

1.1 CONCEPTOS GENERALES Y TERMINOLOGÍA

1.1.1 Sistemas de medidas

Se denomina sistema a la combinación de dos o más elementos, subconjuntos y partes necesarias para realizar una o varias funciones. En los sistemas de medida, esta función es la asignación objetiva y empírica de un número de propiedades o cualidad de un objeto o evento, de tal forma que la describa. Es decir, el resultado de la medida debe ser: independiente del observador (objetiva), basada en la experimentación (empírica), y de tal forma que exista una correspondencia entre las relaciones numéricas y las relaciones entre las propiedades descriptas.

Los objetivos de la medida pueden ser: la vigilancia o seguimiento de procesos, como es el caso de la medida de la temperatura ambiente, de los contadores de gas y de agua, de la monitorización clínica, etc.; el control de un proceso, como en el caso de un termostato o el control de nivel de un depósito; y también puede ser una necesidad de la ingeniería experimental, como puede ser el estudio de la distribución de temperatura en el interior de una pieza irregular, o las fuerzas sobre un conductor simulado de un vehículo cuando este choca contra un objeto. Por el volumen o la naturaleza de la información deseada, los sistemas CAD no permiten por el momento prescindir de este tipo de estudio. Las medidas en prototipos son además necesarias para verificar los resultados de los modelos desarrollados en un ordenador.

En la figura 1.1 se describe la estructura general de un sistema de medida y control. En un sentido amplio, la realización de una medida implica, pues, además de la adquisición de la información, realizada por un elemento sensor o transductor, también el procesamiento de dicha información y la presentación de resultados, de forma que puedan ser percibidos por nuestros sentidos. Cualquiera de estas funciones puede ser local o remota, implicando ello, en este segundo caso, la necesidad de transmitir la información.

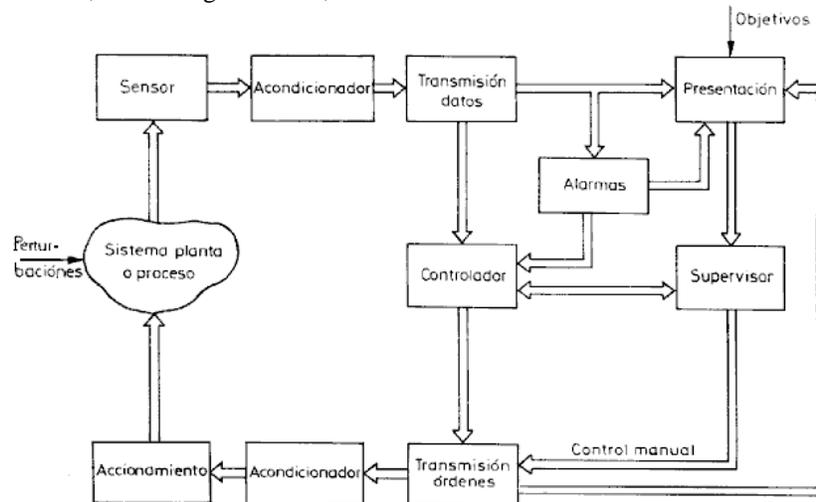


Figura 1.1 Estructura general de un sistema de medida

1.1.2 Transductores, sensores y accionamientos

Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta. Es, por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro. Esto significa que la señal de entrada es siempre una energía o potencia, pero al medir, una de las componentes de la señal suele ser tan pequeña que puede despreciarse, y se interpreta que se mide solo la otra componente.

Al medir una fuerza, por ejemplo, se supone que el desplazamiento del transductor es despreciable, es decir, que no se “carga” al sistema, ya que de lo contrario podría suceder que este fuera incapaz de aportar la energía necesaria para el desplazamiento. Pero en la transducción siempre se extrae una cierta energía del sistema donde se mide, por lo que es importante garantizar que esto no lo perturba.

Dado que hay seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares o químicas, cualquier dispositivo que convierte una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería considerarse un Transductor, y la señal de salida podría ser de cualquier forma física “útil”. En la práctica, no obstante, se consideran transductores por antonomasia aquellos que ofrecen una señal de salida eléctrica. Ello se debe al interés de este tipo de señales en la mayoría de los procesos de medida. Los sistemas de medida electrónicos ofrecen, entre otras, las siguientes ventajas:

1. Debido a la estructura electrónica de la materia, cualquier variación de un parámetro no eléctrico de un material viene acompañada por una variación de un parámetro eléctrico. Eligiendo el material adecuado, esto permite realizar transductores con salida eléctrica para cualquier magnitud física no eléctrica.
2. Dado que un proceso de medida no conviene extraer energía del sistema donde se mide, lo mejor es amplificar la señal de salida del transductor. Con amplificadores electrónicos se pueden obtener fácilmente ganancias de potencia elevadas en una sola etapa, a baja frecuencia.
3. Además de la amplificación, hay una gran variedad de recursos, en forma de circuitos integrados, para acondicionar o modificar las señales eléctricas. Incluso hay transductores que incorporan físicamente en un mismo encapsulado parte de estos recursos.
4. Existen también numerosos recursos para presentar o registrar información si se hace electrónicamente, pudiéndose manejar no sólo datos numéricos, sino también textos, gráficos y diagramas.
5. La transmisión de señales eléctricas es más versátil que la de señales mecánicas, hidráulicas o neumáticas, y si bien no hay que olvidar que estas pueden ser más convenientes en determinadas circunstancias, como pueden ser la presencia de radiaciones ionizantes o atmósferas explosivas, en muchos casos estos sistemas han sido sustituidos por otros eléctricos. De hecho, mientras en industrias de proceso (química, petróleo, gas, alimentación, textil, etc.), donde se introdujeron enseguida los sistemas automáticos, se encuentran actualmente sistemas neumáticos junto a sistemas eléctricos más recientes, en cambio en las industrias de manufacturados, donde hay una serie de procesos discontinuos y que son de automatización más reciente, apenas hay sistemas neumáticos.

Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida.

Sensor y transductor se emplean a veces como sinónimos, pero sensor sugiere un significado más extenso: la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos. Transductor, en cambio, sugiere que la señal de entrada y la salida no deben ser homogéneas. Para el caso en que lo fueran se propuso el término “modificador”, pero no tuvo aceptación.

La distinción entre transductor de entrada (señal física/señal eléctrica) y transductor de salida (señal eléctrica presentación) está prácticamente en desuso. La tendencia actual, particularmente en robótica, es emplear el término sensor para designar al transductor de entrada, y el término actuador o accionamiento para designar el transductor de salida. Los primeros pretenden la obtención de información, mientras que los segundos buscan la conversión de energía.

A veces, sobre todo en el caso de la medida de magnitudes mecánicas, puede señalarse la presencia de un elemento designado como sensor primario, que convierte la variable de medida en una señal de medida, siendo el sensor electrónico quien la convierte en una señal eléctrica. Un método para medir una diferencia de presiones, consiste en emplear un diafragma cuya deformación se mide mediante una galga extensométrica. En este caso el diafragma es el sensor primario y la galga hace de transductor. No obstante se denomina transductor al conjunto de ambos elementos.

1.1.3 Acondicionamiento y presentación

Los acondicionadores de señal, adaptadores o amplificadores, en sentido amplio, son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, una señal apta para ser presentada o registrada o que simplemente permita un procesamiento posterior mediante un equipo o

instrumento estándar. Consisten normalmente en circuitos electrónicos que ofrecen entre otras funciones, las siguientes: amplificación, filtrado, adaptación de impedancias y modulación o demodulación.

Si se considera, por ejemplo, el caso en que una de las etapas de tratamiento de la señal de medida es digital, si la salida del sensor es analógica, que es lo más frecuente, hará falta un convertidor A/d. Estos tienen una impedancia de entrada limitada, exigen que la señal aplicada sea continua o de frecuencia baja, y que su amplitud esté entre unos límites determinados. Todas estas exigencias obligan a interponer un acondicionador de señal entre el sensor, que muchas veces ofrecen señales de apenas unos milivoltios, y el convertidor A/D.

La presentación de los resultados puede ser de forma analógica (óptica, acústica) o numérica (óptica). El registro puede ser magnético o sobre papel, e incluso electrónico (memorias), y exige siempre que la información de entrada esté en forma eléctrica.

1.1.4 Interfaces, dominio de datos y conversiones

En los sistemas de medida, las funciones de transducción, acondicionamiento, procesamiento y presentación, no siempre se pueden asociar a elementos físicos distintos. Además, la separación entre el acondicionamiento y el procesamiento puede ser a veces difícil de definir. Pero, en general, siempre es necesaria una acción sobre la señal del sensor antes de su utilización final. Con el término interfase se designa, en ocasiones, el conjunto de elementos que modifican las señales, en cambiando incluso de dominio de datos, pero sin cambiar su naturaleza, es decir, permaneciendo siempre en el dominio eléctrico.

Se denomina dominio de datos al nombre de una magnitud mediante la que se representa o transmite información. El concepto de dominios de datos y el de conversiones entre dominios, es de gran interés para describir los transductores y los circuitos electrónicos asociados. En la figura 1.2 se representa un diagrama con algunos de los posibles dominios, detallando en particular ciertos dominios eléctricos.

En el dominio analógico, la información está en la amplitud de la señal, bien se trate de carga, corriente, tensión o potencia. En el dominio temporal, la información no está en las amplitudes de las señales, sino en las relaciones temporales: período o frecuencia, anchura de los pulsos, fase. En el dominio digital, las señales tienen solo dos niveles. La información puede estar en el número de pulsos, o venir representada por palabras serie o paralelo codificadas.

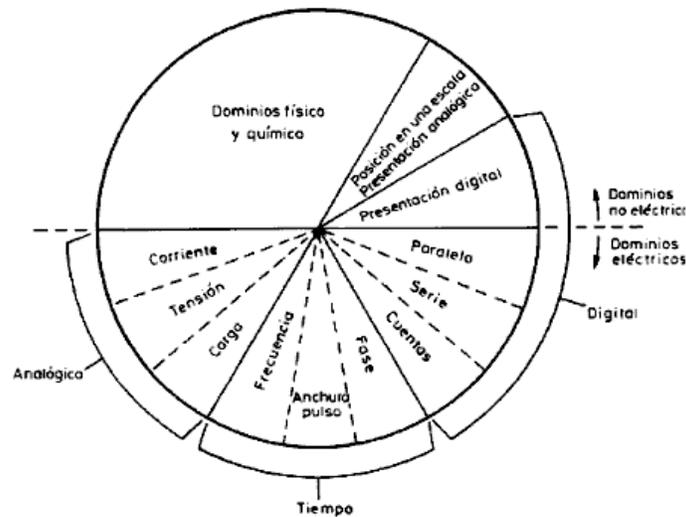


Figura 1.2 Dominios de datos

El dominio analógico es, en general, el más susceptible a interferencias eléctricas. En el dominio temporal, la variable codificada no se puede medir, es decir, convertir al dominio de números, de forma continua, sino que hay que esperar un ciclo o la duración de un pulso. En el dominio digital, la obtención de números es inmediata.

La estructura de un sistema de medida refleja las conversiones entre dominios, e influye particularmente en ella el que se trate de una medida directa o indirecta.

Una medida física es directa cuando se deduce información cuantitativa acerca de un objeto físico o acción mediante comparación directa con una referencia. A veces se puede hacer simplemente de forma mecánica, como en el caso de una balanza clásica.

En las medidas indirectas la cantidad de interés se calcula a partir de otras medidas y de la aplicación de la ecuación que describe la ley que relaciona dichas magnitudes. Los métodos empleados suelen ser siempre eléctricos. En el caso, por ejemplo, de la medida de la potencia transmitida por un eje a partir de la medida del par y de la medida de su velocidad de rotación.

1.2 TIPOS DE SENSORES

El número de sensores disponibles para las distintas magnitudes físicas es tan elevado que no se puede proceder racionalmente a su estudio sin clasificarlos previamente de acuerdo con algún criterio.

Según el aporte de energía, los sensores se pueden dividir en moduladores y generadores. En los sensores moduladores o activos, la energía de la señal de salida procede, en su mayor parte, de una fuente de energía auxiliar. La entrada solo controla la salida. En los sensores generadores o pasivos, en cambio, la energía de salida es suministrada por la entrada.

Los sensores moduladores requieren en general más conexiones que los generadores, ya que la energía de alimentación suele suministrarse mediante conexiones distintas a las empleadas por la señal. Además, esta presencia de energía auxiliar puede crear un peligro de explosiones en algunos ambientes. Por contra, su sensibilidad se puede modificar a través de la señal de alimentación, lo que no permiten los sensores generadores.

Según la señal de salida, los sensores se clasifican en analógicos o digitales. En los analógicos la salida varía, a nivel macroscópico, de forma continua. La información está en la amplitud, si bien se suelen incluir en este grupo los sensores con salida en el dominio temporal.

En los sensores digitales, la salida varía en forma de saltos o pasos discretos. No requieren conversión A/D, y la transmisión de su salida es más fácil. Tienen también mayor fidelidad y mayor fiabilidad, y muchas veces mayor exactitud, pero lamentablemente no hay modelos digitales para muchas de las magnitudes físicas de mayor interés.

Atendiendo al modo de funcionamiento, los sensores pueden ser de defección o de comparación. En los sensores que funcionan por defección, la magnitud medida produce algún efecto físico, que engendra algún efecto similar, pero opuesto, en alguna parte del instrumento, y que está relacionado con alguna variable útil.

Un dinamómetro para la medida de fuerzas es un sensor de este tipo en el que la fuerza aplicada deforma un muelle hasta que la fuerza de recuperación de éste, proporcional a la longitud, iguala la fuerza aplicada.

En los sensores que funcionan por comparación, se intenta mantener nula la defección mediante la aplicación de un efecto bien conocido, opuesto al generado por la magnitud a medir. Hay un detector del desequilibrio y un medio para restablecerlo.

Las medidas por comparación suelen ser más exactas porque el efecto conocido opuesto se suele calibrar con un patrón o magnitud de referencia de calidad.

El detector de desequilibrio sólo mide alrededor de cero y, por lo tanto, puede ser muy sensible y no necesita estar calibrado. Por contra, tiene en principio menor respuesta dinámica y, si bien se pueden automatizar mediante un servo mecanismo, no se logra normalmente una respuesta tan rápida como en los de defección.

Según el tipo de relación entrada-salida, los sensores pueden ser de orden cero, de primer orden, de segundo orden o de orden superior. El orden está relacionado con el número de elementos almacenadores de energía independientes que incluye el sensor, y repercute en su exactitud y la velocidad de respuesta. Esta clasificación es de gran importancia cuando el sensor forma parte de un sistema de control en lazo cerrado.

En el cuadro 1.1 se resumen todos estos criterios de clasificación y se dan ejemplos de sensores de cada clase. Ahora bien, para el estudio de un gran número de sensores se suele acudir a su clasificación de acuerdo con la magnitud medida. Se habla, en consecuencia, de sensores de temperatura, de presión, caudal humedad, posición, velocidad, aceleración, fuerza, par, etc. Sin embargo, esta clasificación difícilmente puede ser exhaustiva ya que la cantidad de magnitudes que se puede medir es prácticamente inagotable.

Cuadro 1.1 Clasificación de los sensores.

criterio	Clases	Ejemplos
Aporte de energía	Moduladores	Termistor

	Generadores	Termopar
Señal de salida	Analógicos Digitales	Potenciómetro Codificador de posición
Modo de operación	De defección De comparación	Acelerómetro de defección Servoacelerómetro

Desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, es más atractiva la clasificación de los sensores de acuerdo con el parámetro variable: resistencia, capacidad, inductancia, añadiendo luego los sensores generadores de tensión, carga o corriente, y otros tipos no incluidos en los anteriores grupos. Si bien este tipo de clasificación es poco frecuente, en la elegida para desarrollar la investigación, pues permite reducir el número de grupos a unos pocos. En el cuadro 1.2 se recogen los sensores y métodos de detección ordinarios para las magnitudes más frecuentes.

Sensores	Posición Distancia Desplazamiento	Velocidad	Aceleración Vibración	Temperatura	Presión	Caudal Flujo	Nivel	Fuerza	Humedad
Resistivos	Potenciómetros Galgas Magnetorresistencias		Galgas + masa-resorte	RTD Termistores	Potenciómetros + tubo Bourdon	memómetros de hilo caliente Galgas + voladizo Termistores	Potenciómetro + flotador Termistores LDR	Galgas	Humidistor
Capacitivos	Condensador diferencial				Condensador variable + diafragma		Condensador variable	Galgas capacitivas	
Inductivos y electro-magnéticos	LVDT Corrientes Foucault Resolver Inductosyn Efecto Hall	Ley Faraday LVT Efecto Hall Corrientes Foucault	LVDT + masa-resorte		LVDT + diafragma Reluctancia variable - diafragma	LVDT + rotámetro Ley Faraday	LVDT + flotador Corrientes Foucault	Magneto-elástico LVDT + célula carga	
Generadores			Piezoeléctricos + masa-resorte	Termopares Piezoeléctricos	Piezoeléctricos			Piezoeléctricos	
Digitales	Codificadores incrementales y absolutos	Codificadores incrementales		Osciladores de cuarzo	Codificador + tubo Bourdon	Vórtices			
Uniones p-n	Fotoeléctricos			Diode Transistor Convertidores T/I			Fotoeléctricos		SAW
Ultrasónicos	Reflexión	Efecto Doppler				Efecto Doppler Tiempo tránsito Vórtices	Reflexión Absorción		

Cuadro 1.2 Sensores y métodos de detección ordinarios para las magnitudes más frecuentes

1.3 CONFIGURACIÓN GENERAL ENTRADA-SALIDA

1.3.1 Interferencias y perturbaciones internas

En un sistema de medida, el sensor es el elemento dispuesto expresamente con la misión de obtener información, en forma de señal eléctrica, sobre la propiedad medida. pero no sería razonable esperar, a priori, que por una parte el sensor respondiera exclusivamente a la magnitud de interés, y que por otra el origen de las señales de salida fuera únicamente la señal presente a la entrada.

La experiencia demuestra en seguida que esto no es así y, por lo tanto, conviene tener en cuenta esta realidad. Las perturbaciones internas son aquellas señales que afectan indirectamente a la salida debido a su efecto sobre las características del sistema de medida. Pueden afectar tanto a las características relativas a la variable de interés como a las relativas a las interferencias.

En la figura 1.3 se describe gráficamente esta situación. Mediante las letras F se expresa una relación, del tipo que sea (no necesariamente lineal), entre la entrada y salida de cada bloque o subconjunto. obsérvese que una misma señal puede actuar a la vez como interferencia y como perturbación interna.

Para medir, por ejemplo, una fuerza, es común emplear una galga extensométrica. Esta se basa en la variación de la resistencia eléctrica de un conductor o semiconductor como resultado de aplicarle un esfuerzo. Dado que un cambio de temperatura producirá también una variación del valor de la resistencia, se dice que los cambios de temperatura son una interferencia o perturbación externa. A su vez, para la medida de los cambios de resistencia con el esfuerzo aplicado hará falta un amplificador electrónico. Dado que los cambios de temperatura afectarán a las derivas de dicho amplificador y con ellas a la medida, resulta que dichos cambios son también una perturbación interna. Si la fuerza se midiera con un sensor capacitivo, los cambios de temperatura dejarían de ser una perturbación externa, pero sus efectos en los circuitos electrónicos no dejarían de tener importancia.

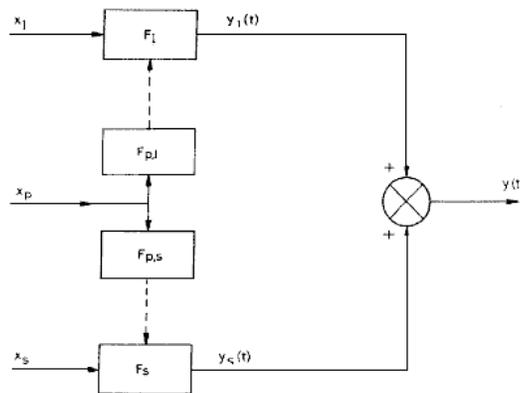


Figura 1.3 Efecto de las perturbaciones internas y externas en los sistemas de medida. x_s es la señal de interés, y es la salida del sistema, x_i es una perturbación externa, x_p es una perturbación interna.

1.3.2 Técnicas de compensación

Los efectos de las perturbaciones internas y externas pueden reducirse mediante una alteración del diseño o a base de añadir nuevos componentes al sistema. Un método para ello es el denominado diseño con insensibilidad intrínseca. Se trata de diseñar el sistema de forma que sea inherentemente sensible sólo a las entradas deseadas. En el ejemplo anterior se lograría si se dispusiera de galgas de material con coeficientes de temperatura pequeño.

El método de la realimentación negativa se aplica con frecuencia para reducir el efecto de las perturbaciones internas. El principio se puede representar mediante la figura 1.4a, donde se supone que el sistema de medida, $G(s)$, y la realimentación empleada, $H(s)$, son lineales y se pueden describir mediante su función de transferencia. La relación entrada-salida viene dada por:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \approx \frac{1}{H(s)}$$

donde la aproximación es aceptable cuando $G(s)H(s) \gg 1$. Si la realimentación negativa es insensible a la perturbación considerada y está diseñada de forma que el sistema no se haga inestable, resulta entonces que la señal de salida no vendrá afectada por la perturbación.

La viabilidad de una solución de este tipo hay que juzgarla desde la perspectiva de las condiciones físicas de los elementos descritos por $G(s)H(s)$. La posible inestabilidad de H a la perturbación es una consecuencia de que H maneja menos energía que G . Ello permite, además, que el bloque H pueda ser mucho más exacto y lineal que G . Resulta también que en este caso se extrae menos energía del sistema donde se mide.

El convertidor Fuerza-corriente de la figura 1.4b es un ejemplo de sensor que funciona por comparación. La fuerza recuperadora, F_R , generada internamente con un sistema electrodinámico (bobina móvil). F_R es proporcional a la corriente I_R que circula por el compensador. I_R se obtiene mediante un amplificador cuya entrada es la salida de un sensor de desplazamiento que detecta la desigualdad entre F_M y F_R . En este caso es un LVDT con devanados conectados en oposición-serie. Si la ganancia del amplificador es suficientemente grande, se tiene $F_M \cong F_R$. La corriente I_R es entonces una medida de F_M , independiente, por ejemplo, de la linealidad del sensor: basta que este detecte el desequilibrio.

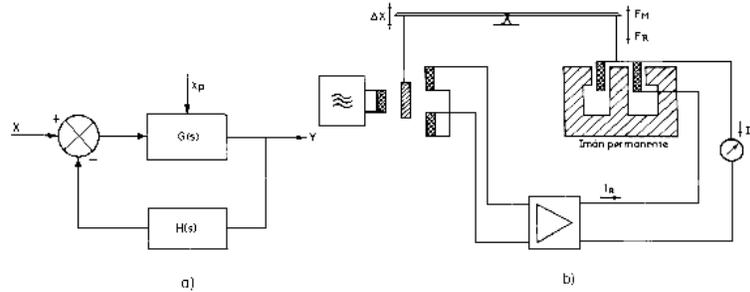


Figura 1.4 a) Método de la realimentación negativa para reducir el efecto de las perturbaciones internas.
b) Convertidor fuerza-corriente basado en realimentación negativa.

Otra técnica para reducir las interferencias es el filtrado. Un filtro es todo dispositivo que separa señales de acuerdo con su frecuencia u otro criterio. Si los espectros frecuenciales de la señal y las interferencias no se solapan, la utilización de un filtro puede ser efectiva. El filtro puede ponerse en la entrada o en una etapa intermedia. En el primer caso puede ser eléctrico o mecánico, por ejemplo, para evitar vibraciones, neumático o en el caso de mediciones de temperatura, un blindaje con masa apreciable para evitar los efectos de las turbulencias. Los filtros dispuestos en las etapas intermedias son casi sin excepción filtros eléctricos.

Una última técnica de compensación de perturbaciones es la utilización de entradas opuestas, que se aplica con frecuencia para compensar el efecto de las variaciones de temperatura. Si, por ejemplo, una ganancia varía con la temperatura por depender de una resistencia que tiene coeficiente de temperatura positivo, puede ponerse en serie con dicha resistencia otra que varíe de forma opuesta (con coeficiente de temperatura negativo) y así mantener constante la ganancia a pesar de los cambios de temperatura.

1.4 CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA

El comportamiento del sistema de medida viene condicionado por el sensor empleado. Es por ello importante describir las características de los sensores. Sucede que, en la mayoría de los sistemas de medida, la variable de interés varía tan lentamente que basta con conocer las características estáticas del sensor. Ahora bien, las características estáticas influyen también en el comportamiento dinámico del sensor, es decir, en el comportamiento que presenta cuando la magnitud de medida varía a lo largo del tiempo.

1.4.1 Exactitud, fidelidad, sensibilidad

La exactitud (en inglés, "accuracy") es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar indicaciones que se aproximen al verdadero valor de la magnitud medida. En castellano se emplea como sinónimo de exactitud el término precisión.

El valor "exacto", "verdadero" o "ideal", es el que se obtendría si la magnitud se midiera con un método "ejemplar". Se considera como tal aquel método de medida en el que los expertos coinciden que es suficientemente exacto para la finalidad pretendida con los resultados que se obtengan.

La exactitud de un sensor se determina mediante la denominada calibración estática. Consiste ésta en mantener todas las entradas excepto una a un valor constante. La entrada en estudio se varía lentamente, tomando sucesivamente valores "constantes" dentro del margen de medida, y se van anotando los valores que

toma la salida. La representación de estos valores en función de los de la entrada define la curva de calibración. Para poder conocer el valor de la magnitud de entrada, ésta debe tener un valor bien conocido, constituyendo lo que se denomina un “patrón” de referencia. Su valor debe conocerse con una exactitud al menos diez veces mayor que la del sensor que se calibra.

La discrepancia entre la indicación del instrumento y el verdadero valor de la magnitud medida se denomina “error”. La diferencia entre la indicación del instrumento y el verdadero valor se denomina error absoluto. A veces se da como porcentaje respecto al máximo valor que puede medir el instrumento (valor de fondo de escala) o con respecto a la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo medibles. Así pues,

$$\text{error absoluto} = \text{resultado} - \text{verdadero valor}$$

Sin embargo, lo más común es especificar el error como cociente entre el error absoluto y el verdadero valor de la magnitud medida, cociente que se denomina error relativo. Este suele tener dos términos: uno dado como porcentaje (tanto por ciento) de la lectura, y otro constante, que puede estar especificado como porcentaje del fondo de escala o un umbral, o un número de “cuentas” en el caso de instrumentos digitales.

$$\text{error relativo} = \frac{\text{error absoluto}}{\text{verdadero valor}}$$

Para algunos sensores puede que se especifique un error relativo como porcentaje del fondo de escala, sin más, o bien como porcentaje de la lectura exclusivamente. Si el margen de medida incluye valores pequeños, lo primero implica que en dicha zona del margen se tendrá un error muy grande, mientras que lo segundo da lugar a errores increíblemente pequeños.

Para poder comparar distintos sensores entre sí en cuanto a su exactitud, se introduce la denominada “clase de precisión”. Todos los sensores de una misma clase tienen un error en la medida, dentro de su alcance nominal y en unas condiciones establecidas, que no superan un valor concreto, denominado “índice de clase”. Este es un error de medida porcentual, referido a un valor convencional que es la amplitud del margen de medida o el valor superior de dicho alcance. Así, un sensor de posición de clase 0,2 y un alcance de 10 mm, en las condiciones ambientales de referencia, tiene un error inferior a 20 μm al medir cualquier posición dentro de dicho alcance.

El valor medido y su inexactitud deben darse con valores numéricos compatibles, de forma que el resultado numérico de la medida no debe tener más cifras de las que se puedan considerar válidas a la luz de la incertidumbre sobre dicho resultado. Por ejemplo, al medir la temperatura ambiente, un resultado de la forma 20°C \pm 1°C está expresado correctamente, mientras que las expresiones 20°C \pm 0,1°C, 20,5°C \pm 1°C, 20,5°C \pm 10% son todas incorrectas.

Hay que ser también precavido al traducir unidades, para no aumentar falsamente la precisión. Por ejemplo, una longitud de 19 pulgadas (1 pulgada = 25,4 mm) no se puede expresar directamente como 482,6 mm, porque mientras el resultado original da a entender que hay una indeterminación en la cifra de las décimas de pulgada (2,54 mm), el segundo coloca la indeterminación en la cifra de las décimas de milímetro. Es decir, el resultado original da a entender que la longitud real está entre 485 mm y 480 mm, mientras que la traducción directa sugiere que está entre 482,5 mm y 482,7 mm.

La fidelidad (en inglés americano designada como “precisión”) es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar el mismo valor de la magnitud medida, al medir varias veces en unas mismas condiciones determinadas (ambientales, operador, etc.), prescindiendo de su concordancia o discrepancia con el valor real de dicha magnitud. La fidelidad implica que se tenga simultáneamente una conformidad en las sucesivas lecturas y un número entero alto de cifras significativas y es, por tanto, una condición necesaria pero no suficiente para la exactitud. La figura 1.5 presenta distintas situaciones posibles.

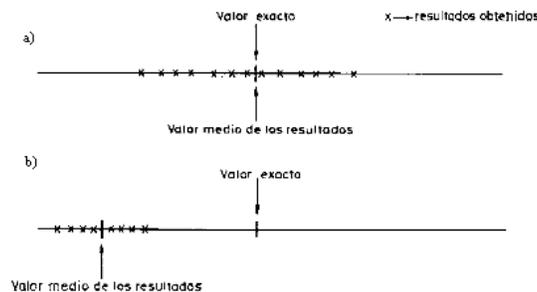


Figura 1.5 Distintas situaciones de medida que indican la diferencia entre exactitud y fidelidad. En el caso a) hay una gran exactitud y una baja fidelidad. En el caso b) la fidelidad es mayor pero hay una gran inexactitud.

La repetibilidad se refiere al mismo hecho, pero cuando las medidas se realizan en un intervalo de tiempo corto. Cuantitativamente, es 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 antedichas. Si no se dice lo contrario, la probabilidad se toma del 95%.

La reproducibilidad se refiere también al grado de coincidencia entre distintas lecturas individuales cuando se determina el mismo parámetro con un método concreto, pero con un conjunto de medidas a largo plazo o realizadas por personas distintas o con distintos aparatos o en diferentes laboratorios. Cuantitativamente, es el valor por debajo del que 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 se toma del 95%.

En sensores, cuando hay una variación de la salida a lo largo del tiempo se habla a veces de “inestabilidad”, y se dice que el sensor tiene derivas. En particular, se especifican a veces las denominadas derivas de cero y derivas del factor de escala. La deriva de cero expresa la variación de la salida con entrada nula. La deriva del factor de escala expresa la variación de la sensibilidad.

La sensibilidad o factor de escala es la pendiente de la curva de calibración, que puede ser o no constante a lo largo de la escala de medida. Para un sensor cuya salida esté relacionada con la entrada x mediante la ecuación $y=f(x)$, la sensibilidad en el punto x_a , $S(x_a)$, es:

$$S(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a}$$

En los sensores interesa tener una sensibilidad alta y, si es posible, constante. Para un sensor con respuesta:

$$y = k \cdot x + b$$

la sensibilidad es $S = k$, para todo el margen de valores de x aplicables. Para uno cuya respuesta sea:

$$y = k \cdot x^2 + b$$

la sensibilidad es $S = 2 \cdot k \cdot x$, y varía a lo largo de todo el margen de medida.

1.4.2 Otras características: linealidad, resolución

Las tres características anteriores, exactitud, fidelidad y sensibilidad, son suficientes para describir el funcionamiento estático de un sensor. Pero a veces se emplean, además o en su lugar, otras que expresan características alternativas o de interés particular para ciertos casos, o bien por complementarias de cara a conocer la idoneidad de un sistema de medida para una aplicación dada.

La linealidad expresa el grado de coincidencia entre la curva de calibración y una línea recta determinada. Según cual sea dicha recta se habla de:

- ♦ Linealidad independiente: la línea de referencia se define por el método de 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 calidad.
- ♦ 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 (o la menor del margen de medida) 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.
- ♦ Linealidad teórica: la recta es la definida por las previsiones teóricas formuladas al diseñar el sensor.

En la figura 1.6 se representan estas distintas rectas para un sensor con una curva de calibración dada. resulta, pues, que la linealidad expresa hasta qué punto es constante la sensibilidad del sensor, pero para que un sensor sea válido no es condición indispensable que sea lineal. El interés de la linealidad está en que la conversión lectura-valor medido es más fácil si la sensibilidad es constante para conocer el valor de la entrada. Además, en instrumentos lineales la no linealidad equivale a inexactitud.

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 una 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.

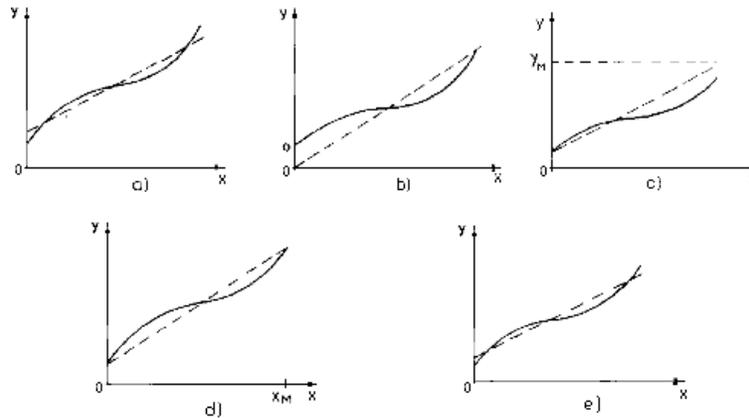


Figura 1.6 Rectas de referencia tomadas para definir la linealidad. a: mínimos cuadrados; b: mínimos cuadrados ajustada al cero; c: terminal; d: a través de los extremos; e: teórica.

Los principales factores que influyen en la linealidad son: la resolución, el umbral y la histéresis. La resolución o discriminación es el incremento mínimo de la entrada para el que se obtiene un cambio en la salida. Cuando el incremento de la entrada se produce a partir de cero, se habla de umbral.

La histéresis se refiere a la diferencia en la salida para una misma entrada, según la dirección en que se alcance. Es decir, puede suceder, análogamente a la magnetización de los materiales ferromagnéticos, que la salida correspondiente a una entrada dependa de si la entrada previa fue mayor o menor que la entrada actual.

1.4.3 Errores sistemáticos

La calibración estática de un sensor permite detectar y corregir los denominados errores sistemáticos. Se dice de un error que es sistemático cuando en el curso de varias medidas de una magnitud de un determinado valor, hechas en las mismas condiciones, o bien permanece constante en valor absoluto y signo, o bien varía de acuerdo con una ley definida cuando cambian las condiciones de medida. Dado que el tiempo es también una condición de medida, éstas deben ser realizadas en un intervalo de tiempo breve.

La posibilidad de estos errores se entiende si se considera que en el resultado de una medida influye no sólo el aparato empleado para efectuarla sino también el método, el operario (en algunos casos) y toda una serie de circunstancias (climáticas, mecánicas, eléctricas, etc) que nunca son ideales, constantes y conocidas todas.

La presencia de errores sistemáticos puede descubrirse, por tanto, midiendo la misma magnitud con dos aparatos distintos, o con dos métodos distintos, o dando las lecturas dos operarios distintos, o cambiando de forma ordenada las condiciones de medida y viendo su efecto en el resultado. Para juzgar sobre la consistencia de los resultados obtenidos hay que recurrir a criterios estadísticos. En cualquier caso, siempre hay un cierto riesgo de que un error sistemático pase inadvertido, incluso en las medidas de mayor calidad. El objetivo será, pues, tener un riesgo muy pequeño de que haya errores grandes no detectados.

1.4.4 Errores aleatorios

Los errores aleatorios son los que permanecen una vez eliminadas las causas de errores sistemáticos. Se manifiestan cuando se mide repetidamente la misma magnitud, con el mismo instrumento y el mismo método, y presentan las propiedades siguientes:

1. Los errores aleatorios positivos y negativos de igual valor absoluto tienen la misma probabilidad de producirse.
2. Los errores aleatorios son tanto menos probables cuando mayor sea su valor.
3. Al aumentar el número de medidas, la media aritmética de los errores aleatorios de una muestra -conjunto de medidas- tiende a cero.
4. Para un método de medida determinado, los errores aleatorios no exceden de cierto valor. Las medidas que lo superan deben repetirse y, en su caso, estudiarse por separado.

Los errores aleatorios se denominan también errores accidentales o fortuitos, y ello da a entender que pueden ser inevitables. La ausencia de variaciones de unas a otras lecturas cuando se están realizando una serie de medidas de la misma magnitud con el mismo sistema de medida, no es necesariamente una indicación de ausencia de errores aleatorios. Puede suceder, por ejemplo, que el instrumento no tenga suficiente resolución, es decir, que su capacidad para apreciar pequeños cambios en la magnitud medida sea muy limitada, de modo que no sean detectados por el operario en el dispositivo final de lectura.

La presencia de errores aleatorios hace que después de realizar una o varias medidas de una determinada magnitud se tenga una incertidumbre sobre el verdadero valor de ésta (valor "exacto"). Cuanto mayor sea dicha incertidumbre, evaluada mediante parámetros estadísticos, menos repetible es la medida. Si además hay errores sistemáticos, el resultado final diferirá del correcto y, por tanto, la medida será inexacta.

Si se hace la media de varias lecturas, los errores aleatorios se cancelan y quedan sólo los errores sistemáticos. Ya que éstos son reproducibles, se pueden conocer para unas condiciones de medida dadas y corregir la lectura cuando se mida en las mismas condiciones. Esta determinación de la diferencia entre el verdadero valor y el valor obtenido se realiza durante la calibración, en unas condiciones dadas, y normalmente durante este proceso se ajusta el instrumento para eliminar dicho error. Cuando se realice una medida aislada, en las mismas condiciones, quedará sólo la componente aleatoria del error.

Sucede en la práctica, sin embargo, que durante el proceso de calibración sólo se pueden eliminar los errores sistemáticos en condiciones muy específicas, por lo que es posible que en otras condiciones se tengan errores de este tipo incluso superiores a los aleatorios que el fabricante recoge en las especificaciones. Aunque no hay obligatoriedad de hacerlo así, lo habitual es especificar el margen que es probable contenga el verdadero valor, dando de alguna forma la diferencia entre el valor máximo y mínimo.

1.5 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA

La presencia de inercias (masas, inductancias,...), capacidades (eléctricas, térmicas, fluidas, etc.) y, en general, de elementos que almacenan energía, hace que la respuesta de un sensor a señales de entrada variables sea distinta a la que presenta cuando las señales de entrada son constantes, descrita mediante las características estáticas.

La descripción del comportamiento del sensor se hace en este caso mediante las denominadas características dinámicas: error dinámico y velocidad de respuesta (retardo). El error dinámico es la diferencia entre el valor indicado y el valor exacto de la variable medida, siendo nulo el error estático. Describe la diferencia en la respuesta del sensor a una magnitud de entrada según que esta sea constante o variable en el tiempo.

La velocidad de respuesta indica la rapidez con que el sistema de medida responde a los cambios de la variable de entrada. En cuanto a la medida, no importa mucho que exista un retardo entre la magnitud aplicada a la entrada y la indicación correspondiente a la salida. Pero si el sensor forma parte de un sistema de control, este retardo puede dar lugar a oscilaciones.

Para poder determinar las características dinámicas de un sensor, hay que aplicar a su entrada una magnitud variable. Esta puede ser de muchas formas distintas, pero lo normal y suficiente para un sistema lineal (cuando se cumple el principio de superposición) 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 del tipo de sensor. Es difícil, por ejemplo, tener 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 de un sensor, se supone que la salida y la entrada se relacionan según una ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes y que, por lo tanto, se tiene un sistema lineal invariable en el tiempo. En estas condiciones, la relación entre la salida y la entrada del sensor puede expresarse de una manera simple, en forma de cociente, empleando la transformada de Laplace de

ambas señales y la función de transferencia propia del sensor. Hay que recordar que esta última da una relación general entre la salida y la entrada, pero no entre sus valores instantáneos.

Las características dinámicas de los sensores pueden estudiarse entonces para cada señal de entrada aplicada, agrupándolos de acuerdo con el orden de la función de transferencia que los describe. Normalmente no es necesario emplear modelos de orden superior a dos.

1.5.1 Sistemas de medida de orden cero

Un sensor de orden cero es aquel cuya salida está relacionada con la entrada mediante una ecuación del tipo:

$$y(t) = k \cdot x(t) \quad (5.1)$$

de forma que su comportamiento queda caracterizado por su sensibilidad estática, k , y se mantiene constante con independencia de la frecuencia de variación de la entrada. En consecuencia, tanto un error dinámico como su retardo son nulos.

Para que la relación entrada-salida sea de la forma indicada por 5.1, es necesario que el sensor no incluya ningún elemento almacenador de energía. Es el caso de los potenciómetros empleados para la medida de desplazamientos lineales y angulares. Con la notación de la figura 1.7, se tiene:

$$y = E \cdot \frac{x}{x_M} \quad (5.2)$$

donde $0 \leq x \leq x_M$. En este caso, $k = E/x_M$.

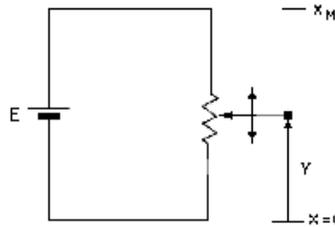


Figura 1.7 Potenciómetro lineal como sensor de posición.

Ahora bien, en términos estrictos un modelo como el indicado es siempre una abstracción matemática, porque es inevitable la presencia de “imperfecciones” que impiden la aplicación del modelo en todas las circunstancias posibles. En el caso del potenciómetro se puede indicar, por ejemplo, que su empleo en la medida de movimientos rápidos es invariable.

1.5.2 Sistemas de medida de primer orden

En un sensor de primer orden hay un elemento que almacena energía y otro que la disipa. La relación entre la entrada $x(t)$ y la salida $y(t)$ viene dada por una ecuación diferencial del tipo:

$$a_1 \cdot \frac{dy(t)}{dt} + a_0 \cdot y(t) = x(t) \quad (5.3)$$

La función de transferencia correspondiente es:

$$\frac{Y(s)}{K(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (5.4)$$

donde $k = 1/a_0$ es la denominada sensibilidad estática, y $\tau = a_1/a_0$ se conoce como constante de tiempo del sistema. La frecuencia propia, ω_c , viene dada por $1/\tau$. El sistema queda caracterizado por dos parámetros: k para la respuesta estática y ω_c o τ para la respuesta dinámica.

La expresión de la señal de salida para cada una de las entradas más frecuentes (escalón, rampa y senoide) figuran en el cuadro 1.3.

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

Cuadro 1.4 Error dinámico y retardo para un sistema de primer orden.

Entrada	Error dinámico	Retardo
Escalón, $u(t)$	0	τ
Rampa, Rt	$R[t + k(\tau - t)]$ o $R\tau$	τ
Senoide, A, ω	$1 - (1 + \omega^2\tau^2)^{-1/2}$	$(\arctan \omega\tau)/\omega$

El error dinámico y el retardo de un sensor de primer orden dependen de la forma de la señal de entrada. En el cuadro 1.4 se resumen los correspondientes a las entradas anteriores.

El hecho de que el error dinámico venga dado por expresiones bien definidas puede sugerir que es fácil corregirlo. Pero, en la práctica, difícilmente se estará midiendo una entrada con una variación tan simple como la definida por las expresiones consideradas. En la figura 1.8 están representadas gráficamente las respuestas respectivas a cada una de las señales de entrada.

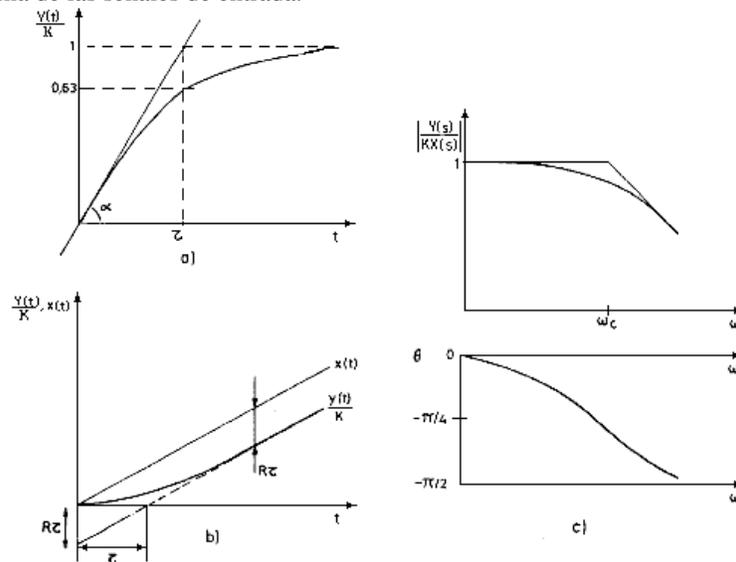


Figura 1.8 Respuesta de un sensor de primer orden a una entrada escalón (a), una entrada en rampa (b), y una entrada senoidal (c).

1.5.3 Sistemas de medida de segundo orden

Un sensor es de segundo orden cuando incluye dos elementos que almacenan energía y otros dos que la disipan. La relación entre la entrada $x(t)$ y la salida $y(t)$ viene dada por una ecuación diferencial lineal de segundo orden

de la forma:

$$a_2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dy}{dt} + a_0 \cdot y = x(t) \quad (5.7)$$

La función de transferencia correspondiente es:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.8)$$

donde k es la sensibilidad estática, ξ es el coeficiente de amortiguamiento y ω_n es la frecuencia natural del sensor. Hacen falta dos parámetros para definir su comportamiento dinámico u uno para su comportamiento estático.

Las expresiones genéricas de los parámetros de un sistema de segundo orden son:

$$k = \frac{1}{a_0}$$

$$\omega_n^2 = \frac{a_0}{a_2}$$

$$\xi = \frac{a_1}{2(a_0 \cdot a_2)^{1/2}}$$

Puede observarse que estos tres parámetros son independientes y que la modificación que la modificación de uno de ellos puede afectar a los otros dos. Sólo a_0 , a_1 y a_2 son independientes entre sí.

La deducción de la salida en función de la entrada figuran en el cuadro 1.5. La representación gráfica correspondiente es la de la figura 1.9. Obsérvese que ahora el comportamiento es distinto según sea $0 < \xi < 1$, $\xi = 1$ o $\xi > 1$. Para la entrada senoidal se ha omitido el transitorio inicial.

Cuadro 1.5 Expresión de la salida de un sistema de segundo orden para distintas entradas simples.

Entrada	Salida
Escalón, $u(t)$	
$0 < \xi < 1$	$1 - \frac{e^{-\sigma t}}{(1 - \xi^2)^{1/2}} \operatorname{sen}(\omega_d t + \alpha)$ $\sigma = \xi\omega_n$ $\omega_d = \omega_n (1 - \xi^2)^{1/2}$ $\alpha = \arcsen \omega_d / \omega_n$
$\xi = 1$	$1 - e^{-\sigma t} (1 + \omega_n t)$
$\xi > 1$	$1 + \frac{\omega_n}{2(\xi^2 - 1)^{1/2}} \left(\frac{e^{-at}}{a} - \frac{e^{-bt}}{b} \right)$ $a = \omega_n [\xi + (\xi^2 - 1)^{1/2}]$ $b = \omega_n [\xi - (\xi^2 - 1)^{1/2}]$
Rampa, Rt	
$\xi > 1$	$R \left\{ t - \frac{2\xi}{\omega_n} \left[1 + \frac{2\xi[1 - \xi - (\xi^2 - 1)^{1/2}] + 1}{4\xi(\xi^2 - 1)^{1/2}} e^{-at} + \frac{2\xi[\xi - (\xi^2 - 1)^{1/2}] - 1}{4\xi(\xi^2 - 1)^{1/2}} e^{-bt} \right] \right\}$
$\xi = 1$	$R \left\{ t - \frac{2\xi}{\omega_n} \left[1 - \left(1 + \frac{\omega_n t}{2} \right) \exp(-\omega_n t) \right] \right\}$
$0 < \xi < 1$	$R \left\{ t - \frac{2\xi}{\omega_n} \left[1 - \frac{\exp(-\xi\omega_n t)}{2\xi(1 - \xi^2)^{1/2}} \operatorname{sen}[(1 - \xi^2)^{1/2}\omega_n t + \theta] \right] \right\}$ $\theta = \arctan [2\xi(1 - \xi^2)^{1/2} / (2\xi^2 - 1)]$
Senoidal, A, ω	$\frac{kA}{[(1 - \omega^2/\omega_n^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2]^{1/2}} \operatorname{sen}(\omega t - \theta)$ $\theta = \arctan \frac{2\xi\omega/\omega_n}{1 - (\omega/\omega_n)^2}$

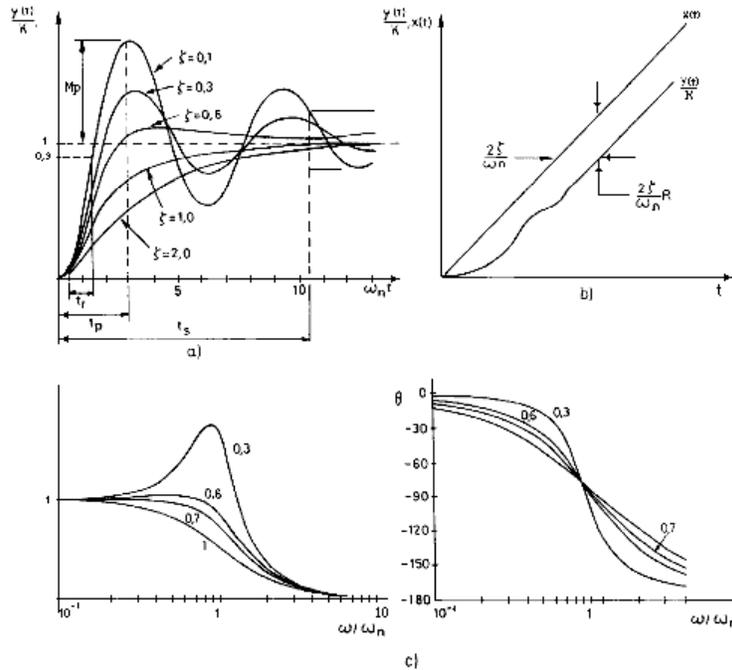


Figura 1.9 Respuesta de un sensor de segundo orden a una entrada escalón (a), a una entrada en rampa (b) y a una entrada senoidal (c).

El error dinámico y el retardo de un sistema de segundo orden depende no solo de la forma de la señal de entrada, sino también de ω_n y de ξ . Su expresión es mucho más compleja que en el caso de un sistema de primer orden, y para su análisis se definen diversos factores relacionados con ω_n y ξ .

Cuando la entrada es un escalón de amplitud unidad, si el sistema es sobreamortiguado ($\xi > 1$) o tiene amortiguamiento crítico ($\xi = 1$), no hay rebasamiento ni error dinámico en la respuesta.

Para un sistema subamortiguado, $\xi < 1$, el error dinámico es nulo, pero la velocidad de respuesta y rebasamiento (figura 1.9a) están relacionados, de forma que, en general, a mayor velocidad, mayor rebasamiento. El tiempo de “subida”, (en inglés “rise time”), que es el tiempo empleado para ir del 10% al 90% del valor final, viene dado por:

$$t_r = \frac{\arctan\left(-\frac{\omega_a}{\sigma}\right)}{\omega_a}$$

donde $\sigma = \xi \omega_n$ es la denominada atenuación y $\omega_a = \omega_n \cdot (1 - \xi^2)^{1/2}$ es la frecuencia natural amortiguada.

El tiempo transcurrido hasta que se alcanza el primer pico, t_p , es:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_a}$$

y el máximo rebasamiento o sobreimpulso:

$$M_p = e^{-\left(\frac{\sigma}{\omega_a}\right)\pi}$$

El tiempo que tarda la salida en establecerse dentro de una banda alrededor del valor final, t_s , (en inglés, “settling time”) depende de la amplitud de dicha banda. Para $0 < \xi < 0.9$, si se considera una banda de $\pm 2\%$, $t_s \cong 4/\sigma$, siendo el mínimo para $\xi = 0,76$; si se considera una banda de $\pm 5\%$, $t_s \cong 3/\sigma$, y el mínimo se obtiene para $\xi = 0,68$. En general, la velocidad de respuesta es óptima para ξ entre 0,5 y 0,8.

A la vista de la figura 1.9a, se podría pensar que los sensores cuya respuesta a un escalón presente un sobrepico notable, por ser muy subamortiguados, deberían ser descartados. Pero, en la práctica, la entrada nunca será un escalón perfecto, de manera que el comportamiento real del sensor puede ser perfectamente aceptable. Es el caso, por ejemplo, de los sensores piezoeléctricos.

Frente a una entrada rampa, el error dinámico es:

$$e_d = \frac{2\xi R}{\omega_n}$$

mientras que el retardo es $2\xi / \omega_n$.

Para describir la respuesta en frecuencia de un sistema de segundo orden, cuando $0 \leq \xi \leq \sqrt{2}/2$ se introducen otros dos parámetros: la frecuencia de resonancia, ω_r , y la amplitud de dicha resonancia, M_r . La primera viene dada por:

$$\omega_r = \omega_n (1 - 2\xi^2)^{1/2}$$

mientras que la amplitud de la respuesta frecuencial para $\omega = \omega_r$ es:

$$M_r = \frac{1}{2\xi(1 - \xi^2)^{1/2}}$$

Un ejemplo de sensor cuyo comportamiento dinámico se puede describir mediante (5.8) es un termómetro que tenga un recubrimiento, por ejemplo, para su protección. En este caso, a la capacidad calorífica del elemento que responde a la temperatura (sensor) y a la resistencia a la transmisión del calor desde el medio donde se mide, hay que añadir la capacidad calorífica y la resistencia térmica del recubrimiento. El sistema es del tipo sobreamortiguado.

Un ejemplo de sensor subamortiguado lo ofrecen los sistemas masa-resorte (inerciales), empleados en las medidas de desplazamientos, velocidades y aceleraciones de movimientos vibratorios o en móviles de largo recorrido. Son también el fundamento de los sismógrafos.

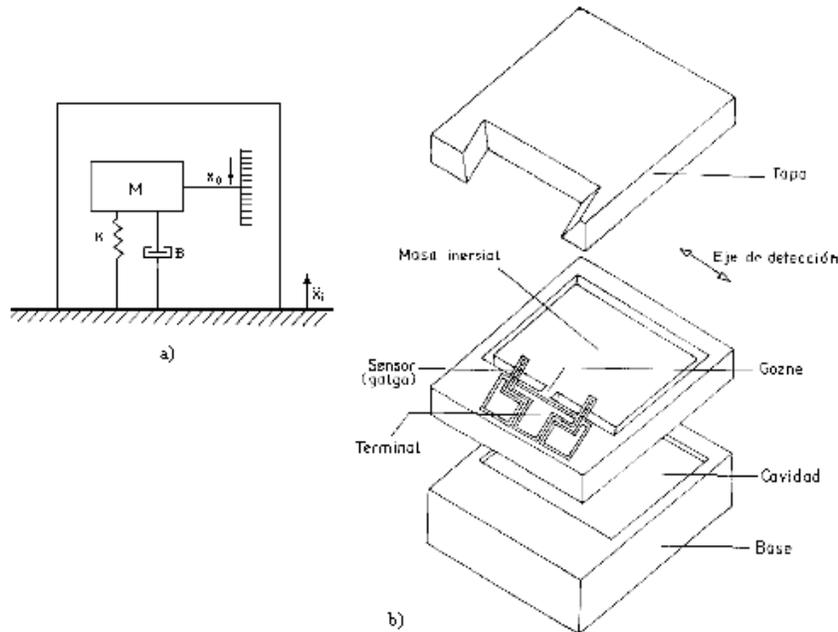


Figura 1.10 Sistema masa-resorte. a) Modelo general. K y B no tienen por que ir necesariamente asociados a elementos físicos distintos. b) Microacelerómetro de silicio, de tres capas: al aplicar una aceleración en la dirección de la flecha, la masa inercial gira alrededor del gozne, de manera que una galga se comprime y la otra se extiende.

Con la notación de la figura 1.10a, si se mide el desplazamiento x_0 de la masa M con respecto a la carcasa sujeta al elemento que experimenta aceleración \ddot{x}_i , la ecuación de equilibrio es:

$$M(\ddot{x}_i - \ddot{x}_0) = Kx_0 + B\dot{x}_0$$

donde K es la constante elástica del muelle y B describe el amortiguamiento interno viscoso. En términos de la transformada de Laplace, la expresión queda:

$$M \ddot{x}_1(s) = x_0(s) [K + Bs + Ms^2]$$

y de ahí es inmediata la deducción de la función de transferencia:

$$\frac{x_0(s)}{\ddot{x}_1(s)} = \frac{M}{K} \cdot \frac{K/M}{s^2 + s(B/M) + K/M}$$

1.6 CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA: IMPEDANCIA

La descripción de los sensores mediante sus características estáticas y sus características dinámicas no es, en modo alguno completa. Para ilustrar esta afirmación considérense, por ejemplo, las situaciones siguientes.

En el caso de un potenciómetro, para evitar que el cursor pierda el contacto con el elemento resistivo es necesario que ejerza una fuerza sobre este. Qué sucede entonces si se pretende medir el movimiento de un elemento que sea incapaz de vencer el rozamiento entre el cursor y la pista?

Si para medir la temperatura que alcanza un transistor se emplea un termómetro con una masa importante respecto a la del transistor, al ponerlo en contacto con este, no lo enfriará dando, en consecuencia, una temperatura inferior a la temperatura que tenía inicialmente el transistor?

Resulta que ni las características estáticas ni las características dinámicas de los sensores, tal como se han expuesto, permiten describir el comportamiento real del sensor. Ello es debido a que la descripción de un sensor o sistema mediante esquemas de bloques, deja al margen el hecho de que todo proceso de medida es inevitable la extracción de una cierta cantidad de energía del sistema donde se mide. Cuando, debido a esta circunstancia, la variable medida queda alterada, se dice que hay un error por carga. Los esquemas de bloques solo son válidos cuando no hay interacción energética entre bloques. El concepto de impedancia de entrada permite valorar si se producirá o no un error de carga.

En el proceso de medida de una variable cualquiera x_1 siempre interviene además de otra variable x_2 tal que el producto $x_1 x_2$ tiene dimensiones de potencia. Así, al medir una fuerza siempre se tiene una velocidad, al medir un caudal hay una caída de presión, al medir una temperatura hay un flujo de calor, al medir una corriente eléctrica se produce una caída de tensión, etc.

Por otra parte, las variables a medir que no sean mecánicas se designan como variables esfuerzo si se miden entre dos puntos o dos regiones del espacio, y como variables flujo si se miden en un punto o región del espacio. En el caso de variables mecánicas se designan como variables esfuerzo las que se miden en un punto, mientras que las variables flujo se miden entre dos puntos. Son, por ejemplo, variables esfuerzo la tensión eléctrica, la presión, la temperatura, la fuerza y el par mecánico; mientras que son variables flujo la corriente eléctrica, el caudal, la velocidad lineal y la velocidad angular.

Para el caso de un elemento que se pueda describir mediante relaciones lineales, la impedancia de entrada, $Z(s)$, se define como el cociente entre las transformadas de Laplace de una variable esfuerzo y una variable flujo asociada. La admitancia de entrada, $Y(s)$, se define como el recíproco de $Z(s)$. El valor en ambas varía normalmente con la frecuencia. A frecuencias muy bajas, se habla, respectivamente, de rigidez y compliancia, en vez de impedancia y admitancia.

Resulta entonces que para tener un error por carga mínimo, al medir una variable esfuerzo es necesario que la impedancia de entrada sea alta. Si x_1 es una variable esfuerzo,

$$Z(s) = x_1(s) / x_2(s)$$

La potencia extraída del sistema será:

$$P = x_1 x_2$$

y si se desea que esta potencia sea mínima, debe serlo x_2 y de ahí resulta que la impedancia de entrada debe ser grande.

Al medir una variable flujo, para mantener P mínima es necesario que x_1 sea pequeña, y ello exige una impedancia de entrada pequeña, es decir una admitancia de entrada grande.

Para tener impedancias de entrada altas, puede ser necesario cambiar el valor numérico de los componentes del sistema o cambiar el diseño y usar un elemento activo. En este caso, la mayor parte de energía viene de una fuente externa y no necesariamente del medio donde se mide. Otra alternativa es medir empleando el

método de cero, porque este método solo extrae energía de forma importante cuando hay un cambio de valor de la entrada.

Finalmente, puede haber otras perturbaciones imputables no a una “carga” sino al propio método de medida. Por ejemplo si al medir la velocidad de un fluido se obstruye apreciablemente la sección del conducto, se obtendrá un resultado erróneo. Queda bien claro que no se puede aplicar un sensor directamente sin considerar el efecto de su presencia en el sistema del que se desea obtener información. En el cuadro 1.6 se recogen diversos factores a tener en cuenta en la elección de un sensor.

1.7 SENSORES PRIMARIOS

Los sensores primarios son los dispositivos que permiten obtener una señal transducible a partir de la magnitud física a medir. Desde el punto de vista de los dominios de información (figura 1.2), pueden contemplarse como elementos cuya entrada y salida pertenecen ambas al dominio “físico”, mientras que los sensores electrónicos operan sobre su salida para hacer el paso al dominio eléctrico.

Para su estudio los clasificamos según la magnitud de entrada que detectan.

1.7.1 Sensores de temperatura: bimetales

Se denomina bimetel a toda pieza formada por dos metales con distinto coeficiente de dilatación térmica unidos firmemente, por ejemplo, mediante soldadura autógena, y sometidos a la misma temperatura. Cuando se produce un cambio de temperatura, la pieza se deforma según un arco circular uniforme. Con la notación de la figura 1.11, el radio de curvatura, r , al pasar de una temperatura T_1 a otra T_2 viene dado por:

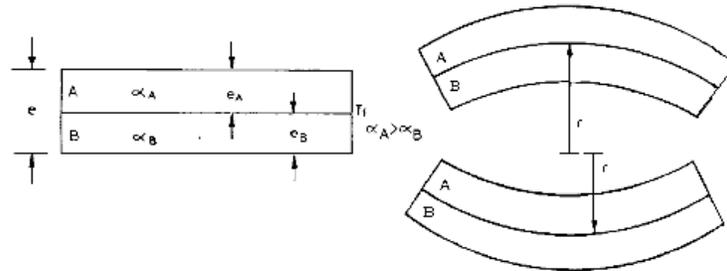


Figura 1.11 Bimetel. Las dimensiones y curvatura se han exagerado para poder ilustrar mejor el principio de funcionamiento.

$$r = \frac{e[3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + 1/mn)]}{6(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)(1+m)^2}$$

siendo:

- e el espesor total de la pieza
- n la relación entre los módulos de elasticidad = E_B / E_A
- m la relación de espesores = e_B / e_A
- α_A, α_B los coeficientes de dilatación lineal

Si se emplean materiales con módulos de elasticidad y espesores similares ($m \cong 1, n \cong 1$), que es lo habitual, la expresión anterior se reduce a:

$$r \approx \frac{2e}{3(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)}$$

El radio de curvatura varía de forma inversamente proporcional a la diferencia de temperaturas, de modo que un sensor de posición o de desplazamiento permitiría la obtención de una señal eléctrica correspondiente.

También puede calcularse la fuerza desarrollada por un elemento de este tipo que estuviera total o parcialmente empotrado o sujeto.

En la práctica se emplean piezas con espesores de 10 μm a 3 mm. Para tener alta sensibilidad, interesaría que fuera $\alpha_B < 0$, pero como no hay metales útiles con esta propiedad, se toma invar (acero al níquel), que tiene $\alpha_B = 1,7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Como metal A se emplean latones y otras aleaciones propiedad de los diversos fabricantes. Para microactuadores (microválvulas) se emplean silicio y aluminio.

Estos dispositivos se emplean en el márgenes desde -75 a $+540$ $^\circ\text{C}$, y particularmente desde 0 a 300 $^\circ\text{C}$. Se les dispone en voladizo, espiral, hélice, diafragma, etc., y se mide la fuerza o desplazamiento. También se emplean directamente como actuadores para abrir o cerrar contactos (termostatos, control ON-OFF) y para protección en interruptores térmicos de circuitos eléctricos. En este último caso la corriente se hace circular por el propio elemento, que se calienta por efecto Joule hasta que alcanza una fuerza mecánica sobre un dispositivo que interrumpe el camino de la corriente.

Otras aplicaciones que no sean la medida son: la compensación térmica en dispositivos mecánicos sensibles a la temperatura y la detección de incendios. En cualquier caso, su respuesta es lenta porque tiene mucha masa.

1.7.2 Sensores de presión

La medida de presiones en líquidos o gases es una de las más frecuentes, particularmente en control de procesos. La presión es una fuerza por unidad de superficie, y para su medida se procede bien a su comparación con otra fuerza conocida, o bien a la detección de su efecto sobre un efecto elástico (medidas por deflexión). En el cuadro 1.7 se recogen algunas de las características posibles.

En los manómetros de columna de líquido, como el tubo en U de la figura 1.12, el resultado de la comparación de la presión y la presión de referencia, si se desprecian efectos secundarios, es una diferencia de nivel de líquido h .

$$h = \frac{P - P_{\text{ref}}}{\rho g}$$

donde ρ es la densidad del líquido y g la aceleración de la gravedad. Un sensor de nivel (fotoeléctrico, flotador, etc.) permite entonces obtener una señal eléctrica.

Al aplicar una presión a un elemento elástico, este se deforma hasta el punto en que las tensiones internas igualan la presión aplicada. Según sean el material y la geometría empleados, el desplazamiento o deformación resultantes son más o menos amplios, pudiéndose aplicar luego unos u otros sensores (cuadro 1.7). Los dispositivos utilizados derivan del tubo de Bourdon, o bien del diafragma empotrado o sujeto por sus bordes.

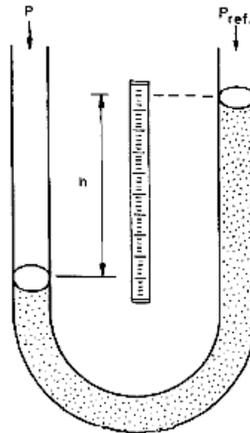
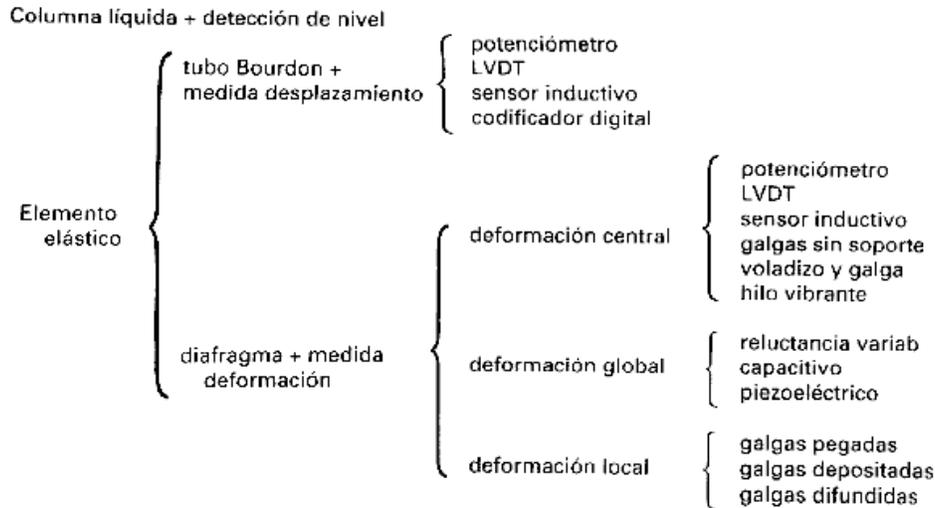


Figura 1.12 Manómetro en U. El líquido debe ser compatible con el fluido cuya presión se desea medir, y el tubo debe soportar los esfuerzos mecánicos a que queda sometido.



Cuadro 1.7 Algunas alternativas para la medida de presiones en el margen habitual.

El tubo Bourdon, desarrollado por Eugene Bourdon en 1849, consiste en un tubo metálico se sección transversal no circular, obtenido a base de aplanar un tubo de sección circular, que tiende a recuperar dicha forma cuando se aplica una diferencia de presión entre el interior y el exterior. Si se ciega el tubo por un extremo y se empotra rígidamente el otro, esta tendencia a recuperar la sección transversal provoca un desplazamiento del extremo libre (figura 1.13). Aunque este desplazamiento no es lineal en todo su margen, si lo es en márgenes pequeños. Las configuraciones que ofrecen mayores desplazamientos tienen la contrapartida de una mayor compliancia y longitud, lo que les confiere baja respuesta en frecuencia. Para la obtención de una señal eléctrica se acude a un sensor de desplazamiento.

Un diafragma es una placa circular flexible consistente en una membrana tensa o una lámina empotrada que se deforma bajo la acción de la presión o diferencia de presiones a medir.

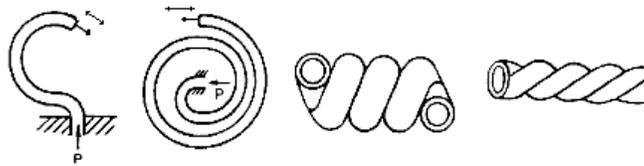


Figura 1.13 Distintas formas de los tubos Bourdon.

La transducción se realiza entonces detectando el desplazamiento del punto central del diafragma, su deformación global o la deformación local (en este caso mediante galgas extensométricas).

En el caso de una lámina delgada de espesor e y radio R , con una diferencia de presión P entre ambas caras, si la máxima deformación central z es inferior a $1/3$ del espesor, se cumple:

$$P = \frac{16Ee^4}{3R^4(1-\mu^2)} \left[\frac{z}{e} + 0,4888 \left(\frac{z}{e} \right)^3 \right]$$

donde E es el módulo de Young y μ el coeficiente de Poisson del material.

Si se van a emplear sensores piezorresistivos, entonces interesa conocer la tensión mecánica de los distintos puntos del diafragma. Para el caso anterior, en todos los puntos a distancia r del centro la tensión en dirección radial es :

$$\sigma_r = \frac{3PR^2\mu}{8e^2} \left[\left(\frac{1}{\mu} + 1 \right) - \left(\frac{3}{\mu} + 1 \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

La tensión en dirección tangencial es:

$$\sigma_r = \frac{3PR^2\mu}{8e^2} \left[\left(\frac{1}{\mu} + 1 \right) - \left(\frac{1}{\mu} + 3 \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

La sensibilidad del diafragma aumenta con su área y con el inverso del cuadrado de su espesor. A lo largo y ancho del diafragma hay simultáneamente tracciones y compresiones, por lo que conviene disponer varias galgas y combinarlas en un puente de medida para tener efectos aditivos y compensación de temperatura.

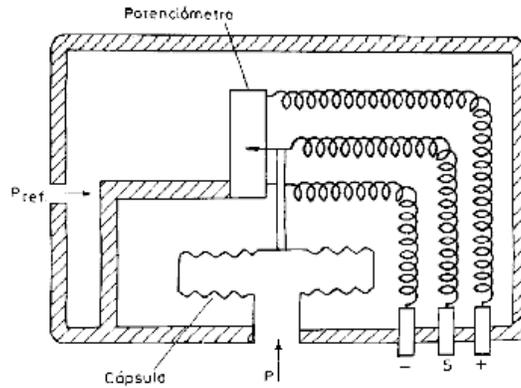


Figura 1.14 Cápsula para la medida de presión.

Los materiales elásticos empleados son: cobre de beridio, aceros inoxidables, aleaciones níquel-cobre, e incluso silicio en el caso de diafragmas que deban incorporar galgas extensométricas del mismo material.

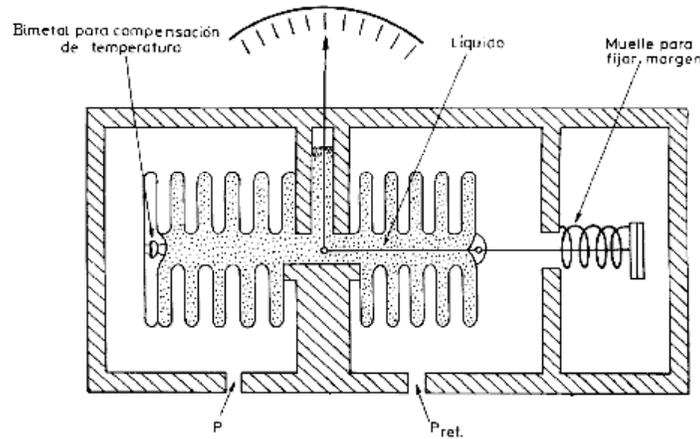


Figura 1.15 Fuelle para la medida de presión con compensación térmica a base de bimetalo.

Si el desplazamiento obtenido mediante un simple diafragma no es suficiente, se pueden emplear cápsulas y fuelles. Una cápsula (figura 1.14) consiste en dos diafragmas apareados unidos por el borde y dispuestos en caras opuestas de la misma cámara. Los fuelles (figura 1.15) son cámaras flexibles con elongación axial, que ofrecen aún mayor deflexión que las cápsulas, pudiendo ser de hasta un 10% de su longitud. Pero unos y otros son sensibles a las vibraciones y aceleraciones y no resisten sobre presiones altas.

1.7.3 Sensores de flujo y caudal

Se denomina flujo (en inglés, "flow") al movimiento de fluidos por canales o conductos abiertos o cerrados. El caudal (en inglés, "flow rate") es la cantidad de material, en peso o volumen, que fluye por unidad de

tiempo. Las medidas de caudal están presentes en todos los procesos de transporte de materia y energía mediante fluidos, bien sea para el control de dichos procesos o como simple indicación, o bien, con finalidad de determinar tarifas, como sucede en los casos del agua, gas, gasolina, o crudos, entre otros.

La mayoría de los caudalímetros se basan en métodos de medida indirectos y, en particular, en la detección de diferencias de presión provocadas por la inserción de un elemento en el conjunto donde se desea medir. Para entender este y otros métodos de medida de caudal es necesario repasar, siquiera brevemente, la teoría básica de flujo de fluidos.

Se denomina flujo viscoso o laminar al de un fluido a lo largo de un conducto recto, con paredes lisas y de sección transversal uniforme, donde la trayectoria de cada una de las partículas es paralela a las paredes del tubo y con la misma dirección. Por contrapartida, se habla de flujo turbulento cuando algunas de las partículas del fluido poseen componentes de velocidad longitudinal y transversal, y aparecen remolinos y torbellinos.

Para un fluido incompresible, en el que la gravedad sea la única fuerza interna, sin rozamiento, que fluya en régimen estacionario y sin que entre ni salga calor de él, se cumple el teorema de Bernoulli. Según este, todo cambio de velocidad provoca un cambio de sentido opuesto en la presión, cambio que es igual al que experimenta la energía cinética de la unidad de volumen, sumado a cualquier cambio debido a diferencia de nivel. Es decir:

$$p + \rho g z + \frac{\rho v^2}{2} = \text{constante} \quad (7.7)$$

donde:

- p es la presión estática
- ρ es la densidad del fluido (incompresible)
- g es la aceleración de la gravedad
- z es la altura geométrica respecto al nivel de referencia
- v es la velocidad del fluido en el punto considerado
- $\rho v^2/2$ se denomina presión dinámica

Un dispositivo simple, cuyo fundamento se puede describir mediante la expresión (7.7), es el tubo de Pitot, empleado para determinar la magnitud de la velocidad de un fluido en un punto. En el caso de un canal abierto, con un fluido incompresible y sin fricción y flujo unidimensional de dirección conocida, si se dispone un tubo en ángulo recto con una abertura dirigida aguas arriba (figura 1.16), el líquido penetra en el tubo y sube lo suficiente para que se equilibre la presión de la columna líquida con la fuerza producida por la velocidad al impactar el fluido en la abertura.

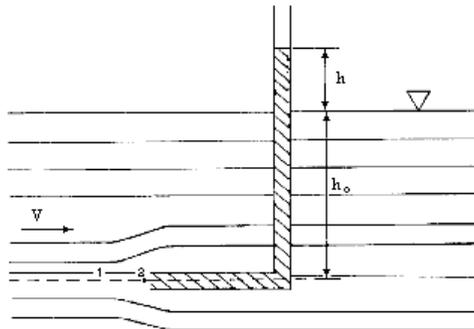


Figura 1.16 Tubo de Pitot en canal abierto

Dado que enfrente de esta la velocidad es nula, las líneas de flujo se “reparten”, creándose un punto de estancamiento. Se cumple:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_2}{\rho g} = h_0 + h$$

y como, al ser un canal abierto, $p_1 = \rho g h_0$, se tiene finalmente:

$$v^2 = 2gh$$

En un tubo cerrado hay que medir la presión estática mediante un manómetro y la presión total (o de estancamiento), p_1 , mediante un tubo Pitot. Con la disposición de la figura 1.17, se hacen dos medidas a la

vez. A partir de (7.7) es fácil obtener la relación entre la velocidad y la diferencia entre ambas presiones, que resulta ser:

$$v^2 = 2(p_1 - p)/\rho$$

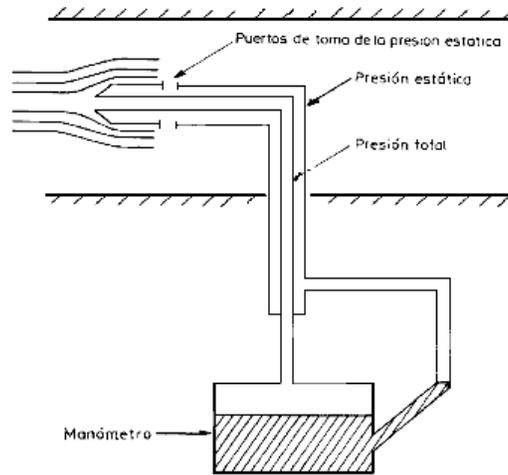


Figura 1.17 Tubo de Pitot en canal cerrado. El manómetro mide la diferencia entre la presión total y la presión estática, y puede ser de tipo electrónico.

El tubo de Pitot es utilizado frecuentemente en aviación para medir la velocidad del aire.

Los caudalímetros de obstrucción son, sin duda alguna, los más frecuentes, y su funcionamiento se puede describir también a partir de (7.7). Se denomina obstrucción a una restricción de flujo de área constante. En ella se produce una caída de presión que depende del flujo, según se demuestra seguidamente. de esta forma, la medida de caudal se reduce a una medida de presión diferencial.

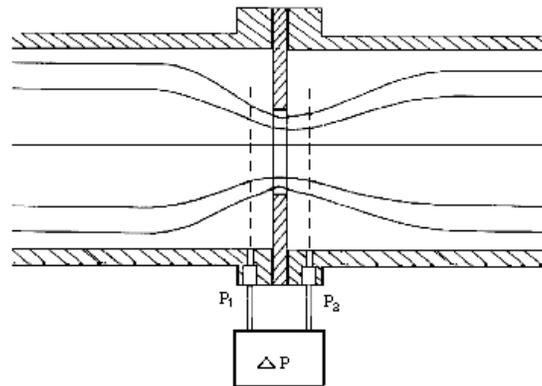


Figura 1.18 Placa de obstrucción para la medida de caudal empleando un sensor de presión diferencial.

Si en un conducto cerrado se interpone una placa con un orificio, hay una contracción de la vena fluida, que pasa de tener una sección transversal A_1 (la del conducto) a una sección transversal A_2 (la del orificio) (figura 1.18), y ello lleva asociado un cambio de velocidad. Dado que la masa se debe conservar,

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Por otra parte, la aplicación del teorema de Bernoulli lleva a:

$$p_1 + \rho g z_1 + \rho v_1^2 / 2 = p_2 + \rho g z_2 + \rho v_2^2 / 2$$

Si $z_1 = z_2$, a partir de estas dos expresiones es inmediato obtener

$$v_2^2 = \frac{2(p_1 - p_2) / \rho}{1 - (A_2 / A_1)^2}$$

El caudal teórico es $Q = A_2 v_2$, pero el caudal real es algo inferior y se determina calculando experimentalmente un factor de corrección, denominado coeficiente de descarga, C_d , que depende de A_1 , A_2 y otros factores. Su valor es del orden de 0,6. Se tiene así:

$$Q_r = C_d Q$$

Entre los principales inconvenientes de este método hay que señalar que impone una pérdida de carga apreciable y que es difícil medir con exactitud caudales fluctuantes, a no ser que el medidor de presión diferencial sea rápido (incluidos los efectos de las conexiones hidráulicas). Las denominadas toberas y venturímetros tienen igual fundamento, pero los perfiles son más suaves, de modo que la pérdida de carga es menor (C_d puede ser de hasta 0,97).

La aplicación del teorema de Bernoulli y el principio de conservación de la masa a la medida del caudal volumétrico, puede hacerse también de forma recíproca a la vista anteriormente. Es decir, se puede hacer variable la sección del paso del fluido y mantener constante la diferencia de presión entre ambos lados de una obstrucción. El caudal a medir está entonces relacionado con la sección de paso.

Los rotámetros (figura 1.19) son indicadores de caudal medio basados en este método. Consisten en un tubo de conicidad uniforme y un obturador ranurado, dispuesto en su interior que arrastrado por el fluido, a lo que se opone con su peso. El fluido, líquido o gas, circula de abajo arriba. Si aumenta el caudal, el obturador se eleva de modo que el área de paso sea mayor y la diferencia de presiones se mantenga constante. El desplazamiento del obturador indica el caudal del fluido.

Para presiones inferiores a 3,5 kPa y líquidos que no sean totalmente opacos, el tubo puede ser de vidrio y llevar inscrita la escala donde se lee la posición del flotador. Para presiones elevadas y caudales altos el tubo debe ser metálico, detectándose entonces la posición del obturador de forma magnética. También se puede aplicar el método de medida por comparación mediante un flotador magnético y un solenoide lineal en el exterior del tubo. La posición del flotador se mide con un detector fotoeléctrico. El caudal se determina a partir de la corriente que hay que suministrar al solenoide para reposicionar el flotador en la posición de referencia.

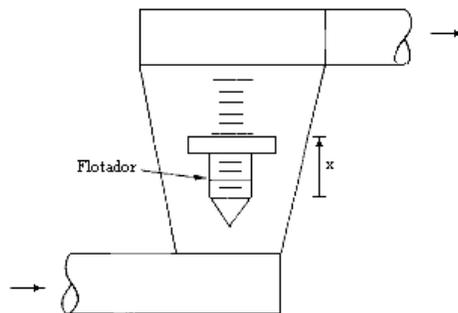


Figura 1.19 Caudalímetro de área variable: rotámetro.

Los caudalímetros de turbina consisten en una rueda alabeada, dispuesta en el seno del fluido en movimiento que provoca su giro con una velocidad proporcional a la del fluido si ésta es suficientemente alta. La velocidad de giro de las paletas se detecta mediante un captador magnético.

En las corrientes de superficie libre, bien sea en canales abiertos o bien en tuberías que no estén completamente llenas, se emplean métodos de medida distintos a lo visto para tuberías a presión. Uno de ellos se basa en la utilización del vertedero.

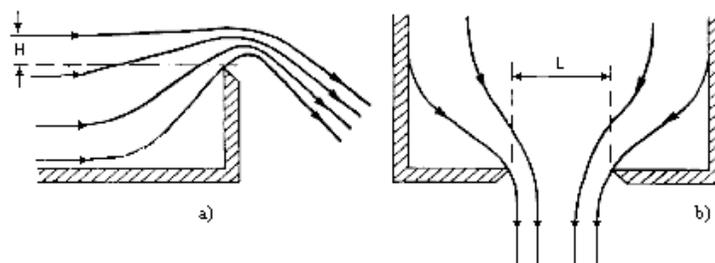


Figura 1.20 Vertedero de aforo con escotaduras rectangular. a) vista lateral. b) vista desde arriba.

Un vertedero de aforo consiste en una abertura practicada en la parte superior de una presa o pared perpendicular a la dirección del fluido, que provoca un estancamiento detrás suyo, de modo que el líquido se vierte a través de la abertura (figura 1.20). Se convierte así energía cinética del fluido en energía potencial, y el fluido alcanza una altura sobre el punto inferior de la abertura que es función del caudal. Para una abertura rectangular, por ejemplo

$$Q = K L H^{3/2}$$

donde Q es el caudal, H es la altura alcanzada, L la altura del vertedero y K una constante. La medida de H puede hacerse con un sensor de nivel.

1.7. 4 Sensores de nivel

El método mas simple para medir el nivel de un líquido es sumergir una regla graduada y ver que queda mojada al extraerla, pero no se presta fácilmente a la automatización. Para obtener la señal eléctrica se puede emplear un flotador con una conexión mecánica que en virtud del principio de Arquímedes, convierte el desplazamiento de la superficie libre en una fuerza o par, y estos en un ángulo de giro (figura 1,21a). Otra posibilidad es emplear un flotador con una polea y un contrapeso (figura 1.21b): el ángulo girado por la polea es proporcional al nivel del líquido. Para evitar que el flotador derive por la superficie, se encierran en un tubo-guía. Para evitar el depósito de sustancias en la superficie tiene forma ahusada.

Una alternativa es medir la diferencia de presiones ΔP entre el fondo del depósito y la superficie del líquido (figura 1.21c). La relación con la altura del líquido h es:

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

donde ρ es la densidad del líquido y g la aceleración de la gravedad. Este método se puede aplicar tanto en depósitos abiertos como en depósitos cerrados a presión. En ambos casos, el desconocimiento exacto de ρ , que depende del líquido y de la temperatura, es una fuente de error. Las posible fugas en la toma de presión cercana al fondo, son otro problema a considerar.

El neto de la figura 1.21d, denominado de burbujeo evita la medida de presiones en el fondo del depósito consiste en un tubo inmerso hasta las proximidades del fondo, y por el que se hace circular un gas inerte al caudal constante que se ajusta hasta que se ven aparecer burbujas en el extremo del tubo. La presión en el tubo es igual entonces a la presión en la altura del depósito donde está el extremo del tubo.

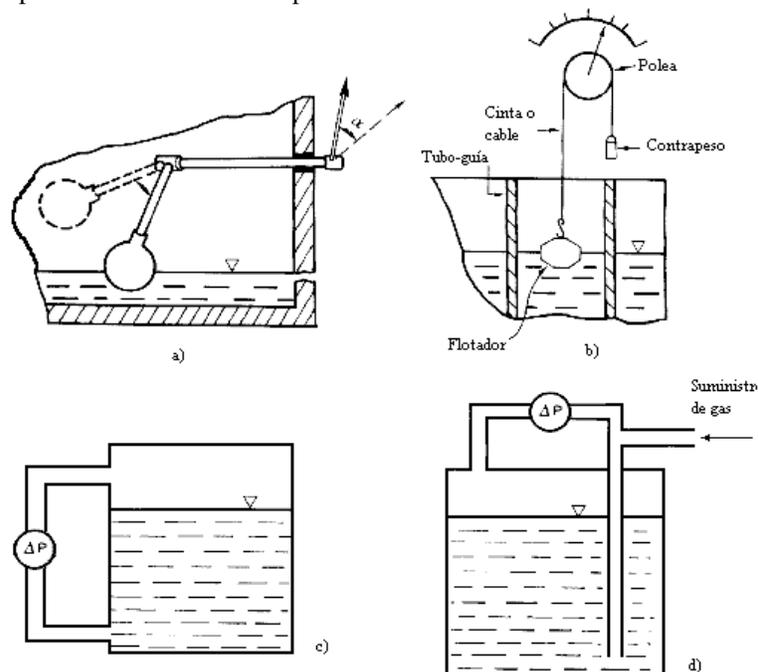


Figura 1.21 Diversos sensores de nivel. a) y b) Basados en flotador. c) Depresión diferencial d) De burbujeo y medida de presión diferencial.

1.7.5 Sensores de fuerza y par.

Un método para medir una fuerza (o par de fuerza) consiste en compararla con otra conocida con exactitud, como se hace en las balanzas. Otro método consiste en medir el efecto de la fuerza sobre un elemento elástico, denominado célula de carga. En las células de carga “eléctrica”, el efecto de una deformación o desplazamiento. En las células de carga hidráulicas y neumáticas, el efecto es un aumento de la presión de un líquido o un gas respectivamente.

Al aplicar un esfuerzo mecánico a un elemento elástico inmóvil, este se deforma hasta que las tensiones generadas por la deformación igualan las debidas al esfuerzo aplicado. El resultado es un cambio en las dimensiones del elemento, que si tiene una forma apropiada puede ser proporcional al esfuerzo mecánico.

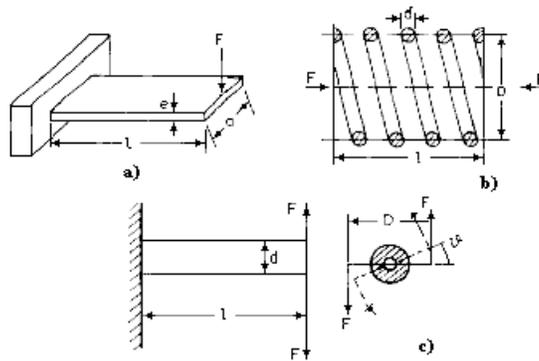


Figura 1.22 Distintas formas de muelles con deflexión lineal y angular.

En la figura 1.22 se presentan 3 disposiciones físicas adecuadas para esta aplicación. Las ecuaciones correspondientes a las del cuadro 1.8.

	<i>Deflexión</i>	<i>Máximo esfuerzo</i>
Voladizo	$x = \frac{4 Fl^3}{Eae^3} = \frac{2 \sigma l^2}{3 Ee}$	$\sigma_M = \frac{6 Fl}{e^2 a} = \frac{3 Ee x}{2 l^2}$
Espiral	$x = \frac{8 FnD^2}{Gd^4} = \frac{\pi n D^2}{Gdk_1}$	$\tau_M = \frac{8 k_1 DF}{\pi d^3} = \frac{Gdxk_1}{\pi n D^2}$
Barra de torsión	$\theta = \frac{32 FDI}{\pi d^4 G} = \frac{2 \tau l}{dG}$	$\tau_M = \frac{16 FD}{\pi d^3} = \frac{dG\theta}{2l}$
<i>E</i> = Módulo de elasticidad longitudinal (Young). <i>G</i> = Módulo de elasticidad torsional. <i>k</i> ₁ = Factor de esfuerzo (función de <i>D/d</i>) (valor entre 1,1 y 1,6). <i>n</i> = Número de espiras.		

Cuadro 1.8 Deflexión y esfuerzos en las piezas elástica de la figura 1.22. Todas las magnitudes están expresadas en unidades del SI.

1.8 MATERIALES EMPLEADOS EN SENSORES

Los sensores se basan en fenómenos físicos o químicos y en materiales donde dichos fenómenos se manifiestan de forma útil, es decir, con sensibilidad, repetibilidad y especificidad suficiente. Los fenómenos pueden ser relativos al material en sí o a su disposición geométrica, y en muchos de ellos son conocidos desde hace tiempo. Las mayores novedades en sensores se deben al descubrimiento de nuevos materiales, de formas de prepararlos o a ambas cosas. Los materiales (sólidos, líquidos, gases) están constituidos por átomos, moléculas o iones. Los átomos pueden unirse para formar moléculas o redes de átomos, gracias a distintas fuerzas de cohesión o enlaces: iónico, metálico, covalente y de Van der Waals. El enlace iónico está formado por atracción electrostática entre iones de carga opuesta. Los sólidos iónicos tienen elevada resistencia mecánica, temperatura de fusión relativamente alta y conductividad eléctrica baja. El enlace metálico está determinado por los electrones de valencia (los de la capa más exterior del átomo) cuyo campo eléctrico estabiliza una red compacta de iones metálicos positivos a través de la cual se desplazan libremente aquellos, constituyendo el denominado gas electrónico. Los electrones libres ocasionan la alta conductividad eléctrica y térmica de los metales, y sus fuerza electrostática, a lo largo y ancho de toda la estructura cristalina mantienen la cohesión y permiten deformar el metal sin que se fracture. El enlace covalente está formado por el solapamiento de pares de electrones orbitales atómicos, aportado uno por cada átomo y que no pueden orbitar más allá de los átomos a que pertenecen. El enlace covalente puede existir tanto en las moléculas como entre los átomos de una red cristalina y dota al material de alta resistividad eléctrica. El enlace de Van der Waals o molecular existe entre moléculas con enlaces covalentes intramoleculares, cuando hay un movimiento coordinado de los electrones de valencia. Dado que esta fuerza de atracción es débil, los materiales con enlace molecular tienen puntos de fusión y ebullición bajos; se utilizan poco en sensores.

En cada átomo los niveles de energía posibles están cuantificados, es decir, cada electrón solo puede ocupar uno de varios niveles de energía especificados, tanto en su estado normal como si ha sido excitado energéticamente. Entre los niveles de reposo y los niveles excitados hay una separación que corresponde a la energía que hay que comunicar a un electrón para pasar de uno a otro nivel.

Cuando hay varios átomos, por ejemplo en un cristal, el conjunto de niveles de energía es muy grande y difieren poco entre sí. Se habla entonces de bandas de energía que agrupan todos los niveles próximos. Hay tres bandas: la banda saturada o de valencia (normal), la banda de niveles de energía libre o de conducción (estados excitados), y la banda prohibida (entre las dos anteriores).

Para sensores interesan los efectos sobre las propiedades eléctricas de los materiales, y la propiedad básica es la conductividad eléctrica. Atendiendo a esta, los materiales se clasifican en: conductores, semiconductores y dieléctricos (aislante). La diferencia entre ellos se aprecia representando sus bandas de energía (figura 1.23) en los conductores las bandas de valencia y de conducción se solapan, de manera que en la banda de conducción hay siempre electrones libres. En los aislantes, en cambio, la banda prohibida es tan ancha que apenas se observa conductividad por electrones. En los semiconductores la situación es intermedia, y el aporte de energía externa permite obtener portadores libres. Cada forma de energía (térmica, óptica, eléctrica, ..) tiene una eficacia distinta, y además la cantidad de energía a aportar depende de la presencia de defectos o impurezas en el material, que establecen niveles de energía intermedios entre las bandas de valencia y de conducción. Todos estos factores se utilizan en el diseño de sensores.

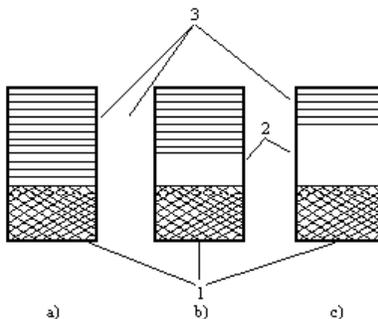


Figura 1.23 Diagrama de bandas de energía para un conductor (a), un semiconductor (b) y un aislante (c).
1: banda de valencia, 2: banda prohibida, 3: banda de conducción.

Desde el punto de vista estructural, los materiales sólidos pueden ser monocristalinos, policristalinos, amorfos y amorfocrystalino. El tipo de red formado depende, sobre todo, de la dimensiones del átomo y de la

configuración de sus capas de electrones externos. Los monocristales son disposiciones regulares de átomos, que pueden ser consideradas la repetición periódica en las tres dimensiones de una célula cristalina básica. Los materiales policristalinos consisten en un gran número de pequeños cristales con orientaciones diversas y propiedades isotrópicas. Es el caso de los metales y las cerámicas.

Los materiales amorfos carecen de ordenación atómica, son líquidos solidificados en los que al reducir la temperatura hay un aumento de la viscosidad que impiden la formación y crecimiento de los cristales. Es el caso de vidrio y las resinas. Mediante enfriamiento rápido y otras técnicas, es posible obtener aleaciones metálicas amorfas o vidrios metálicos, que tienen gran resistencia a la deformación plástica, a la propagación de grietas y a la corrosión electroquímica. Los materiales amorfos cristalinos son sustancias amorfas parcialmente cristalizadas. Es la estructura de la mayoría de los polímeros.

1.8.1 Conductores, semiconductores y dieléctricos

Hay dos tipos de conductores: los electrónicos, que son los metales y su aleaciones, y los iónicos, que son los electrolitos (soluciones, acuosas o no, de ácidos, bases o sales). La movilidad de los electrones en los metales es relativamente pequeña debido a las vibraciones aleatorias de los núcleos atómicos de la red. Los metales y aleaciones se emplean como sensores por sus propiedades termoelectricas, por la variación de su conductividad con la temperatura y la deformación, o simplemente porque su alta conductividad eléctrica facilita la formación de circuitos donde una variables a medir produce cambios detectables. También se emplean como sensores primarios, por ejemplo en bimetales o elementos deformables diagramas, células de carga). Algunos metales se emplean por sus propiedades magnéticas, mientras que otros se emplean como electrodos y catalizadores de reacciones químicas. Los electrolitos se emplean, sobre todo, en sensores químicos.

Los semiconductores son el grupo de materiales cuyo uso en sensores ha experimentado últimamente el mayor crecimiento. Tienen enlaces covalentes y su conductividad eléctrica viene afectada por la temperatura, la deformación mecánica, la luz, los campos eléctricos y magnéticos, las radiaciones nucleares y electrónicas, y la absorción de sustancias diversas. Estos efectos son además controlables mediante la adición de impurezas (semiconductores extrínsecos). Por otra parte, el silicio, que es el material mejor conocido gracias a su extenso uso en electrónica, permite integrar junto al sensor diversas funciones de procesamiento de la señal detectada, y se presta a técnicas de fabricación en gran escala. Aún se puede añadir que el silicio es mecánicamente tan fuerte como el acero y no tiene histéresis mecánica. De particular interés es la producción de sensores basados en silicio amorfo, que es mucho más fácil de obtener que el silicio cristalino. Otros semiconductores empleados son el germanio, y diversos compuestos, cristalinos o amorfos, como el AsGa, SbIn, Scd, Spb, SeCd y el SePb.

Los dieléctricos están formados por enlaces covalentes y por ello se emplean, ante todo, como aislantes eléctricos. Pero además se emplean para la detección, por ejemplo en condensadores variables donde la composición afecta a la constante dieléctrica. Otros dieléctricos se emplean por sus propiedades higroscópicas como sensores de humedad, que afecta a su conductividad y constante dieléctrica.

Pero los dieléctricos mas empleados en sensores son las cerámicas, los polímeros orgánicos y el cuarzo.

Las cerámicas resisten la corrosión, la abrasión y las altas temperaturas. Por ello han sido tradicionalmente el material de soporte de otros materiales sensores, clásicos y en las tecnologías de película gruesa y fina. Desde hace unos años, sin embargo, vienen creciendo los usos de cerámicas como elementos detectores, basados en las propiedades del cristal (NTC), en propiedades de la granularidad y de la disociación entre granos (PTC de conmutación, cerámicas piezo- y piroeléctricas, ferritas), y en propiedades superficiales (Al₂O₃ en sensores de humedad, ZrO₂ en sensores de oxígeno y SnO₂ en sensores de gases).

Los polímeros orgánicos son macromoléculas formadas al unirse entre sí, mediante enlaces covalentes, un gran número de moléculas iguales o monómeros. La unión puede hacerse formando cadenas lineales o tridimensionales. En primer caso el producto es flexible, elástico y termoplástico (recupera su estado viscoso al aumentar la temperatura); hay termoplásticos cristalinos (nilón, poliestireno, polipropileno), y los hay amorfos (poliestireno, policarbonato, cloruro de polivinilo). Los polímeros tridimensionales son más rígidos, son casi insolubles y sufren cambios irreversibles al calentarse; por ejemplo, las silicionas, el poliester, la melamina y las resinas epóxicas.

Los plásticos se obtienen añadiendo a un polímero (que actúa de aglutinante), una carga o material de relleno que se le adhiere fuertemente. Los plásticos son los aislantes por antonomasia, pero hay al menos cuatro tipos

de polímeros que se emplean por sus propiedades sensoras: de humedad, piro- y piezoeléctricas, y elastómeros y polímeros que al someterlos a presión experimentan una gran deformación acompañada a veces de cambios de conductividad eléctrica. Los polímeros pueden hacerse conductores mediante dopado o con aditivos de alta conductividad relativa (plata, carbón). El arquetipo es el poliacetileno dopado. Los polímeros se usan también como membranas de soporte en sensores selectivos de ion y en biosensores.

1.8.2 Materiales magnéticos

Los materiales magnéticos pueden ser débilmente magnéticos o fuertemente magnéticos. En los primeros la permeabilidad magnética no depende de la intensidad del campo aplicado. Pertenecen a este grupo los materiales diamagnéticos ($\mu < 1$) y los para magnéticos ($\mu > 1$). En los materiales fuertemente magnéticos, o magnéticos a secas ($\mu \gg 1$), la permeabilidad depende de la intensidad del campo magnético. En este grupo están los materiales ferromagnéticos (hierro, cobalto y níquel) y ferromagnéticos (ferritas).

Los materiales ferromagnéticos pueden considerarse formados por numerosos volúmenes elementales o dominios, cada uno con una magnetización en una dirección dada. Si los momentos magnéticos de los diversos dominios tienen direcciones distintas, el material está desmagnetizado. Pero si hay un cierto grado de alineamiento entre dominios, el material está magnetizado.

Los momentos magnéticos fundamentales se deben a corrientes electrónicas “elementales”. En el caso de los elementos del grupo de hierro (Fe, Co, Ni,) se deben al desapareamiento en el espín electrónico (pero no a su momento orbital). En las tierras raras (por ejemplo, el gadolinio), hay además una contribución al momento magnético elemental debida a desequilibrios orbitales.

Durante la magnetización de un material ferromagnético, hay dos tipos de procesos: cambios del volumen de algunos dominios a expensas de otros (proceso de desplazamiento), y giro de los momentos magnéticos de los dominios en la dirección del campo externo (proceso de orientación). En la figura 1.24 se describe la magnetización en función de la intensidad del campo aplicado, H . Si H es pequeña (figura 1.24a) crecen los dominios con dirección próxima a la del campo aplicado, y el material está ligeramente magnetizado en la dirección de estos dominios. Pero si desaparece el campo H , los dominios vuelven a su tamaño original: el proceso es reversible.

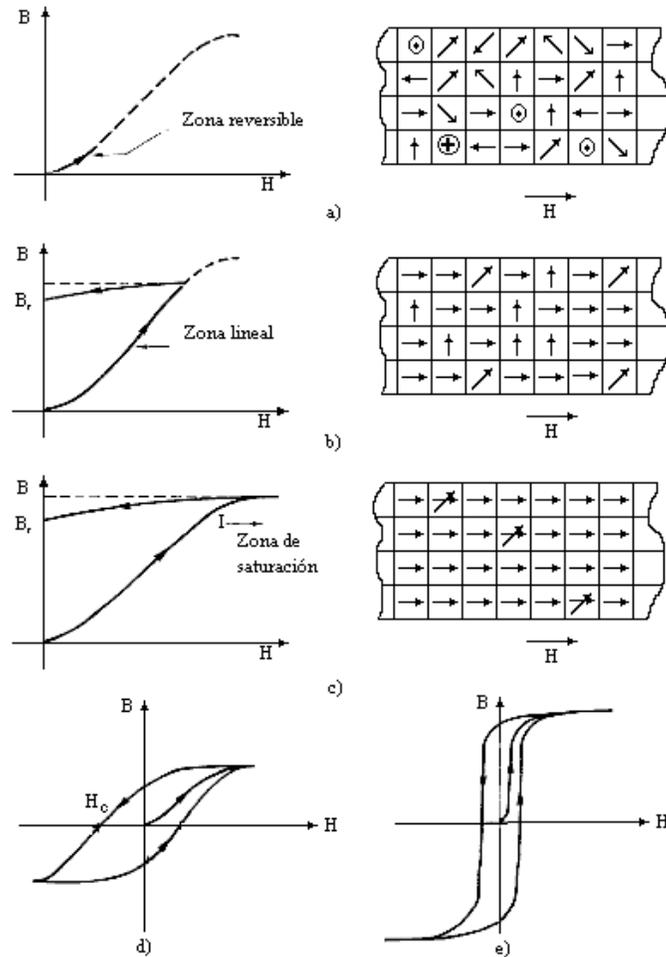


Figura 1.24 Magnetización de materiales ferromagnéticos.

Si H es más grande (figura 1.24b) el magnetismo inducido crece de forma casi lineal por la reorientación de los dominios; pero al quitar el campo algunos dominios reducen su volumen y otros se desalinean, con lo cual el magnetismo remanente B_r es algo menor. Si H es muy grande (figura 1.24c) casi todos los dominios han sido reorientados en una dirección muy próxima a la del campo aplicado, y un aumento del campo no comporta un aumento de la magnetización: el material está “saturado”; al quitar el campo, algunos dominios que han sido llevados más allá de su estado estable se realinean, y B_r es algo menor que el valor de saturación, pero no nulo. Para tener una magnetización nula, hay que aplicar un campo de signo opuesto al original y cuyo valor se denomina campo magnético coercitivo, H_c .

Si se aplica un campo H con valores crecientes y decrecientes, se describe una curva unívoca pero en la que el recorrido para valores crecientes difiere del recorrido para valores decrecientes: hay histéresis. Según las proporciones de esta curva, se habla de materiales magnéticamente blandos y materiales magnéticamente duros. Los materiales blandos tienen un ciclo de histéresis pequeño, con μ alta y H_c pequeña (figura 1.24e). Se emplean en aplicaciones de corriente alterna, pues sus pérdidas de energía por histéresis son pequeñas. Es el caso del ferrosilicio. Los materiales duros tienen un ciclo de histéresis amplio con permeabilidad relativamente pequeña y campo coercitivo grande (figura 1.24d). Por esta última propiedad, son de interés en imanes permanentes. La dureza magnética va acompañada de dureza mecánica, lo que dificulta el acabado de estos materiales.

La permeabilidad magnética de los materiales ferromagnéticos depende de la temperatura: va creciendo conforme aumenta ésta, hasta alcanzar la temperatura de Curie, distinta para cada material, donde μ es máxima. A partir de ahí desciende bruscamente porque las regiones de magnetización espontánea se alteran por el movimiento térmico, y el material deja de ser magnético.

Los materiales ferromagnéticos son sustancias cristalinas en las que los momentos magnéticos de los iones próximos se orientan antiparalelamente, pero con una cierta preponderancia de un sentido sobre el otro, por lo que pueden alcanzar una magnetización neta apreciable. Tienen estructura de dominios y punto de Curie, por lo que su comportamiento es similar al de las sustancias ferromagnéticas.

Sin embargo, se saturan antes, su dependencia con la temperatura es más compleja y su resistividad eléctrica es mucho más alta. Son óxidos metálicos complejos y que se designan como ferritas.

1.9 TÉCNICAS DE PREPARACIÓN DE MATERIALES PARA MICROSENSORES

Los materiales para microsensores se preparan según su naturaleza, el principio de detección deseado y la aplicación. Cada vez más se emplean técnicas comunes en la fabricación de circuitos electrónicos (circuitos impresos, películas gruesa y delgada, monolíticos) y el micromecanizado del Si, AsGa y el cuarzo. Estas técnicas permiten obtener sensores de pequeño tamaño, fiables y con grandes volúmenes de producción que reducen mucho los costos. Los materiales de los circuitos impresos, cobre y sustratos, tienen pocas propiedades que permitan aplicarlos directamente como sensores. La detección de humedad, con sustratos preparados, y algunos sensores capacitivos son los ejemplos más notables.

1.9.1 Técnicas de película gruesa

La tecnología de película gruesa emplea “pastas” o “tintas” que contienen dispersos metales ordinarios o nobles, de modo que pueden ser conductoras, resistivas o dieléctricas. Dichas pastas se depositan sobre un sustrato cerámico, de acuerdo con la geometría predefinida del circuito a realizar, con líneas de 50 a 200 μm de ancho, y se funden sometidas a temperaturas elevadas en un horno, normalmente en una atmósfera de aire. El proceso de impresión, secado y fusión se va repitiendo para las distintas pastas empleadas, y con ciclos térmicos predeterminados. Se forma así una película de unos 15 μm de espesor que es impermeable a muchas sustancias, pero relativamente porosa a ciertos agentes químicos o biológicos. Las tolerancias de los componentes obtenidos son elevadas ($\pm 10\%$ a $\pm 20\%$), pero se pueden ajustar hasta $\pm 0,2-0,5\%$ mediante vaporización selectiva por láser.

Hay tres tipos básicos de circuitos de película gruesa, según la temperatura de fusión empleada. Las películas de baja temperatura funden a unos 150°C y emplean como soporte materiales plásticos (incluidos los de circuitos impresos) y dos tipos de pastas: la termoplásticas y las termoestables. Las termoplásticas se emplean, sobre todo, en interruptores de membrana. Las termoestables se basan en materiales epóxicos con carbón y plata. Las películas de alta temperatura funden a 600-1000°C y emplean como soporte óxido de aluminio de alta pureza, zafiro o berilo (silicato de aluminio y berilio); las pastas conductoras están basadas en paladio y rutenio junto con plata u oro, mientras que las pastas dieléctricas están basadas en una fritada de vidrio de borosilicato. Las películas de temperatura intermedia funden a unos 600°C y emplean como soporte acero de bajo contenido en carbono recubierto de porcelana. Las pastas son similares a las de alta temperatura.

Las técnicas de película gruesa se emplean en sensores al menos de tres formas distintas: en circuitos híbridos para el tratamiento de las señales, directamente para fabricación de sensores, y como soporte para crear estructuras a las que se puedan añadir materiales sensores. Los sensores de película gruesa emplean la propia película como elemento de detección, no como simple soporte del circuito. Las magnitudes detectadas dependen entonces de las propiedades de las pastas, y las hay especiales para ser empleadas como sensores. Hay pastas conductoras con alto coeficiente de temperatura, pastas piezorresistivas, magnetorresistivas y otras con alto coeficiente Seebeck. Las pastas basadas en óxido metálico y en polímeros se aplican a la detección de humedad y gases (por absorción). Las técnicas de película gruesa permiten definir estructuras como electrodos interdigitados sobre soporte cerámico o metálico, y estructuras multicapa.

Por la naturaleza de los materiales empleados, los sensores de película gruesa de alta temperatura resisten temperaturas elevadas, permiten utilizar tensiones y corrientes relativamente altas y son inertes a muchas sustancias químicas. Dado que la pasta acaba de hecho integrada en la cerámica, además son robustos mecánicamente.

1.9.2 Técnicas de película fina

Las películas finas se obtienen mediante deposición al vacío sobre un sustrato de alúmina pulida de muy alta pureza o vidrios de baja alcalinidad. El trazado de los circuitos se define mediante máscaras y fotolitografía, de forma análoga a los circuitos integrados monolíticos. Aunque el nombre pudiera sugerir que la única diferencia entre éstas y las películas gruesas está en el espesor, en realidad son técnicas totalmente distintas. Más aún, si las películas finas se metalizan, su espesor puede superar entonces el de las películas gruesas.

Los materiales más comunes en películas finas son nichrome para las resistencias, oro para los conductores y monóxido de silicio como dieléctrico. Para sensores de temperatura se emplea platino, para piezorresistivos nichrome y silicio policristalino, para magnetorresistivos aleaciones de níquel y cobalto o hierro, y para sensores de gases óxido de cinc.

Las técnicas de deposición son las mismas que se emplean en los circuitos integrados de silicio: evaporación térmica, deposición catódica (sputtering) y métodos químicos. Una técnica de deposición especial para películas orgánicas es la de Langmuir-Blodgett. En la evaporación térmica y deposición catódica, átomos de un material en fase vapor condensan sobre el sustrato y forman una película que crece mediante difusión controlada. En la deposición química en fase vapor, se evapora en la cámara de vacío un compuesto volátil del material a depositar y entonces reacciona con otras sustancias gaseosas en el sustrato, dando un compuesto no volátil que queda depositado sobre el sustrato.

Las películas de Langmuir-Blodgett, son películas monocapa de materiales, normalmente aislantes, cuyas moléculas tienen una “cabeza” hidrofílica y una “cola” hidrófoba. Cuando dichos materiales son dispersados sobre agua, la cabeza se orienta hacia ésta mientras que la cola se orienta en sentido opuesto. Si la fuerza hidrofílica y la hidrófoba están equilibradas, se forma una monocapa. Estas capas se pueden recoger y depositar sobre un sustrato para formar membranas donde inmovilizar enzimas o donde se adhieren moléculas de gases. Esta técnica se ha empleado en ISFET Y EN SENSORES BASADOS EN ONDAS SUPERFICIALES.

1.9.3 Micromecanizado

El micromecanizado es un conjunto de procesos para producir componentes micromecánicos tridimensionales. Se trata de procesos similares a los empleados para fabricar circuitos integrados, por ejemplo técnicas fotolitográficas para transferir la trama de una máscara a la superficie de una oblea. Después se elimina el material (Si, AsGa o cuarzo) en las zonas y direcciones de interés mediante ataque selectivo de dicha superficie (en las zonas no protegidas por la máscara). Las microestructuras obtenidas son planares, y se interconectan varias capas para definir microestructuras tridimensionales. El acelerómetro de la figura 1.10b, por ejemplo, consta de tres capas.

Hay dos procesos básicos para eliminar selectivamente el material en microsensores: ataque químico anisótropo (húmedo) y ataque por plasma (seco). La velocidad del ataque químico depende de la orientación cristalográfica, del reactivo y del material semiconductor de partida. Para el silicio, por ejemplo, el ataque según el plano (111) es, en general, mucho más lento que según los planos (100) y (110). A la vez, el silicio tipo n es atacado con una velocidad más de 50 veces mayor que el silicio tipo p, y por esto se suele partir de silicio tipo n. El cuarzo, en cambio, es prácticamente inatacable en todos los planos paralelos al eje, y esto permite definir flancos muy abruptos en las direcciones perpendiculares a dicho eje (“cortes z”).

El ataque en seco usa un plasma en vez de un líquido. El material se elimina isotrópicamente, con independencia de la orientación cristalográfica del sustrato. Pero el equipamiento necesario es más caro. El método más satisfactorio es RIOE (Reactive Ion Etching). En éste se deposita el sustrato en un electrodo que se mantiene a una diferencia de potencial (de radio frecuencia) de cientos de voltios respecto a un plasma (CF₄, CF₃CF₁, C₂F₅C₁) que se aspira hacia la cámara donde está el electrodo. Esto acelera los iones positivos del plasma hacia el sustrato, y este bombardeo iónico, en dirección casi perpendicular, lo va erosionando.

En la figura 1.25 se muestran varias estructuras obtenidas por micromecanizado. La microestructura más simple es un diafragma o membrana (figura 1.25a). A base de erosionar los bordes del diafragma, se pueden formar puentes (figura 1.25b), voladizos (figura 1.25c) y membranas suspendidas (figura 1.25d).

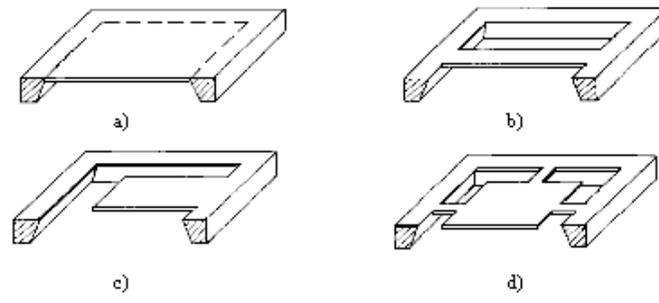


Figura 1.25 Microestructuras obtenidas por micromecanizado, a) Diafragma. b) Puente, c) Voladizo, d) Membrana flotante.