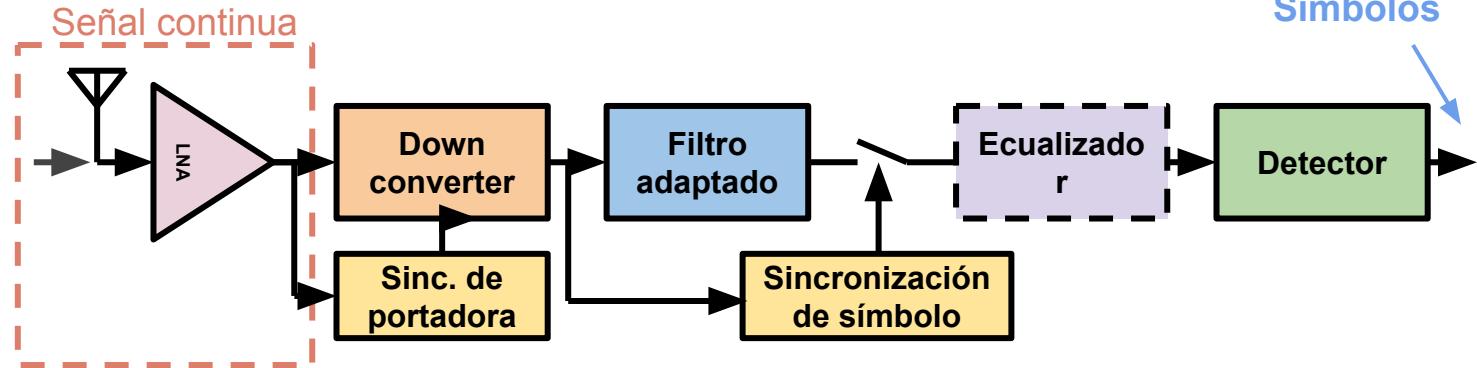
Ejemplo con cadena de transmisión en BP



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.

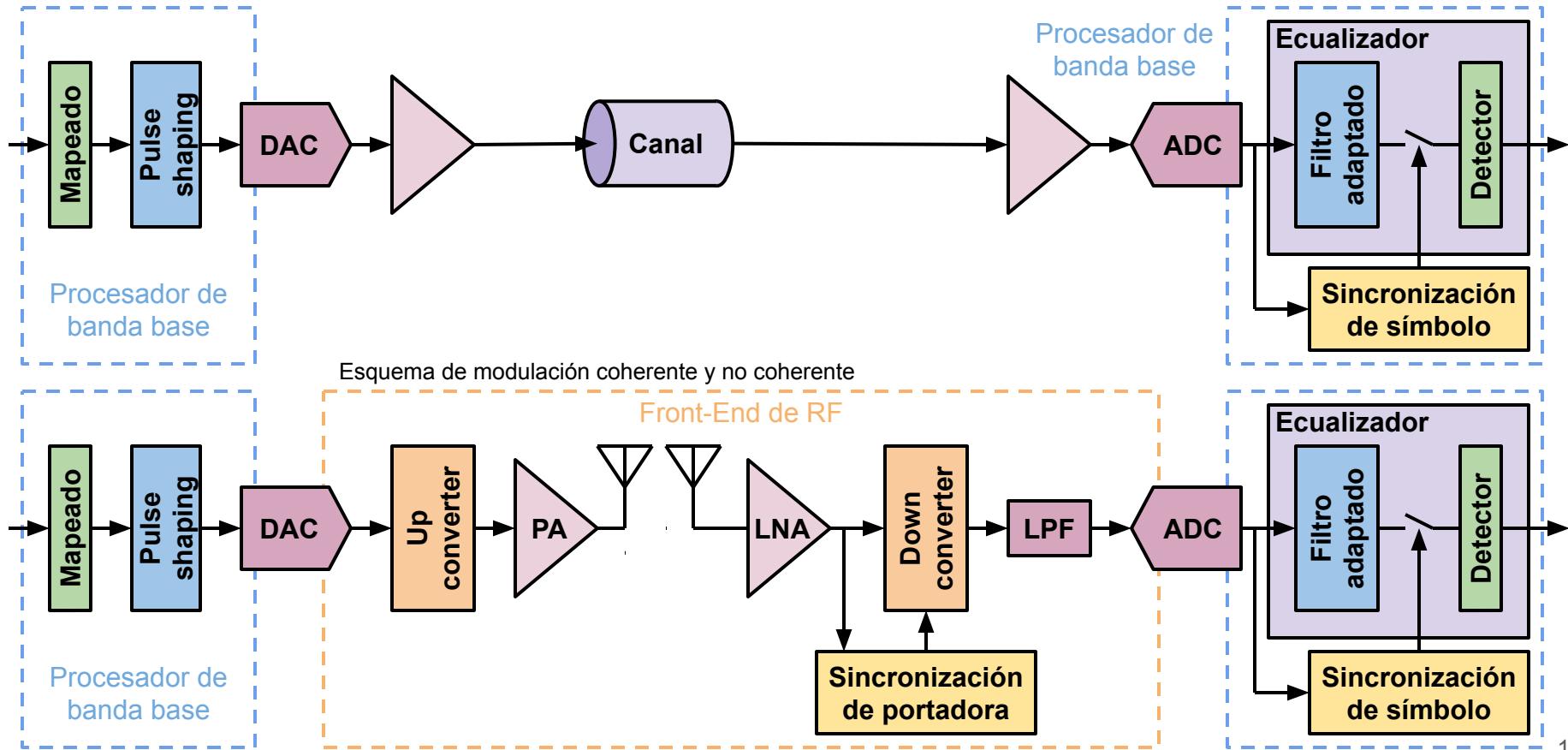
¿y el resto?



Señal discreta  
en amplitud y  
tiempo:  
Símbolos

# Conversión entre señales analógicas y digitales

## Configuraciones típicas



# Conversión entre señales analógicas y digitales

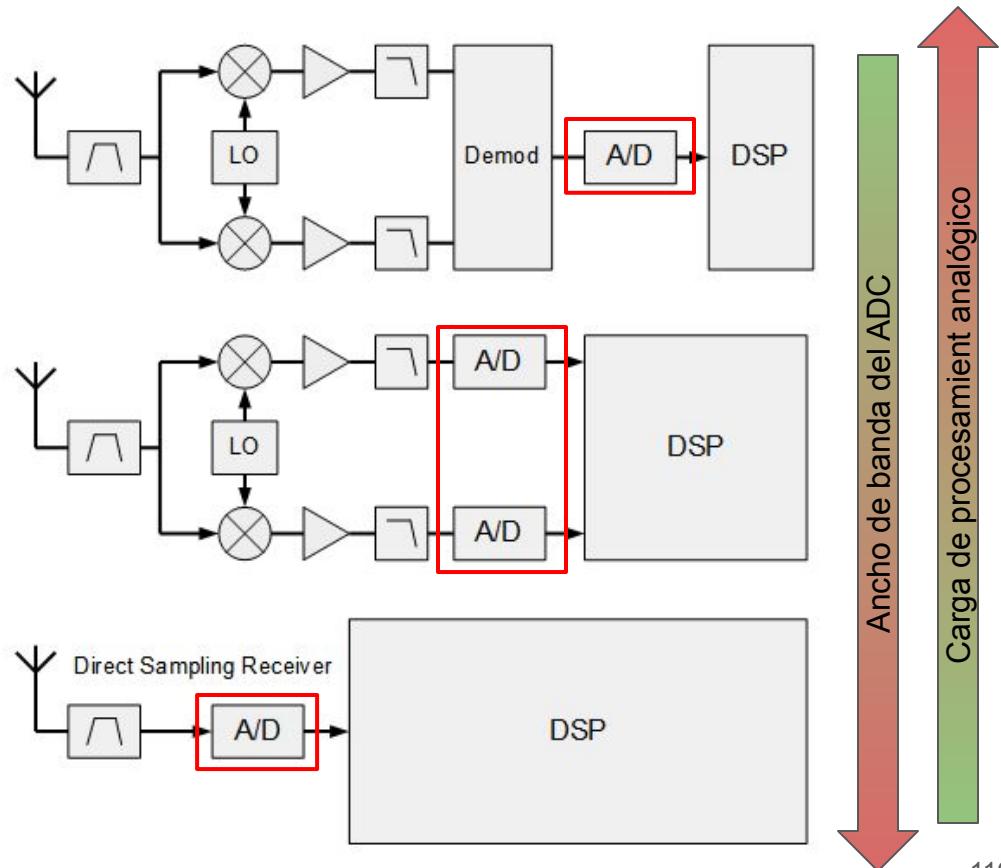
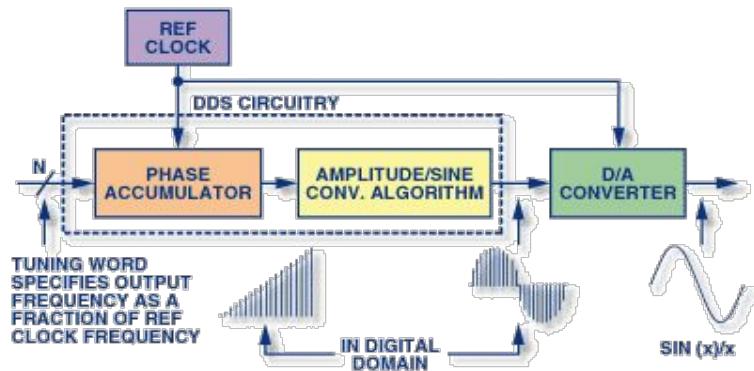
## Configuraciones típicas

Otras configuraciones para el transmisor:

- DDS

Otras configuraciones para el receptor:

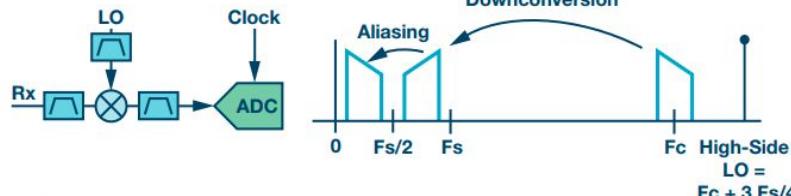
- Demodulación analógica
- Conversión directa
- Muestreo directo



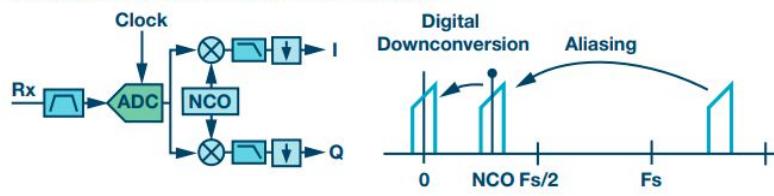
# Conversión entre señales analógicas y digitales

## Configuraciones típicas

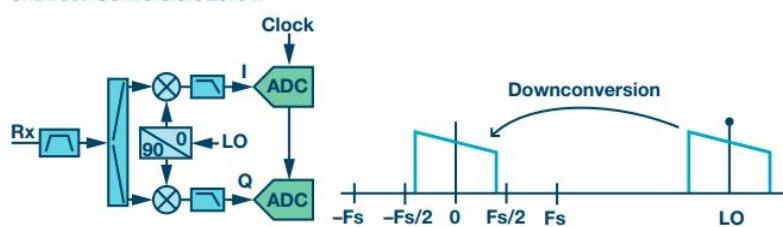
### a. Heterodyne with 2<sup>nd</sup> Nyquist IF Sampling



### b. Direct Sampling with Digital Downconversion

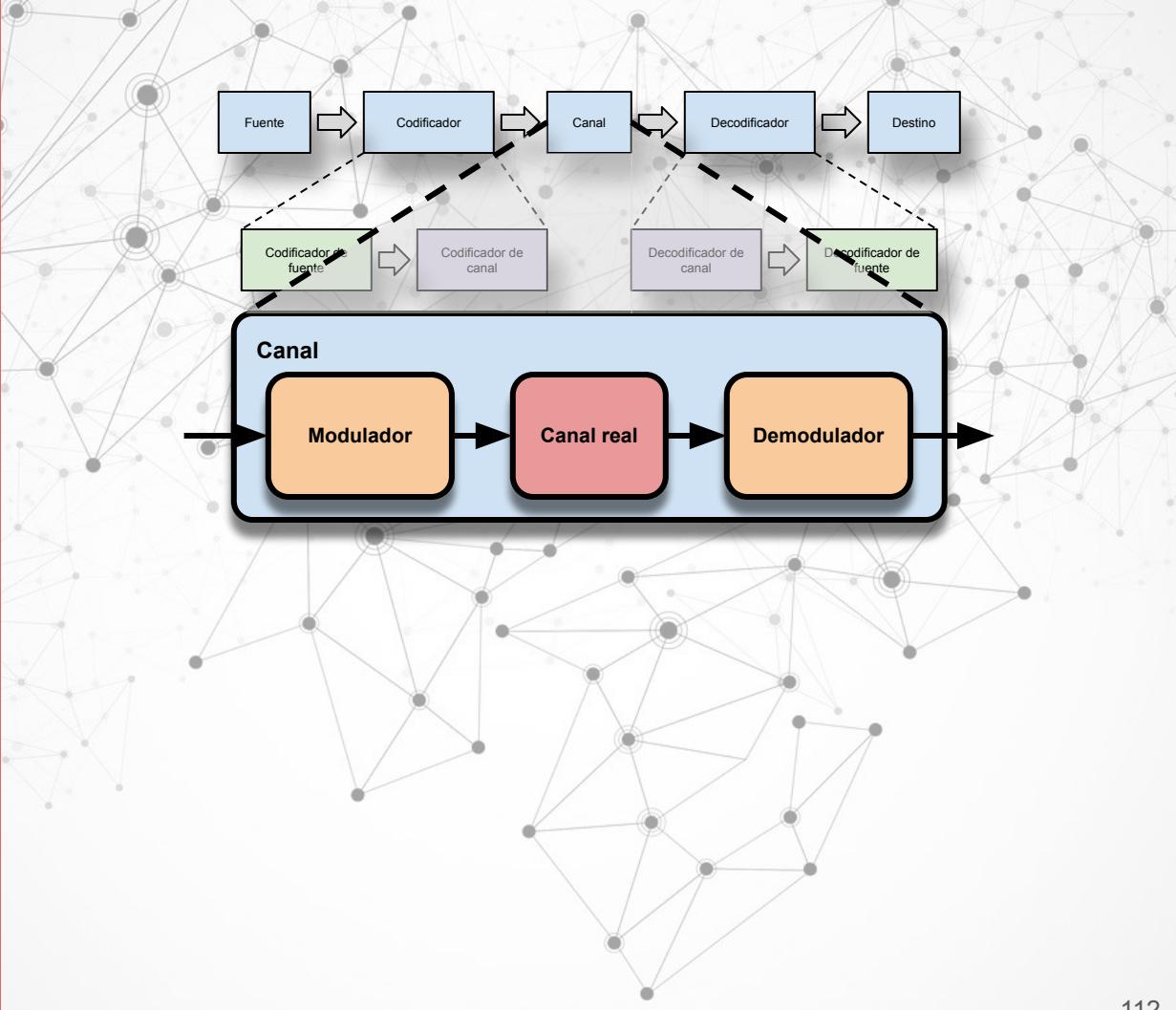


### c. Direct-Conversion/Zero IF



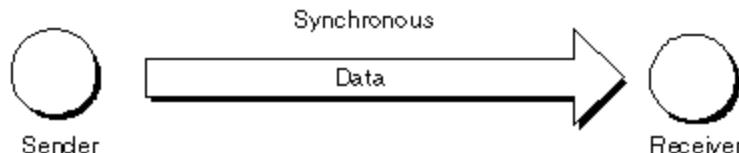
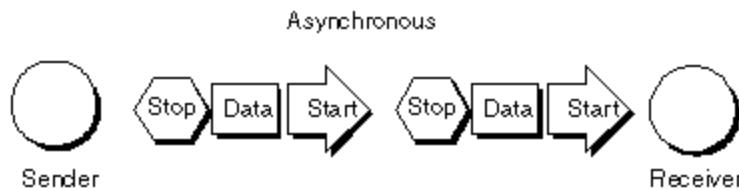
Type	Configuration	Benefits	Challenges
Heterodyne		<ul style="list-style-type: none"><li>Proven trusted</li><li>High performance</li><li>Optimum spurious noise</li><li>High dynamic range</li><li>EMI immunity</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>SWaP</li><li>Many filters</li></ul>
Direct Sampling		<ul style="list-style-type: none"><li>No mixing</li><li>Practical at L-, S-band</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>ADC input bandwidth</li><li>Gain not distributed across frequency</li></ul>
Direct-Conversion		<ul style="list-style-type: none"><li>Maximum ADC bandwidth</li><li>Simplest wideband option</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Image rejection<ul style="list-style-type: none"><li>I/Q balance</li></ul></li><li>In-band IF harmonics</li><li>LO radiation</li><li>EMI immunity (IP2)</li><li>DC and 1/f noise</li></ul>

# Sistemas de comunicación sincrónicos y asincrónicos



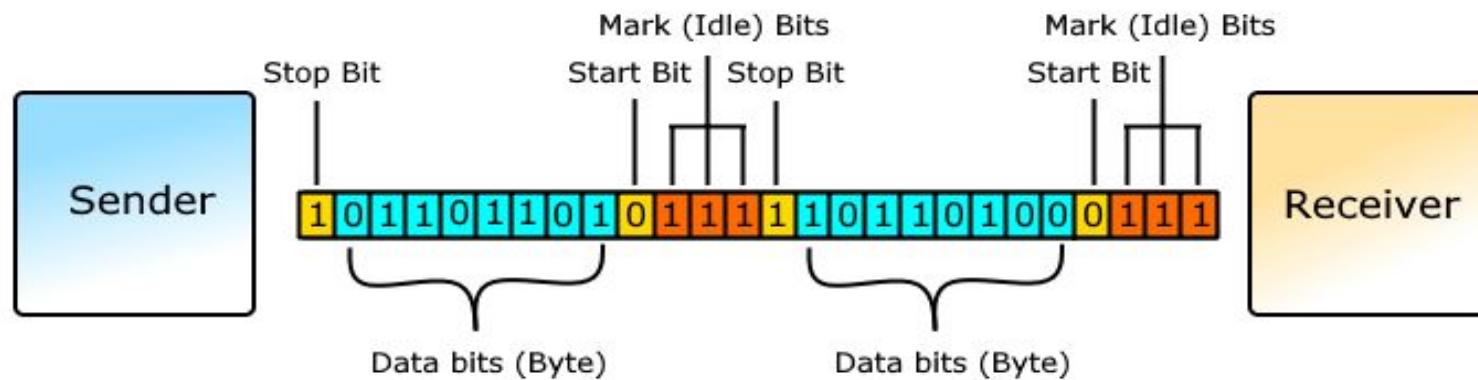
# Sistemas de comunicación sincrónicos y asincrónicos

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

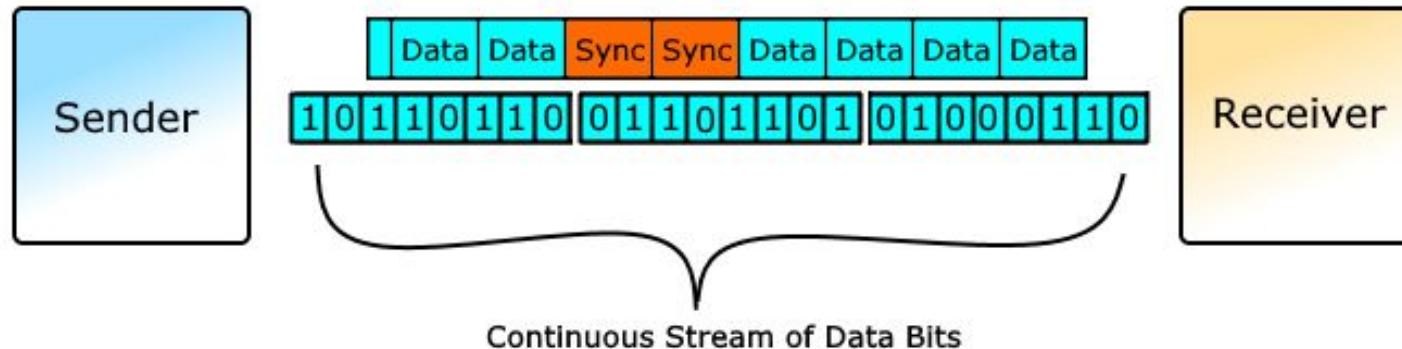
## Asincrónico



Asynchronous Transmission

# Sistemas de comunicación sincrónicos y asincrónicos

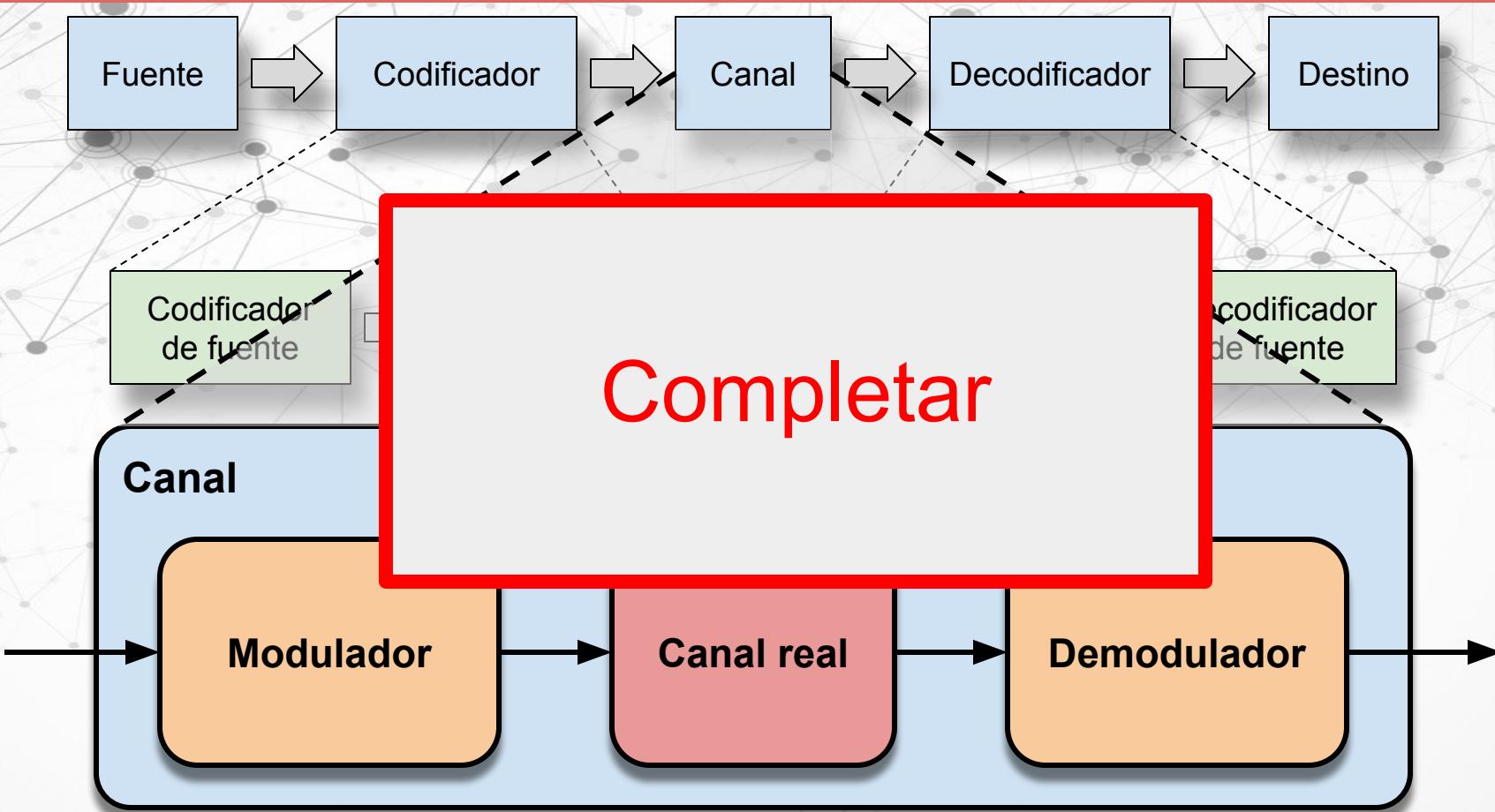
## Sincrónico



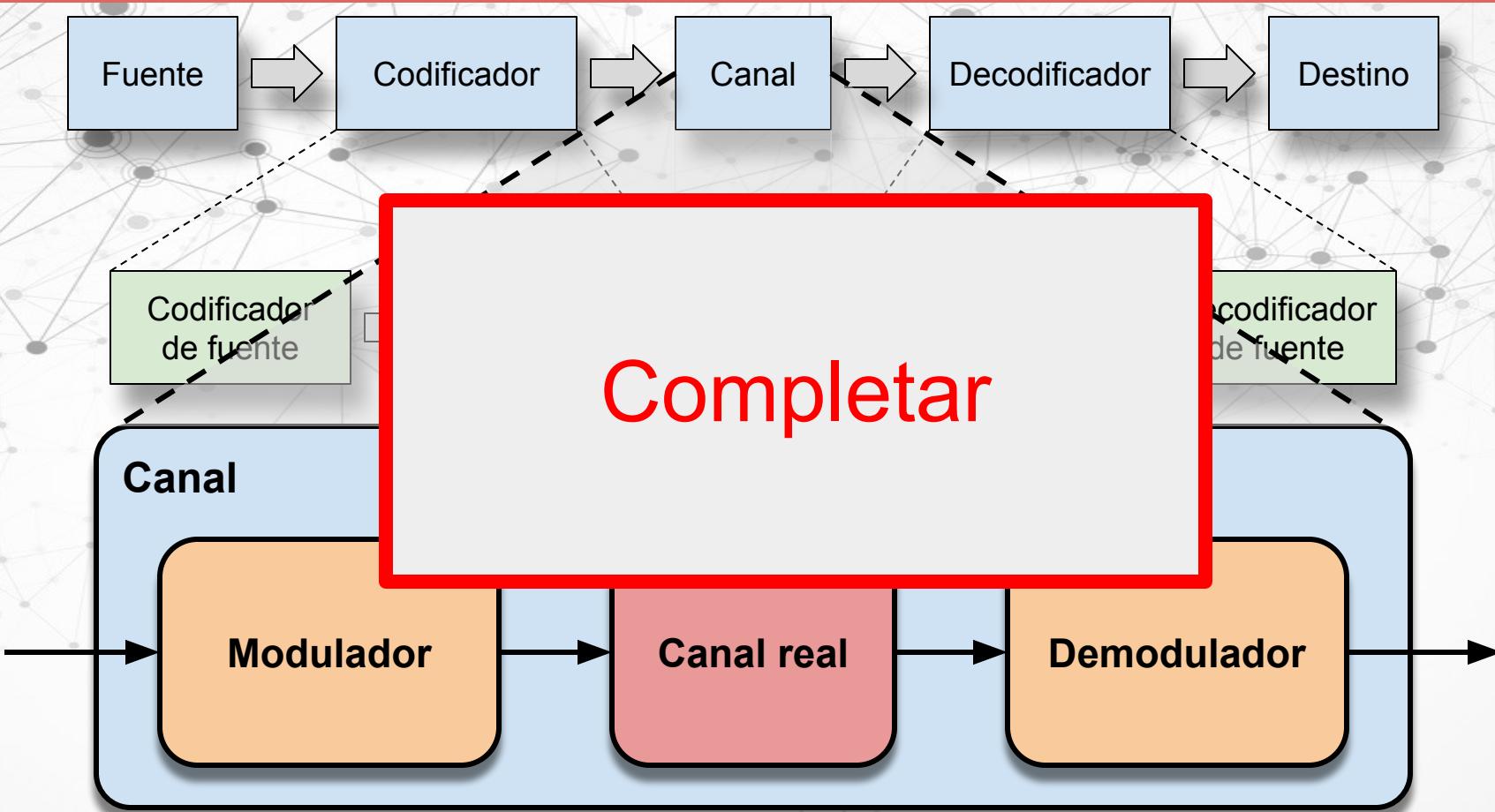
### Synchronous Transmission

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

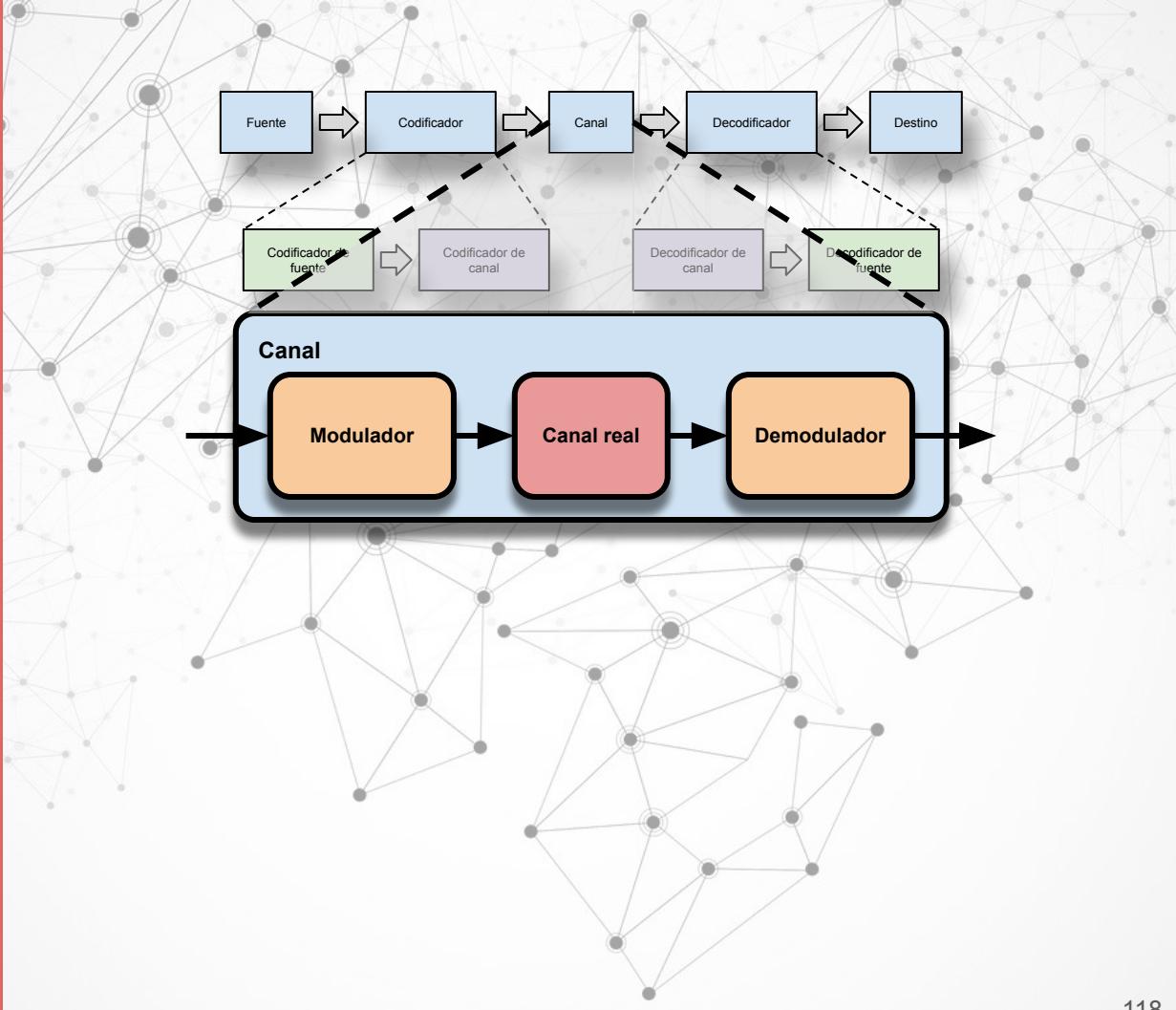
## Resumen y siguientes pasos



## Resumen y siguientes pasos



# Ejercicio 5



# Ejercicio 5

## Enunciado



Screenshot of a GitHub repository page for "ej05".

Repository: MSE-SDC-base\_repo / ejercicios / ej05 /

File list:

- ..
- entrega EJERCICIOS->ENTREGAS: Readme reaplaced by gitignore 12 months ago
- images MODEM & EJERCICIOS: Se actualizan los enunciados los tests 11 months ago
- README.md EJ05: Image path corrected! 7 months ago
- raised\_cosine.m EJERCICIOS: Se agregan funciones para ej05 12 months ago
- root\_raised\_cosine.m EJERCICIOS: Se agregan funciones para ej05 12 months ago

README.md content:

### Enunciado Trabajo Práctico 5

Simulación del modulador en banda pasante y del modelo equivalente de banda base del canal.

#### Objetivo

Familiarizarse con las tareas del demodulador (salvo la sincronización). Entender el modelo equivalente de banda base del canal.

#### Descripción

Se tiene el siguiente sistema:

The block diagram illustrates a communication system. It starts with a PRBS block followed by a Modulator (M1) block. The output of M1 is labeled  $b[n]$ . This signal passes through a FIR filter block labeled  $p[k]$ , whose output is labeled  $d[k]$ . The output of the FIR filter is fed into a channel block. The channel block contains a channel impulse response  $h[k]$  and a noise source  $n[k]$ . The output of the channel block is labeled  $x[k]$ . This signal then passes through another FIR filter block labeled  $p[k]$ , whose output is labeled  $c[k]$ . Finally, the signal passes through a Demodulator (M1) block, whose output is labeled  $\hat{b}[n]$ .

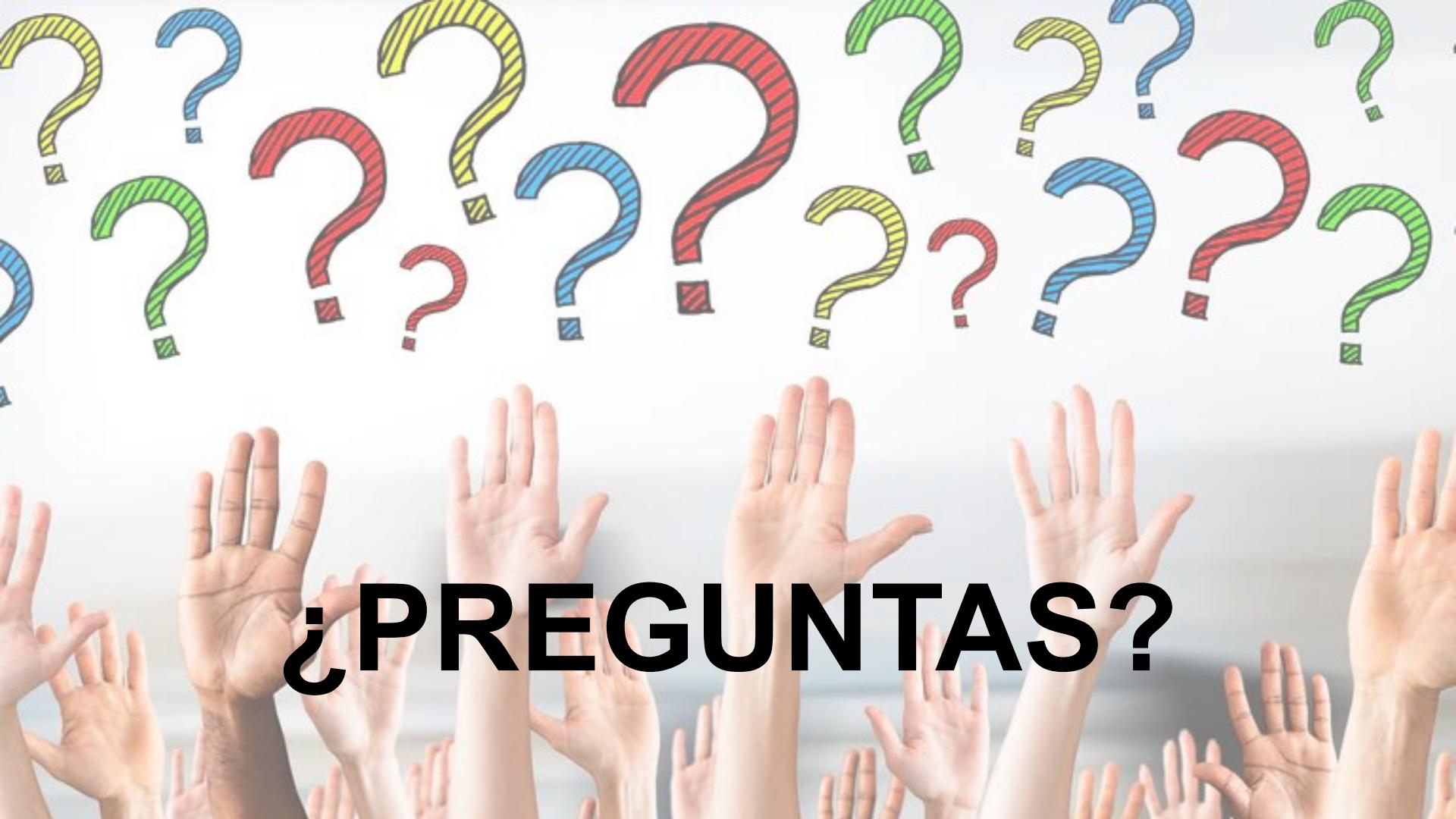
Al igual que en el ejercicio 3 considere un periodo de muestreo de  $T_s = \frac{1}{16} \mu s$  y un tiempo de símbolo  $T_{\text{symb}}$  de 16 veces  $T_s$ .

Continuar leyendo el enunciado en GitHub

# 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](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](https://www2.ece.ohio-state.edu/~schniter/ee501/handouts/slides_cmplxbb.pdf)



**¿PREGUNTAS?**



**¡Gracias!**