



E.U.I.T.I.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

DPTO. ELECTRÓNICA, AUTOMÁTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

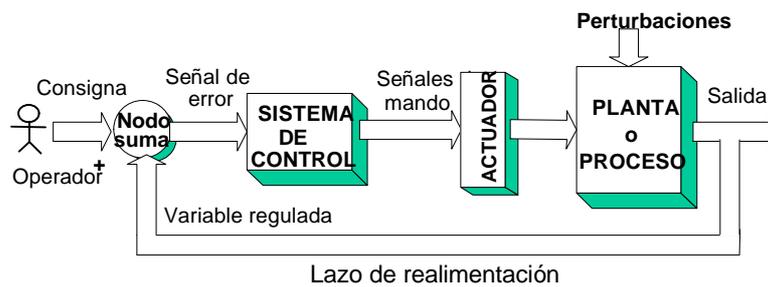
TRANSPARENCIAS TEMA 1

Sistema de Medida. Definición

- Asigna un número a una propiedad o cualidad de un objeto o evento.
- Objetiva y empíricamente.
- Con correspondencia entre las relaciones numéricas y las relaciones entre las propiedades descritas.

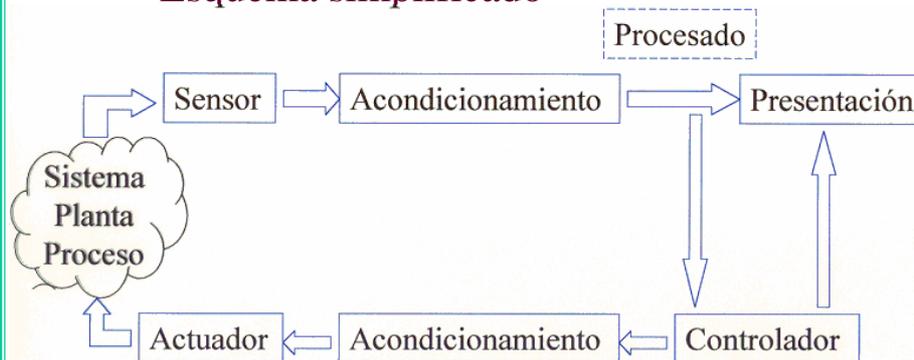
Sistema de Medida. Objetivos

- Vigilancia o seguimiento de procesos.
- Control de procesos.
- Ingeniería experimental.

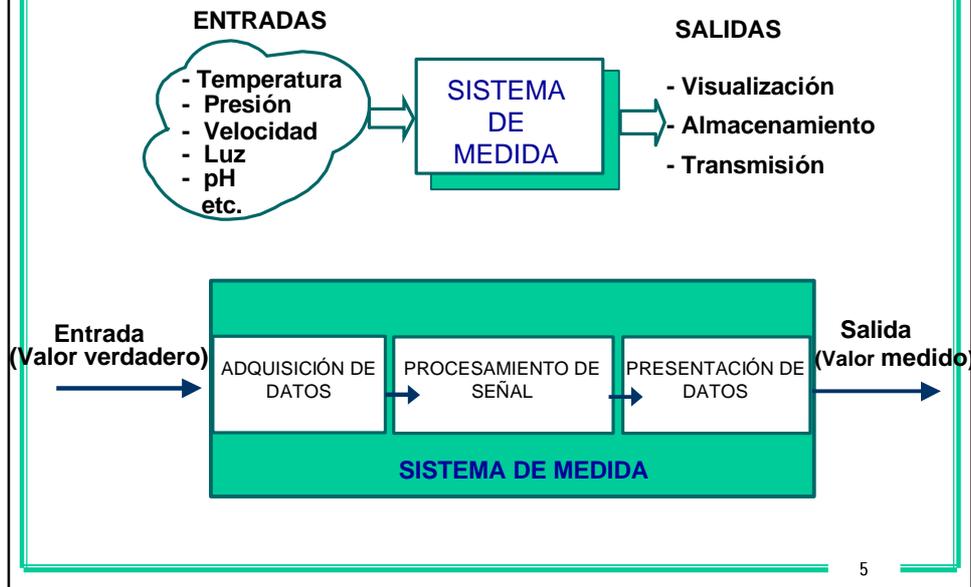


Sistema de Medida y Control

- Esquema simplificado



Sistema de Medida. Operaciones



Transductor

- Transductor, convierte una señal de una forma física en otra de una forma física distinta.
- Existe una transferencia de energía (extracción de energía del sistema medido).
- La transferencia debe ser pequeña para perturbar lo menos posible el sistema medido.

Transductor con Salida Eléctrica

- Transductor suele usarse como sinónimo de:
 - Transductor con señal de salida eléctrica.
- Ventajas transductores eléctricos:
 - Naturaleza electrónica de la materia: cualquier variación en un parámetro resulta en una modificación de las propiedades eléctricas.
 - Facilidad para amplificar la señal: permite extraer menos energía.
 - Gran variedad de opciones para procesar, presentar y almacenar las señales eléctricas.

Sensor

- Sensor, genera una señal transducible a partir de la magnitud física que se desea medir.
- Las funciones de transductor y sensor pueden recaer en un solo dispositivo o no.

Tipos de Sensores

- Moduladores: modulan una fuente de energía externa. Ej.: NTC.
- Generadores: generan energía a partir de la magnitud medida. Ej.: termopar.
- Analógicos: salida continua. Ej.: LDR.
- Digitales: salida discreta. Ej.: encoder.
- Por Deflexión: salida varía en correspondencia con variación magnitud. Ej.: dinamómetro.
- Por Comparación: búsqueda del equilibrio con una referencia. Ej.: balanza.

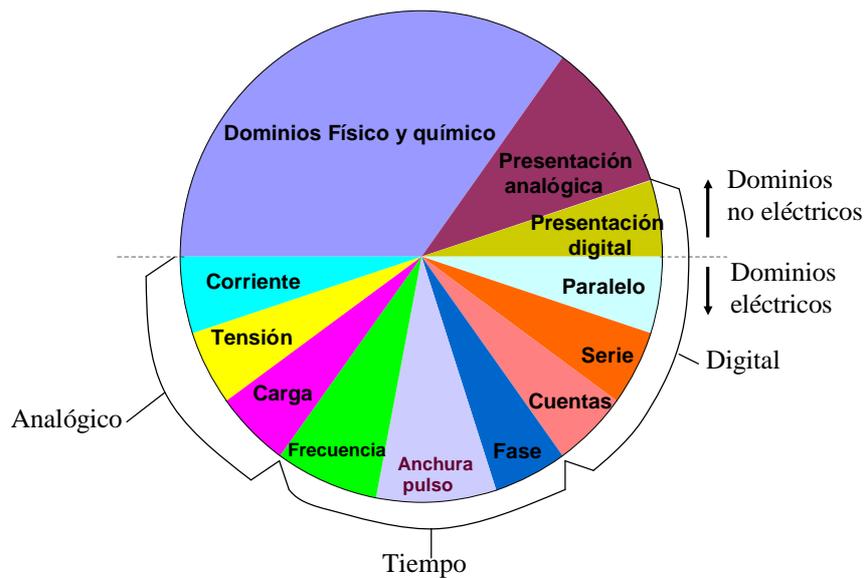
Acondicionamiento

- Las señales del transductor no suelen poder utilizarse directamente.
- Es necesario su acondicionamiento:
 - Amplificación.
 - Filtrado.
 - Adaptación de impedancias.
 - Normalización.
 - Modulación / Demodulación.
 - Conversión A/D y D/A.
 - Muestreo y retención.

Interfaz

- No siempre resulta sencillo diferenciar que elemento realiza cada función
- Por ello a veces se utiliza el concepto de interfaz:
 - Conjunto de elementos que modifican las señales, cambiando incluso su dominio de datos, pero sin cambiar su naturaleza.

Dominios de Datos



Medidas directas e indirectas

- Medidas directas:
 - Una medida física es directa cuando se deduce información cualitativa acerca de un objeto físico o acción mediante comparación directa de una referencia.
- Medidas indirectas:
 - Una medida física es indirecta cuando la cantidad de interés se calcula a través de otras medidas y de la aplicación de la ecuación que describe la ley que relaciona dichas magnitudes.

Perturbaciones

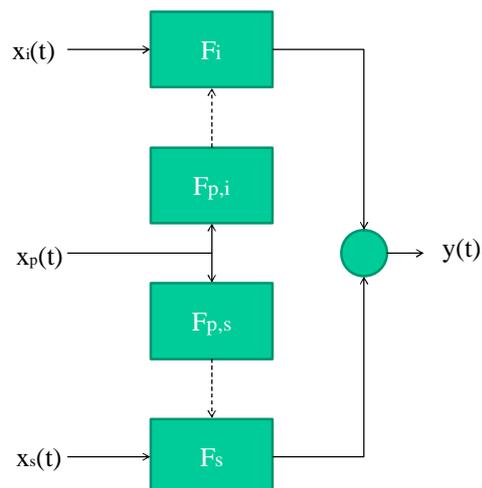
- Idealmente, el sensor debería ser sensible:
 - Sólo a la magnitud que deseamos medir.
 - Sólo en donde deseamos medirla.
- Esto es imposible en la práctica debido a la existencia de perturbaciones internas y externas

Perturbaciones. Tipos

- Perturbaciones Internas:
 - Aquellas que afectan a la salida por su efecto sobre las características del sistema de medida.
- Perturbaciones Externas o interferencias:
 - Aquellas que afectan a la salida como consecuencia del principio de medida.

Perturbaciones. Modelado

- x_s : Señal
- x_p : Perturbación interna
- x_i : Interferencia



Perturbaciones. Ejemplo

- Galga extensométrica:
 - Principio de medida: variación de la resistencia eléctrica con la deformación.
 - Necesita amplificación.
 - La temperatura actúa como perturbación interna y externa:
 - Interna: al desplazar el punto de funcionamiento del amplificador
 - Externa: al modificar la resistividad del material de la galga.

Perturbaciones. Compensación

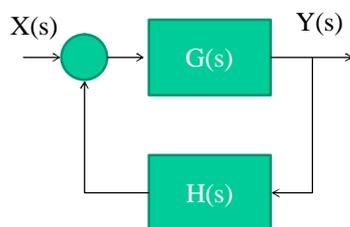
- Objetivo: reducir efecto de las perturbaciones
- Métodos:
 - Modificación del diseño original.
 - Adición de nuevos componentes.
- Técnicas:
 - Insensibilidad intrínseca.
 - Realimentación negativa.
 - Filtrado.
 - Cancelación de efectos contrarios.

Compensación. Insensibilidad Intrínseca

- Empleo de materiales, sensores o diseños menos sensibles a las perturbaciones.
- Ejemplo:
 - Empleo de resistencias con menor coeficiente de temperatura en los circuitos de acondicionamiento.

Compensación. Realimentación negativa

- Factible en medidas por comparación (donde se trata igualar el error a cero).
- $H(s)$ debe ser insensible a la perturbación.

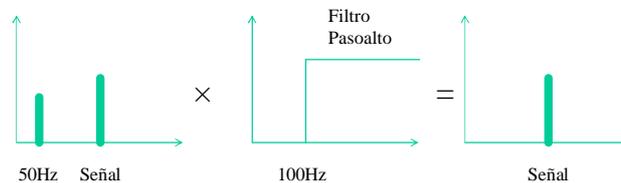


$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1 + H(s)G(s)} \approx \frac{1}{H(s)}$$

↑
 $|H(s)G(s)| \gg 1$

Compensación. Filtrado

- Útil si los espectros de la señal y las perturbaciones no se solapan.
- En tal caso, es posible eliminar las perturbaciones por filtrado
- Ejemplo: ruido de red



Compensación. Cancelación Efectos

- Se trata de asociar elementos en los que la perturbación tenga efectos del mismo orden, pero contrarios.
- Ejemplo: asociar una resistencia con coeficiente de temperatura positivo a otra con coeficiente de temperatura negativo.

Características de los Sistemas de Medida

- El comportamiento de un sistema de medida queda definido por sus:
 - Características estáticas: que describen el comportamiento ante señales infinitamente lentas.
 - Características dinámicas: que describen el comportamiento ante señales que varían con velocidad finita.
 - Características de entrada/salida: amplían las anteriores al considerar la interacción entre el sistema de medida y el sistema medido.

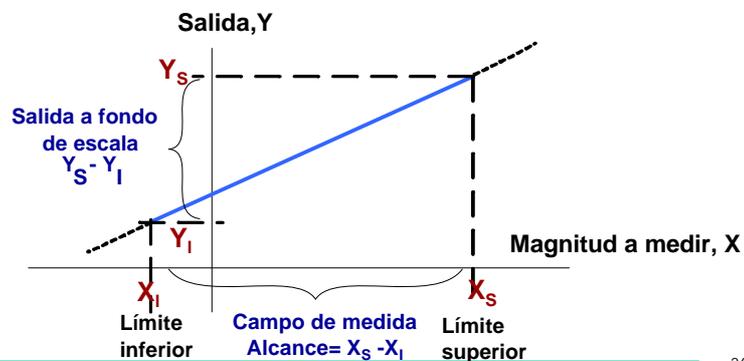
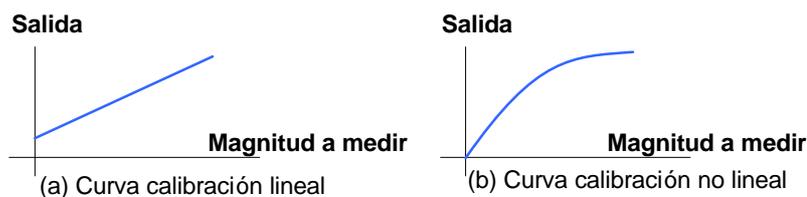
Características estáticas *Comportamiento del sistema*

- Exactitud, veracidad, precisión.
- Fidelidad, repetibilidad, reproducibilidad.
- Sensibilidad o factor de escala.
- Linealidad:
 - Resolución
 - Umbral
 - Histéresis

Exactitud o precisión. Calibración estática

- La exactitud mide la capacidad de un instrumento de medida de dar indicaciones que se aproxime al verdadero valor de la variable medida.
- La exactitud de un sensor se determina mediante calibración estática.
- Se mantienen constantes todas las entradas menos una, que se hace variar muy lentamente.
- La magnitud de entrada debe proceder de un patrón con una exactitud al menos 10 veces mayor que la del sensor.
- La representación de los valores de salida en función de los valores de entrada da la curva de calibración.

Curva de calibración



Exactitud. Error absoluto y relativo.

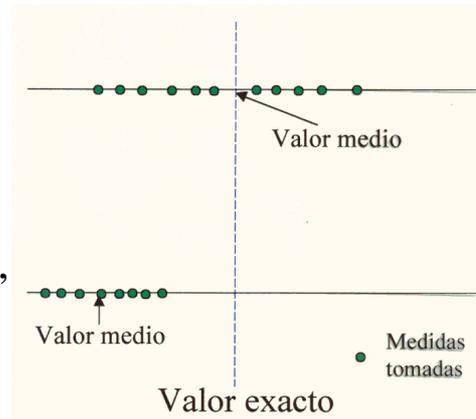
- La inexactitud de un instrumento de medida se pone de manifiesto cuando evaluamos el error de la variable medida.
- Se determina a través de la diferencia entre el valor “exacto” de la magnitud y el medido.
 - Valor exacto o verdadero: el obtenido por un método que los expertos consideran lo suficientemente preciso para el fin perseguido.
- Se da como error absoluto:
 - $e_a = | \text{Valor_medido} - \text{Valor_exacto} |$
- O como error relativo:
 - $e_r = | \text{Valor_medido} - \text{Valor_exacto} | / \text{Valor_exacto}$

Fidelidad, repetibilidad

- **Fidelidad:** capacidad de un instrumento de medida de dar la misma lectura al medir varias veces en unas mismas condiciones determinadas, prescindiendo de su concordancia o discrepancia con el valor real de dicha magnitud.
- Implica conformidad en lecturas sucesivas y un número alto de cifras significativas: condición necesaria pero no suficiente para la exactitud.
- Se da como el valor por debajo del cual se encuentra, con una probabilidad del 95%, el valor absoluto de la diferencia entre dos resultados individuales obtenidos en idénticas condiciones.
- **Repetibilidad:** igual concepto, pero cuando las mediciones se realizan en intervalos cortos de tiempo.

Características estáticas Exactitud y fidelidad

- Gran exactitud, baja fidelidad
- Mayor fidelidad, gran inexactitud



Sensibilidad

- Se define como:

$$S_x^y(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a}$$

- Puede expresarse también por unidad:

$$S_x^y(x_a) = \left. \frac{dy/y}{dx/x} \right|_{x=x_a} = \left. \frac{dy}{dx} \cdot \frac{x}{y} \right|_{x=x_a}$$

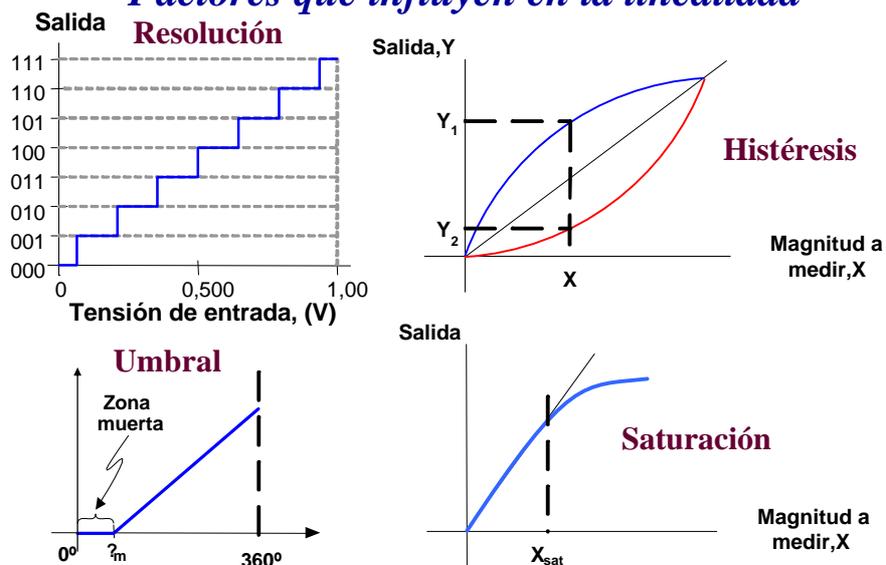
- No es constante en el campo de medida salvo para sistemas lineales.

Linealidad

- La linealidad representa hasta qué punto es constante la sensibilidad del transductor, sin embargo para que un transductor sea válido no es condición necesaria que tenga gran linealidad.
- Se ve influenciada por:
 - **Resolución:** incremento mínimo de la entrada que provoca un cambio en la salida.
 - **Umbral:** caso particular de la resolución para $x = 0$.
 - **Histéresis:** diferencia en la salida para un mismo valor de entrada.
 - Fenómenos de saturación.
- Se mide a través de la diferencia entre la respuesta del sensor y una recta de comparación.

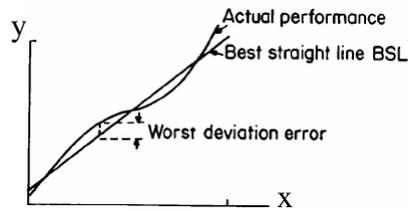
Características estáticas

Factores que influyen en la linealidad

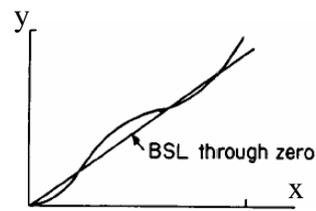


Características estáticas

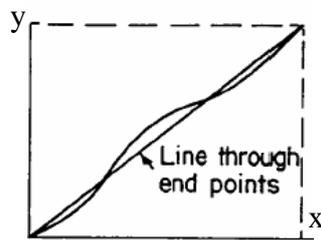
Rectas para definir la linealidad



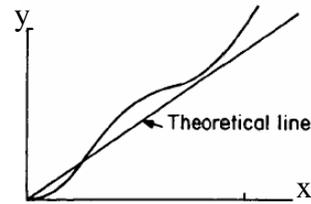
a) Mínimos cuadrados



b) Mínimos cuadrados ajustados a cero



c) A través de los extremos



d) Teórica

33

Importancia linealidad

- El interés de la linealidad está en que:
 - La respuesta resulta más intuitiva para un humano.
 - El procesamiento de la señal resulta más sencillo.
 - La teoría clásica de control trabaja sobre sistemas lineales.
 - Es complicado eliminar la no linealidad con circuitos analógicos.
- En la actualidad no es tan importante debido a la disponibilidad de microcontroladores baratos con gran capacidad de cálculo que permiten linealizar fácilmente la respuesta.

34

Errores

- Discrepancia entre el valor real de una magnitud y su medida.
- Tipos:
 - Errores Sistemáticos.
 - Errores Aleatorios.

Errores Sistemáticos

- Aquellos que en el curso de varias medidas hechas en las mismas condiciones, bien permanecen constantes en valor absoluto y signo, bien varían de acuerdo con una ley definida cuando cambian las condiciones de medida.
- Una vez determinados, pueden compensarse.

Errores Aleatorios

- Aquellos que quedan una vez eliminados los errores sistemáticos.
- Siguen una distribución normal de media cero:
 - Los errores aleatorios positivos y negativos de igual valor absoluto tienen la misma probabilidad de producirse.
 - Los errores aleatorios son tanto menos probables cuanto mayor sea su valor.
- No pueden eliminarse por completo, pero pueden reducirse haciendo la media de varias medidas.

Propagación de errores

Operación		Resultado
Suma	$(a \pm k_1 a) + (b \pm k_2 b)$	$(a + b) \pm \sqrt{(k_1 a)^2 + (k_2 b)^2}$
Diferencia	$(a \pm k_1 a) - (b \pm k_2 b)$	$(a - b) \pm \sqrt{(k_1 a)^2 + (k_2 b)^2}$
Producto*	$(a \pm k_1 a) \cdot (b \pm k_2 b)$	$ab \pm ab \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$
Cociente*	$\frac{a \pm k_1 a}{b \pm k_2 b}$	$\frac{a}{b} \pm \frac{a}{b} \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$

EN GENERAL $\Rightarrow Y = f(a \pm k_1 a, b \pm k_2 b) \Rightarrow \text{Error} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 (k_1 a)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 (k_2 b)^2}$

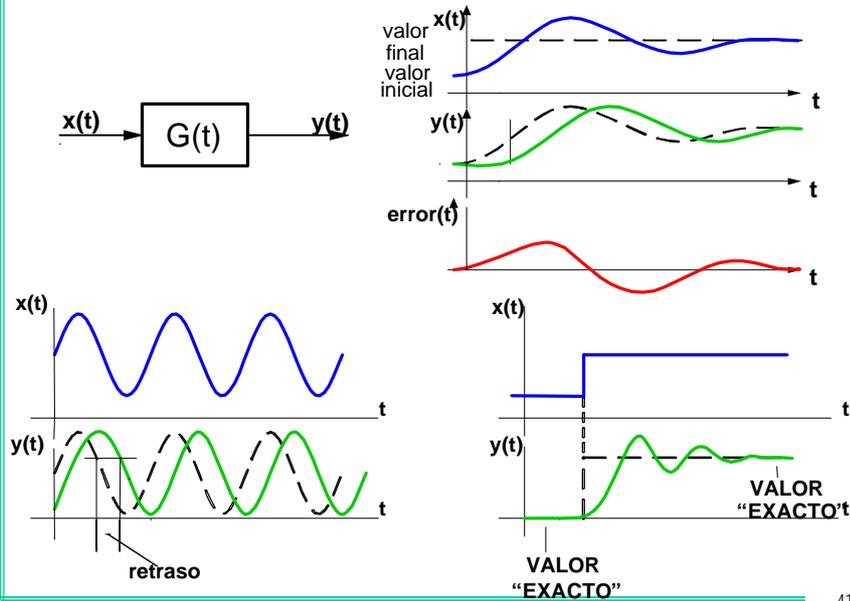
Características dinámicas *Comportamiento del sistema*

- Si la señal de entrada se modifica de repente de un valor a otro, la señal de salida no cambia de forma instantánea a su valor definitivo.
- Esto es debido a que un sistema físico tiene una dinámica que viene determinada por el almacenamiento de energía en uno o más de sus elementos.
- Dado que existe un número infinito de posible señales de entrada, la respuesta se ensaya con señales de entrada estándar: impulso, escalón, rampa y senoidal.

Características dinámicas *Comportamiento del sistema*

- La respuesta ante señales variables se describe a través de las **características dinámicas**:
 - **Error dinámico**: diferencia entre el valor indicado y el real, siendo nulo el error estático.
 - **Tiempo de subida**: tiempo necesario para que la salida pase del 10% al 90% de su valor final.
 - **Tiempo de establecimiento**: tiempo necesario para que la salida quede acotada dentro del 5% del valor final.
 - **Sobreoscilación**: valor máximo en que sobrepasa la salida su valor final.
 - **Velocidad de respuesta**: rapidez con la que responde a los cambios en la variable de entrada.

Características dinámicas



Respuesta a diferentes tipos de sistemas lineales

- **Orden cero** $a_0 y = x(t)$
- **Primer orden** $a_1 dy/dt + a_0 y = x(t)$
- **Segundo orden** $a_2 d^2 y/dt^2 + a_1 dy/dt + a_0 y = x(t)$

Funciones de transferencia

- **Orden cero** $Y(s)/X(s) = 1$
- **Primer orden** $Y(s)/X(s) = 1/(\tau s + 1)$
- **Segundo orden** $Y(s)/X(s) = 1/(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)$

SISTEMA DE PRIMER ORDEN

- Respuesta ante diferentes entradas

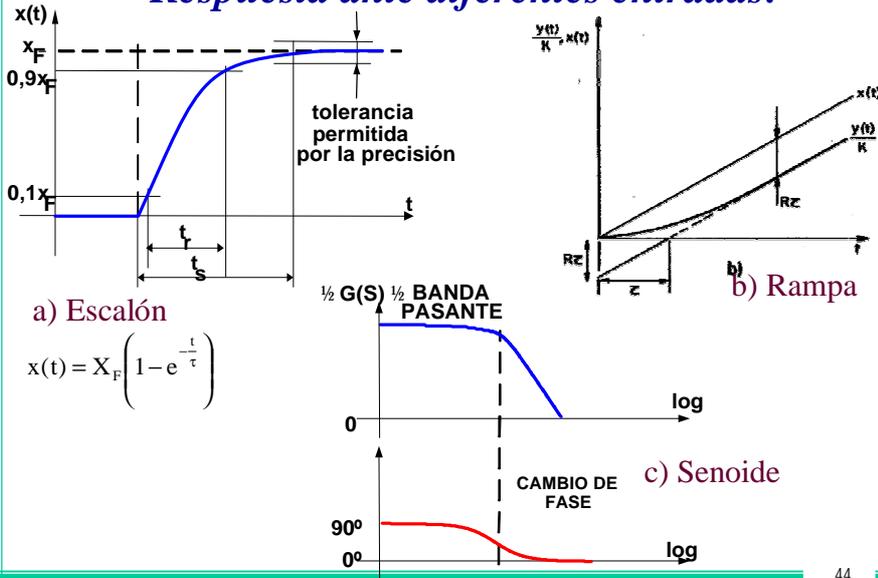
Entrada	Salida
Escalón, $u(t)$	$k (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$
Rampa, Rt	$Rkt - Rkt u(t) + Rkt e^{-\frac{t}{\tau}}$
Senoide, $A \cdot \sin(\omega t)$	$\frac{k A \tau \omega e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 + \tau^2 \omega^2} + \frac{k A}{\sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}} \text{sen}(\omega t + \varphi)$ $\varphi = \arctan(-\omega \tau)$

- Error dinámico y retardo

Entrada	Error dinámico	Retardo
Escalón, $u(t)$	0	τ
Rampa, Rt	$R[\tau + k(t - \tau)]$ ó Rt	τ
Senoide, $A \cdot \sin(\omega t)$	$1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \tau^2 \omega^2}}$	$\varphi = \frac{\arctan(-\omega \tau)}{\omega}$

Sistema de primer orden

Respuesta ante diferentes entradas:



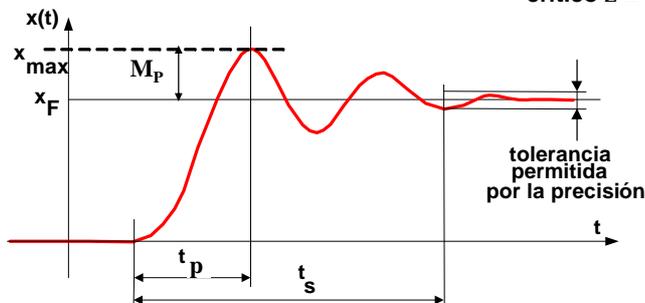
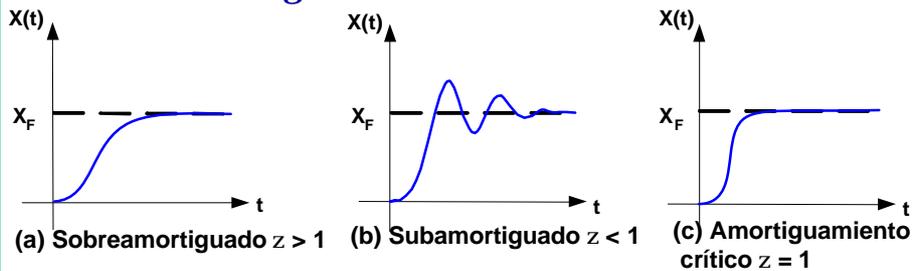
Sistema de segundo orden

Entrada	Salida	
Escalón, $u(t)$	$1 - \frac{e^{-st}}{\sqrt{1-z^2}} + \text{sen}(w_a t + a)$	$s = z w_n \quad w_a = w_n \sqrt{1-z^2}$ $a = \text{arc sen} \frac{w_a}{w_n}$
$0 < z < 1$	$1 - e^{-st}(1 + w_n t)$	
$z = 1$	$1 + \frac{w_n}{2\sqrt{z^2-1}} \left(\frac{e^{-at}}{a} - \frac{e^{-bt}}{b} \right)$	$a = w_n(z + \sqrt{z^2-1})$ $b = w_n(z - \sqrt{z^2-1})$
$z > 1$		
Rampa, Rt $z > 1$	$R \left\{ t - \frac{2z}{w_n} \left[1 + \frac{2z(-z - \sqrt{z^2-1}) + 1}{4z\sqrt{z^2-1}} e^{-at} + \frac{2z(z - \sqrt{z^2-1}) - 1}{4z\sqrt{z^2-1}} e^{-bt} \right] \right\}$	
$z = 1$	$R \left\{ t - \frac{2z}{w_n} \left[1 - \left(1 + \frac{w_n t}{2} \right) e^{-w_n t} \right] \right\}$	$q = \text{arctan} \frac{2z\sqrt{1-z^2}}{2z^2-1}$
$0 < z < 1$	$R \left\{ t - \frac{2z}{w_n} \left[1 - \frac{e^{-z w_n t}}{2z\sqrt{1-z^2}} \text{sen}(\sqrt{1-z^2} w_n t + q) \right] \right\}$	
Senoide, $A, ?$	$\frac{kA}{\sqrt{\left(1 - \frac{w}{w_n}\right)^2 + \left(2z \frac{w}{w_n}\right)^2}} \text{sen}(wt - q)$	$q = \text{arctan} \frac{2z \frac{w}{w_n}}{1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2}$

45

Características dinámicas

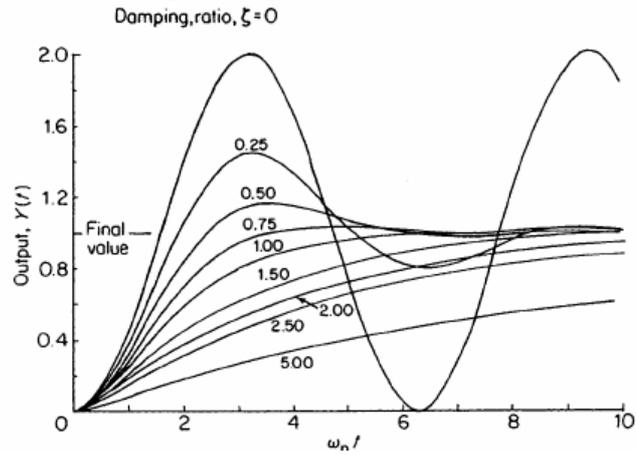
Sistema de segundo orden- entrada en escalón



46

Características dinámicas

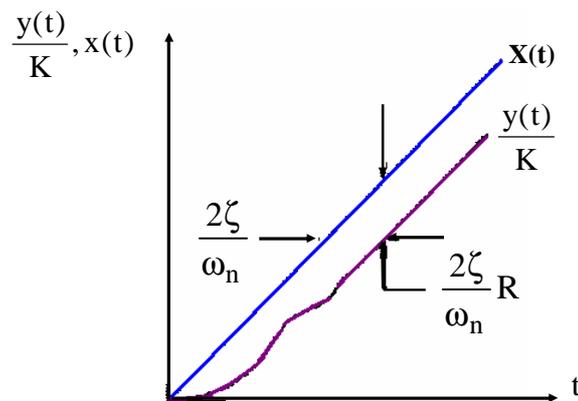
Sistema de segundo orden, entrada en escalón



Representación gráfica de la salida normalizada de una entrada en escalón, para diferentes valores del coeficiente de amortiguamiento

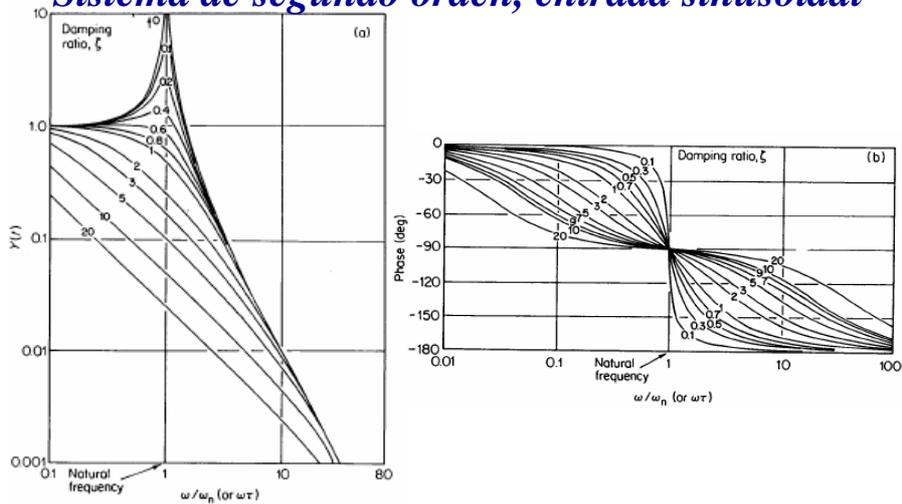
Características dinámicas

Sistema de segundo orden, entrada rampa



Características dinámicas

Sistema de segundo orden, entrada sinusoidal



Gráfica de la salida normalizada de una entrada sinusoidal, para diferentes valores del coeficiente de amortiguamiento

49

Error de carga

- Medir produce un error de carga.
- La energía extraída durante el proceso de medida altera el estado del sistema medido.
- Ni las características estáticas ni las dinámicas dan cuenta de este error.
- Para cuantificarlo se emplea el concepto de Impedancia de Entrada.

50

Variables de Flujo y de Esfuerzo

- En el modelado dinámico de sistemas se distinguen dos tipos de variables generalizadas:
 - De Flujo.
 - De Esfuerzo.
- En magnitudes mecánicas:
 - Variable de esfuerzo: se mide en un punto o región del espacio (escalar). Ej.: fuerza.
 - Variable de flujo: se mide entre dos puntos o regiones del espacio (vector). Ej.: velocidad.
- En magnitudes no mecánicas:
 - Variable de esfuerzo: se mide entre dos puntos o regiones del espacio (vector). Ej.: tensión eléctrica.
 - Variable de flujo: se mide en un punto o región del espacio (escalar). Ej.: corriente.

Impedancia de Entrada

- La medida implica la asociación entre una variable de esfuerzo, x_e , y otra de flujo, x_f , de forma que su producto tiene dimensiones de potencia.
- Ejemplos: tensión y corriente, diferencia de presión y flujo volumétrico, fuerza y velocidad.
- La Impedancia de Entrada es el cociente entre las transformadas de Laplace de las variables de esfuerzo y de flujo asociadas: $Z_e = X_e / X_f$
- La Admitancia de Entrada es su recíproco: $Y_e = X_f / X_e$

Selección Impedancia de Entrada

- Objetivo: minimizar error de carga.
- Implica minimizar energía extraída: $X_e \cdot X_f \rightarrow 0$
- Si se desea medir:
 - Una variable de esfuerzo: $Z_e = \frac{X_e}{X_f \rightarrow 0} \rightarrow \infty$
 - Una variable de flujo: $Z_e = \frac{X_e \rightarrow 0}{X_f} \rightarrow 0$
- Ejemplo: medir una tensión sin error de carga implica sensor con alta impedancia de entrada.