

# Tema I. Principios generales de Instrumentación

## Universidad Nacional del Callao-FIEE

- 1.1 Introducción.
- 1.2 Variables y señales.
- 1.3 Sistemas de medida.
- 1.4 Características estáticas.
- 1.5 Características dinámicas.
- 1.6 Errores de medición.
- 1.7 Calibración.

REVISADO POR: ING. JACOB ASTOCONDOR VILLAR

# 1.1 Introducción

- Captación y medida de magnitudes físicas

## INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA



- Conceptos básicos de media.
- Circuitos electrónicos.
- Interferencias electromagnéticas.
- Sensores.
- Sistemas de adquisición de datos.



El ser humano percibe la información del mundo que le rodea a través de sus sentidos y adquiere el conocimiento, sobre todo el científico, cuando es capaz de cuantificar las magnitudes que percibe, es decir, a través de la medida. La Instrumentación Electrónica es la técnica que se ocupa de la medición de cualquier magnitud física, de la conversión de la misma a magnitudes eléctricas y de su tratamiento para proporcionar la información adecuada a un operador (visualización), a un sistema de control o a ambos.

## 1.2 Variables y señales

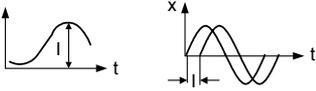
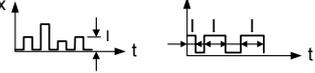
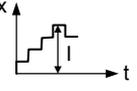
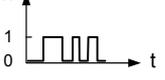
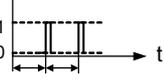
Naturaleza de la variable	Tipo de variable
<b>Mecánica</b>	Fuerza, presión, aceleración, espesor, nivel, posición
<b>Térmica</b>	Temperatura, calor específico, entropía, etc.
<b>Magnética</b>	Campo magnético, flujo, permeabilidad magnética
<b>Eléctrica</b>	Tensión, corriente, carga, conductividad, resistencia
<b>Óptica</b>	Amplitud, fase, índice de refracción, emisividad
<b>Biológica</b>	Proteínas, hormonas, células, glucosa, colesterol
<b>Química</b>	Humedad, Composición, concentración, pH

**Señal:** variable, en la que la información es de naturaleza eléctrica

Como hemos dicho, la instrumentación electrónica se encarga de la captación y medida de magnitudes físicas. La información (datos) de una determinada magnitud física se denomina variable. Cuando esta información es de naturaleza eléctrica, la variable se denomina señal.

Existe una gran variedad de magnitudes susceptibles de poder ser medidas. La tabla agrupa las distintas magnitudes físicas según sea su naturaleza.

# Señales analógicas y discretas

		Sin cuantificación de tiempo (continua)	Con cuantificación de tiempo (discontinua)
Análogicas		Señal analógica continua 	Señal analógica discontinua 
	Discretas	Multipunto Señal multipunto continua 	Señal multipunto discontinua 
Binarias		Señal binaria continua 	Señal binaria discontinua 

Las señales pueden ser clasificadas atendiendo a diferentes criterios:

- **Señales analógicas:** no tienen cuantificación en el parámetro de información.
- **Señales discretas:** debido a la cuantificación, la información solo puede tomar un número finito de valores.

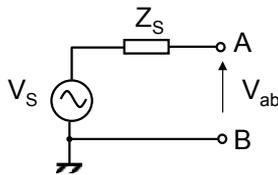
En las señales dependientes del tiempo, el parámetro de información puede cambiar en cualquier instante (señales continuas) o bien los cambios solo son posibles en instantes de tiempo discretos, debido a la cuantificación de tiempo.

Un caso de especial importancia son las **señales binarias**, las cuales solo pueden tomar dos valores de amplitud discretos, 0 y 1. Las **señales digitales** solo puede tomar dos valores de amplitud discretos en instantes concretos.

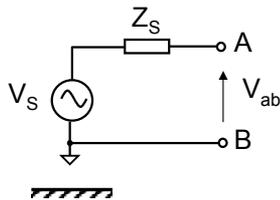
- **Señales deterministas:** se conoce el comportamiento completo de la señal, incluso su comportamiento futuro. Por ejemplo señales de test como la función impulso o la función escalón.
- **Señales no deterministas:** se desconoce su comportamiento. Si son descritas por una distribución de probabilidad, se denominan señales **estocásticas**.

# Señales unipolares

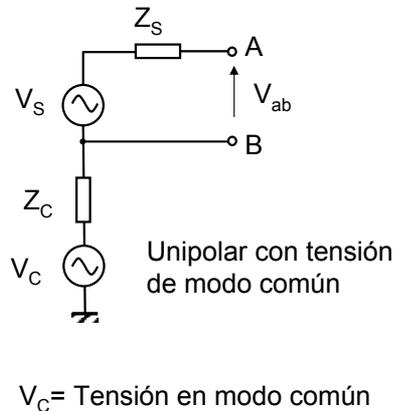
➤ Se tienen entre un terminal y otro de referencia



Unipolar con puesta a tierra



Unipolar flotante



Unipolar con tensión de modo común

$V_C =$  Tensión en modo común

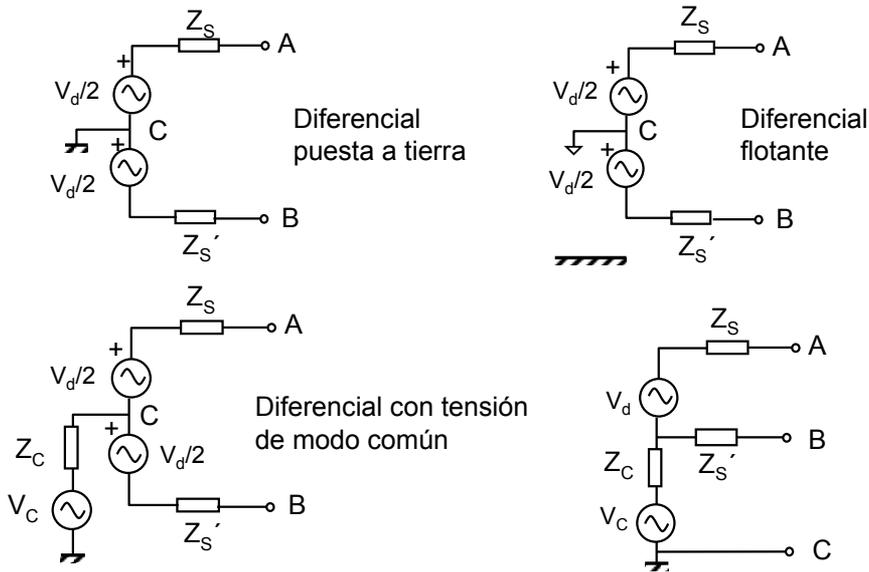
Según la **configuración de los terminales de la señal**, éstas pueden ser:

- **Unipolares**: se tienen entre un terminal y otro de referencia.

El terminal de referencia puede estar conectado a tierra, puede ser independiente de tierra (*señal unipolar flotante*). Si entre el terminal de referencia y tierra existe una tensión se dice que es una **tensión en modo común** y no se puede conectar a tierra ninguno de los terminales de la señal; la impedancia equivalente del generador de modo común puede tener valores muy dispares según el caso.

Un termopar conectado a la carcasa de una turbina de vapor para medir la temperatura ofrece una señal unipolar puesta a tierra por estarlo la turbina. El mismo termopar pero encerrado dentro de una vaina de acero y aislado de ella ofrece una señal, en principio, flotante. Si en vez de estar montado sobre la turbina lo está sobre un cable de alta tensión, esta tensión aparece en modo común a los terminales del termopar, y en serie con una impedancia (alta) determinada por el acoplamiento capacitivo entre el cable y tierra.

## Señales bipolares o diferenciales



• **Bipolares o diferenciales:** se tienen entre dos terminales que son independientes del terminal de referencia, el cual puede estar o no conectado a tierra. La impedancia entre cada uno de los dos terminales de señal y el de tierra es similar. La polaridad con que se tomen las señales es irrelevante: solo cambia el signo. Hay también tres posibilidades: señal diferencial puesta a tierra, flotante o con tensión de modo común, que es lo más frecuente.

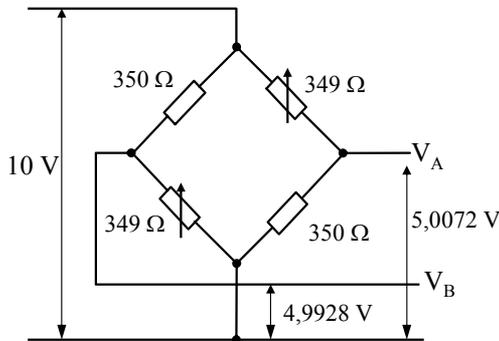
El punto de referencia para las señales flotantes, o uno cualquiera de los terminales de señal, puede conectarse a tierra; para las señales con tensión de modo común, no se puede conectar a tierra ningún terminal, ni siquiera el de referencia. Se puede, sin embargo, invertir la polaridad de la salida.

Las señales diferenciales se distinguen porque las diferencias de potencial respectivas entre cada terminal y el de referencia varían simultáneamente en la misma magnitud pero en sentido opuesto. Sin embargo, muchas veces se emplea un circuito equivalente como el de la figura inferior derecha, donde esta propiedad no queda patente; obsérvese que aquí el terminal C no coincide con el punto C de la figura inferior izquierda.

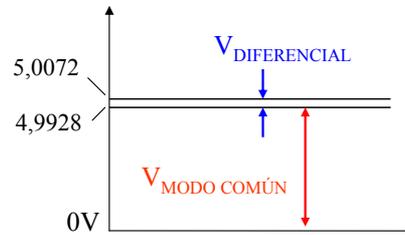
Obviamente, mientras una señal unipolar puede darse con dos terminales, una señal diferencial necesita siempre al menos tres terminales para su representación: alto, A; bajo, B y común, C.

# Ejemplo

## ➤ Puente de impedancias



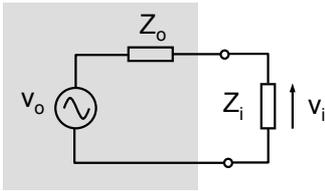
$$V_{\text{DIF}} = V_A - V_B = 5,0072 - 4,9928 \text{ V} \\ = 0,0144 \text{ V}$$



Un ejemplo de señal diferencial es la que se tiene en un puente de impedancias alimentado por una fuente de tensión o de corriente. Si en alguna de las ramas del puente colocamos un sensor cuya resistencia sufra una pequeña variación (como consecuencia de la variación de una magnitud física), el puente se desequilibra y en la salida se obtiene una pequeña tensión diferencial.

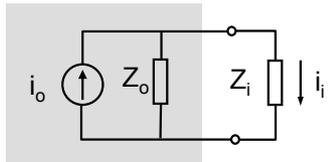
**El puente de impedancias responde a la variación de la resistencia (que es realmente la información que queremos detectar) y elimina la señal de modo común que no contiene información.** El pequeño valor de la señal diferencial hace necesaria su amplificación.

## Señales de baja y alta impedancia de salida



$$v_i = v_o \frac{Z_i}{Z_i + Z_o}$$

Medida de tensión ( $v_i \approx v_o$ )  $\Rightarrow Z_i \gg Z_o$



$$i_i = i_o \frac{Z_o}{Z_i + Z_o}$$

Medida de corriente ( $i_i \approx i_o$ )  $\Rightarrow Z_i \ll Z_o$

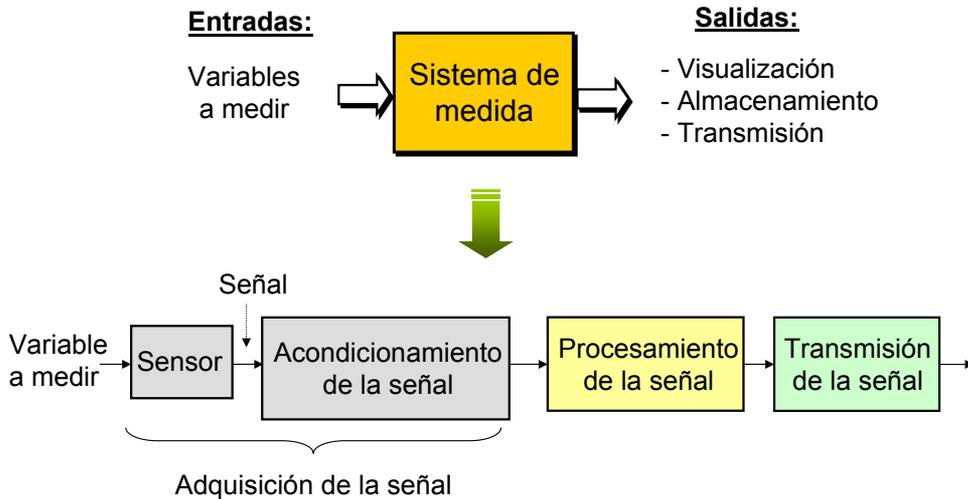
➤ Máxima transferencia de potencia:  $R_i = R_o$

Las señales se pueden clasificar también atendiendo al valor de su impedancia de salida,  $Z_o$ .

Si lo que se quiere medir es una tensión se puede ver con facilidad que la impedancia de entrada del dispositivo de medida  $Z_i$  debe ser mucho mayor que la de salida, sino se quiere que la señal resulte atenuada. En cambio si lo que se desea medir es una corriente la situación es la contraria: la impedancia de entrada ha de ser mucho menor que la de salida de la señal.

Si lo que se desea es transmitir la máxima potencia de un elemento al siguiente y como suele ser habitual las impedancias son resistivas, la resistencia de entrada y de salida deben ser iguales (teorema de la máxima transferencia de energía).

## 1.3 Sistemas de medida



Un sistema de medida electrónico es aquel equipo electrónico cuya finalidad es obtener información acerca de un proceso físico y presentar dicha información en la forma adecuada a un observador u a otro sistema técnico de control. En un sistema de medida podemos distinguir tres funciones principales:

- **Adquisición de señal.** La información de las magnitudes físicas es adquirida y convertida en una señal eléctrica. De esta etapa dependerá en buena parte de las prestaciones del sistema de medida. La variable del mundo físico es convertida en una señal eléctrica mediante un dispositivo **sensor** a fin de poder ser procesada adecuadamente. Con frecuencia, la señal procedente del sensor tiene unas características que la hacen poco adecuada para ser procesada: señal de pequeño nivel, espectro grande, falta de linealidad, etc. Estas funciones se realizan en la etapa de **acondicionamiento** de la señal.
- **Procesamiento de señal.** Consiste en el procesamiento, selección y manipulación de los datos con arreglo a los objetivos perseguidos. Esta función suele ser realizada por algún tipo de procesador digital (microcontrolador, DSP).
- **Transmisión de señal.** El valor medido se presenta a un observador (p.e. mediante un display), se almacena (por ejemplo, en disco o en un chip de memoria) o bien se transmite a otro sistema de medida o de control.

# Clasificación de los sensores

## Según el aporte de energía

- **Moduladores:** requieren una fuente de energía auxiliar (termistor)
- **Generadores:** no requieren fuente de energía auxiliar (termopar)

## Según el parámetro variable

- Resistivos
- Inductivos
- Capacitivos
- Magnéticos
- Ópticos

## Según la magnitud medida

- Temperatura
- Presión
- Flujo, caudal
- Posición
- Desplazamiento
- Velocidad
- Aceleración
- Nivel
- Humedad
- Fuerza, par
- etc.

La gran variedad de sensores disponible para medir las distintas magnitudes físicas hace necesario una clasificación que facilite su estudio. Los criterios más importantes son:

**a) Según el aporte de energía.** Pueden ser:

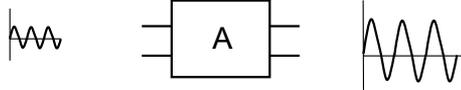
- **Moduladores:** necesitan para su funcionamiento de una fuente de energía auxiliar (p.e termistores). Se emplean principalmente para medir señales débiles. Su sensibilidad se puede modificar a través de la señal de alimentación.
- **Generadores:** no requieren la presencia de una fuente de energía auxiliar para funcionar. Por ejemplo los termopares producen directamente una tensión de salida proporcional a la temperatura.

**b) Según la magnitud medida:** sensores de temperatura, presión, caudal, humedad, posición, velocidad, aceleración, fuerza, par, etc. Esta clasificación es la más extendida en los libros de instrumentación. Sin embargo tiene el inconveniente de la gran variedad de sensores.

**c) Según el parámetro variable:** resistivos, capacitivos, inductivos, magnéticos, ópticos, etc. Según este criterio se reduce el número de tipos de sensores. Además los sensores de un mismo parámetro variable también comparten la circuitería de acondicionamiento.

# Acondicionamiento de la señal

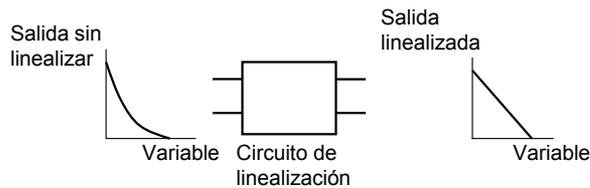
- **Amplificación:**



- **Filtrado:**



- **Linealización:**



- **Conversión de magnitud:**  $R \rightarrow V, V \rightarrow I, I \rightarrow V, V \rightarrow f$

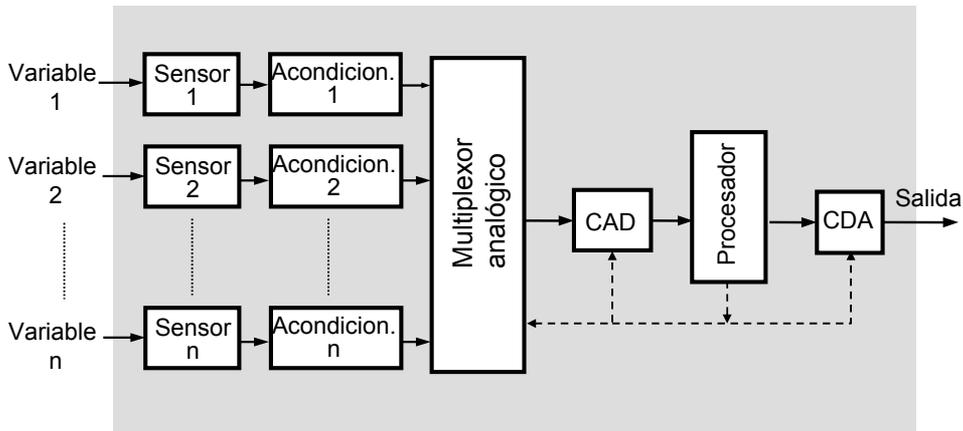
La **amplificación de señales** se realiza cuando se considera que el nivel típico de salida de un sensor es demasiado bajo. La amplificación por medios analógicos se realiza con la ayuda de un amplificador operacional, el cual requiere una impedancia de entrada elevada para minimizar los efectos de carga en la señal de salida. Cuanto antes podamos elevar los niveles de las señales, tanto mejor porque los posibles ruidos que se introduzcan en el circuito resultarán cuantitativamente menores.

El **filtrado de señales** consiste en eliminar cierta banda de frecuencias dentro de ellas. El intervalo de frecuencias que deja pasar un filtro es la banda de paso, el intervalo que no se deja pasar es la banda de rechazo y los límites entre ambos intervalos son las frecuencias de corte.

La **linealización** consiste en obtener una señal de salida que varíe linealmente con la variable que se desea medir. Un caso bastante frecuente es el de un sensor donde la salida es exponencial con respecto a la variable a medir.

La **conversión de señal** se requiere cuando es necesario convertir un tipo de variación eléctrica en otro. Así un gran número de sensores varían su resistencia como consecuencia de la variación de la variable a medir. En estos casos se requiere un circuito que convierta estos cambios de resistencia en una tensión o en una corriente. Es bastante frecuente también en la transmisión de una señal (sobre todo a largas distancias) la necesidad de realizar una conversión de tensión a corriente y viceversa.

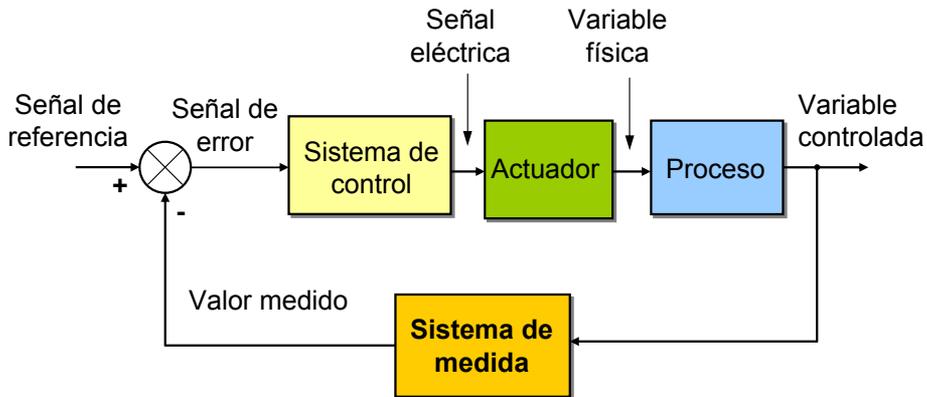
## Medida de múltiples variables



**Qué hacer cuando se requiere capturas simultánea?**

Cuando es necesario medir más de una variable de entrada, se recurre a sistemas de adquisición de datos más o menos complejos. Una primera solución se muestra en la figura. Cada variable es acondicionada de forma independiente. En este caso las señales acondicionadas son procesadas de forma secuencial. Si fuera necesaria una captura simultánea de las variables involucradas (p.e la medida de un desfase) el esquema anterior no serviría. En el tema siguiente veremos la circuitería para realizar este tipo de medidas.

# La medida en el control de procesos



- **No se puede controlar una variable con mayor exactitud a como la podemos medir.**

La instrumentación electrónica tiene una especial incidencia en el entorno industrial y mas concretamente en el control de procesos. La realidad es que estas dos disciplinas, instrumentación y control, están fuertemente imbricadas hasta el punto de que comparten algunos criterios de diseño, afectando las decisiones de una directamente a la otra. En realidad, la frontera entre instrumentación y control no siempre es evidente. El ámbito del control se delimita cuando los criterios de diseño quedan establecidos por la teoría de la regulación automática.

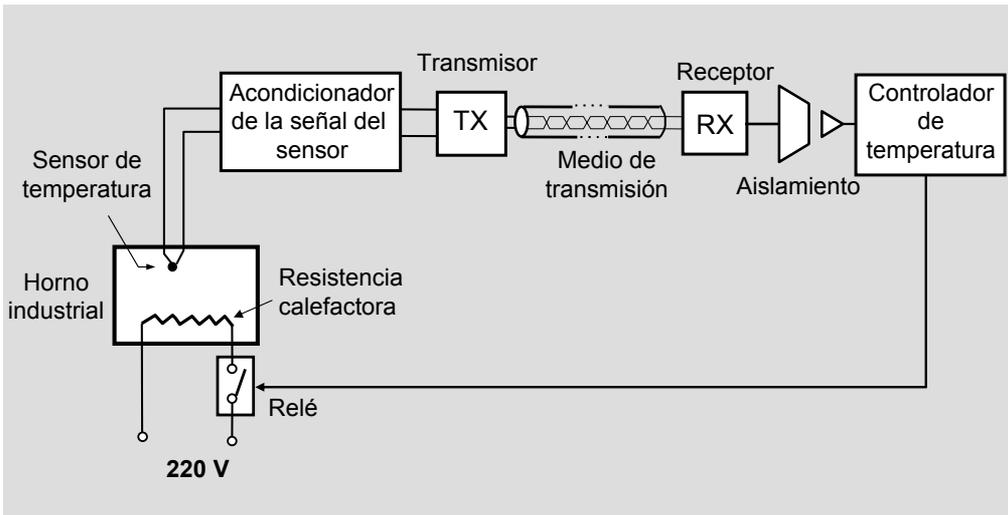
La figura muestra un diagrama de bloques de un sistema de control, cuyo objetivo es mantener controlada una variable de salida en un cierto valor.

El valor de la variable controlada se determina con la ayuda del sistema de medida. Este valor se compara con el valor de referencia, y la diferencia (señal de error) se aplica al sistema de control, el cual se encarga de generar las señales necesarias al **actuador** para que actúe sobre proceso a fin de mantener controlada la variable de salida.

Los sistema de control pueden ser analógicos (emplean circuitos analógicos para el control) o digitales (basados en procesadores digitales).

**No se puede controlar una variable con mayor exactitud a como la podemos medir; así que la medida es un elemento fundamental para el control.**

## Ejemplo: Control de temperatura



La medida de la temperatura es sin duda una de las mediciones más frecuentes y más importantes que se suelen efectuar en los procesos industriales. La mayoría de los sistemas físicos, electrónicos, químicos, mecánicos y biológicos se ven afectados de una u otra forma por la temperatura. Algunos procesos trabajan bien solo dentro de un margen estrecho de temperatura: ciertas reacciones químicas, procesos biológicos e incluso circuitos electrónicos se comportan mejor dentro de ciertos límites de temperatura. Cuando estos procesos necesitan ser optimizados, se requiere la medida de la temperatura.

La figura muestra un sistema de control de la temperatura de un horno industrial, la cual ha de estar comprendida entre ciertos límites. La señal proporcionada por el sensor de temperatura es acondicionada en las proximidades del horno y enviada a un dispositivo de control que puede o no encontrarse en el mismo lugar del horno. En este último caso la señal puede enviarse directamente o bien modulada. El dispositivo controlador, en función del valor medido de temperatura, dará las ordenes oportunas al dispositivo de potencia para mantener la temperatura dentro de los límites requeridos.

## 1.4 Características estáticas

➤ Comportamiento del sistema frente a entradas de valor constante.

- Curva de calibración
- Sensibilidad
- Campo de medida
- Exactitud
- Repetibilidad
- Linealidad
- Resolución
- Histéresis

➤ Se supone que la variable a medir no se ve afectada por el método de medida (efecto de carga).

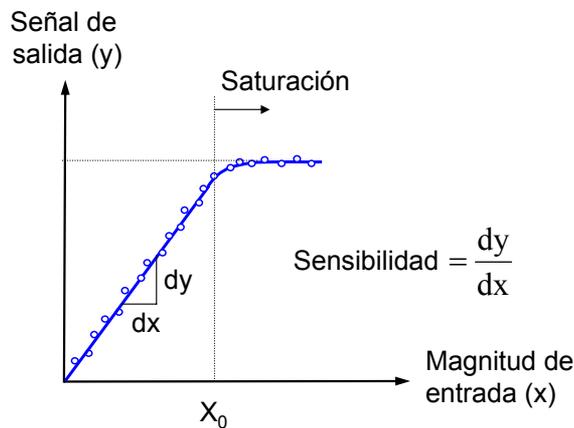
El comportamiento de un sensor o de un instrumento de medida, en general, se puede definir mediante la **función de transferencia**, que indica tanto el comportamiento en régimen estático como dinámico. El primero corresponde a la relación entre la entrada y la salida cuando la entrada es constante o cuando ha transcurrido un tiempo suficiente para que la salida haya alcanzado el valor final o régimen permanente. El segundo indica la evolución del sistema hasta que la salida alcanza el valor final ante una variación en la entrada.

Una función de transferencia que recogiese con rigurosidad ambos comportamientos resultaría tremendamente compleja por lo que, en la práctica, suelen estudiarse por separado mediante una serie de parámetros. En este punto se estudiarán las principales características estáticas.

Estamos suponiendo que la variable a medir no se ve afectada por el sistema de medida. Esto no siempre es así, por ejemplo si medimos la temperatura de un dispositivo mediante un método que afecte a dicha temperatura, estamos cometiendo un error en la medida. Por lo tanto además de las características estáticas y dinámicas habrá que considerar el **efecto de carga** que el método de medida introduce.

# Curva de calibración

- Se obtiene aplicando sucesivos valores de la magnitud de entrada y anotando los respectivos valores de salida.



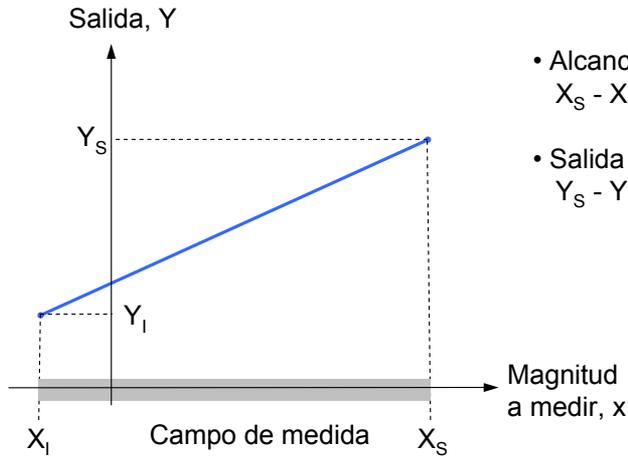
La **curva de calibración** de un sensor o de un sistema de medida en general es la línea que une los puntos obtenidos aplicando sucesivos valores de la magnitud de entrada e ir anotando los respectivos valores de salida. Los valores de entrada se determinan con un sistema de medida de calidad superior al que se está calibrando.

La **sensibilidad** (*sensitivity*) es la pendiente de la curva de calibración. Interesa que la sensibilidad sea alta y, si es posible, constante. Si esta es una recta la sensibilidad es constante y se dice que es el sistema o sensor es lineal. Lo importante no es tanto el que sea lineal (ya que se de no serlo se podría linealizar) sino que la medida sea repetible, es decir, que a la misma entrada le corresponda siempre la misma salida.

En el ejemplo de la figura se tiene una respuesta lineal para valores de la variable de entrada menores que  $X_0$ . Para valores mayores que  $X_0$ , la curva de calibración se hace menos sensible hasta que alcanza un valor límite para la señal de salida. Este comportamiento se conoce como **saturación**, por lo que no sería adecuado su empleo para medir valores mayores que su valor de saturación.

Es normal que los puntos no estén localizados exactamente sobre la línea, por el contrario, se localizarán a cualquier lado de ella. La magnitud de las excursiones de los puntos a la línea dibujada dependerá de la magnitud de los **errores aleatorios** de la medición que están asociados con los datos.

## Campo o margen de medida



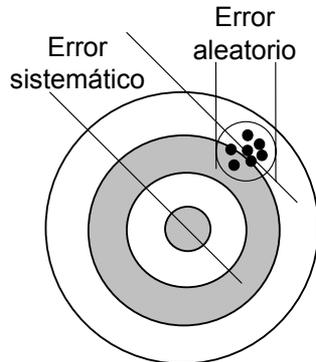
- Alcance o fondo de escala:  
 $X_S - X_I$
- Salida a fondo de escala:  
 $Y_S - Y_I$

Para definir la curva de calibración adecuadamente se necesita como mínimo indicar su forma y sus límites. Estos últimos se especifican con algunos de los siguientes parámetros:

- **Campo o margen de medida** (*range*): es el conjunto de valores comprendidos entre los límites superior e inferior entre los cuales se puede efectuar la medida.
- **Alcance o fondo de escala** (*span, FS*): es la diferencia entre los valores máximo y mínimo de la variable que se pueden medir de forma fiable. No confundir este término con el límite superior de medida, ya que solo coinciden si el límite inferior es cero. También se conoce como **margen dinámico**, aunque, empleado en este contexto puede resultar algo confuso ya que no describe una característica dinámica.
- **Salida a fondo de escala** (*full scale output*): es la diferencia entre las salidas para los extremos del campo de medida.

# Exactitud y error

- **Precisión** (*precision*): grado de concordancia entre los resultados.
- **Exactitud** (*accuracy*): grado de concordancia entre el valor exacto de la entrada y el valor medido.  
Se suele expresar como un porcentaje del fondo de escala.



Precisión alta, Exactitud baja

• **Error absoluto:**  $\Delta x = |x - x_0|$

• **Error relativo:**  $\varepsilon = \left| \frac{\Delta x}{x} \right|$

$x$  = valor medido  
 $x_0$  = valor exacto

• **Precisión** (*precision*): es el grado de concordancia entre los resultados. También se suele encontrar con el nombre de **fidelidad**. Una indicación de la precisión de una medida es mediante el **número de cifras significativas** con las que se expresa un resultado. Por ejemplo si el valor de una tensión es de 5,0 V, el número de cifras significativo es dos. En el caso de un instrumento digital se habla de número de dígitos significativos. En los cálculos hay que tener cuidado de no expresar el resultado con más cifras significativas que las de los números empleados en dichos cálculos.

• **Exactitud** (*accuracy*) es el grado de concordancia entre el valor exacto (“real”, “verdadero”) de la entrada y el valor medido. Se suele expresar como un porcentaje del fondo de escala. La exactitud nos está indicando el máximo error que puede existir en la medición, por lo que en realidad debería hablarse de **inexactitud** más que de exactitud. En algunas ocasiones se utiliza, con el mismo significado, la frase **incertidumbre de la medición**.

Es frecuente oír hablar indistintamente de precisión y exactitud, aunque, como hemos visto, la diferencia entre ambos es bien significativa.

# Repetibilidad

➤ Es una forma alternativa de expresar la precisión.

- **Repetibilidad:** grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mesurando, realizadas bajo las mismas condiciones de medida
- **Reproducibilidad:** grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mesurando, realizadas bajo diferentes condiciones de medida.

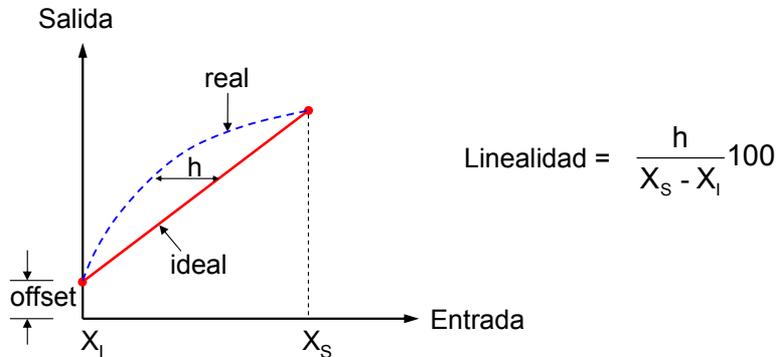
Los términos repetibilidad y reproducibilidad tienen un significado muy parecido, aunque se aplican en diferentes contextos.

- **Repetibilidad:** se refiere grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mesurando, realizadas bajo las mismas condiciones de medida.
- **Reproducibilidad:** grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mesurando, realizadas bajo diferentes condiciones de medida. Las medidas pueden realizarse a largo plazo o por personas distintas o con distintos aparatos o en distintos laboratorios.

Las características anteriores se definen cuantitativamente, como el valor por debajo del cual se encuentra, con una probabilidad especificada, el valor absoluto de la diferencia entre dos resultados individuales obtenidos en las condiciones anteriores. Si no se dice lo contrario, la probabilidad que se toma es del 95%.

# Linealidad

- Máxima desviación de la curva de calibración con respecto a la línea recta por la que se ha aproximado.



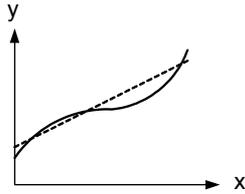
- La linealidad no es una característica crítica, es más importante la repetibilidad.

Resulta deseable que la lectura de salida de un instrumento sea linealmente proporcional a la cantidad que se mide. La **linealidad** se define como la máxima desviación de la curva de calibración con respecto a una línea recta determinada por la que se ha aproximado. Habitualmente se suele expresar en forma porcentual con respecto al alcance. También se conoce como **no linealidad** o **error de linealidad**.

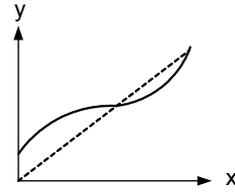
La linealidad expresa hasta que punto es constante la sensibilidad del sensor. El interés de la linealidad está en que la conversión lectura-valor medido es más fácil si la sensibilidad es constante, pues entonces basta multiplicar la indicación de salida por un factor constante para conocer el valor de la entrada.

Actualmente, con la posibilidad de incorporar un microprocesador en los sistemas de medida, interesa más la repetibilidad que la linealidad, pues siempre es posible crear un tabla conteniendo los valores de entrada que correspondan a los valores de salida detectados. Mediante una interpolación adecuada, es posible reducir el tamaño de dicha tabla.

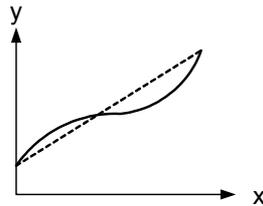
# Linealidad



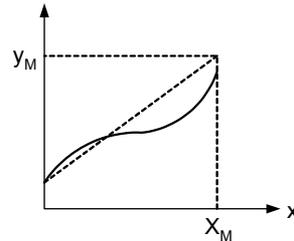
Linealidad independiente



Linealidad ajustada al cero



Linealidad terminal



Linealidad a través de los extremos

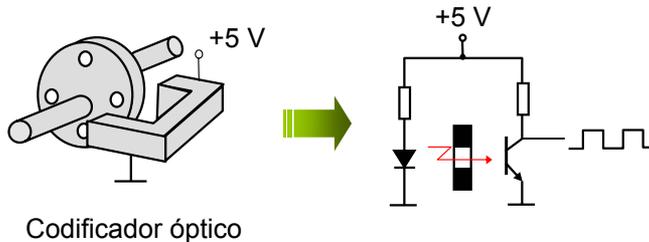
Según que línea recta se utilice para aproximar la curva de calibración se habla de:

- **Linealidad independiente:** la línea de referencia se define por el método de los mínimos cuadrados. De esta forma el máximo error positivo y el mínimo error negativo son iguales. Es la forma de especificación que suele dar mejor resultados.
- **Linealidad ajustada al cero:** la recta se define también por el método de los mínimos cuadrados, pero con la restricción adicional de pasar por cero.
- **Linealidad terminal:** la recta se define por la salida sin entrada y la salida teórica máxima, correspondiente a la mayor entrada admitida.
- **Linealidad a través de los extremos:** la recta se define mediante la salida real cuando la entrada es la menor del alcance especificado, y la salida real cuando la entrada es la máxima del alcance especificado.

Los principales factores que influyen en la linealidad son: la resolución, el umbral y la histéresis

# Resolución

- Es el mínimo incremento en la variable de entrada que ofrece un cambio medible en la salida.
- Cuando el incremento de la entrada se produce a partir de cero, se habla de **umbral**.



- El factor último que limita la resolución es el ruido eléctrico

La **resolución** de un dispositivo es el mínimo incremento de la entrada que ofrece un cambio medible en la salida. Se suele expresar como un valor en tanto por ciento sobre el fondo de escala.

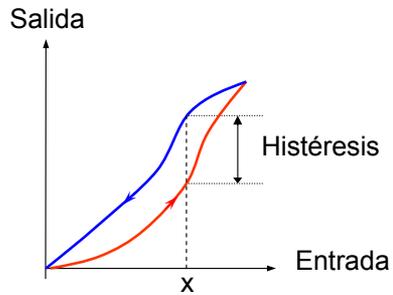
Cuando el incremento de la entrada se produce a partir de cero, se habla de **umbral**.

La figura muestra un **codificador óptico** en el que un disco con cuatro zonas transparentes está montado sobre un eje. Al girar el eje la luz del diodo LED pasa a través de los agujeros del disco llegando al fototransistor a cuya salida se obtiene un pulso cada 90° de giro. La resolución del codificador será por tanto de 90°.

La resolución de un sensor, no es en general, un factor limitante en aplicaciones industriales, por cuanto siempre es posible disponer de una etapa amplificadora de forma que se puedan percibir pequeños cambios de la entrada. El factor último que limita la resolución es el ruido eléctrico.

# Histéresis

- Es la máxima diferencia en la salida para una misma entrada, según la dirección en que se alcance.



La **histéresis** se define como la máxima diferencia en la medida dependiendo del sentido en el que se ha alcanzado.

## 1.5 Características dinámicas

- Respuesta del sistema ante señales de entrada variable
- Entrada transitoria, periódica, aleatoria.

	Ecuación diferencial	Función de transferencia
Orden cero	$a_0 y = x(t)$	$\frac{Y(s)}{X(s)} = 1$
Primer orden	$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t)$	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{(\tau s + 1)}$
Segundo orden	$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t)$	$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$

$x$  = variable de entrada,  $y$  = variable de salida;  $a_2, a_1, a_0$  = constantes  
 $\tau_1, \tau_2$  = cte. de tiempo

Las características dinámicas de un sistema de medida describen su comportamiento ante una magnitud variable. Este comportamiento es distinto al que presentan los sistemas cuando las señales de entrada son constantes debido a la presencia de inercias (masas, inductancias,...), capacidades (eléctricas, térmicas, ) y en general elementos que almacenan energía. Esta entrada puede ser de muchas formas distintas, pero lo normal y suficiente para un sistema lineal es estudiar la respuesta frente a una entrada transitoria (impulso, escalón, rampa), periódica (senoidal) o aleatoria (ruido blanco). La elección de una u otra depende de tipo de sensor. Es difícil, p.e una temperatura con variaciones senoidales, pero es fácil producir un cambio de temperatura brusco, a modo de escalón. En cambio, es más fácil producir un impulso que un escalón de aceleración.

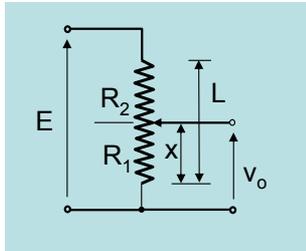
Para describir matemáticamente el comportamiento dinámico se supone que el sistema puede ser adecuadamente caracterizado por una ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes y que, por lo tanto, se tiene un sistema invariable en el tiempo. En estas condiciones, la relación entre la salida y la entrada del sensor puede expresarse de manera simple, en forma de cociente, empleando la transformadas de Laplace de ambas señales y la función de transferencia propia del sensor.

En los sensores ordinarios la función de transferencia consiste en una simple constante de proporcionalidad (**sensores de orden cero**), o en una fracción cuyo denominador es un polinomio de primer o de segundo orden (**sensores de primer y segundo orden** respectivamente)

# Sistemas de orden cero

➤  $y(t) = kx(t)$        $k = \text{sensibilidad del sistema}$

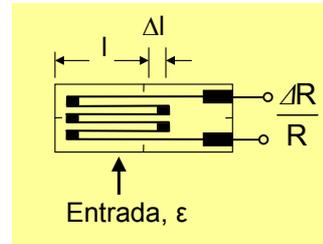
Potenciómetro



$$V_0 = E \frac{R_1}{R_1 + R_2} = E \frac{x}{L}$$

$$k = E/L$$

Galga extensométrica



$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon = K \frac{\Delta l}{l} = K \frac{F}{EA}$$

$K = \text{factor de galga}$

$\varepsilon = \text{deformación unitaria}$

Dado que en la ecuación diferencial de un sistema de orden cero no hay derivadas su respuesta temporal y frecuencial no experimentará cambios.

La figura muestra dos ejemplos de sistemas de orden cero. A la izquierda se muestra el caso de un **potenciómetro** empleado como sensor de movimiento lineal. Suponiendo el potenciómetro ideal la tensión de salida cambia de manera instantánea cuando se desplaza el cursor a lo largo del recorrido del potenciómetro. Debido a las imperfecciones del potenciómetro no se podrá utilizar para la medida de movimientos rápidos.

A la derecha se tiene una **galga extensométrica** utilizada para la medida de esfuerzos mecánicos en materiales en los que la resistencia efectiva entre sus extremos se modifica con el esfuerzo aplicado sobre la galga.

# Sistemas de primer orden

$$\triangleright a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t); \xrightarrow{L} \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{(\tau s + 1)} \quad k = 1/a_0 = \text{sensibilidad}$$

$$\tau = a_1/a_0 = \text{cte de tiempo}$$

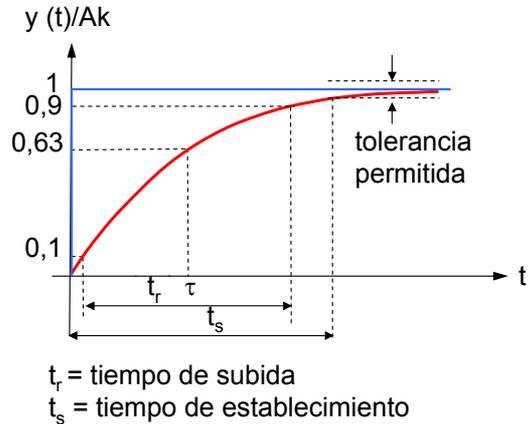
• Respuesta a un escalón:

$$x(t)=A \xrightarrow{L} X(s)=A/s$$

$$Y(s) = \frac{k}{(\tau s + 1)} \frac{A}{s} = \frac{Ak}{s} - \frac{Ak}{s + 1/\tau}$$

$\downarrow L^{-1}$

$$y(t) = Ak(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$



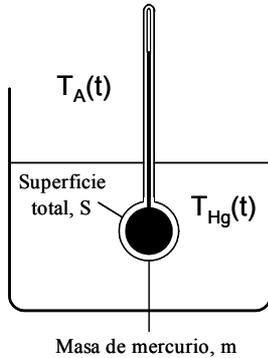
Un sistema de primer orden es aquel que contiene un elemento que almacena energía y otro que la disipa. La figura muestra la respuesta de un sistema de primer orden a un escalón de amplitud A. El parámetro dinámico que define un sistema de primer orden es la **constante de tiempo**, aunque se pueden definir otros parámetros que también permiten caracterizar lo rápido que resulta un sistema de primer orden, como:

- **Tiempo de subida** (*rise time*,  $t_r$ ), es el tiempo que transcurre entre que el sistema alcanza el 10% y el 90% del valor final.
- **Tiempo de establecimiento** (*settling time*,  $t_s$ ), es el tiempo que transcurre hasta que el sistema proporciona una salida dentro del margen de tolerancia definido por su precisión.

En los sistemas eléctricos un ejemplo de sistema de primer orden es la red RC. En sistemas de fluidos se tiene en el vaciado de tanques: la resistencia al vaciado y la capacidad del tanque constituyen la constante de tiempo. En los sensores químicos se tiene cuando el soluto es disuelto en una disolución.

# Ejemplo

➤ Termómetro de mercurio



$k$  = conductividad térmica del tubo de vidrio  
 $d$  = espesor de pared

$$q(t) = \frac{kS}{d}(T_A(t) - T_{Hg}(t))$$

$$q(t) = mc_e \frac{dT_{Hg}(t)}{dt}$$

$$\frac{dT_{Hg}(t)}{dt} + \frac{kS}{dmc_e} T_{Hg}(t) = \frac{kS}{dmc_e} T_A(t)$$

$$sT_{Hg}(s) + AT_{Hg}(s) = AT_A(s); \quad A = \frac{kS}{dmc_e}$$

$$G(s) = \frac{T_{Hg}(s)}{T_A(s)} = \frac{A}{A + s} = \frac{1}{1 + s/A}$$

La figura muestra un termómetro de mercurio constituido por un tubo de vidrio de conductividad térmica  $k$  y que presenta un espesor de pared  $d$ , superficie total  $S$  en cuyo interior hay una masa de mercurio  $m$  con calor específico  $c_e$ .

El flujo de calor  $q(t)$  que atraviesa la superficie de vidrio es proporcional a la diferencia de temperaturas y viene dado por la expresión:

$$q(t) = \frac{kS}{d}(T_A(t) - T_{Hg}(t))$$

donde  $T_A(t)$  es la variable que representa la temperatura ambiente y  $T_{Hg}(t)$  representa a la temperatura interior del mercurio. Suponiendo que la masa térmica del vidrio es despreciable, todo ese flujo de calor es absorbido por la masa térmica del mercurio siguiendo la expresión:

Igualando ambas expresiones:

$$q(t) = mc_e \frac{dT_{Hg}(t)}{dt}$$

$$mc_e \frac{dT_{Hg}(t)}{dt} = \frac{kS}{d}(T_A(t) - T_{Hg}(t))$$

La influencia de la entrada,  $T_A(t)$  sobre la salida  $T_{Hg}(t)$  se puede obtener de la e.d. siguiente:

$$\frac{dT_{Hg}(t)}{dt} + \frac{kS}{dmc_e} T_{Hg}(t) = \frac{kS}{dmc_e} T_A(t)$$

Denominando  $A$  al término  $kS/dmce$ , el cual depende sólo del sistema, y se aplica la transformada de Laplace, se obtiene:

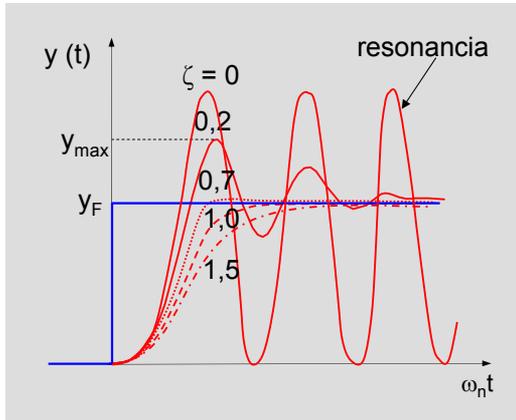
$$sT_{Hg}(s) + AT_{Hg}(s) = AT_A(s)$$

o, lo que es lo mismo, el sistema queda caracterizado por la siguiente función de transferencia en  $s$ :

$$G(s) = \frac{T_{Hg}(s)}{T_A(s)} = \frac{A}{A + s} = \frac{1}{1 + s/A}$$

# Sistemas de segundo orden

$$\rightarrow a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t) \xrightarrow{L} \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$



$$k = 1/a_0 = \text{sensibilidad estática}$$

$$\omega_n = (a_0/a_2)^{1/2} = \text{frec. natural}$$

$$\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}} = \text{coeficiente de amortiguamiento}$$

$$\text{Sobreoscilación: } S_u(\%) = \frac{y_{\max}}{y_F} 100$$

Un sistema es de segundo orden cuando tiene dos elementos de almacenamiento de energía, como es el caso de sistemas masa-resorte (inerciales), empleados para la medida de desplazamientos, velocidades y aceleraciones.

La respuesta de un sistema de 2º orden a una entrada escalón se obtiene resolviendo la e.d. de 2º orden o bien, como se ha hecho con los sistemas de primer orden, obteniendo la antitransformada de Laplace.

La forma de onda que se obtiene depende del valor del **coeficiente de amortiguamiento**  $\zeta$ . Para  $\zeta = 0$  no hay amortiguamiento y la salida presenta oscilaciones de amplitud constante cuando se ve perturbada por algún cambio en la variable física que se mide. Este estado se conoce como **resonancia** y ocurre a la **frecuencia natural**  $\omega_n$ .

Para  $\zeta = 0,2$  la respuesta sigue siendo oscilatoria, pero las oscilaciones se atenúan en forma gradual, es una respuesta **subamortiguada**. Un aumento adicional de  $\zeta$  reduce aún más las oscilaciones hasta que para  $\zeta = 1,5$  la respuesta se vuelve **sobreamortiguada**, y la salida avanza lentamente hacia su valor final.

En un sistema de medición las respuestas extremas son poco adecuadas. Los instrumentos comerciales se diseñan para tener un factor de amortiguamiento entre 0,6 y 0,8.

## 1.6 Errores de medición

### Errores instrumentales

- Se deben a la precisión o resolución limitada que presenta cualquier aparato de medida.

### Errores sistemáticos

- Se deben a fallos o defectos en el diseño del experimento, en los instrumentos de medida o en el propio experimentador.
- Se producen siempre en la misma dirección.
- Se pueden detectar y corregir mediante calibración estática.

### Errores aleatorios (accidentales)

- Se deben a variaciones imprevisibles en el proceso de medida, tanto en las condiciones físicas como en el comportamiento del experimentador
- Toman diferentes valores cuando se repite la medida.
- Puede estimarse su influencia mediante cálculos numéricos.

Un principio básico de todo sistema de instrumentación electrónica es el de medir una magnitud con el mínimo error posible. Sin embargo, siempre existe un grado de incertidumbre puesto que es imposible realizar una medición sin modificar en mayor o en menor grado aquello que se mide. Además, las variables incontroladas, entre ellas el ambiente, el envejecimiento de los componentes, el ruido, etc., añaden nuevos errores.

Distinguiremos tres tipos de errores en la medida de la magnitud física:

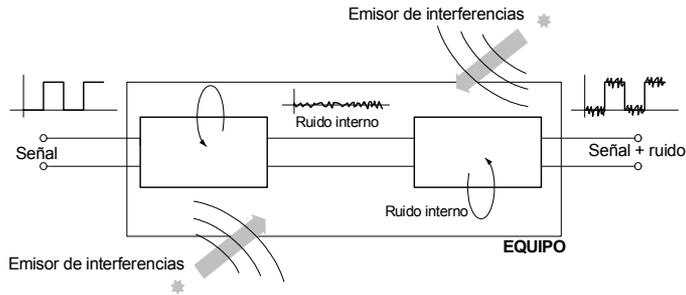
- **Errores instrumentales:** Se deben a la precisión o resolución limitada que presenta cualquier aparato de medida. Por ejemplo si la división menor de un a regla es el milímetro, toda medida que realicemos con ella no podrá tener un intervalo de error menor que el milímetro.
- **Errores sistemáticos:** Se deben a fallos o defectos en el diseño del experimento, en los instrumentos de medida o el propio experimentador; por ejemplo: una báscula mal calibrada, un reloj que adelanta, etc. Estos errores se producen siempre en la misma dirección.
- **Errores aleatorios o accidentales:** Se deben a variaciones imprevisibles en el proceso de medida, tanto en las condiciones físicas (temperatura, presión, humedad, etc.) como en el comportamiento del experimentador (equivocaciones en la toma de datos, etc). Los errores de este tipo son aleatorios y puede estimarse su influencia mediante cálculos numéricos.

# Fuentes de errores sistemáticos

- Efecto de carga del circuito de medición.
- Proceso de medición.
- Condiciones ambientales.
- Ruido periódico.
- Envejecimiento de los componentes.
- Conexión de las puntas de prueba.
- F.e.m. térmica.

- **Efecto de carga del circuito de medición.** La transferencia de tensión o de corriente de un sistema a otro debe hacerse sin pérdida de información. Sin embargo el valor de la impedancia de salida de la señal y la impedancia de entrada del sistema dan lugar a una atenuación de la señal.
- **Proceso de medición.** El proceso de medición perturbará siempre al sistema que se está midiendo. La magnitud de la perturbación varía de un sistema de medición a otro, y se ve afectada especialmente por el tipo de instrumento de medición que se utiliza.
- **Condiciones ambientales.** Las características estáticas y dinámicas se especifican para condiciones ambientales particulares, p.e. de temperatura y presión. La magnitud de esta variación se cuantifica por medio de la deriva de la sensibilidad y la deriva del cero (offset).
- **Ruido periódico.** Este ruido es provocado por la interferencia que produce la proximidad del sistema de medición a equipos o cables que conducen la corriente y se alimentan de la red eléctrica.
- **Envejecimiento.** La aparición de errores sistemáticos después de cierto período de tiempo es absolutamente normal, esto se debe al envejecimiento de los componentes del instrumento. Se requiere una recalibración.
- **Puntas de prueba.** Es importante que tengan la sección transversal adecuada para minimizar su resistencia, e incluir el blindaje adecuado en caso de que se sometan a la acción de campo eléctricos y magnéticos que puedan inducir señales de ruido en ellas.
- **F.e.m. térmicas.** Siempre que se conectan dos metales diferentes se genera una f.e.m. térmica que varía de acuerdo con la temperatura de la unión (efecto termoeléctrico). Estas f.e.m térmicas son de unos cuantos mV y, por ello, su efecto será significativo siempre que las señales de medición tengan una magnitud similar.

# Fuentes de errores aleatorios



## Ruido interno

- Ruido térmico
- Ruido de parpadeo (1/f)
- Ruido *shot*

## Interferencias electromagnéticas

- Sistema eléctricos
- Sistemas electrónicos
- Otros sistemas

Las fuentes de errores aleatorios son el **ruido interno** del sistema de medida y el ruido externo o **interferencias electromagnéticas**.

En general, el ruido es toda señal no deseada que se superpone a la señal que nos interesa, tendiendo a ocultar parcialmente la información. La importancia del ruido en el sistema de medida se mide mediante la relación señal/ruido, S/N, definida como:

$$S/N = 20\log(\text{valor de la señal}/\text{valor del ruido})$$

El ruido que se genera en un circuito electrónico puede tener origen diverso:

- **Ruido térmico:** se produce en cualquier elemento de comportamiento resistivo. Se debe a la agitación térmica de las partículas y crece con la temperatura y con el valor de la resistencia.
- **Ruido de parpadeo (flicker o 1/f):** aparece en todos los componentes activos. Se asocia a una corriente continua que circula por el componente.
- **Ruido shot:** se ocasiona por el movimiento aleatorio de los electrones al atravesar cualquier barrera de potencial.

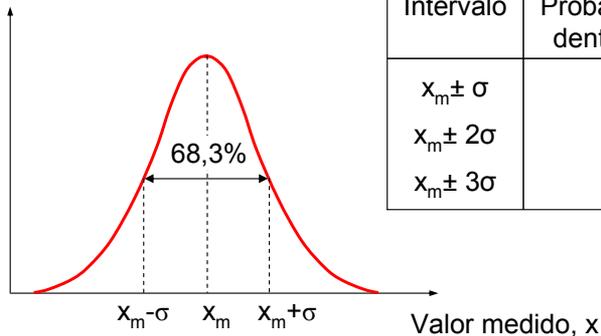
Las interferencias electromagnéticas tienen su origen fundamentalmente en la presencia de campos electromagnéticos cercanos al sistema de medida. Las fuentes de interferencia pueden ser:

- **Sistemas eléctricos:** motores y generadores, líneas de distribución y transporte, aparallaje eléctrico, hornos de arco, equipos de soldadura, iluminación, etc.
- **Sistemas electrónicos:** equipos de comunicación, radar, computadores y sistemas de control, fuentes de alimentación y accionadores, sistemas industriales, etc.
- **Otros sistemas:** sistemas de encendido, sistemas de ultrasonidos, etc.

# Distribución de frecuencia

- La distribución de frecuencia más importante para los conjuntos de datos que contienen errores aleatorios es la gaussiana o normal.

Función densidad de probabilidad,  $P(x)$



Intervalo	Probabilidad de estar dentro del intervalo
$x_m \pm \sigma$	68,3%
$x_m \pm 2\sigma$	95,4%
$x_m \pm 3\sigma$	99,7%

Una forma de analizar el patrón en el cual las mediciones se desvían del valor medio consiste en utilizar técnicas gráficas. Cuando el número de mediciones tiende a infinito, se tienen una curva conocida como **curva de distribución de frecuencias** de las mediciones.

Existen tres tipos especiales de distribución de frecuencias conocidas como gaussiana, binomial y de Poisson. De ellas, la más importante para los conjuntos de datos que contienen errores de medición aleatorios es la **distribución gaussiana o normal**, que se muestra en la figura.

La forma de la distribución normal es la de una campana simétrica con respecto a la línea que pasa por la media de los valores de medición, lo cual significa que los errores positivos más allá del valor de la media ocurren en cantidades iguales que los errores negativos en cualquier conjunto de datos que contienen mediciones sujetas a errores aleatorios.

Para una distribución normal el 68,3% de las lecturas estará comprendido en el intervalo  $x_m \pm \sigma$ . El 95,4% de las medidas en el intervalo  $x_m \pm 2\sigma$  y el 99,7% de las lecturas en el intervalo  $x_m \pm 3\sigma$ .

## Cifras significativas

- El número de cifras significativas en un resultado no puede ser mayor al de cualquiera de las magnitudes que aparecen en el cálculo.
- Cuando una medida está dada sin expresar el correspondiente error, consideramos que todas las cifras son significativas excepto la última.
- El valor de la medida no debe tener cifras significativas de orden menor que la última del error.

### Incorrectas

6,276 ± 0,146

34 ± 0,046

4763 ± 337

### Correctas

6,28 ± 0,15

34,00 ± 0,05

4800 ± 300

El número de dígitos o cifras significativas que debemos emplear para representar el valor de una magnitud física, así como su error, viene condicionado por la precisión con la que es conocida. La medida y el error absoluto se redondean de acuerdo con las siguientes reglas:

- a) Los ceros como primeras cifras de un resultado experimental **no** se consideran como cifras significativas.
- b) Si los ceros aparecen como últimas cifras de números enteros **no** son significativos.
- c) Los ceros entre o a la derecha de los dígitos (del 1 al 9) y a la derecha del punto decimal **si** son significativos.
- d) El número de cifras significativas en un resultado no puede ser mayor al de cualquiera de las magnitudes que aparecen en el cálculo.
- e) Cuando una medida está dada sin expresar el correspondiente error, consideramos que todas las cifras son significativas excepto la última. Ejemplo: 16,592 g tiene un error asociado ±0,001
- f) El error absoluto se dará con dos cifras significativas siempre que la primera sea uno. En caso contrario se empleará solo una. Para redondear, si la primera cifra suprimida es mayor o igual que cinco, se aumentará en una unidad la última cifra conservada.
- g) El valor de la medida no debe tener cifras significativas de orden menor que la última del error.

# Errores en medidas directas

- **Medida directa:** se obtiene utilizando un determinado aparato de medida.

La medida de la magnitud la expresaremos como:  $x = x_m \pm \Delta x$

$$x_m = \text{valor medio} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- **Cálculo del error:  $\Delta x$**

$$\Delta x = \sqrt{I_x^2 + E_x^2} \quad \left\{ \begin{array}{l} E_x = \text{Error aleatorio} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n(n-1)}} \\ I_x = \text{Error instrumental} \end{array} \right.$$

Una medida directa es aquella que obtenemos utilizando un determinado aparato de medida. Si la medimos una vez, su valor será el obtenido y su error vendrá determinado por la precisión del aparato de medida. Por ejemplo, al medir el tiempo que tarda un objeto en caer, si medimos 3,22 s con un cronómetro que mide hasta las centésimas de segundo, diremos que el tiempo es  $(3,22 \pm 0,01)$ s.

El valor de la magnitud así encontrado podría estar afectado por errores de carácter aleatorio, por ello es aconsejable repetir varias veces la medida. Se toma como valor de la magnitud la media aritmética:  $x_m$

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Siendo  $n$  el número de medidas y  $x_i$  el valor obtenido en cada una de ellas.

Para calcular el error, debemos tener en cuenta el error instrumental,  $I_x$  y el error aleatorio o estadístico,  $E_x$ ; el error sistemático no podemos detectarlo mediante cálculos. El error estadístico viene dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}{n(n-1)}}$$

El error absoluto  $\Delta x$ :  $\Delta x = \sqrt{I_x^2 + E_x^2}$  ; en la práctica se toma  $\Delta x$  como el mayor de los errores; si ambos son de magnitud parecida se aplica la expresión anterior.

La medida de la magnitud la expresaremos:  $x = x_m \pm \Delta x$

# Errores en medidas indirectas

➤ **Medida indirecta:** se obtiene a partir de otras medidas

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

La medida de la magnitud la expresaremos como:  $y = y_m \pm \Delta y$

$$y_m = f(x_{1m}, x_{2m}, \dots, x_{nm})$$

➤ **Cálculo del error:**  $\Delta y$

$$\Delta y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x_{1m}} \cdot \Delta x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_{x_{2m}} \cdot \Delta x_2 + \dots$$

Llamamos medida indirecta a aquella magnitud que obtenemos a partir de otras medidas, directas o indirectas mediante alguna expresión matemática. Por ejemplo, la medida de la densidad de un líquido midiendo de forma directa su masa y el volumen que ocupa.

En general, sea la magnitud física  $y$ , que depende de  $n$  magnitudes ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

De cada una de estas magnitudes,  $x_i$ , conocemos (hemos calculado) su valor medio y su error absoluto,  $x_i = x_{im} \pm \Delta x_i$

El valor medio de la medida indirecta es:

$$y_m = f(x_{1m}, x_{2m}, \dots, x_{nm})$$

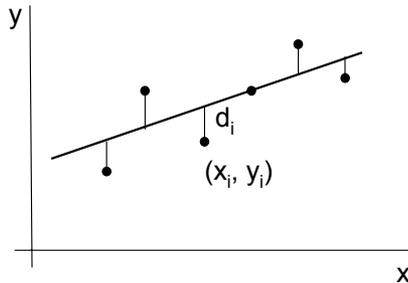
El error absoluto lo obtenemos:

$$\Delta y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x_{1m}} \cdot \Delta x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_{x_{2m}} \cdot \Delta x_2 + \dots$$

Donde  $\Delta y$ ,  $\Delta x_1$ ,  $\Delta x_2$ , ... son los errores absolutos de las medidas. Las derivadas parciales se calculan en los puntos  $x_i = x_{im}$  y se toman en módulos para que todos los errores se sumen.

# Método de los mínimos cuadrados

- Si los puntos se distribuyen en el plano con una apariencia de linealidad, podemos expresar la relación de la forma:  $y = A + Bx$
- Un método para determinar A y B es el de los mínimos cuadrados.



$$d_i = y_i - (A + Bx_i)$$

A y B se determinan para hacer mínima la suma de los cuadrados de  $d_i$ :

$$\sum_{i=1}^n (d_i^2) = \sum_{i=1}^n (y_i - A - Bx_i)^2$$

- Coeficiente de correlación, r: grado de ajuste o dependencia lineal de x e y

La representación gráfica de los resultados experimentales son herramientas de gran utilidad.

Cuando al estudiar el comportamiento de determinadas magnitudes físicas, realizamos una representación gráfica de ellas (x,y), y observamos que los puntos se distribuyen en el plano con una apariencia de linealidad, deducimos que la ley que las relaciona se puede expresar en la forma  $y = Bx + A$ .

Un método para determinar A y B es el **método de los mínimos cuadrados**.

Aplicaremos este método cuando podamos suponer que todo el error está asociado a una variable, considerando los valores de la otra como exactos, llamaremos y a esta variable.

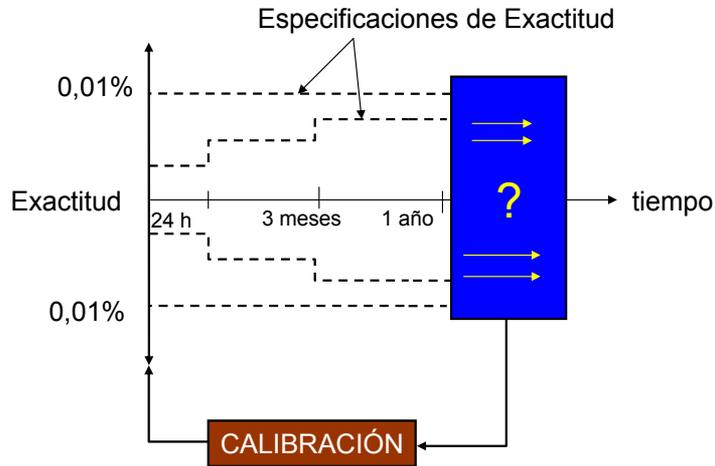
Si representamos gráficamente los puntos experimentales  $(x_i, y_i)$ , tenemos que para cada valor  $x_i$ , existen diferencias entre los valores  $y_i$  experimentales y los valores “ $Y_i$ ” obtenidos al sustituir  $x=x_i$  en la recta de ajuste  $y=Bx+A$ , la diferencia entre estos dos valores la llamamos  $d_i$

$$d_i = y_i - (Bx_i + A)$$

Si todos y cada uno de los valores d son nulos, el ajuste es perfecto. En general, esto no ocurre, por lo ello, determinaremos los parámetros A y B de la recta que hacen mínima la suma de los cuadrados de esa diferencia:

## 1.7 Calibración

- Consiste en la comparación de la exactitud de un instrumento con un patrón conocido.



La exactitud de los componentes electrónicos en todos los instrumentos se derivan con el paso del tiempo. Los efectos del tiempo en servicio tales como las condiciones medioambientales (temperatura, presión y humedad) aumentan la inexactitud y la incertidumbre con que se realizan las medidas, pudiendo sacar al instrumento fuera de las especificaciones o tolerancias definidas por el fabricante.

Para solucionar este problema los instrumentos deben ser calibrados de forma periódica, según los intervalos de tiempo recomendados por el propio fabricante.

La calibración consiste en la comparación de la exactitud de un instrumento con un patrón conocido. Mediante la calibración de un instrumento se determina la desviación de éste respecto del patrón. Además, si dispone de un sistema de ajuste, se puede mejorar su exactitud, reduciendo la desviación y devolviendo el instrumento a las especificaciones definidas por el fabricante.

Las ventajas de calibrar son:

- Reducir errores de medida
- Aseguramiento de la medida
- Repetibilidad de las medidas
- Transferencia de procesos
- Intercambio de instrumentos
- Cumplir con los requerimientos establecidos en las normas ISO-9000 o ISO-17025

# Métodos de calibración

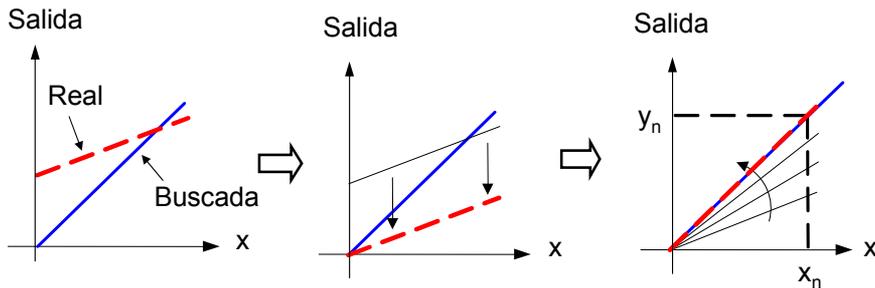
- **Calibración a un punto:**

se actúa sobre el sistema de medida de forma que para un punto concreto (p.e el cero) la salida sea lo más exacta posible.

- **Calibración del cero y de la sensibilidad**

1º Se ajusta el cero (offset).

2º Se ajusta la sensibilidad (ganancia)



*Instrumentación Electrónica*

38

*Tema 1. Principios generales de instrumentación*

Los métodos de calibración más sencillos son:

- **Calibración a un punto:** suele efectuarse sobre el valor del cero de la variable de entrada ya que para este punto suele conocerse el valor verdadero.

- **Calibración del cero y de la sensibilidad:** se realiza mediante dos mandos, uno permite modificar el nivel (offset) y el otro la sensibilidad del sistema. Primero debe ajustarse el cero y después la ganancia. ¿sería correcto ajustar en primer lugar la ganancia y después el cero?

# Certificado de calibración

Una vez realizada la calibración de un instrumento se emite su correspondiente certificado de calibración. En este certificado se recoge, entre otras informaciones, el tipo de instrumento, el número de serie,, las referencias al peticionario, la fecha de calibración, las condiciones ambientales, una declaración de Trazabilidad de las medidas, así como los resultados obtenidos durante el proceso de calibración.

Dentro de los resultados se indica, para punto de calibración, la configuración del instrumento, el valor del patrón, la lectura del dispositivo bajo calibración, la desviación determinada respecto del patrón, así como la incertidumbre expandida de la medida.

Además, se incluye la tolerancia correspondiente a las especificaciones del fabricante o la tolerancia establecida por el propio usuario del instrumento. En base a dicha tolerancia, es evaluada la conformidad del instrumento y se indica como resultado en el certificado de calibración.

En el caso de que el instrumento haya sido ajustado durante el proceso de calibración, se incluirán en el certificado los resultados correspondientes a la calibración antes y después de ajuste, permitiendo avaluar el estadop en el que se encontraba el instrumento antes de ajustar y el resultado después de realizar dicho ajuste.

# Entidad Nacional de Acreditación

- La acreditación es el procedimiento mediante el cual un Organismo autorizado reconoce formalmente que una organización es competente para la realización de una determinada actividad de evaluación de la conformidad.
  
- En España: ENAC acredita:
  - Laboratorios
  - Entidades de Inspección
  - Entidades de Certificación
  - Verificadores Medioambientales
  - Proveedores de Programas de Intercomparación



La **Entidad Nacional de Acreditación** (ENAC) es una organización auspiciada y tutelada por la Administración que se constituye con arreglo a lo dispuesto en la Ley de Industria 21/1992 y al Real Decreto 2200/95 por el que se aprueba el Reglamento para la Infraestructura de la Calidad y Seguridad Industrial. ENAC es una entidad privada, independiente y sin ánimo de lucro cuya función es coordinar y dirigir en el ámbito nacional un Sistema de Acreditación conforme a criterios y normas internacionales.

ENAC acredita organismos que realizan actividades de evaluación de la conformidad, sea cual sea el sector en que desarrolle su actividad, su tamaño, su carácter público o privado, o su pertenencia a asociaciones o empresas, universidades u organizaciones de investigación.

- Laboratorios
- Entidades de Inspección
- Entidades de Certificación
- Verificadores Medioambientales
- Proveedores de Programas de Intercomparación

La Administración, tanto central como autonómica, utiliza las acreditaciones de ENAC en sus respectivos ámbitos de competencia en sectores tales como el **industrial, agroalimentario, medioambiente, defensa, construcción, sanidad, telecomunicaciones, metrología**, etc.