



Universidad  
Carlos III de Madrid

# Instrumentación Electrónica con Microprocesador II: Procesadores Avanzados

---

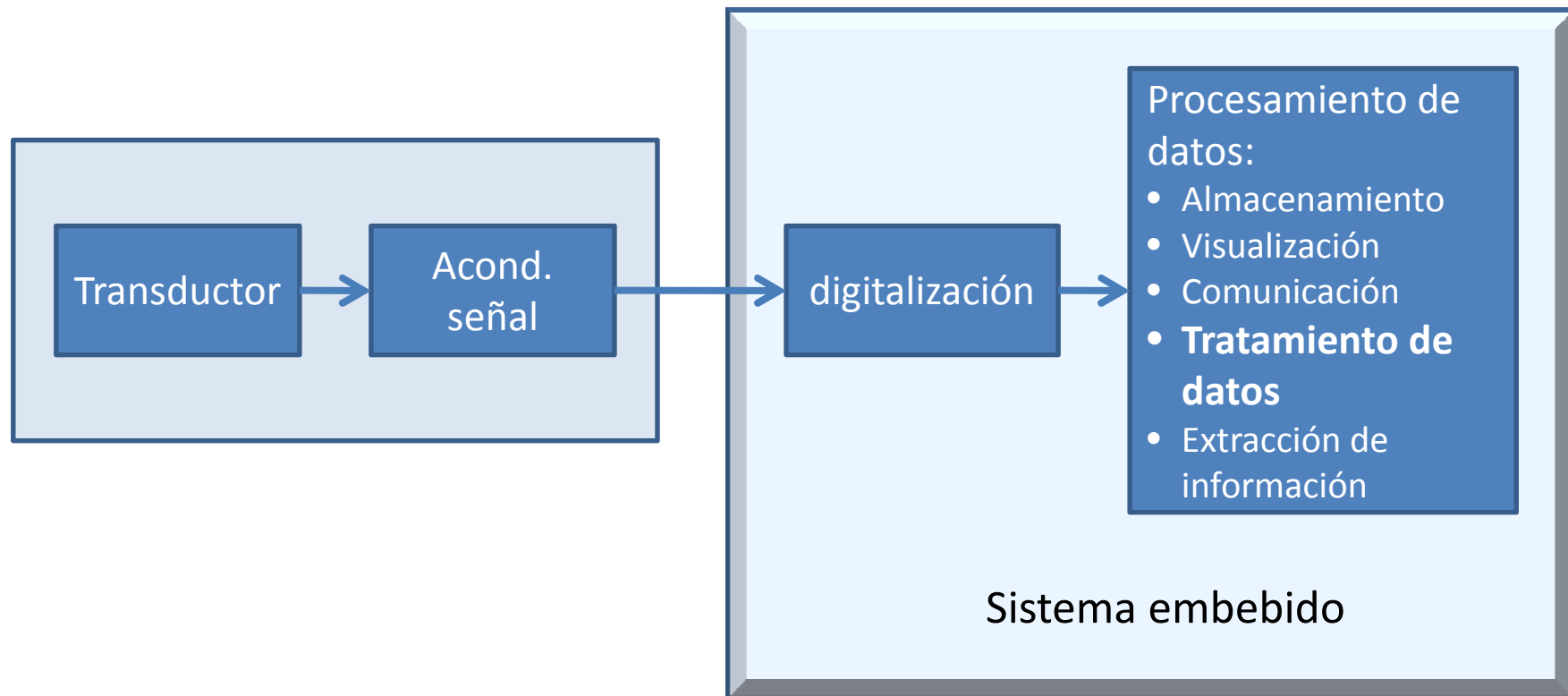
## Acondicionamiento digital de señales

Marta Ruiz Llata



## Introducción

### Sistema de instrumentación: esquema de bloques



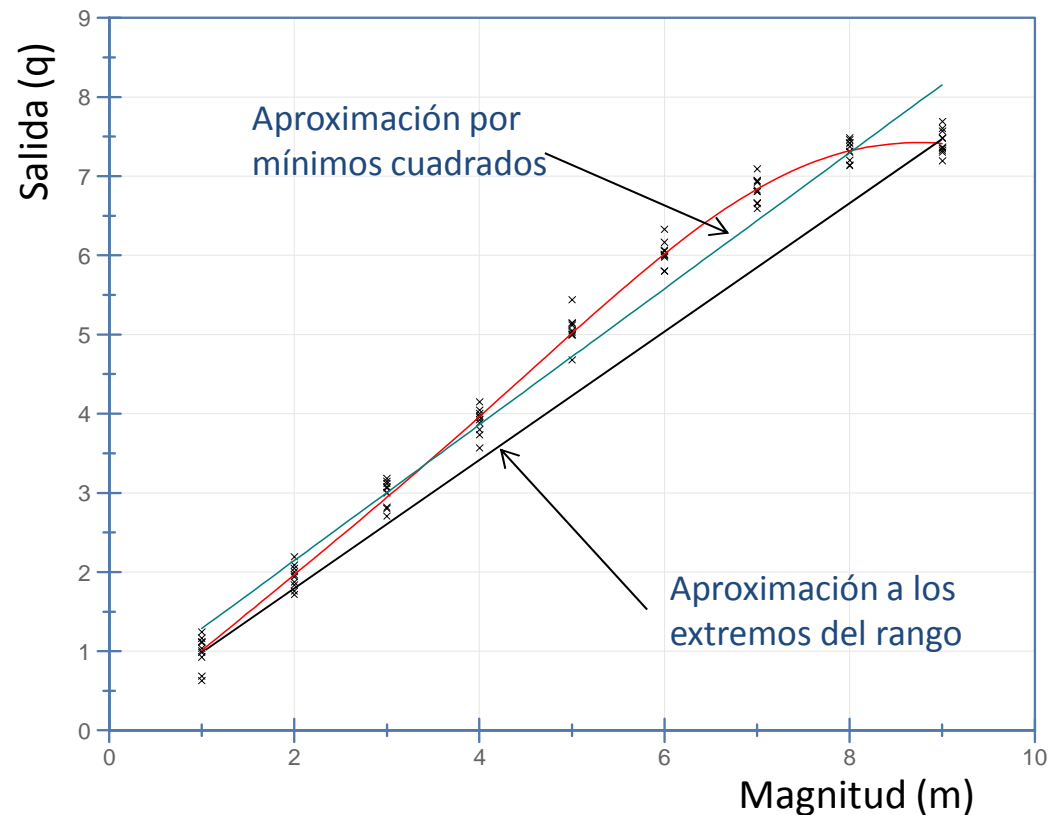


## Índice

- Técnicas digitales de linealización
  - Conversión AD no lineal
  - LUT (look-up table)
  - Linealización a trozos
  - Cálculo o estimación de la función característica
- Compensación de magnitudes de influencia (temperatura...)
- Procesamiento digital del señales
  - Repaso de señales y sistemas (tiempo continuo y tiempo discreto)
  - Filtros digitales
  - Implementación de filtros en microcontroladores

## Linealización

- La linealidad de un sensor es una característica de su curva de calibración estática. Describe cuanto se aleja esta de la curva de calibración ideal (línea recta).
- Las fuentes de no linealidad en el sistema son el propio sensor, los circuitos analógicos de acondicionamiento (amplificadores, filtros...), el ADC...



## Característica de un termistor NTC (Negative Temperature Coefficient)

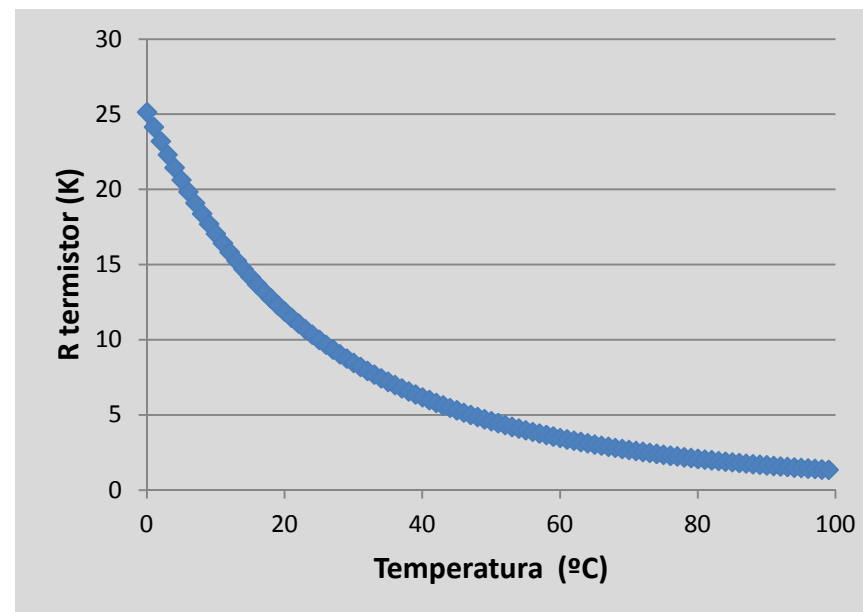
$$R_t = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

$T$  es la temperatura

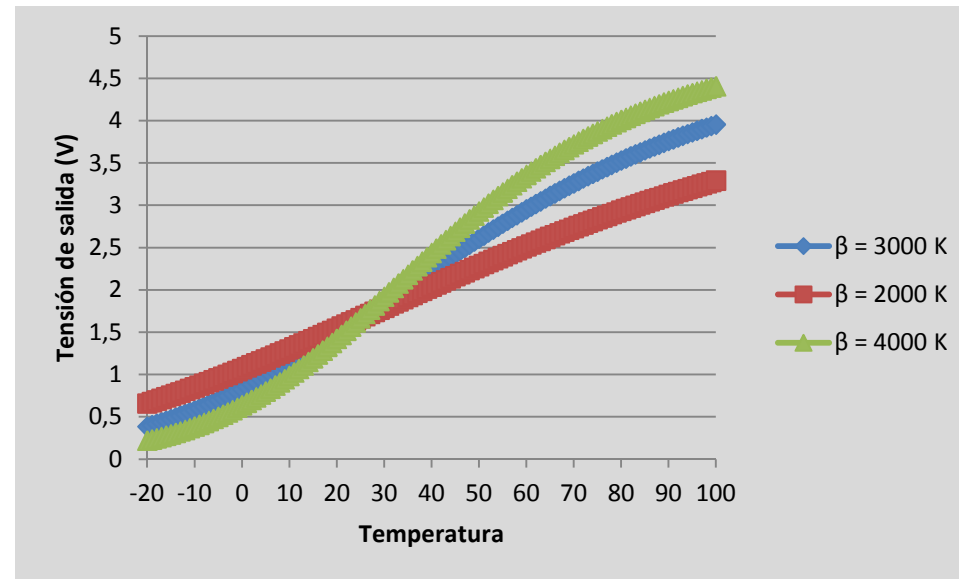
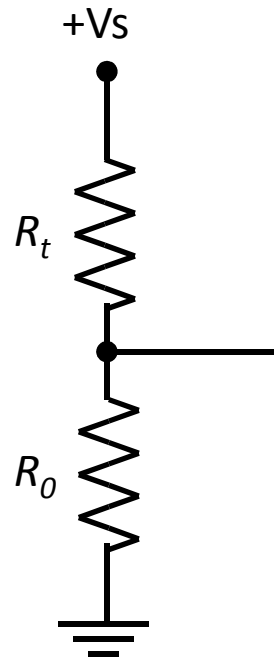
$T_0 = 298\text{K}$

$R_0$  es la resistencia a  $T_0$

$\beta$  es la constante del termistor (2000 – 4000 K)



- Se puede linealizar la respuesta del termistor mediante circuitos de acondicionamiento analógicos. Un método sencillo consiste en formar un divisor resistivo.



Para  $R_0 = 5\text{K}$  y  $\beta = 3000\text{ K}$ , y  $V_S = 5\text{ V}$ :

$$V_0 (-20^\circ\text{C}) = 0.38\text{ V}$$

$$V_0 (10^\circ\text{C}) = 1.13\text{ V}$$

$$V_0 (40^\circ\text{C}) = 2.24\text{ V}$$

$$\Delta V_0 = 0.75\text{ V}$$

$$\Delta V_0 = 1.11\text{ V}$$

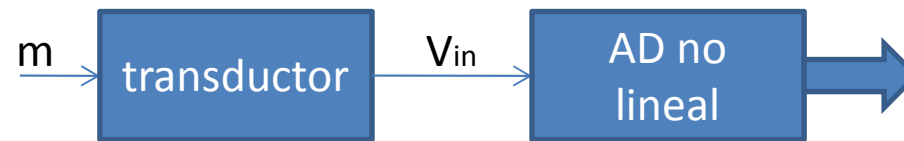


## Técnicas digitales de linealización

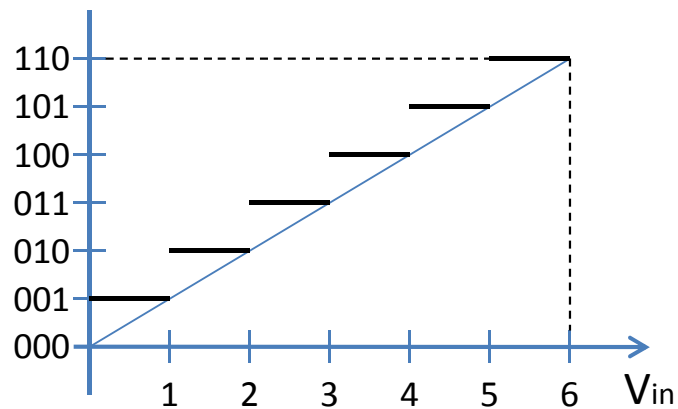
- Conversión AD no lineal
- LUT (look-up table)
- Linealización a trozos
- Cálculo o estimación de la función característica

## Conversión AD no lineal

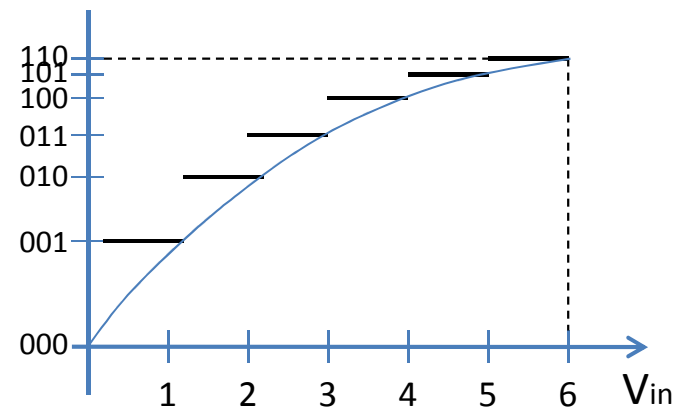
Utilizado en sensores con interfaz digital. Proporcionan un código digital lineal con el parámetro de medida sentido a través de un transductor no lineal.



AD lineal



AD no lineal







## LUT

- Es una tabla que almacena los valores digitales correspondientes a los datos proporcionados por el sensor.
- Método rápido porque no requiere cálculos. La tabla se consulta directamente con los resultados de la conversión AD.
- La resolución (incremento mínimo de la entrada para que se aprecie un incremento a la entrada) depende del tamaño de la tabla
- La resolución no es constante en todo el rango



## Ejemplo de cálculo de una LUT

- Variable de entrada  $m$  en el rango 0-50 ( $V_o = 0-5$  V)
- Resolución 3 bits
- $O = \text{sqrt}(m)$

Tensión (V)	ADC	Código	LUT (Hex)	LUT (dec)
0	000	0	00h	0
0.71	001	1	01h	1
1.42	010	2	04h	4
2.13	011	3	09h	9
2.84	100	4	10h	16
3.55	101	5	19h	25
4.26	110	6	24h	36
4.97	111	7	31h	49

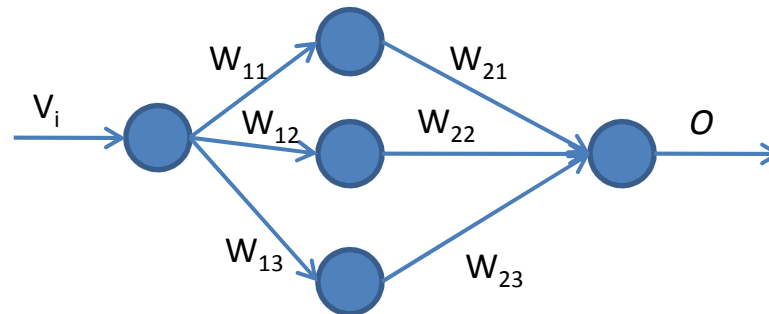


## Linealización a trozos

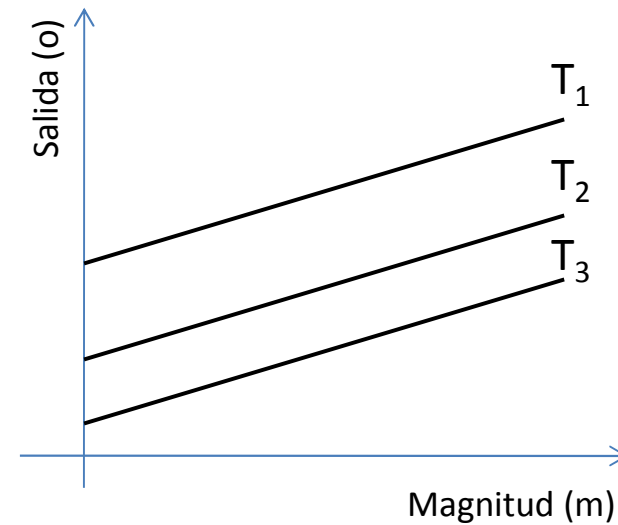
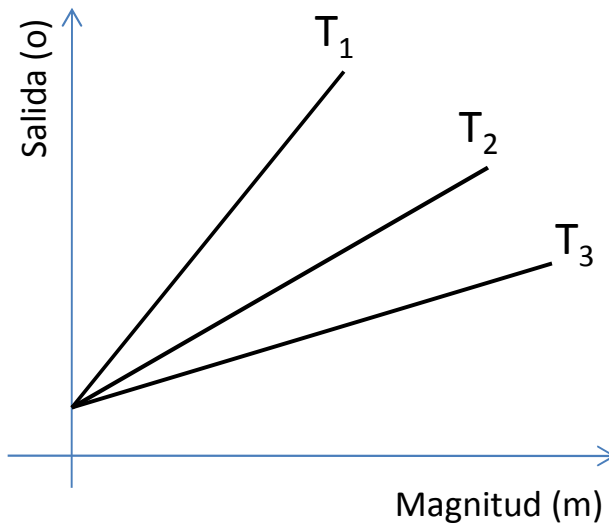
- Se divide el rango del parámetro de entrada en N segmentos iguales (o distintos) y se aproxima de manera lineal cada tramo.
- Para cada medida el micro evalúa una ecuación lineal.
- La resolución se puede hacer constante.
- El error dependerá del número de tramos.

## Cálculo de una ecuación

- Directamente la característica estática del sensor si es conocida (ejemplo SHT75)
- Cálculo de una función aproximada
  - Técnicas de interpolación
  - Técnicas estadísticas
  - Redes neuronales...



## Compensación de parámetros (temperatura)

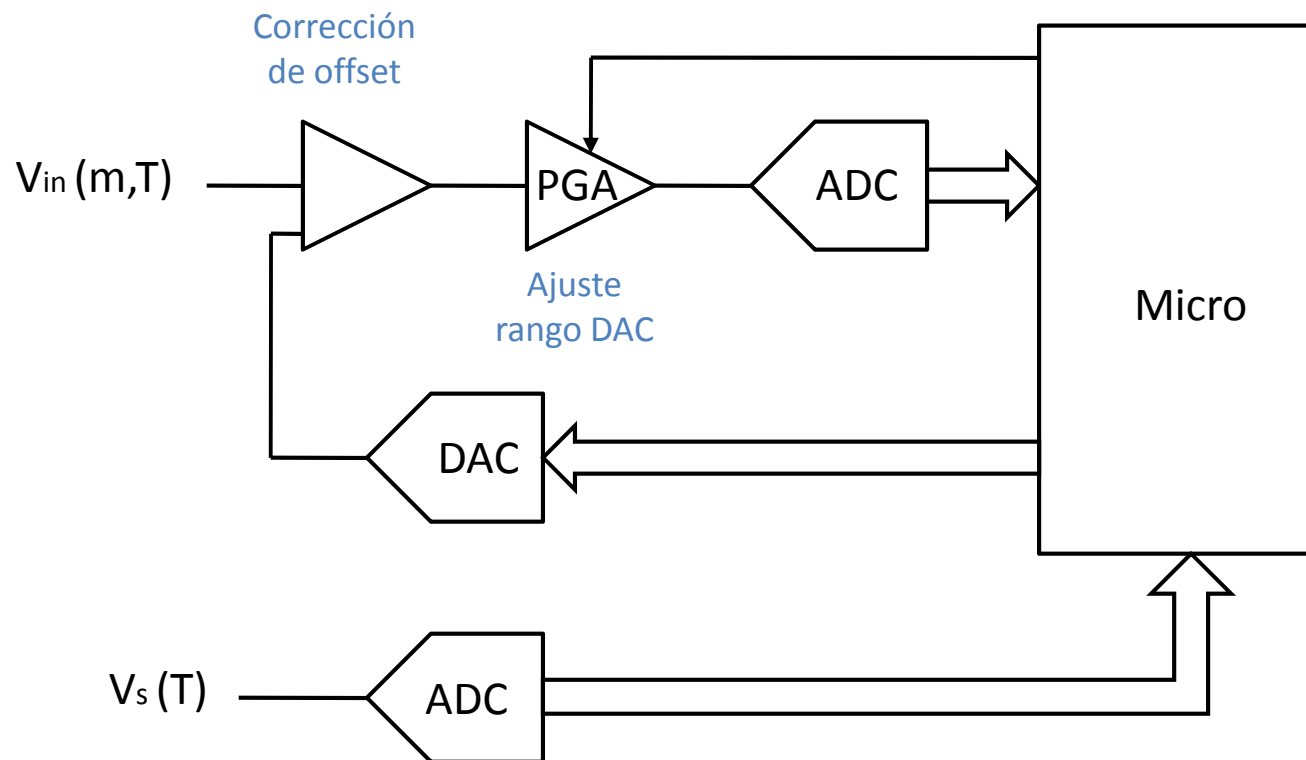


$$o = \alpha_s m$$

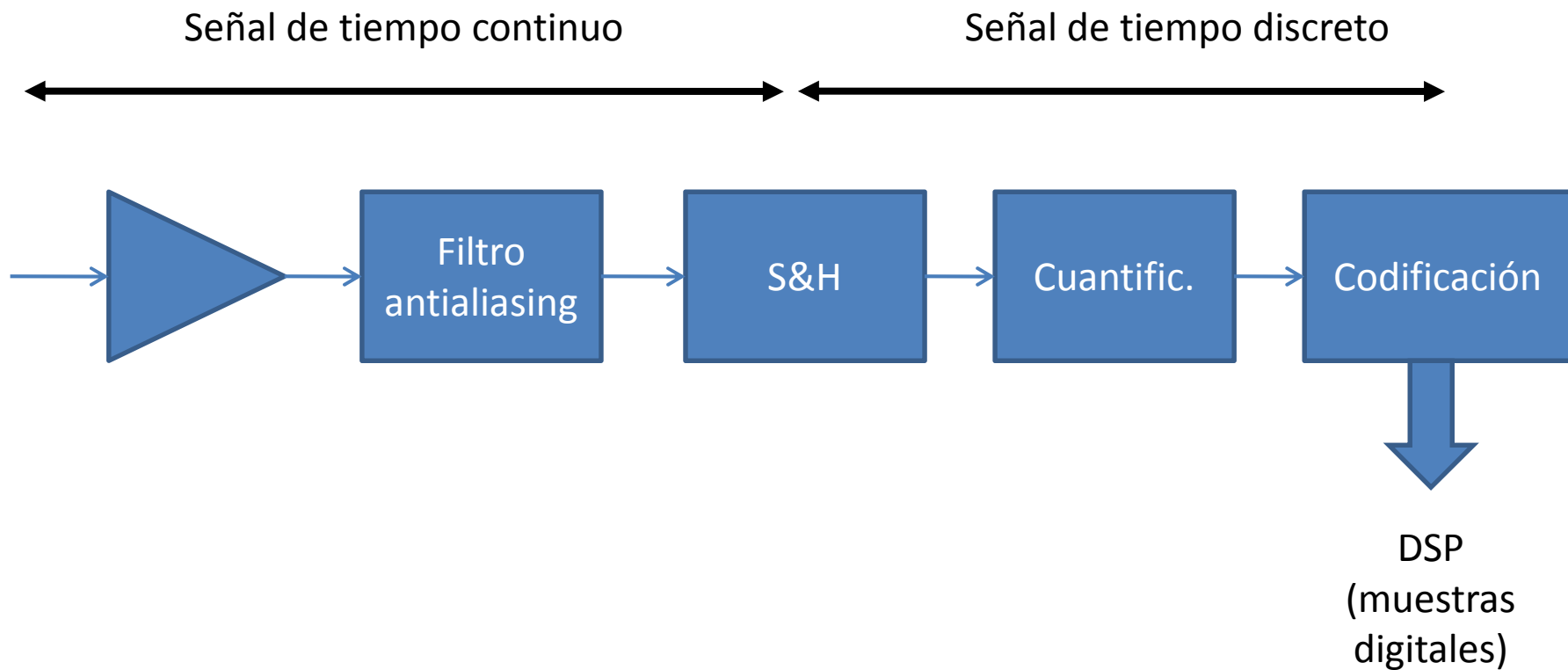
$$\alpha_s = \alpha_0 (1 + \alpha_T T)$$

## Compensación de temperatura en un sistema embebido

El efecto de la temperatura sobre el transductor suele ser no lineal. Los sistemas basados en microprocesador presentan ventajas respecto a compensación mediante circuitos en cuanto a flexibilidad y calibración.



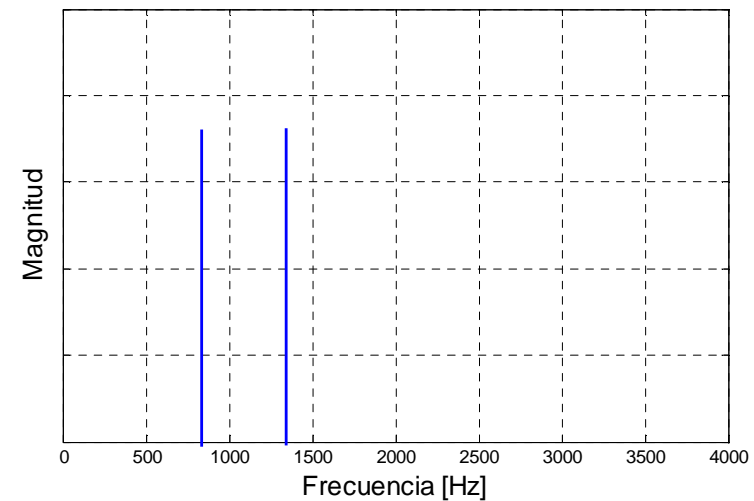
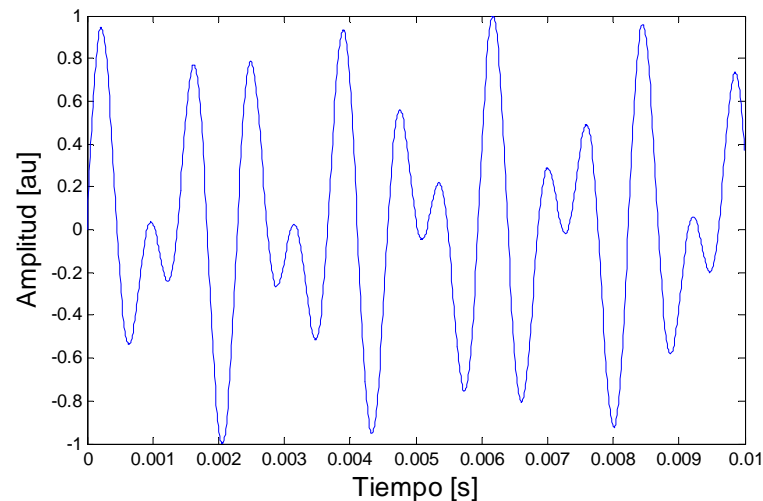
## Procesamiento de señales



## Repaso de señales y sistemas

- Descripción de señales en el dominio del tiempo
- Descripción en el dominio de la frecuencia
  - Amplitud
  - Desfase

Señal formada por 2 tonos (tecla '8'), 852 Hz, 1336 Hz

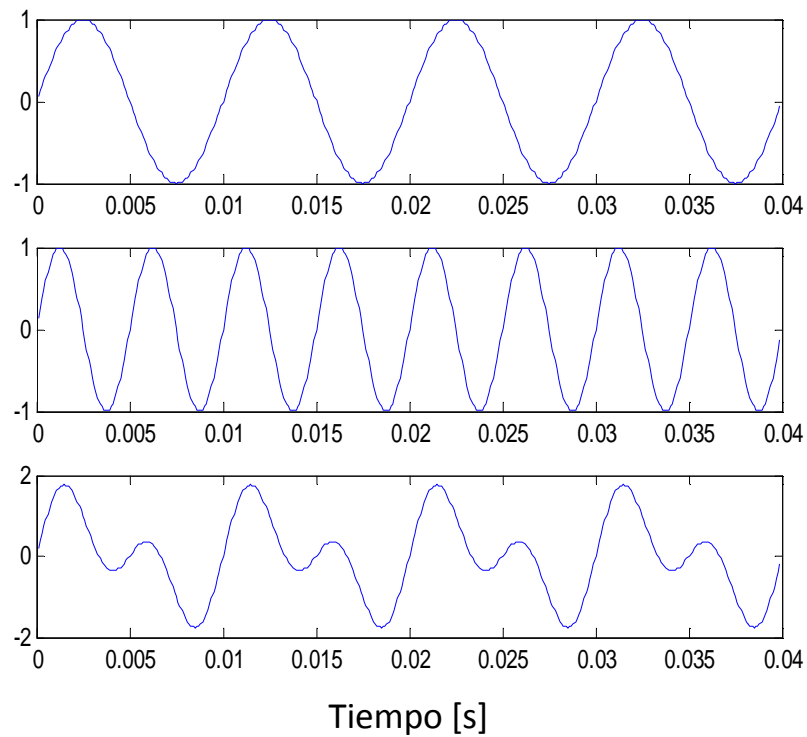


Misma magnitud  
(misma potencia en ambas frecuencias)



## Magnitud y fase en el dominio de la frecuencia

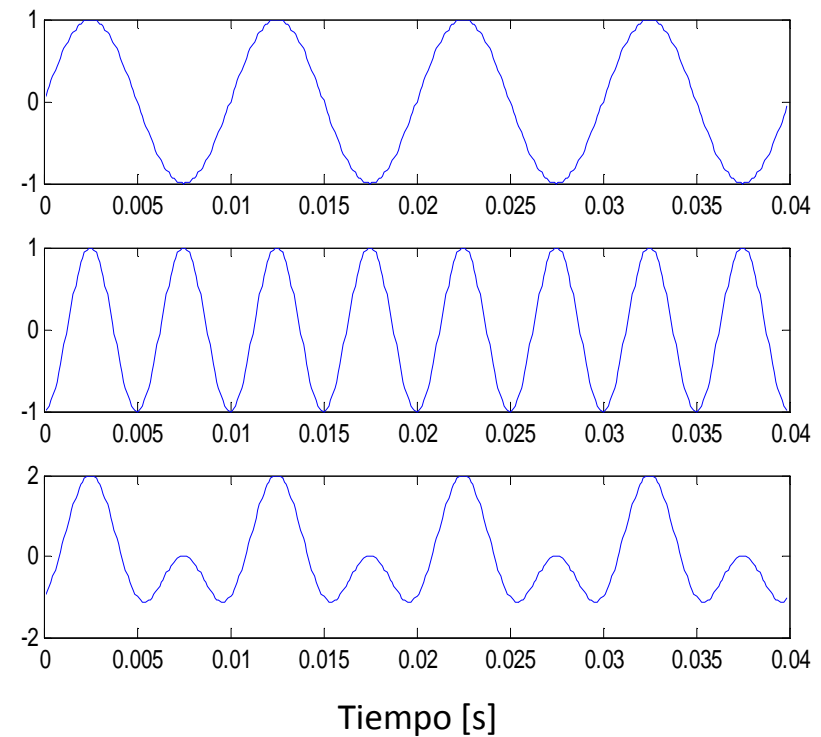
Son necesarias las dos variables para definir la señal.



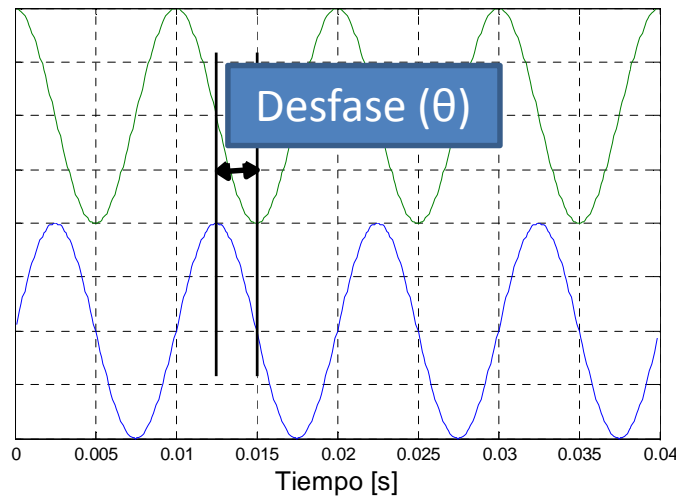
100 Hz

+

200 Hz

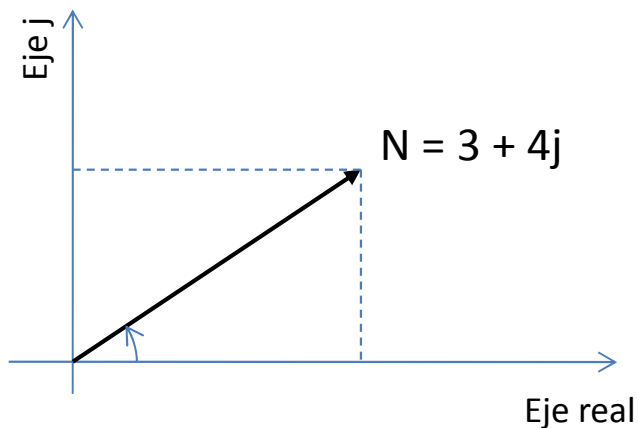


- El desfase de una señal se refleja en un desplazamiento en el tiempo



$$t_d = -\frac{\theta}{f}$$

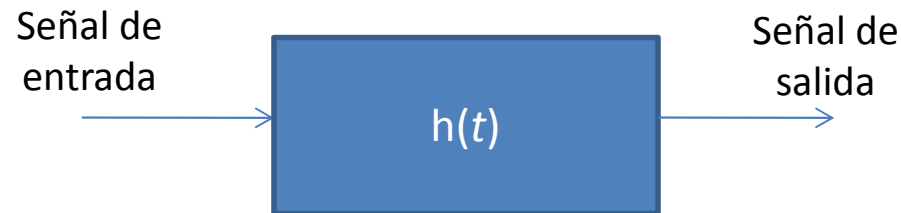
- La magnitud y la fase se representan de manera conjunta utilizando números complejos



$$|N| = 5$$

$$\angle N = 0.927 \text{ rad}$$

## Descripción de sistemas

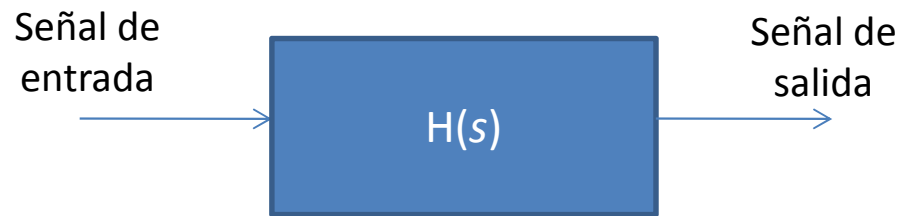


- En el dominio del tiempo (respuesta al impulso, respuesta al escalón)
- Función de transferencia  $H(j\omega)$  (describe el comportamiento estacionario)
  - Respuesta en amplitud:  $|H(j\omega)|$
  - Respuesta en fase
- Función del sistema  $H(s)$ 
  - $s$  es una frecuencia compleja

$$s = \sigma + j\omega$$

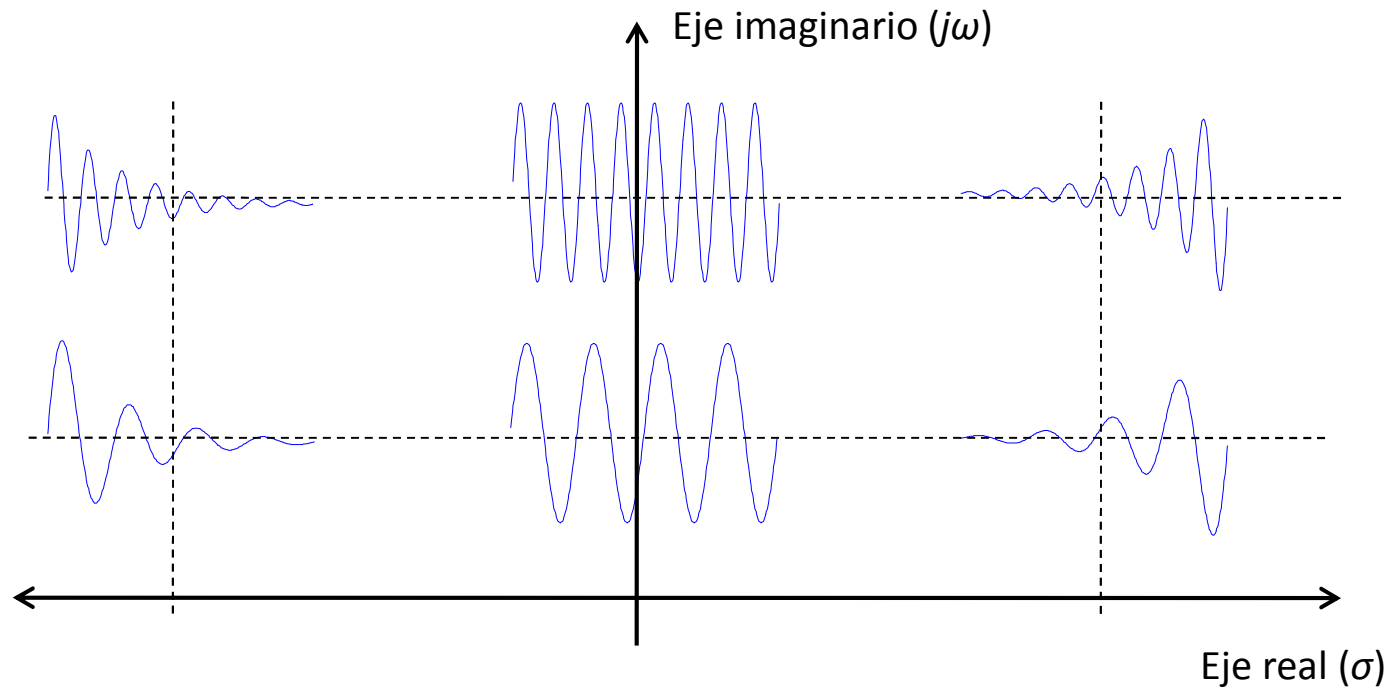
$$x(t) = Ae^{\sigma t} \cos(\omega t + \theta)$$

- Función del sistema  $H(s)$ 
  - $s$  es una frecuencia compleja



$$s = \sigma + j\omega$$
$$x(t) = Ae^{\sigma t} \cos(\omega t + \theta)$$

### Plano $s$





## Filtros

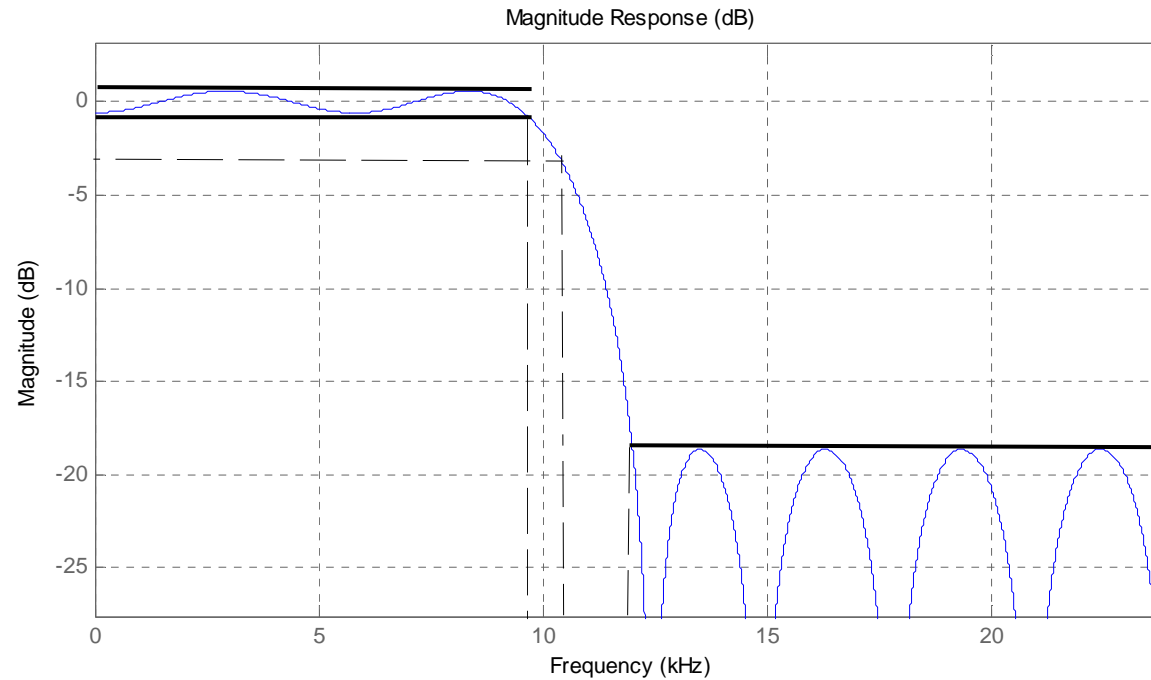
- Características en régimen estacionario (dominio de la frecuencia)
  - Respuesta en amplitud
  - Respuesta en fase
  - Estabilidad
- Características dinámicas (dominio del tiempo)
  - Tiempo de subida
  - Tiempo de establecimiento
  - Sobreoscilación

---

## Tipos de filtros

- Paso alto
- Paso bajo
- Paso banda
- Notch
- Paso todo (modifica sólo la fase de la señal)

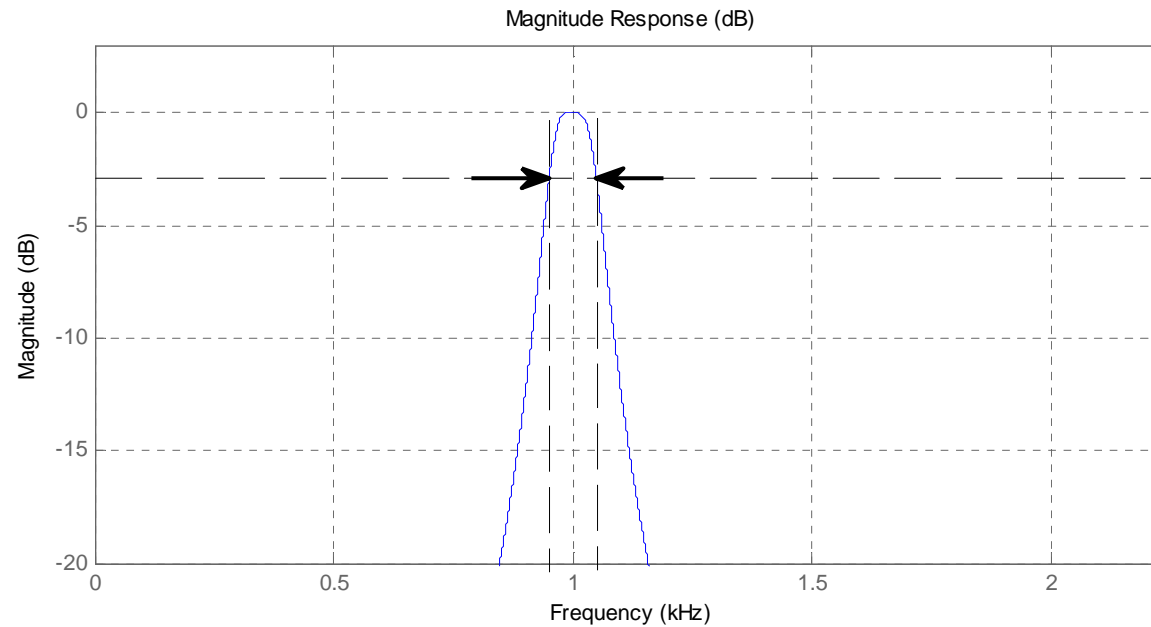
## Especificación de la respuesta en amplitud



Parámetros de un filtro paso bajo:

- Frecuencia de corte ( $f_c$ )
- Rizado en banda paso ( $A_p$ )
- Atenuación mínima ( $A_s$ )
- Corte banda de paso ( $F_p$ )
- Corte banda de rechazo ( $F_s$ )

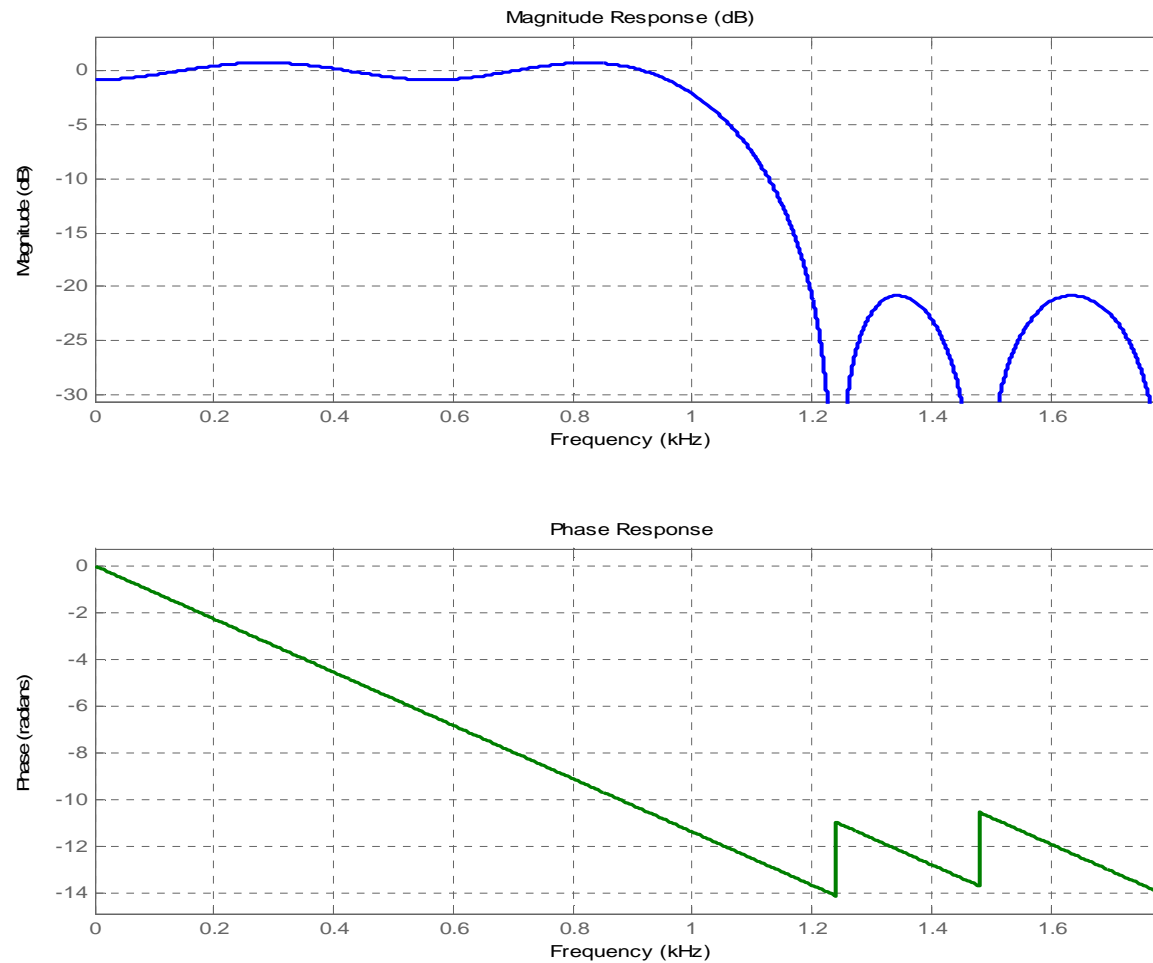
## Especificación de la respuesta en amplitud



- Parámetros de un filtro paso banda:
- Frecuencia central
  - Ancho de banda
  - Factor Q



## Especificación de la respuesta en fase (desfase lineal)



Filtro de fase lineal





## Resumen de señales y sistemas analógicos

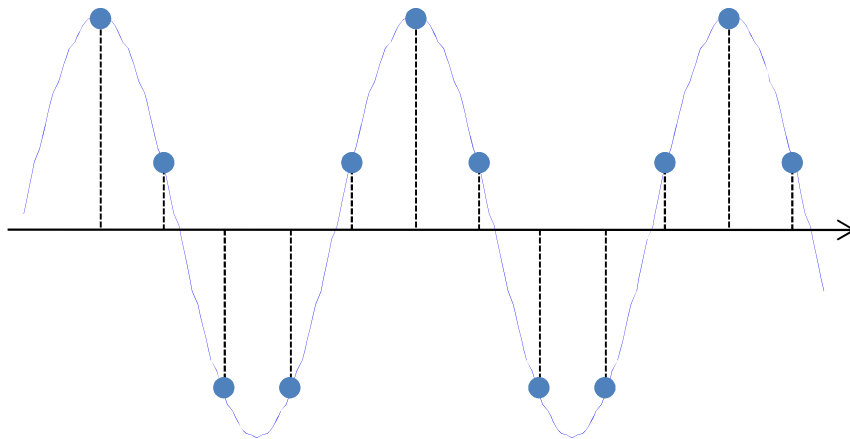
- Las señales analógicas son continuas en el tiempo y en los valores de amplitud. Se pueden describir en el dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia (amplitud, en dB, y desfase frente a frecuencia en escala logarítmica)
- $H(j\omega)$  describe el comportamiento de un sistema en el dominio de la frecuencia.  $H(s)$  también utilizando una frecuencia compleja.
- La función  $H(s)$  puede descomponerse en polos (raíces del denominador) y ceros (raíces del numerador). La representación de los polos y los ceros de un sistema en el plano  $s$  es una herramienta muy útil para visualizar la respuesta del sistema.
- Un filtro es un ejemplo de sistema que se diseña para modificar la amplitud (y/o fase) de una señal.

## Señales y sistemas de tiempo discreto

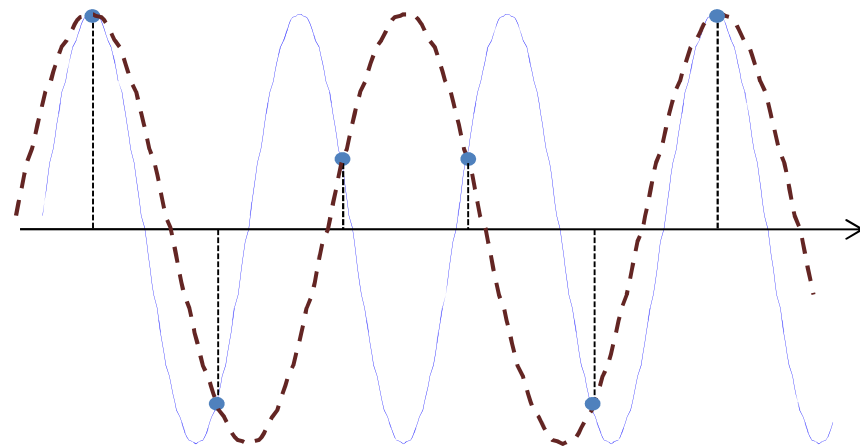
- Una señal de tiempo discreto toma valores en puntos del tiempo (intervalos regulares) pero puede tener valores continuos. Se obtiene por muestreo de una señal analógica.
- Una “señal” digital es discreta en el tiempo y cuantificada.

$F_s$  frecuencia de muestreo

$T_s=1/F_s$  periodo de muestreo



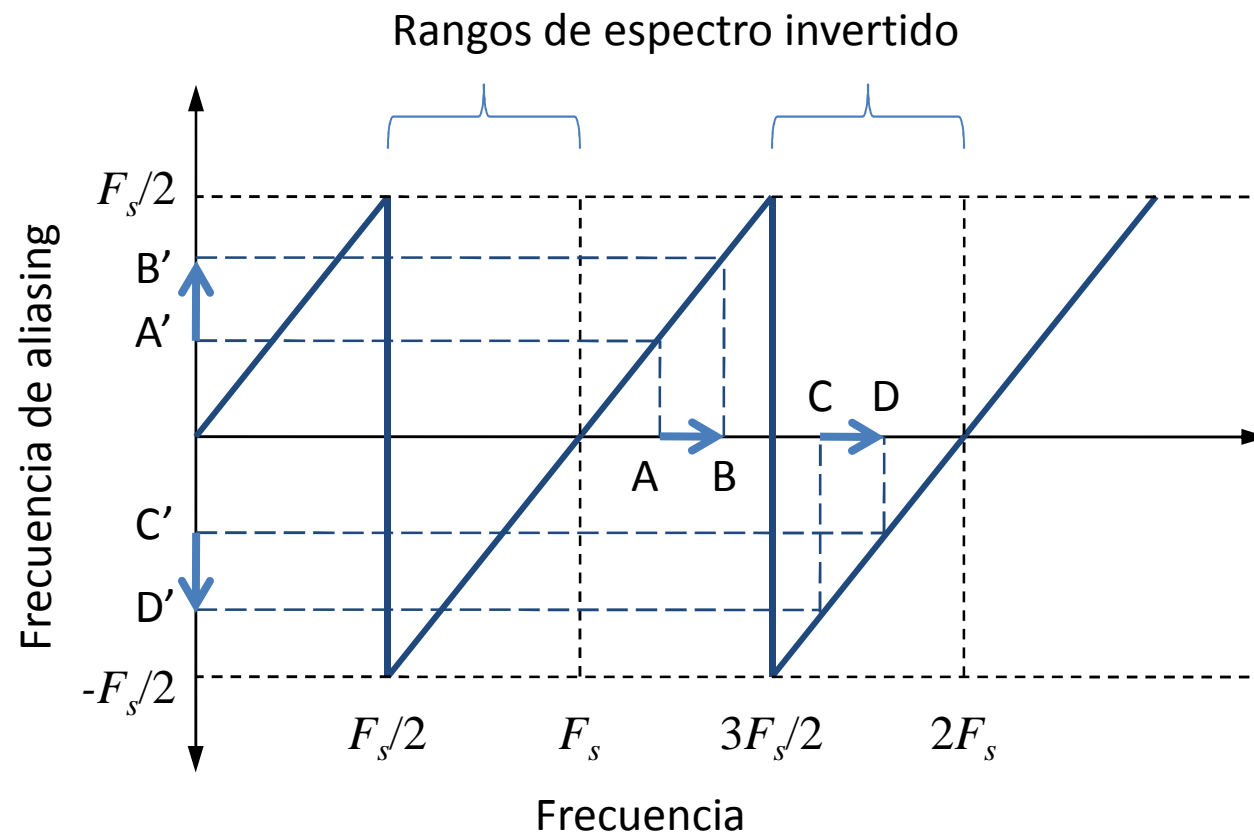
Señal de de 600 Hz muestreada a  $F_s = 3$  KHz



Señal de 600 Hz muestreada a  $F_s = 1$  KHz  
Aliasing a 400 Hz

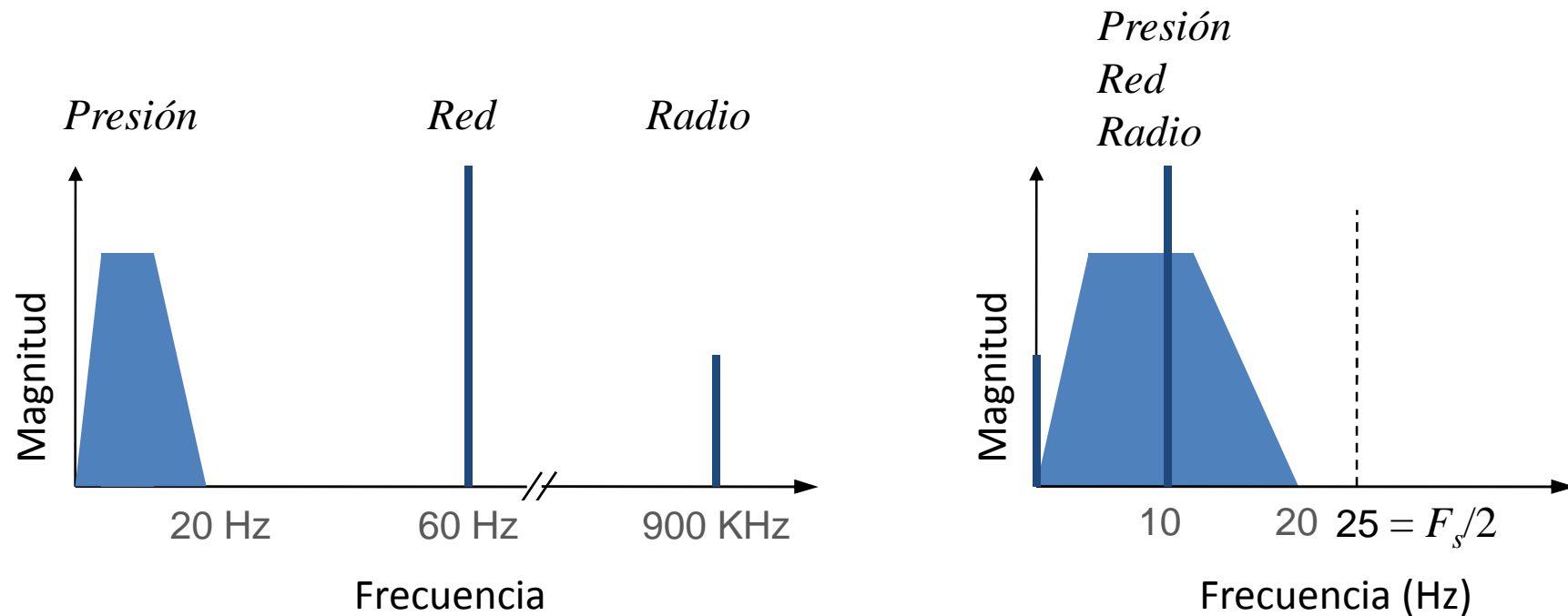
## Elección de la frecuencia de muestreo

- La frecuencia de muestreo afecta el contenido de frecuencias de la señal discreta
- Los componentes de frecuencia por encima de la frecuencia de Nyquist ( $F_s/2$ ) se trasladan a otra frecuencia dentro del rango  $0 - F_s/2$ .



$$F_a = F - F_s \left\lfloor \frac{F + F_s/2}{F_s} \right\rfloor$$

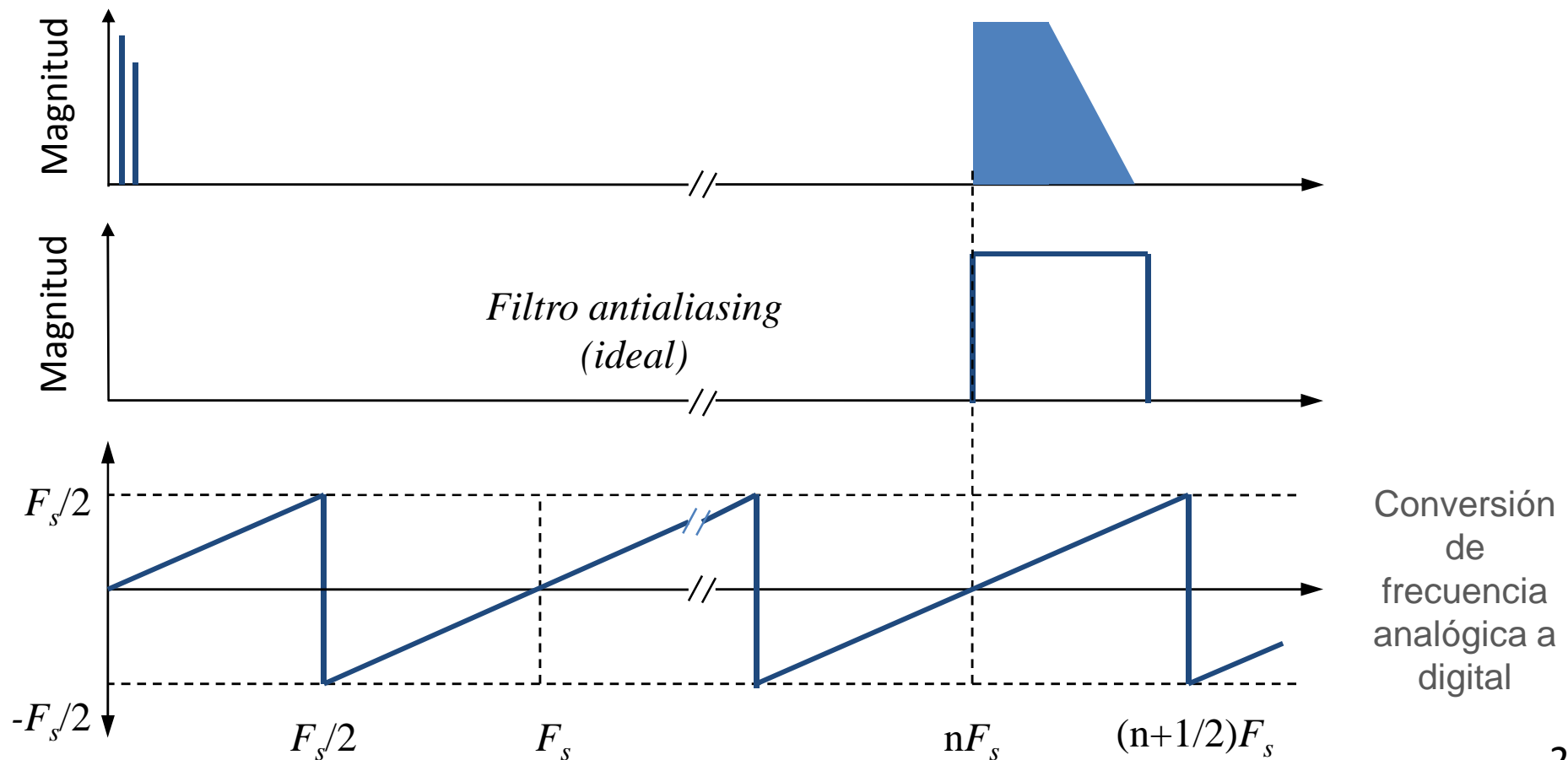
## Elección de la frecuencia de muestreo (ejemplo 1)



¡ Filtro antialiasing !

## Elección de la frecuencia de muestreo (ejemplo 2)

- Undersampling: Se puede muestrear una señal analógica para tener aliasing del rango de frecuencias de interés. Cuidadosa elección de la frecuencia de muestreo para no hacer el espectro discontinuo o invertido.

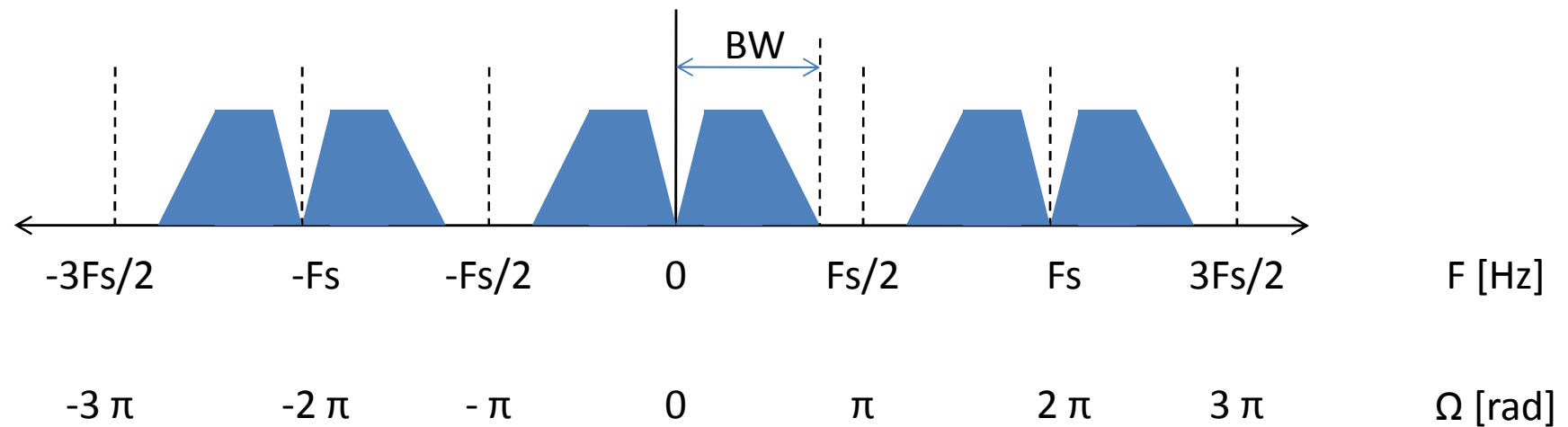




## Descripción de señales y sistemas en tiempo discreto

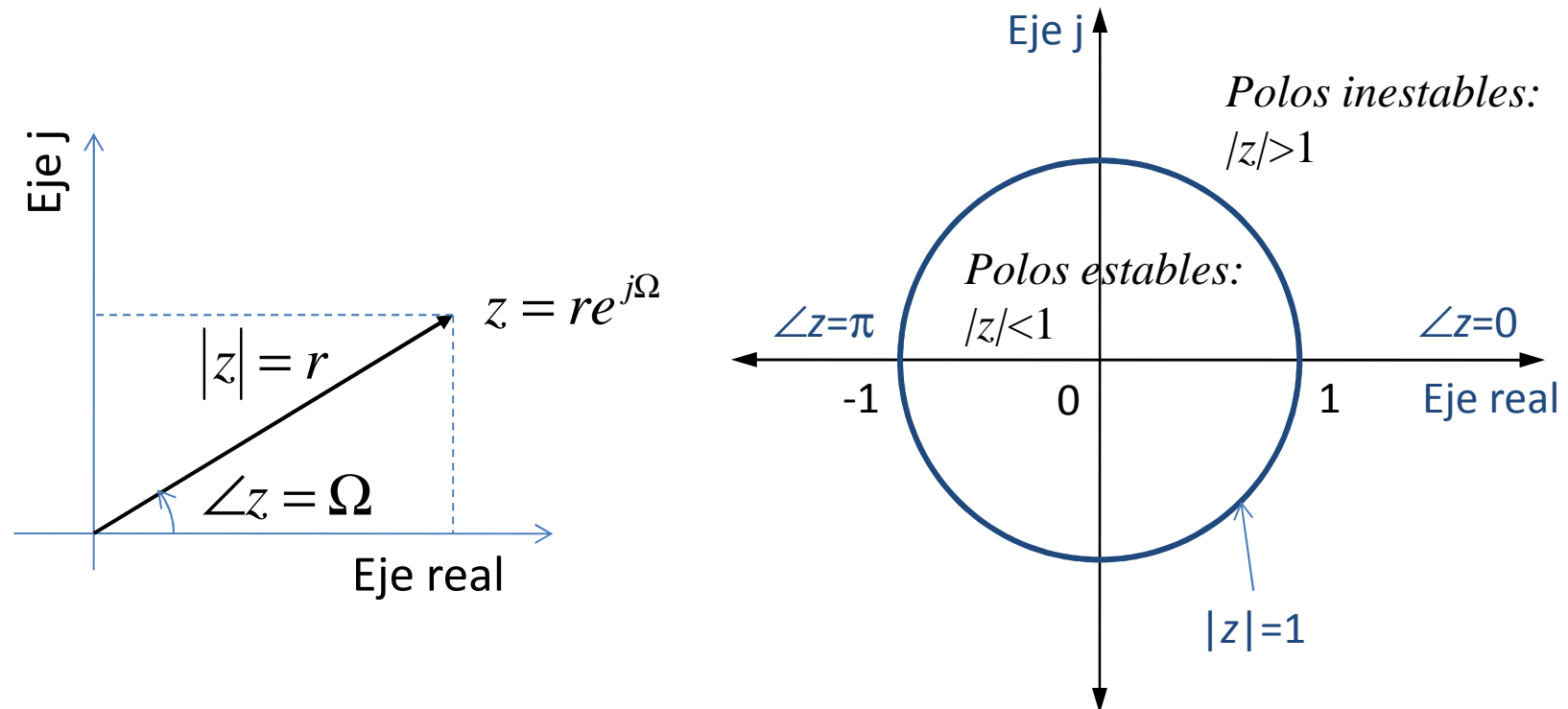
Frecuencia normalizada ( $\Omega$ )

$$\Omega = \omega T_s \quad [\text{rad}]$$



## Plano $z$

- $H(e^{j\Omega})$  representa la respuesta en frecuencia (amplitud y fase del sistema)
- $H(z)$  es la función del sistema. La descomposición en polos y ceros en el plano  $z$  da una descripción del comportamiento del sistema





## Paso de $H(z)$ a ecuación en diferencias

- Una ecuación en diferencias relaciona la salida actual del sistema con los valores anteriores y el actual mediante una combinación lineal (tarea que va a realizar nuestro procesador)

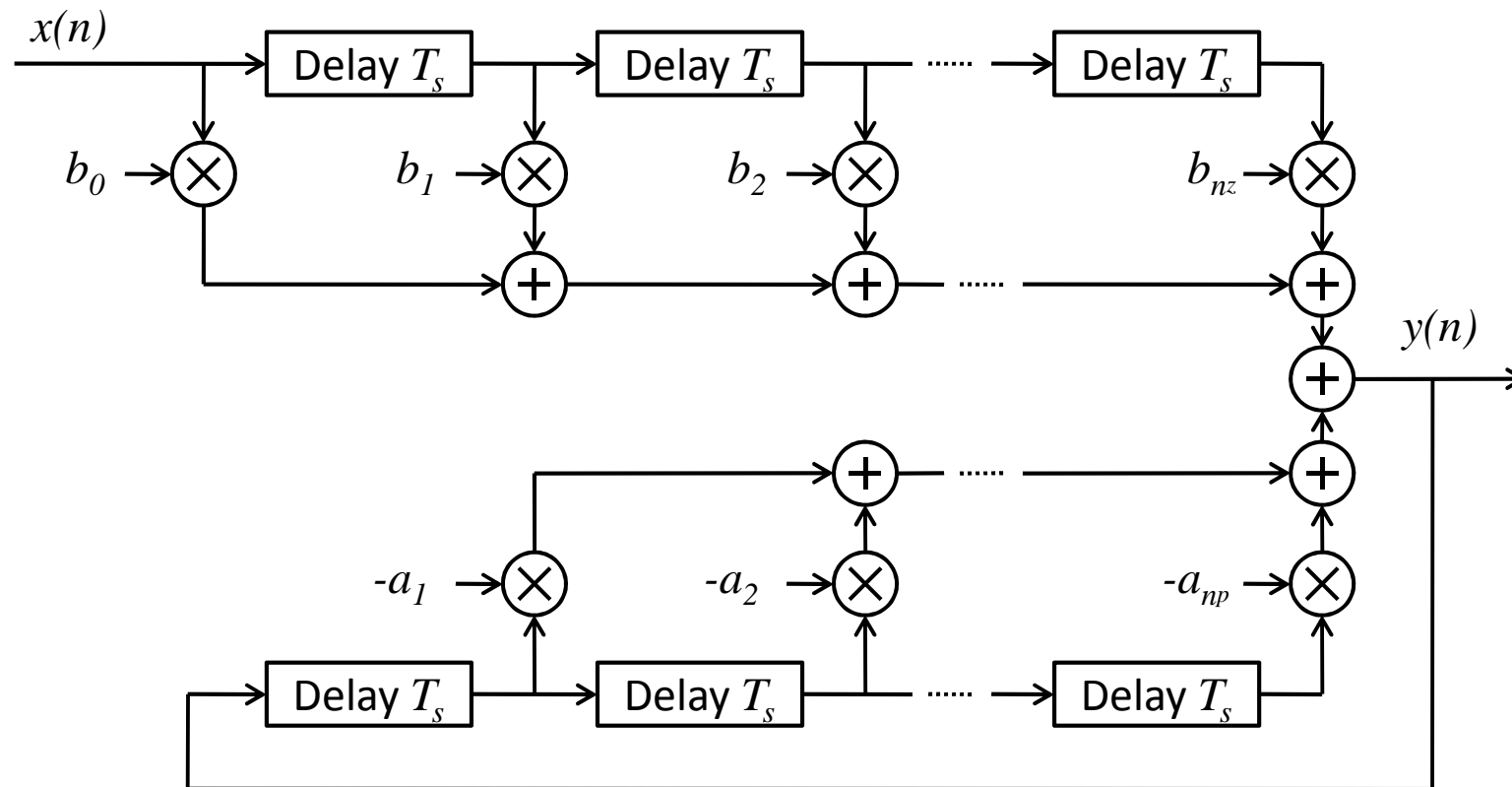
$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{(z-1)(z+1)}{(z+0.5j)(z-0.5j)} = \frac{1-z^{-2}}{1-0.25z^{-2}}$$

$$y(n) = x(n) - x(n-2) + 0.25y(n-2)$$



## Filtros digitales

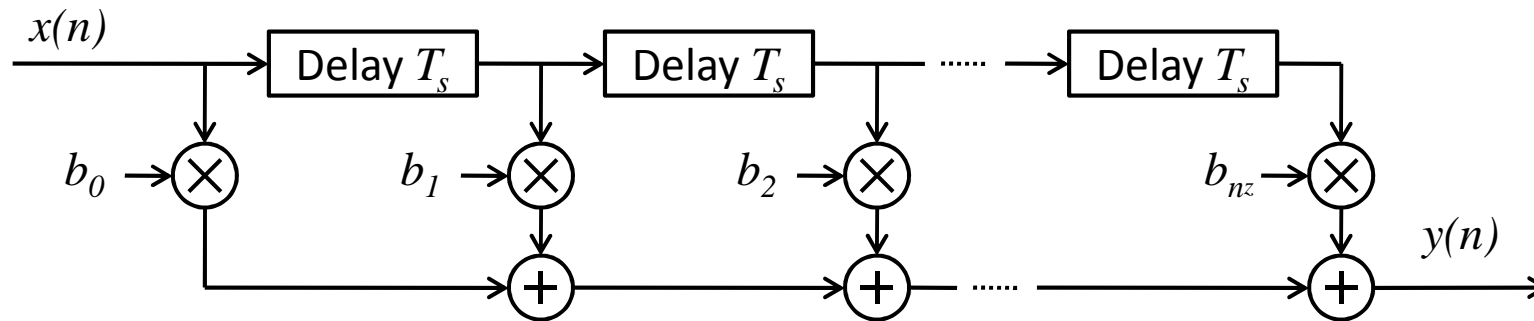
$$y(n) = b_0x(n) + b_1x(n-1) + b_2x(n-2) + \dots + b_{n_z}x(n-n_z) - a_1y(n-1) - a_2y(n-2) - \dots - a_{n_p}y(n-n_p)$$



IIR (Infinite Impulse Response)

## Filtros digitales

$$y(n) = b_0x(n) + b_1x(n-1) + b_2x(n-2) + \dots + b_{n_z}x(n-n_z)$$



FIR (Finite Impulse Response)



## Características de un sistema embebido

- Se diseñan para trabajar en línea (tiempo limitado).
- Recursos de memoria limitados.
- Operaciones generalmente en punto fijo.



## Proceso de diseño de un filtro digital

- Especificar las características del filtro
- Seleccionar el tipo de filtro (FIR o IIR)
- Calcular los coeficientes del filtro
- Seleccionar la arquitectura del filtro (ej: secciones de segundo orden en cascada)
- Evaluar los efectos de operación en punto fijo
- Generar el código
- Verificar

## Comparativa

- Un filtro FIR generalmente requiere mas carga computacional que un filtro IIR para la misma respuesta en magnitud dada.
- Los filtros FIR pueden proporcionar exactamente una respuesta en fase lineal, mientras que en los filtro IIR dan una respuesta de fase no lineal que puede distorsionar la señal.
- En los filtros FIR la estabilidad está garantizada, al contrario que en los IIR.
- Los filtros FIR son menos sensibles a la cuantificación de los coeficientes y ruido de redondeo en los cálculos.
- Con un filtro FIR es más sencillo diseñarlo para cualquier especificación arbitraria incluso cuando no es posible su equivalente analógico.
- La implementación de los filtros FIR es directa (el hardware de los DSPs la realiza de manera eficiente). Los filtros IIR requieren un diseño cuidadoso de sus etapas para obtener prestaciones óptimas.
- En caso de los filtros IIR existe su equivalente analógico y los procesos de diseño son más sencillos.



## Implementación de filtros en microcontroladores

- Es necesario tener en cuenta la arquitectura del procesador.
- Las operaciones principales son: multiplicación, acumulación (suma), desplazamiento, saturación (overflow), direccionamiento indexado y manejo de buffers circulares, y movimiento de datos.
- Programación en alto nivel o programación en ensamblador
- Los datos se pueden codificar de en distintos formatos según rango y resolución (ej: 1.15 para representar datos entre -1 y menor que 1).
- Optimización del código :
  - Reducir carga (llamadas a subrutinas, desplazar en lugar de multiplicar, contantes...)
  - Reducir velocidad (registros, bucles, eliminación de expresiones...)
  - Movimiento de datos (usar punteros, no mover datos)
- Optimización del uso de memoria
- Control de la conversión AD – intervalo de muestreo (interrupciones / polling)



## Referencias

- Manabendra Bhuyan. “Intelligent Instrumentation”. CRC Press, 2011.
- Dale Grover & John R. Deller. “Digital Signal Processing and teh Microcontroller”. Prentice Hall, 1999
- Robert B. Northrop. “Introduction to Instrumentation and Measurements”. CRC Press, 1997



## Deberes

Teniendo en cuenta las características del circuito de captura analógica. Calcular una LUT para linealizar la respuesta de un termopar tipo de tipo K en el rango de temperaturas -40-80 °C

Las tablas de voltajes termoeléctricos datos pueden encontrarse en:

[http://srdata.nist.gov/its90/download/type\\_k.tab](http://srdata.nist.gov/its90/download/type_k.tab)

Determinar los coeficientes de un filtro notch (banda eliminada) con una resolución de 16 bits. Los parámetros son  $F_0 = 50$  Hz,  $F_s = 12.8$  KHz

fdatool (Matlab)