

♦ **CONTROL**



**Tema III:  
Instrumentación  
de Medida**

Profesor: Luis Parrilla Roure

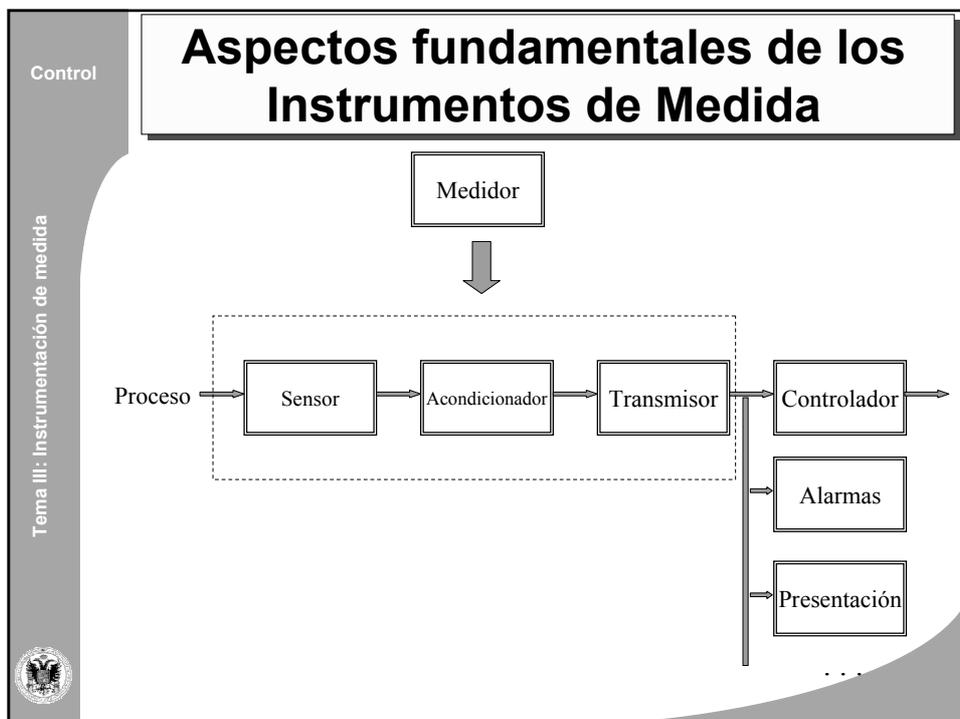
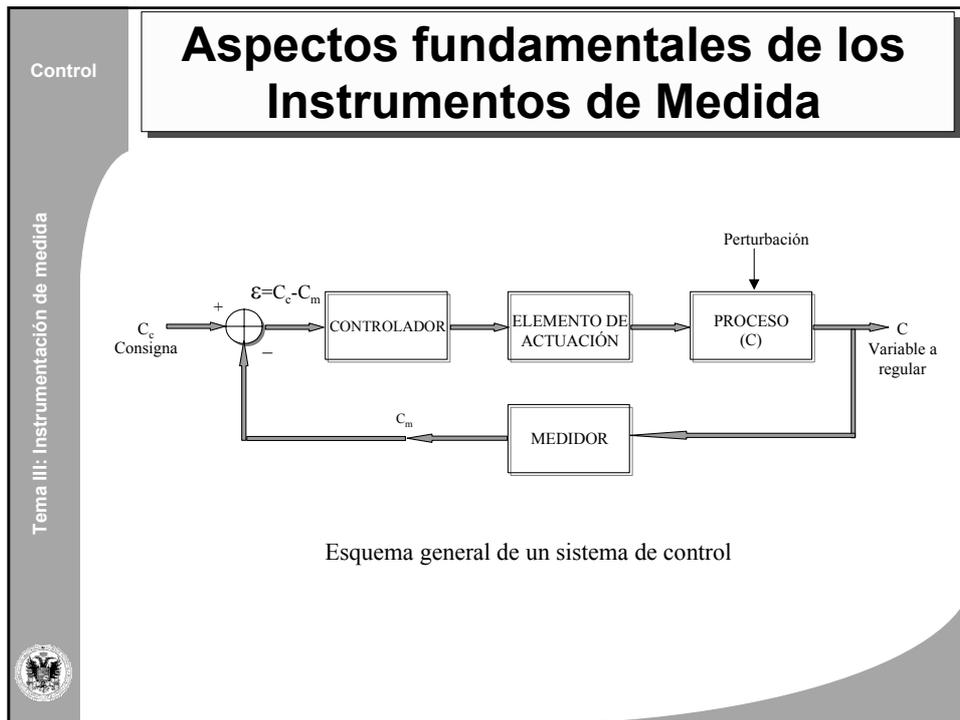
Control

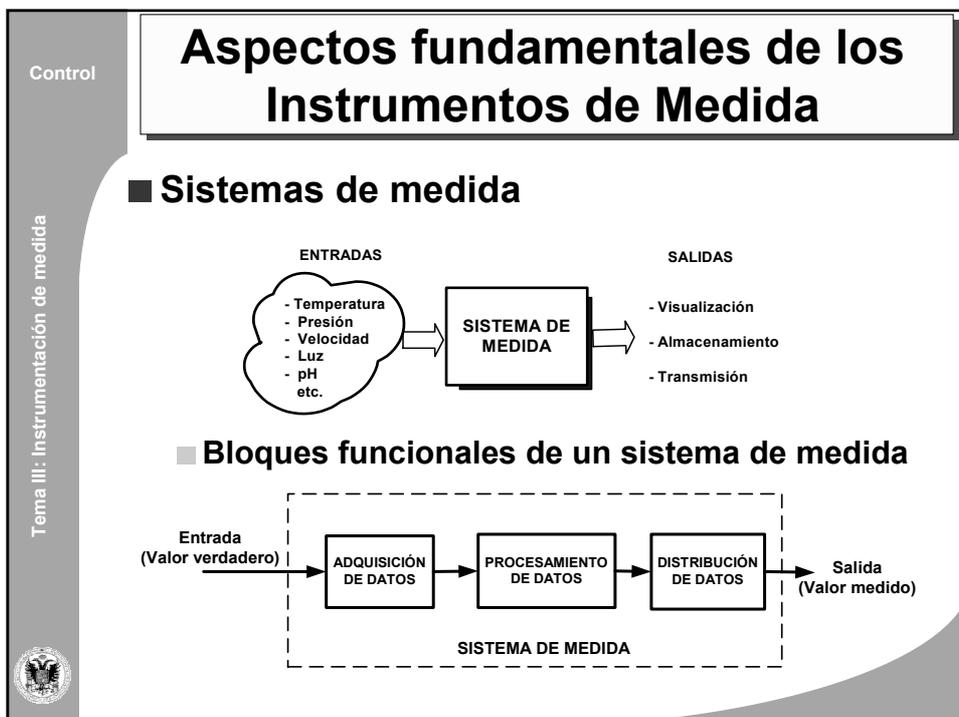
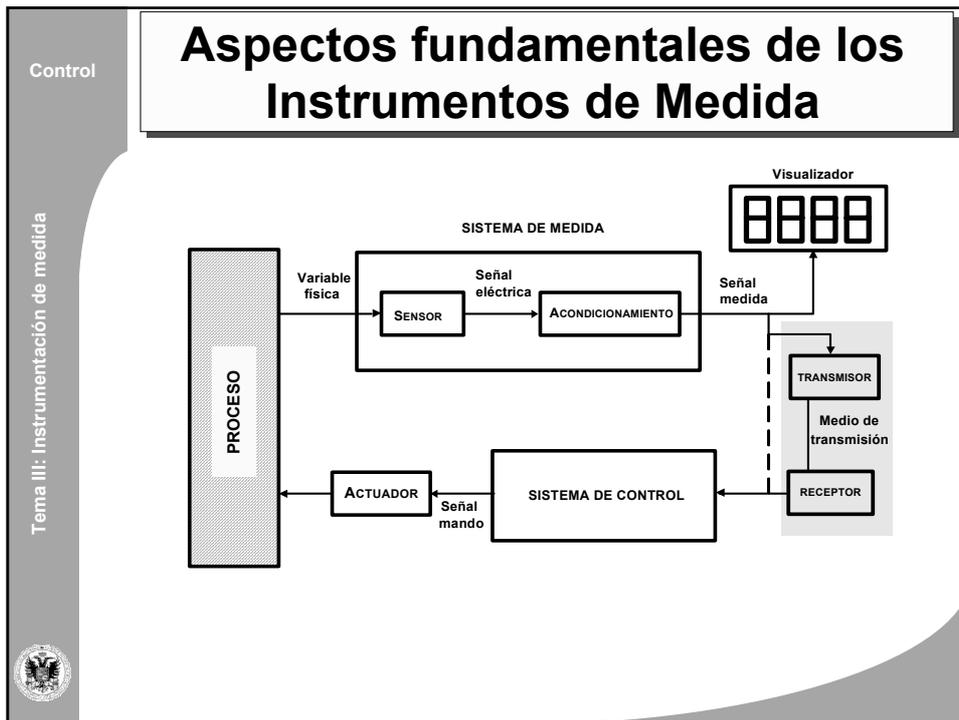
**Tema III: Instrumentación de Medida**

- Aspectos fundamentales de los Instrumentos de Medida
- Nomenclatura y terminología
- Principios de transducción
- Características estáticas, dinámicas y de entrada
- Criterios de selección
- Tipos de transductores
- Acondicionadores y tipos normalizados de salida
- Transmisores de señales
- Buses de campo normalizados

Tema III: Instrumentación de medida







Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Aspectos fundamentales de los Instrumentos de Medida

- Elementos de un sistema de medida

- Sistemas de medida multicanal
  - Con un solo ADC

Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Aspectos fundamentales de los Instrumentos de Medida

- Con un ADC por canal

- Ejemplo: Sistema de instrumentación industrial

Control

## Nomenclatura y Terminología

Tema III: Instrumentación de medida

- **Transductor:** *Dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de una forma física distinta*
  - Se convierte un tipo de energía en otro ⇒
  - Extraer energía del sistema a medir
  - Normalmente la salida es una señal eléctrica
- **Tipos de señales**
  - Mecánicas
  - Térmicas
  - Magnéticas
  - Eléctricas
  - Ópticas
  - Moleculares (Químicas)



Control

## Nomenclatura y Terminología

Tema III: Instrumentación de medida

- **Sensor:** *Dispositivo que a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida*
  - Es una definición más amplia que la de transductor; no implica un cambio de tipo de señal física.
  - **Ejemplo: Medida de diferencia de presiones**
    - **Diafragma** cuya deformación se mide mediante una galga extensométrica
      - Diafragma: Sensor primario
      - Galga extensométrica: Transductor a señal eléctrica



Control

## Nomenclatura y Terminología

Tema III: Instrumentación de medida

- **Ventajas sistemas de medida electrónicos**
  - Estructura electrónica de la materia  $\Rightarrow$  variaciones parámetros no eléctricos acompañados por variaciones parámetros eléctricos
  - Baja extracción de energía  $\Rightarrow$  amplificar la salida
  - Gran cantidad de recursos para realizar el acondicionamiento
  - Facilidad para el registro y presentación de datos
  - Versatilidad para la transmisión de señales



Control

## Nomenclatura y Terminología

Tema III: Instrumentación de medida

- **Acondicionador: *Elemento que, a partir de la señal de salida de un transductor electrónico, ofrece una señal apta para:***
  - Representación
  - Registro
  - Procesamiento mediante un instrumento estándar
- **Operaciones básicas de acondicionamiento:**
  - Amplificación
  - Filtrado
  - Adaptación de impedancias
  - Modulación/Demodulación
  - Conversión A/D



Control

## Nomenclatura y Terminología

Tema III: Instrumentación de medida

- **Interfaz:** Conjunto de elementos que modifican las señales, cambiando incluso el dominio de datos, pero sin cambiar la naturaleza de la señal
- **Dominio de datos:** Nombre de la magnitud mediante la que se representa o transmite la información

Analógico

Dominios Físico y Químico

Presentación en una escala

Presentación analógica

Presentación digital

Paralelo

Serie

Cuentas

Fase

Ancho de pulso

Frecuencia

Carga

Tensión

Corriente

Digital

Dominios no Eléctricos

Dominios Eléctricos

Tiempo

Control

## Principios de Transducción

Tema III: Instrumentación de medida

- **Principios básicos de transducción**
  - Resistencia eléctrica
  - Capacidad
  - Inducción y circuitos magnéticos
  - Generación de energía eléctrica
  - Transducción digitales
  - Características uniones p-n
  - ...

Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Características estáticas**
  - **Campo de medida:** conjunto de valores comprendidos entre los límites superior e inferior entre los que puede efectuarse la medida
  - **Alcance, fondo de escala:** diferencia entre los límites superior e inferior de medida
  - **Salida a fondo de escala:** diferencia entre las salidas para los extremos del campo de medida
  - **Curva de calibración:** relación entre la entrada y salida del sensor o sistema en régimen estático.

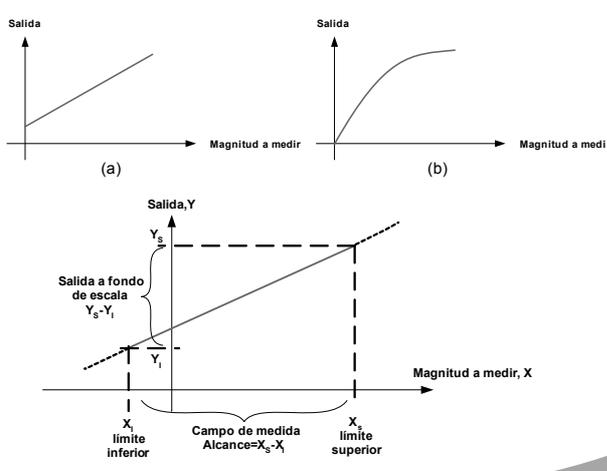


Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Ejemplos de curvas de calibración**



Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Sensibilidad: Relación entre una variación producida a la salida y la correspondiente variación en la entrada (pendiente de la curva de calibración)**

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\Delta \text{magnitud de salida}}{\Delta \text{magnitud de entrada}}$$

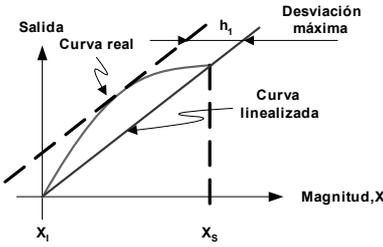
- **No linealidad: Máxima diferencia entre la respuesta real y la característica puramente lineal, referida al fondo de escala**
  - Linealidad independiente: Mínimos cuadrados
  - Linealidad ajustada al cero: Mínimos cuadrados pasando por cero
  - Linealidad terminal: salida sin entrada/salida teórica máxima
  - Linealidad a través de los extremos: salida real entrada mínima/ salida real entrada máxima
  - Linealidad teórica: Recta definida por las previsiones teóricas



Control

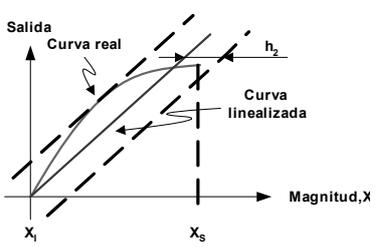
Tema III: Instrumentación de medida

## Características estáticas, dinámicas y de entrada



(a)

$$\frac{h_1}{X_s} 100\%$$



(b)

$$\frac{h_2}{X_s} 100\%$$



Control

Tema III: Instrumentación de medida

### Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Ruido:** *Desviación respecto al valor teórico debido a fuentes de ruido*
- **Zona muerta:** *campo de valores de la variable que no hace variar la indicación*

(a)

(b)

Control

Tema III: Instrumentación de medida

### Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Histéresis:** *Diferencia en la medida dependiendo del sentido en que se ha alcanzado. Se suele expresar referida al fondo de escala*
- **Deriva:** *Variación de algún aspecto de la curva de calibración con respecto a algún parámetro ambiental (temperatura, humedad, etc) o con el tiempo. Normalmente se expresa en % del fondo de escala*

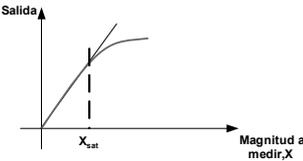
(a)

Control

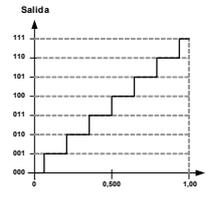
Tema III: Instrumentación de medida

## Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Saturación:** *Nivel de entrada a partir del cual la sensibilidad disminuye de forma significativa*



- **Resolución:** *Incremento mínimo de la variable de entrada que ofrece un cambio medible a la salida*



Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Errores**
  - **Error absoluto:** *Diferencia entre el valor medido y el valor exacto en valor absoluto*
$$|\text{Valor medido} - \text{Valor exacto}|$$
  - **Error relativo:** *Error absoluto dividido entre el valor exacto*
$$\frac{|\text{Valor medido} - \text{Valor exacto}|}{\text{Valor exacto}}$$

Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Veracidad:** *Grado de concordancia entre el valor medio obtenido de una gran serie de resultados y el valor verdadero o el aceptado como referencia*
- **Precisión:** *Grado de concordancia entre los resultados. Se cuantifica a través de:*
  - **Repetibilidad:** *Máxima desviación entre valores de salida obtenidos al medir varias veces un mismo valor de entrada con un mismo equipo*
  - **Reproducibilidad:** *Máxima desviación entre valores de salida obtenidos al medir varias veces un mismo valor de entrada con un mismo método pero con equipos distintos, a largo plazo*
- **Exactitud:** *Correspondencia de los resultados entre sí, y además, el valor verdadero (se refiere conjuntamente a la veracidad y a la precisión)*

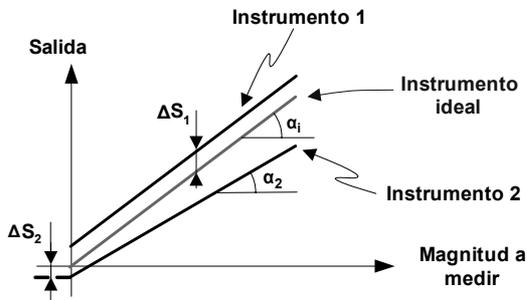


Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Calibración:** *Establecer, con la mayor exactitud posible, la correspondencia entre las indicaciones de un instrumento de medida y los valores de la magnitud que se mide con él.*



Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Calibración a un punto:** *actuar sobre el sistema de forma que para un punto concreto la salida sea lo más exacta posible*
- **Calibración del cero y de la sensibilidad:** *se ajusta un punto y la pendiente o sensibilidad. Permite ajustar perfectamente una curva de calibración lineal.*

(a) (b) (c)

Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Características estáticas, dinámicas y de entrada

- **Características dinámicas y de entrada**
  - **Velocidad de respuesta:**
    - **Tiempo de retardo:** Tiempo desde la aplicación de un escalón hasta que la salida alcanza un 10% del valor final
    - **Tiempo de subida:** del 10% al 90%
    - **Tiempo de establecimiento:** al 95% o 99%
  - **Sobredisparo (sistemas de segundo orden)**
  - **Respuesta en frecuencia**
    - **Diagrama de bode**
    - **Distorsión armónica**
  - **Impedancia de entrada**

Control

## Criterios de Selección

Tema III: Instrumentación de medida

- **Magnitud a medir**
  - Margen de medida
  - Exactitud deseada
  - Estabilidad
  - Ancho de banda
  - Tiempo de respuesta
  - Límites absolutos posibles de la magnitud a medir
  - Magnitudes interferentes
- **Características de salida:**
  - Sensibilidad
  - Tipo: tensión corriente, frecuencia
  - Forma señal: unipolar, flotante, diferencial
  - Impedancia
  - Destino: presentación analógica, conversión digital, telemedida ...



Control

## Criterios de Selección

Tema III: Instrumentación de medida

- **Características de alimentación:**
  - Tensión
  - Corriente
  - Potencia disponible
  - Frecuencia (si alterna)
  - Estabilidad
- **Características ambientales:**
  - Margen de temperaturas
  - Humedad
  - Vibraciones
  - Agentes químicos
  - Entorno electromagnético
  - ¿Atmósfera explosiva ?



Control

## Criterios de Selección

Tema III: Instrumentación de medida

- **Otros factores:**
  - Peso
  - Dimensiones
  - Vida media
  - Coste de adquisición
  - Disponibilidad
  - Tiempo de instalación
  - Longitud de cable necesaria
  - Tipo de conector
  - Situación en caso de fallo
  - Coste de verificación
  - Coste de mantenimiento
  - Coste de sustitución



Control

## Tipos de Transductores

Tema III: Instrumentación de medida

- **Según el principio de transducción:**
  - Resistivos
  - Capacitivos
  - Inductivos y electromagnéticos
  - Generadores
  - Uniones p-n
  - Digitales
  - Ultrasonidos
- **Según necesidades de alimentación:**
  - Pasivos o moduladores
  - Activos, directos o generadores
- **Según el tipo de señal de salida**
  - Analógicos
  - Digitales
  - Todo-nada



Control

Tema III: Instrumentación de medida

## Acondicionadores y Tipos Normalizados de salida

- **Sensores analógicos:** Tensión 0-10V; corriente 4-20 mA
  - Amplificación
  - Filtrado
  - Conversión V/I
  - Conversión A/D
  - ...
- **Digitales:**
  - Series de pulsos
  - Codificación en binario, BCD, etc
  - Procesos de filtrado digital, codificación, etc

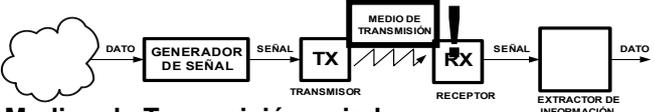


Control

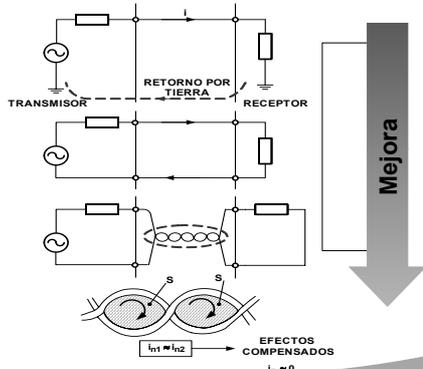
Tema III: Instrumentación de medida

## Transmisores de señales

- **Transmisión de señales**



- **Medios de Transmisión guiados**
  - **Cables de cobre**




Control

## Transmisores de señales

Tema III: Instrumentación de medida

■ Par trenzado

Recubrimiento exterior, Malla, Aislantes, Conductores

STP

Lámina conductora, Hilo

FTP

Tipo	Número de pares	Aplicaciones
UTP	1 ó 2	Telefonía
	4	Cable estructurado
	10, 20, 25, 50 100, 300	Troncales de telefonía Datos baja velocidad Datos velocidad media Instrumentación
STP	1, 2, 4, 25	Instrumentación
FTP	4	Cable estructurado
	25	Telefonía Datos Instrumentación

Control

## Transmisores de señales

Tema III: Instrumentación de medida

■ Coaxial

Recubrimiento exterior, Malla (conductor exterior), Conductor interno, Aislante

$$A_t = k \frac{\sqrt{f}}{\log(D/d)} (1/D + 1/d)$$

■ Fibra óptica

Cubierta interior, Recubrimiento, Fibra óptica, Cubierta exterior

LED o LD, CONECTOR, FIBRA ÓPTICA, FOTODIODO

INFORMACIÓN → A/D → COD → SEÑAL ELÉCTRICA → DRIVER → FIBRA ÓPTICA → ENLACE → FOTODIODO → SEÑAL ELÉCTRICA → DEC → DIA → INFORMACIÓN RECUPERADA

Control

## Transmisores de señales

Tema III: Instrumentación de medida

### Medios de transmisión no guiados

VLW: Very Large Wave (ondas super largas).  
 AM: Ondas de Amplitud Modulada.  
 FM: Ondas de Frecuencia Modulada.  
 TV: Ondas de Televisión.

### Codificación de la información

**Sencillez** **Seguridad**

Control

## Transmisores de señales

Tema III: Instrumentación de medida

### Resumen medios de transmisión

Tipo de medio	Medio de transmisión	Alcance del enlace	Interferencias	Método de transmisión
Guiado	Cable de cobre	Corto	Bajas-medias	Banda base
		Medio	Altas	Modulación
	Fibra óptica	Cualquiera	Bajas	Banda base
			Medias-altas	Modulación
No guiado	Ondas de radio	Cualquiera	Cualesquiera	Modulación
	Luz	Cualquiera	Cualesquiera	Modulación

Control

## Transmisores de señales

Tema III: Instrumentación de medida

### ■ Telemedida

Control

## Transmisores de señales

Tema III: Instrumentación de medida

### ■ Bucles de tensión

$$v_2 = \frac{R_e}{R_e + R_C + R_G + R_O} v_1 < v_1$$

$$\varepsilon = \frac{R_C + R_G + R_O}{R_e + R_C + R_G + R_O}$$

Control

## Transmisores de señales

■ Relación señal-ruido en bucles de tensión

$$S/N = 20 \log \frac{V_1}{v_n + (R_o + 2\rho l/S)i_n}$$

Tema III: Instrumentación de medida

Control

## Transmisores de señales

■ Bucles de corriente

$$v_2 = \frac{R_o R_e}{R_o + R_c + R_e} i_1$$

Con fuente de corriente ideal

$$v_2 = R_e i_1$$

Tema III: Instrumentación de medida

Control

## Transmisores de señales

■ Valores usuales en bucles de corriente

Bucle de corriente	$R_e$	Niveles de tensión
0÷20 mA	250 $\Omega$	0÷5 V
	500 $\Omega$	0÷10 V
4÷20 mA	250 $\Omega$	1÷5 V
	500 $\Omega$	1÷10 V

Tema III: Instrumentación de medida

Control

## Transmisores de señales

■ Relación señal-ruido en bucles de corriente

$$S/N = 20 \log \frac{R_o i_1}{(R_o + R_c) i_n + v_n}$$

Con fuente de corriente ideal

$$S/N = 20 \log \frac{i_1}{i_n}$$

Tema III: Instrumentación de medida

Control

## Transmisores de señales

■ Alimentación en bucles de corriente

Tema III: Instrumentación de medida

Control

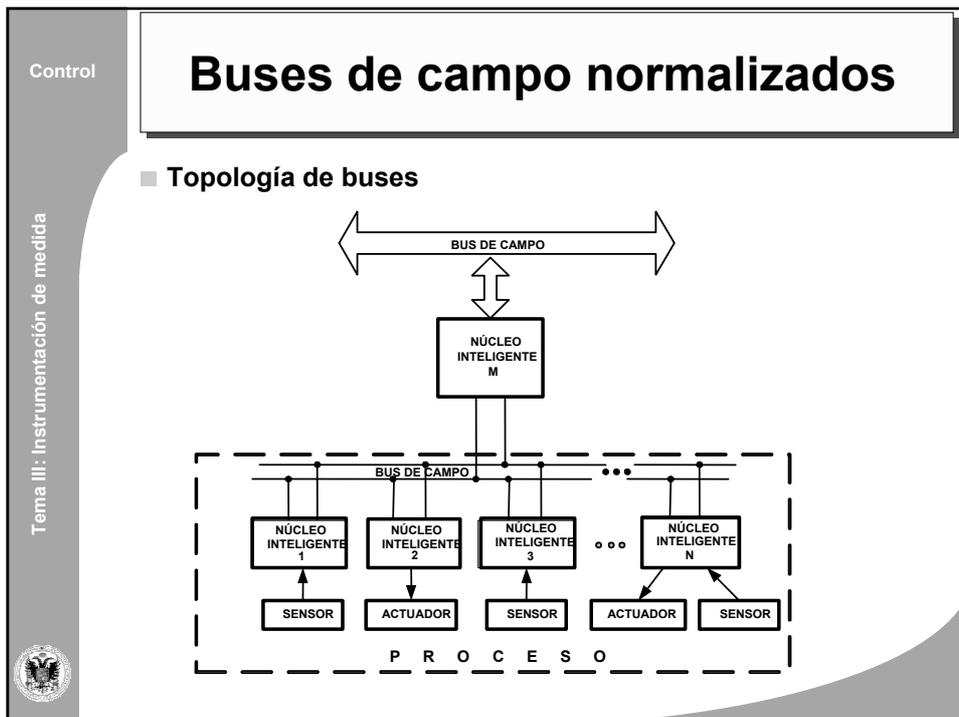
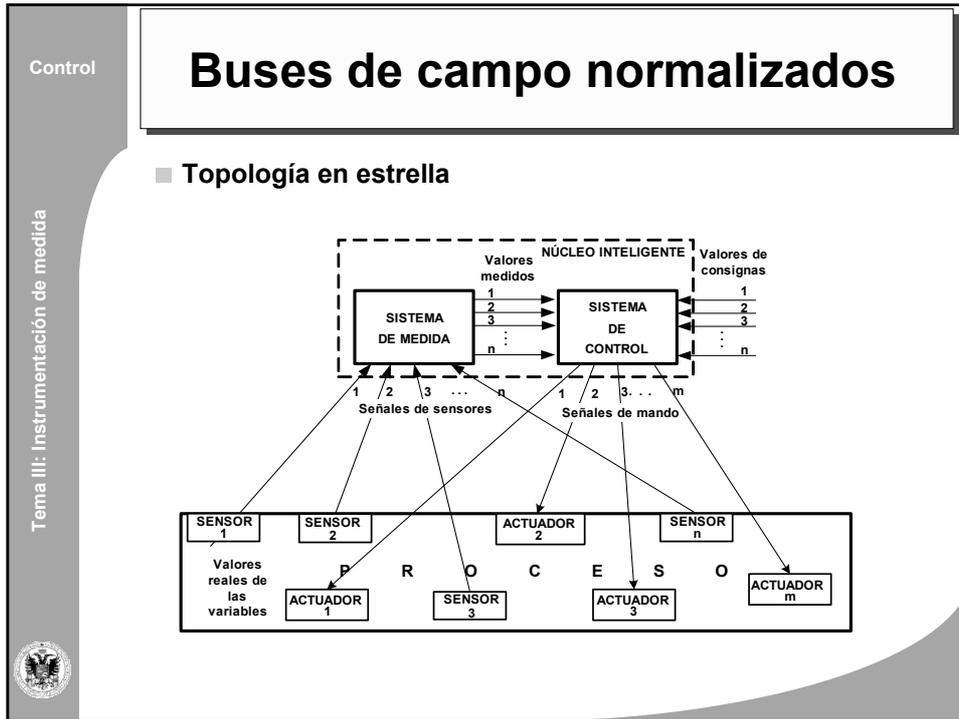
## Buses de campo normalizados

■ Redes de control

■ Características

Parámetro	Redes de datos	Redes de control
Ámbito	gestión	proceso
Tamaño	LAN - WAN	LAN
Volumen de datos	grande	pequeño
Procesos críticos	No	Sí
Velocidad	No en tiempo real	Alta (tiempo real)
Crítica	No	Sí
Prioridades	No	Sí
Estandarización	Alta	Baja
Seguridad	Media	Alta
Administración	Sí	Sí / frecuentes reconfiguraciones

Tema III: Instrumentación de medida



Control

## Buses de campo normalizados

Tema III: Instrumentación de medida

### ■ Buses de campo normalizados

	Foundation™ Fieldbus				WorldFIP <sup>4</sup>	Profibus <sup>4</sup> PA
	H1 <sup>1</sup>	H2 <sup>1</sup>	H2 <sup>1</sup>	H2 <sup>1</sup>		
Rata de transmisión [bits/s]	31.25 kB	1.0 MB	1.0 MB	2.5 MB	31.25 kB 1.0 MB 2.5 MB	31.25 kB
Comunicación	Single/ Multi-Master	Single/ Multi-Master	Single/ Multi-Master	Single/ Multi-Master	Producer/ Consumer	Master/Master Mast er/Slave con Token Peer to Peer
Acceso a la red	Token Passing	Token Passing	Token Passing	Token Passing	Bus Arbiter	Token Passing
Medio de transmisión						
Cantidad de Nodos máx. <sup>9</sup>	240 por Segmento, ó 32.768 por Sistema	256 por Red	14400 por Segmento			
Seguridad intrínseca?	Si	---	Si	---	Si	Si
Alimentación por Bus?	Si	---	Si	---	Si	Si
ASIC disponible? <sup>6</sup>	Si	planificado	planificado	planificado	Si	Si
Medio de transmisión Normativa	IEC 1158-2	IEC 1158-2	IEC 1158-2	IEC 1158-2	IEC/ISA/FF IEC 1185-2	IEC/ISA/FF IEC 1185-2
Normativa (s) aplicable (s)	ISA 850	ISA 850	ISA 850	ISA 850	EN 50170 (Parte 3)	EN 50170-A2 DIN 19245



Control

## Buses de campo normalizados

Tema III: Instrumentación de medida

### ■ Otros protocolos de comunicación

	Bus de Sensor	Protocolos de Comunicación		
	AS-Interface	Modbus	Ethernet <sup>®</sup>	Hart <sup>®</sup>
Rata de transmisión [bits/s]	167 kB	no determinado (1,2 kB-115,2 kB típico)	10MB	1200 Baud
Comunicación	Master/Slave	Master/Slave	Master/Slave Peer to Peer	Master/Slave
Acceso a la red	Polling ciclico	Token Passing	CSMA/CD*5	Ninguno
Medio de transmisión				
Cantidad de Nodos máx. <sup>9</sup>	31 por Red	247 por Red	400 por segmento	15 por segmento
Seguridad intrínseca?	---	---	---	Si
Alimentación por Bus?	Si	---	---	Si
ASIC disponible? *6	Si	---	Si	Si
Medio de transmisión Normativa	no especificado	no especificado	no especificado	no especificado
Normativa (s) aplicable (s)	IEC947-5-2/D EN 60 947 DIN VDE D660/208	no especificado	IEE802.3 ISO 8802.3	no especificado



Control

## Buses de campo normalizados

■ Leyenda

	Cable par trenzado		Cable de fibra óptica
	Radio transmisión		Cable de fibra óptica (aún no implementado)
	Cable Coaxial		

\*1 **H1** y **H2** son terminologías del **FOUNDATION Fieldbus** que no se usan en el IEC  
\*2 **Profibus - DP** también disponible con set de instrucciones extendidas (**Profibus-DPV1**).  
\*3 **DEVICENET** y **SDS** son utilidades en el nivel usuario (ISO), necesarias para **CAN** en el nivel físico.  
\*4 **Profibus** (excepto PA), **WorldFIP** y **P-NET** están definidos en la Norma **EN 50170**.  
\*5 **CSMA/CD**: Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection,  
(NDA-Destructive Bitwise Arbitration)  
\*6 **ASIC**: Application Specific Integrated Circuit  
\*7 **CTDMA**: Concurrent Time Domain, Multiple Access.

Tema III: Instrumentación de medida

