

1. INTRODUCCIÓN A LOS SENSORES

Un sensor es un elemento o dispositivo capaz de reaccionar ante cambios en una determinada variable, usualmente transformándolos en cambios sobre una segunda variable, la cual es más fácil de ser interpretada como un valor de medida.

Para entender mejor esta definición examinaremos un ejemplo: Un termómetro de mercurio es un sensor de temperatura. Lo que hace este elemento es reaccionar ante los cambios en esta variable (la reacción consiste en que el mercurio se dilata o contrae según la temperatura) y convirtiéndolos en cambios en otra variable (altura que alcanza el elemento en una columna). A través de esta segunda variable podemos “leer” o interpretar el valor de la temperatura en un momento dado.

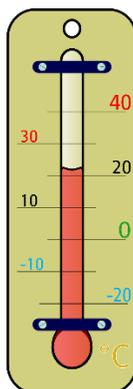


Figura 1-1 Termómetro de mercurio

Para el caso de este libro, en el que tratamos con sistemas de medida mediados por la electrónica, un sensor como el termómetro que acabamos de describir no es tan útil. En su lugar nos interesan particularmente aquellos sensores en el que pueden “traducir” una determinada variable a medir en una variable de carácter eléctrico, como voltaje, resistencia o corriente, entre otros. Nos concentraremos, por lo tanto, en sensores con esta característica.

1.1 Tipos de sensores

Para explicar un poco más en detalle el funcionamiento de los sensores, es de utilidad hacer alguna clasificación de estos. Sin embargo, es posible clasificar los sensores de acuerdo a diferentes criterios: la variable que miden (temperatura, presión, humedad, distancia, velocidad, etc.), la naturaleza de la variable de salida (digitales y analógicos) o el tipo de variable que se tiene a la salida (resistivos, capacitivos e inductivos). Este último criterio es de utilidad, porque según la variable de salida, la forma de uso del sensor y el acondicionamiento que él puede requerir varía. Por este motivo analizaremos esta última clasificación.

1.1.1 Sensores resistivos

Son aquellos en los que la variable a medir produce un cambio en la resistencia del elemento o material utilizado como sensor.

Se basan en el hecho de que la resistencia de algunos materiales es fácilmente alterada por algunos factores externos, como la temperatura, la cantidad de luz o la deformación a la que se expone el material. Vamos a analizar algunos de los principales tipos de sensores resistivos.

El acondicionamiento de este tipo de sensores se estudiará más adelante en el capítulo 6.

a. Sensores potenciométricos

Son aquellos en los que la resistencia del elemento varía con un movimiento físico. En la Figura 1-1 se ve un típico potenciómetro de rotación en el cual la resistencia entre la terminal central y las laterales varía según el ángulo de rotación de la perilla. Así, este elemento se podría utilizar como un sensor de ángulo de rotación.



Figura 1-2 Potenciómetro

Generalmente están formados por una pista de un material resistivo sobre la cual se desliza un cursor como se ve en la Figura 1-3.

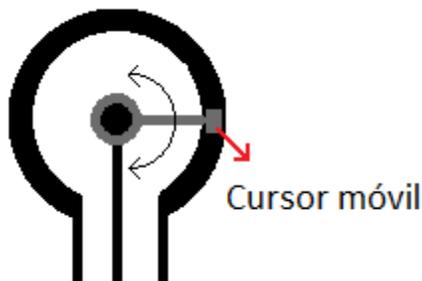


Figura 1-3 Estructura de un potenciómetro

Así, al mover el cursor, cambia la longitud de material entre las terminales y, por lo tanto, varía la resistencia. Esta construcción resulta en su mayor inconveniente: el rozamiento y movimiento mecánico los hace propensos al desgaste.

Un ejemplo del uso de este tipo de sensores es la medición de la posición de una válvula mariposa en un automóvil. Esta válvula es la que abre y cierra el paso de aire a los cilindros en un motor de combustión y conocer su posición es importante para el control de la combustión.

Para su medición se suele usar un sensor potenciométrico acoplado a ella, como el que se muestra en la Figura 1-4.



Figura 1-4 Válvula mariposa. En el extremo derecho se ve acoplado el sensor potenciométrico.

En la se ve la estructura interna de este sensor.



Figura 1-5 Sensor de posición de válvula mariposa: Pista de material resistivo (izquierda) y contacto deslizante (derecha)

No todos los sensores potenciométricos son de rotación, porque también existen potenciómetros de movimiento lineal, como se ve en la Figura 1-6, con lo que puede medirse desplazamiento.

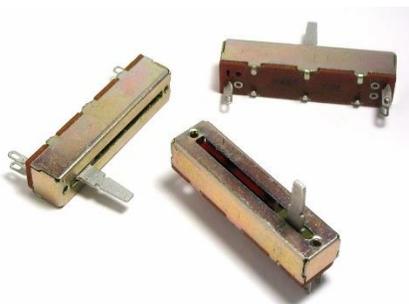


Figura 1-6 Potenciómetros de movimiento lineal

b. Fotorresistencias

Las fotorresistencias o fotorresistores son elementos en los cuales la resistencia disminuye cuando la luz incide en el elemento. También se conocen como LDR de sus siglas en inglés *light dependent resistor*.

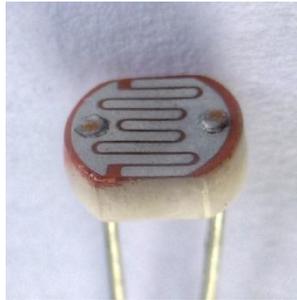


Figura 1-7 Potenciómetros de movimiento lineal

Estos elementos están contruidos en base a semiconductores y su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico. Algunos de los materiales comunes en la construcción de este elemento son el sulfuro de talio, el sulfuro de cadmio, el sulfuro de plomo, y el seleniuro de cadmio.

La variación en el valor dela resistencia depende de su construcción, si bien típicamente las variaciones son bastante grandes, pudiendo tener un valor del rango de $1M\Omega$ en la oscuridad y de 100Ω al exponerse directamente a la luz.

c. Termistores y RDTs (Resistance Temperature Detector)

En la mayoría de los materiales, la resistividad es un parámetro que se ve afectado por la temperatura, según el coeficiente de temperatura de la resistencia de dicho material (α) según la ecuación siguiente.

$$R = R_0 * (1 + \alpha * \Delta T)$$

Cuando se construye un resistor, esto puede ser un fenómeno no deseado, por lo cual se intenta minimizar; pero en los termistores y RDTs este fenómeno se utiliza como ventaja par construir sensores que varían su resistencia con la temperatura.

Esencialmente la diferencia entre RDTs y termistores es el material del cual están contruidos: los RDTs se hacen en base a conductores y los termistores a semiconductores.

- **RDTs**

Los RDTs están fabricados con materiales conductores (como cobre, níquel o platino), en los cuales un aumento en la temperatura produce una agitación térmica de los electrones, resultando en un aumento de la resistencia.

Existen diferentes tipos de RDT según su construcción, entre los que se destacan:

- Elementos de alambre enrollado: constan de un alambre del material enrollado alrededor de un núcleo de cerámica o vidrio
- Elementos de película fina: constan de una fina película del material depositada sobre un sustrato de cerámica.



Figura 1-8 Diferentes tipos de RDT

Una ventaja importante de los RDTs es que su funcionamiento es aproximadamente lineal, además de que permiten una alta precisión y repetitividad. Sin embargo, pueden presentar mayor tiempo de respuesta y costo que otros sensores de temperatura, como los termopares. También son propensos a sufrir problemas por auto calentamiento, por lo cual se debe cuidar la corriente en el circuito.

Probablemente el RDT más usado y conocido es la pt100, un sensor elaborado de platino que tiene una resistencia de 100Ω a 0°C .

- **Termistores**

Los termistores están contruidos en base a semiconductores y se presentan en dos tipos diferentes, según las características del material con el cual se construyen:

- Termistores NTC (*Negative Temperature Coefficient*)

Son aquellos que tienen un coeficiente de temperatura negativo, es decir, en los cuales un aumento en la temperatura resulta en un descenso de la resistencia.

- Termistores PTC (*Positive Temperature Coefficient*)

Son aquellos que tienen un coeficiente de temperatura positivo, es decir, en los cuales un aumento en la temperatura resulta en un aumento de la resistencia.



Figura 1-9 Termistores

El principal inconveniente de los termistores es su falta de linealidad, además de que también son propensas a problemas por auto calentamiento. Por otro lado, entre sus ventajas tenemos el bajo costo, alta sensibilidad y respuesta rápida.

d. Galgas extensiométricas

Las galgas son sensores basados en el efecto piezoresistivo, es decir, en la propiedad que tienen algunos materiales de cambiar su resistencia al ser sometidos a un esfuerzo o estrés mecánico. Estos elementos se pueden usar para medir deformación, presión o carga, por lo cual son utilizados en células de carga y transductores de presión y par.

Su fabricación consiste en una estructura geométrica impresa en una fina lámina metálica sobre una base flexible.



Figura 1-10 Galga extensiométrica

1.1.2 Sensores capacitivos

Son aquellos en los que la variable a medir se ve reflejada en un cambio en la capacitancia de un elemento, ya sea por una alteración de la constante dieléctrica o en la estructura del elemento. Hay muchas variables que pueden ser medidas por este tipo de sensores, como movimiento, campos eléctricos y composiciones químicas, pero algunos de los que tienen una utilización más amplia son los sensores de proximidad, los sensores táctiles y los acelerómetros, por lo cual hablaremos brevemente de ellos.

a. Sensores capacitivos de proximidad

Este tipo de sensores no está diseñado para medir un valor específico de distancia, sino que simplemente se activan ante la presencia cercana de un objeto. Esto se logra mediante un capacitor cuya capacitancia se ve afectada cuando un material penetra el campo magnético que este genera. Esto es posible cuando el objeto que se acerca tiene una constante dieléctrica superior a la del aire; sí la magnitud del cambio generado en la capacitancia está en función de las características dieléctricas del material y de su volumen, densidad y compacticidad. Estos sensores pueden detectar tanto materiales metálicos como no metálicos (a diferencia de los sensores de proximidad inductivos que sólo pueden detectar elementos metálicos).



Figura 1-11 Sensores capacitivos de proximidad. Tomado de "General specifications of inductive and capacitive sensors - EN50032" Meyer Industrie-Electronic GmbH. <http://englisch.meyle.de/pdf/capacitive-proximity-sensors.pdf>

El capacitor que forma el elemento sensor está conectado en un circuito resonante de forma que, al aumentar la capacitancia, el circuito entra en resonancia. Después del circuito resonante se encuentra una etapa de acondicionamiento para definir el nivel de trigger en el que la señal cambia de nivel para indicar la presencia del objeto.

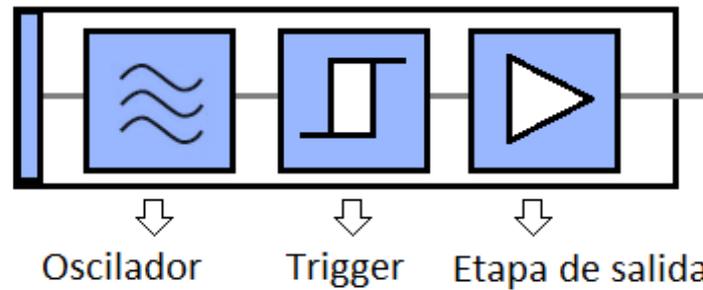


Figura 1-12 Esquema interno de un sensor de proximidad capacitivo

b. Sensores capacitivos táctiles

Esta forma de medición se utiliza en los sensores “touch” y las pantallas táctiles de dispositivos móviles como celulares y tablets.



Figura 1-13 Pantalla táctil capacitiva

Hay varios tipos y formas de construcción, muchas pantallas táctiles constan de un material tal como el vidrio cubierto de una película de algún material conductor (tal como óxido de indio y estaño) y es polarizado en las esquinas de la pantalla. Cuando algún elemento conductor (tal como el dedo humano) entra en contacto con la pantalla altera el campo eléctrico, lo cual se refleja en un cambio en la capacitancia. Puede imaginarse como que el dedo está formando una especie de capacitor y el cuerpo humano está actuando como una especie de tierra virtual.

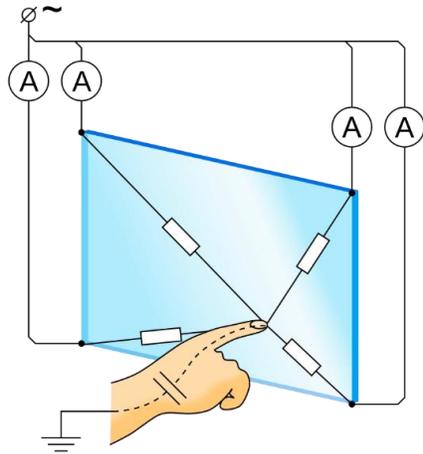


Figura 1-14 funcionamiento de una pantalla táctil capacitiva

c. Acelerómetros capacitivos

Si bien hay muchas formas de construir elementos para sensado de la aceleración, una de ellas es el uso de elementos capacitivos. En estos sensores se tiene placas metálicas que varían su posición relativa en respuesta a una aceleración aplicada.

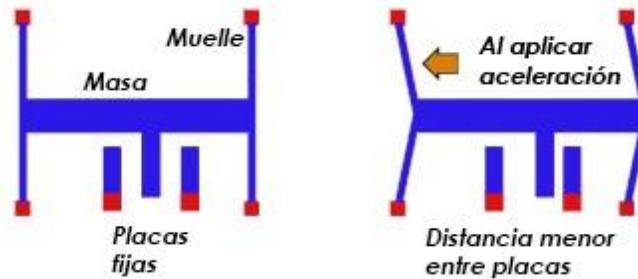


Figura 1-15 Estructura de un acelerómetro capacitivo. (imagen de referencia)

1.1.3 Sensores inductivos

Son aquellos en los que un cambio que la variable a medir produce un cambio sobre la inductancia del sensor (que básicamente es una bobina). Principalmente se usan como sensores de proximidad para objetos metálicos.



Figura 1-16 Sensores inductivos de proximidad. Tomado de “Inductive proximity sensors technical data. Bulletin Numbers 802PR, 871C, 871D, 871F, 871FM, 871L, 871P, 871R, 871T, 871TM, 871 TS, 871Z, 871ZC, 871ZT, 872C, 872L” Allen- Bradley. https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/prox-td001_-en-p.pdf

Su funcionamiento se basa en el principio de inducción electromagnética. La bobina asociada a este sensor hace parte de un circuito resonante; cuando un objeto metálico entra en contacto con el campo magnético alterno generado por la bobina se inducen corrientes de Foucault en el objeto. Estas, a su vez, generan un campo electromagnético que produce un decremento en la inductancia de la bobina y en la amplitud de las oscilaciones del circuito resonante.

Así, cuando un objeto metálico se acerca al sensor, las oscilaciones se reducen y el sensor cambia de estado.

Al igual que en los sensores de proximidad capacitivos, el esquema interno de funcionamiento es similar al ilustrado en la Figura 1-12, es decir, además del circuito resonante hay un acondicionamiento para determinar el estado de la oscilación y proveer una salida con sólo dos niveles (alto y bajo, ausencia o presencia de un objeto metálico).

Según la configuración exacta de la etapa de salida del circuito de acondicionamiento, se encuentran varios tipos de sensores, que se conectan de forma diferente.

a. Sensor tipo NPN

El sensor tiene tres terminales (polarización, tierra y salida). En este caso la etapa de salida se da a través de un transistor tipo NPN. La carga se conecta entre la terminal de salida y la de polarización.

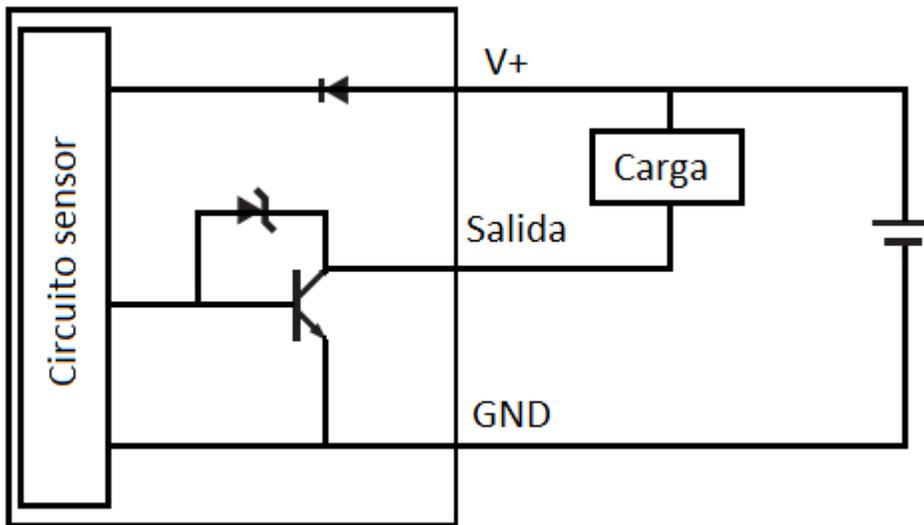


Figura 1-17 Sensor tipo NPN y forma de conexión

b. Sensor tipo PNP

El sensor tiene tres terminales (polarización, tierra y salida). La etapa de salida se da a través de un transistor tipo PNP. La carga se conecta entre la terminal de salida y la de tierra.

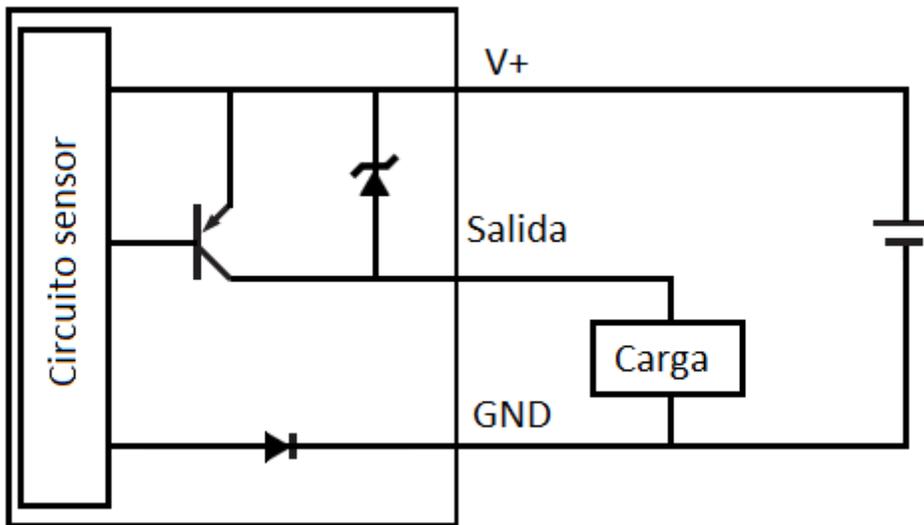


Figura 1-18 Sensor tipo PNP y forma de conexión

c. Sensor tipo ON-OFF

El sensor tiene dos terminales (tierra y salida). La etapa de salida se da a través de un transistor tipo PNP. La carga se conecta en serie con el sensor y la fuente de polarización.

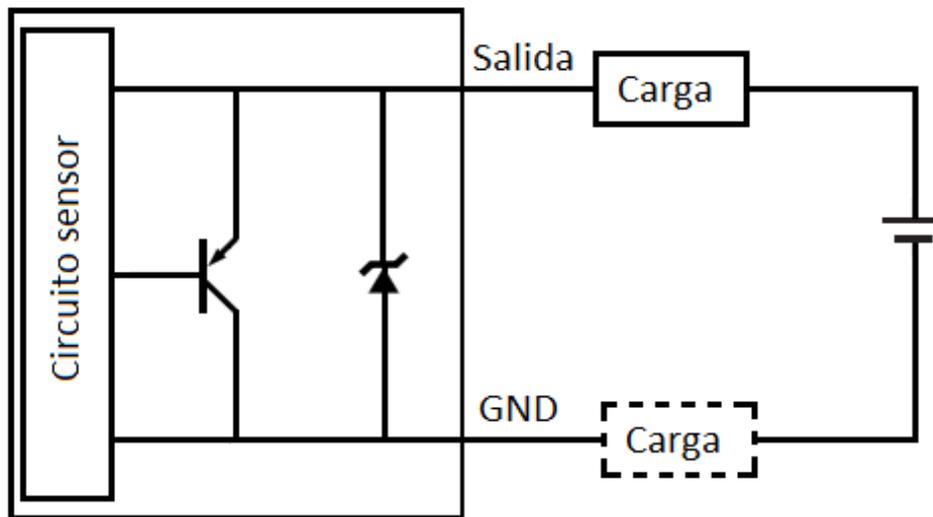


Figura 1-19 Sensor tipo PNP y forma de conexión

1.1.4 Sensores piezo eléctricos

En algunos cristales tienen la propiedad de adquirir una polarización eléctrica al ser sometidos a una tensión mecánica. Este comportamiento se conoce con el nombre de efecto piezoeléctrico y hace que estos materiales puedan ser utilizados como sensores que transforman presión en una pequeña diferencia de potencial eléctrico.

Los elementos piezoeléctricos se utilizan en sensores de presión, aceleración y fuerza.

1.1.5 Termopares

Los termopares o termocuplas son sensores de temperatura que basan su funcionamiento en el efecto seebeck. Al unir dos alambres fabricados con metales diferentes y aplicar un cambio de temperatura en el punto de unión se crea una pequeña diferencia de potencial entre las dos terminales que es proporcional al cambio en la temperatura. Esta diferencia de potencial es del orden de los milivoltios, lo cual hará necesario una buena etapa de acondicionamiento para aprovechar esta señal.

Al punto donde se unen los dos materiales diferentes se le llama unión caliente (pues es el punto de la termocupla que normalmente someteremos a la temperatura a medir). A los extremos

opuestos de los alambres los llamaremos unión fría (pues normalmente están más alejados de la temperatura a medir y se encuentran a temperatura ambiente)

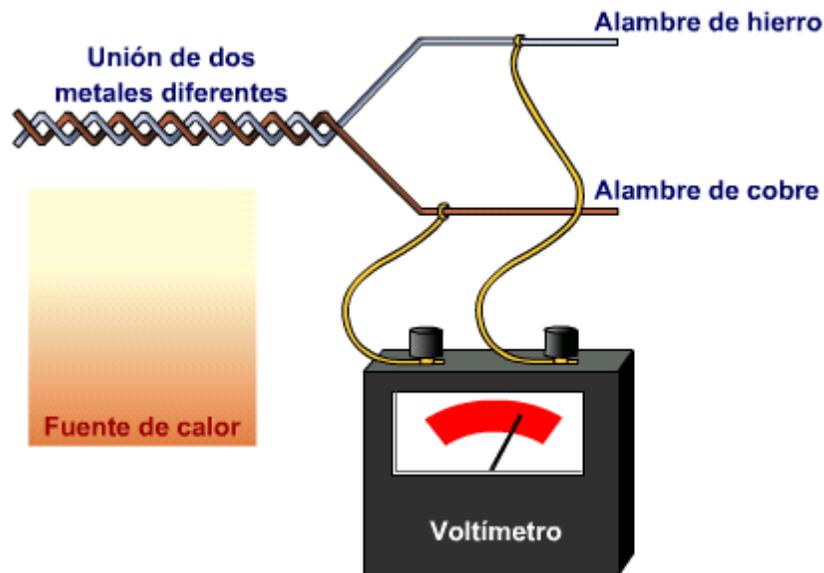


Figura 1-20 Principio de funcionamiento de un termopar

Son sensores de bajo costo y muy utilizados, pero debe tenerse en cuenta de que la relación entre la temperatura y el voltaje no es lineal.

Otro punto a tener en cuenta es que suelen requerir de algo llamado compensación de unión fría debido al fenómeno que explicaremos a continuación. Cuando la unión caliente se somete a una determinada temperatura, esperamos que el voltaje que obtenemos sea proporcional a ella. Sin embargo, la temperatura ambiente a la cual está expuesta la unión fría también afecta la medición, lo cual no es recomendable. Por este motivo se suele necesitar un circuito de compensación llamado "compensación de unión fría".

Según los materiales que conformen el termopar varía la magnitud exacta del voltaje generado y las temperatura que pueden medirse y según esto se tienen diferentes tipos así:

Tipo	Materiales
Tipo K	Cromel (níquel-cromo) /alumel (níquel-magnesio-aluminio-silicio)
Tipo E	Cromel (níquel-cromo) /constantán (cobre-níquel)
Tipo J	hierro/constantán (cobre-níquel)
Tipo T	cobre/constantán (cobre-níquel)

Tipo N	nicrosil (niquel-cromo-silicio)/nasil (niquel-silicio-magnesio)
Tipo B	Platino 70%-rodio 30% / Platino 84%-rodio 6%
Tipo R	Platino 87%-rodio 13% / Platino
Tipo S	Platino 90%-rodio 10% / Platino

1.2 Características de los sensores

Hay un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de medición: ¿Cómo elegir un sensor específico para medir una determinada variable? Por ejemplo, existe una gran variedad de sensores de temperatura (termopares, RDTs, termistores, sensores integrados, etc). ¿Cómo determinar cuál usar ante un caso específico?

Para esto es importante tener en cuenta las características de la variable que queremos medir y aspectos técnicos como el rango de medición, la sensibilidad, resolución y error, entre otros, además de conocer el ambiente en el que se encontrará el sensor (si es de uso industrial o doméstico, por ejemplo).

Vamos a hablar brevemente de algunos conceptos importantes a tener en cuenta a la hora de hacer este tipo de análisis.

1.2.1 Campo de medida o rango

Es el conjunto de valores de la variable de interés que el sensor está en capacidad de medir. Por ejemplo, si digo que un determinado sensor de temperatura puede ser usado para medir valores entre -100°C y 200°C , este será su campo de medida.

1.2.2 Margen, alcance o span

Es la diferencia algebraica entre los valores máximo y mínimo que el sensor es capaz de medir. Para el ejemplo anterior, el span sería de $200^{\circ}\text{C} - (-100^{\circ}\text{C}) = 300^{\circ}\text{C}$.

1.2.3 Sensibilidad

Esta característica indica que tan grande es el cambio en la señal de salida del sensor por unidad de cambio de magnitud en la variable de entrada.

Por ejemplo, si un sensor de temperatura dado me dice que su sensibilidad es de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, esto quiere decir que la variable de entrada es temperatura, la de salida es voltaje y que por cada grado centígrado que aumente la temperatura, el voltaje se incrementará en 10mV .

1.2.4 Resolución

Está relacionada con la capacidad que tiene el instrumento para medir cambios pequeños en la variable de interés. Entre más pequeño sea el mínimo cambio que el sensor es capaz de detectar, más sensible es este. Entonces podemos definirla como la división más pequeña de su escala de medida. Por ejemplo, en una regla común (de las que usamos en el colegio o la universidad) el valor más pequeño de distancia que podemos medir es un milímetro, pues es la escala más pequeña que está marcada en el instrumento.

1.2.5 No linealidad

Para definir lo que es la linealidad, necesitamos entender primero lo que es la *curva característica* en un sensor. Esta se construye haciendo una gráfica de variable de entrada vs variable de salida para un sensor específico. Por ejemplo, la figura siguiente ilustra una curva para un hipotético sensor de temperatura, en el cual la salida es un voltaje. La línea roja ilustra el valor de voltaje que tendríamos para cada valor específico de temperatura en el rango de medición.

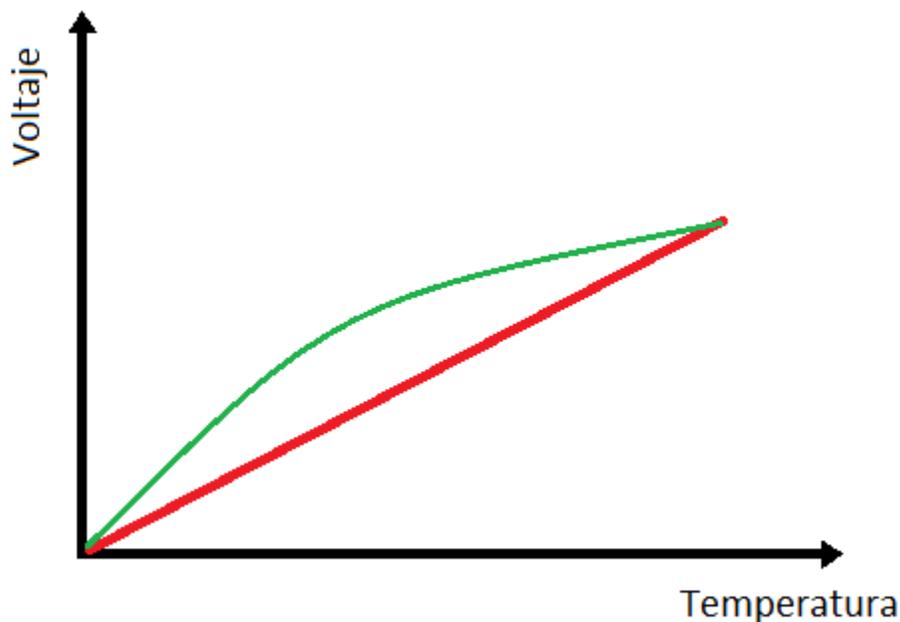


Figura 1-21 Curva característica

En este ejemplo, observamos que la curva característica es una línea recta, lo cual quiere decir que el sensor es lineal en su comportamiento. Esto es ideal en un sensor, puesto que hace muy fácil de interpretar cualquier resultado de medición. Sin embargo, muchos sensores tienen una curva característica diferente a esta. La línea verde en la misma gráfica ilustra una curva característica diferente que corresponde a un sensor que es *no lineal*. La no linealidad nos dice en un sensor que tanto se desvía su curva característica de una línea recta ideal.

1.2.6 Velocidad de respuesta

Se refiere al retraso que puede existir entre un cambio en la variable medida y el respectivo cambio en la variable de salida.

1.2.7 Exactitud

Se refiere a la capacidad que tiene el sensor para dar valores de medida lo más próximos posibles al valor real de la magnitud analizada. Por ejemplo, si a unas condiciones de 200°C un sensor arroja una medida de 201°C, entonces tenemos una inexactitud de 1°C en la medición.

La exactitud suele expresarse ya sea directamente en las unidades de la variable medida o como porcentaje del margen o span del sensor. Por ejemplo, un sensor de temperatura que mida entre -100°C y 300°C (margen de 400°C) y que puede arrojar un valor 1°C por encima o por debajo del valor real de la temperatura, podemos decir que la precisión es de $\pm 1^\circ\text{C}$ o de $\pm 0.25\%$.

1.2.8 Precisión y repetibilidad

La precisión en un sensor es la calidad que este tenga para entregar el mismo valor de medida cada que se encuentra en las mismas condiciones. Es decir, si tomáramos múltiples medidas con un sensor bajo las mismas condiciones de medición, la precisión indicaría que tan cercanas están entre si estos valores. Por ejemplo, al medir en repetidas ocasiones la temperatura a 20°C un cierto sensor puede entregar diferentes valores (digamos 20.1°C, 19.8°C, 20.3°C, 19.7°C). En este caso, tenemos una dispersión de $20.3 - 19.7 = 0.6^\circ\text{C}$.

También llamamos a este factor repetibilidad, pues indica la capacidad del instrumento de entregar la misma salida ante repetidas mediciones bajo las mismas condiciones.

La precisión difiere de la exactitud. Podemos, por poner un caso, tener un sensor muy poco exacto (que a 20°C entregue un valor de 25°C); pero que al repetir en numerosas ocasiones la medición a esta temperatura tenga buen repetibilidad (25°C, 25.1°C, 24.9°C).

1.2.9 Histéresis

Algunos sensores no se comportan igual cuando la variable medida va en aumento que cuando va descendiendo. Cuando esto sucede se dice que el sensor presenta *histéresis*.

Para entender mejor esto vamos a ilustrarlo con un ejemplo. Supongamos que tenemos un sensor de temperatura cualquiera y que para ver su comportamiento lo ponemos en un ambiente de prueba en el cual empezamos a subir poco a poco la temperatura y registramos su valor de salida para cada valor de temperatura, a medida que esta sube. Con este obtenemos una curva como la que se ve en la Figura 1-22, que sería la curva característica del sensor.

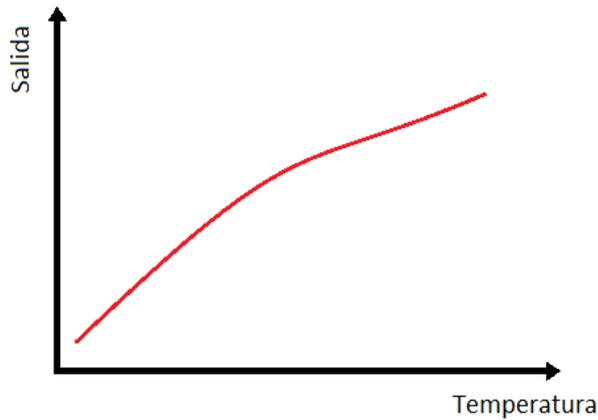


Figura 1-22 comportamiento de subida en un sensor

Vemos que el comportamiento es no lineal, lo cual no es extraño. Ahora, supongamos que después de llegar a una temperatura máxima de interés, dejamos que la temperatura descienda, y medimos de nuevo la respuesta del sensor. Podríamos pensar que lo esperado es que al bajar la temperatura siga la misma curva que al subir ¿no es cierto?

En realidad, en muchos casos tendremos que cuando la temperatura va bajando, el sensor se comporta de forma ligeramente diferente. Podría ser que al bajar el sensor entregue valores como los que muestra la línea azul en la siguiente figura.

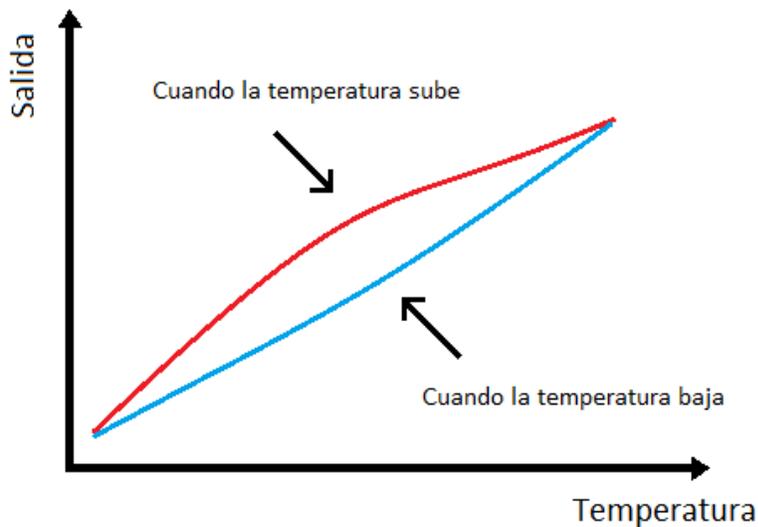


Figura 1-23 Histéresis en un sensor

Cuando esto sucede, decimos que el sensor tiene histéresis.

1.2.10 Otros aspectos

Los que hemos mencionado hasta el momento son sólo algunos de los aspectos que debemos tener en cuenta a la hora de elegir un sensor y que están relacionados, principalmente, con la capacidad del sensor de medir la variable de interés en el rango de interés y con la exactitud requerida.

Sin embargo, existen muchos otros aspectos importantes a tener en cuenta relacionados con las características técnicas del elemento.

Para empezar, podemos mencionar las características relacionadas con el consumo de energía. Especialmente cuando tengamos sistemas portables que funcionen con batería, será muy importante verificar el consumo de corriente del sensor y encontrar la opción que menor consumo nos presente.

Otro aspecto tiene que ver con las condiciones ambientales en las que se instalará el sensor: ¿se trata de un ambiente industrial o doméstico? ¿El sensor estará expuesto a condiciones hostiles de temperatura, humedad, a algún tipo de ambiente corrosivo de impacto mecánico? En tal caso debemos verificar que el sensor elegido esté en capacidad de soportar dichas condiciones.

También ha de tenerse en cuenta el tipo de salida entregada por el sensor: ¿será un voltaje análogo de 0 a 5V? ¿o de 0 a 10V? ¿será una corriente de 4 a 20mA? ¿Se na salida digital de algún tipo? ¿será a través de algún protocolo como el I2C o algún otro? Esto es importante para determinar si es compatible con el resto de nuestro sistema de medición.

Relacionado con esto, también debemos considerar el tipo y cantidad de acondicionamiento requerido por el sensor. Existen algunos sensores que ya tienen un acondicionamiento integrado (los conectamos y listo) y hay otros a los cuales tendremos que diseñarle un apropiado circuito de acondicionamiento.

Por último, el precio suele ser también un parámetro importante, dependiendo de las restricciones que tengamos en el presupuesto.