

INGENIERO DE SISTEMAS DE DEFENSA SENSORES Y TRATAMIENTO DE SEÑAL

TEMA 2: INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE MEDIDA

2.1. INTRODUCCIÓN

2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SENSORES

2.3. PROCESO DE MEDICIÓN

2.4. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS

2.5. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

2.6. CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA/SALIDA

2.7. DIAGRAMAS P&I



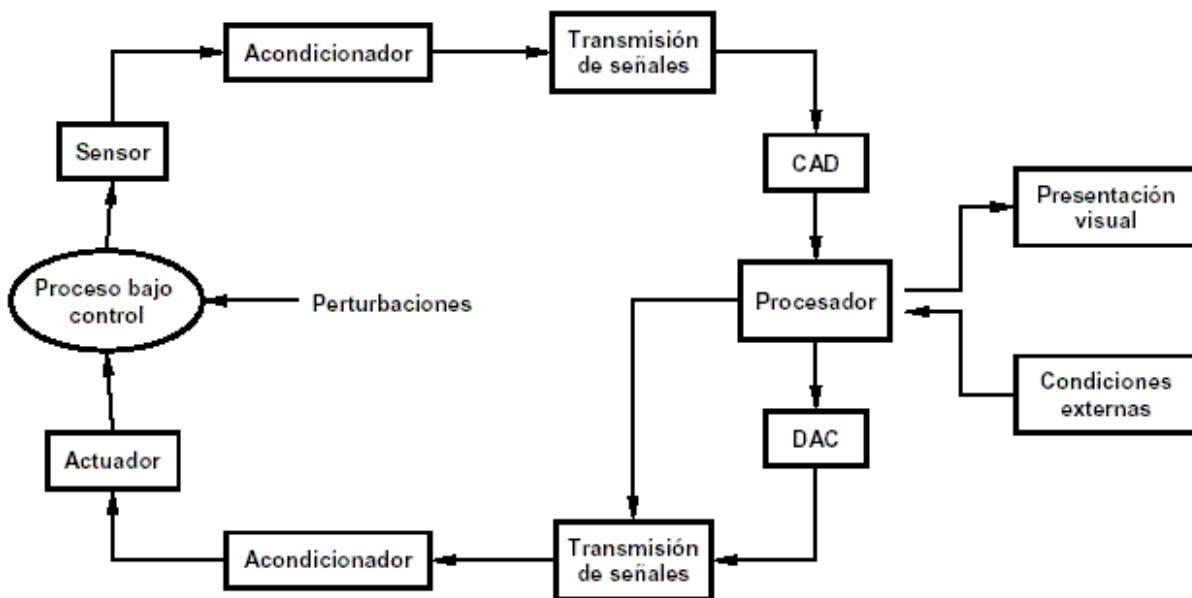
Dpto de Tecnología Electrónica

Universidad Politécnica de Cartagena

1.- INTRODUCCIÓN

Definición

Se define un **sistema de control** como "un sistema que compara el valor de una variable a controlar con un valor deseado (consigna) y cuando existe una desviación, efectúa una acción de corrección sin que exista intervención humana".



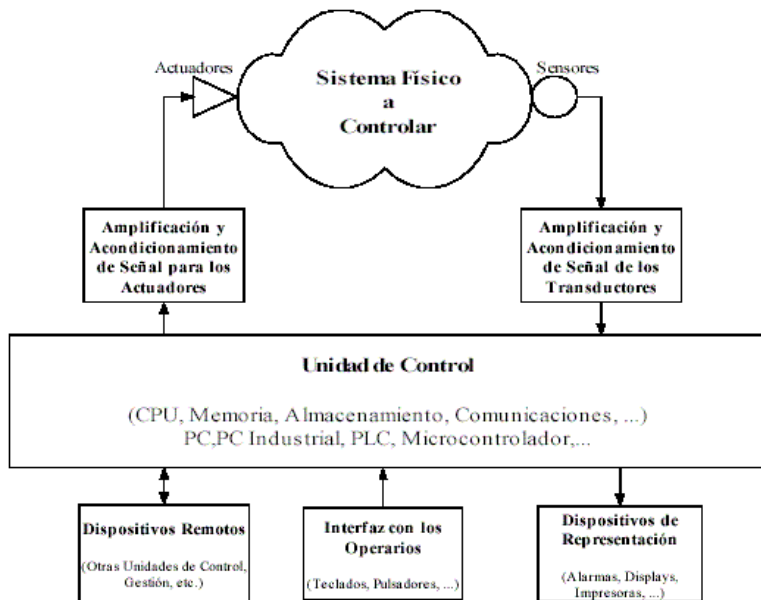
Hitos Fundamentales

- 1960-1980: La mayoría de los sistemas de control estaban basados en amplificadores operacionales a fin de implementar todas las funciones de control ⇒ Control Analógico.
- 1980-1990: Se incorporan microprocesadores y microcontroladores junto a los amplificadores operacionales ⇒ Control Digital.

Elementos de un sistema de control

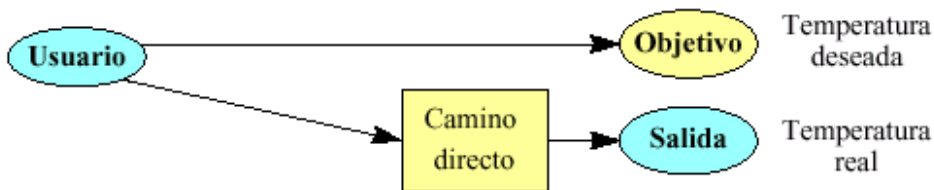
Un sistema de control elemental incluye:

- a) Unidades de medida.
- b) Dispositivos Indicadores.
- c) Registradores.
- d) Elementos Finales de control (Actuadores)
- e) El Propio Proceso a Controlar.



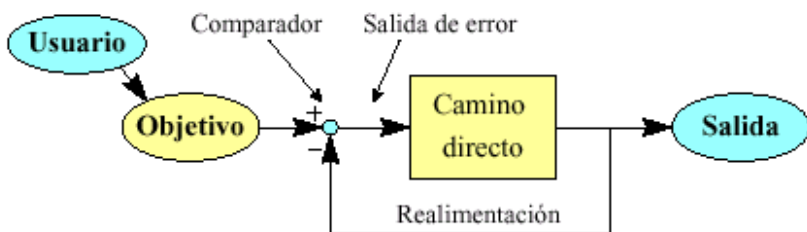
Todos estos elementos constituyen un todo que forman lo que conceptualmente se denomina el **lazo de control**. Este lazo de control puede ser *abierto o cerrado*.

• Sistema en lazo abierto



En los sistemas en lazo abierto no existe realimentación con el sistema, por lo que no se ajusta el control. Son sistemas más bien dedicados a la monitorización y el registro, no al control.

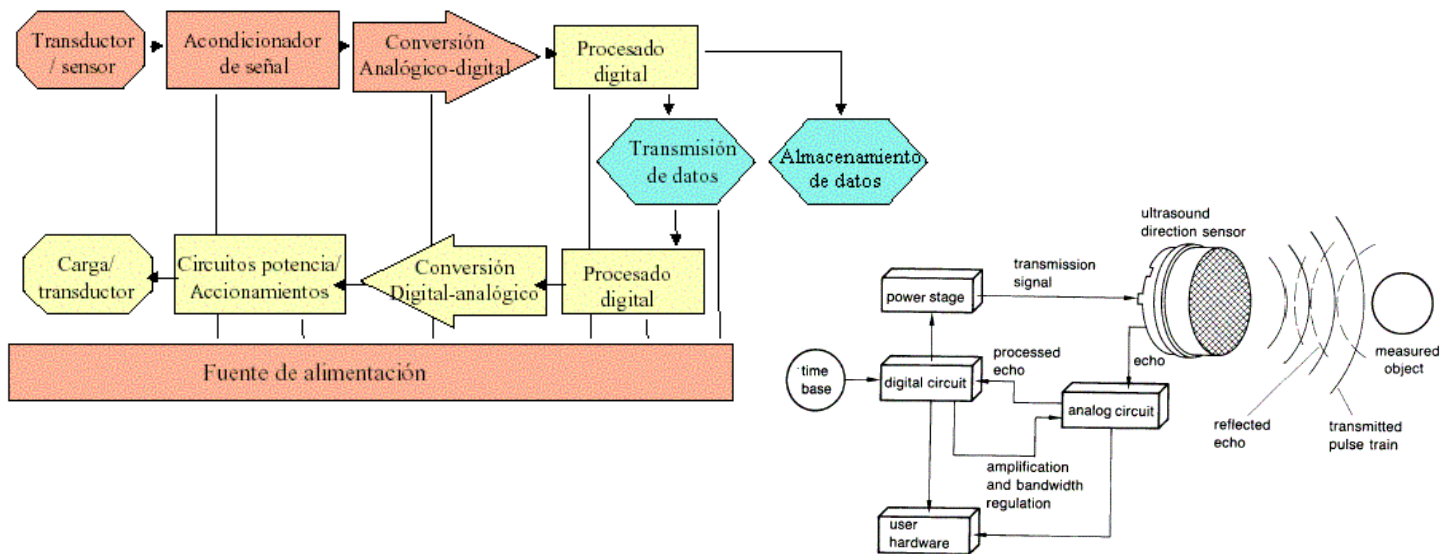
• Sistema en lazo cerrado



En los sistemas en lazo cerrado se compara la información de los elementos de medida con una referencia (consigna) y la discrepancia (señal de error) determina la actuación.

Elementos más usuales de un sistema de medida y control electrónicos

Los sistemas de medida y control electrónicos constituyen hoy por hoy, la forma de implementación más extendida, aunque todavía es posible encontrar excepciones (regulador de Watt).



En estos sistemas es habitual encontrar los siguientes elementos:

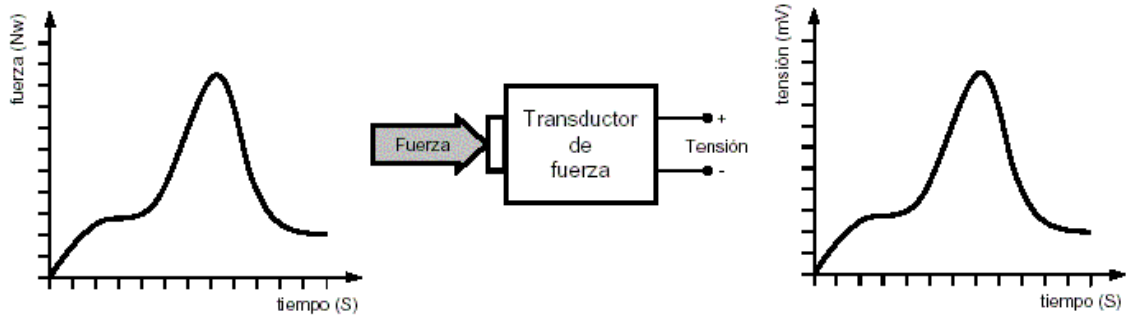
● Sensores y Transductores

- **Sensores:** Elemento primario que a partir de la energía del medio proporciona una señal de salida que es función de la magnitud que pretende medir.
- **Transductor:** (del latín *transducere*= convertir). Dispositivo que transforma una magnitud física (mecánica, térmica, magnética, eléctrica, óptica, etc.) en otra magnitud, normalmente eléctrica. En la realidad es un dispositivo más complejo, ya que puede incluir amplificadores, acondicionadores de señal, conversores A/D, etc.

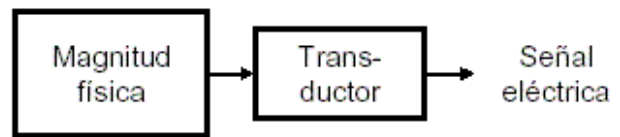
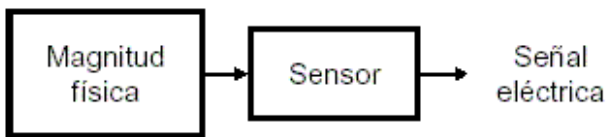
Transductor

- **Fenómenos (entre otros):**
 - Temperatura
 - Luminosidad
 - Deformación / presión / fuerza
 - Desplazamiento/ velocidad/ aceleración / vibración
 - Flujo, caudal
- Volumen /energía
- Magnetismo y partículas
- Frecuencia / tiempo
- V, I
- **Usando:**
 - I, V, R, C, L,

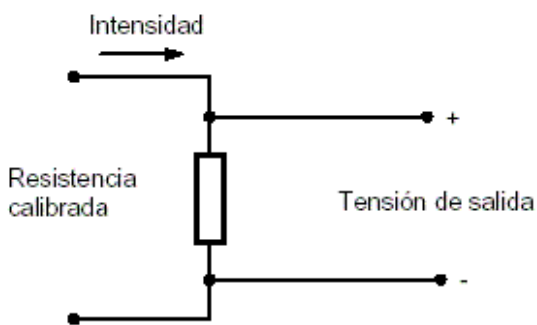
Ejemplo:



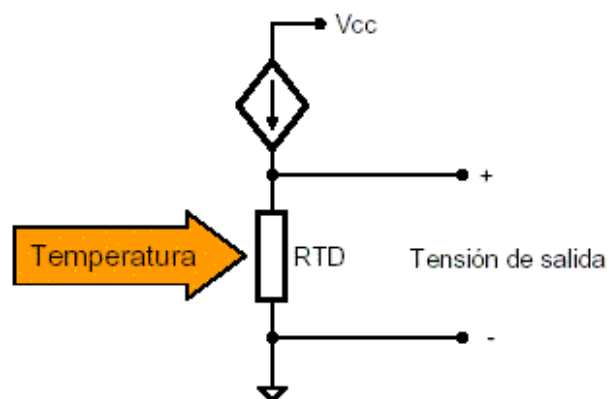
Diferencia entre sensor y transductor: En un transductor se produce una conversión del tipo de energía.



Ej.: Medida de la corriente por una línea utilizando una resistencia de bajo valor.



Ej.: Medida de temperatura utilizando una RTD (Detector de Temperatura Resistivo).



Acondicionador de señal

Acondicionadores de señal

Reciben la señal de salida de los transductores y la preparan de forma que sea apta para tratarla mediante dispositivos tales como PLC, PC Industriales, microcontroladores, etc. Normalmente, el acondicionamiento de salida suele estar constituido por un amplificador de potencia.

- **Funciones:**
- Acoplo de impedancias
- Linealización
- Puentes
- Ganancia (escalado)
- Filtrado y reducción ancho de banda
- Integración /diferenc./P.
- Reducción de ruido
- Conversión entre dominios V; I / t / f
- Detección de picos
- *Aislamiento*
- Lock-in y chopper
- Métodos oscilométricos
- **Usando:**
- Amp.Op., Comparadores
- Vref
- R's, C's, L's y Diodos

Conversores A/D

Adaptan la señal para su posterior utilización por un sistema digital mediante un proceso que suele constar de tres etapas

- a) *Muestrea*. Se toman valores de la magnitud analógica a intervalos determinados de tiempo, denominado tiempo de muestreo. Su inversa constituye la frecuencia de muestreo.
- b) *Cuantificación*. Se representa la magnitud de la señal mediante un nº finito de valores.
- c) *Codificación*: Se representa el valor mediante un código determinado (binario de N bits, Gray,...)

Es habitual oír hablar de conversores de diferentes tipos: Integración (doble rampa), V a F, Signa-Delta, Aproximaciones sucesivas, ½ Flash-Flash, etc.

Transmisión de Datos e Instrucciones: Módulo encargado de enviar los datos obtenidos al sistema de control. Hay multitud de métodos: analógicos o digitales, por línea directa o por bus, por red, etc. Suelen ser habituales el bus de instrumentación GPIB (IEEE 488), buses de control industrial como el CAN, VME, VXE..., u otros más clásicos como el RS232, RS485, USB, o incluso a través de Internet (ethernet).

Procesado: Determinación de las actuaciones que se aplicarán al sistema físico. Se encarga de realizar tareas tales como: modificación de ganancias, filtrado, linealizaciones, integraciones, diferenciaciones, detección de picos u otro tipo de operaciones más complejas.

- **Visualización y Registro:** Almacenamiento de datos importantes, generación de alarmas y almacenamiento de históricos para su análisis posterior.
- **Conversor D/A:** Toma la información digital y la convierte en valores analógicos. Dependiendo del actuador, podría ser necesaria una conversión previa.
- **Actuador:** Dispositivo que realiza una conversión de energía para modificar el estado del sistema a controlar.
- **Fuentes de alimentación:** Dispositivos encargados de suministrar la energía necesaria a todos los elementos electrónicos.

Clasificación de los sistemas de medida y control

Es posible clasificarlos atendiendo a diferentes criterios:

a) En función de la Naturaleza de las Señales:

- **Analógico:** Controlador analógico, normalmente electrónico. Veloces y robustos. Imposible implementar controladores complejos.
- **Digitales:** Normalmente un PC Industrial o un PLC. Son muy eficientes y pueden resolver problemas complejos. Permite usar visualizadores y sistemas de almacenamiento masivo.
- **Híbrido:** Intentan mezclar las ventajas de ambos tipos, velocidad y robustez de los analógicos junto con la versatilidad y potencia de cálculo de los digitales. Suelen basarse en la jerarquización del problema.

b) En función del Bucle de Control:

- **Bucle Abierto:** No existe realimentación con el sistema, por lo que no se ajusta el control. Monitorización o Registro, no para controlar.
- **Bucle Cerrado:** Se comparan las medidas de los transductores con una referencia y la discrepancia determina la actuación.

c) En función de la Distribución del Sistema:

- **Centralizado:** Procesamiento y Control en un único elemento al que llegan todas las medidas y del que parten todas las actuaciones.
- **Descentralizado:** Procesado en varios elementos coordinados entre sí, por sectores, zonas,...
- **Distribuido:** Descentralización mayor, la comunicación resulta fundamental.

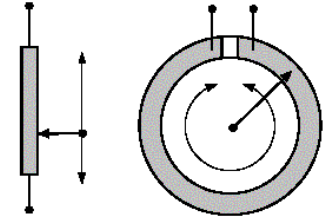
2.- CLASIFICACIÓN DE LOS SENSORES

1.1.- Atendiendo al Fundamento Físico

Hace referencia a la propiedad física cuya variación produce la excitación.

- **Resistivos:** Miden variaciones de la resistencia, que consiste en una medida de la oposición del dispositivo a ser atravesado por una corriente eléctrica.

$$R = \sigma \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{l}{S} \left\{ \begin{array}{l} \sigma = \text{Conductividad} \\ \rho = \frac{1}{\sigma} = \text{Resistividad} \end{array} \right.$$

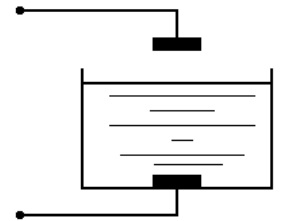


Características: Económicos.

Ejemplos: Potenciómetros, Galgas, RTDs, Termistores...

- **Capacitivos:** Miden variaciones de la capacidad. Dos conductores separados por un dieléctrico constituyen un condensador.

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d} \quad \epsilon = \text{Constante Dieléctrica}$$

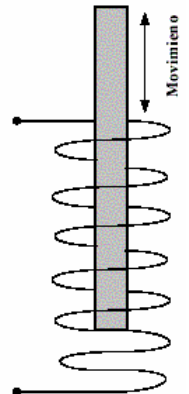


Características: Precisos. Mínimo error de carga, pero no lineales.

Ejemplos: Transductores de posición, nivel, fuerza...

- **Inductivos:** Miden variaciones de la inductancia electromagnética, o magnitud del flujo magnético (Φ) que atraviesa el dispositivo cuando circula por él una corriente (I).

$$L = N \cdot \frac{d\Phi}{di} \quad N = \text{Número de vueltas de la espira.}$$



Características: Sensibles, resistentes ala humedad, se ven afectados por campos electromagnéticos.

Ejemplos: Transductores de posición, detectores de presencia...

- **Generadores de Tensión o Intensidad:** La magnitud física provoca la generación de tensión (V) o intensidad (I) en el dispositivo, sin necesidad de alimentación externa.

1.2.- Atendiendo a la Alimentación

- **Activos:** Ellos mismos generan una tensión o corriente, no requiriendo por tanto una alimentación externa. Se basan en diferentes efectos: termoelectrico, piezoelectrico...
- **Pasivos:** Requieren de una alimentación o excitación externa para generar una señal.

1.3.- Atendiendo al Modo de Funcionamiento

- **Deflexión:** La magnitud medida produce un efecto físico que ocasiona una reacción en el sensor asociada a una variable útil fácilmente medible.
Ejemplos: Potenciómetros, galgas, NTCs, RTDs, ...
- **Comparación:** Se compara la variable a medir con otra conocida (referencia de medida). El detector de desequilibrio proporcionará la medida del transductor.
Ejemplos: Balanza, tubo en U para medida de presión, ...

1.4.- Atendiendo a la Señal de Salida

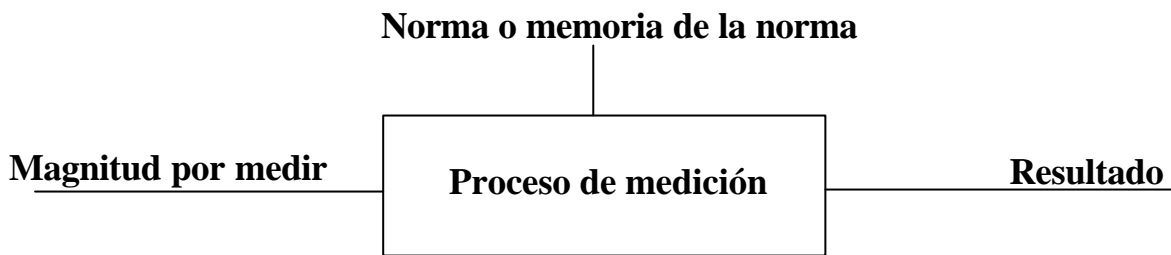
- **Analógicos:** La salida del transductor es un nivel de tensión o intensidad que varía de forma continua con la variable a medir dentro del rango de medida del transductor. Suelen emplearse valores normalizados a 0-10V y 4-20mA.
- **Digitales:** La salida está codificada mediante un código binario o en forma de pulsos. Son codificaciones habituales la binaria, Gray, el BCD, ...
- **Todo-Nada:** Se consideran un caso particular de los digitales. La salida sólo presenta dos estados: activa o no activa.
Detectores de presencia, ...

1.5.- Atendiendo a la Magnitud a Medir

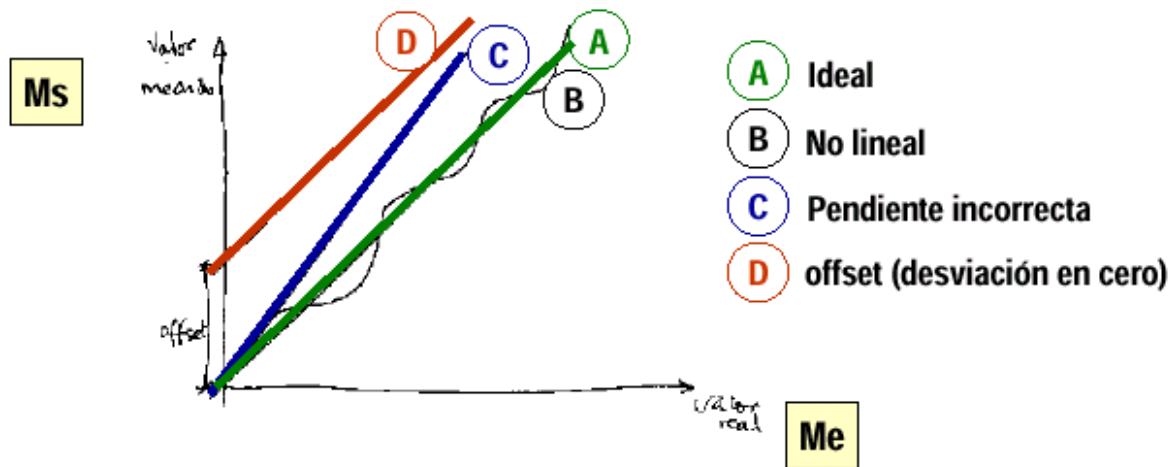
Posición	Fuerza	Flujo
Velocidad	Par	Caudal
Aceleración	Nivel	Luminosidad
Temperatura	Presión

3.- PROCESO DE MEDICIÓN

Con frecuencia, al percibir una magnitud física el objetivo es medirla. El proceso de medición implica la comparación de alguna magnitud por medir con una norma.



Ninguna medición hecha con un sistema real es perfecta. Siempre existe un pequeño error que significa que el resultado obtenido con el sistema de medición es siempre ligeramente diferente del valor real o verdadero de la magnitud que se mide. De hecho el valor real nunca se conoce en verdad, sólo se aproxima mediante la medición.



- La **linealidad** refleja si hay o no una relación lineal entre el valor real y el medido. La no linealidad es difícil de corregir y, por tanto, es un parámetro importante a considerar.
- El **offset** o desviación cero refleja el valor medido cuando el sensor debería devolver cero. Genera un error, pero es más fácil de corregir.

ERRORES

Los errores relacionados con la medición son ocasionados por muchos factores y se pueden agrupar en varias categorías.

● Errores aleatorios o accidentales

Generan resultados diferentes en lecturas repetidas y pueden ser ocasionados por ruido o por variaciones ambientales. Como son aleatorios, a tales errores suelen aplicarse técnicas estadísticas para la reducción de su efecto (promedios).

● Errores sistemáticos

Estos errores son constantes y ocasionados por características del sistema como la calibración incorrecta, los límites de definición o los efectos de carga en donde el sistema de medición cambia el valor de la magnitud que está midiendo. Los errores en la técnica que se emplea también pueden generar este tipo de error.

No son remediables por medio de técnicas estadísticas ya que si, por ejemplo, un sistema está calibrado de forma incorrecta, cada lectura resultará afectada y el tomar una gran cantidad de lecturas no resolverá el problema.

Una dificultad mayor relacionada con esta clase de errores es que no se les puede detectar mediante una disparidad en las lecturas obtenidas.

Los errores sistemáticos se pueden reducir por medio de la calibración mejorada o de una mayor atención a la técnica.

● Errores ilegítimos

No deberían existir, pero en ocasiones ocurren. Ejemplos de ellos son las equivocaciones en la medición o el cálculo. Estos errores deben eliminarse haciendo un diseño escrupuloso.

● Ejemplo: Fallo del misil Patriot

Fuente: GAO (General Accounting Office)/IMTEC (Information Management and Technology Division)-92-26
February 4, 1992



United States General Accounting Office

Washington, D.C. 20548

Information Management and Technology Division B-247094

Dear Mr. Chairman:

On February 25, 1991, a Patriot missile defense system operating at Dhahran, Saudi Arabia, during Operation Desert Storm failed to track and intercept an incoming Scud. This Scud subsequently hit an Army barracks, killing 28 Americans. After reviewing the facts associated with this incident it has been determined that a computer software problem was involved

El Patriot fue inicialmente diseñado para operar en Europa frente a misiles soviéticos que alcanzaban velocidades del orden de MACH 2 (1500millas por hora). A fin de ser detectado se diseñó de forma que fuese móvil, de forma que tras unas pocas horas de operatividad pudiese trasladarse a otra localización. Los militares estadounidenses trataron de aprovechar tales características en Arabia Saudí.

Figure 8: Correctly Calculated Range Gate

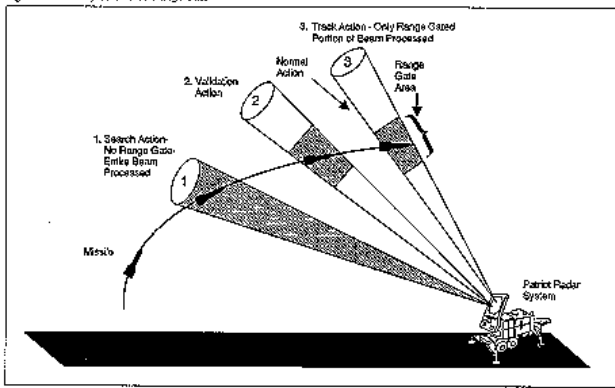
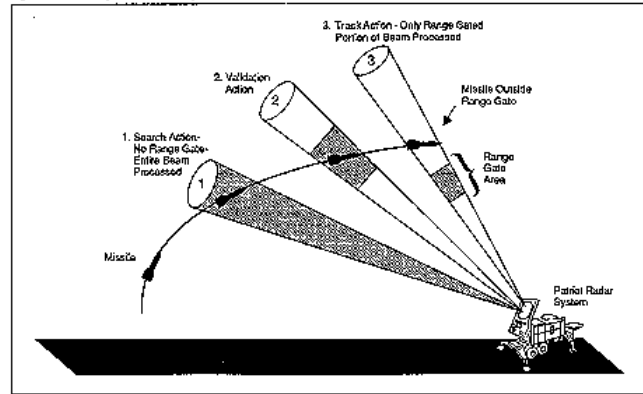


Figure 9: Incorrectly Calculated Range Gate



Para localizar el misil, el sistema de detección toma información sobre la velocidad del misil y el tiempo transcurrido desde la última localización. Ambos números reales que deben almacenarse en los registros de 24 bits que posee el sistema, lo que produce una imprecisión en las medidas. En concreto la del tiempo, que se guarda en múltiplos de $1/10. = 1/2^4 + 1/2^5 + 1/2^8 + 1/2^9 + 1/2^{12} + 1/2^{13} + \dots$ que en 24 bits no tiene una codificación exacta; introduciendo un error de 0.00000000000000000000000011001100... binario, o 0.000000095 decimal.

En el momento del accidente la batería antimisil llevaba operativa 100 horas seguidas. Multiplicando por el número de décimas de Segundo en 100 horas sale $0.000000095 \times 100 \times 60 \times 60 \times 10 = 0.34$. El Scud tiene una velocidad de 1,676 m/s; por lo que en ese tiempo se desplaza más de medio kilómetro

RUIDO

El ruido existe en todos los sistemas electrónicos. Su presencia aumenta la cantidad de errores aleatorios relacionados con cualquier medición y finalmente provoca una restricción sobre los valores más pequeños que se pueden medir.

Para medir la calidad de una imagen frente al ruido se suele utilizar la denominada relación señal-ruido (S/N Ratio), que se define como:

$$S / N = \left| \frac{\text{señal}}{\text{ruido}} \right| \Leftrightarrow S / N[\text{dB}] = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{\text{señal}}{\text{ruido}} \right|$$

Ejemplo: Medición de la calidad de una imagen transmitida

S/N ratio [dB]	S/N ratio:1	Calidad de imagen
60 dB	1000	Excelente. Sin ruido aparente
50 dB	316	Buena. Ligera presencia de ruido, pero prácticamente imperceptible.
40dB	100	Razonable. Grano fino o "nieve" en la imagen; lo que origina la pérdida de ciertos detalles.
30 dB	32	Calidad Pobre, Gran cantidad de ruido
20 dB	10	Inservible

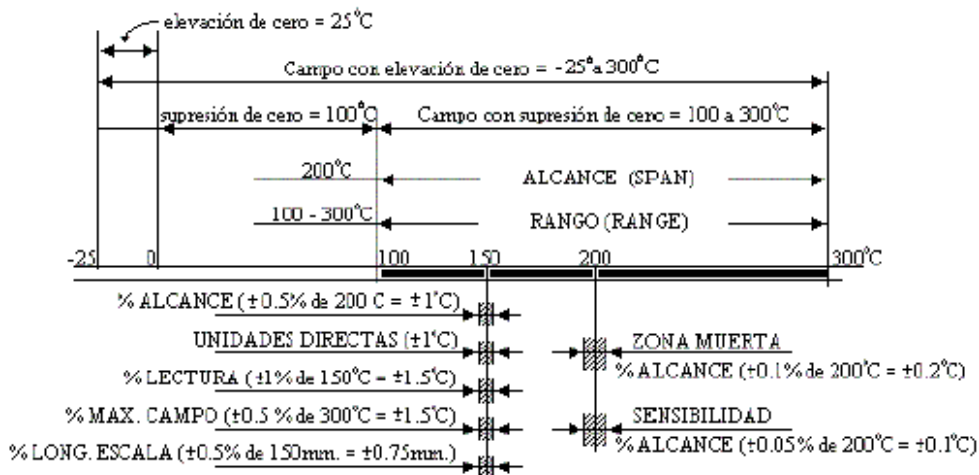
Todos los componentes electrónicos que poseen resistencia generan lo que se llama **ruido térmico** o **ruido Johnson** como resultado del movimiento aleatorio de sus átomos (inducido en forma térmica). Este tipo de ruido pertenece a lo que se denomina **ruido blanco** ya que presenta componentes en todas las frecuencias, con igual potencia de ruido en todas las partes del espectro.

Como todos los transductores tienen resistencia, todos producirán ruido térmico que se agrega a su señal de salida siguiendo la ecuación $V_{\eta}(\text{r.m.s.}) = (4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot R)^{1/2}$

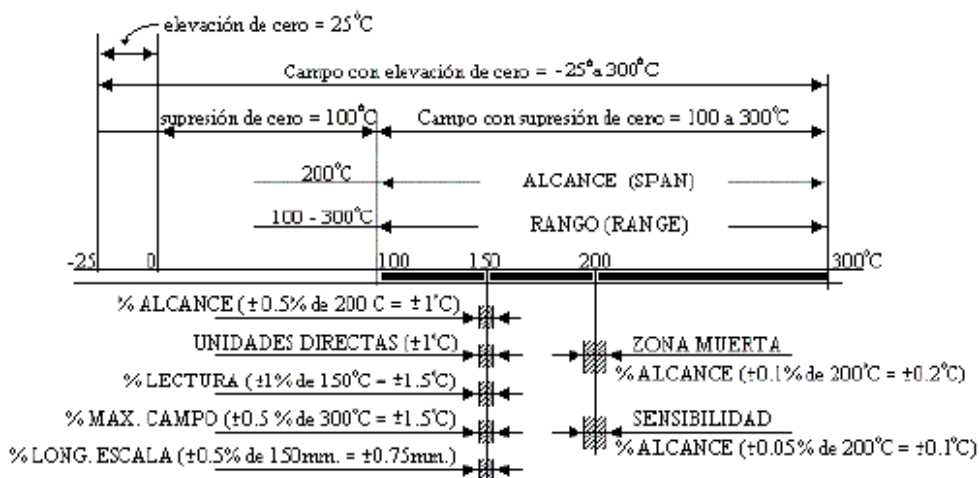
K:Cte de Boltzman ($1.3805 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$)

B: Ancho de banda del sistema de medición

4.- CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS



- **RANGO O CAMPO DE MEDIDA (RANGE):** Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento; Viene expresado estableciendo los dos valores extremos. Ej. : Rango de un medidor de temperatura es de 100°C a 300°C.
- **ALCANCE (SPAN):** Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. Para el ejemplo anterior el alcance es 200°C.
- **ZONA MUERTA (DEAD ZONE):** Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento. Es decir que no produce respuesta. Viene dada en tanto por ciento del Span de la medida. Por ejemplo, si la zona muerta es de $\pm 0.1\%$ del Span (200°C) entonces $0.1 \times 200 / 100 = \pm 0.2^\circ\text{C}$.
- **CAMPO DE MEDIDA CON ELEVACIÓN DE CERO:** Es aquel campo de medida en el que el valor cero de la variable o señal medida, es mayor que el valor inferior del Rango. El cero de instrumento esta dentro del rango de medición (-25 a 300°C).
- **ELEVACIÓN DE CERO:** Es la cantidad con que el valor cero de la variable supera el valor inferior del rango de medición. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en porcentaje de span. Ejemplo: 25°C.

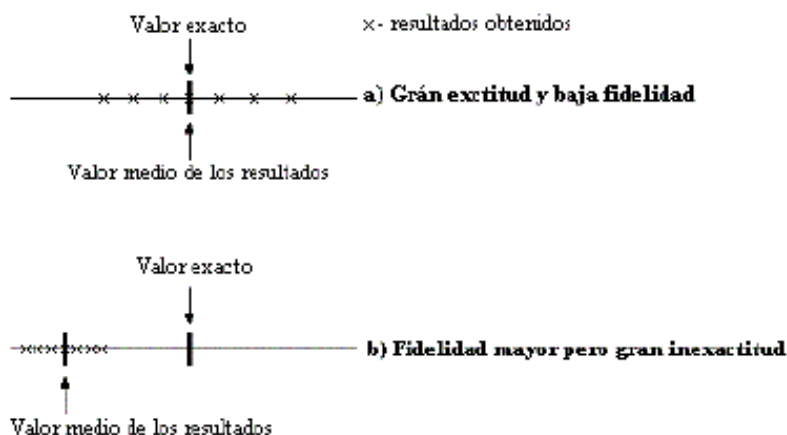


- **CAMPO DE MEDIDA CON SUPRESIÓN DE CERO** : Es aquel campo de medida, en el que el valor cero de la variable o señal de medida, es menor que el valor inferior del campo. El cero de instrumento esta fuera del rango de medición (100 - 300).
- **SUPRESIÓN DE CERO**: Es la cantidad con que el valor inferior del rango de medición supera el valor cero de la variable. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en porcentaje del span (alcance). Ejemplo: 100°C, 50%.
- **SENSIBILIDAD (SENSITIVITY)**: Es definida como la razón de un cambio en la salida al correspondiente cambio en la entrada bajo condiciones estáticas o de estado estacionario, se designa por K. Cuando un transductor saca 5 mV por grados Celsius, la sensibilidad es de 5mV/ °C (relación lineal). La sensibilidad viene dada en tanto por ciento del Span de la medida. Si la sensibilidad de un instrumento de temperatura es ±0.05% (Span = 200), su valor será de $0.05 \times 200 / 100 = \pm 0.1$ Unidades de salida/°C.
- **EXACTITUD (ACCURACY)**: Es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio. Hay varias formas de expresar la exactitud.
 - *Tanto por ciento del alcance.* Para el ejemplo anterior que tenia un rango entre 100 y 300 °C y para una lectura de 150°C con una exactitud de ±0.5% del SPAN, el valor real estará comprendido entre $150^\circ\text{C} \pm 0.5 \times 200 / 100 = 150 \pm 1^\circ\text{C}$, es decir, entre 149 y 151°C.
 - *Directamente en unidades de la variable medida.* Por ejemplo, se tiene ±1°C de exactitud ⇒ En cada valor de temperatura leído hay una incertidumbre (error) de ±1°C
 - *Porcentaje de la lectura real.* Para una lectura de 150°C con una exactitud de ±1% de la lectura ⇒ la incertidumbre será de ± 1.5°C. En este caso la exactitud varía en cada punto del instrumento.

- *Porcentaje de la lectura a Plena Escala (Full-Scale) del instrumento.* Una exactitud de $\pm 0.5\%$ FS en un rango de 100° a 300°C \Rightarrow la incertidumbre será de $\pm 0.5 \cdot 300 / 100 = \pm 1.5^\circ\text{C}$
- *Porcentaje de la longitud de la escala del instrumento.* Por ejemplo, si la longitud de la escala del instrumento es de 150mm , y la exactitud de $\pm 0.5\%$ \Rightarrow representará una incertidumbre de $\pm 0.75\text{mm}$.

La exactitud varía en cada punto del campo de medida del instrumento, aunque el fabricante la especifica en todo el margen del instrumento. Esto quiere decir que el instrumento puede tener una exactitud por ejemplo en la zona central de la escala y otra totalmente diferente en sus extremos. Por eso cuando se desea obtener la máxima exactitud en un punto determinado de la escala, puede calibrarse únicamente para ese punto de trabajo, sin considerar los valores restantes del campo de medida.

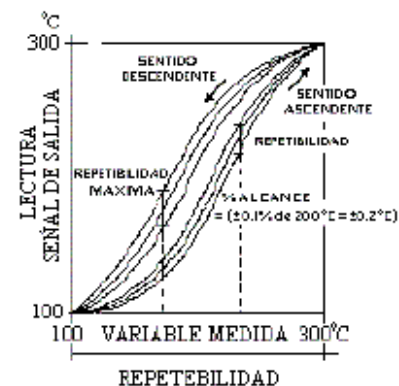
- **FIDELIDAD (PRECISION)** : Suele confundirse con exactitud, pero una medición precisa puede no ser una medición exacta. Si el medidor está expuesto a la misma entrada en varias ocasiones y los resultados tienden a permanecer estrechamente juntos, entonces se dice que el instrumento es de alta precisión. La fidelidad implica que tenga simultáneamente una conformidad en las sucesivas lecturas y un número alto de cifras significativas y es, por tanto, una condición necesaria pero no suficiente para la exactitud.



- **FIABILIDAD**: Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones específicas.

● REPETIBILIDAD (REPEATABILITY)

Es la capacidad de reproducción de la señal de salida del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. Se considera en general su valor máximo (repetibilidad máxima) y se expresa en tanto por ciento del Span; un valor representativo es el de $\pm 0.1\%$. $0.1 \times 200 / 100 = \pm 0.2^\circ\text{C}$. Nótese que la repetibilidad no incluye la histéresis.



$$\text{Repetibilidad} = 2 \sqrt{\frac{S_i - S_n}{N}}$$

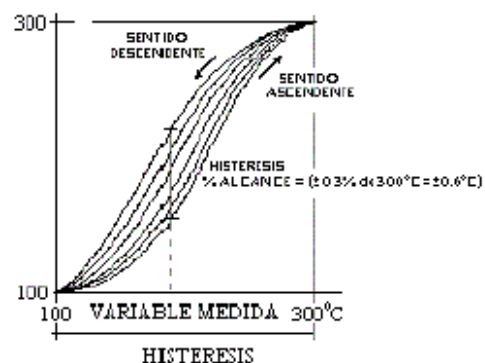
$S_i \rightarrow$ Lecturas Individuales
 $S_n \rightarrow$ Media de las lecturas
 $N \rightarrow$ Número total de lecturas

Variable (PSI)	Indicación	$(X_i - X)^2$
Desde 0 a 0.5	0.502	0.000004
Desde 0 a 1	1.006	0.000036
Desde 0 a 1.5	1.509	0.000081
Desde 0 a 2	2.008	0.000064
Desde 0 a 2.5	2.506	0.000036
Desde 0 a 3	3.007	0.000049
Desde 0 a 3.5	3.503	0.000009
Desde 0 a 4	4.006	0.000036
Desde 0 a 4.5	4.507	0.000049
Desde 0 a 5	5.010	0.000100
Desde 0 a 5.5	5.505	0.000025
Desde 0 a 6	6.006	0.000036
Desde 0 a 6.5	6.501	0.000001
Desde 0 a 7	7.003	0.000009
Desde 0 a 7.5	7.504	0.000016
Desde 0 a 8	8.009	0.000081
Desde 0 a 8.5	8.508	0.000064
Desde 0 a 9	9.008	0.000064
Desde 0 a 10	10.005	0.000025
Numero de Datos =	19	Total = 0.000785

resultando: $\sqrt{\frac{0.000785}{19}} = \pm 0,02\%$

● **REPRODUCTIBILIDAD:** Término aplicado a la capacidad de un sistema de medida o instrumento para mostrar la misma lectura para una entrada en distintas ocasiones, pero bajo las mismas condiciones y a lo largo de un período de tiempo determinado. Por ejemplo un valor representativo sería $\pm 0.2\%$ del alcance a lo largo de un período de 30 días. La repetitividad es la reproductibilidad cuando se aplica una entrada constante repetidamente en cortos intervalos de tiempo, bajo las mismas condiciones.

● **HISTÉRESIS (HYSTERESIS):** Máxima diferencia entre lecturas, para la misma entrada. Cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos ascendente y descendente. Se expresa en tanto por ciento del span de la medida. Ej: Si en un termómetro de rango 0 - 100°C, para el valor de la variable 40°C el instrumento marca 39.9 al subir la temperatura desde 0, e indica 40.1 al bajar la temperatura desde 100°C, el valor de histéresis es de : $(40.1 - 39.9) * 100 / (100 - 0) = \pm 0.2\%$ del span $\Rightarrow \pm 0.2^\circ\text{C}$.



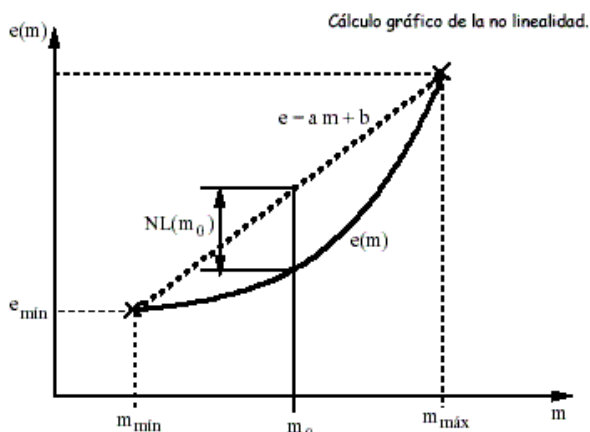
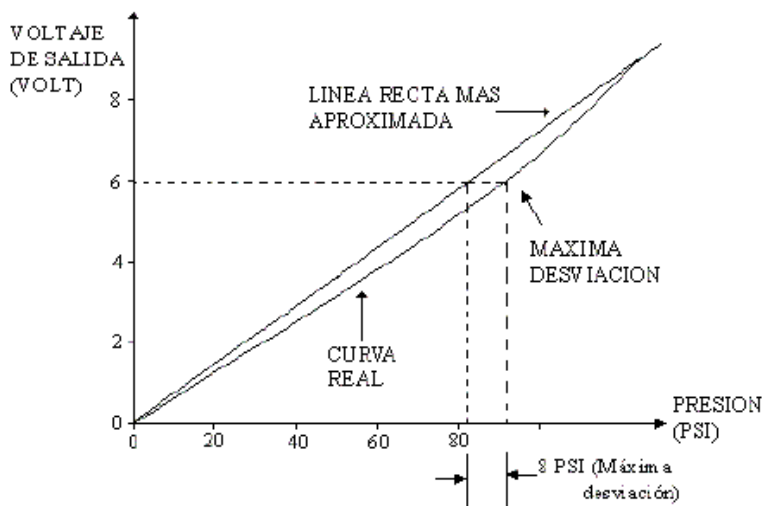
● **RESOLUCIÓN:** Es el mínimo valor medible de un cambio en la variable de entrada. Esta característica del instrumento sólo puede ser cambiada por re-diseño. Generalmente es expresada como un porcentaje del alcance de medida. En algunos casos, la resolución de un sistema de medición es limitada por la sensibilidad del acondicionador de señal asociado. Cuando esto ocurre, la resolución puede ser mejorada empleando un mejor acondicionamiento. En sistemas digitales, la resolución es una cantidad perfectamente definida que es simplemente el cambio en la variable dinámica, representada por el cambio de 1 bit en la palabra binaria de salida. En éstos casos, la resolución puede ser mejorada, sólo con una codificación diferente de la información analoga, o adicionando más bits a la palabra. La resolución se expresa como un porcentaje de la lectura a plena escala (FS).

● **DERIVA (DRIFT):** variaciones en la señal de salida, que se presentan en un período de tiempo determinado, mientras se mantienen constantes la variable medida y todas las condiciones ambientales. Causas \Rightarrow Variaciones Ftes de Alimentación, componentes, etc.

- DERIVA DE CERO : Variación en la señal de salida para el valor cero de la medida \Rightarrow atribuible a cualquier causa interna.
- DERIVA TERMICA DE CERO: Variación en la señal de salida a medida cero, debido a los efectos únicos de la temperatura.

La deriva se expresa como porcentaje de la señal de salida a escala total (FS) a la temperatura ambiente, por unidad, o por intervalo de variación de la temperatura. Por ejemplo la deriva térmica de cero de un instrumento en condiciones de temperatura ambiente durante 1 mes fue de 0.2% del alcance(span).

- LINEALIDAD:** Máxima desviación comparando la relación entrada /salida y la línea recta más aproximada. Se expresa esta desviación como un porcentaje de la escala total (FS). Ej: Un transductor Voltaje /presión tiene una linealidad de 8% FS (rango 0-100 psi), $\Rightarrow 8 \times 100/100=8$ psi. \Rightarrow desviación máxima para un voltaje dado.



Aproximación lineal: Recta que aproxima la curva entrada /salida sobre un rango.

Ej: La ecuación para la figura siguiente es :

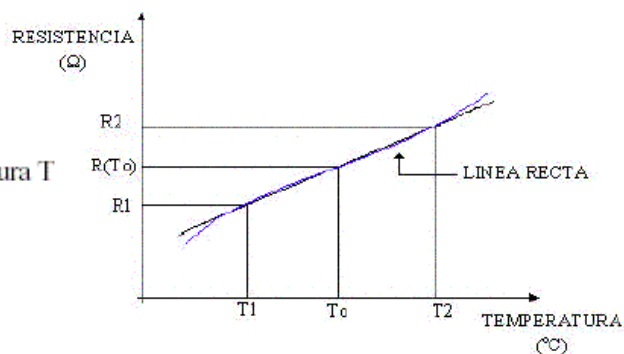
$$R(T) = R(T_0) [1 + \alpha_0 \Delta T] \quad T_1 < T < T_2$$

Donde : $R(T)$ = Aproximación de resistencia a temperatura T

$R(T_0)$ = Resistencia a temperatura T_0 (Temp. Prom)

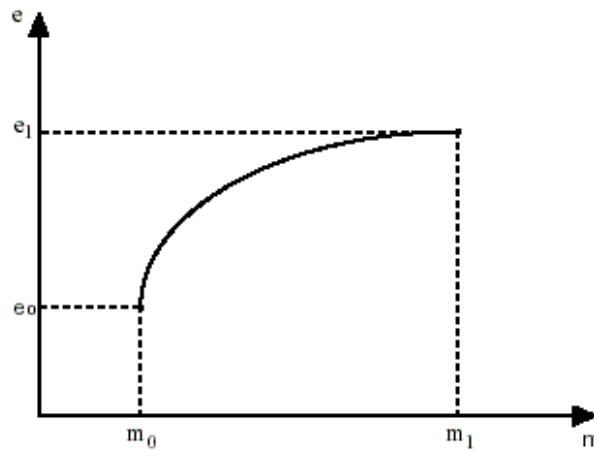
$$\Delta T = T - T_0$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{R_0} \times \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1}$$



- **TEMPERATURA DE SERVICIO (O DE OPERACIÓN):** Rango de temperaturas en el cual se espera que trabaje el sistema dentro de límites os de error especificados.
- **VIDA ÚTIL DE SERVICIO:** Tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo e intermitente del instrumento sin que se presenten cambios en su comportamiento mas allá de tolerancias especificadas.
- **CALIBRACIÓN:** Calibración es el proceso de comparar un instrumento de exactitud desconocida, para asegurar que funcione dentro de los límites de la tolerancia especificada por el fabricante, o que tenga la exactitud requerida en el trabajo para el que fue escogido. El instrumento estándar para comparación es normalmente de una exactitud de por lo menos cuatro veces mayor que el instrumento a calibrar y cuando no se puede tener éste estándar, se toma el promedio de varios estándares. Una Calibración estática es una calibración realizada de manera que da tiempo al elemento para que su salida se sitúe en un valor fijo. Una Calibración dinámica es a menudo una comparación del elemento a calibrar con otro estándar, que es mucho más rápido.

Curva de calibración



Rango en la entrada: m_0 a m_1

Rango en la salida: e_0 a e_1

"Span" en la entrada: $m_1 - m_0$

"Span" en la salida: $e_1 - e_0$

Sensibilidad: $\Delta e / \Delta m$

Umbral: m_0

5.- CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

Si la señal de entrada a un elemento se modifica de repente de un valor a otro, la señal de salida no cambia de forma instantánea a su nuevo valor. La manera en que un elemento responde a cambios súbitos de entrada se conoce como características dinámicas del elemento.

● RESPUESTA EN EL TIEMPO (RESPUESTA TRANSITORIA)

Viene acotada por los siguientes parámetros:

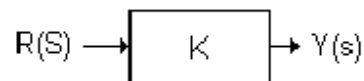
- **Error Dinámico:** Diferencia entre el valor indicado y el real, siendo nulo el error estático.
- **Velocidad de respuesta:** Rapidez con la que responde a los cambios en la variable de entrada.
- **Tiempo de subida (Rise Time-tr):** Tiempo transcurrido desde que la salida tiene el 10% de su valor final hasta que esta alcanza el 90% de dicho valor. En los denominados sistemas subamortiguados es el tiempo que tarda el sistema en llegar por primera vez a su valor final.
- **Tiempo de establecimiento (setting time-ts):** Tiempo que se requiere para que la salida está acotada dentro del 2 ó 5% del valor final, según el criterio que se adopte.
- **Sobreimpulso (Overshoot-Mp):** Valor máximo que sobrepasa la salida a su valor final.

Atendiendo a su respuesta transitoria, es habitual catalogar los sistemas en los siguientes tipos:

Sistemas de Orden 0

Su salida se rige por la ley:

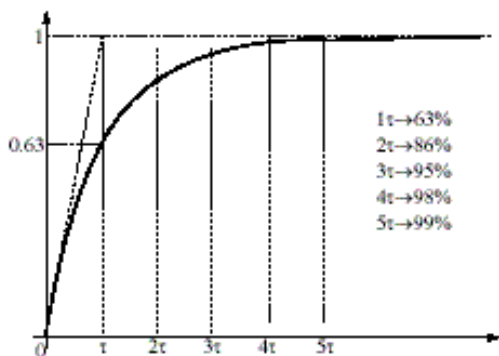
$$Y(s) = K \cdot R(s)$$



K es la denominada sensibilidad del sistema.

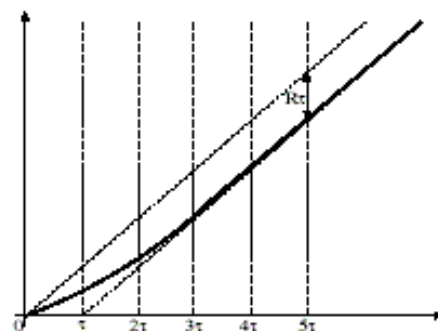
Ejemplo de tales sistemas lo constituyen los potenciómetros, constituidos por resistencias y cumpliendo por tanto la ley de Ohm: $V = R \cdot I$

Sistemas de Orden 1



Respuesta a entrada escalón de un sistema de 1^{er} orden

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$



Respuesta a entrada rampa de un sistema de 1^{er} orden

Entrada	Error Dinámico	Retardo
Escalón=1	0	τ
Rampa= Rt	$R\tau$	τ
Senoidal= $A \sin(\omega t)$	$1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$	$\frac{\text{atan}(\omega \tau)}{\omega}$

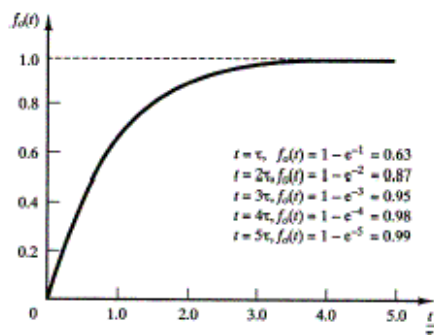
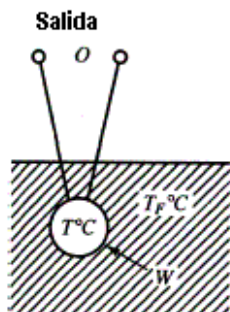
Entrada	Salida
Escalón, $u(t)$	$k(1 - e^{-t/\tau})$
Rampa, Rt	$Rkt - Rk\tau u(t) + Rk\tau e^{-t/\tau}$
Senoidal, A, ω	$\frac{kA\tau\omega e^{-t/\tau}}{1 + \tau^2\omega^2} + \frac{kA}{(1 + \tau^2\omega^2)^{1/2}} \text{sen}(\omega t + \theta)$ $\theta = \text{arctan}(-\omega\tau)$

Ejemplo: Sensor de temperatura.

$$\tau \frac{dT}{dt} + T = T_F \Rightarrow G(s) = \frac{1}{1 + \tau s}$$

donde

- τ - constante de tiempo
- T- Temperatura del sensor
- T_F - Temperatura Ambiente



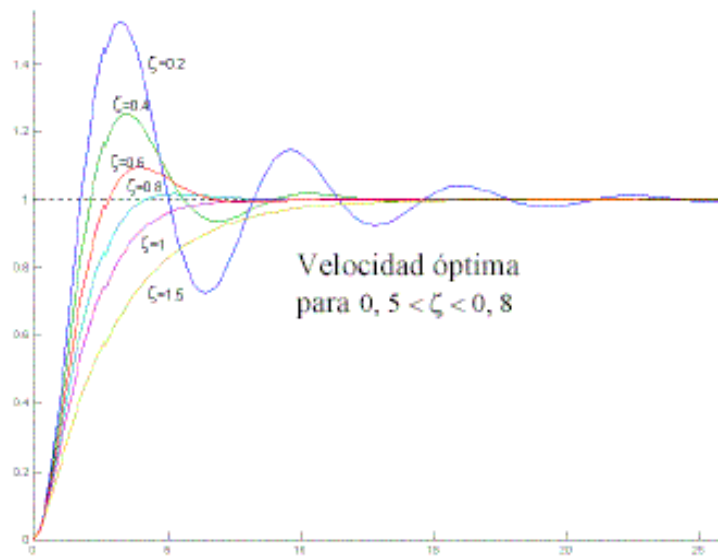
Sistemas de Orden 2

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{1/a_2}{s^2 + \frac{a_1}{a_2} s + \frac{a_0}{a_2}} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \text{.- Frec. Natural del Sistema} \\ K = 1/a_0 \text{.- Sensibilidad Estática} \\ \zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}} \text{.- Coef. de Amortiguamiento} \end{array} \right.$$

Caso Subamortiguado ($0 < \zeta < 1$)

- $t_s(2 \text{ ó } 5\%) = \frac{4 \text{ ó } 3}{\zeta \omega_n}$.- Tiempo de Establecimiento
- $M_p = e^{-(\sigma/\omega_d)\Pi} = e^{-(\zeta\Pi)/(\sqrt{1-\zeta^2})}$.- Sobreimpulso
- $t_r = \frac{\Pi - \beta}{\omega_d}$.- Tiempo de Subida
- $t_p = \frac{\Pi}{\omega_d}$.- Tiempo de Pico



Siendo:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}, \cos \beta = \zeta \text{ y } \sigma = \zeta \omega_n$$

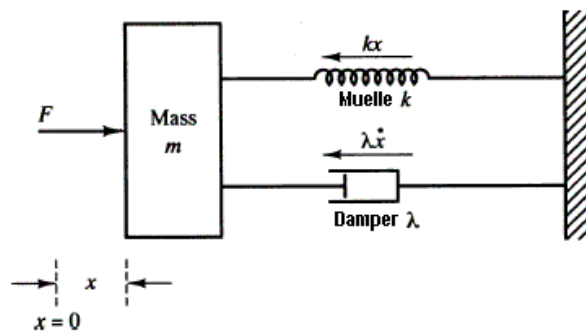
Ejemplo: Acelerómetro.

$$\frac{1}{\omega_n} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} \frac{dx}{dt} + x = \frac{1}{k} F \Rightarrow G(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1}$$

donde

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ rad/sec} \text{ - Frecuencia Natural Masa}$$

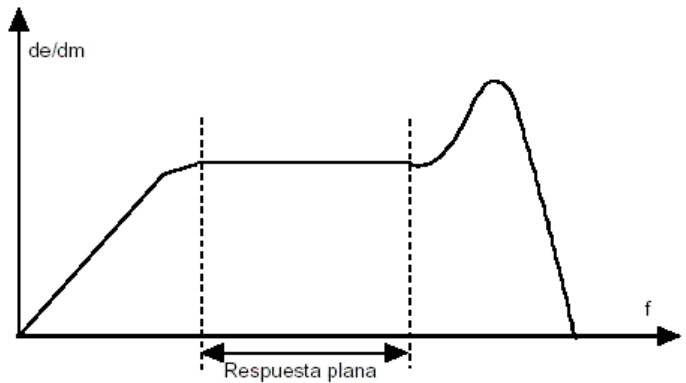
$$\xi = \frac{\lambda}{2\sqrt{km}} \text{ - Damping Ratio}$$



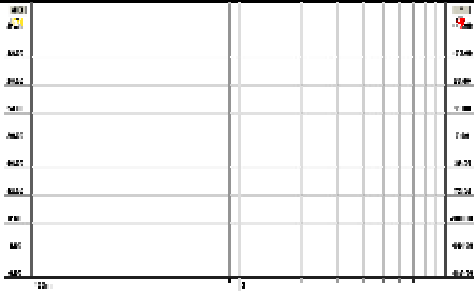
● RESPUESTA EN FRECUENCIA

Se obtiene al variar la frecuencia de una onda seno de amplitud constante aplicada a la entrada del sistema, a fin de analizar cómo varía la sensibilidad del elemento con la frecuencia de la señal de entrada.

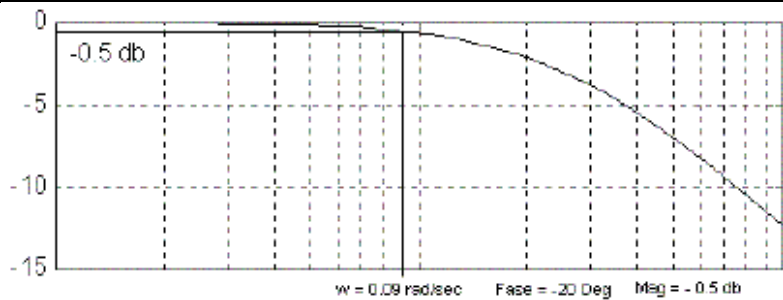
Interesa siempre trabajar en la zona plana de la curva de respuesta (zona con sensibilidad independiente de la frecuencia).



Sistemas de Orden 0

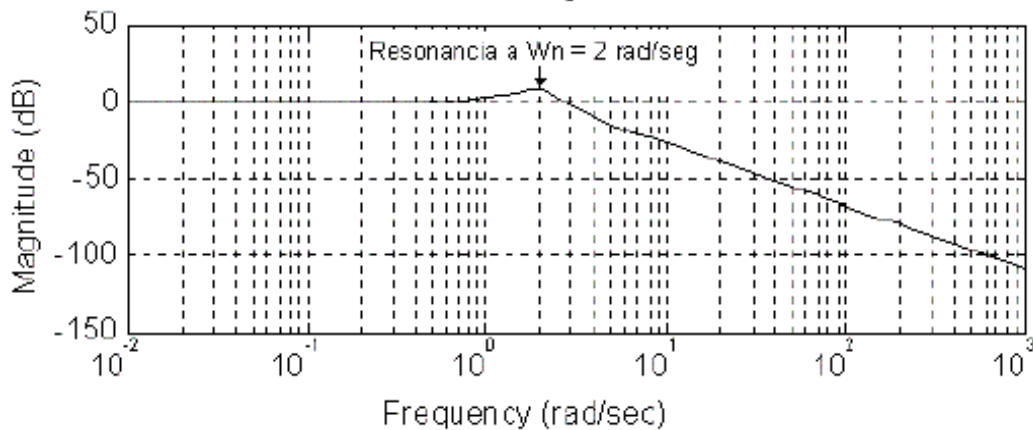


Sistemas de Orden 1



Sistemas de Orden 2

Bode Diagrams



6.- CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA/SALIDA

Variables de esfuerzo y de flujo

Su definición depende de la naturaleza de la variable que se mida

- Variables Mecánicas:
 - Variable de esfuerzo: Se mide en un punto o región del espacio (escalar) (Ej. Fuerza).
 - Variable de flujo: Se mide entre dos puntos o regiones del espacio (vector) (Ej. Velocidad).
- Variables no Mecánicas:
 - Variable de esfuerzo: Se mide entre dos puntos o regiones del espacio (vector) (Ej. Tensión eléctrica).
 - Variable de flujo: Se mide en un punto o región del espacio (escalar) (Ej. Corriente).

Al medir se produce un error por carga, esto es, hay un error intrínseco en la variable medida ya que se extrae energía en el proceso de medición.

Se define la **impedancia de entrada** $Z(s)$ como:

$$Z(s) = \frac{V_{\text{ESFUERZO}}(s)}{V_{\text{FLUJO}}(s)}$$

Si se desea medir:

Una variable de esfuerzo \Rightarrow Interesa Z_{in} alta













Una variable de flujo \Rightarrow Interesa Z_{in} baja

Se define la **impedancia de salida** como la modificación de la medida según la potencia extraída.

7.- DIAGRAMAS P&I

Los diagramas P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*) constituyen una norma de uso recomendado para la representación de instrumentos, estandarizado a través de la norma DIN/ISA-S5.1 emitida por la Sociedad Americana de Instrumentación (ISA, *Instrument Society of America*).

Según esta norma, el instrumento se representa por un círculo con una serie de letras en su interior que indican su función y, adicionalmente, un número que indica a qué bucle de control pertenece.

Símbolos para instrumentos o Funciones			
	Situación Primaria accessible para El operador	Field mounted	Situación Auxiliar accessible para El operador
Instrumento Discreto	1 	2 	3 
Control o display compartido	4 	5 	6 
Función de Cómputo	7 	8 	9 
Control Lógico Programable	10 	11 	12 

Notas:
 1. El tamaño del símbolo puede variar de acuerdo a los requerimientos del usuario o tamaño del documento.
 2. El usuario puede usar sus propias abreviaciones para indicar la situación del elemento.
 3. Los dispositivos inaccesibles (tras un panel) tendrán el mismo símbolo, pero presentarán una línea horizontal punteada

L	I	C	- 101	A
Primera Letra	Modificador de la Segunda Letra	Segunda Letra	Número de identificación del lazo	Sufijo opcional que se adiciona si es preciso

El significado de cada letra es el siguiente:

Letras de Identificación					
	Primera Letra		Letras Sucesivas		
	Medida o Valor Inicial	Modificador	Tipo de Lectura o Función Pasiva	Función de salida	Modificador
A	Analysis		Alarm		
B	Burner, combustion		User's choice	User's choice	User's choice
C	User's choice			Control	
D	User's choice	Differential			
E	Voltage		Sensor (primary element)		
F	Flow rate	Ration (fraction)			
G	User's choice		Glass, viewing device		
H	Hand				High
I	Current (electrical)		Indication		
J	Power	Scan			
K	Time, time schedule	Time rate of change		Control station	
L	Level		Light		Low
M	User's choice	Momentary			Middle, intermediate
N	User's choice		User's choice	User's choice	User's choice
O	User's choice		Orifice, restriction		
P	Pressure, vacuum		Point (test connection)		
Q	Quantity	Integrate, totalizer			
R	Radiation		Record		
S	Speed, frequency	Safety		Switch	
T	Temperature			Transmit	
U	Multivariable		Multifunction	Multifunction	Multifunction
V	Vibration, mechanical analysis			Valve, damper, louver	
W	Weight, force		Well		
X	Unclassified	X axis	Unclassified	Unclassified	Unclassified
Y	Event, state, or presence	Y axis		Relay, compute, convert	
Z	Position, dimension	Z axis		Driver, actuator	

Source: Control Engineering with data from ISA S5.1 standard

L	I	C	- 101	A
Primera Letra	Modificador de la Segunda Letra	Segunda Letra	Número de identificación del lazo	Sufijo opcional que se adiciona si es preciso

La primera letra indica siempre la variable que se mide o controla. Por ejemplo, T se refiere a la variable temperatura. A veces se usa una letra adicional a esta, denominada modificadora de la primera letra para indicar diferencia (D) relación (F), etc. De la variable medida. Así TD significaría diferencia de temperatura.

La segunda letra describe la función cumplida por el elemento. Si tiene varias funciones primero se colocan las relativas a funciones pasivas (I- Indicación, R-Registro...) y luego las activas (T- Transmisión, C-Control Analógico, S-Interruptor...).

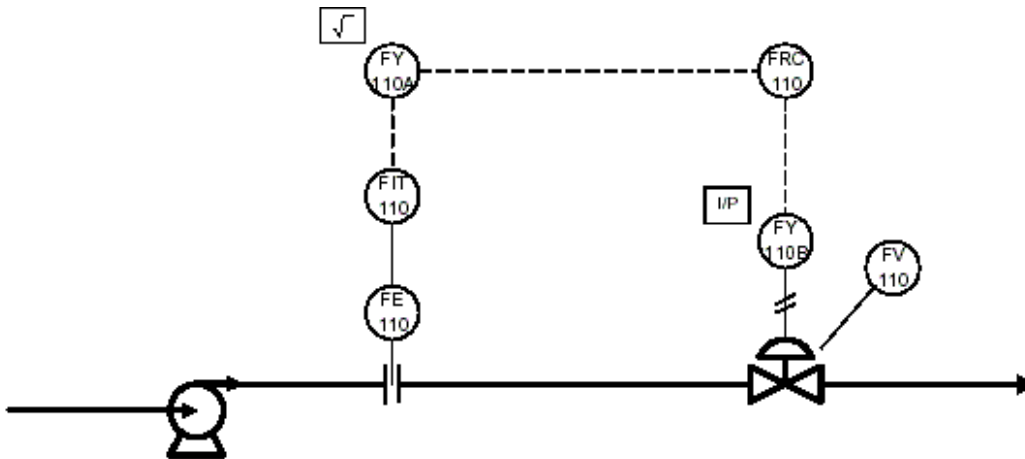
Por ejemplo:

- PT : Transmisor de presión (primera y segunda letra)
- PDT: Transmisor de Diferencia de Presión (primera letra con su modificadora y segunda).
- PIT: Transmisor de Presión con Indicador Local.

A continuación se ponen números que relacionen los instrumentos con equipos o lugares de la instalación. Eventualmente pueden colocarse letras para asegurar que el elemento quede perfectamente identificado sin ambigüedades.

Líneas de conexión	
Conexión al proceso o alimentación al instrumento:	
Señal Neumática o señal sin definir (usan gas como medio de transmisión)	
Señal eléctrica	
Tubo capilar (Sistema lleno):	
Señal hidráulica	
Señal electromagnética o sonido (guiada): (Si no es guiada se representa con una onda senoidal)	
Enlace Interno del sistema (software or data link):	

Ejemplo



- FE-110: Elemento primario de medición de caudal. Como se colocaron las dos barras sobre la línea de caudal indica que se trata de una placa orificio con tomas de brida.
- FIT-110: Transmisor conectado al elemento anterior, con un indicador local (I). Este transmisor es electrónico ya que la señal de salida está dibujada con guiones.
- FY110A: Relé que extrae la raíz cuadrada de la señal y se usa el sufijo A ya que el mismo lazo contiene otro relé.
- FRC-110: Controlador que presenta una letra modificadora R que significa que posee un registrador (dispositivo de almacenamiento de datos).
- FY-110B: Relé conversor de señal eléctrica a señal neumática (en línea de trazo continuo con un doble guión cortándola).
- FV-110: Se trata del elemento final de control, consistente en una válvula con actuador neumático.