

Instrumentación Electrónica

Introducción a los Sistemas de Instrumentación



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Índice



- ❑ Lección 0. Objetivos del tema.
- ❑ Lección 1. Sistemas de Instrumentación.
 - Diagramas de bloques.
 - Tipos de sensores y actuadores.
 - Telemedida y buses de instrumentación.
 - Características básicas de un instrumento.
- ❑ Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento.
 - Definiciones y fundamentos.
 - Errores sistemáticos.
 - Errores aleatorios.
 - Reducción de errores mediante Instrumentos Inteligentes.
 - Evaluación y expresión de la incertidumbre.
- ❑ Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida.
 - Régimen de funcionamiento.
 - Parámetros en régimen estático.
 - Parámetros en régimen dinámico.



- ❑ Lección 4. Calibración de Instrumentos.
 - Definiciones y conceptos generales.
 - Tipos de estándar de unidad.
 - Tipos y métodos de calibración.
 - Especificaciones de un instrumento.
- ❑ Lección 5. Seguridad Eléctrica y Compatibilidad Electromagnética.
 - Seguridad Eléctrica.
 - Compatibilidad Electromagnética.
 - Marcado CE.
- ❑ Ejemplo de modelado de un sistema de medida: Sistema para la medida de distancias por IR.
 - Planteamiento del problema.
 - Identificación de fuentes de incertidumbre en la medida.
- ❑ Referencias y bibliografía.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 0. Objetivos del tema



- ❑ Conocer los diferentes elementos que forman un Sistema de Instrumentación.
- ❑ Analizar los conceptos de error e incertidumbre: tipos y análisis.
- ❑ Definir las características de un instrumento y la repercusión de estas sobre su funcionamiento.
- ❑ Conocer los conceptos básicos asociados a la calibración de un instrumento.
- ❑ Conocer los conceptos básicos relacionados con las normativas de seguridad eléctrica, compatibilidad electromagnética y marcado CE.
- ❑ Relacionar conceptos desarrollados en el tema mediante un ejemplo de sistema de medida.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Índice



- ❑ Lección 0. Objetivos del tema.
- ❑ **Lección 1. Sistemas de Instrumentación.**
 - Diagramas de bloques.
 - Tipos de sensores y actuadores.
 - Telemedida y buses de instrumentación.
 - Características básicas de un instrumento.
- ❑ Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento.
- ❑ Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida.
- ❑ Lección 4. Calibración de Instrumentos.
- ❑ Lección 5. Seguridad Eléctrica y Compatibilidad Electromagnética.
- ❑ Ejemplo de modelado de un sistema de medida: Sistema para la medida de distancias por IR.
- ❑ Referencias y bibliografía.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



- Diagramas de bloques
 - Instrumento básico.

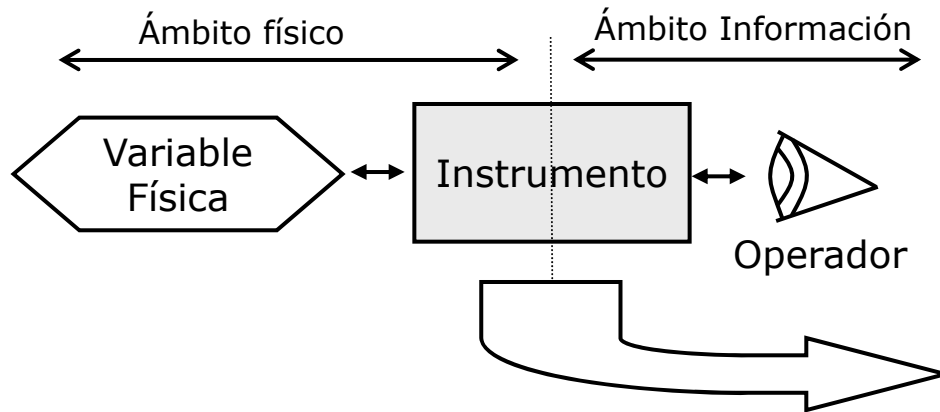
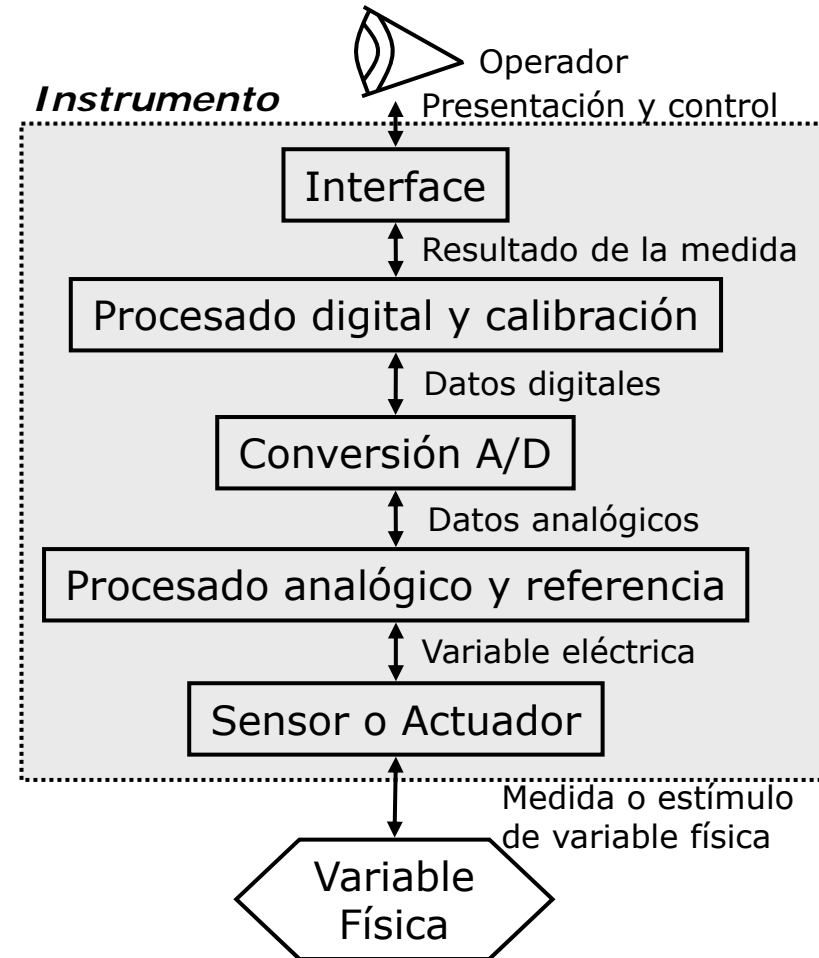


Diagrama de instrumento básico



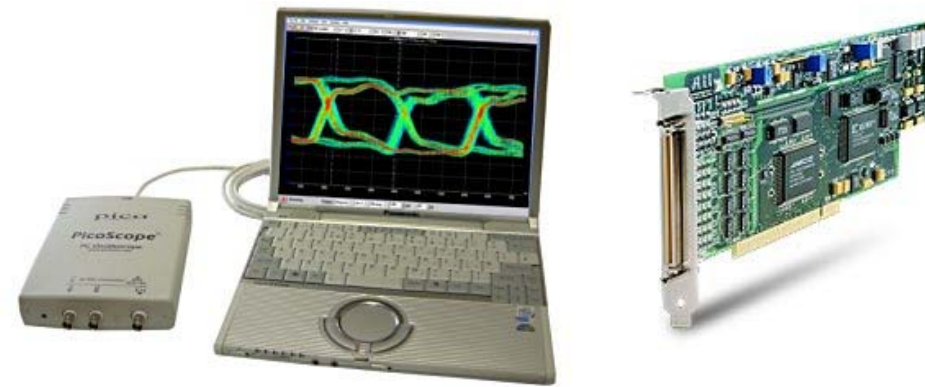
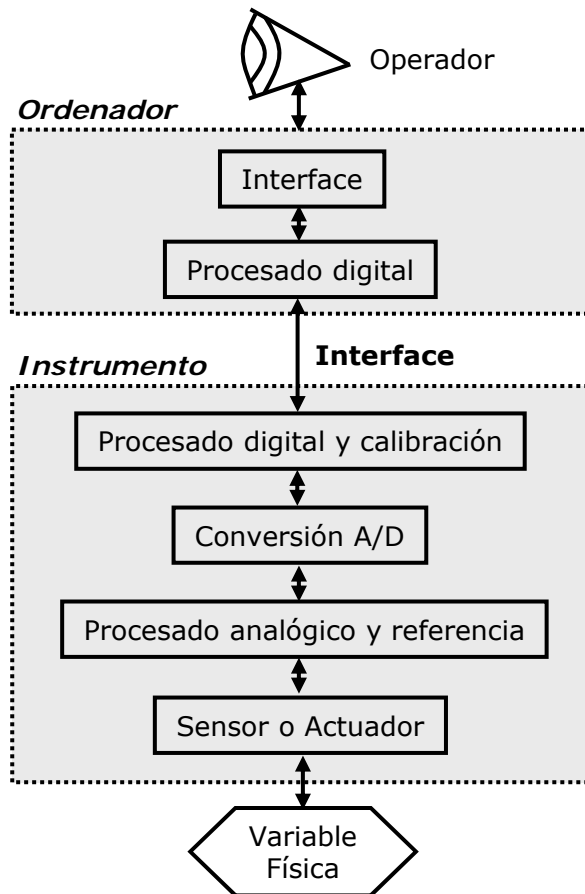


Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



- Diagramas de bloques.
 - Instrumento controlado por computador.



Posibilidades de Interface instrumento-ordenador:

- Directo a bus interno: ISA, PCI...
- Periférico general: RS232, LAN, USB...
- Buses de instrumentación: GPIB, VXI...
- Buses industriales: Profibus, CAN...

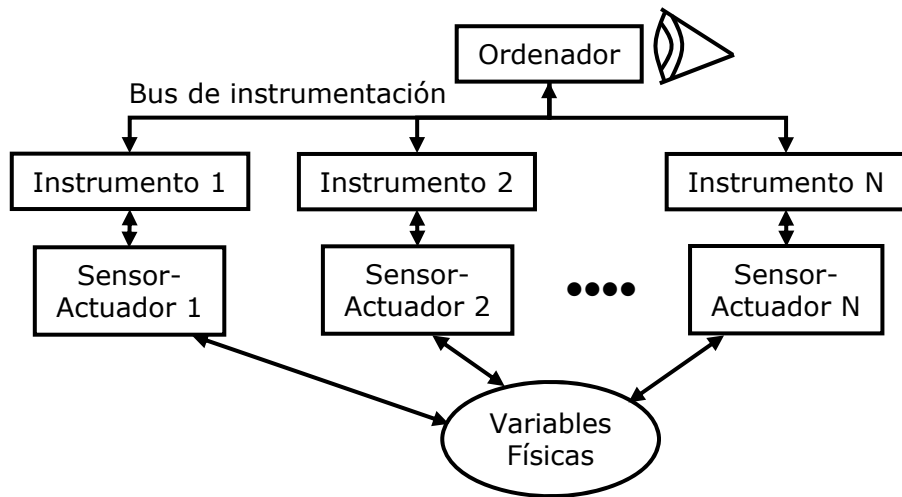


Introducción a los Sistemas de Instrumentación

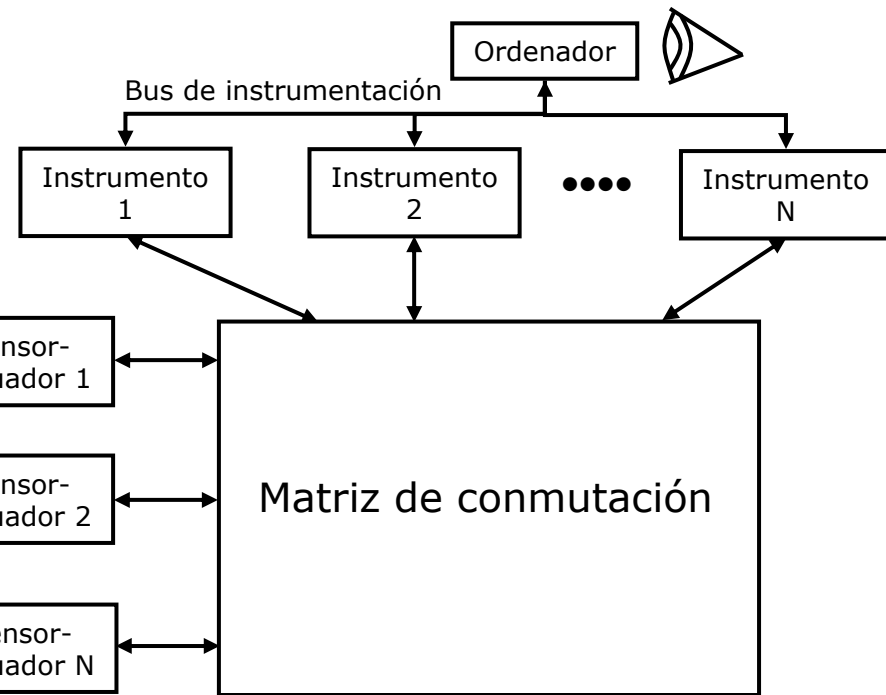
Lección 1. Sistemas de Instrumentación



- Diagramas de bloques.
 - Sistemas de instrumentación.



Matriz de conmutación:
Encamina las diferentes señales a los diferentes instrumentos.



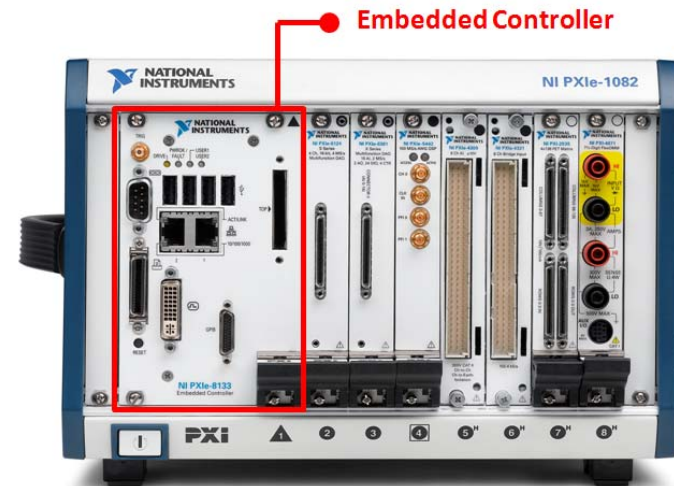
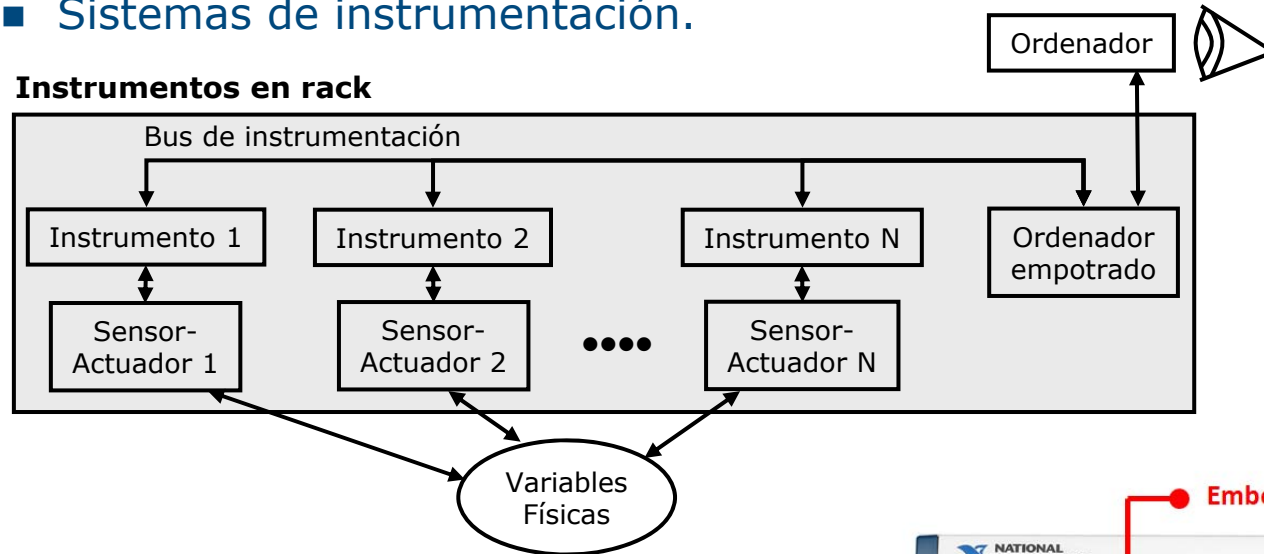


Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



- Diagramas de bloques.
 - Sistemas de instrumentación.





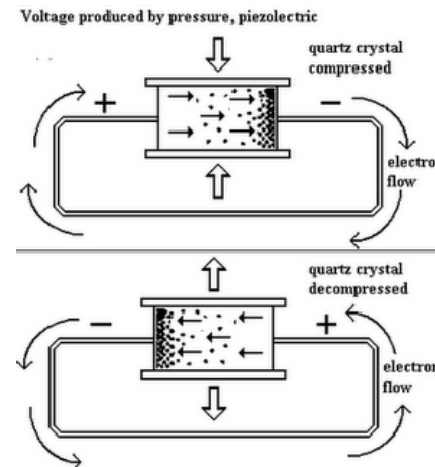
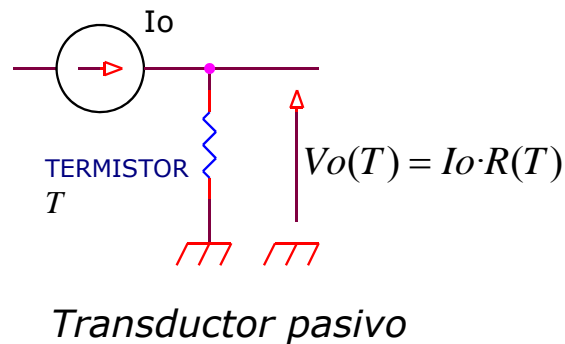
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



□ Tipos de sensores y actuadores.

- **Transductor.** Dispositivo que realiza una transformación entre tipos de energía. Algunos son bidireccionales. Su denominación indica el tipo de transformación, aunque no la dirección. Transductor electromecánico, fotoeléctrico...
- **Transductor autogenerador (activo):** No necesita aportación ajena de energía para realizar la transformación. Por ejemplo, transductor piezoeléctrico.
- **Transductor externamente alimentado (pasivo):** Necesita, para realizar la transformación, aportación de energía ajena al proceso básico de transducción. Por ejemplo, termistor: es una resistencia función de la temperatura. Para obtener energía eléctrica en la salida (función de la energía térmica) es necesario realizar una conversión resistencia-tensión/corriente, para lo que es necesario aportar energía eléctrica.



Transductor activo



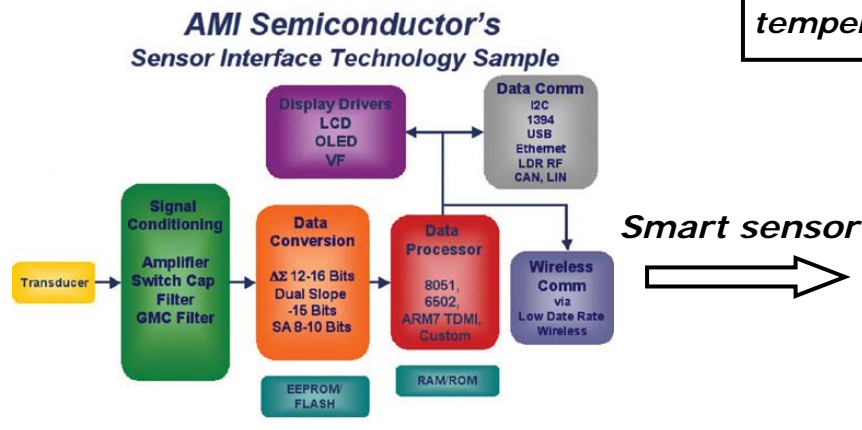
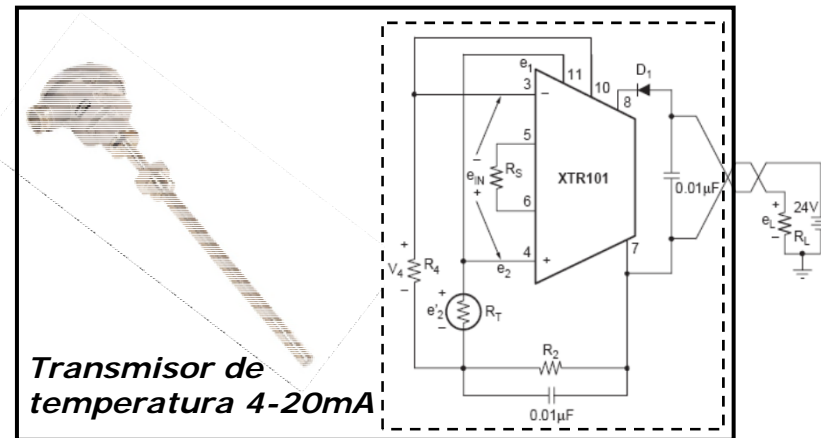
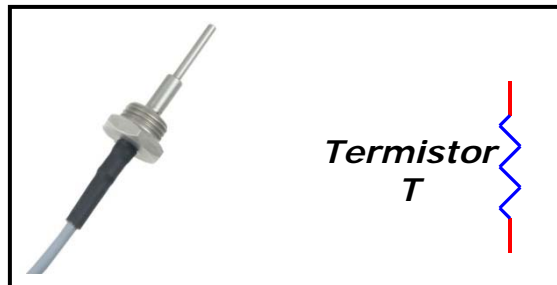
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



□ Tipos de sensores y actuadores.

- **Sensor.** Dispositivo que capta magnitudes físicas o químicas (temperatura, aceleración, pH, etc.) y proporciona una magnitud eléctrica (tensión, resistencia, etc.) función de estas. Puede tener diferentes grados de complejidad.





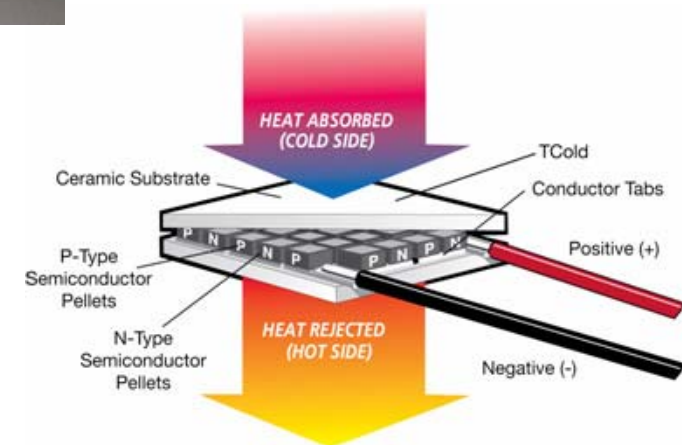
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



□ Tipos de sensores y actuadores.

- **Actuador eléctrico.** Dispositivo que transforma una energía eléctrica en otro tipo de energía (mecánica, térmica, óptica, etc.). Su finalidad es producir un efecto, normalmente, sobre un proceso de control. Por ejemplo: motores, resistencia calefactora, altavoz, etc.





Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



- Tipos de sensores y actuadores.
 - **Selección de sensores/actuadores.** Se debe atender a diferentes cuestiones, principalmente:
 - *Sensibilidad: relación entrada-salida.*
 - *Rango o margen de medida/actuación.*
 - *Entorno de funcionamiento y fiabilidad.*
 - *Respuesta en frecuencia y transitoria.*
 - *Tipo de señal eléctrica de salida/entrada: analógica, digital, tensión, corriente, etc.*
 - *Impedancia de entrada/salida.*
 - *Requerimientos de energía: potencia, tensiones, etc.*
 - *Exactitud, linealidad, histéresis, banda muerta, ruido, etc.*
 - *Costo.*
 - *Necesidades de calibración.*
 - *Normativas de seguridad requeridas por la aplicación.*
 - *Distancia entre el dispositivo y el sistema de medida/actuación.*



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

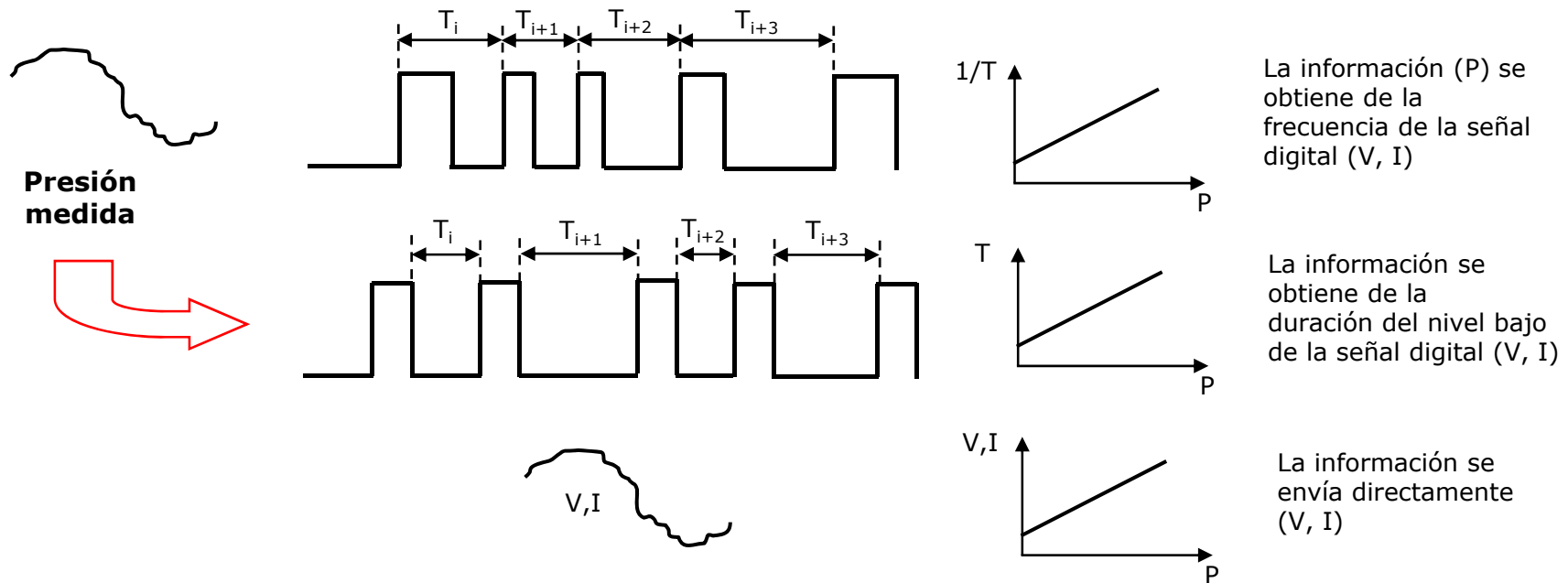
Lección 1. Sistemas de Instrumentación



□ Telemedida y buses de instrumentación.

■ **Telemedida.** Proceso en el cual los resultados de una medida son enviados a un punto de recepción lo suficientemente alejado como para que este requerimiento afecte sobre la estructura y el diseño del sistema de transmisión. Diferentes posibilidades:

■ *Telemedida analógica.* La información se envía en formato analógico: puede adoptar infinitos valores dentro de un rango finito.





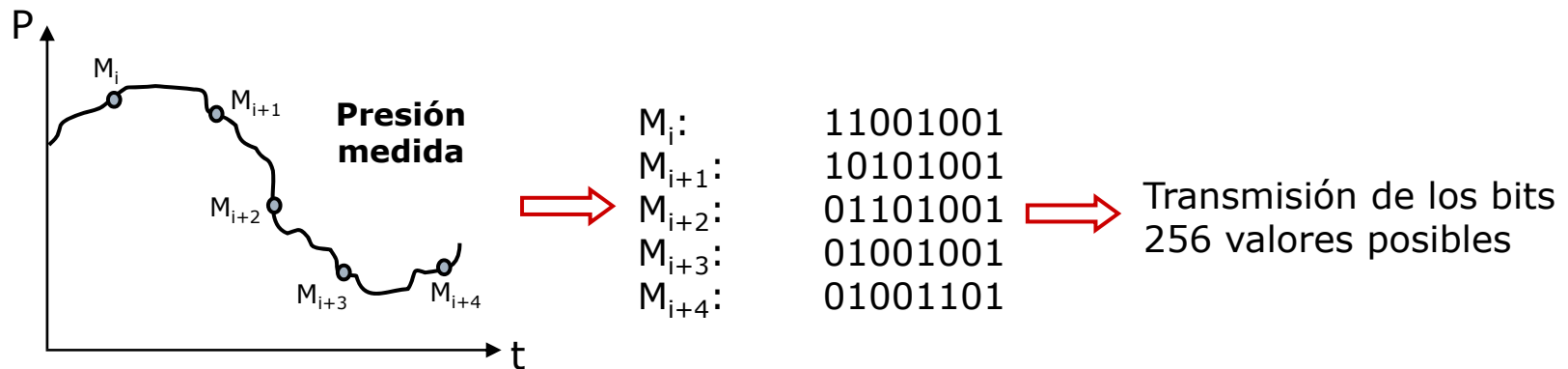
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



□ Telemedida y buses de instrumentación.

- *Telemedida digital.* La información se envía en formato digital: solo puede adoptar un número finito de valores dentro de un rango finito.



- *Telemedida vía radio.* La información (en formato analógico o digital) se envía modulada a través de ondas de radio.
- *Telemedida vía cable.* La información (en formato analógico o digital) se envía (modulada, codificada o en banda base) a través de un cable eléctrico o una fibra óptica.

Las características de la aplicación (distancia, entorno, coste, características de la información, etc.) determinan el método más adecuado para implementar la telemetria.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



- **Telemedida y buses de instrumentación.**
 - **Buses de instrumentación.** Permiten comunicar y controlar, mediante un computador, distintos instrumentos para formar un sistema de instrumentación de cualquier grado de complejidad.
 - IEEE488 (o bus GPIB). Bus que se diseñó de forma específica para el control de instrumentos.
 - USB, IEEE1394, Ethernet. Buses habituales de los ordenadores. Por su alta disponibilidad en los ordenadores, muchos fabricantes de instrumentos los integran facilitando el control del instrumento sin necesidad de adquirir hardware adicional.
 - LXI. LAN extensions of instrumentation. Propuesta que probablemente sustituirá al bus GPIB.
 - VXI, PXI. Extensiones de los buses VME y PCI, respectivamente, utilizadas en instrumentos modulares en racks.



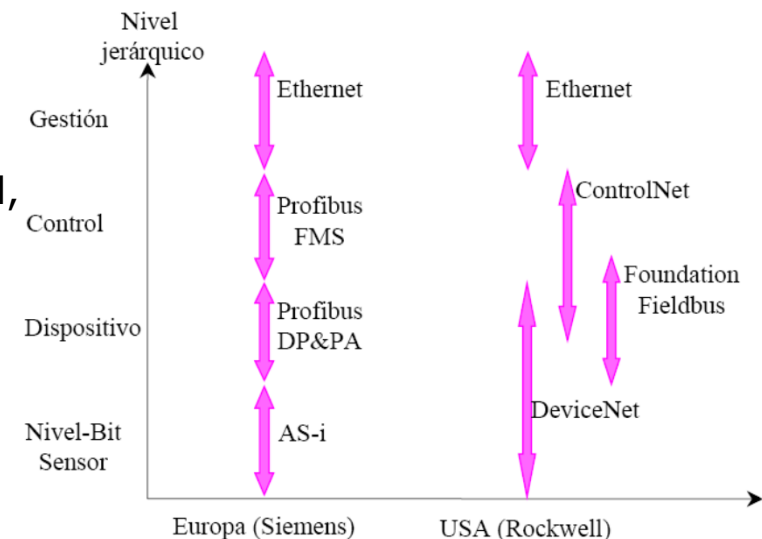
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



□ Telemedida y buses de instrumentación.

- **Buses de campo (Field Bus).** Son los utilizados en sistemas de control industriales, plantas automatizadas de fabricación y de forma general en los sistemas de control de procesos. Bajo esta denominación se incluyen las tecnologías de comunicación y los protocolos.
- **Objetivo:** Conectar los sensores, actuadores y otros dispositivos repartidos por la planta (campo) con los sistemas de control tipo PLC (controlador lógico programable también conocido como autómatas programables) o un PC. Los buses de campo pueden ser propietarios o abiertos.
- **Ejemplos:** Profibus DP, Modbus Plus, SINEC, Omron Sysmac, Profibus FMS, DeviceNet, CAN, AS-i.
- **Características principales:** Conexión con 2 hilos, tiempo real, pequeñas cantidades de datos, alta compatibilidad electromagnética, fácil configuración y programación del sistema, alta fiabilidad, bajo coste de instalación y mantenimiento.



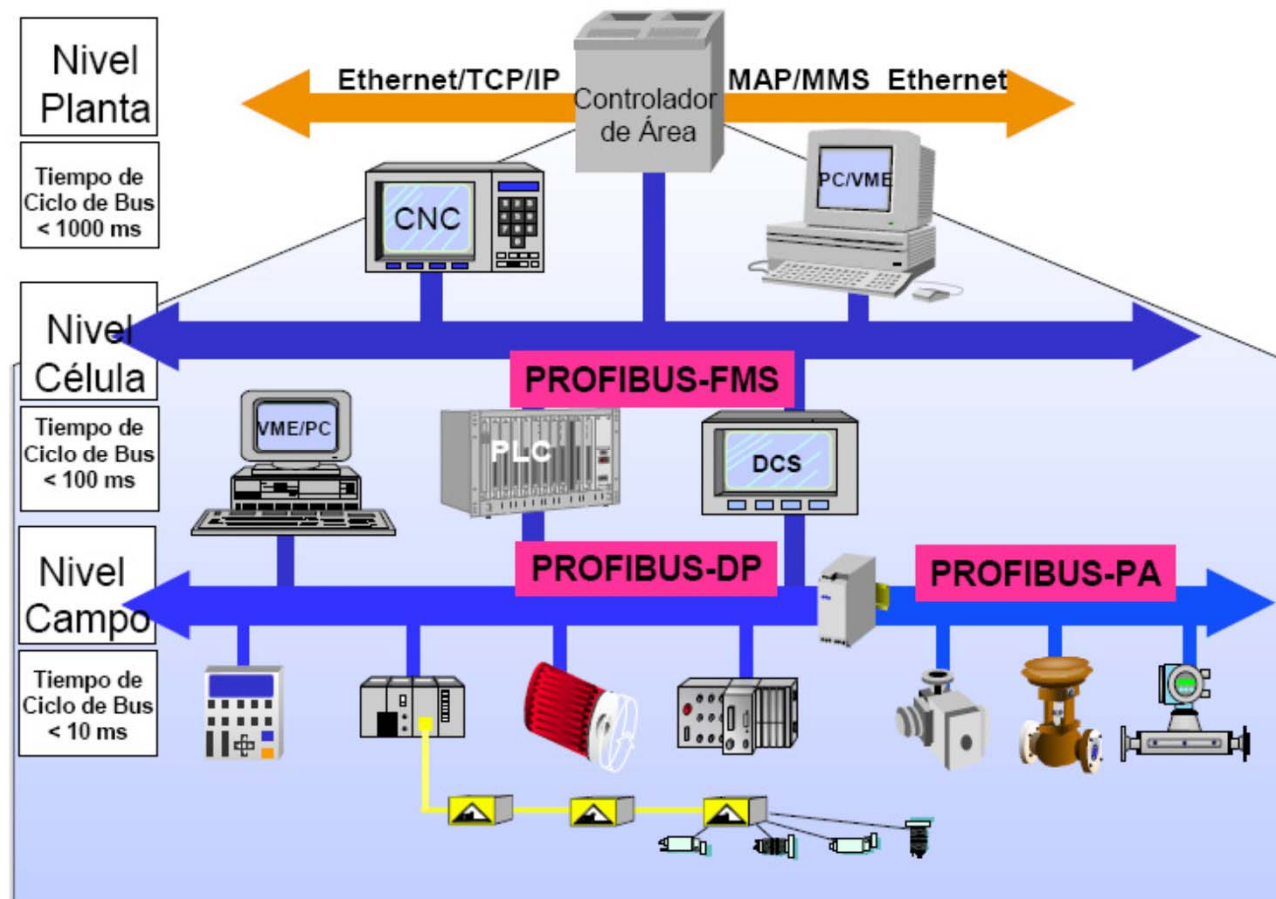


Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



- Telemedida y buses de instrumentación.
 - Buses de campo (Field Bus).





Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 1. Sistemas de Instrumentación



❑ Características básicas de un Instrumento.

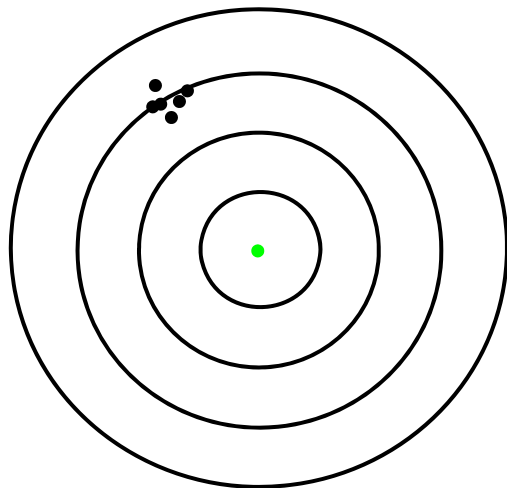
Las definiremos para un medidor, pero son equivalente para un instrumento generador.

- **Exactitud.** Diferencia entre el resultado de la medida y el verdadero valor de la magnitud. La diferencia es el error de la medida y se caracteriza de forma estadística mediante el concepto de *incertidumbre*.
- **Discriminación.** Variación mínima de la entrada que puede ser detectada por el medidor. A veces se usa el término *resolución* para esta característica.
- **Rango.** Valores máximo y mínimo de la magnitud que puede ser medida.
- **Precisión.** Dispersión de los resultados de diferentes medidas realizadas con una misma magnitud de entrada. Es habitual utilizar de forma incorrecta este término, asociando alta precisión (baja dispersión) con alta exactitud. Bajo el concepto de precisión se definen dos características:
 - *Repetibilidad. Precisión evaluada sobre un grupo de medidas realizadas en un corto espacio de tiempo. Está marcada por el ruido del sistema.*
 - *Reproducibilidad. Precisión evaluada sobre un grupo de medidas realizadas en un largo período de tiempo. Cuantifica el ruido del sistema y las derivas.*

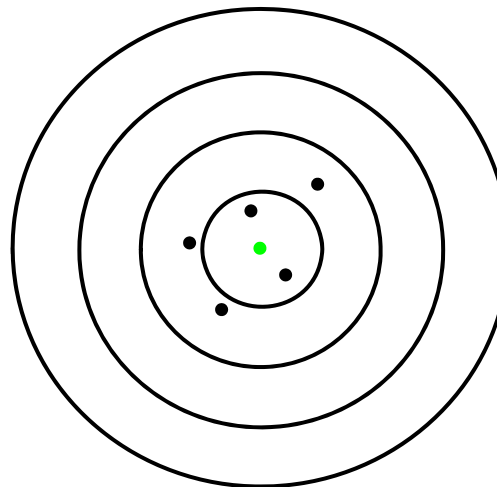


□ Ejemplo: Diferencia entre precisión y exactitud.

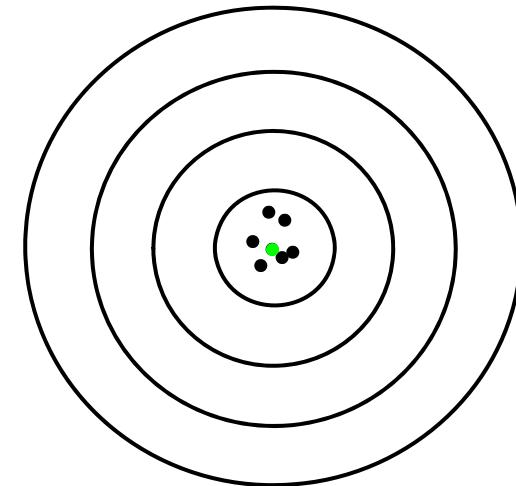
Las figuras muestran los resultados de las medidas realizadas con 3 instrumentos de características distintas. El punto central (en verde), representa el verdadero valor de la magnitud de entrada.



Alta precisión
Baja exactitud



Menor precisión
Mejor exactitud



Alta precisión
Alta exactitud

En un instrumento de alta precisión y baja exactitud, se puede conseguir mayor exactitud mediante un proceso de calibración.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Índice



- ❑ Lección 0. Objetivos del tema.
- ❑ Lección 1. Sistemas de Instrumentación.
- ❑ **Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento.**
 - **Definiciones y fundamentos.**
 - **Errores sistemáticos.**
 - **Errores aleatorios.**
 - **Reducción de errores mediante Instrumentos Inteligentes.**
 - **Evaluación y expresión de la incertidumbre.**
- ❑ Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida.
- ❑ Lección 4. Calibración de Instrumentos.
- ❑ Lección 5. Seguridad Eléctrica y Compatibilidad Electromagnética.
- ❑ Ejemplo de modelado de un sistema de medida: Sistema para la medida de distancias por IR.
- ❑ Referencias y bibliografía.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Definiciones y fundamentos.

■ Error.

- *Medidor*: diferencia entre el valor medido de la magnitud y su valor real.
- *Generador*: diferencia entre el valor generado de la magnitud y el valor deseado.

- **Incertidumbre**: Banda entre la que se encuentra el error con una probabilidad dada.

***Ejemplo:** Incertidumbre del instrumento $\pm 0.1\%$ de la medida con $P=95\%$. Esto significa que si medimos una tensión de 2V, el error estará comprendido en la banda de $\pm 2\text{mV}$ con una probabilidad del 95%, existiendo por lo tanto una probabilidad del 5% de que sea mayor que el valor calculado.*

Al usar un instrumento, nunca conoceremos el error exacto. Si así fuese, el instrumento sería ideal. Por lo tanto, el término correcto que debe utilizarse es el de incertidumbre o banda de error.

La caracterización del error se hace de forma estadística.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

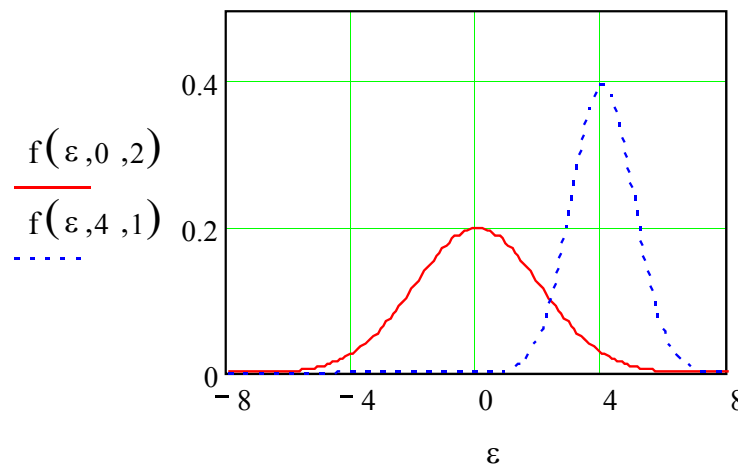
Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Definiciones y fundamentos.

- **Caracterización estadística del error.** El error se caracteriza por una variable aleatoria, que habitualmente sigue una función de densidad gaussiana.
 - Función de densidad gaussiana de media μ y desviación estándar σ :

$$f(\varepsilon, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varepsilon-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$



$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\varepsilon, \mu, \sigma) d\varepsilon = 1$$

$$\int_{\mu-\sigma}^{\mu+\sigma} f(\varepsilon, \mu, \sigma) d\varepsilon = 0.683$$

$$\int_{\mu-1.96\sigma}^{\mu+1.96\sigma} f(\varepsilon, \mu, \sigma) d\varepsilon = 0.95$$

$$\int_{\mu-2.58\sigma}^{\mu+2.58\sigma} f(\varepsilon, \mu, \sigma) d\varepsilon = 0.99$$



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento

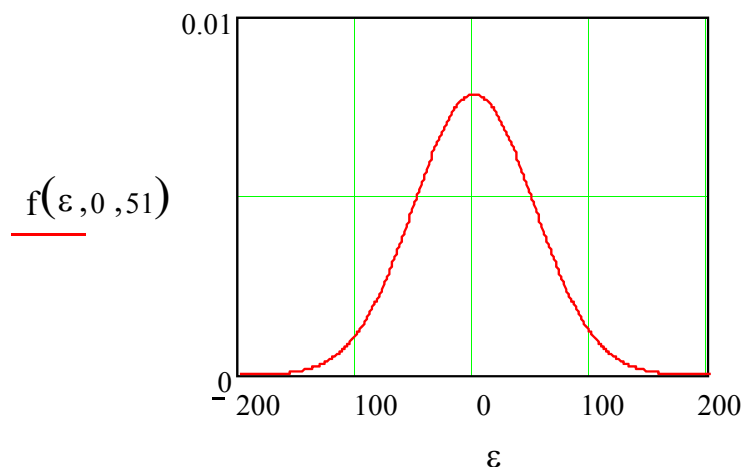


□ Definiciones y fundamentos.

Ejemplo: Caracterización estadística del error.

Las especificaciones de un amperímetro indican que presenta una incertidumbre de $\pm 100\text{ppm}$ de la medida con una probabilidad del 95%. Analice este dato.

- Como la banda de incertidumbre es simétrica respecto al origen: $\mu=0$.
- La probabilidad del 95% corresponde a $\pm 1.96\sigma$: $\sigma=100/1.96=51\text{ppm}$.
- La incertidumbre para $P=68.3\%$ (incertidumbre estándar): $\pm\sigma=\pm 51\text{ppm}$.



- Incetidumbre estándar: incertidumbre a $\pm\sigma$.
- Nivel de confianza: la probabilidad asociada a la incertidumbre indicada (95% en el ejemplo).
- Factor de cobertura: el factor por el que se debe multiplicar la *incertidumbre estándar* para obtener el nivel de confianza deseado (1.96 en el ejemplo).
- Incetidumbre expandida: la incertidumbre con un factor de cobertura superior a la unidad, normalmente 2 ($\pm 100\text{ppm}$ en el ejemplo).



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



❑ Errores sistemáticos.

- **Definición:** Son aquellos que se producen con la misma magnitud para unas condiciones de funcionamiento determinadas (μ del error). La causa que produce el error puede ser conocida o no. Lógicamente, si pueden ser determinados, su aportación al error total es eliminada.

Comentario: El proceso que permite determinar y anular los errores sistemáticos se conoce como calibración. En la práctica no es posible calibrar un instrumento para la totalidad de condiciones de funcionamiento posibles, por lo que muchos errores sistemáticos deben ser soportados en su uso.

■ Fuentes de errores sistemáticos:

- *Tolerancias de componentes.*
- *Derivas en componentes: efecto de la temperatura, humedad, envejecimiento, alimentación...*
- *Aproximaciones del modelo del instrumento.*
- *Interacción con la carga (instrumentos generadores) o interacción con la fuente (instrumentos medidores).*
- *Otros: f.e.m térmica, BW, distorsión...*



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



❑ Errores aleatorios.

- **Definición:** Son aquellos cuya magnitud no puede predecirse. Se caracterizan mediante parámetros estadísticos y se suele cumplir que su función densidad de probabilidad es gaussiana, caracterizándose mediante la desviación estándar (σ) y la media (μ).

Comentario: La complejidad, naturaleza o desconocimiento de los mecanismos que producen un error sistemático, puede aconsejar/obligar a que sea tratado como error aleatorio.

■ Fuentes de errores aleatorios:

- *Ruidos eléctricos generados en los componentes electrónicos ($\mu=0$).*
- *Interferencias Electromagnéticas ($\mu=0$, normalmente).*
- *Vibraciones ($\mu=0$, normalmente). Por ejemplo, la variación en la relación de acoplamiento en un transformador.*
- *Algunos errores sistemáticos cuando son evaluados sobre un conjunto de circuitos/sistemas.*



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

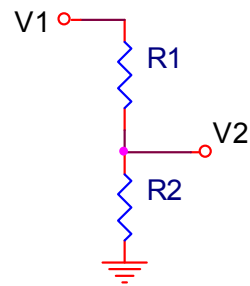
Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Ejemplos de errores.

■ Ejemplo 1. Tolerancia en componentes/circuitos.

Supongamos el divisor resistivo de la figura en el que $R_1=R_2$ y la resistencia R_2 presenta una tolerancia $T(R_2)=\pm 1\%$ con $P=95\%$. La incertidumbre en la división (V_2/V_1) sigue la expresión indicada ($T(V_2/V_1)$), resultando $\pm 0.5\%$ con $P=95\%$.


$$T(V_2/V_1) = \frac{\Delta(V_2/V_1)}{V_2/V_1} = \frac{\Delta\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)}{\frac{R_2}{R_1+R_2}} = \frac{\frac{R_2(1+T(R_2))}{R_1+R_2} - \frac{R_2}{R_1+R_2}}{\frac{R_2}{R_1+R_2}} =$$
$$= 2 \cdot \frac{1+T(R_2)}{2+T(R_2)} - 1 = \frac{2+2\cdot T(R_2) - 2 - T(R_2)}{2+T(R_2)} = \frac{T(R_2)}{2+T(R_2)} \cong \frac{T(R_2)}{2} = \pm 0.5\%$$

La tolerancia representa la dispersión del valor de la resistencia para unas condiciones de funcionamiento (temperatura, tiempo, etc). Para un resistor concreto, la desviación respecto a su valor nominal se mantiene si no cambian las condiciones de funcionamiento, por lo que puede ser medida y eliminada por el sistema.

El error producido por la tolerancia es sistemático evaluado en un único divisor resistivo, pero es aleatorio cuando lo evaluamos sobre un conjunto de divisores resistivos.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

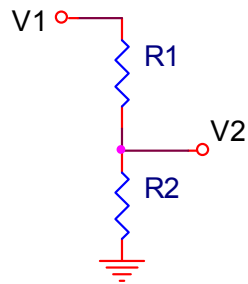
Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Ejemplos de errores.

■ Ejemplo 2. Derivas en componentes/circuitos.

En el divisor resistivo del ejemplo anterior, la resistencia R2 presenta un coeficiente de temperatura $CT(R2) = \pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Este parámetro producirá una deriva térmica en la división según la expresión indicada ($DT(V2/V1)$).



$$DT(V2/V1) = \frac{\Delta(V2/V1)}{(V2/V1)} = \frac{\Delta\left(\frac{R2}{R1+R2}\right)}{\frac{R2}{R1+R2}} \cong \frac{CT(R2)}{2} \Delta T = \pm 50 \cdot \Delta T (\text{ppm}/^\circ\text{C})$$

Al igual que en el ejemplo de la tolerancia, para un divisor resistivo concreto la deriva térmica puede medirse y por lo tanto compensarse.

El error producido por el $CT(R2)$ es sistemático evaluado en un único divisor resistivo y aleatorio evaluado sobre un conjunto de divisores resistivos.

El proceso de calibración supone evaluar el comportamiento térmico del divisor en todo el margen de temperatura de funcionamiento y disponer de un sistema de medida de temperatura y de compensación del efecto. **Coste muy elevado.**

Generalmente es mejor solución utilizar un componente con menos derivas y soportar el error resultante.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

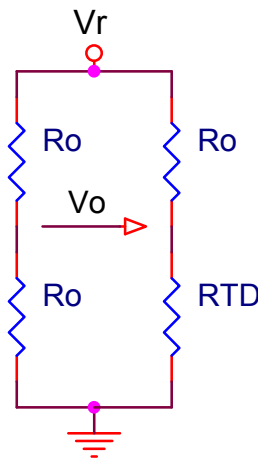
Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Ejemplos de errores.

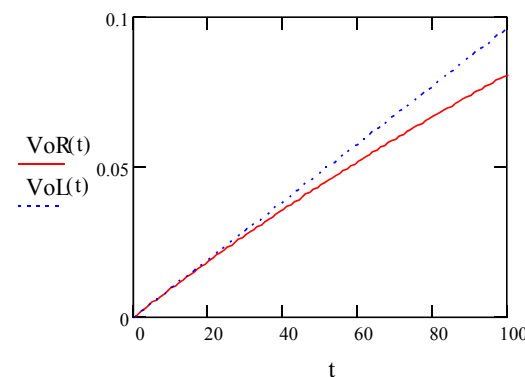
■ Ejemplo 3. Aproximaciones del modelo.

En la figura se muestra un circuito para medir la temperatura basado en un sensor resistivo del tipo RTD. Supongamos que la expresión **real** del RTD es $RTD = R_o(1 + \alpha t)$, donde "t" es la temperatura. La expresión de $V_o(t)$ no es lineal pero, por simplicidad, el sistema de medida utiliza la aproximación lineal indicada para interpretarla, produciendo un error sistemático en el modelo.



$$V_o(t) = V_r \left(\frac{R_o(1 + \alpha t)}{R_o + R_o(1 + \alpha t)} - \frac{1}{2} \right) = V_r \frac{\alpha t}{2(2 + \alpha t)} \cong \frac{V_r}{4} \alpha t$$

$$Error(^{\circ}C) = t_{Estimada} - t_{Real} = \frac{4V_o}{\alpha V_r} - \frac{4V_o}{\alpha(V_r - 2V_o)} (^{\circ}C)$$



Existiría un segundo error sistemático en el modelo, como consecuencia de que la resistencia del RTD tampoco cambia linealmente con la temperatura.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

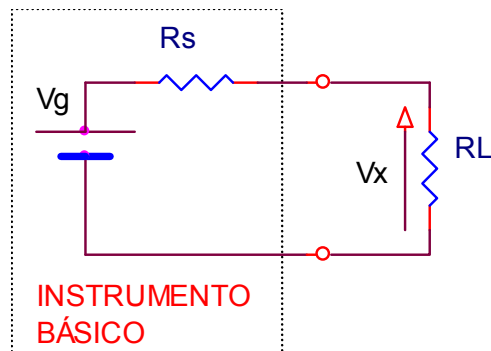
Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Ejemplos de errores.

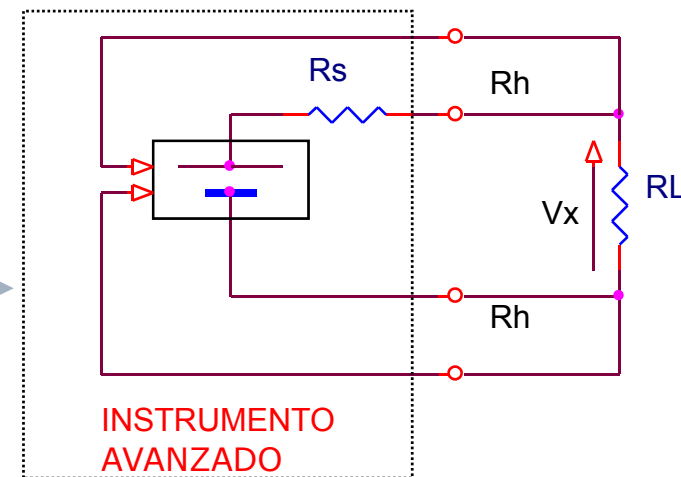
■ Ejemplo 4. Interacción con la carga.

En la figura se muestra un instrumento encargado de generar una tensión a una carga. Como el instrumento no es ideal, presenta una resistencia de salida $R_s = 0.1\Omega$, lo que produce un error sistemático (E) en la tensión suministrada.



$$E(V) = V_x - V_g = V_g \frac{R_L}{R_s + R_L} - V_g = -V_g \frac{R_s}{R_s + R_L} \cong -V_g \frac{R_s}{R_L}$$

Un instrumento mas avanzado podría utilizar la técnica de 4 hilos para eliminar el error (incluido el de los cables por su R_h).





Introducción a los Sistemas de Instrumentación

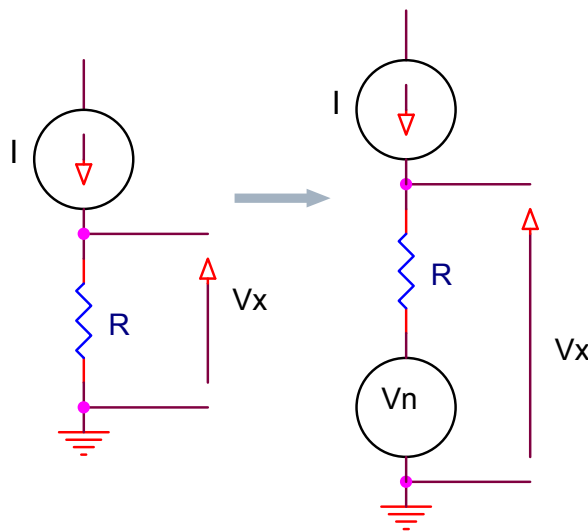
Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



- Ejemplos de errores.
 - Ejemplo 5. Ruido eléctrico.

En la figura se muestra un circuito básico para medir el valor de una resistencia, mediante la conversión de la resistencia a una tensión proporcional gracias a la corriente inyectada.

En cualquier resistencia se genera una tensión de ruido térmico que se suma a la información, produciendo un error en la medida. Dicho ruido es una v.a. de media nula y desviación típica igual al valor eficaz del ruido ($\sigma = Vn_{RMS}$), donde B es el ancho de banda de ruido del medidor y $K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K):



$$Vn_{RMS} = \sqrt{4KTRB} (V)$$

$$R_{Estimada} = \frac{Vx}{I} = \frac{I \cdot R + Vn}{I} = R + \frac{Vn}{I}$$

El error es una v.a. de media nula y $\sigma = Vn_{RMS}/I$. Como se observa, el error se puede reducir limitando el ancho de banda del medidor.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

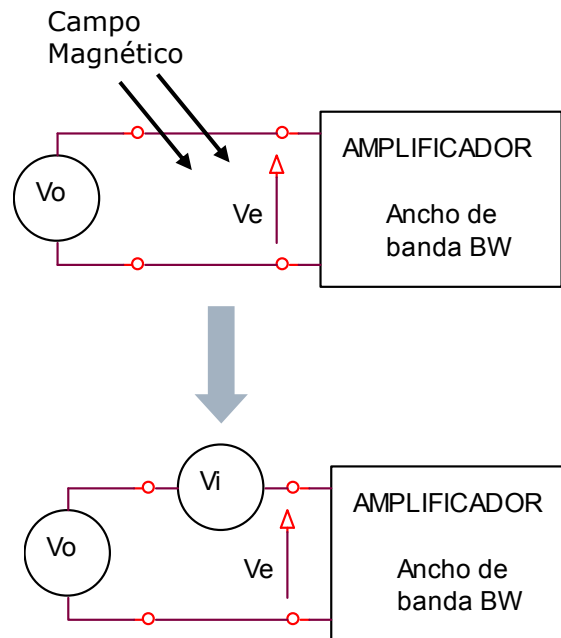
Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Ejemplos de errores.

■ Ejemplo 6. Interferencia Electromagnética.

La figura muestra un circuito en el que una tensión resultado de una medida es enviada a un punto remoto de recepción. Un campo magnético interferente induce en la transmisión una tensión de valor V_i que se suma a la información produciendo un error aleatorio de media $\mu=0$ y de $\sigma=V_{i_{RMS}}$. Se pueden dar dos situaciones adicionales:



- Que el BW del amplificador sea inferior a la frecuencia de la interferencia (f_i), atenuando con mayor o menor intensidad el ruido.
- Que aun siendo $BW \ll f_i$, la interferencia sea demodulada a la entrada del amplificador como consecuencia de efectos no lineales (fenómeno conocido como *rectificación de audio*), resultando una tensión de ruido proporcional a la envolvente de la interferencia, que genera un error aleatorio con $\mu \neq 0$.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



- Reducción de errores mediante Instrumentos Inteligentes.
 - Necesidades:
 - *Modelo del efecto de las perturbaciones: teórico o empírico.*
 - *Transductores secundarios para las perturbaciones a compensar.*
 - *Sistema digital de procesamiento.*
 - Reducción de errores sistemáticos:
 - *Con el modelo y el transductor secundario correspondiente, se pueden compensar: derivas, efectos de carga, no linealidad...*
 - *Técnicas de auto-cero, inversión de puntas de prueba para anular f.e.m. térmica...*
 - Reducción de errores aleatorios:
 - *Mediado de muestras, filtros de mediana y filtros digitales mas complejos.*



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Evaluación y expresión de la incertidumbre.

Objetivo: Conocer cómo deben tratarse las diferentes fuentes de incertidumbre para determinar y expresar la incertidumbre total.

■ **Ley de propagación de incertidumbres:** Es el método que permite calcular la *desviación estándar* del resultado de una medida mediante la combinación de las diferentes fuentes de incertidumbre. También se conoce como “*root-sum-of-squares*” o método “*RSS*” para la combinación de las incertidumbres calculadas como desviación estándar.

■ **Premisa:** se asume que todos los errores sistemáticos importantes han sido identificados y compensados, mediante lo que se conoce como “*factores de compensación*”. Como la corrección no es perfecta, queda una incertidumbre estándar asociada a dicha corrección.

■ Expresión de la incertidumbre:

■ *Estándar:* desviación estándar del resultado obtenido con el método RSS.

■ *Expandida:* la incertidumbre estándar anterior multiplicada por un factor de cobertura (normalmente entre 2 y 3). En este caso se asocia una probabilidad dada por el valor del factor de cobertura y las características de las v.a. que representan a las aportaciones de incertidumbre.

Por ejemplo, Factor de cobertura 2 y v.a. gaussiana: $P \approx 95\%$



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Evaluación y expresión de la incertidumbre.

Ley de Propagación de Incertidumbres: denominamos “y” a la estimación de una medida o salida “Y”, obtenida de la combinación de las estimaciones “x_i” de diferentes medidas o variables “X_i” (incluidas las diferentes fuentes de error).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

La *incertidumbre estándar combinada* del resultado de la medida, $u_c(y)$, que representa la desviación estándar del resultado, se calcula como la raíz cuadrada de la varianza, $u_c^2(y)$, obtenida mediante la expresión:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u(x_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

donde las derivadas parciales se denominan “*coeficientes de sensibilidad*”; $u(x_i)$ es la incertidumbre estándar de x_i ; y $u(x_i, x_j)$ es la covarianza estimada de x_i, x_j .

En muchos casos, las diferentes aportaciones de incertidumbre son incorreladas, por lo que la covarianza estimada es cero y la incertidumbre estándar se calcula con el primer término de la expresión anterior.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Evaluación y expresión de la incertidumbre.

Cálculo de la incertidumbre estándar de las diferentes aportaciones $u(x_i)$:

- Incertidumbres tipo A: Son aquellas que se obtienen por métodos estadísticos válidos para el tratamiento de los datos obtenidos en la observación del proceso. Con el uso de estos métodos obtenemos la desviación estándar y la función densidad de probabilidad necesaria para expresar la incertidumbre expandida.
- Incertidumbres tipo B: Son las obtenidas por cualquier otro método distinto del anterior. Por ejemplo: Especificaciones del fabricante, datos ofrecidos por el documento de calibración, experiencia o conocimiento del proceso, etc. Estas especificarán la desviación estándar y la función densidad de probabilidad.

Es bastante habitual que la especificación de incertidumbre no indique el tipo de función densidad de probabilidad ni la desviación estándar. Por ejemplo: Incertidumbre en la medida $\pm 100\mu\text{V}$. Entonces podemos adoptar varias hipótesis según el conocimiento que tengamos del proceso:

- *Asumir distribución uniforme: desviación estándar $100/\sqrt{3}\mu\text{V}$.*
- *Asumir distribución triangular: desviación estándar $100/\sqrt{6}\mu\text{V}$.*
- *Asumir distribución normal con desviación estándar $100\mu\text{V}$.*



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Evaluación y expresión de la incertidumbre.

Cálculo de la función densidad de probabilidad conjunta de la suma de v.a. independientes:

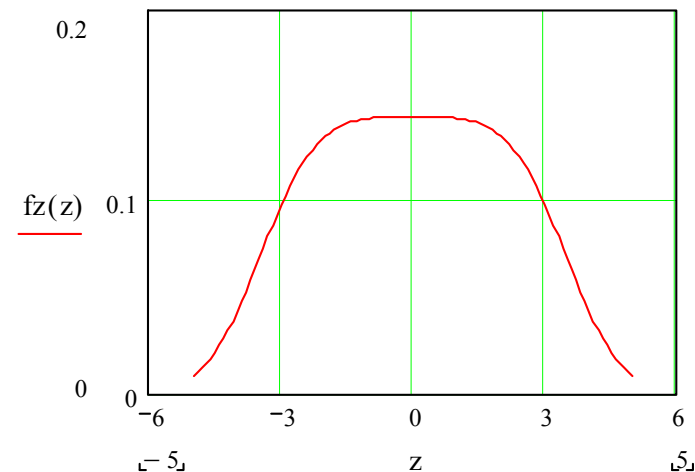
- Todas las aportaciones de incertidumbre siguen una distribución normal. Entonces la f.d.p. conjunta es también normal y su desviación estándar se obtiene mediante RSS.
- Una o más de las aportaciones de incertidumbre no presentan una f.d.p. normal. La f.d.p. conjunta se obtiene convolucionando, sucesivamente, las f.d.p. de las aportaciones que no presentan f.d.p. normal, con la f.d.p. conjunta de todas las normales.

Ejemplo: $Z=X+Y$, con X normal e Y uniforme ($\mu_X = \mu_Y = 0$ $\sigma_X = 1$ y $\sigma_Y = 2$):

$$f_Z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) \cdot f_Y(z-x) dx$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} = \sqrt{5}$$

Resultaría con un factor de cobertura de 2 (incertidumbre total expandida de $\pm 2\sqrt{5}$), una probabilidad del 97.6%.





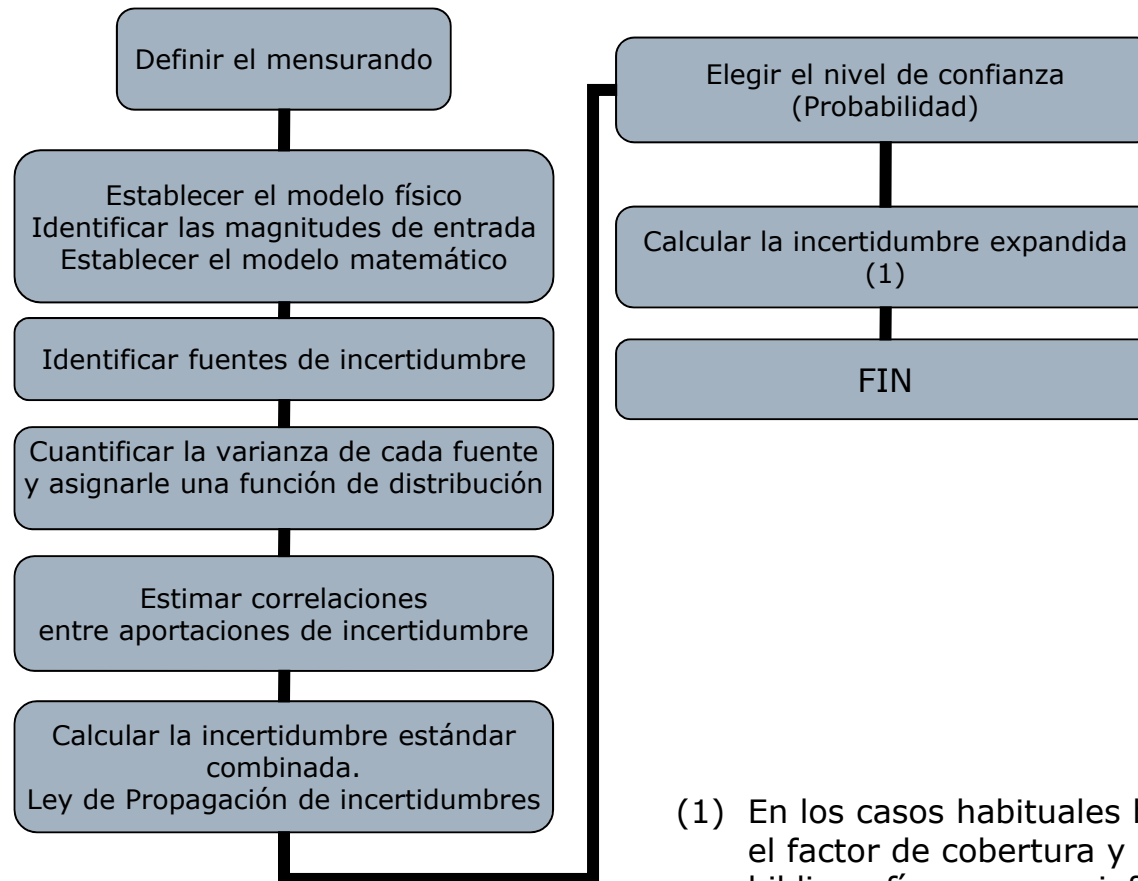
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Evaluación y expresión de la incertidumbre.

Diagrama para la estimación de la incertidumbre:



(1) En los casos habituales basta con determinar el factor de cobertura y aplicarlo. Consultar la bibliografía para mas información.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Evaluación y expresión de la incertidumbre.

Ejemplo 1: A partir de las especificaciones suministradas de un voltímetro, obtenga la incertidumbre estándar cuando se miden 1.2V, a una temperatura de 30°C, en una escala de 2V y transcurridos 3 meses desde la calibración.

Accuracy Range	Uncertainty*3		Temperature Coefficient/°C Outside 18 – 28 °C
	90 days	1 year	
	23 °C ±5 °C	23 °C ±5 °C	
200 mV	0.01 + 0.003	0.015 + 0.004	0.0015 + 0.0005
2 V	0.01 + 0.002	0.015 + 0.003	0.001 + 0.0005
20 V	0.01 + 0.003	0.015 + 0.004	0.0020 + 0.0005
200 V	0.01 + 0.002	0.015 + 0.003	0.0015 + 0.0005
1000 V	0.01 + 0.002	0.015 + 0.003	0.0015 + 0.0005

*3 Uncertainty given as ±(% of reading + % of range).

Como no se dispone de mas información, suponemos que las aportaciones son independientes, siguen una f.d.p. normal y que el valor indicado corresponde a su desviación estándar. La incertidumbre estándar combinada en la medida es:

$$u_c = \sqrt{(1.2V \cdot 0.0001)^2 + (2V \cdot 0.00002)^2 + (1.2V \cdot 2^\circ C \cdot 0.00001^\circ C^{-1})^2 + (2V \cdot 2^\circ C \cdot 0.000005^\circ C^{-1})^2} = 130.3\mu V$$

Entonces, el resultado de la medida es 1.2V±130μV con factor de cobertura 1 (equivalente a P=68.3%) ó 1.2V±260μV con factor de cobertura 2 (P≈95%).



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento



□ Evaluación y expresión de la incertidumbre.

Ejemplo 2: El resultado de una medida y , se obtiene a partir del modelo indicado, en el que las magnitudes (K_i, X_i) presentan una incertidumbre de valor estándar σ_i . Los errores en todas las magnitudes siguen una distribución normal y son incorrelados. Obtenga la incertidumbre estándar en la medida.

$$\text{Modelo: } Y = K_1 X_1 + K_2 X_2 \quad \text{Medida: } y = k_1 x_1 + k_2 x_2$$

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \left(\frac{\partial Y}{\partial K_1} \sigma_{K1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} \sigma_{X1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial K_2} \sigma_{K2}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} \sigma_{X2}\right)^2 = \\ &= (X_1 \cdot \sigma_{K1})^2 + (K_1 \cdot \sigma_{X1})^2 + (X_2 \cdot \sigma_{K2})^2 + (K_2 \cdot \sigma_{X2})^2 \\ u_c(y) &= \sqrt{u_c^2(y)} \end{aligned}$$



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Índice



- ❑ Lección 0. Objetivos del tema.
- ❑ Lección 1. Sistemas de Instrumentación.
- ❑ Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento.
- ❑ **Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida.**
 - Régimen de funcionamiento.
 - Parámetros en régimen estático.
 - Parámetros en régimen dinámico.
- ❑ Lección 4. Calibración de Instrumentos.
- ❑ Lección 5. Seguridad Eléctrica y Compatibilidad Electromagnética.
- ❑ Ejemplo de modelado de un sistema de medida: Sistema para la medida de distancias por IR.
- ❑ Referencias y bibliografía.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Régimen de funcionamiento.

Objetivo: Caracterizar los parámetros en régimen estático y dinámico de un sistema de medida (o generación) y las incertidumbres asociadas.

■ **Parámetros en régimen estático:** Permiten determinar el funcionamiento y características del sistema^(*) frente a señales de variación lenta. Esto es, son los parámetros básicos que no tienen en consideración los efectos que la velocidad de variación de la señal pueden producir en su funcionamiento. *Estamos en régimen estático cuando las salidas solo dependen de las entradas.*

■ **Parámetros en régimen dinámico:** Complementan a los anteriores, para en conjunto determinar el funcionamiento del sistema para cualquier régimen de velocidad de variación de la señal. *Estamos en régimen dinámico cuando las salidas dependen de las entradas y de valores pasados.* Dentro de los parámetros en régimen dinámico se diferencia:

- *Régimen dinámico estacionario o permanente: la relación entre las entradas y las salidas del sistema es independiente del instante de tiempo considerado.*
- *Régimen dinámico transitorio: dicha relación sí depende del instante de tiempo considerado.*

(*) Utilizamos el término "sistema" para incluir tanto a un instrumento, como a cualquier otro circuito, componente o subsistema donde tenga sentido la definición de estos parámetros.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



- Parámetros en régimen estático.
 - **Sensibilidad:** Valor de la derivada, respecto a la entrada, de la función de transferencia que relaciona la salida y la entrada del sistema.
 - **Linealidad:** Cuantifica la variación de la sensibilidad a lo largo de la función de transferencia real en sistemas que nominalmente son lineales.
 - **Conformidad:** Cuantifica la similitud entre la función de transferencia real y la función de transferencia nominal en sistemas cuya función de transferencia nominal no es lineal.
 - **Offset o Línea base:** Valor ideal de la salida del sistema cuando la entrada es nula.

Los parámetros definidos dependen de variables de entorno (derivadas térmicas y temporales, alimentación, etc); presentarán un valor nominal y una tolerancia asociada. En su conjunto, permiten determinar la incertidumbre en régimen estático del instrumento.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen estático.

■ Expresión de la Sensibilidad y de sus modificadores.

La sensibilidad indica cuanto cambia la salida del sistema por unidad de cambio de la magnitud de entrada. La magnitud de salida es una magnitud eléctrica (V, A, Ω , ...), mientras que la de entrada puede ser cualquier magnitud física.

Ejemplos de unidades de sensibilidad: mV/°C, mV/N, mV/mA, Ω /°C.

Los errores e incertidumbres en la sensibilidad se suelen caracterizar de forma relativa y se expresan en % o en ppm. Por ejemplo: Tolerancia, $T(S)=\Delta S/S=\pm 0.2\%$; Coef. de temperatura, $CT(S)=\Delta S/S \cdot \Delta T=\pm 50\text{ppm}/^\circ\text{C}$.

Cuando una información transita por un sistema de medida, los errores de ganancia de los diferentes subsistemas producen un error de sensibilidad que se calcula como suma de los errores de ganancia expresados de forma relativa.

Supongamos que la expresión de la tensión a la salida de un sistema es:

$V_o = S_e \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot M$, donde M es la magnitud medida, S_e la sensibilidad a la entrada y G_1 , G_2 las ganancias de los subsistemas por los que circula la señal. Por lo tanto, la sensibilidad a la salida es: $S_o = S_e \cdot G_1 \cdot G_2$, y el error de sensibilidad en la salida resulta:

$$\frac{\Delta S_o}{S_o} \cong \left(\frac{\partial S_o}{\partial S_e} \Delta S_e + \frac{\partial S_o}{\partial G_1} \Delta G_1 + \frac{\partial S_o}{\partial G_2} \Delta G_2 \right) \frac{1}{S_o} = \frac{\Delta S_e}{S_e} + \frac{\Delta G_1}{G_1} + \frac{\Delta G_2}{G_2}$$



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

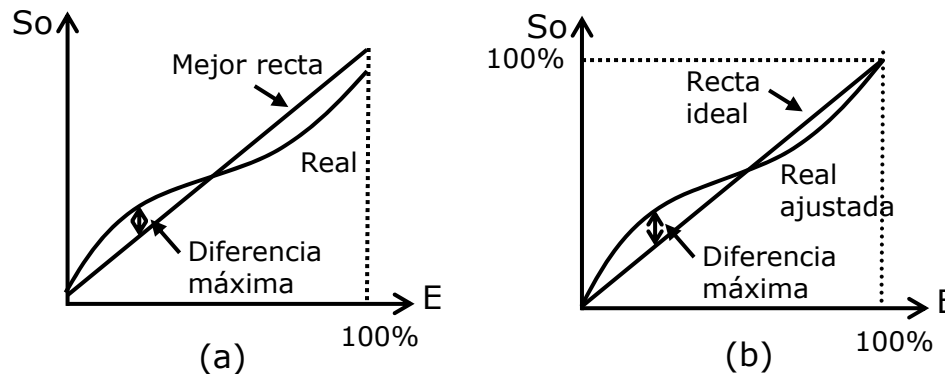
Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen estático.

■ Expresión de la Linealidad.

La linealidad en un sistema de medida es una característica habitualmente deseable. Para cuantificarla existen diferentes métodos, siendo lo normal evaluar la diferencia máxima entre la función de transferencia del sistema y una línea recta. Este valor se normaliza respecto al margen dinámico del sistema, se expresa en % o ppm de fondo de escala y se denomina *No Linealidad (NL)*. Dos posibilidades son:



$$NL(S_o) = \frac{\Delta S_o|_{MX}}{S_o|_{MX} - S_o|_{MIN}} \cdot 100(\% \text{ de FE})$$

- (a) NL respecto a la mejor recta.
(b) NL respecto a puntos finales.

En la figura (a), la recta de comparación es la que produce el menor error máximo, ya sea puntual o evaluado en toda la función mediante mínimos cuadrados.
En la figura (b), la recta real ajustada se obtiene ajustando el offset y la sensibilidad en la función de transferencia real para que pase por los puntos finales.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen estático.

■ Expresión del offset y de sus modificadores.

En un sistema no siempre la salida debe ser nula cuando lo es la entrada. Por ejemplo, un estándar de transmisión de información en formato analógico es el conocido como bucle 4-20mA. En este, el valor mínimo de la información (que puede ser 0) se representa por una corriente de salida de valor 4mA y el máximo por 20mA. Por lo tanto, el offset o línea base del sistema es de 4mA. El offset se expresa en unidades de la magnitud de salida (V, A...).

La diferencia entre el valor real del offset y su valor ideal, representa el error de offset. Este se produce por las tolerancias de los componentes y por el efecto sobre estos de diferentes variables de entorno. Los errores e incertidumbres de offset se pueden expresar de diferentes formas:

- *En unidades de la magnitud de salida (V, A...). Por ejemplo: $\pm 5\text{mV}/^\circ\text{C}$.*
- *En unidades de la magnitud medida, dando así una información más útil de su valor. Por ejemplo, si el medidor de fuerza presenta una sensibilidad de $S=1\text{mV}/\text{N}$, resultaría $\pm 5\text{N}/^\circ\text{C}$.*
- *Normalizado respecto al fondo de escala de la medida, lo que cuantifica su importancia al compararlo con todo el margen de medida. Por ejemplo, si el margen de medida de fuerza es de 1000N, los $\pm 5\text{N}/^\circ\text{C}$ se podrían expresar como $\pm 5000\text{ppm}/^\circ\text{C}$ del FE.*



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida

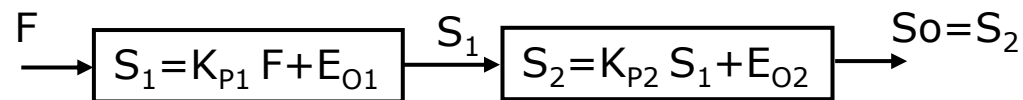


□ Parámetros en régimen estático.

■ Expresión del offset y de sus modificadores.

Los errores de offset introducidos por los diferentes elementos o subsistemas, producen un error de offset total que se calcula como la suma de los errores de offset, si estos están expresados en unidades de la magnitud medida o normalizados respecto al FE.

Ejemplo. En el medidor de fuerza de la figura, $K_{p1}=10\text{mV/N}$ y $K_{p2}=10\text{V/V}$. Los errores de offset a la salida de cada subsistema son: $E_{O1}=3\text{mV}$ y $E_{O2}=-12\text{mV}$. El margen de medida de fuerzas es $0 \leq F \leq 50\text{N}$. Calcule el error de offset total.



- Error de offset en la salida: $E_{O1} \cdot K_{p2} + E_{O2} = 18\text{mV}$.
- Error de offset en unidades de la medida: $18\text{mV}/K_{p1}K_{p2} = 0.18\text{N}$. Que se puede calcular también como $E_{O1}/K_{p1} + E_{O2}/K_{p1}K_{p2} = 0.3\text{N} - 0.12\text{N} = 0.18\text{N}$.
- Error de offset normalizado respecto al FE: $(0.18\text{N}/50\text{N}) \cdot 100 = 0.36\%$ de FE.

Si en lugar de los errores de offset conocemos las incertidumbres, las aportaciones se sumarían como v.a., siguiendo la ley de propagación de incertidumbres.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida

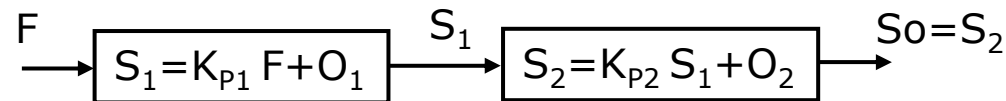


□ Parámetros en régimen estático.

■ Expresión del offset y de sus modificadores.

Los errores de ganancia introducidos por los diferentes elementos o subsistemas, producen un error de offset en aquellos subsistemas en los que en la entrada la línea base es distinta de cero. Esto es como consecuencia de que el error de ganancia introduce un error en la línea base.

Ejemplo. En el medidor de fuerza de la figura, $K_{p1}=10\text{mV/N}$, $K_{p2}=10\text{V/V}$, $O_1=1\text{V}$ y $O_2=-10\text{V}$. Los errores de ganancia de K_{p1} y K_{p2} son 100ppm en ambos casos. Calcule el error de offset producido por los errores de ganancia.



- El error de offset producido por el error en K_{p1} del bloque 1 es nulo, ya que la línea base a la entrada del sistema es cero.
- El error de offset a la salida producido por el error en K_{p2} se calcula como:

$$\Delta O_2 = O_1 \cdot \Delta K_{p2} = O_1 \cdot K_{p2} \cdot \frac{\Delta K_{p2}}{K_{p2}} = 1\text{mV} \equiv 0.01\text{N}$$



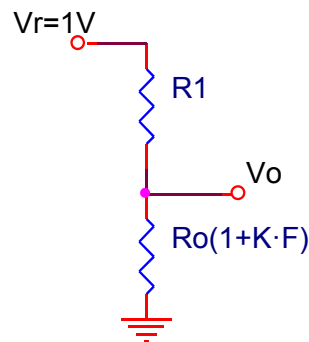
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida

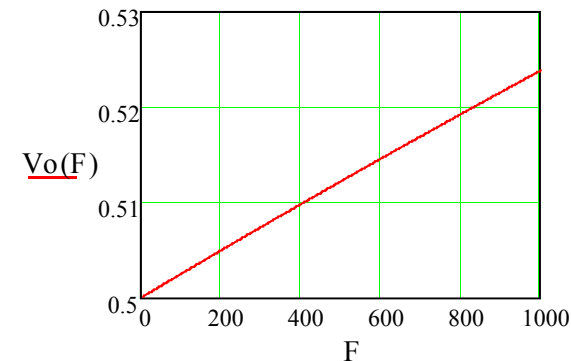


□ Parámetros en régimen estático.

Ejemplo: El circuito de la figura convierte la magnitud F , captada por un sensor resistivo, en una tensión. Supongamos: $R1=R_0$, $0 \leq F \leq 1000N$ y $K=10^{-4}N^{-1}$.



$$V_o(F) = V_r \frac{R_0(1+K \cdot F)}{R_1 + R_0(1+K \cdot F)} =$$
$$= V_r \frac{1+K \cdot F}{2+K \cdot F}$$



▪ Sensibilidad:

$$S(F) = \frac{dV_o(F)}{dF} = V_r \frac{K}{(2+K \cdot F)^2} \cong V_r \frac{K}{4} = 25(\mu V / N)$$

▪ Coeficiente de temperatura de la sensibilidad. Supongamos que $V_r = V_{r0}(1+CT(V_r) \cdot t)$ y que $K = K_0(1+CT(K) \cdot t)$:

$$CT(S) = \frac{\Delta S(F)_{\Delta t}}{\Delta t \cdot S(F)} \cong CT(V_r) + CT(K)$$



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen estático.

- Tolerancia de la sensibilidad. Supongamos que $V_r = V_{ro}(1 + T(V_r))$ y que $K = K_o(1 + T(K))$:

$$T(S) = \frac{\Delta S(F)}{S(F)} \cong T(V_r) + T(K) \quad \text{Al ser tolerancias se sumarían como v.a}$$

- Offset:

$$V_o(F = 0) = \frac{V_r}{2} = 0.5V$$

- Coeficiente de temperatura del Offset. Supongamos que $V_r = V_{ro}(1 + CT(V_r) \cdot t)$

$$CT(V_o(F = 0)) = \frac{\Delta V_o(F = 0)_{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{V_{ro}}{2} CT(V_r)$$

- Tolerancia del offset. Supongamos $T(R_1) = T(R_o) = \pm 0.1\%$ y $T(V_r) = \pm 0.2\%$:

$$T(V_o(F = 0)) = \Delta V_o(F = 0) \cong \frac{\partial V_o(F = 0)}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial V_o(F = 0)}{\partial R_o} \Delta R_o + \frac{\partial V_o(F = 0)}{\partial V_r} \Delta V_r$$

Al ser tolerancias se sumarían como v.a



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen estático.

▪ No Linealidad respecto a la recta ideal. La desviación máxima se produce para la fuerza máxima $F=1000\text{N}$:

$$Vo(F) = Vr \frac{1 + K \cdot F}{2 + K \cdot F}$$

$$NL(Vo) = \frac{\Delta Vo|_{MX}}{Vo|_{MX} - Vo|_{MIN}} \cdot 100 = -4.76\%FE$$

$$Vo_i(F) = S(F=0) \cdot F + Vo(F=0) = \frac{Vr}{4} K \cdot F + \frac{Vr}{2}$$

▪ No Linealidad respecto a puntos finales. Como en el origen la función de transferencia real coincide con la ideal, solo es necesario ajustar la sensibilidad para que con $F=1000\text{N}$ coincidan ambas funciones. La desviación máxima se obtiene ahora en $F=500\text{N}$.

$$Vo(F=1000) - Vo(F=0) = 0.02381 \cdot Vr$$

$$Vo(F)|_{Ajustada} = \frac{Vr}{2} + \frac{0.02381}{1000} \cdot Vr \cdot F$$

$$NL(Vo) = \frac{\Delta Vo|_{MX}}{Vo|_{MX} - Vo|_{MIN}} \cdot 100 = 1.218\%FE$$

La función para interpretar la tensión de salida es $Vo(F)|_{Ajustada}$

Se observa la importante reducción en el valor de la No Linealidad y por lo tanto del error.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida

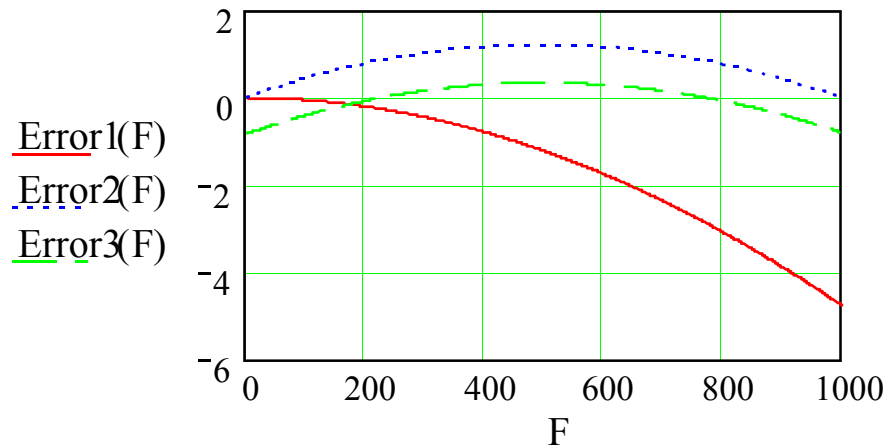


□ Parámetros en régimen estático.

- No Linealidad respecto a la mejor recta según criterio de minimizar la suma de los errores cuadráticos en toda la curva:

Mediante una herramienta de análisis matemático, la recta resultante del método es $V_o(F) = 0.5002 + 2.38 \cdot 10^{-5} \cdot F$, que sería la función utilizada para interpretar la tensión de salida. El error máximo resulta -0.83% de FE.

En la siguiente figura se muestra el error de linealidad en todo el margen, para los tres casos calculados. Como demuestra el ejemplo, una buena elección de la recta usada para interpretar el resultado de la medida, en aquellos sistemas que así lo requieran, permite reducir significativamente el error.



Error1(F): Recta ideal.

Error2(F): Puntos finales.

Error3(F): Mejor recta mínimos cuadrados.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



- ❑ **Parámetros en régimen dinámico estacionario.**
 - **Ancho de banda:** Rango de frecuencias que pueden transitar por el sistema, con una atenuación y/o distorsión inferior a un valor determinado. Se diferencia entre ancho de banda en pequeña señal y en gran señal, y se definen para una señal de entrada sinusoidal.
 - **Tiempo de retardo:** Tiempo que emplea una señal en transitar desde la entrada a la salida del sistema. Se define para señales de entrada sinusoidales.
 - **Distorsión:** Cuantifica la generación de componentes espectrales a la salida del sistema, que no se encontraban en la señal de entrada. Caracteriza el efecto de la no linealidad del sistema, pero evaluado como un indicador más significativo en aplicaciones que tratan con señales alternas.
 - **Relación señal-ruido (SNR):** Compara la magnitud del ruido que acompaña a una señal con la magnitud de la señal. El ruido puede ser generado internamente por los dispositivos electrónicos (ruido intrínseco) o proceder del acoplo de interferencias.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen dinámico estacionario.

■ Ancho de banda en pequeña señal (BW_{PS}).

Es consecuencia de los efectos de filtrado producidos por las reactancias (parásitas o deseadas) del sistema. Indica el margen de frecuencias en el cual la sensibilidad del sistema no se reduce en más de 3 dB respecto a la sensibilidad máxima. El ancho de banda de un sistema se obtiene a partir del módulo de su $H(j\omega)$.

■ Ancho de banda en gran señal (BW_{GS}).

Lo determina la velocidad máxima con la que puede variar la señal en las etapas de salida de los diferentes subsistemas. Esta velocidad máxima se cuantifica mediante el parámetro Slew-rate (SR).

$$SR = \left. \frac{dV_o(t)}{dt} \right|_{MAX}$$

Por ejemplo, si un sistema tiene un $SR=4V/\mu s$ su ancho de banda en gran señal para señales sinusoidales de salida de amplitud máxima de pico 2V sería:

$$SR = 4V/\mu s \geq \left. \frac{dV_o(t)}{dt} \right|_{MAX} = V_p \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_E \Rightarrow f_E \leq \frac{1}{\pi} MHz$$

Si la velocidad de variación de la amplitud del tono es superior, en la salida se obtendría distorsionado, resultando una señal cuya variación máxima sería el SR. Este efecto debe evitarse puesto que es irreversible.



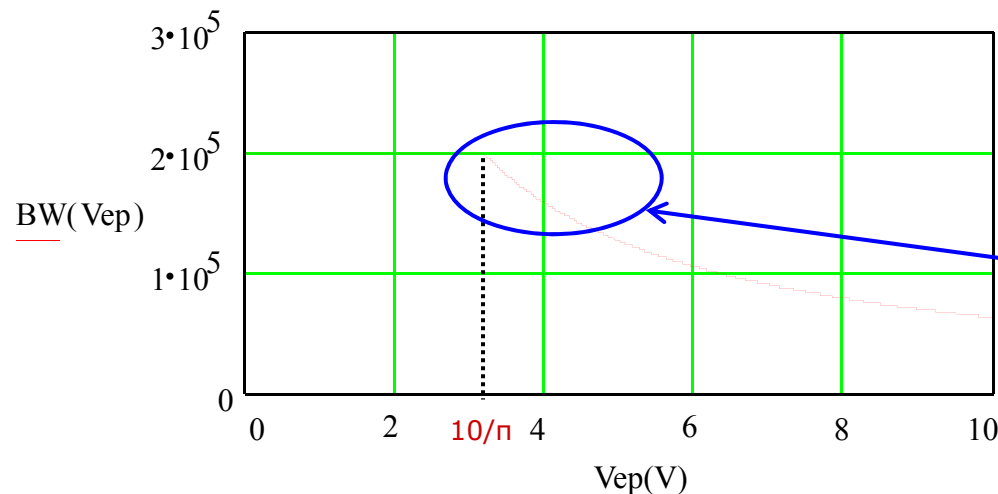
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



- Parámetros en régimen dinámico estacionario.
 - Representación del BW de un sistema.

En un sistema se puede realizar una gráfica que sintetice su ancho de banda en función de la amplitud de la señal de entrada. Para el ejemplo anterior ($SR=4V/\mu s$), si $BW_{PS}=200kHz$, la gráfica sería la representada en la figura, donde se supone una ganancia unidad del sistema y se observa cómo, para amplitudes de pico en la entrada superiores a $10/\pi$ voltios, la limitación en ancho de banda es por SR.



$$SR = 4V / \mu s = V_{ep} \cdot G \cdot 2 \cdot \pi \cdot BW_{PS}$$

$$V_{ep}|_{L\acute{i}mite} = \frac{4 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^5} = \frac{10}{\pi} (V)$$

Esta zona es una aproximación, puesto que la atenuación por BW_{PS} permitiría una mayor amplitud en la V_{ep} ($\sqrt{2}$ superior en el cruce).



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen dinámico estacionario.

■ Tiempo de retardo o propagación, $Tr(w)$.

El tiempo de retardo se define para señales de entrada sinusoidales y se obtiene a partir de la fase de $H(jw)$:

$$Tr(w) = -\frac{\varphi_{H(jw)}}{w}$$

Si $Tr(w) \neq f(w)$, se dice que el sistema es de fase lineal y sólo produce un retraso de la señal sin modificar su aspecto.

Si $Tr(w) = f(w)$, el sistema introduce distorsión de fase, de manera que la forma de onda se modifica aun sin hacerlo la potencia de las diferentes componentes frecuenciales. La importancia de este fenómeno depende de cómo se extraiga la información de la señal.

Existe una fuerte dependencia entre $|H(jw)|$ y la respuesta de fase. Los sistemas en los que $|H(jw)|$ presenta variaciones bruscas, producen elevada distorsión de fase y al contrario. Por ello, la elección de un tipo de filtro, entre las diferentes funciones de transferencia existentes, representa un compromiso entre selectividad en su respuesta en amplitud y el valor de la distorsión de fase permitida.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen dinámico estacionario.

■ Tiempo de propagación de grupo, $T_p(w)$.

Cuantifica la variación en la fase entre señales de frecuencias próximas. Se calcula como:

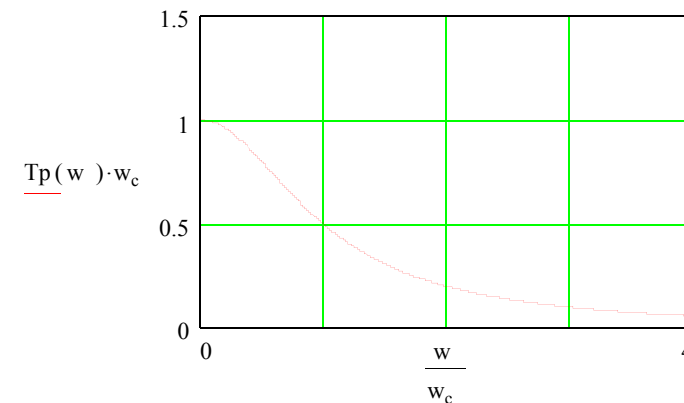
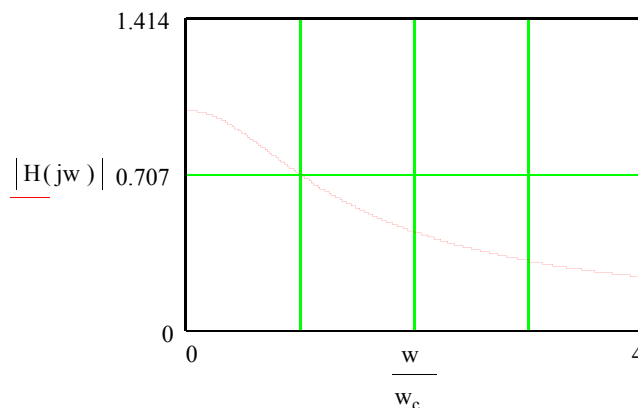
$$T_p(w) = -\frac{d\varphi_{H(jw)}}{dw}$$

Ejemplo: Filtro paso-bajo de primer orden.

En la figura se representa tanto la respuesta en amplitud como el tiempo de propagación de grupo, este último normalizado respecto a w_c .

$$H(jw) = \frac{1}{1 + jw/w_c} \rightarrow |H(jw)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (w/w_c)^2}}$$

$$\varphi_{H(jw)} = -\arctg(w/w_c) \rightarrow T_p(w) = \frac{w_c^{-1}}{1 + (w/w_c)^2}$$





Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen dinámico estacionario.

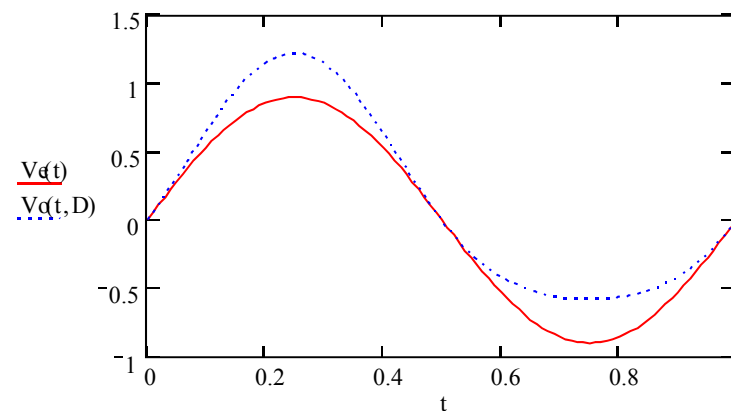
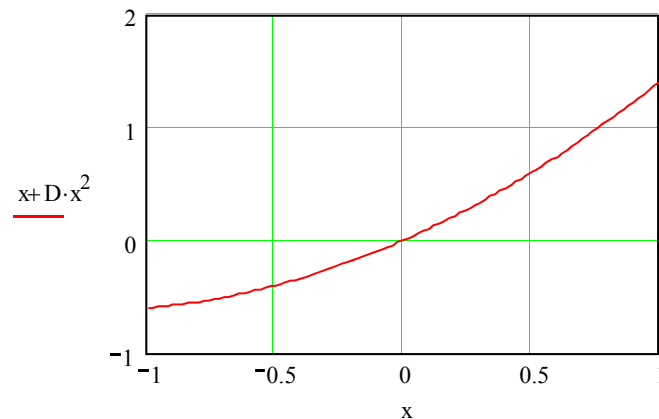
- **Distorsión.** Supongamos un sistema en el que la relación salida-entrada sigue la expresión $y=x+D\cdot x^2$, esto es, un sistema no lineal salvo para $D=0$. Este sistema distorsiona la señal de entrada generando componentes frecuenciales nuevas a la salida. Por ejemplo:

$$V_e(t) = 0.9 \cdot \text{sen}(2\pi t)$$

$$V_o(t, D) = V_e(t) + D \cdot V_e(t)^2 = 0.9 \cdot \text{sen}(2\pi t) + 0.81 \cdot D \frac{1 - \cos(4\pi t)}{2}$$

$$D = 0.4 \rightarrow V_o(t, D) = 0.9 \cdot \text{sen}(2\pi t) + 0.162 - 0.162 \cdot \cos(4\pi t)$$

El sistema genera, junto con una CC, una componente de distorsión del doble de frecuencia de la de entrada, tal y como se muestra en la figura para $D=0.4$.





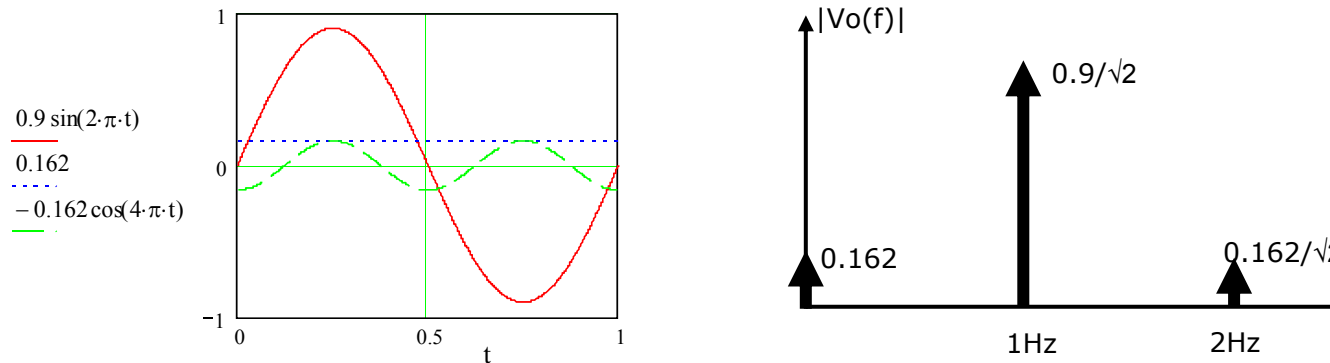
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen dinámico estacionario.

- **Distorsión.** A continuación se descompone la señal de salida del sistema:



El parámetro distorsión cuantifica, de forma relativa en % o en dB, la magnitud de las **componentes alternas** nuevas que aparecen en la salida. En la práctica, se definen diferentes tipos de distorsión, por ejemplo:

- THD (Distorsión armónica total): compara la potencia total de todas las componentes de distorsión, con la del fundamental.

$$THD = 10 \cdot \log \frac{P_{Distorsión}}{P_{Fundamental}} = 10 \cdot \log \frac{0.162^2/2}{0.9^2/2} = -14.9dB$$

- Distorsión de primer armónico: compara solo la potencia del primer armónico. En este ejemplo coincide con la THD.
- IMD (Distorsión de intermodulación): a la entrada del sistema se introducen 2 tonos de distinta frecuencia y se evalúa la potencia total de los armónicos nuevos (*batidos*), respecto a la potencia total de las dos componentes fundamentales.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen dinámico estacionario.

- **Relación señal-ruido (SNR).** Todas las señales soportan una cantidad de ruido aditivo (señal aleatoria de media nula) cuyo efecto en un sistema de medida es el de un error aleatorio que se caracteriza estadísticamente, generando una incertidumbre en la medida. Para cuantificar la magnitud del ruido se utiliza la siguiente expresión, donde σ_N es la desviación estándar o típica del ruido, que coincide con su valor eficaz:

$$SNR = 10 \cdot \log \frac{P_S}{P_N} = 20 \cdot \log \frac{V_{S_{RMS}}}{V_{N_{RMS}}} = 20 \cdot \log \frac{V_{S_{RMS}}}{\sigma_N} (dB)$$

Por ejemplo, supongamos que el resultado de la medida de una tensión es 0.2V y que sabemos que el valor eficaz del ruido que acompaña a la señal es 1mV. Por lo tanto, la medida soporta una incertidumbre estándar o típica de valor $\pm 1mV$, y el error presentará las mismas características estadísticas que la v.a. ruido.

- **Figura de ruido (NF).** Es el cociente entre las SNRs en potencias a la entrada y a la salida de un sistema expresadas en valores naturales, o la resta entre ellas, si están expresadas en dB. Cuantifica la importancia del ruido introducido por el sistema. Su valor ideal es $NF=1$ en unidades naturales (0dB expresada en dB).

$$NF = \frac{SNR_I}{SNR_O} = \frac{P_{S_I} / P_{N_I}}{P_{S_O} / P_{N_O}}$$



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen dinámico transitorio.

Caracterizan la respuesta del sistema frente a cambios bruscos de la señal de entrada. La respuesta del sistema se obtiene mediante transformada inversa de Laplace de la expresión:

$$S(s) = E(s) \cdot H(s)$$

donde: $E(s)$ entrada, $H(s)$ función de transferencia y $S(s)$ salida.

Los parámetros utilizados para caracterizar la respuesta del sistema dependen del tipo de señal de entrada y de la función de transferencia del sistema.

Para señales de entrada escalón:

- Temporales: Tiempo de subida/bajada, tiempo de retardo, tiempo de establecimiento.
- Amplitud: Sobreimpulso máximo.

Al hablar del ancho de banda de un sistema, distinguíamos entre pequeña y gran señal. En el régimen transitorio sucede lo mismo. Para que la respuesta evolucione según indica la función de transferencia, es necesario que el Slew Rate del sistema sea superior a la velocidad máxima de variación en la salida deducida con $E(s) \cdot H(s)$.

En la práctica, si la caracterización de la respuesta transitoria es importante para la aplicación, debe asegurarse que estamos en pequeña señal, lo que permite conseguir alta fiabilidad en dicho propósito.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



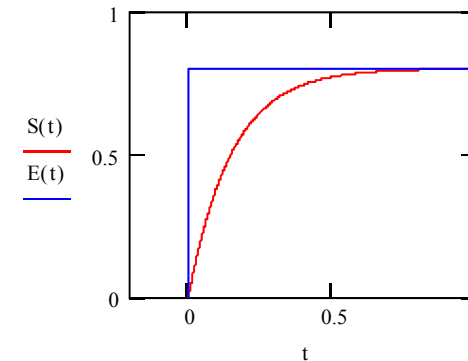
□ Parámetros en régimen dinámico transitorio.

Ejemplo 1. Entrada escalón de amplitud A y f_c de transferencia de primer orden con ganancia k y cte. de tiempo $1/\omega_C$, donde ω_C es la frecuencia de corte del sistema en rd/s.

$$E(s) = \frac{A}{s}$$

$$H(s) = \frac{k}{1+s\tau} = \frac{k}{1+s/\omega_C}$$

$$\Rightarrow S(t) = A \cdot k (1 - e^{-t/\tau})$$



Tiempo de subida: $T_s = t_1 - t_2 = 0.35/f_c$ \leftarrow

$$0.9 = 1 - e^{-t_1/\tau} \rightarrow t_1 = \tau \cdot \ln(10) = 0.3665 / f_c$$

$$0.1 = 1 - e^{-t_2/\tau} \rightarrow t_2 = \tau \cdot \ln(1.1) = 0.0167 / f_c$$

Tiempo de establecimiento para $\epsilon < 0.1\%$: $T_{EST} |_{\epsilon < 0.1\%} = 1.1/f_c$ \leftarrow

$$0.999 = 1 - e^{-T_{EST}/\tau} \rightarrow T_{EST} = \tau \cdot \ln(1000) = 1.1 / f_c$$

Condición de pequeña señal: \Rightarrow

$$SR \geq \left. \frac{dS(t)}{dt} \right|_{MX} = \frac{A \cdot k}{\tau} = A \cdot k \cdot 2\pi \cdot f_c$$



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida



□ Parámetros en régimen dinámico transitorio.

Ejemplo 2. Entrada escalón de amplitud A y f. de transferencia de segundo orden con ganancia k, frecuencia natural subamortiguada w_n en rd/s y factor de amortiguamiento ξ .

$$E(s) = \frac{A}{s} \quad \xi > 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{s(t)}{A \cdot k} = 1 + \frac{-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} e^{(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})w_n t} + \frac{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} e^{(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})w_n t}$$

$$H(s) = \frac{k}{\frac{s^2}{w_n^2} + 2\xi \frac{s}{w_n} + 1} \quad \xi < 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{S(t)}{A \cdot k} = 1 - e^{-\xi w_n t} \left[\frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \sqrt{1 - \xi^2} w_n t + \cos \sqrt{1 - \xi^2} w_n t \right]$$

Los parámetros característicos cambian de forma acusada en función del factor de amortiguamiento:

$\xi > 1$ respuesta sobreamortiguada $s(t, \xi)$

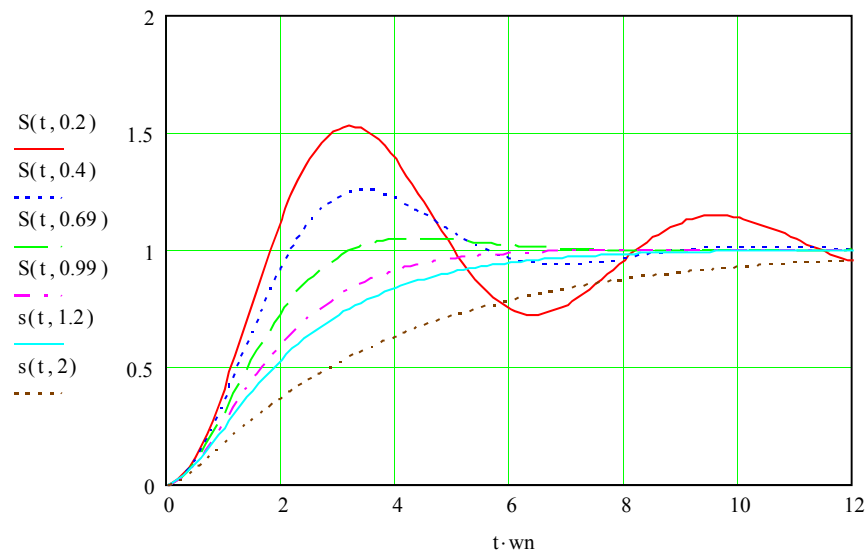
$\xi < 1$ respuesta subamortiguada $S(t, \xi)$

$\xi = 1$ amortiguamiento crítico.

Para $\xi < 1$ se produce una oscilación en la respuesta temporal.

Supuesto $\xi > 1$, el tiempo de subida se puede aproximar por:

$$Ts \cong \sqrt{2 \cdot \pi \left[\left(\frac{2 \cdot \xi}{w_n} \right)^2 - \frac{2}{w_n^2} \right]}$$





Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Índice



- ❑ Lección 0. Objetivos del tema.
- ❑ Lección 1. Sistemas de Instrumentación.
- ❑ Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento.
- ❑ Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida.
- ❑ **Lección 4. Calibración de Instrumentos.**
 - **Definiciones y conceptos generales.**
 - **Tipos de estándar de unidad.**
 - **Tipos y métodos de calibración.**
 - **Especificaciones de un instrumento.**
- ❑ Lección 5. Seguridad Eléctrica y Compatibilidad Electromagnética.
- ❑ Ejemplo de modelado de un sistema de medida: Sistema para la medida de distancias por IR.
- ❑ Referencias y bibliografía.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 4. Calibración de Instrumentos



- **Definiciones y conceptos generales.**
 - **Metrología.** Ciencia de la Medida. Aborda todos los aspectos teóricos y prácticos asociados a una medida y su incertidumbre, en cualquier campo de la ciencia o la tecnología.
 - **Medida.** Conjunto de operaciones que tienen como objetivo determinar el valor de una cantidad.
 - **Mensurando.** La cantidad sujeta a medida.
 - **Método de medida.** Secuencia lógica de operaciones, descritas de forma genérica, necesarias para realizar una medida. Ejemplos:
 - *Método de sustitución.*
 - *Método diferencial.*
 - *Método de anulación.*
 - **Principio de medida.** La base científica de la medida. Ejemplos:
 - *Efecto termoeléctrico, aplicado en la medida de la temperatura.*
 - *Efecto Josephson, aplicado en la medida de diferencia de potenciales eléctricos.*
 - *Efecto Doppler, aplicado en la medida de velocidad.*



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 4. Calibración de Instrumentos



- ❑ **Definiciones y conceptos generales.**
 - **Calibración.** Procedimiento mediante el cual se compara un sistema de medida cuya exactitud es desconocida o no ha sido verificada, con otro sistema de exactitud conocida (estándar o patrón). Para que los resultados del proceso sean significativos, la exactitud del patrón debe ser sensiblemente superior a la ofrecida por el sistema bajo test.
 - **Objetivo de la calibración:**
 - *Asegurar que un equipo funciona dentro de especificaciones.* Tras la calibración de un equipo su exactitud puede empeorar con el paso del tiempo, por lo que es necesario confirmarla periódicamente.
 - *Caracterizar las prestaciones del equipo.* Determinar las especificaciones de exactitud.
 - *Ajustar el equipo para mejorar su exactitud.* Eliminando errores sistemáticos.
 - **Laboratorio de calibración.** Laboratorio equipado con instrumentos de test, que se encuentra en un entorno controlado, con personal cualificado y cuya finalidad es realizar la calibración de instrumentos según unos procedimientos establecidos.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 4. Calibración de Instrumentos



- ❑ Definiciones y conceptos generales.
 - **Estándar de medida o de unidad.** Dispositivo, instrumento o proceso utilizado para definir o realizar una unidad. Se utiliza para calibrar otro equipo y sus características deben ser trazables a referencias formalmente aceptadas.
 - **Unidad de medida.** Definición estandarizada para cuantificar una magnitud. En España se utiliza el sistema internacional de unidades (SI), que presenta unas unidades básicas y otras derivadas de estas. BOE 21 DE ENERO DE 2010.
 - **Trazabilidad metrológica.** Capacidad de relacionar (según un procedimiento formalmente aceptado) los resultados de una medida a través de una cadena continua de procesos de calibración (*cadena de trazabilidad*), con una fuente aceptada como referencia (patrón nacional o internacional, constante física fundamental o material estándar de referencia). Los elementos necesarios para confirmar la trazabilidad metrológica son:
 - *Cadena de trazabilidad metrológica ininterrumpida a un patrón nacional o internacional.*
 - *Una incertidumbre y procedimiento de medida documentados.*
 - *Una competencia técnica reconocida.*
 - *Trazabilidad metrológica al SI.*
 - *Especificación de los intervalos entre calibraciones.*



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 4. Calibración de Instrumentos



❑ Tipos de estándar de unidad.

Existe una jerarquía y clasificación, relativa a la exactitud y uso del estándar o patrón. En un proceso de calibración se utiliza aquel que presente exactitud suficiente para asegurar la validez de los resultados de la calibración.

- **Patrón de referencia.** Es el de más alta calidad metrológica disponible en un lugar dado o en una organización determinada, del cual se derivan las mediciones efectuadas en dicho lugar.
- **Patrón nacional.** Patrón reconocido por la legislación nacional para servir de base, en un país, en la asignación de valores a otros patrones de la magnitud afectada.
- **Patrón internacional.** Patrón reconocido por un acuerdo internacional para servir de base internacionalmente en la asignación de valores a otros patrones de la magnitud afectada. Los patrones internacionales se evalúan y verifican periódicamente con mediciones absolutas en términos de unidades fundamentales. La coordinación internacional de los patrones, corresponde a la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM) en Sévres, cerca de París.
- **Patrón primario.** Patrón que es designado o ampliamente reconocido como poseedor de las más altas cualidades metrológicas y cuyo valor se acepta sin referirse a otros patrones de la misma magnitud.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 4. Calibración de Instrumentos



- Tipos de estándar de unidad.
 - **Patrón secundario.** Patrón cuyo valor se asigna por comparación con un patrón primario de la misma magnitud. Normalmente los patrones primarios son utilizados para calibrar patrones secundarios.
 - **Patrón de trabajo.** Patrón que se utiliza corrientemente para calibrar instrumentos de medición o materiales de referencia.
 - **Patrón de transferencia.** Patrón utilizado como intermediario para comparar patrones. Las resistencias se utilizan como patrones de transferencia para comparar patrones de voltaje. Las pesas se utilizan para comparar balanzas.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 4. Calibración de Instrumentos



- ❑ Tipos y métodos de calibración.
 - **Tipos de calibración.** Atendiendo al resultado del proceso:
 - **Report calibration.** Proporciona los resultados de las medidas realizadas con el instrumento (errores) y las incertidumbres asociadas. No garantiza las características del instrumento más allá del momento en el que los datos fueron obtenidos. Para conocer cómo cambian las características del instrumento con el tiempo u otras variables, los fabricantes del equipo deben evaluar los resultados obtenidos en diferentes calibraciones.
 - **Limit tolerance calibration.** Es el método comúnmente utilizado en la industria. Comprueba que el error en la medida cumple las especificaciones nominales del instrumento. Si no las cumple se dice que está fuera de tolerancia y debe ser ajustado/reparado.
 - **Necesidad de calibración.** La calibración permite asegurar un nivel de confianza en los resultados de las medidas. Habitualmente, los fabricantes suministran los instrumentos calibrados y recomiendan unos intervalos máximos entre calibraciones para asegurar la exactitud indicada en las especificaciones. La exactitud de un instrumento puede empeorar por:
 - *Desgaste mecánico o envejecimiento de los componentes electrónicos.*
 - *Mal uso del operario.*
 - *Ajustes no autorizados.*



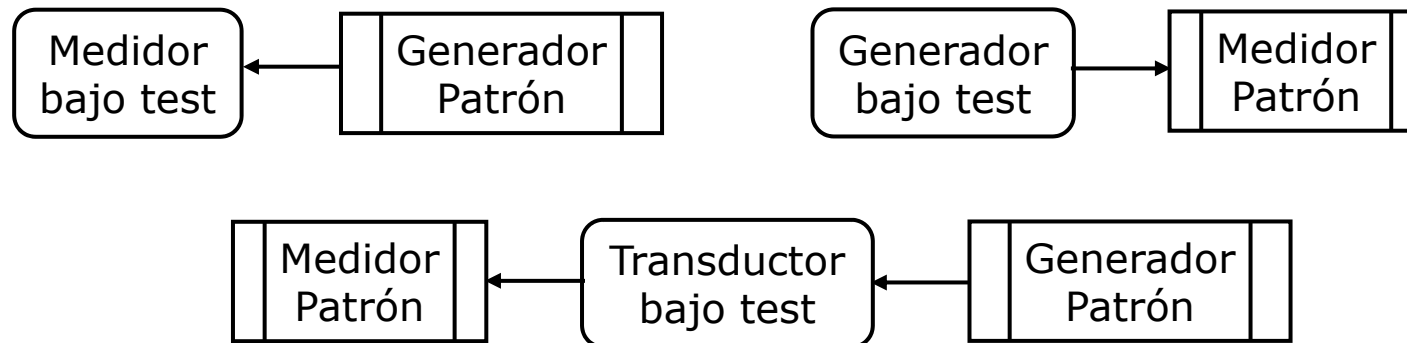
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 4. Calibración de Instrumentos



□ Tipos y métodos de calibración.

- **Métodos de calibración.** Para realizar la comparación entre el equipo patrón y el equipo objeto de calibración existen dos métodos fundamentales*:
 - *Comparación directa.*
 - *Comparación indirecta.*
- **Calibración mediante comparación directa.**



- En el CEM (Centro español de metrología) se puede acceder a muchos ejemplos de calibración de distintos instrumentos.



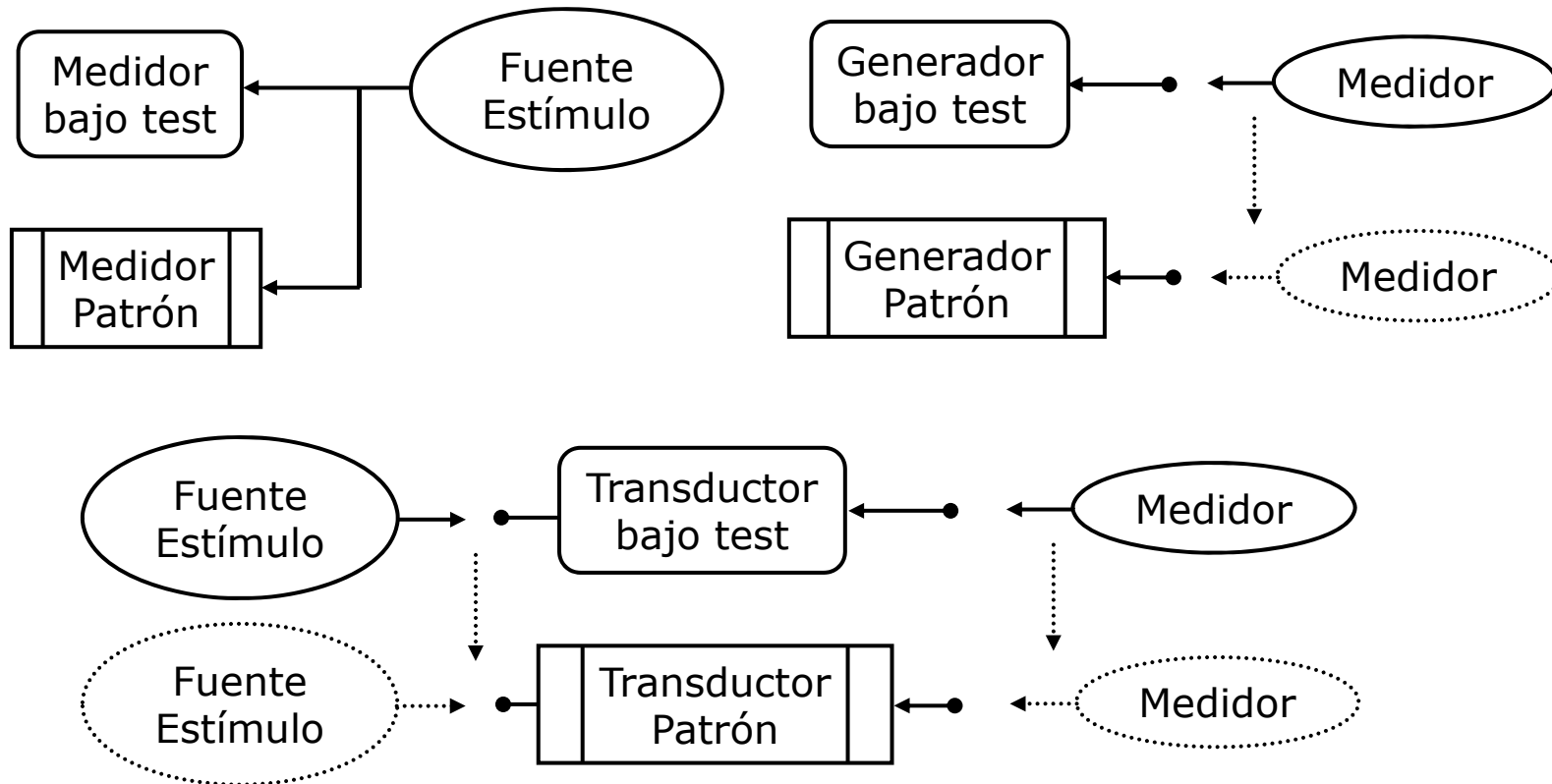
Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 4. Calibración de Instrumentos



□ Tipos y métodos de calibración.

- **Calibración mediante comparación indirecta.** El equipo bajo test se compara con un patrón de la misma función. Esto es, medidor bajo test con medidor patrón y generador bajo test con generador patrón.





Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 4. Calibración de Instrumentos



❑ Especificaciones de un instrumento.

Permiten determinar las características operacionales del instrumento. Se pueden distinguir los siguientes grupos de especificaciones:

- **Calificadores:** rangos y escalas de medida, margen de temperatura de funcionamiento, impedancia de entrada o salida, etc.
- **Incertidumbre base:** permite calcular la incertidumbre en su uso si se cumplen unas condiciones de funcionamiento (margen de temperatura, tiempo máximo desde calibración, etc.). Estas especificaciones pueden venir desglosadas en diferentes términos: exactitud, linealidad, precisión, etc. En general pueden aparecer 3 aportaciones: proporcional a medida/salida, proporcional a escala y suelo/fondo.
- **Modificadores:** representan aportaciones adicionales de incertidumbre como consecuencia de derivas (térmicas o temporales) o por cualquier otro efecto no incluido en la incertidumbre base.

Las especificaciones de incertidumbre se obtienen a partir del análisis de los errores medidos en un conjunto representativo de instrumentos. Por lo tanto son datos estadísticos y los límites de error indicados en las especificaciones deben cumplirlos la gran mayoría de los equipos (típicamente el 95 ó 99%). Dichos límites son los que se comprueban en las calibraciones periódicas de los instrumentos.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Índice



- ❑ Lección 0. Objetivos del tema.
- ❑ Lección 1. Sistemas de Instrumentación.
- ❑ Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento.
- ❑ Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida.
- ❑ Lección 4. Calibración de Instrumentos.
- ❑ **Lección 5. Seguridad Eléctrica y Compatibilidad Electromagnética.**
 - Seguridad Eléctrica.
 - Compatibilidad Electromagnética.
 - Mercado CE.
- ❑ Ejemplo de modelado de un sistema de medida: Sistema para la medida de distancias por IR.
- ❑ Referencias y bibliografía.



❑ Seguridad Eléctrica.

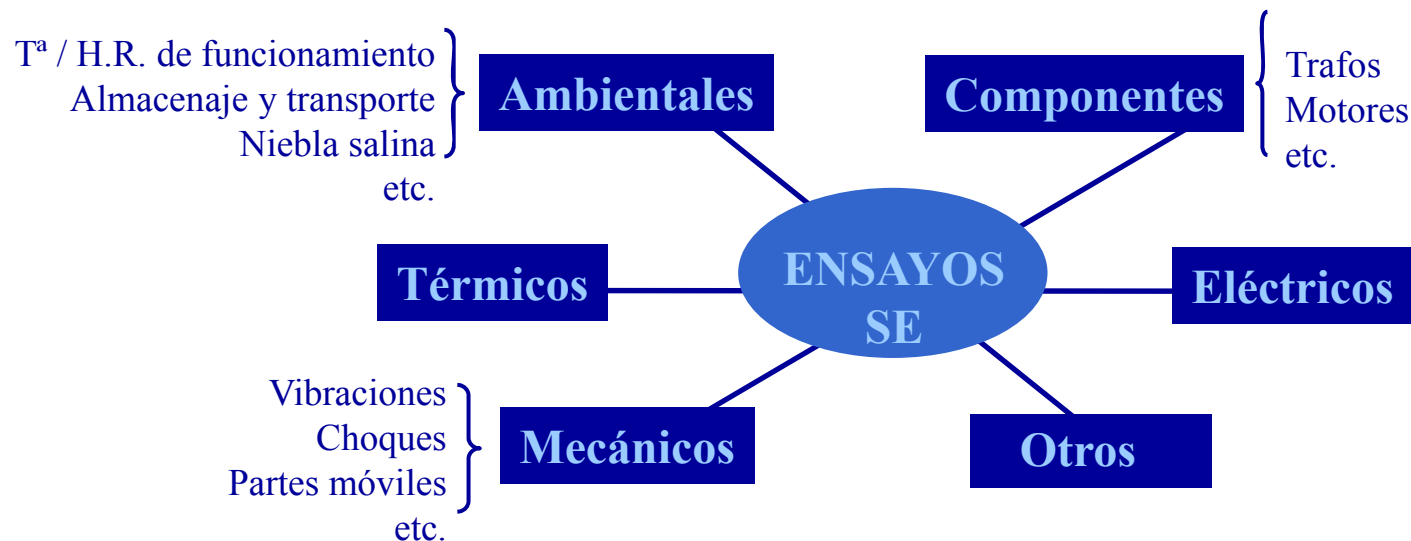
Los equipos deben cumplir unas normativas que garanticen un nivel de seguridad adecuado en su uso. La Seguridad Eléctrica está ligada a la Directiva 2006/95/EC “Directiva de Baja Tensión” (\neq Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión). Dicha normativa se aplica, con algunas exclusiones, al material eléctrico que utilice una tensión nominal comprendida entre 50-1.000 V en CA y 75-1.500 V en CC.

- Diseñar un equipo seguro lleva asociado un coste añadido. Por ello, la Seguridad Eléctrica de un equipo tiene que ser función de:
 - Quién va a utilizarlo (técnico de mantenimiento \leftrightarrow niño).
 - Dónde se va a usar (invernadero \leftrightarrow entorno doméstico)
 - Cuál es la aplicación del equipo (electrocardiógrafo \leftrightarrow multímetro)
- La Seguridad Eléctrica es un compendio de requisitos a los que se deben comprometer:
 - Fabricante. Diseño seguro y producción fiable.
 - Instalador. Utilización de material adecuado siguiendo las instrucciones del fabricante.
 - Usuario. Debe conocer y seguir las instrucciones del manual del equipo.
 - Personal de mantenimiento. Mantenimientos preventivos + repuestos correctos.



❑ Seguridad Eléctrica.

- La Seguridad Eléctrica pretende dar las pautas para el diseño de equipos seguros cubriendo múltiples disciplinas:
 - Choque eléctrico: Paso de corriente a través del cuerpo humano.
 - Peligros mecánicos: Bordes y esquinas cortantes, inestabilidad del equipo, partes móviles capaces de causar lesiones, etc.
 - Peligros térmicos: Quemaduras debido al contacto con partes accesibles, ignición de líquidos inflamables, degradación de aislamientos, etc.
 - Radiación, Peligros químicos, etc.





- Seguridad Eléctrica.
 - Ensayos eléctricos:
 - Continuidad de tierra.
 - Resistencia de aislamiento.
 - Rigidez dieléctrica (ensayo de tensión).
 - Corriente de fugas.

Norma	Campo de aplicación	Continuidad de tierra	Resistencia de aislamiento	Rigidez dieléctrica	Corriente de fugas
EN60065	Autómatas	Yes	Yes	Yes	Yes
EN60204-1	Equipo eléctrico de máquinas	Yes	Yes	Yes	No
EN60335-1	Electrodomésticos	Yes	Yes	Yes	Yes
EN60598-1	Luminarias	Yes	Yes	Yes	Yes
EN60601-1	Equipos médicos	Yes	No	Yes	Yes
EN60950	Tecnología de la información	Yes	Yes	Yes	Yes
EN61010-1	Medida, control y uso en labs.	Yes	No	Yes	Yes

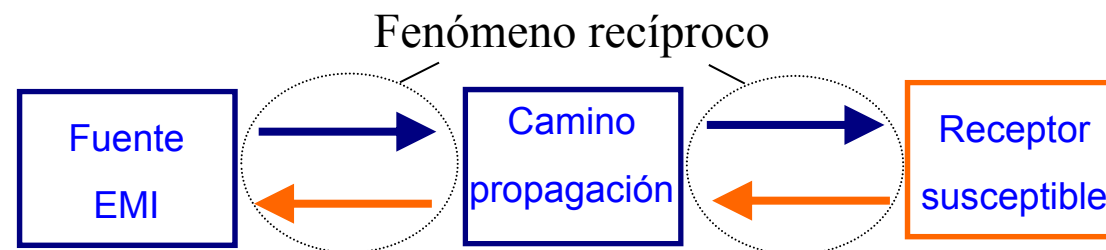


❑ Compatibilidad Electromagnética.

Los equipos que puedan crear perturbaciones electromagnéticas o que su funcionamiento pueda verse perjudicado por dichas perturbaciones, deben cumplir la directiva Europea 2004/108/CE.

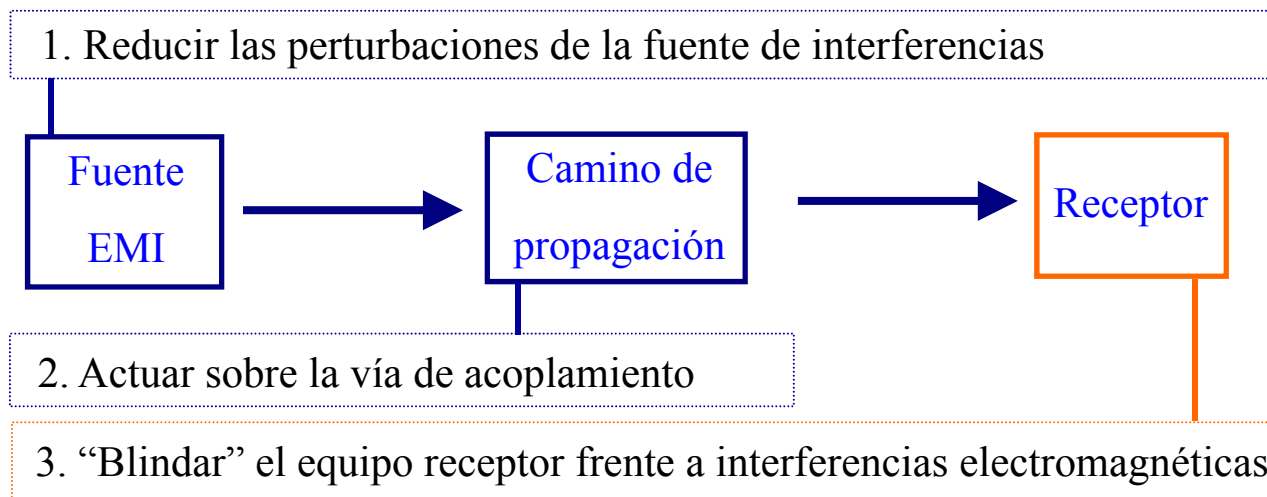
■ Definiciones:

- EMI: Interferencia Electromagnética. Perturbación que ocurre en cualquier aparato, equipo o sistema causada por una fuente electromagnética externa.
- EMC: Compatibilidad Electromagnética. Capacidad de cualquier aparato, equipo o sistema para funcionar de forma satisfactoria en su entorno electromagnético sin provocar perturbaciones electromagnéticas sobre cualquier cosa de ese entorno. Ni afectar ni ser afectado por EMI.
- EMS: Susceptibilidad Electromagnética. Capacidad de cualquier aparato, equipo o sistema para funcionar sin degradación en presencia de una perturbación electromagnética.



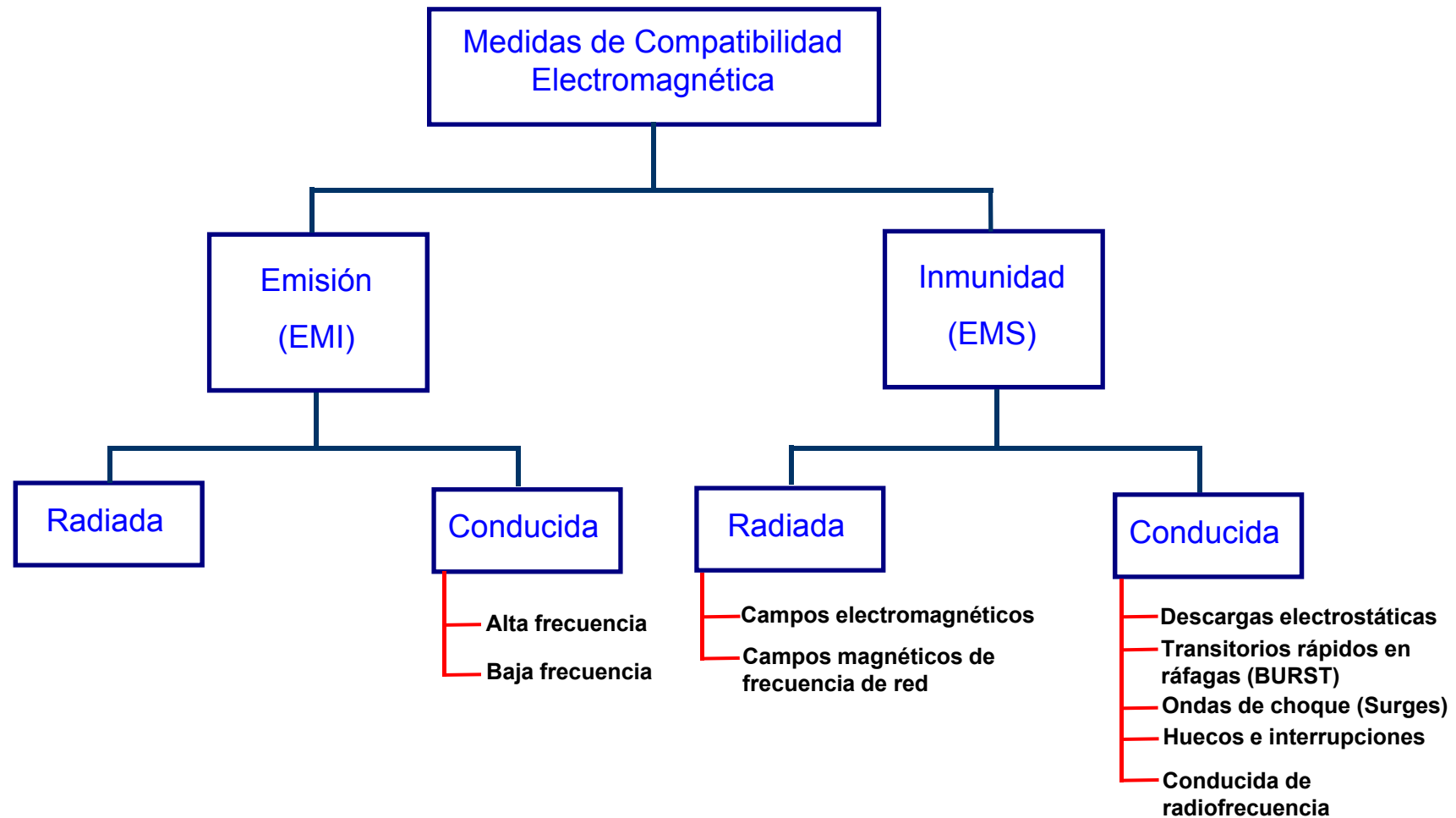


- ❑ Compatibilidad Electromagnética.
 - Fuentes de EMI.
 - Naturales. Tormentas eléctricas.
 - Artificiales intencionadas. Emisoras de radio, Wi-Fi, bluetooth...
 - Artificiales no intencionadas. Resto sistemas eléctricos/electrónicos.
 - Tipos de acoplo de interferencias.
 - Conducido. La interferencia se transmite entre fuente y receptor a través de un conductor eléctrico. Red eléctrica o comunicación por cable.
 - Radiado. La interferencia se transmite entre fuente y receptor a través del aire.



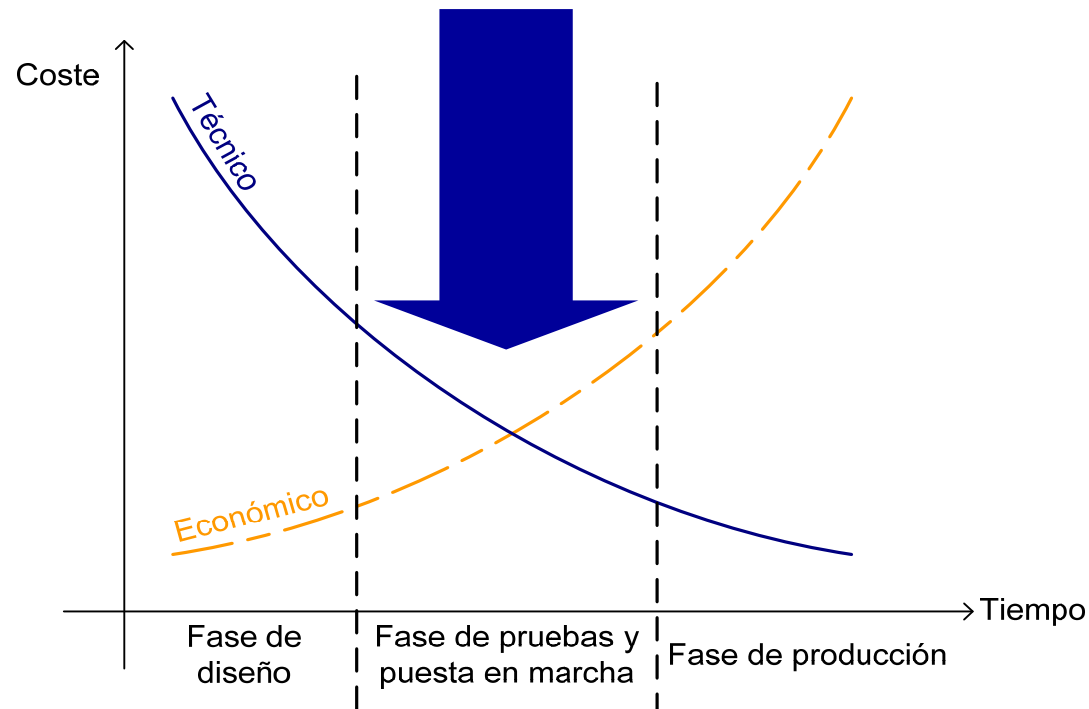


- ❑ Compatibilidad Electromagnética.
- Medidas de Compatibilidad Electromagnética.





- ❑ Compatibilidad Electromagnética.
- **Relación coste económico-coste técnico.** En las primeras fases de diseño las posibilidades técnicas para evitar problemas son muy altas y económicas, pero puede ser difícil identificarlas. Las posibilidades para eliminar los problemas en la fase de producción son reducidas y costosas.



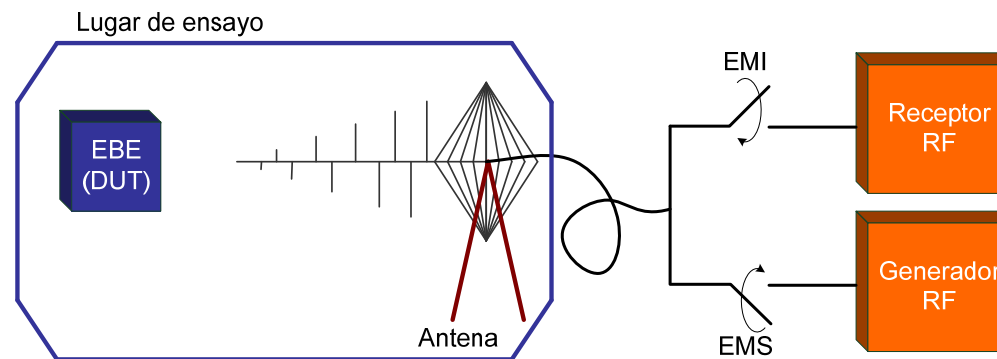


Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Lección 5. Seguridad Eléctrica y Compatibilidad Electromagnética



- ❑ Compatibilidad Electromagnética.
- Componentes básicos para la medida de EMC.
 - Antena:
 - EMI: Captan el campo electromagnético generado por el EBE (Equipo Bajo Ensayo) (*DUT: Device Under Test*).
 - EMS: Transmiten la perturbación hacia el EBE.
 - Lugar de Ensayo:
 - EMI: Campo abierto, Cámara Semianecoica.
 - EMS: Cámara Anecoica, Semianecoica "modificada", GTEM.
 - EMI: Receptor RF.
 - Analizador de espectros con detectores específicos.
 - EMS: Generador de RF.





❑ Mercado CE.

Es de obligado cumplimiento que todo producto comercializado o puesto en servicio dentro de la Unión Europea sea marcado CE, siempre que una Directiva de Nuevo Enfoque le sea de aplicación. El marcado CE indica que el equipo cumple todas las directivas que le son de aplicación.

■ Directiva de Nuevo Enfoque: Directiva Europea destinada a establecer el procedimiento para el Mercado CE de un producto. Establece:

- Campo de aplicación: productos cubiertos por la Directiva y exclusiones.
- Requisitos esenciales.
- Procedimiento de Evaluación de la Conformidad.
- Documentación Técnica.
- Declaración CE de Conformidad.



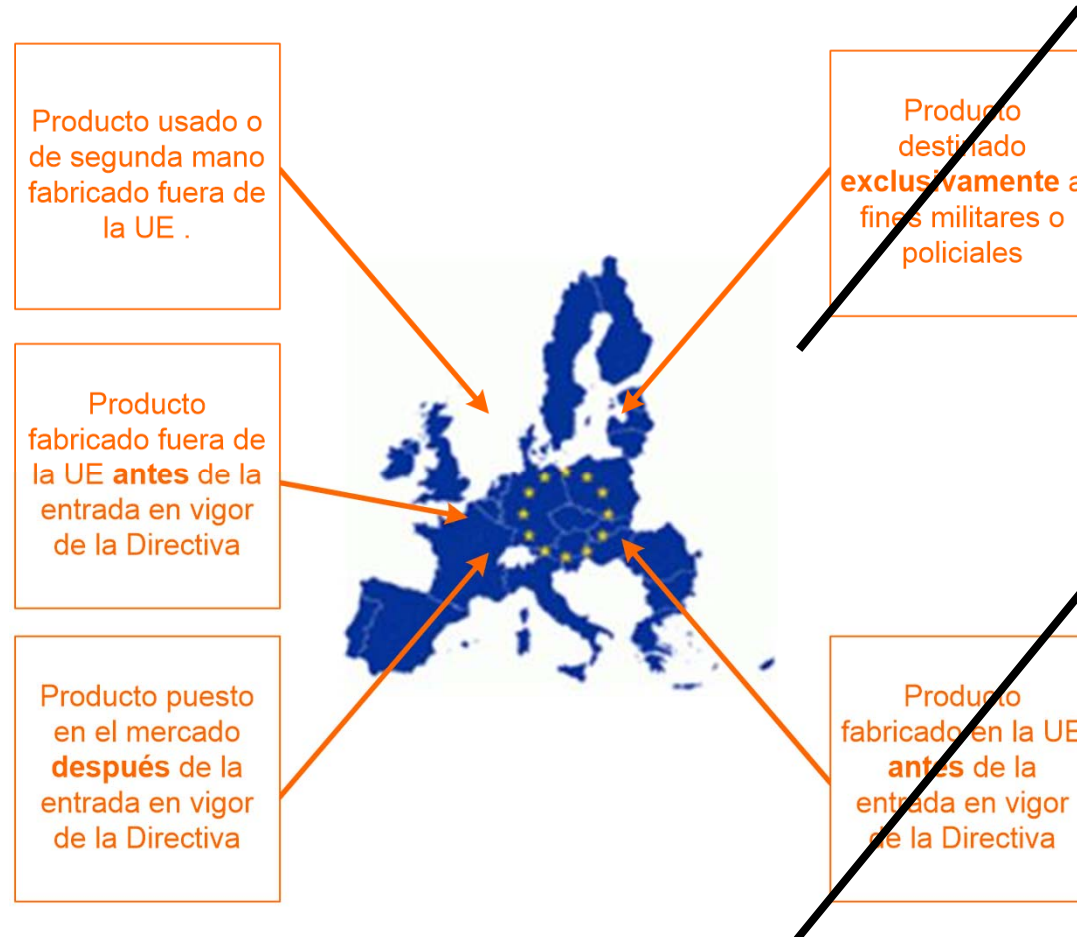
■ Consideraciones:

- El hecho de que las partes que forman un sistema/equipo dispongan de Mercado CE no implica que el sistema/equipo pueda ser Mercado CE. Además:

CE ≠ Chinese Exported



- ❑ Mercado CE.
- Alcance del mercado CE.





- ❑ **Mercado CE.**
- **Normas armonizadas.** Norma europea adoptada por los organismos de normalización europeos. Establecen los requisitos esenciales para dar cumplimiento a la Directiva de aplicación. Cada Directiva tiene una serie de normas armonizadas asociadas.
- **Organismo de normalización.** Entidad dedicada a la elaboración de normas armonizadas:
 - Internacionales: IEC (International Electrotechnical Commission), CISPR (Comité Internationale Spécial Perturbacions Radioelectriques), ISO (International Organization for Standardization) etc.
 - Europeos: CENELEC (Comité Europeo para la Normalización Electrotécnica, Normas EN), ETSI (Instituto para Normas de Telecomunicación Europeo, Normas ETSI), etc.
 - Nacionales: El organismo de normalización español es AENOR (Asociación Española de Normalización, normas UNE)
 - La transposición de normas también es labor de los organismos. Ejemplo:

UNE-EN ISO/IEC 17025



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Índice



- ❑ Lección 0. Objetivos del tema.
- ❑ Lección 1. Sistemas de Instrumentación.
- ❑ Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento.
- ❑ Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida.
- ❑ Lección 4. Calibración de Instrumentos.
- ❑ Lección 5. Seguridad Eléctrica y Compatibilidad Electromagnética.
- ❑ **Ejemplo de modelado de un sistema de medida: Sistema para la medida de distancias por IR.**
 - **Planteamiento del problema.**
 - **Identificación de fuentes de incertidumbre en la medida.**
- ❑ Referencias y bibliografía.

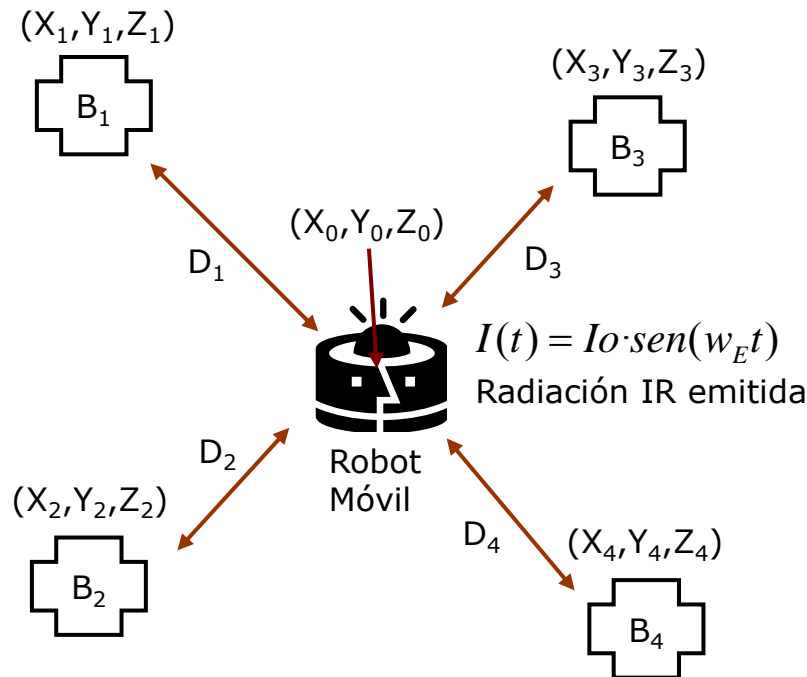


Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Ejemplo: Sistema para la medida de distancias por IR



- Planteamiento del problema.
- Medida de distancias diferenciales y sistema de ecuaciones para obtener (X_0, Y_0, Z_0) .



Por ejemplo: $f_E = 8\text{MHz} \rightarrow \lambda_E = c/f_E = 37.5\text{m}$

Sensibilidad en fase:
 $0.096^\circ/\text{cm}, 1.67 \cdot 10^{-3}\text{rd}/\text{cm}$

Señales recibidas:

$$R_1(t) = I_1 \cdot \text{sen}(w_E t + \varphi_1)$$

$$R_2(t) = I_2 \cdot \text{sen}(w_E t + \varphi_2) \dots$$

$$\varphi_1 = \frac{D_1}{\lambda} 2\pi + \varphi_{O1}(rd)$$

$$\varphi_2 = \frac{D_2}{\lambda} 2\pi + \varphi_{O2}(rd) \dots$$

$$D_1 - D_2 = \frac{(\varphi_1 - \varphi_{O1}) - (\varphi_2 - \varphi_{O2})}{2\pi f_E} c$$

$$D_3 - D_2 = \frac{(\varphi_3 - \varphi_{O3}) - (\varphi_2 - \varphi_{O2})}{2\pi f_E} c \dots$$

Tomamos uno de los receptores como referencia (existen otras posibilidades, por ejemplo, emisión vía radio de f_E). Calculamos, mediante calibración, las fases residuales (φ_{O_i}) y con las distancias diferenciales resolvemos el sistema de ecuaciones.

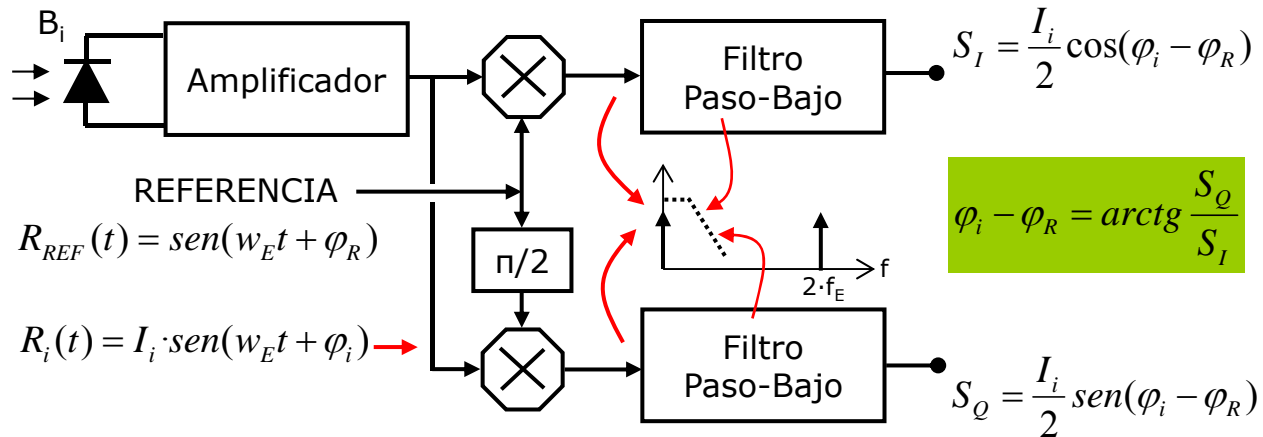


Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Ejemplo: Sistema para la medida de distancias por IR



- ❑ Planteamiento del problema.
- Obtención de las fases diferenciales. Un medidor de fase por receptor.



$$R_{REF}(t) \cdot R_i(t) = \text{sen}(w_E t + \varphi_R) \cdot I_i \text{sen}(w_E t + \varphi_i) = \frac{I_i}{2} [\cos(\varphi_i - \varphi_R) - \cos(2w_E t + \varphi_i + \varphi_R)]$$

$$R'_{REF}(t) \cdot R_i(t) = \cos(w_E t + \varphi_R) \cdot I_i \text{sen}(w_E t + \varphi_i) = \frac{I_i}{2} [\text{sen}(\varphi_i - \varphi_R) + \text{sen}(2w_E t + \varphi_i + \varphi_R)]$$

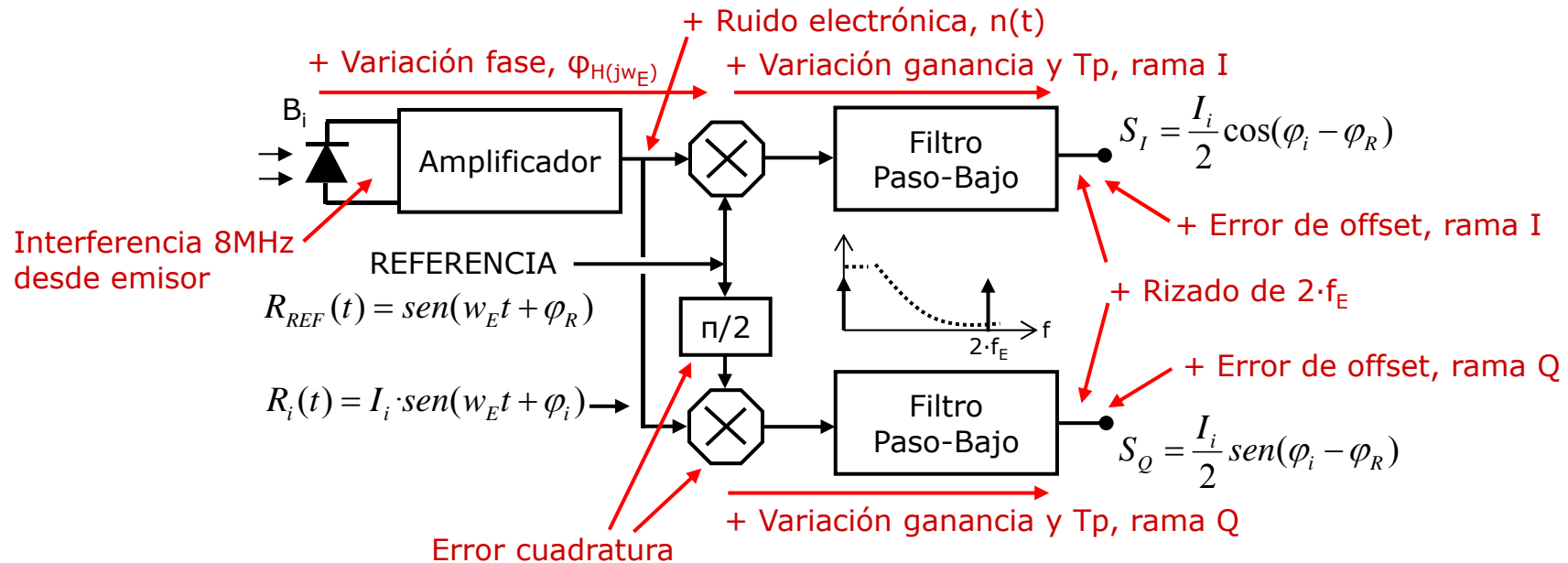


Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Ejemplo: Sistema para la medida de distancias por IR



- Identificación de fuentes de incertidumbre.
- Fuentes de incertidumbre en la electrónica.



En la siguiente expresión se incluyen algunos de los errores indicados:

$$\varphi_i|_{Estimada} - \varphi_R = \arctg \frac{G_Q I_i \text{sen}(\varphi_i + \varphi_{H(jw_E)} - \varphi_R) + n'_Q(t) + V_{OQ}}{G_I I_i \cos(\varphi_i + \varphi_{H(jw_E)} + \Delta\varphi_{\pi/2} - \varphi_R) + n'_I(t) + V_{OI}} = \varphi_i + \varepsilon_{\varphi_i} - \varphi_R$$

Las variaciones de temperatura y alimentación, envejecimiento componentes, errores residuales en los ajustes de parámetros, ruido e interferencias, limitan la exactitud.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Ejemplo: Sistema para la medida de distancias por IR



- Identificación de fuentes de incertidumbre.
- Desarrollo analítico del efecto del error de offset. Llamemos $\varphi = \varphi_i - \varphi_R$.

$$F(\varphi) = \arctg \frac{GI_i \text{sen}(\varphi) + V_{oo}}{GI_i \cos(\varphi) + V_{oi}} = \arctg \left[\frac{\text{sen}(\varphi)}{\cos(\varphi)} \frac{1 + \frac{V'_{oo}}{\text{sen} \varphi}}{1 + \frac{V'_{oi}}{\cos \varphi}} \right] \cong \arctg \left[\frac{\text{sen}(\varphi)}{\cos(\varphi)} \left(1 + \frac{V'_{oo}}{\text{sen} \varphi} - \frac{V'_{oi}}{\cos \varphi} \right) \right] =$$

$$= \arctg \left[u(\varphi) \left(1 + \frac{\Delta u(\varphi)}{u(\varphi)} \right) \right] \quad \text{Con: } u(\varphi) = \frac{\text{sen}(\varphi)}{\cos(\varphi)} \quad \text{Suponemos } \ll 1$$

$$dF(u) = \frac{du}{1+u^2} \rightarrow \Delta F(u) \cong \frac{\Delta u}{1+u^2} \quad \text{Con: } \Delta u = \frac{\text{sen}(\varphi)}{\cos(\varphi)} \left[\frac{V'_{oo}}{\text{sen}(\varphi)} - \frac{V'_{oi}}{\cos(\varphi)} \right]$$

Sustituyendo en $\Delta F(u)$: $\Delta F(u) = \Delta \varphi = V'_{oo} \cdot \cos(\varphi) - V'_{oi} \cdot \text{sen}(\varphi)$

Si las tensiones de offset son v.a. incorreladas pero de igual valor típico, V_{oo} , resulta:

$$\Delta \varphi = V'_{oo} = \frac{V_{oo}}{G \cdot I_i} \text{rd}$$

Por ejemplo, una incertidumbre típica de $\pm 1\text{cm}$, necesita que $G \cdot I_i / V_{oo} = 595$, supuesta una frecuencia de emisión de 8MHz.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

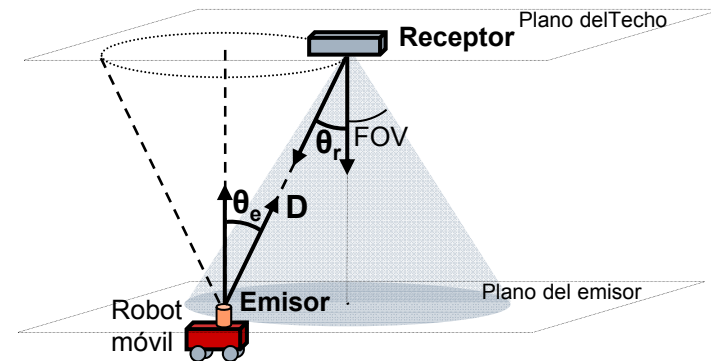
Ejemplo: Sistema para la medida de distancias por IR



- Identificación de fuentes de incertidumbre.
- Desarrollo analítico del efecto del error de offset.

La amplitud de la señal I_I depende de:

- Distancia entre emisor y receptor: $1/D^2$.
- Ángulo entre el camino directo y el eje de radiación del emisor $\approx \cos(\theta_e)$ (Lambertiano).
- Ángulo entre el camino directo y el eje del receptor de radiación $\approx \cos(\theta_r)$ (Lambertiano).



Si por ejemplo, el valor de $I_I \cdot G = 5V$ a 2m y con ángulos cero (perfectamente orientados emisor y receptor), para mantener una incertidumbre típica de $\pm 1cm$ a 10m con $\theta_e = \theta_r = 45^\circ$, las tensiones de offset típicas no pueden superar $168\mu V$ ($G \cdot I_I / V_{00} = 595$) para una frecuencia de emisión de 8MHz.

El incremento de la frecuencia de emisión, reduce la sensibilidad del sistema expresada en cm/rd, por lo que disminuye el error por offset.

Tanto el análisis realizado como sus conclusiones serían similares al estudiar el efecto del ruido de la electrónica. El desarrollo analítico del efecto de otros errores, se podría realizar mediante un procedimiento análogo al utilizado para el error de offset.



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Índice



- ❑ Lección 0. Objetivos del tema.
- ❑ Lección 1. Sistemas de Instrumentación.
- ❑ Lección 2. Errores e Incertidumbre de un Instrumento.
- ❑ Lección 3. Parámetros de los sistemas de medida.
- ❑ Lección 4. Calibración de Instrumentos.
- ❑ Lección 5. Seguridad Eléctrica y Compatibilidad Electromagnética.
- ❑ Ejemplo de modelado de un sistema de medida: Sistema para la medida de distancias por IR.
- ❑ **Referencias y bibliografía.**



Introducción a los Sistemas de Instrumentación

Referencias y Bibliografía



- ❑ P.H. Sydenham. Handbook of measurement science Vol.1 y 2. Ed. John Wiley&Sons.
- ❑ C.F.Coombs. Electronic Instrument Handbook. Ed. McGraw-Hill.
- ❑ Documentos en página web de la asignatura.
- ❑ <http://www.fluke.es>
- ❑ <http://www.agilent.es>
- ❑ <http://www.idm-instrumentos.es>
- ❑ <https://www.swe.siemens.com/SPAIN/WEB/ES/INDUSTRY/AUTOMATIZACION/Pages/Default.aspx>
- ❑ <http://industrial.omron.es/>