

INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

3º I.T.I. Electrónica

APUNTES

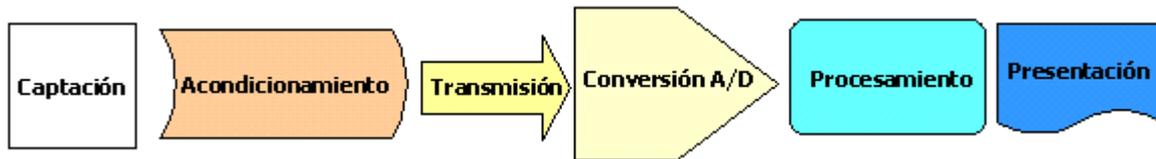


INDICE

1.- INTRODUCCIÓN	3
1.1.- LA CADENA DE MEDIDA	3
1.1.1.- Laboratorio	3
1.1.2.- Procesos industriales	3
1.1.3.- Elementos principales	4
1.2.- CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE UNA MEDIDA	5
1.2.1.- Resolución	5
1.2.2.- Sensibilidad	6
1.2.3.- Linealidad	8
1.2.4.- Precisión	8
1.2.5.- Repetibilidad	12
1.2.6.- Diferencia entre resolución, precisión y repetibilidad	12
1.2.7.- Dígitos: Truncamiento, redondeo, operaciones	13
1.3.- CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE UNA MEDIDA	14
1.3.1.- Sistemas de orden cero	14
1.3.2.- Sistemas de primer orden	14
1.3.3.- Sistemas de segundo orden	14
1.4.- CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA Y SALIDA	15
1.4.1.- Impedancia de entrada/salida	15
1.4.2.- Máxima transferencia de potencia:	15

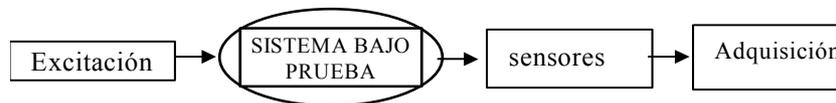
1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- LA CADENA DE MEDIDA



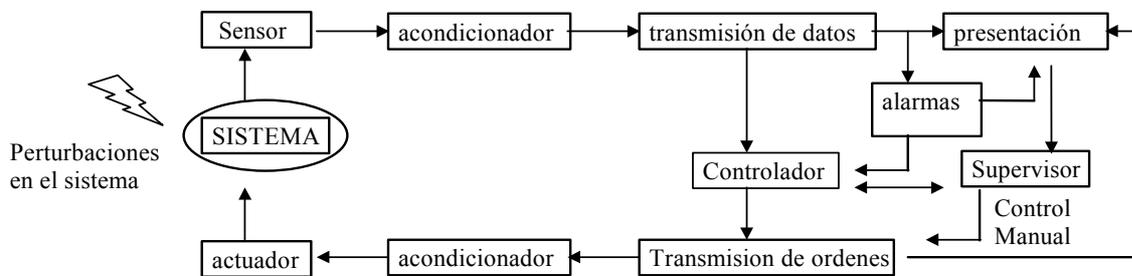
Tendremos en cuenta dos aplicaciones genéricas distintas a la hora de organizar la cadena de medida, una será en los procesos industriales y la otra en un entorno de test y medida de laboratorio.

1.1.1.- LABORATORIO



En un entorno de test y medida, la información puede venir dada no sólo por sensores, sino también directamente por otros aparatos (osciloscopios, multímetros, generadores de funciones, fuentes de alimentación, etc.). A partir de la información recogida podemos cambiar las condiciones de la prueba, reconfigurando parámetros en los aparatos.

1.1.2.- PROCESOS INDUSTRIALES

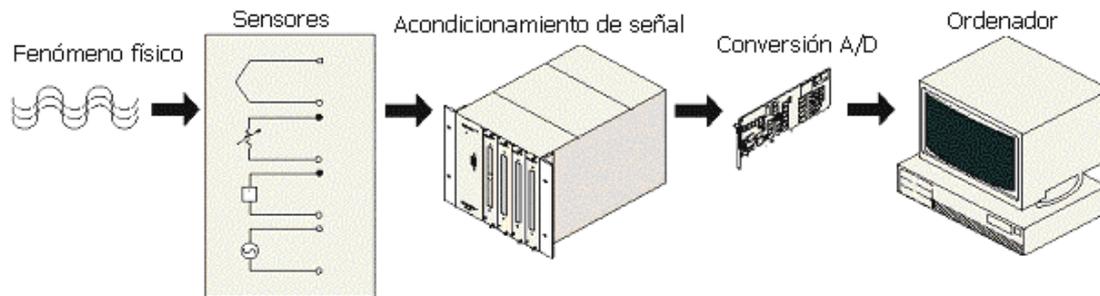


En los procesos industriales existirán fundamentalmente unos sensores que serán los que suministren información, convenientemente acondicionada, al elemento controlador del sistema. El elemento controlador, que normalmente será un microprocesador, recibirá la información de los sensores directamente o mediante un proceso de comunicación. Junto con la representación de la información y las correspondientes alarmas, el elemento controlador dará las ordenes a los actuadores para que el proceso funcione dentro de los márgenes previstos.

La flexibilidad que se añade al sistema gracias al software que lo controla es importante en la actualidad, y depende del sistema de control que hayamos escogido. Para un mismo entorno de trabajo, los mismos

sensores y actuadores, podemos controlar el proceso en base a un interés concreto en un momento determinado. Primar el ahorro energético, el número mínimo de maniobras o la precisión puede depender del producto final que deseemos obtener.

1.1.3.- ELEMENTOS PRINCIPALES



- **Sensor:** Los transductores eléctricos (que son los que nos interesan) son dispositivos que modifican una magnitud eléctrica (V, I, R) en función del fenómeno físico.
- **Acondicionamiento de señal:** Modificar la señal eléctrica para facilitar su posterior análisis y/o digitalización.
- **Conversión A/D:** Conversión de señal eléctrica a datos binarios.
- **Procesamiento:** Modificar la señal digital para extraer la información de interés.

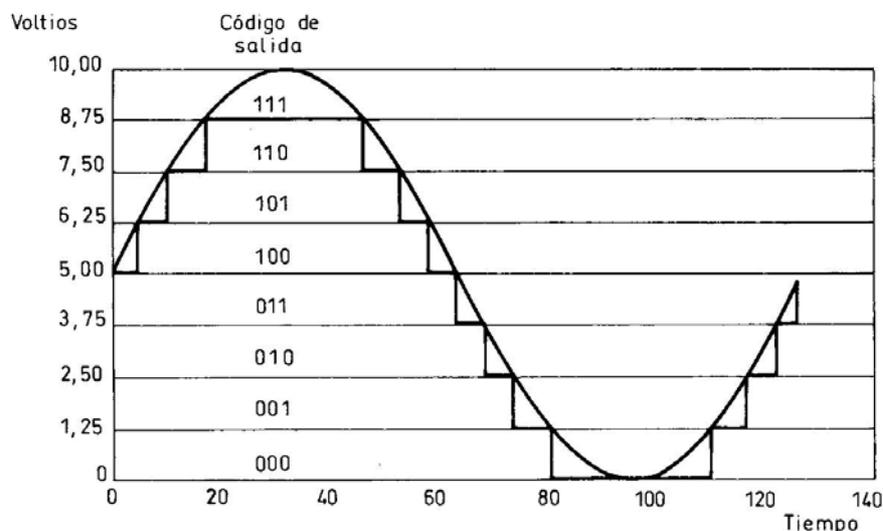
1.2.- CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE UNA MEDIDA

Las características cuya variación es lenta respecto al tiempo de observación.

1.2.1.- RESOLUCIÓN

Es el cambio mas pequeño de señal que puede ser observado en nuestro instrumento (P. Ej. en el display de un multímetro).

1.2.1.1.- Conversión A/D: Cuantificación y codificación



CUANTIFICACIÓN

Dividir la señal continua en un número finito de valores. Es evidente que se comete un error, pues el valor cuantificado no se corresponderá exactamente con uno de los códigos disponibles.

CODIFICACIÓN

Asignar un código (binario) a cada estado cuantificado.

En el ejemplo, se ha cuantificado la señal en 8 estados que han sido codificados en binario natural

RESOLUCIÓN

En conversores A/D e instrumentos digitales suele especificarse en bits o en dígitos sin especificar el rango de medida. Por ejemplo, se habla de resoluciones de 12 bits, 6 ½ dígitos, etc.

En el ejemplo anterior la resolución es de 3 bits.

Una resolución de 12 bits de un convertor A/D indica que es capaz de representar 4096 combinaciones binarias, es decir, 1 parte entre 4096 ($2^{12}=4096$).

En comparación, los multímetros digitales ofrecen habitualmente "5 ½ " o "6 ½ dígitos" de resolución. Por regla general, el término "½ dígito" significa que el dígito más significativo puede valer 0 ó 1. Por ejemplo, una resolución de 5½ dígitos supone valores entre 0 y 199.999 (unipolar) ó entre -199.999 y 199.999 (bipolar).

LSB (LESS SIGNIFICANT BIT)

Cuando hablamos de convertidores A/D, el valor del bit menos significativo recibe el nombre de LSB.

$$1LSB = \frac{\text{Rango}}{n^{\circ} \text{ cuentas}} = \frac{\text{Rango}}{2^{n^{\circ} \text{ bits}}}$$

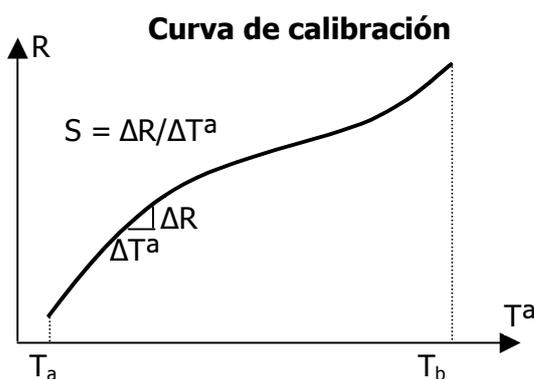
Como puede verse, el valor de 1 LSB depende del rango que consideremos.

Un convertor A/D con 12 bits de resolución sobre un rango de 1 V tendrá un valor de LSB:
1 LSB = 1V / 4096 partes = 244 μ V.

Un voltímetro de 5½ dígitos de resolución sobre un rango de 10 V tendrá una resolución:
Resolución en el rango de 10V = 10V / 200.000 partes = 50 μ V.

1.2.2.- SENSIBILIDAD

1.2.2.1.- Sensores



Como siempre:

Eje X: **entrada**, es decir magnitud física a medir.

Eje Y: **salida**, magnitud eléctrica sensible.

Rango de medida = T_b-T_a

- También llamada *factor de escala*, la sensibilidad es la pendiente de la *curva de calibración* del sensor.
- Las unidades serán, en la gráfica de ejemplo para un sensor de temperatura resistivo, $\Omega/^{\circ}\text{C}$.

- NO tiene por que ser constante en todo el rango de medida, por lo que la sensibilidad tendrá una expresión general de la forma:

$$S(Xa) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{X=Xa} \equiv \text{Sensibilidad en el punto } x=Xa$$

Según esta ecuación, si por ejemplo la respuesta del sensor es $y = kx+b$, entonces $S = k$ (respuesta lineal). Si la respuesta del sensor fuera $y = kx^2+b$, entonces $S = 2kx$.

1.2.2.2.- Instrumentos de medida

En instrumentos de medida, la sensibilidad máxima viene determinada por el rango más bajo dividido entre la resolución:

$$\text{Sensibilidad}_{\text{máx}} = \frac{\text{Rango}_{\text{mín}}}{\text{Resolución en cuentas}}$$

Teniendo en cuenta la definición de LSB, podríamos decir que la sensibilidad máxima sería el valor de 1 LSB en el rango mínimo.

Por ejemplo, la sensibilidad de un conversor A/D con una resolución de 12 bits sobre un rango de 2V:

$2V / 4096 \text{ partes} = 488 \mu V$ de sensibilidad.

Sensibilidad de un multímetro de 5½ dígitos sobre un rango de 10Ω.

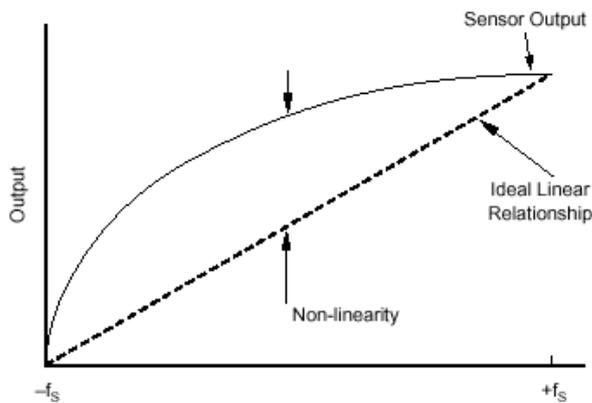
5½ dígitos significan 200.000 niveles, suponiendo un rango de 10Ω, tenemos una sensibilidad de $0,00005\Omega = 50 \mu\Omega$.

¿Qué resolución deben tener un multímetro y un conversor A/D para obtener una sensibilidad de 1mV sobre un rango de 10V?

Dividiendo el rango entre la sensibilidad sabemos que requiere 1 parte entre 10.000, lo que significa 4 dígitos (10^4). En la práctica necesitaremos un multímetro de 4½ dígitos.

Utilizando el mismo razonamiento para el conversor A/D: $\log_2(10000) = 13,3$ bits que en la práctica supone contar con un conversor A/D de 16 bits.

1.2.3.- LINEALIDAD



Expresa lo constante que resulta la sensibilidad del sensor o aparato de medida.

Una sensibilidad constante (alta linealidad) facilita la conversión del valor leído al valor medido:

$$y(x) = K \cdot x$$

p.ej.: $i(F) = k \cdot F$, una corriente proporcional a una fuerza.

La **alinealidad** es la falta de proporcionalidad de la salida de un dispositivo respecto a su entrada y se expresa habitualmente como la máxima desviación respecto a la recta proporcional. Se expresa en % respecto del fondo de escala.

$$\text{Error de linealidad (\%)} = \frac{|\text{Valor medido} - \text{Valor real}|_{\text{máximo}}}{\text{Valor a fondo de escala}} \cdot 100$$

Por ejemplo si el valor medido por el aparato o el sensor es de 80 mV y cuando el valor real es de 70 mV, esto supone una alinealidad de 10 mV. Suponiendo un fondo de escala de 20 V tenemos un error de linealidad:

$$((80 \cdot 10^{-3} - 70 \cdot 10^{-3}) / 20) \cdot 100 = 0,05\%$$

1.2.4.- PRECISIÓN

La precisión describe lo ajustado de la lectura al valor real.

- La precisión depende de varios factores como resolución, offset del amplificador, no linealidades, efectos del ruido, efectos de la temperatura.
- Es importante no confundir resolución con precisión. La posibilidad de detectar un cambio muy pequeño no quiere decir que se esté obteniendo el valor real (por ejemplo debido al *offset*).

1.2.4.1.- Error

ERROR ABSOLUTO

Error absoluto = valor medido - valor verdadero. Se expresa en las mismas unidades que se miden.

ERROR RELATIVO

$$\text{Error relativo (\%)} = \frac{\text{error absoluto}}{\text{valor verdadero}} \cdot 100$$

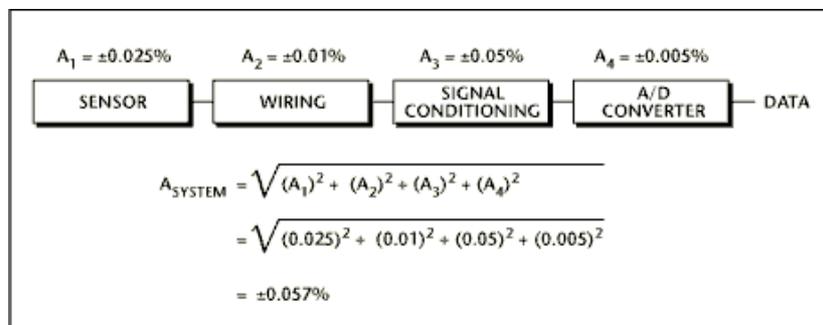
Cuando el error relativo es muy pequeño el manejo de % se vuelve engorroso, por lo que suele verse expresado en partes por millón (ppm)

$$\text{Error relativo (ppm)} = \frac{\text{error absoluto}}{\text{valor verdadero}} \cdot 10^6, \text{ donde ppm} = 1/10^6 = 10^{-6}$$

Sin embargo, **la forma correcta** de expresarlo es, por ejemplo: Error relativo = 23 $\mu\text{V}/\text{V}$ ó 56 $\mu\Omega/\Omega$ ó directamente Error relativo = 23 $\cdot 10^{-6}$.

ERROR TOTAL DE UN SISTEMA

El error total de un sistema puede estimarse como la suma cuadrática del error de sus componentes:



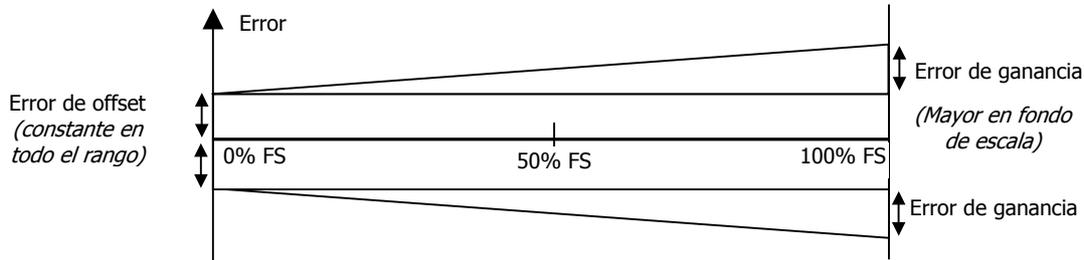
1.2.4.2.- Especificaciones

Lo que realmente suele dar el fabricante de un aparato es el valor relativo compuesto por dos términos:

$$\text{Error relativo} = \pm (\% \text{ de la lectura} + \% \text{ del rango})$$

Sustituyendo los valores por las especificaciones del fabricante obtenemos el error absoluto para una lectura dentro de un rango.

El error proporcional al valor de la lectura viene determinado mayormente por la ganancia del amplificador, mientras que el error constante en todo el rango es principalmente motivado por el offset. En la figura pueden observarse ambos tipos de error.



FS = Fondo de escala

DERIVA TEMPORAL

Las especificaciones de precisión en instrumentos de cierta calidad vienen dadas para 24 horas, 90 días, 1 año, 2 años, e incluso 5 años desde la última calibración.

EJEMPLO: ESPECIFICACIONES DEL MULTÍMETRO HP 34401A:

DC Voltage Input Characteristics

Range	Maximum reading (6% digits)	Resolution in digits			Input resistance
		6%	5%	4%	
100 mV	120.0000	100 nV	1 µV	10 µV	10 MΩ or > 10 GΩ
1 V	1.200000	1 µV	10 µV	100 µV	10 MΩ or > 10 GΩ
10 V	12.000000	10 µV	100 µV	1 mV	10 MΩ or > 10 GΩ
100 V	120.0000	100 µV	1 mV	10 mV	10 MΩ
1000 V	1050.0000	1 mV	10 mV	100 mV	10 MΩ

Input Protection: >1000 V on all ranges

Measurement Accuracy: ±(% of reading + % of range)

Range	24-Hour 23° C ±1° C	90-Day 23° C ±5° C	1-Year 23° C ±5° C
100 mV	0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035
1 V	0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007
10 V	0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005
100 V	0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006
1000 V	0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0010	0.0045 + 0.0010

Hallar la precisión del multímetro HP 34401A para una lectura de 0'8 V_{DC} después de 1 año de su calibración:

Suponemos que la medida se ha realizado en el rango más adecuado, es decir 1V.

$$\text{Error} = (\pm 0'004 \% \text{ de la lectura} + 0'0007\% \text{ del rango})$$

$$= \pm \left(\frac{0'004 \cdot 0'8}{100} + \frac{0'0007 \cdot 1}{100} \right)$$

$$= 0,000039 \text{ V} = \pm 39 \mu\text{V}$$

$$\text{Valor real} = 0,8\text{V} \pm 39 \mu\text{V}$$

La precisión de una tarjeta DAQ de 12 bits de resolución viene especificada por $\pm (0'01 \%$ lectura + 1 LSB rango) ± 1 LSB ruido. Hallar la incertidumbre para una lectura de 0,5 V en un rango de 2V:

El ruido de una tarjeta DAQ es causado principalmente por la gran cantidad de circuitos en conmutación que posee el interior de un PC. Este ruido es proporcional a la ganancia (i.e. del rango) y se especifica su valor pico a pico. La utilización del promediado de muestras puede reducir significativamente su valor y por tanto la incertidumbre. Incertidumbre es sinónimo de error:

$$\text{Error} = \pm (0'01 \% \text{ lectura} + 1 \text{ LSB rango}) \pm 1 \text{ LSB ruido}$$

$$= \pm \left(\frac{0'01 \cdot 0'5}{100} + \frac{2V}{2^{12}} \right) \pm \frac{2V}{2^{12}}$$

$$= \pm 0,001026563 \text{ V} = \pm 1'026 \text{ mV}$$

$$\text{Valor real} = 0,5V \pm 1'026 \text{ mV}$$

La precisión de una tarjeta DAQ de 16 bits de resolución viene especificada por $\pm (0'005 \%$ lectura + 1 LSB rango) ± 2 LSB ruido. Hallar la incertidumbre para una lectura de 0,5 V en un rango de 2V:

Observar que sube la resolución y el número de LSB de ruido, aunque el valor de un LSB sea ahora menor. Además ha bajado el error debido a la ganancia.

$$\text{Error} = \pm (0'005 \% \text{ lectura} + 1 \text{ LSB rango}) \pm 2 \text{ LSB ruido}$$

$$= \pm \left(\frac{0'005 \cdot 0'5}{100} + \frac{2V}{2^{16}} \right) \pm \frac{2 \cdot 2V}{2^{16}}$$

$$= \pm 0,000116553V = \pm 116'5 \mu\text{V}$$

$$\text{Valor real} = 0,5V \pm 116'5 \mu\text{V}$$

Podemos observar el aumento de la precisión respecto de una tarjeta de 12 bits.

DERIVA TÉRMICA

Las especificaciones de precisión también varían con la temperatura de funcionamiento.

En varios aparatos de medida, se desprecia el error introducido por la Tª cuando ésta se mantiene dentro de lo que se llama “ventana”, por ejemplo 15° - 35° ó 23°C ±5°C

Una resistencia de precisión de 10 KΩ tiene una deriva térmica especificada como 3 ppm/°C. ¿Cuál es el error absoluto si la temperatura es de 45°C?

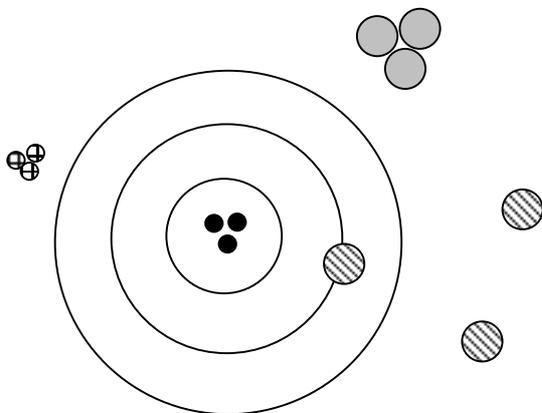
Cómo no se especifica la Tª a la cual se establece la resistencia nominal, la supondremos de 25 °C. Por lo tanto el incremento de Tª es de 20 °C, y el error absoluto será:

$$\varepsilon = 10000 \cdot 20 \cdot (3 / 10^6) = 0'6 \Omega$$

1.2.5.- REPETIBILIDAD

Indica la proximidad entre medidas sucesivas realizadas en iguales condiciones.

1.2.6.- DIFERENCIA ENTRE RESOLUCIÓN, PRECISIÓN Y REPETIBILIDAD



	Resolución	Precisión	Repetibilidad
●	Alta	Alta	Alta
⊕	Alta	Baja	Alta
● (gris)	Baja	Baja	Alta
● (rayado)	Baja	Baja	Baja

- El valor real a medir es el centro de la diana, por lo que la **precisión** aumenta cuando las medidas se aproximan a dicho punto.
- El radio de los círculos es inversamente proporcional a la **resolución**.
- La separación entre los círculos de un mismo tipo nos da idea de la repetibilidad de la medida. En el último caso las tres medidas son muy distintas entre sí por lo que podemos decir que la repetibilidad es baja.

1.2.7.- DÍGITOS: TRUNCAMIENTO, REDONDEO, OPERACIONES

1.2.7.1.- Truncamiento:

Un resultado no debe contener más dígitos significativos que el que menos de sus componentes:

Por ejemplo: $52'15 + 23'109 + 12'1256 = 87'38$

1.2.7.2.- Redondeo

De 0 a 4 se redondea a 0

De 5 a 9 se añade un 1 al siguiente dígito

1.2.7.3.- Operaciones

SUMA

Suma de cantidades → Suma de incertidumbres:

$$(3'456 \text{ V} \pm 0'006 \text{ V}) + (3'456 \text{ V} \pm 0'006 \text{ V}) = 6'912 \text{ V} \pm 0'012 \text{ V}$$

PRODUCTO:

Error total = Suma cuadrática del error de los factores

$$P = V * I = (11'023 \text{ V} \pm 0'07\%) * (12'132 \text{ A} \pm 0'034\%)$$

$$\text{Error} = \sqrt{0'07^2 + 0'034^2} = 0'077820306 \%$$

$$P = 133'731036 \text{ W} \pm 0'077820306 \% \rightarrow \text{Demasiados dígitos}$$

Truncamos y redondeamos la potencia para que no tenga más decimales que sus componentes V e I:

$$P = 133'731036 \text{ W} \rightarrow P = 133'731 \text{ W}$$

Hacemos lo mismo con el porcentaje de error: $0'077820306 \% \rightarrow 0'08 \%$

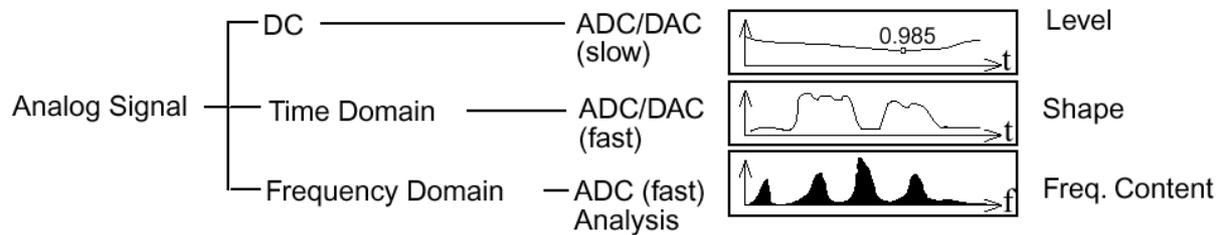
Finalmente, obtenemos: **$P = 133'731 \text{ W} \pm 0'08 \%$**

- ✎ **Problema propuesto (Problema 4, septiembre 2002): Problema 7, Pág. 358, A. Manuel Lázaro. Un transductor de temperatura proporciona una tensión de salida cuya sensibilidad es de 20 mV/°C. Si se desea digitalizar esta señal manteniendo una precisión en la medida de 0,1 °C en un rango de 0 a 100 °C, determinar el número mínimo de bits que ha de tener el conversor A/D.**

Se recomienda dibujar la curva de calibración para una mejor comprensión del problema.

Solución = 10 bits

CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE UNA MEDIDA



- Nos referimos a la variación “rápida” respecto al tiempo de la señal medida. Respuesta de los sensores a cambios rápidos de la magnitud a medir.
- Estas características se deben a la presencia de elementos almacenadores de energía.

VELOCIDAD DE RESPUESTA (RETARDO)

Capacidad de la magnitud de salida de seguir en el tiempo las variaciones de la señal de entrada.

ERROR DINÁMICO

Diferencia entre el valor indicado y el valor exacto de la variable medida cuando el error estático es cero.

1.3.1.- SISTEMAS DE ORDEN CERO

1.3.2.- SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

1.3.3.- SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

1.4.- CARACTERISTICAS DE ENTRADA Y SALIDA

1.4.1.- IMPEDANCIA DE ENTRADA/SALIDA

En todo proceso de medida es inevitable la extracción de cierta cantidad de energía del sistema. Esto causa que la variable medida quede alterada, lo que se llama “**error por carga**”. La impedancia de entrada refleja este hecho.

La impedancia de entrada del sistema de medida debe ser alta para evitar el efecto de carga al sistema.

Por ejemplo, para medir la temperatura de un horno, el efecto de carga del termómetro debe ser despreciable, lo que significa que introducir el termómetro en el horno no variará la temperatura del sistema.

La impedancia de entrada de un voltímetro debe ser mucho mayor que la impedancia de salida del sistema a medir, pues de lo contrario la corriente que absorbe modificaría el sistema.

1.4.2.- MÁXIMA TRANSFERENCIA DE POTENCIA:

Se produce cuando la impedancia de salida de la fuente de energía y la impedancia de entrada del sistema que la absorbe son iguales:

$$P_{\text{máx}} \leftrightarrow Z_{\text{in}} = Z_{\text{out}}$$

Por ejemplo, si la impedancia de salida de un amplificador de audio es de 8Ω , debemos conectar altavoces cuya impedancia de entrada sea de 8Ω en pos de aprovechar al máximo la potencia suministrada por el amplificador.