

Lección 9.

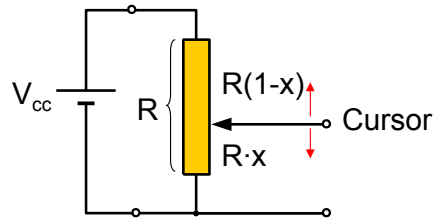
Medida de magnitudes mecánicas

- 9.1 Introducción
- 9.2 Sensores potenciométricos
- 9.3 Galgas extensométricas
- 9.4 Sensores piezoeléctricos
- 9.5 Sensores capacitivos
- 9.6 Sensores inductivos
- 9.7 Sensores basados en el efecto Hall

9.1 Introducción

Posición	Inductivos, Resistivos, Magnéticos, Efecto Hall
Velocidad	Efecto Hall, Encoder, Potenciómetros
Aceleración	Piezoeléctricos, Piezorresistivos, Capacitivos
Fuerza, Peso	Celdas de carga, Galgas
Presión	Inductivo, Capacitivo, Piezoeléctrico, Galga, Óptico
Caudal	Electromecánicos, Magnéticos, Ultrasonidos
Nivel	Potenciómetros, Capacitivos, Térmicos, Ópticos

9.2 Sensores potenciométricos



Aplicaciones

- Medida de desplazamientos
- Medida de presión
- Medida de nivel

Problemas

- Mecánicos
- Rozamiento
- Autocalentamiento
- Inercia

3

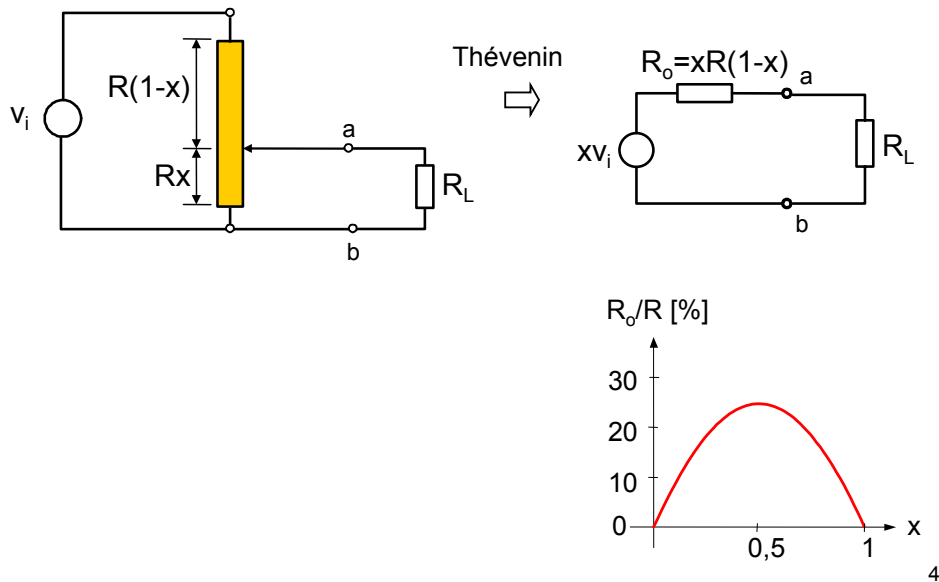
Un **potenciómetro** es un dispositivo electromecánico que consta de una resistencia de valor fijo sobre la que se desplaza un contacto deslizante, el **cursor**, que la divide eléctricamente.

El movimiento del cursor origina un cambio en la resistencia medida entre el terminal central y uno cualquiera de los extremos. Este cambio de resistencia puede utilizarse para medir desplazamientos lineales o angulares de una pieza acoplada al cursor. Para la obtención de una señal eléctrica relacionada con el desplazamiento se alimenta en general, con una tensión continua, adoptando la configuración de un simple divisor de tensión.

Además de para la medida de desplazamientos, los potenciómetros pueden utilizarse para medir otras magnitudes físicas siempre que sea posible convertirlas en un desplazamiento.

A pesar de que estos sistemas fueron los primeros que se emplearon en la instrumentación industrial, hoy en día la aplicación del potenciómetro como sensor de desplazamiento ha caído en desuso debido a diversos problemas: mecánicos (anclajes, rodamientos, guías), rozamiento (acorta la vida), autocalentamiento (la resistencia varía con la temperatura), vibraciones (puede provocar la pérdida de contacto del cursor sobre la resistencia).

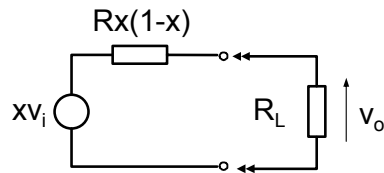
Circuito equivalente



Consideremos el circuito de la figura formado por un potenciómetro lineal de resistencia nominal R y de longitud de desplazamiento máximo, L . Sea l el desplazamiento actual medido desde un punto tomado como referencia y sea $x=l/L$ la fracción del desplazamiento recorrido. Como el potenciómetro es lineal, a una fracción de recorrido x , le corresponde una fracción equivalente de la resistencia nominal R .

El comportamiento del potenciómetro como elemento de un circuito depende de su impedancia de salida, R_o . La figura de la derecha muestra el circuito equivalente Thevenin visto entre el cursor y el extremo de referencia. La impedancia de salida cambia en función de la fracción de desplazamiento x , llegando a ser hasta un 25% del valor nominal del potenciómetro, justo a la mitad del recorrido. En el resto de posiciones, excepto en los extremos, el efecto de la impedancia de salida va a influir sobre la tensión leída, es decir, va a introducir un error respecto a la respuesta ideal.

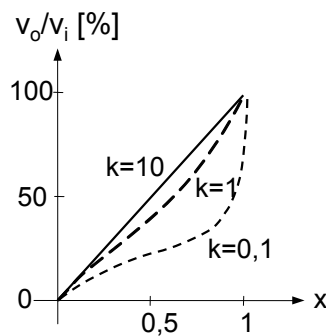
El potenciómetro en carga



$$v_o = v_i x \frac{R_L}{Rx(1-x) + R_L}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{x}{\frac{x(1-x)}{k} + 1} \quad k = R_L/R$$

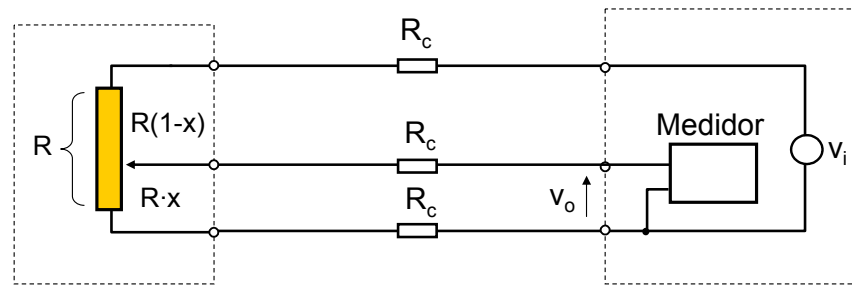
El error de no linealidad es menor para R_L grandes



5

Analizando el circuito del potenciómetro con carga de la figura se obtiene la relación entre la tensión de salida y el desplazamiento. Esta relación se ha representado gráficamente. Vemos como al conectar una carga al potenciómetro se introduce en el sistema un **error de no linealidad**. La magnitud de esta no linealidad depende de k , que es la relación entre la resistencia de carga y la nominal del potenciómetro. Si R_L es considerablemente mayor que R , es decir, para un k suficientemente grande, la salida es prácticamente lineal como se muestra en la figura para $k=10$. Si el valor de R_L es similar al valor de R , ($k=1$) la salida presenta un error de linealidad apreciable. En resumen para conseguir una respuesta lineal se debe exigir al sistema que se acople una impedancia de entrada alta comparada con la resistencia nominal del potenciómetro.

Medida a tres hilos



- Error de offset: $v_o(0) = v_i \frac{h}{1+2h}$

- Sensibilidad: $S = \frac{dv_o}{dx} = v_i \frac{1}{1+2h}$



$$v_o = v_i \frac{Rx + R_c}{R + 2R_c} = \frac{x + h}{1 + 2h}$$

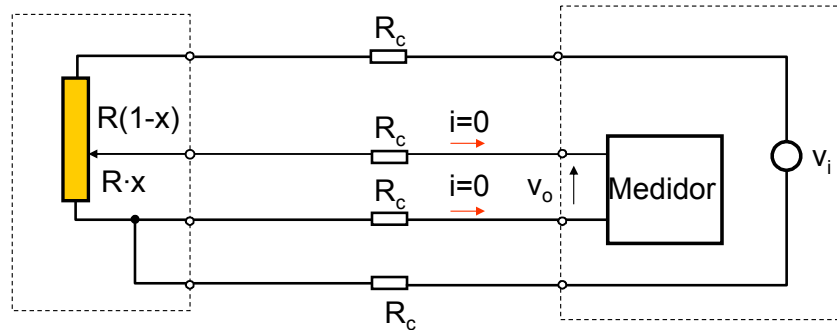
$$h = R_c/R$$

6

Además del error debido a la carga y a la impedancia de salida, otra fuente de error en los sistemas de medida basados en potenciómetros es el cableado. En general, un cable presenta una resistencia pequeña, pero la situación cambia cuando supera cierta longitud. La figura muestra un **sistema de medida a tres hilos** en el que la señal de salida del potenciómetro se envía a través de tres cables al punto donde se procesa la medida. La alimentación también se envía de forma remota.

Despreciando el error debido a la carga, es decir, considerando que la impedancia de entrada del medidor es muy elevada comparada con la impedancia de salida del conjunto sensor potenciométrico-cables. Del análisis de la expresión de v_o se deduce que se tiene un **error de offset** o **error de cero**, dado que para $x=0$ se tiene una tensión distinta de cero. Por otro lado la sensibilidad se aparta de la ideal.

Medida a cuatro hilos



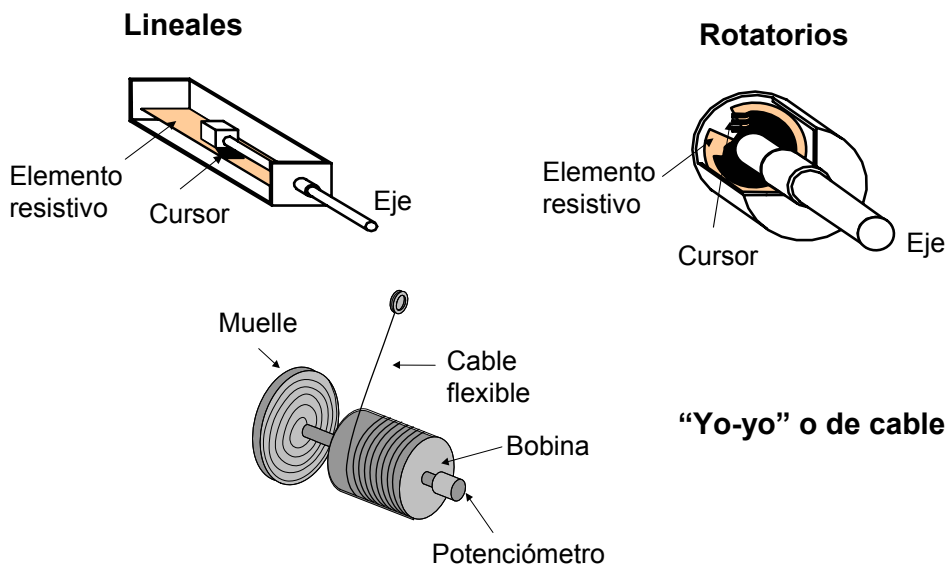
▪ Error de offset: $v_o(0) = 0$

▪ Sensibilidad: $S = \frac{dv_o}{dx} = v_i \frac{1}{1+2h}$

$$v_o = v_i \frac{Rx}{R+2R_c} = v_i \frac{x}{1+2h}$$

Para eliminar el error de *offset* puede utilizarse el circuito de **medida a cuatro hilos** de la figura.

Tipos de potenciómetros



8

Los potenciómetros se pueden clasificar atendiendo a diversos criterios:

▪ **Según elemento resistivo utilizado:**

Bobinados: el elemento resistivo es un hilo arrollado sobre un soporte. Tienen una excelente estabilidad térmica y capacidad para manejar niveles de potencia considerables.

No bobinados: el elemento resistivo puede ser cermet (aleación de cerámica y metal), carbón, plástico conductor, película metálica.

▪ **Por el tipo de desplazamiento que realice el cursor:**

Movimiento lineal: el cursor describe desplazamientos en línea recta. El desplazamiento puede ir desde milímetros hasta varios metros.

Rotatorios: pueden ser de una vuelta o multi-vuelta (3, 5, 10 o 15).

Cuerda, "yo-yo" o de cable: permiten medir la posición y la velocidad de un cable flexible arrollado en una bobina que está sometida a la tracción de un muelle. Pueden llegar a medir varias decenas de metros del cable.

Ejemplos



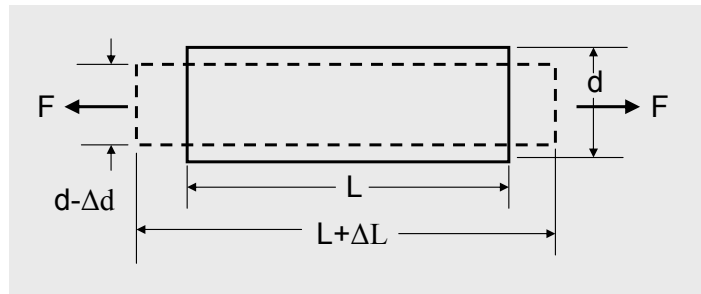
Monitorización de la suspensión de un tren



Test de impacto en un vehículo

www.spaceagecontrol.com

9.3 Galgas extensométricas



$$R = \rho \frac{L}{\pi d^2 / 4} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - 2 \frac{\Delta d}{d} \quad (2)$$

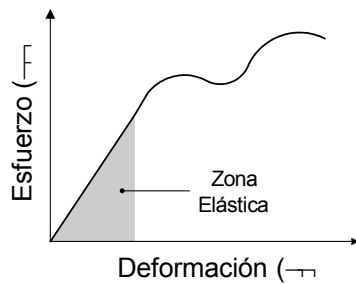
10

Las galgas extensométricas (*strain gauges*) son sensores resistivos muy utilizados en la medida de esfuerzos mecánicos en materiales en los que la resistencia efectiva entre sus extremos se modifica con el esfuerzo aplicado sobre la galga.

Para comprender su funcionamiento, veremos en qué principios se basa el cambio de la resistencia con la fuerza aplicada. Supongamos que se aplica una fuerza F de tracción a los extremos de un hilo de material homogéneo de longitud L y diámetro d . El material se deformará elásticamente. En principio, se modificarán las dimensiones produciéndose un alargamiento del hilo y una disminución de su sección que ocasionará un cambio en la resistencia efectiva del hilo, como se muestra en la ecuación (2). El cambio en la resistencia puede deberse a:

- El propio cambio de longitud.
- El cambio originado en la sección.
- El cambio originado en la resistividad.

Factor de galga



▪ Esfuerzo: $\sigma = \frac{F}{A}$ (3)

▪ Deformación: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ (4)

▪ Módulo de Young: $E = \sigma / \varepsilon$ (5)

▪ Factor de galga: $K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$ (6)

$$\Delta R = KR\varepsilon = \frac{KR}{EA}F$$
 (7)

11

El factor de galga K determina la sensibilidad de la resistencia a los cambios en la longitud. Así, la sensibilidad de la galga crece con el factor de galga y el valor de la resistencia y decrece con el módulo de Young y con la sección. Para lograr mayores cambios en ΔR , será conveniente incrementar el valor de la resistencia sin incrementar la sección, es decir, tener mayores longitudes; por otro lado, si lo que interesa es medir en una zona muy concreta, el tamaño no puede ser muy grande con lo que se impone una solución en la que el hilo se disponga en zig-zag y se sitúe sobre una película que transmita lo mejor posible el estado tensional al propio hilo.

Tipos de galgas

Parámetro	Metálicas	Semiconductoras
Margen de medida, $\mu\epsilon$	0,1 a 40.000	0,001 a 3000
Factor de galga	1,8 a 2,35	50 a 200
Resistencia, Ω	120, 350, 600...5000	1000 a 5000
Tolerancia en la resistencia, %	0,1 a 0,2	1 a 2
Tamaño, mm	0,4 a 150	1 a 5

12

▪ **Galgas metálicas:** para su fabricación se emplean diversos conductores metálicos, como las aleaciones constantán, karma, isoeleastic y aleaciones de platino. Pueden ser de:

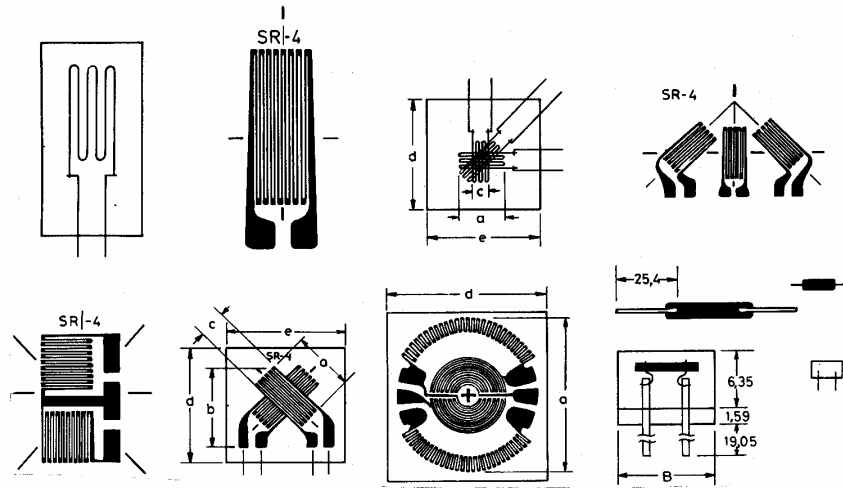
- Hilo metálico. Son las más sencillas. Normalmente están adheridas a una base de dimensiones estables. Introducen errores en la medida ante estados tensionales no longitudinales.

- Película metálica. Son las que se desarrollan por métodos de fotograbado. Se fabrican de forma similar a la producción de circuitos impresos en bases flexibles.

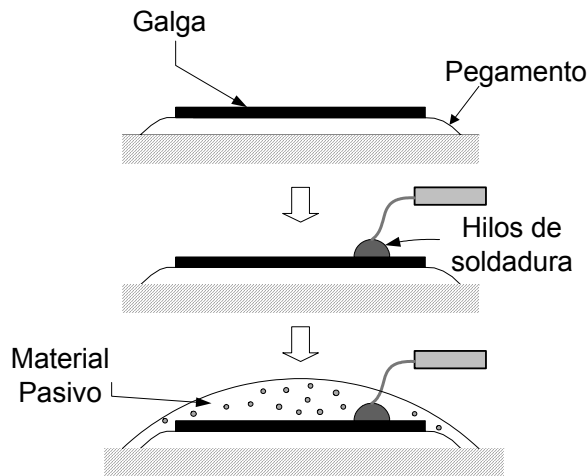
- Metal depositado. Son las aplicadas directamente sobre superficies mediante métodos de evaporización o bombardeo químico. Se usan en los diafragmas de los sensores de presión.

▪ **Galgas semiconductoras:** se fabrican de silicio u otro material semiconductor. Su cambio resistivo es menos lineal que las de metal y tienen una gran dependencia de la temperatura. Se usan en la fabricación de sensores integrados de presión donde se implantan en microdiafragmas para medir presión.

Tipos de galgas



Modo de empleo

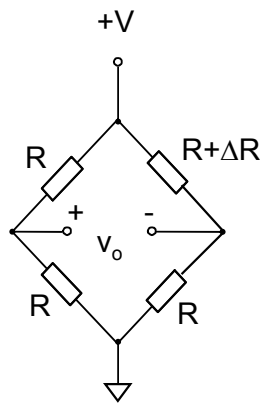


14

Para la correcta utilización de las galgas se debe de tener en cuenta lo siguiente:

- Las galgas solo miden en una dirección, por lo que cuando se colocan se debe tener cuidado de alinearlas teniendo en cuenta las marcas de alineación que presentan.
- Solo proporciona la medida del estado tensional de la superficie que ocupa la galga, no el de toda la superficie.
- Si se desconoce la dirección de la tensión a que estará sometida la galga se podría utilizar dos galgas dispuestas en la misma zona ortogonalmente.
- La transmisión del esfuerzo de la superficie en que se va a medir hasta el metal debe de realizarse sin pérdida de información, por lo que el sistema debe garantizar la no absorción del esfuerzo. Para ello se emplean pegamentos de gran resistencia mecánica que permiten un óptimo funcionamiento. También se debe tener una cierta precaución en la "pasivación" de la superficie expuesta mediante una capa de material que la proteja frente a inclemencias ambientales.

Circuitos de medida



$$v_o = V \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{R + (R + \Delta R)} \right) = V \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R}$$

- Como $4R \gg 2\Delta R \Rightarrow$

$$v_o @ V \frac{\Delta R}{4R} = V \frac{K\varepsilon}{4}$$

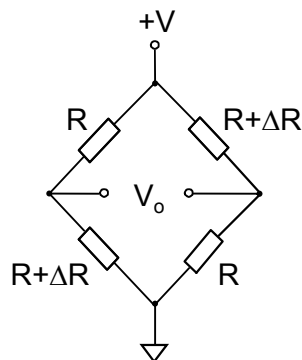
- Sensibilidad del puente:

$$S_p = \frac{dv_o}{d(\Delta R)} @ \frac{V}{4R}$$

Para la medida de los cambios producidos por las galgas extensiométricas se utiliza la configuración en puente de Wheatstone. Como hemos visto este tipo de configuración es muy sensible a pequeños cambios en las resistencias del puente.

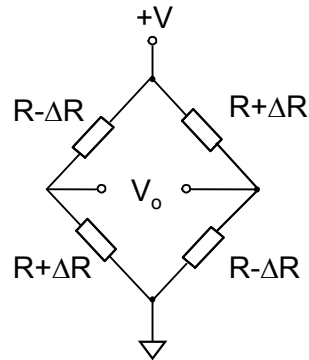
La figura muestra el puente de medida más sencillo, con solo una galga activa. El análisis del circuito se lleva a cabo asumiendo que todas las resistencias son iguales cuando no hay deformación. La tensión de salida del puente es muy pequeña y deberá ser amplificada por un amplificador de instrumentación.

Circuitos de medida



$$v_o @ V \frac{\Delta R}{2R} = V \frac{K\varepsilon}{2}$$

$$S_p = \frac{V}{2R}$$



$$v_o @ V \frac{\Delta R}{R} = VK\varepsilon$$

$$S_p = \frac{V}{R}$$

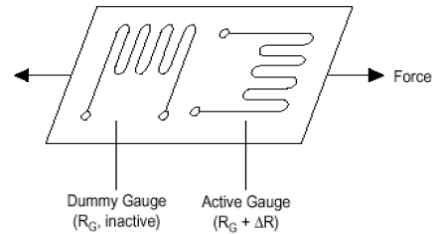
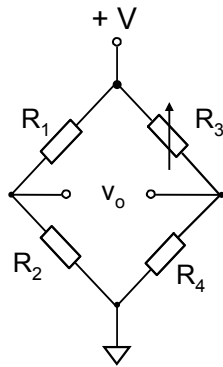
16

Se puede duplicar la sensibilidad en el voltaje de salida disponiendo dos galgas activas (montaje de $\frac{1}{2}$ puente) como se muestra en el montaje de la izquierda. Las dos galgas han de estar sometidas al mismo tipo de esfuerzo.

Si se puede trabajar con estados tensionales “opuestos” pero iguales en valor absoluto es posible disponer cuatro galgas activas, dos trabajando a tracción y dos a compresión con lo que se duplica la sensibilidad del sistema y al tensión de salida será: $v_o = VK\varepsilon$, con cuatro veces más sensibilidad que el montaje original. Claro está que esta posibilidad sólo se podrá llevar a cabo cuando existan estados tensionales opuestos en la zona de medida que lo permitan. Aún en este caso, la utilización de las galgas debe hacerse con sumo cuidado para conseguir que realmente dos de ellas soporten una elongación positiva y las otras dos la soporten negativa y del mismo valor.

Compensación de la temperatura

➤ $50 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$

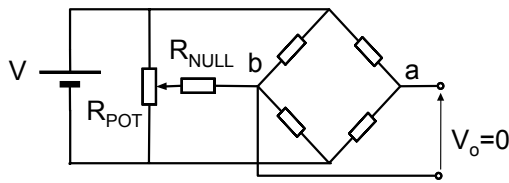


▪ En equilibrio ($v_o=0$) $\Rightarrow R_1 \times R_4 = R_2 \times R_3$

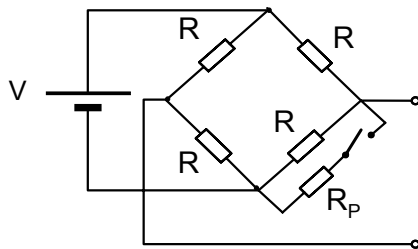
17

Las galgas son bastante sensibles a la temperatura (hasta $50 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$), por lo que se suelen compensar mediante una galga pasiva conectada en la misma rama que la activa y físicamente próxima a ella, de forma que se encuentre a su misma temperatura, pero no sometida a esfuerzos. En el ejemplo de la figura si R_3 es la galga activa, R_4 sería la galga de compensación.

Equilibrado y calibración



- **Equilibrado:**
Se equilibra el puente mediante R_{POT} y R_{NULL} hasta que $V_o = 0V$



- **Calibración (mediante shunt)**
Se coloca un resistencia de precisión R_p que simule una deformación:

$$\varepsilon_{ficticia} = \frac{R}{K(R + R_p)}$$

18

La utilización de los puentes de medida con galgas hay que tener en cuenta diversos aspectos:

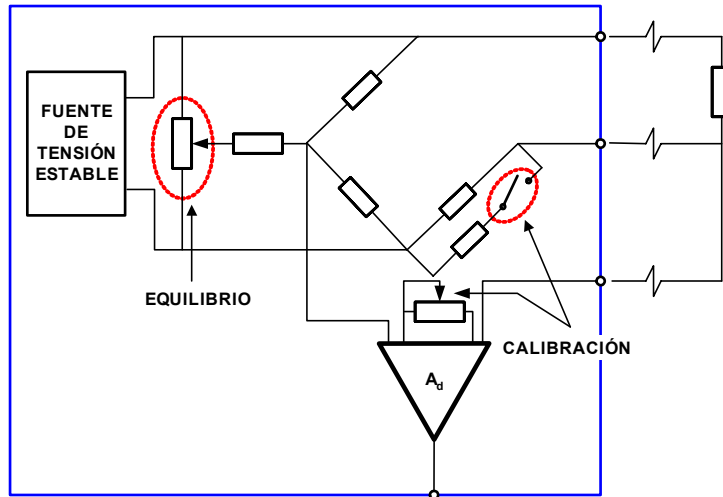
1) Equilibrado del puente. En ausencia de esfuerzos, la tensión de salida del puente debe ser nula. Se ajusta con el potenciómetro R_{POT} y R_{NULL} .

2) Calibración del puente. La calibración consiste en situar un valor de deformación conocido y comprobar si la salida se acerca o no al valor previsto. Como situar un estado de deformación determinado puede no ser algo sencillo de hacer se coloca un resistencia R_{SH} en paralelo con la galga activa. La deformación que simula esa resistencia está dada por la expresión de la figura. La resistencia del interruptor ha de ser muy baja, se recomienda el uso de relés encapsulados al vacío.

3) Cableado del puente. En muchas ocasiones el puente no está en el mismo lugar que las galgas, por lo que las resistencias del cableado pueden afectar a la medida. Este efecto puede compensarse equilibrando el puente antes de utilizarlo para medir.

4) Variación de la resistencia del cable con la temperatura. En este caso se puede efectuar una medida a tres hilos.

Medida de deformación en punto



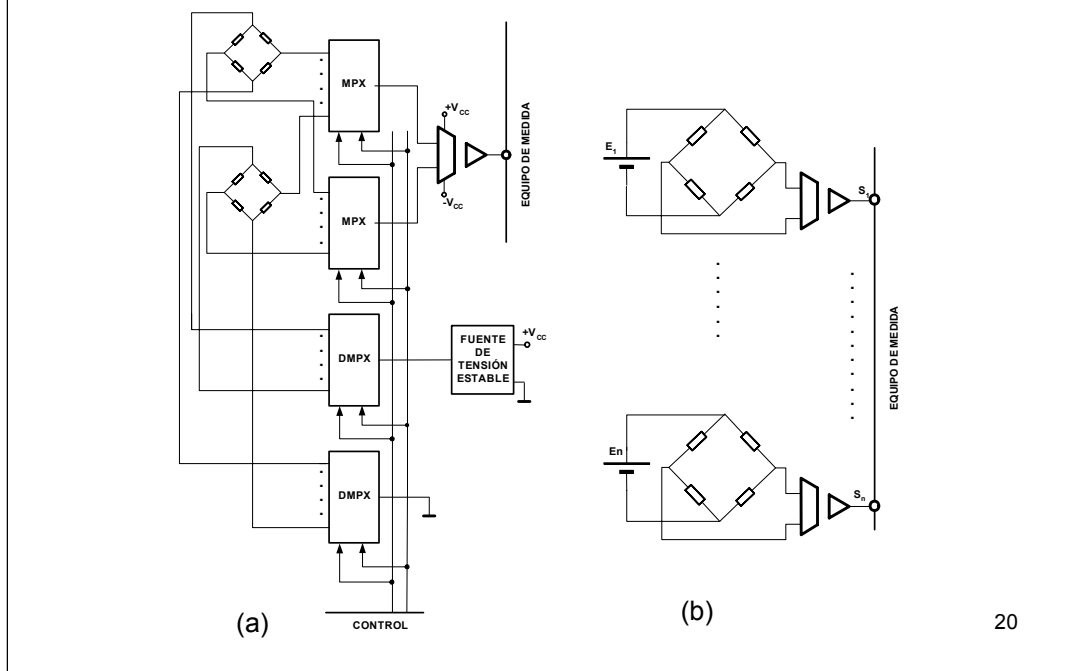
19

Las aplicaciones de las galgas extensométricas pueden clasificarse en dos grandes grupos: en primer lugar, las que suponen la medida directa de un estado de deformación en una superficie que permitirá conocer su estado tensional; en segundo lugar, aquéllas en las que el estado de deformación es una variable intermedia consecuencia de la variable que se pretende medir.

Las medidas estáticas de estados de deformación son medidas en las que se supone que los cambios de los estados de deformación ocurren con lentitud y, por ello, no será preciso cuidar la respuesta en frecuencia de los amplificadores y se podrá utilizar filtros paso bajo con frecuencias de corte bajas para limitar la presencia de señales de ruido de alta frecuencia que pueden aparecer. Este tipo de medidas corresponden a sistemas de monitorización de elementos de sustentación en construcción o en cualquier tipo de máquina que no esté sometida a estados vibratorios o de fatiga.

Dentro de los sistemas de medida de estados de deformación mediante galgas extensométricas se tienen los casos de sistemas en que se pretende medir un único estado con una variable y que incluirán un único puente con los accesorios adicionales para el ajuste del cero y la calibración. Este tipo de sistema corresponde directamente a lo que se ha descrito hasta este momento y supone una amplificación posterior hasta llevar la tensión de salida a los valores que se desee.

Medida de deformación en múltiples puntos

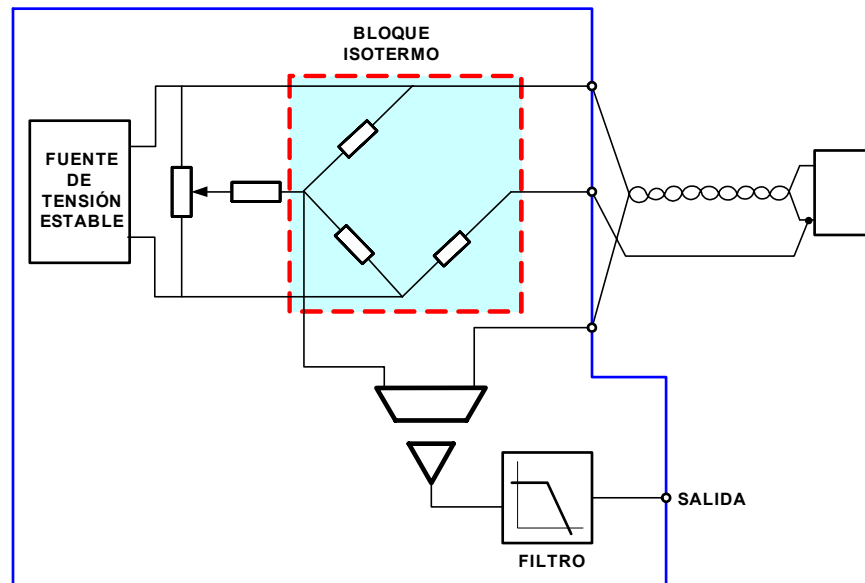


Sin embargo, la situación más normal es la medida de los estados de deformación en varios puntos simultáneamente lo que implica el uso de diferentes canales para la medida. En algunos casos, tales como los sistemas de monitorización de los procesos de construcción de grandes edificios o infraestructuras viarias, el número de variables de deformación monitorizadas puede llegar a ser muy grande (cientos de canales) y los equipos de medida pueden realizarse de dos formas:

Mediante un único amplificador y un multiplexador que vaya recorriendo los distintos puentes de medida de forma secuencial (figura a). Se tiene así un ahorro de equipamiento ya que los amplificadores aislados de instrumentación y las fuentes de alimentación ultra-estabilizadas suelen tener un coste alto. El inconveniente está en la imposibilidad de realizar medidas simultáneas aunque esto es menos importante en medidas estáticas.

Mediante fuentes y amplificadores independientes para cada puente de medida con un coste muy alto, pero una garantía de simultaneidad total y la posibilidad de realizar ajustes particulares para cada uno de ellos (figura b).

Medidas dinámicas



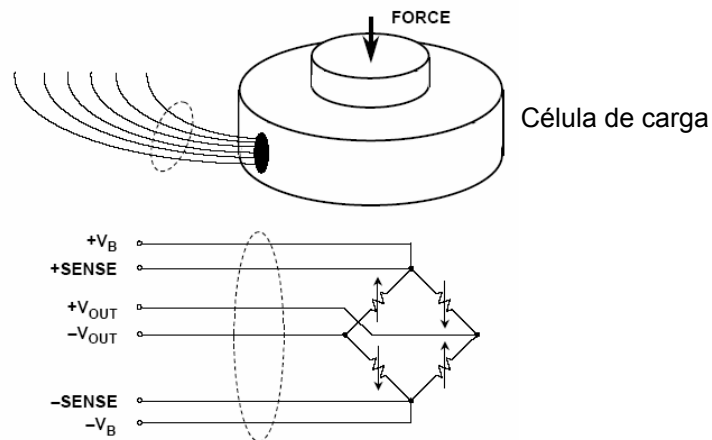
21

Cuando el objetivo es conocer la evolución en el tiempo (o en frecuencia) de los estados de deformación en uno o varios puntos de una pieza o sistema mecánico, es necesario realizar medidas dinámicas que recojan este tipo de información. Las galgas pueden tener buenas características dinámicas por lo que el cuello de botella de este tipo de sistemas suele estar en el producto ganancia – ancho de banda del amplificador que se convierte en un equipo de alto coste. Con vistas a optimizar la relación S/N se incluirán filtros a la salida del amplificador para limitar el ancho de banda al estrictamente necesario para el trabajo a realizar y evitar el procesamiento de tensiones fuera de las frecuencias deseadas. En la figura se muestra un ejemplo de este tipo de sistemas.

Los sistemas comerciales de este tipo suelen incluir filtros de frecuencia de corte variable, adaptables a las necesidades de cada caso, amplificadores aislados con las prestaciones para ajustar el cero y la calibración mediante resistencia de *shunt* y fuentes ultra-estabilizadas para alimentar el puente.

A la hora de diseñar estos sistemas, se deberá tener en cuenta el tipo de aplicación a la que van destinados con lo que si se pretende realizar medidas de vibración prestaremos especial atención a los parámetros de alterna de los amplificadores utilizados mientras que en medidas de fatiga, de impacto o en la que se mezclen las condiciones estáticas y dinámicas, habrá que considerar todas las características de los amplificadores con lo que el problema puede llegar a complicarse en gran medida.

Medida de peso



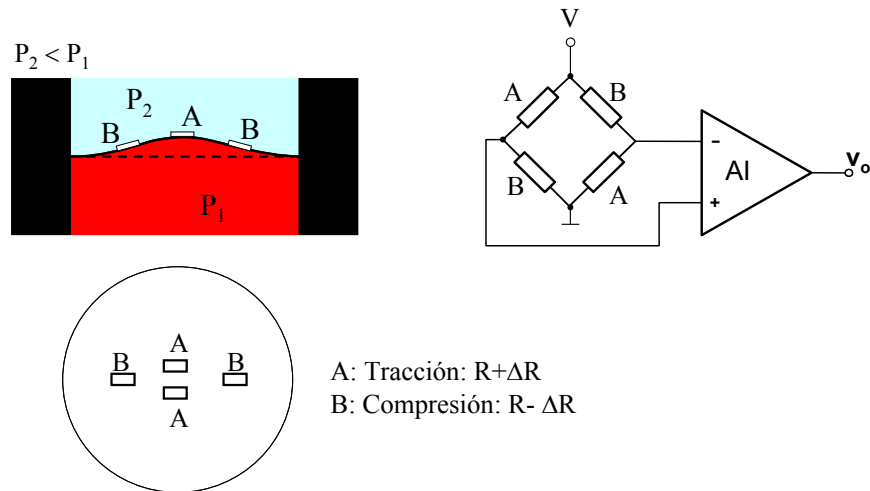
- Margen de medida: 500 ÷ 2000 $\mu\epsilon$.
- Pesaje de tanques, silos y grades pesos industriales.

22

Hay muchas variables que pueden producir estados de deformación en una pieza con lo que las galgas extensométricas se pueden usar para medir esta variable intermedia y, así, poder medir la original. Las aplicaciones más importantes son: la medida de peso y la medida de presión.

Las células de carga (o celdas de carga) son piezas mecánicas con configuración muy variada que se han diseñado de tal forma que en algunas partes de su estructura mecánica, el peso aplicado se transforma en una deformación proporcional que se mide con dos o cuatro galga.

Medida de presión

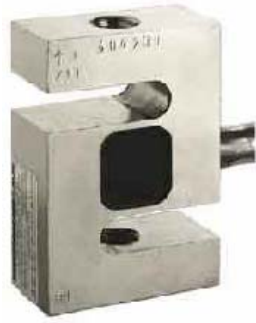


23

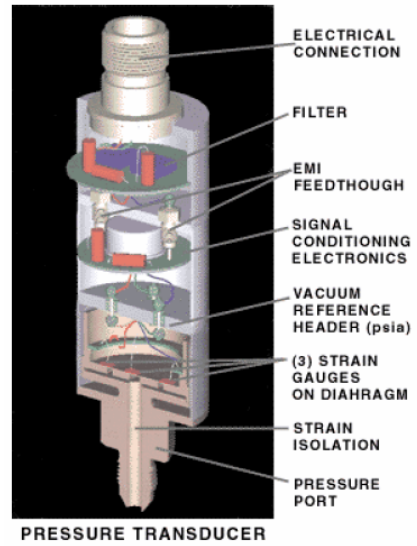
La **medida de presión** se realiza mediante un sistema de membrana que transforma la diferencia de presión entre sus dos caras en una deformación que se mide mediante un puente de cuatro galgas en el que dos trabajan a tracción y dos a compresión, tal como se muestra en la figura.

La dificultad de este tipo de sistemas está en la previsible no-linealidad entre la diferencia de presiones y el estado de deformación que obliga a un diseño muy cuidadoso de la membrana, en cuanto a materiales (metálicos, cerámicos, plásticos, etc.) y morfología, y una selección correcta de los lugares en los que se van a situar las galgas. De todas formas, la no linealidad se puede paliar mediante un microcontrolador que incorpore una tabla de calibración del conjunto.

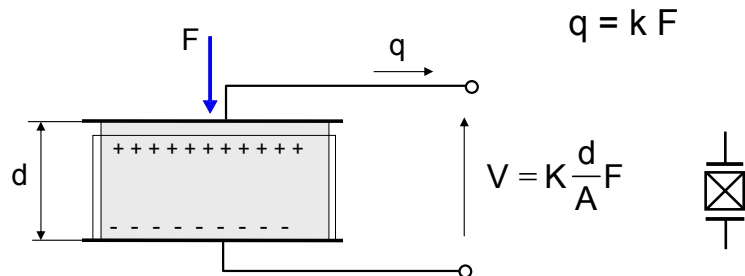
Ejemplos



Célula de carga



9.4 Sensores piezoeléctricos



- Cuarzo, turmalina, sal de Rochelle
- PZT (titanato-circonato de plomo)

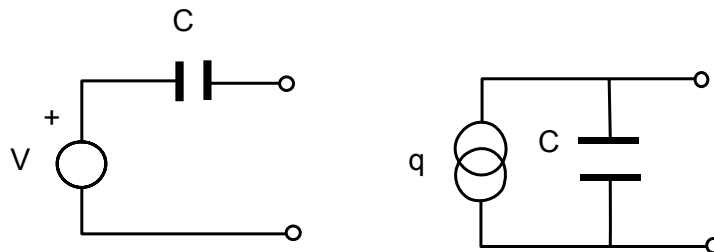
25

El efecto piezoeléctrico fue descubierto por Jacques y Pierre Curie en 1880 en los cristales de cuarzo. Este fenómeno se produce en determinados sistemas cristalinos y consiste en la aparición de una polarización eléctrica en un material al deformarse bajo la acción de un esfuerzo. Es un efecto reversible de modo que al aplicar una diferencia de potencial eléctrico entre dos caras de un material piezoeléctrico, aparece una deformación.

Además del cristal de cuarzo, existen otras sustancias naturales que poseen comportamientos similares tales como la turmalina o la sal de Rochelle. Estas sustancias tienen una gran estabilidad tanto ante el cambio en las condiciones medioambientales como en el transcurso del tiempo, pero las señales que son capaces de producir resultan muy débiles.

Como materiales sintéticos se tiene el titanato de bario o el titanato-circonato de plomo (PZT) que, si bien no tienen tanta estabilidad como las sustancias naturales, presenta un nivel mucho más alto de señal de salida. Los materiales sintéticos producen el efecto piezoeléctrico gracias a la anisotropía de su estructura y a la distribución de sus cargas eléctricas que se suele conseguir después de un tratamiento.

Modelo eléctrico

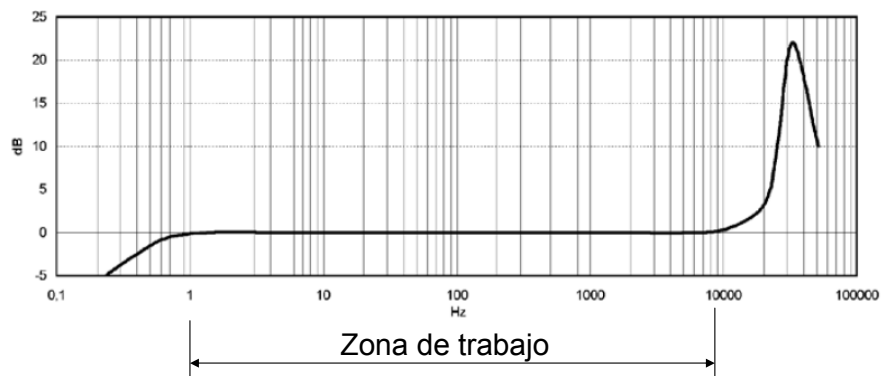


V = tensión a circuito abierto

C = capacidad del cristal

La figura muestra el modelo eléctrico simplificado de un sensor piezoeléctrico, donde V es la tensión de salida en vacío y C la capacidad física del sensor entre los terminales de salida del dispositivo.

Respuesta frecuencial



➤ SÓLO MEDIDAS DINÁMICAS

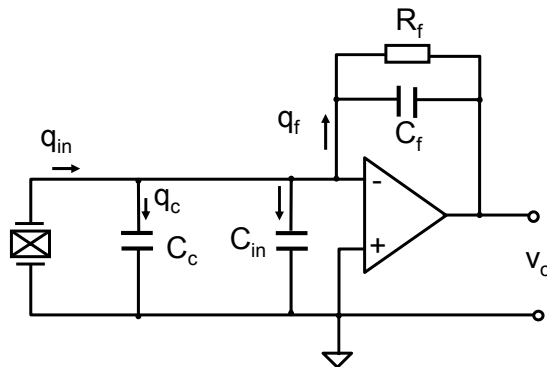
27

Una carga colocada en la salida del sensor modificará su respuesta frecuencial, introduciendo una frecuencia de corte inferior según se muestra en la figura y por tanto una reducción del margen de frecuencias a que se puede usar. A pesar de que puede hacerse que la frecuencia de corte inferior sea muy baja, no puede llegar a medir en continua por lo que el ámbito de aplicación de este tipo de sensores queda limitado a las medidas dinámicas, es decir, medidas en las que la fuerza aplicada sobre el dispositivo (la aceleración o la presión) sea variable.

En general, los fabricantes proporcionan el valor del condensador de salida del dispositivo y la sensibilidad del sistema al parámetro que se está midiendo suponiendo que se trabaja siempre en la zona plana de la curva de respuesta. También se suele proporcionar la frecuencia de resonancia y/o el margen de frecuencias de validez de los datos proporcionados (capacidad y sensibilidad).

Para las medidas estáticas es preferible el empleo otros sensores como las galgas extensiométricas aunque con menor sensibilidad.

Acondicionamiento

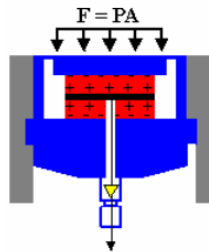


$$q_{in} = q_c + q_{inp} + q_f$$

$$q_{in} = v_{inp} (C_c + C_{in}) - V_o C_f \Rightarrow V_o = -\frac{q_{in}}{C_f}$$

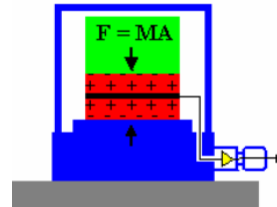
Para poder leer la señal de un sensor piezoeléctrico lo más adecuado es emplear un amplificador de carga que convierte la carga en una tensión. La ventaja que presenta frente a otras soluciones como el amplificador de alterna es que la tensión de salida depende sólo de la carga de entrada y de la capacidad de realimentación. No depende de la capacidad del cable ni de la capacidad de entrada del operacional. La resistencia de realimentación R_f permite que el circuito en continua no se sature y define la frecuencia menor del amplificador.

Aplicaciones



PRESION

- Hidráulica
- Neumática
- Automoción



ACELERACIÓN ($q=kF=kma$)

- Motores
- Turbinas
- Máquinas heramientas
- Puentes

© PCB Piezotronics

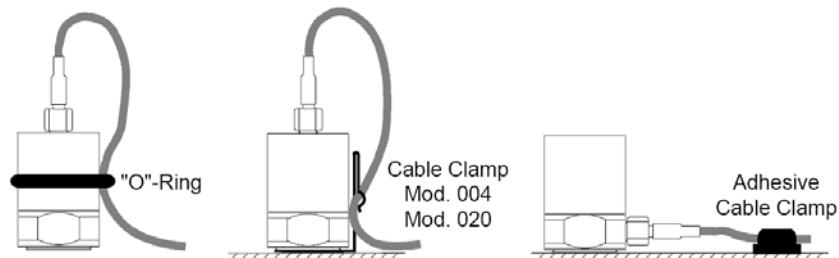
29

Los sensores piezoeléctricos se utilizan para la medida dinámica de fuerzas, presiones y aceleraciones. También propiedades derivadas de la aceleración como vibraciones o impactos.

El tipo de sensor de presión a seleccionar depende, en primer lugar, del tipo de medida de presión que deseemos realizar:

- **Absoluta:** presión en un determinado punto de un medio respecto del cero absoluto de presión que supone el vacío perfecto. Una medida de este tipo es la de la presión atmosférica que determina, para un determinado lugar, el valor de esta magnitud respecto del vacío perfecto.
- **Diferencial:** diferencia de presión entre dos puntos determinados. Un caso muy típico es el de la pérdida de presión en una línea de fluido que circule por una tubería.
- **Relativa** (*gauge pressure* o *gage pressure*): diferencia de presión que existe entre un determinado punto y la presión atmosférica. Quizá la medida más conocida de presión relativa es la medida de la presión sanguínea (la popular tensión).

Cableado

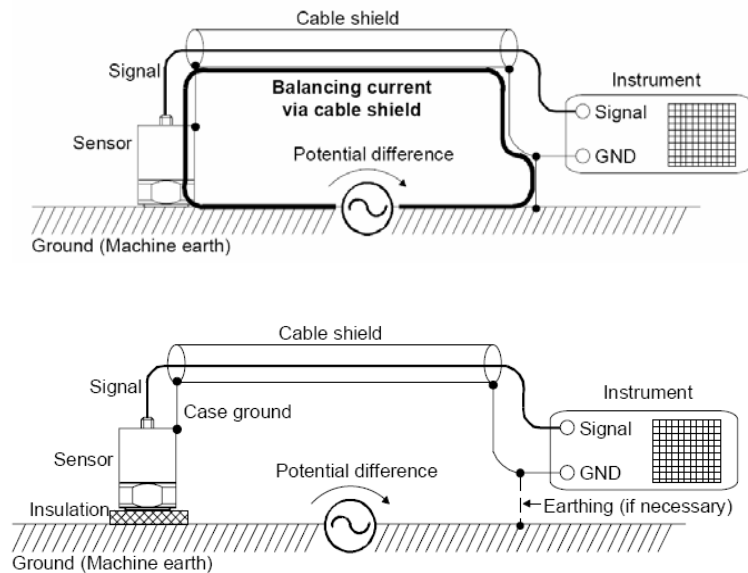


La longitud del cable no debe exceder los 10 m.

El cable introduce un factor que reduce la sensibilidad del sistema a medida que se incrementa la longitud; como quiera que los valores de sensibilidad de estos sistemas – como la de la mayoría de los sensores generadores de señal – no es muy alta, la longitud del cable debe ser minimizada para conseguir reducir la capacidad del cable.

Cuando el sensor piezoeléctrico se usa para medir vibraciones, el cable debe sujetarse firmemente para evitar la introducción de ruido en la conexión (efecto triboeléctrico) lo que es especialmente importante en caminos de alta impedancia. En la figura se muestra la forma típica de sujeción del cable de estos sensores mediante una grapa o un adhesivo.

Aislamiento

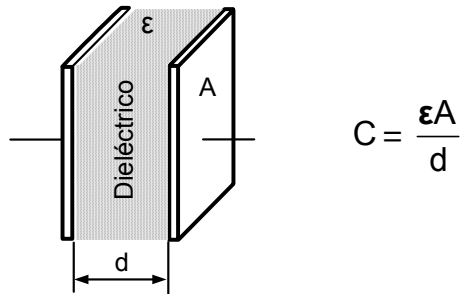


31

La fuente de error más típica son los bucles de masa que se forman debido a la diferencia de potencial entre las referencias de masa del sensor y del instrumento de medida. Esto puede dar lugar a la circulación de corrientes a través de la pantalla del cable del sensor. La consecuencia de ello es una caída de tensión que añade como una componente de error a la señal del sensor a la entrada del instrumento. Estas señales tienen una fuerte componente de 50 o 100 Hz.

Por esta razón el camino de corriente entre el montaje del sensor y el instrumento debe ser interrumpido como se muestra en la figura inferior.

9.5 Sensores capacitivos



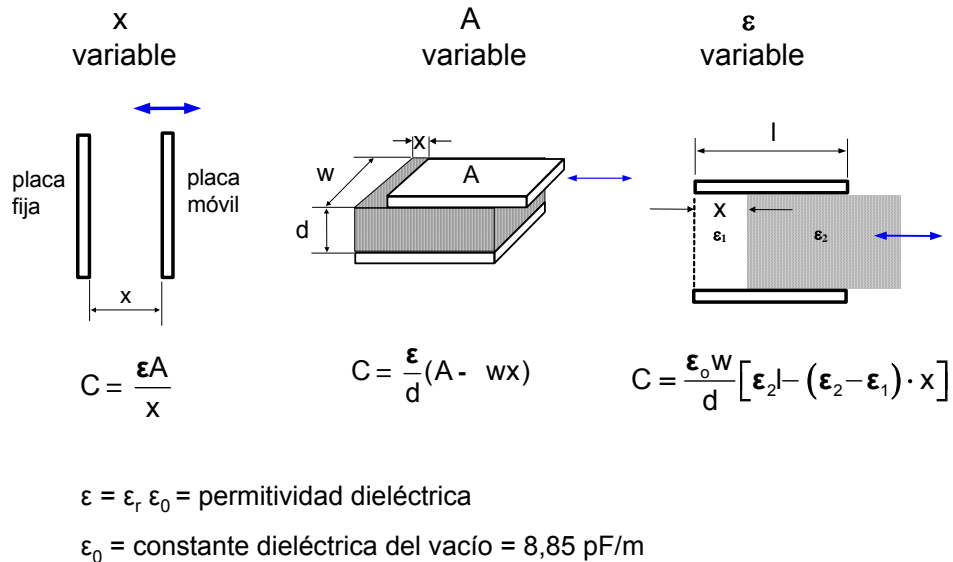
- Se detecta la variación de la capacidad de un condensador

32

Los sensores capacitivos están basados en la variación de la capacidad entre dos o más conductores entre los que se encuentra un dieléctrico, en respuesta a la variación de alguna magnitud física. Aunque las aplicaciones más conocidas están asociadas con medida de movimiento lineal y angular, los sensores capacitivos se emplean también para la medida de humedad, presión, nivel, aceleración, etc. Las principales características que presentan son:

- Permiten detectar muy pequeños desplazamientos (hasta 10^{-10} mm).
- Son fácilmente integrables en un chip de silicio.
- No se ven afectados por la temperatura o el alineamiento mecánico.
- Son muy estables en entornos hostiles.
- Tienen muy bajo consumo.

Condensador de placas paralelas

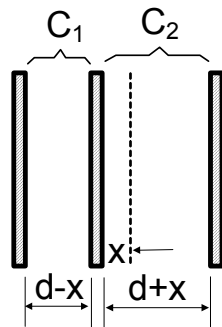


33

En el caso de un condensador de placas paralelas simple, el valor de la capacidad puede verse alterada variando la distancia entre placas (x), el área de las mismas (A) o el tipo de dieléctrico (ϵ).

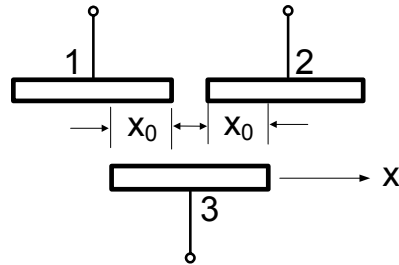
Cuando el parámetro que varía es la distancia entre placas la capacidad no es lineal con respecto a la distancia entre placas, en cambio, sí lo es la impedancia. Si lo que varíe sea el área de las placas o el material dieléctrico, la figura muestra los resultados que se obtienen. En ambos casos la capacidad varía linealmente con el desplazamiento de la placa, con lo que, desde el punto de vista de la linealidad, se puede medir directamente bien su capacidad o la admitancia correspondiente. Una aplicación típica del sensor capacitivo basado en la variación del área es la medida de desplazamientos angulares, mientras la variación de la constante dieléctrica puede utilizarse para medir el nivel de un fluido en un tanque.

Condensador diferencial



$$C_1 = \frac{\epsilon A}{d-x}; \quad C_2 = \frac{\epsilon A}{d-x}$$

$$C_1 - C_2 = \frac{2\epsilon A}{d^2 - x^2} \times x \approx \frac{2\epsilon A}{d^2} \times x$$



$$C_1 = \frac{\epsilon}{d} w(x_0 - x); \quad C_2 = \frac{\epsilon}{d} w(x_0 + x)$$

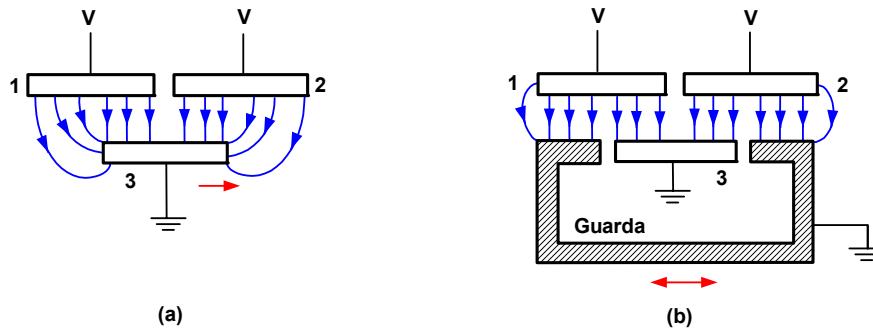
$$C_1 - C_2 = -\frac{2\epsilon}{d} \times x$$

34

Se denomina **condensador diferencial** al formado por tres placas planas paralelas. En general, las placas exteriores suelen ser fijas y la placa central móvil, en respuesta a la variable a detectar. Vemos cómo, a pesar de que C_1 y C_2 son no lineales, se logra obtener una salida lineal realizando una medida diferencial y con una sensibilidad mayor que en el caso del condensador simple. Aplicaciones típicas de esta configuración son los micrómetros, acelerómetros e inclinómetros.

Si se disponen las tres placas del condensador diferencial cómo se muestra en la figura derecha y se varía el área entre placas, se tiene que la medida diferencial de la capacidad nos permite obtener una salida lineal con el desplazamiento. Con esta técnica se han llegado a medir desplazamientos de hasta 10^{-10} mm.

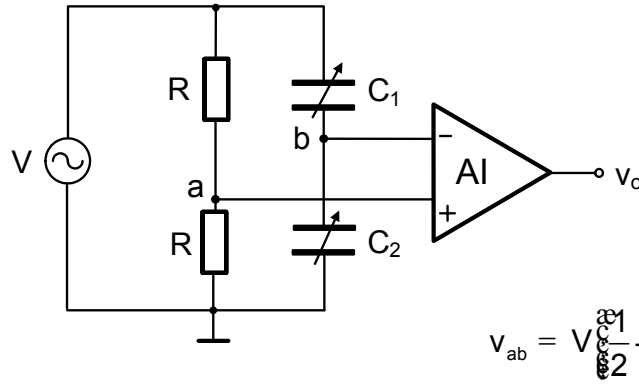
Electrodo de guarda



35

Aunque se ha mejorado en linealidad, el condensador diferencial no está exento de problemas: dispersión del campo eléctrico en los bordes de los electrodos, aislamiento entre placas, capacidades parásitas, cables de conexión, etc. La dispersión del campo en los bordes de los electrodos puede apreciarse mejor en la figura a. Para evitar este efecto, en la figura b se ha colocado un **electrodo de guarda** rodeando al electrodo 3. Este electrodo de guarda se mueve junto al electrodo 3 y está puesto a su mismo potencial. Ahora, las líneas de campo aparecen distorsionadas en el borde de la guarda, lo cual no importa ya que no es un electrodo de medida. En cambio el campo sí es uniforme en los electrodos de medida. El electrodo de guarda protege simultáneamente al electrodo 3 de campos externos que puedan afectar a la linealidad de la medida.

Acondicionamiento



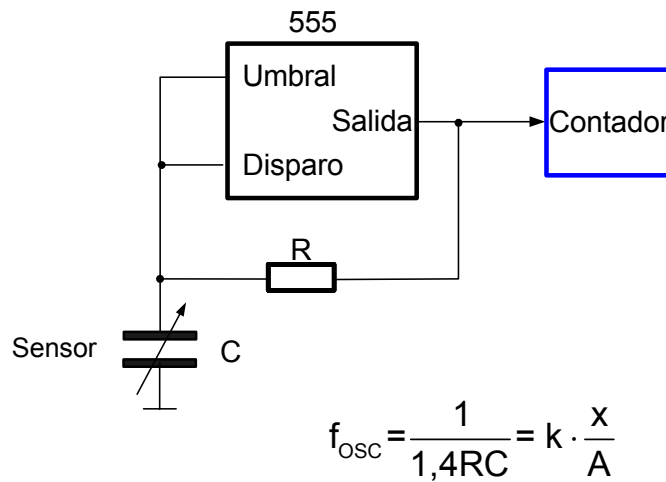
$$v_{ab} = V \frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}}$$

Si C_1 y C_2 son condensadores diferenciales: $V_{ab} = V \frac{x}{2d}$

Los cambios en la capacidad de los sensores capacitivos pueden ser medidos empleando puentes de alterna. La figura muestra el caso de un puente en el que se disponen los condensadores C_1 y C_2 en ramas adyacentes, estando ocupadas las otras dos ramas por resistencias de igual valor. Si la salida del puente se detecta con un circuito de alta impedancia de entrada (p.e. mediante un amplificador de instrumentación), la relación entre la salida del puente y el desplazamiento es lineal. La estructura en puente aporta una ventaja adicional, ya que cualquier cambio que se produzca de forma simultánea en las ramas adyacentes (por ejemplo, interferencias externas, derivas térmicas, etc.) se cancela.

La señal de excitación suele ser senoidal ya que produce menos EMI y da lugar a menores limitaciones en el slew rate del amplificador. Se requiere que tenga una gran estabilidad. Se puede generar a partir de un cristal de cuarzo y un filtro. La frecuencia no suele ser inferior a 100 kHz.

Acondicionamiento



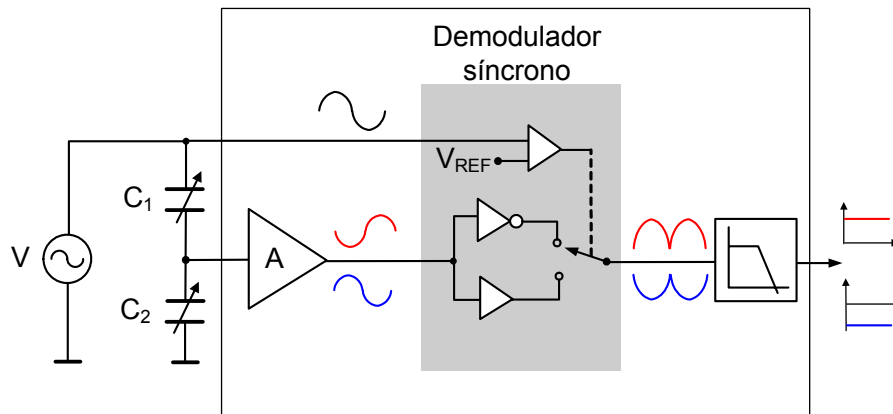
37

En muchas ocasiones el sensor capacitivo forma parte de un circuito oscilador, en el que las variaciones en la capacidad provocan una variación en la frecuencia de oscilación. Existen diferentes soluciones para implementar el circuito oscilador. La figura muestra un oscilador RC, con ciclo de trabajo del 50%, a base del CI 555 en su versión CMOS de bajo consumo.

Si el condensador varía su distancia entre placas, la frecuencia de oscilación del circuito será proporcional a dicha distancia y la salida del sensor será lineal si se cuenta el número de pulsos del oscilador. Si lo que varía es el área de las placas, la salida se linealizará midiendo la duración de los pulsos.

Éste circuito no está exento de problemas. Por un lado, la capacidad parásita del cable de conexión del condensador se añade a la capacidad de medida, reduciendo la sensibilidad. Otro inconveniente se debe a la resistencia R de valor fijo que interviene en la medida de la capacidad. Su estabilidad y coeficiente de temperatura pueden no ser lo suficiente buenos, afectando también a la medida. Estos problemas se pueden reducir empleando el circuito demodulador síncrono que se presenta a continuación.

Demodulador síncrono

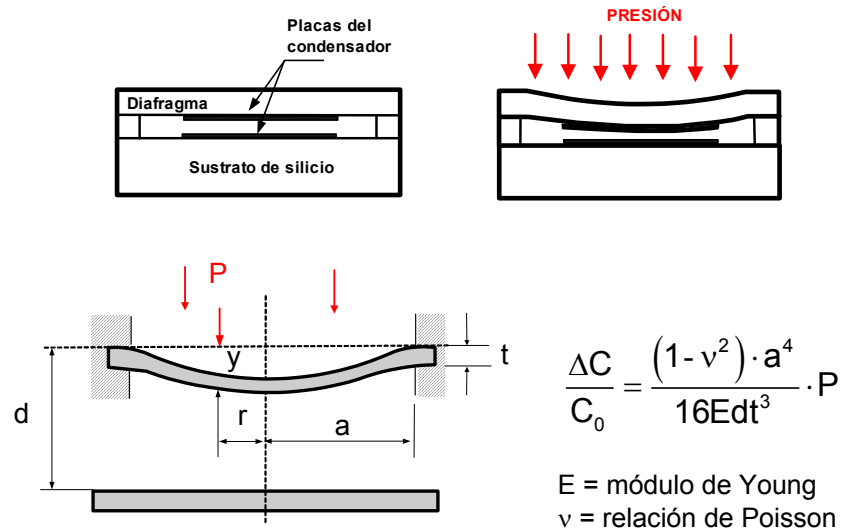


38

Este método es el que permite medir la capacidad con mayor flexibilidad y precisión. La figura muestra su esquema básico. El demodulador síncrono se comporta en esencia cómo un rectificador de doble onda, realizando dicha rectificación en sincronismo con la señal de excitación o de sincronismo del circuito. Así, durante el primer semiciclo, el valor de la señal de excitación es superior a una referencia y el demodulador funciona cómo un rectificador inversor. Durante el segundo semiciclo, la señal de excitación es inferior a la referencia y el demodulador funciona cómo un seguidor de tensión, de forma que la entrada al demodulador aparece en la salida con ganancia unidad. En la figura se muestra lo que ocurre en el demodulador con diferentes colores, dependiendo del sentido de desplazamiento que se tenga en el condensador.

El filtro paso bajo elimina la frecuencia de la portadora y otros armónicos de orden superior produciendo una salida libre de rizado. La amplitud de la señal rectificada y filtrada informa de la magnitud del desplazamiento, mientras que la polaridad informa del sentido del desplazamiento. Dependiendo de la configuración del amplificador se puede linealizar bien la capacidad o la impedancia. Existen circuitos comerciales cómo el NE5521 de Philips o el AD698 de Analog Devices que integran oscilador, amplificador, demodulador y filtro.

Sensor de presión

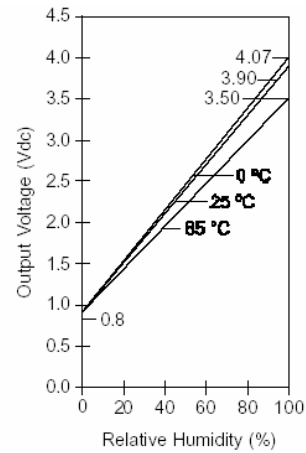
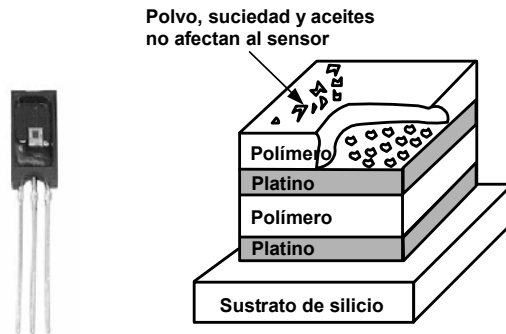


39

El elemento sensor capacitivo está compuesto por un diafragma cerámico, de forma que cuando la presión aumenta, el diafragma se flexiona, variando la distancia entre las placas del condensador. Cambiando el espesor del diafragma en el proceso de fabricación, se pueden llegar a medir presiones entre 7,5 y 10000 psi.

El papel que juega el silicio en la fabricación de los sensores capacitivos no siempre es el mismo: en unos casos se aprovecharán sus excelentes propiedades elásticas y de estabilidad para detectar una determinada magnitud física, mientras que, en otros casos, el silicio únicamente servirá como un sustrato, siendo necesario añadir finas capas de otros materiales para producir el efecto deseado.

Sensor de humedad



$$V_O = V_{CC}[0,0063x(\%HR)+0,16]$$

© Honeywell (HIH-3610)

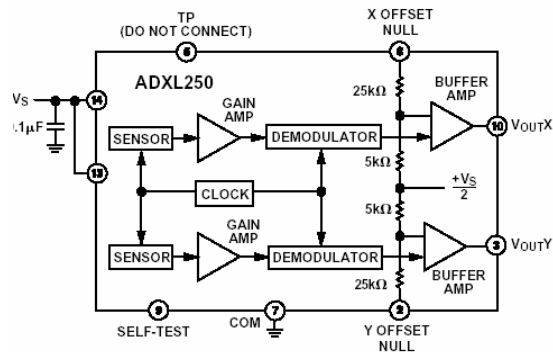
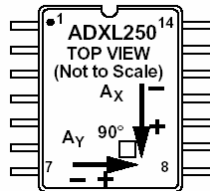
40

Los sensores capacitivos de humedad relativa se usan en numerosas aplicaciones industriales. Por ejemplo, es necesario controlar la humedad en la industria textil, maderera, alimentación, fabricación de papel, almacenaje, etc.

Existen muchos tipos y variantes de sensores de humedad, según sea la composición de las placas del condensador, el material del dieléctrico y el sustrato. El dieléctrico puede ser un óxido de aluminio, silicio poroso o un material polímero. El sustrato es normalmente de cristal, cerámico o silicio. La figura muestra la estructura de un sensor de humedad en el que el dieléctrico es un material polímero y el sustrato es de silicio. El material polímero tiene la habilidad de absorber moléculas de agua lo cual se traduce en un cambio en la permitividad dieléctrica del condensador. El cambio incremental en la permitividad dieléctrica de un sensor de humedad capacitivo es proporcional a la humedad relativa del entorno que le rodea

Una característica importante es su estabilidad química ya que en algunas aplicaciones, el vapor de agua contiene contaminantes (p.e. CO) o bien la medida de humedad se realiza en una muestra de gas en lugar de aire. En estos casos, si el dieléctrico es silicio, las características del sensor no se ven afectadas por dichos gases.

Sensor de aceleración



- Margen de medida: $\pm 5 - \pm 50g$
- Error de linealidad: 0,2% FS
- Sensibilidad: 33 mV/g ($V_s=5V$)

$$V_0 = \frac{V_s}{2} - \left(\text{Sensibilidad} - \frac{V_s}{5V} \cdot a \right)$$

© Analog Devices

41

La medida de aceleración está basada en la ley de Hook: $F = kx$ y en la segunda ley de Newton: $F=ma$. Igualando ambas expresiones, tenemos que: $a=kx/m$, con lo que la medida de la aceleración se convierte en la medida de un desplazamiento.

Los acelerómetros se usan para medir no sólo aceleración sino también otras magnitudes derivadas de ella como inclinación, fuerzas inerciales, choques y vibraciones en aplicaciones de automoción (*airbag*), medicina, control industrial, etc. Las últimas técnicas de micro-mecanizado superficial junto con tecnologías CMOS de fabricación de circuitos integrados permiten integrar en el mismo chip toda la circuitería de procesamiento de la señal, resultando un dispositivo de altas prestaciones y de coste razonable.

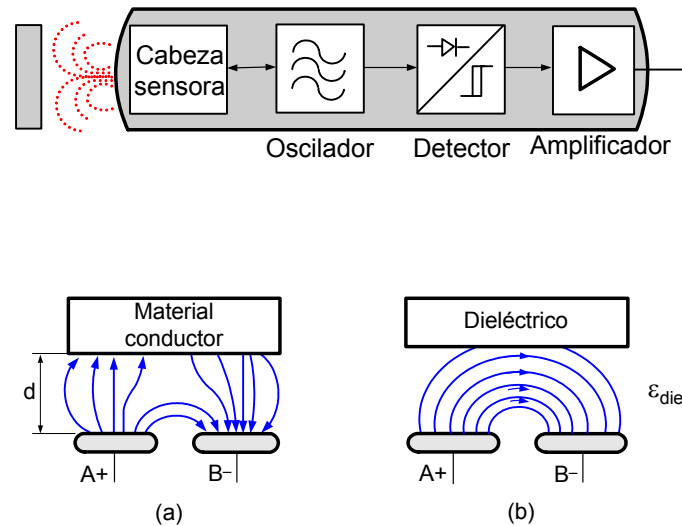
Un ejemplo de microacelerómetro capacitivo es el ADXL250 de Analog Devices. La figura muestra su diagrama de bloques. Las características más significativas son:

- Margen de medida: ± 5 y $\pm 50g$
- Error de linealidad: 0,2% del fondo de escala
- Sensibilidad: 33 mV/g para una $V_s = 5 V$.

Acelerómetros

Tipo	Ventajas	Desventajas
Piezoeléctrico	<ul style="list-style-type: none">• No funcionan en cc• Uso complejo• Bajas temperaturas	<ul style="list-style-type: none">• Vibración• Impacto• Uso industrial
Piezoresistivo	<ul style="list-style-type: none">• Medidas estáticas	<ul style="list-style-type: none">• Resolución limitada• Requiere alimentación• Bajas y medias frecuencias
Capacitivo	<ul style="list-style-type: none">• Funcionan en cc y ca• Baratos• Baja resolución• Frágiles	<ul style="list-style-type: none">• Uso general• Uso industrial

Detector de proximidad



43

Una de las principales aplicaciones de los sensores capacitivos son los detectores de proximidad. Detectan la presencia de objetos próximos, tanto metálicos como no metálicos, y la señalizan mediante una salida del tipo todo-nada.

La cabeza sensora contiene como mínimo, un par de electrodos que constituyen las placas de un condensador abierto. Estos electrodos están situados en el lazo de realimentación de un oscilador de alta frecuencia. Cuando no se tiene presente un objeto, la capacidad del sensor es baja y, por tanto, la amplitud de la oscilación es baja. Cuando el objeto se aproxima a la cabeza sensora se incrementa la capacidad y, con ello, la amplitud de la oscilación, provocando la conmutación del circuito de salida del detector.

Si el objeto es conductor se formará un condensador entre el objeto y la cara activa del sensor, de forma que cuando el objeto se acerca se incrementa la capacidad. Si el objeto no es metálico (sólido o líquido), actúa como un aislante entre los electrodos A y B. En este caso, al aproximarse al detector, lo que ocurre es un incremento de la permitividad dieléctrica del medio y, por tanto, de la capacidad. Recordemos que todos los líquidos y sólidos no conductores tienen una permitividad dieléctrica relativa mayor que la del aire.

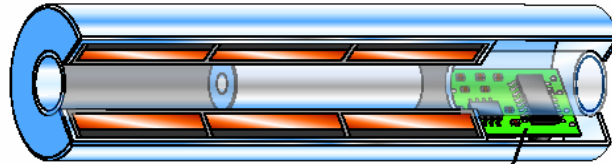
Características

- Detección de sólidos o líquidos.
- Larga vida útil ya que no tiene desgaste.
- Múltiples configuraciones de montaje.
- Distancias cortas (2,5 cm o menos), según material.
- Muy sensibles a factores ambientales.

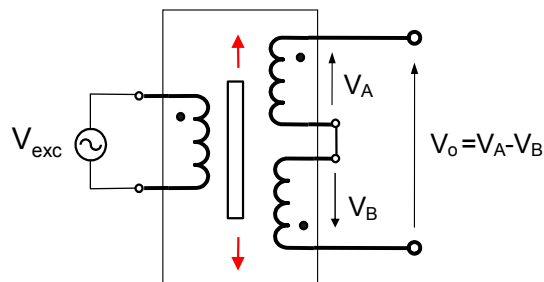
Comercialmente se encuentran en forma cilíndrica (lisa o roscada) con el cuerpo metálico o plástico y en forma rectangular con la cabeza sensora orientable.

Se encuentran presentes en una gran variedad de aplicaciones industriales: control de nivel de líquidos, inspección de paquetes, detección de rotura de cables, detección de nivel en productos de alimentación, detección de pequeños elementos metálicos, etc.

9.6 Sensores inductivos



© Macrosensors



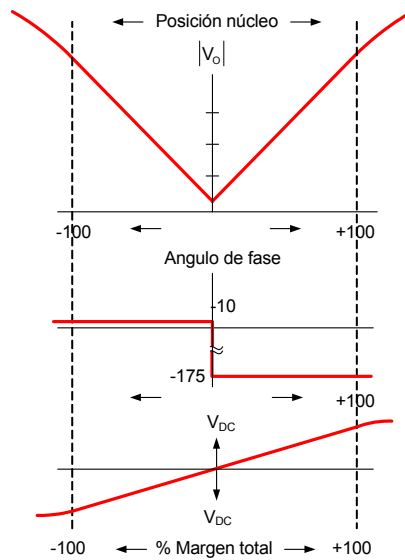
45

El transformador diferencial lineal (LVDT) es un transductor electromecánico cuya entrada es el desplazamiento mecánico de un núcleo y la salida una tensión ac proporcional a la posición del núcleo.

Los LVDT puede medir desplazamiento desde $\pm 100\mu\text{m}$ hasta $\pm 25\text{ cm}$. Ofrece buena exactitud, linealidad, sensibilidad, resolución infinita así como funcionamiento sin fricción. La tensión de excitación típicamente varía entre 2 V y 24 V_{rms} y la frecuencia entre 20 Hz y 20 kHz .

Cuando el devanado primario es energizado por una fuente ac externa, se inducen tensiones en las dos bobinas secundarias. Estas bobinas están conectadas en serie-oposición de forma que las dos tensiones tienen polaridad opuesta. La salida es la diferencia entre estas dos tensiones, y será nula cuando el núcleo se encuentre en la posición central.

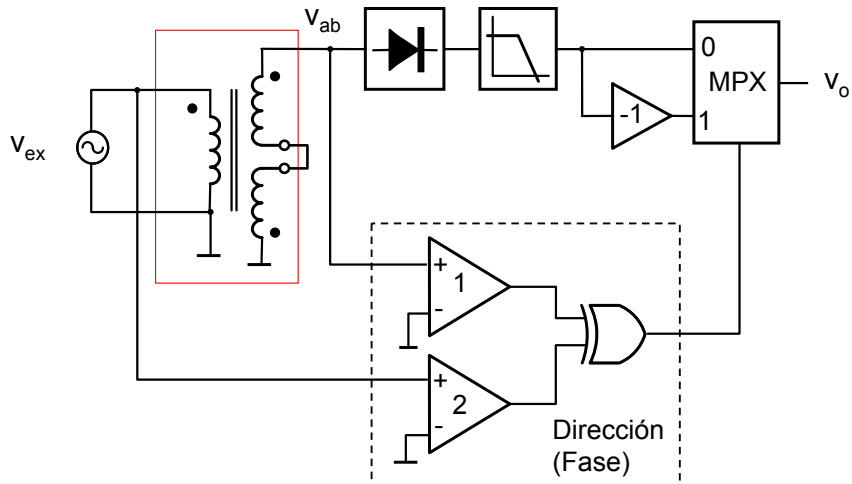
Características de salida



46

Si el núcleo se desplaza la tensión inducida se incrementará en el sentido del movimiento y disminuirá en el sentido contrario. Esto da lugar a una tensión diferencial que varía linealmente con los cambios en la posición del núcleo. La fase de la tensión de salida cambia bruscamente en 180° cuando el núcleo se mueve desde la posición central de un sentido a otro, por lo que midiendo la fase de la salida podemos detectar la dirección del movimiento.

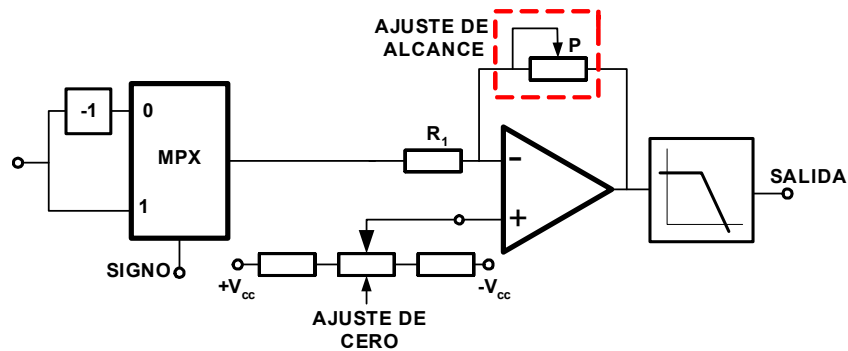
Acondicionamiento



47

La figura muestra el esquema básico de un circuito de acondicionamiento realizado con componentes discretos. En los comparadores 1 y 2 se obtiene una señal cuadrada con la misma fase que v_{ab} y v_{exc} , respectivamente. Si las fases son iguales la puerta EXOR proporciona una salida a nivel bajo y se selecciona el canal 0 del multiplexor analógico (MPX); si por el contrario, las señales están desfasadas 180° , la salida de la puerta estará a nivel lógico alto y el canal seleccionado en el MPX es el 1. Al canal 0 del MPX se llevará el valor medio de la señal (para ello se habrá rectificado y filtrado) y, al canal 1, ese mismo valor pero multiplicado por -1, es decir, con el mismo valor absoluto pero de signo contrario.

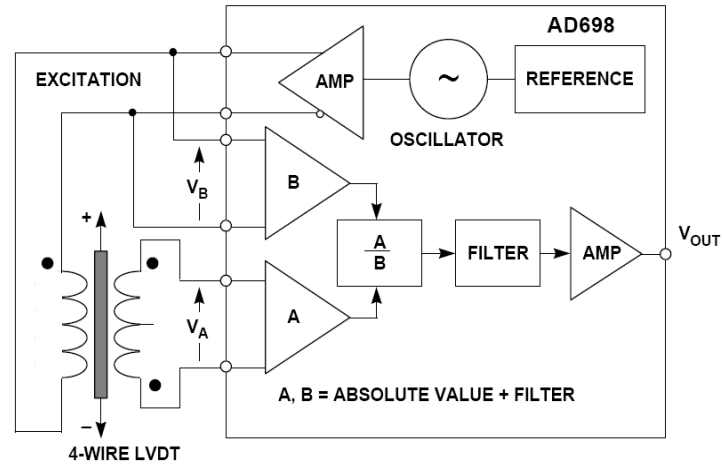
Ajustes



48

Para garantizar la independencia de los ajustes de cero y valor máximo (alcance) del sistema se pueden incluir una etapa adicional en el sistema de amplificación y *offset* situada detrás del multiplexor e inmediatamente antes del filtro. Un pequeño amplificador con ganancia ajustable y nivel de continua variable puede fijar el valor de salida para el punto central (0 V) y para uno de los extremos de medida ($+V_{m\acute{a}x}$ o $-V_{m\acute{a}x}$); el sistema a utilizar puede ser como el de la figura. Obsérvese que dada la ganancia negativa de la etapa de amplificación, los signos de la salida estarán cambiados respecto de los de la figura anterior.

Ejemplo: AD698

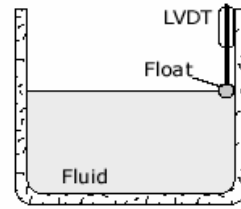
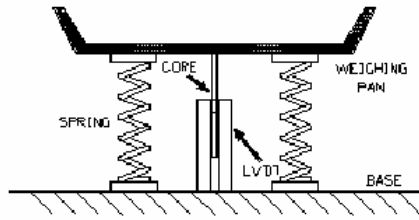


49

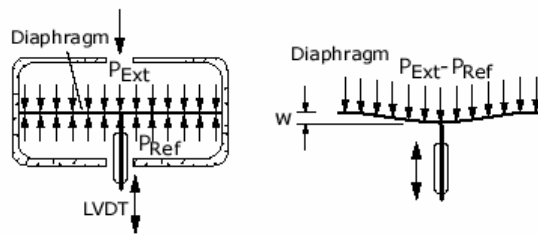
Existen CI específicos para realizar el acondicionamiento del LVDT como el NE5521 de Philips o el AD698 de Analog Devices. La figura muestra el diagrama de bloques del AD698. Decodifica la señal del LVDT mediante una demodulación síncrona de la entrada modulada en amplitud, A, y una referencia fija, B. Calcula el cociente entre la salida del LVDT y la entrada de excitación con objeto de cancelar las derivas en la amplitud del oscilador.

A partir de la hoja de datos del fabricante se puede ver como seleccionar los componentes externos para obtener la frecuencia y amplitud del oscilador, tensión de fondo de escala y características adicionales como el ajuste del offset.

Aplicaciones

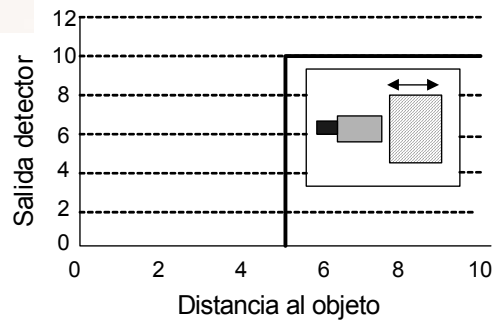


Fluid Level Gage



Diaphragm Pressure Gage

Detector de proximidad



51

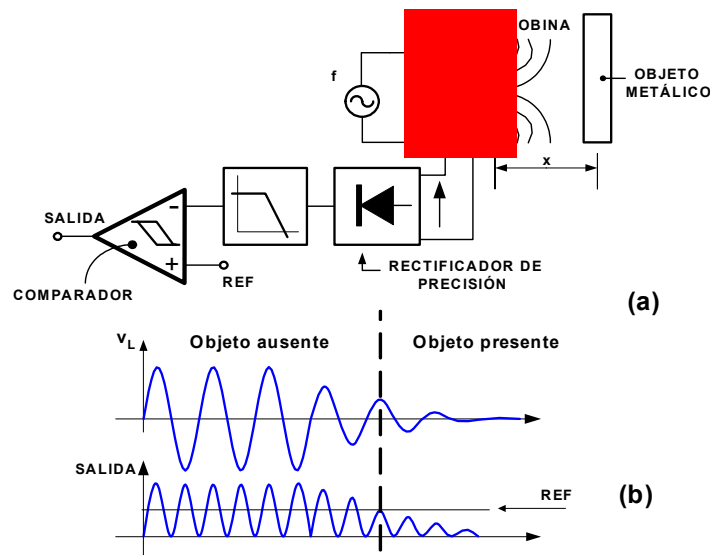
Los detectores de proximidad inductivos son muy empleados en aplicaciones industriales para la detección de objetos metálicos. Las principales ventajas que tienen son:

- No le afecta la humedad.
- No le afectan los entornos contaminados o sucios.
- No tienen partes móviles ni mecánicas.
- No tiene zonas ciegas.

Por el contrario:

- Solo detecta la presencia de objetos metálicos.
- Distancia de detección pequeña (< 70 mm).
- Pueden ser afectados por campos electromagnéticos fuertes.

Principio de funcionamiento



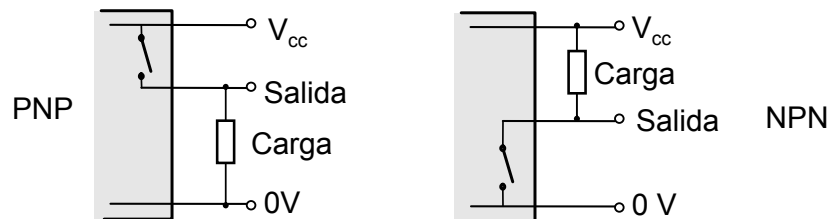
52

Su principio de funcionamiento consiste en un oscilador cuya salida se aplica a una bobina de núcleo abierto capaz de generar un campo electromagnético en sus proximidades; la presencia de objetos metálicos en la zona modificaría el campo y se manifestaría algún cambio en las magnitudes eléctricas de la bobina. Los cambios pueden detectarse y conseguir, así, saber si existe o no un objeto metálico dentro del radio de acción del sistema.

Un caso particular de este sistema es el principio ECKO (*Eddy Current Killed Oscillator*) de la figura. La fuente estabilizada de alterna produce una señal a frecuencia f , a la que está sintonizado el circuito LC, cuya bobina es de núcleo abierto y produce campo magnético en las proximidades. En presencia de un objeto metálico, las corrientes de *Eddy* que se producen en el objeto provocan una carga adicional en la bobina, que es mayor en la medida que el objeto está más próximo. Esta carga produce una caída de la señal en la propia bobina que puede detectarse midiendo la tensión en ella y comparándola con una referencia. Por debajo de esa referencia, se considerará que hay un objeto metálico próximo y, por encima, se considerará que no.

Especificaciones

- Distancia nominal de detección: <70 mm
- Alimentación: DC (24 V) ó AC (220 V)
- Tipo de salida: NPN o PNP
- Grado de protección: IP 65, IP 67, IP 68



53

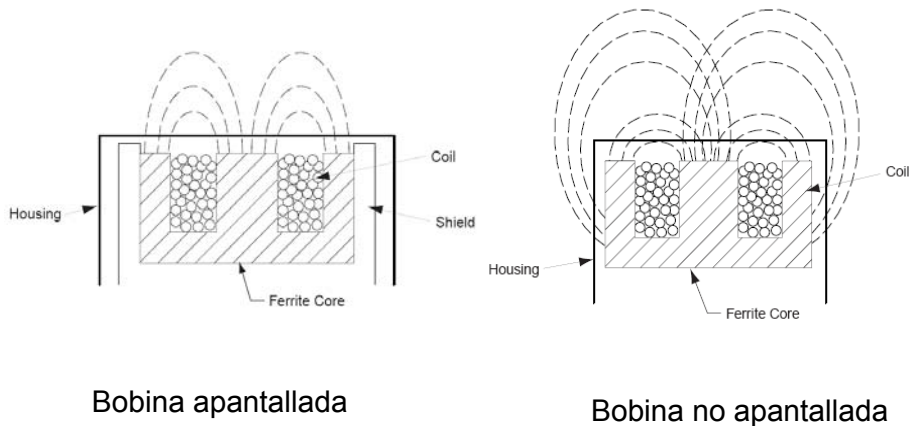
La distancia nominal de detección depende del diámetro del sensor y de si la bobina está o no apantallada.

El tipo de salida puede ser PNP (la carga ha de conectarse entre la salida del sensor y el terminal negativo) o NPN (la carga ha de conectarse entre la salida del sensor y el terminal positivo).

El grado de protección de los sensores de proximidad puede ser:

- IP65: protección frente a polvo y líquido.
- IP67: protección frente a inmersión en agua (1 m de agua durante un mínimo de 30 minutos).
- IP68: protección frente a inmersión continuada en agua

Bobina apantallada



54

El uso de estos sensores es realmente sencillo pero, para optimizar su aplicación, será conveniente tener en cuenta:

a) La presencia de una bobina apantallada o no apantallada modifica la distribución del campo, ocasionando un cambio en la distancia de detección del sistema. El apantallamiento reduce la distancia de detección.

Material del objeto

Material del objeto	Factor de corrección	
	Bobina apantallada	Bobina no apantallada
Cobre	0,30	0,40
Aluminio	0,35	0,45
Latón	0,40	0,50
Acero inox.	0,70	0,80
Lámina Al	0,90	1,00
Acero	1,00	1,00

b) El material del objeto. El material del objeto es importante porque las corrientes inducidas pueden ser más o menos grandes en función de él y, como consecuencia, lo será su influencia sobre el circuito resonante. En la tabla se indican una serie de factores de corrección de la distancia de alcance en función del material.

Tamaño del objeto

S_{obj}/S_{st}	Factor de corrección	
	Bobina apantallada	Bobina no apantallada
0,25	0,56	0,50
0,50	0,83	0,73
0,75	0,92	0,90
1,00	1,00	1,00

S_{obj} =superficie del objeto a detectar

S_{st} =superficie del objeto estándar

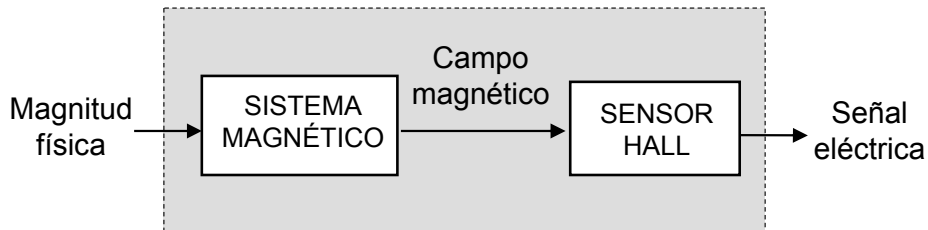
c) El tamaño del objeto. Los fabricantes proporcionan los datos de alcance de sus sensores para un objeto estándar. Si el objeto a detectar tiene un tamaño igual o superior que el objeto estándar no se requiere una corrección del alcance. Sin embargo un objeto más pequeño que el estándar reducirá el alcance.

Como guía para saber cómo se modifica el alcance en función del tamaño del objeto, se puede utilizar la tabla de la figura, donde, S_{obj} es la superficie del objeto y S_{st} es la superficie del objeto estándar. Como se puede observar, la bobina apantallada presenta una menor influencia del tamaño del objeto a detectar.

Comparación detectores de proximidad

Tipo	Inductivo	Capacitivo	Fotoeléctrico
Detecta:	Todo tipo de metales	Aislantes sólidos Líquidos Pulverulentos	Todo tipo de materiales
Aplicaciones más frecuentes	Pequeña distancia Final de carrera Topes	Líquidos en un recipiente aislante	Seguridad Contaje a cualquier distancia
Aspecto más positivo	Robustez Fiabilidad	Sensibilidad Detección de niveles	Grandes distancias Pequeño tamaño
Aspecto más crítico	Viruta metálica Campos magnéticos	Ambiente crítico Ajuste	Polvo; limpieza frecuente

9.6 Sensores basados en el efecto Hall



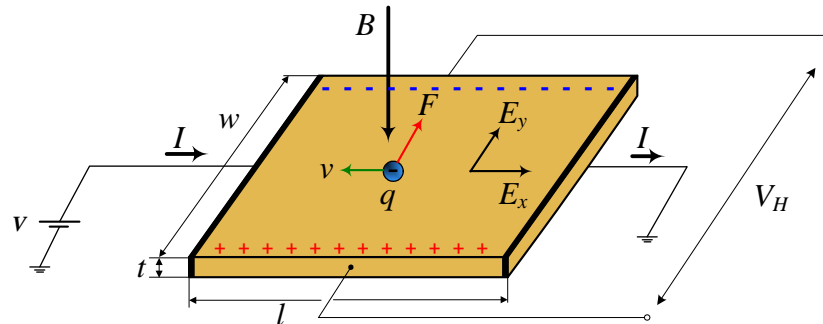
58

Los sensores magnéticos detectan una variación en el campo magnético en respuesta a la variación de alguna magnitud física. Están basados en el efecto Hall, por lo que se conocen también como **sensores de efecto Hall**. Se caracterizan principalmente por:

- Dispositivos de estado sólido
- No tienen partes móviles
- Compatibilidad con otros circuitos analógicos y digitales
- Margen de temperatura amplio
- Buena repetibilidad
- Frecuencia de funcionamiento relativamente alta (100 kHz).

Se utilizan principalmente como sensores de posición, velocidad y corriente eléctrica.

El efecto Hall



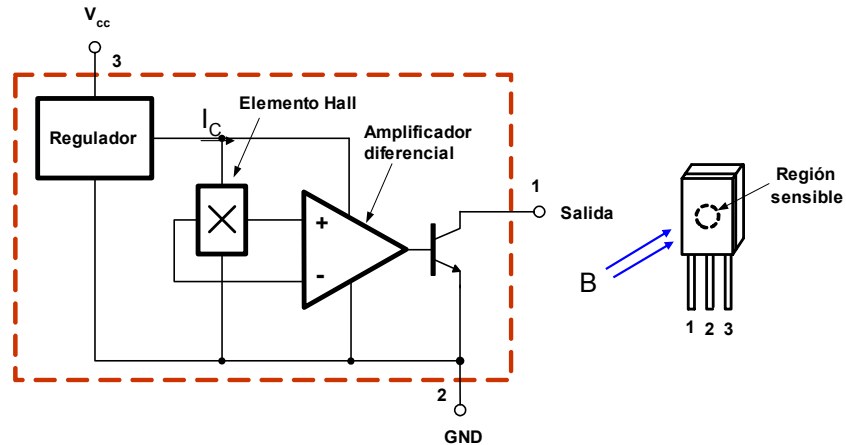
$$\text{Tensión Hall: } V_H = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{t} \text{ (}\mu\text{V)}; \quad R_H = \text{constante Hall}$$

59

La figura muestra una fina lámina de material semiconductor (elemento Hall) de espesor t , a través de la cual circula una corriente eléctrica de control I . En ausencia de campo magnético, la distribución de la corriente es uniforme y no se tiene una diferencia de potencial en los terminales de salida. En cambio, en presencia de un campo magnético de densidad B , los electrones se ven sometidos a una fuerza de Lorentz resultando una diferencia de potencial en la salida V_H denominada **tensión Hall**, cuyo valor es proporcional a la corriente y al campo magnético.

El campo eléctrico E_x da lugar a la circulación de una corriente I . Suponiendo que la lámina es de un metal o de un semiconductor tipo n (los portadores de carga mayoritarios son electrones), la carga q se ve sometida a una fuerza electromagnética: $F = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ que obliga a la carga a desplazarse hacia la parte superior de la lámina, quedando polarizada negativamente y parte inferior positivamente. Esta separación de cargas produce un campo electrostático E_y y una fuerza electrostática $F' = qE_y$ que se opone a F . Cuando F y F' están en equilibrio los portadores de carga se mueven paralelos a E_x como en ausencia de campo magnético.

Sensor Hall de salida lineal



60

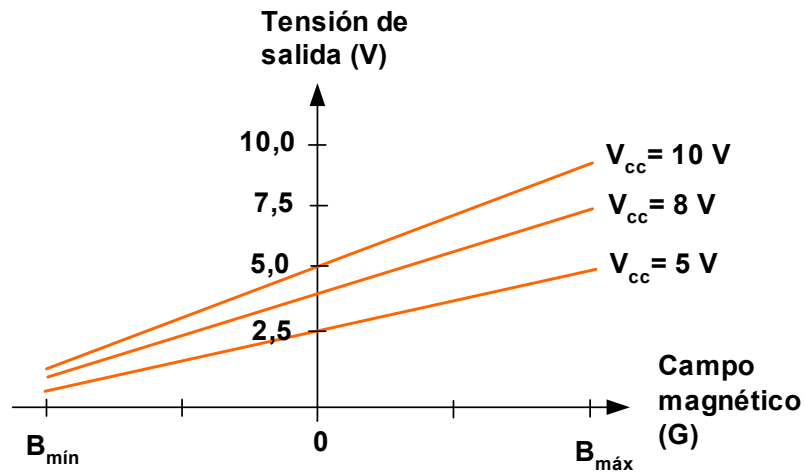
Atendiendo al tipo de salida, los sensores Hall se dividen en dos grupos:

- Sensores Hall de salida lineal.
- Sensores Hall de salida digital (interruptores Hall).

La figura muestra la estructura básica de un sensor Hall de salida lineal. La tensión de salida del elemento Hall requiere un acondicionamiento que consiste básicamente en una etapa de amplificación diferencial, dado que la tensión Hall es de muy bajo nivel ($\approx 30\mu\text{V}/\text{G}$), y una compensación de temperatura. También suelen integrar un regulador de tensión a fin de poder trabajar con amplio margen de tensiones de alimentación y mantener la corriente constante, de forma que la tensión de salida refleje sólo la intensidad del campo magnético.

Para permitir un mejor interfaz con otros dispositivos, a la salida del amplificador diferencial se añade un transistor en emisor abierto, colector abierto o *push-pull*.

Característica de transferencia



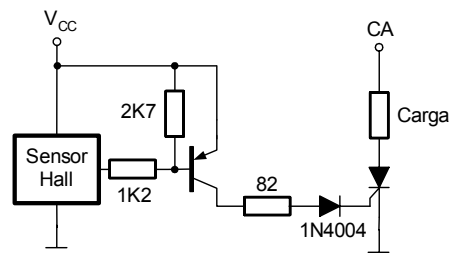
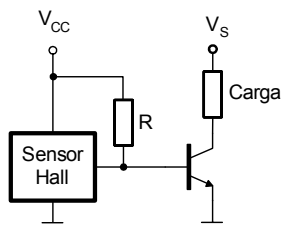
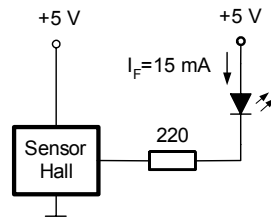
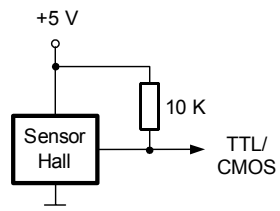
61

El campo magnético medido puede ser positivo o negativo, por lo que la salida del amplificador es una tensión positiva o negativa. Esto requiere disponer, en principio, de fuentes de alimentación tanto positivas como negativas. Para evitar esta situación en el amplificador diferencial se incorpora una tensión de polarización (**null offset**), de forma que con un campo magnético nulo se tenga, en la salida, una tensión positiva.

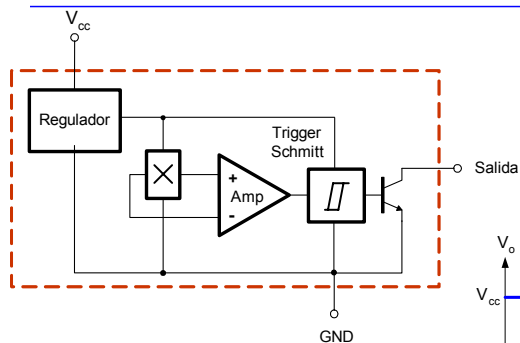
Otras características importantes de los sensores Hall lineales son:

- **Sensibilidad** (mV/G). Es la pendiente de la característica de transferencia. En la mayoría de los sensores Hall lineales la sensibilidad y el *offset* son proporcionales a la tensión de alimentación. Se dice que son sensores **ratimétricos**.
- **Alcance** (*span*). Define el margen de salida del sensor.

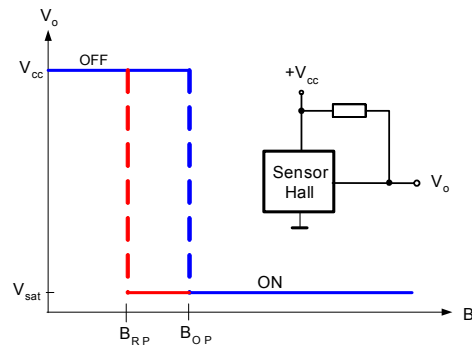
Circuitos de interfaz



Sensor Hall de salida digital



- Si $B > B_{OP}$ el transistor está ON
 $\Rightarrow V_o = V_{sat}$
- Si $B < B_{RP}$ el transistor está OFF
 $\Rightarrow V_o = V_{cc}$



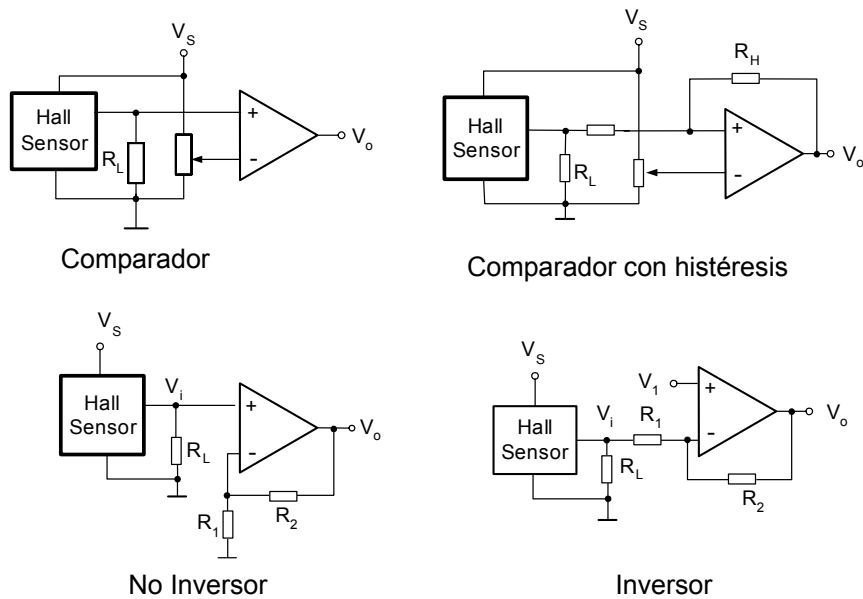
63

Si al sensor lineal añadimos un comparador *Schmitt-Trigger* se obtiene un sensor Hall de salida digital (interruptor Hall), cuyo diagrama de bloques básico se muestra en la figura.

En ausencia de campo magnético, el transistor de salida está cortado (estado "off"). Cuando el campo magnético, perpendicular a la superficie del chip, está por encima de un determinado valor umbral de operación (B_{OP}) el transistor de salida conmuta a saturación (estado "on"), pudiendo conducir corriente.

Si ahora vamos reduciendo el campo magnético, para un valor inferior al punto B_{RP} de la característica (*release point*) el transistor se corta. Para evitar posibles conmutaciones erróneas que se puedan producir en la salida como consecuencia de pequeñas variaciones en la densidad de flujo magnético, el circuito tiene una cierta histéresis (la diferencia entre los puntos OP y RP).

Circuitos de interfaz

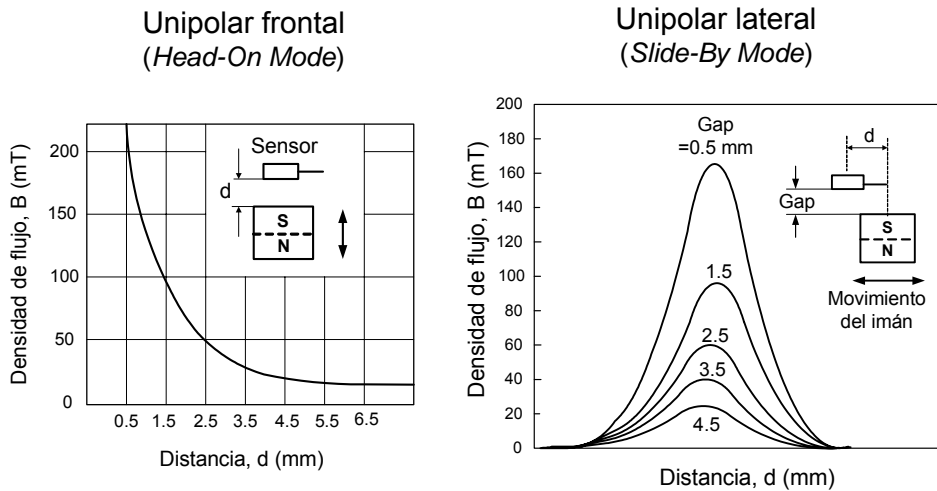


64

La salida de un sensor Hall lineal suele ser una configuración en emisor abierto (fuente de corriente) pudiéndose conectar con facilidad a componentes estándar.

Son bastante frecuentes las aplicaciones donde la salida se lleva a un circuito comparador o a un amplificador. La figura muestra ejemplos de circuitos de interfaz básicos. Empleando un circuito comparador con alimentación simple (por ejemplo el LM339 o equivalente) se puede obtener un interruptor digital con punto de funcionamiento ajustable. La resistencia R_H proporciona la histéresis a los circuitos comparadores.

Configuraciones de medida



65

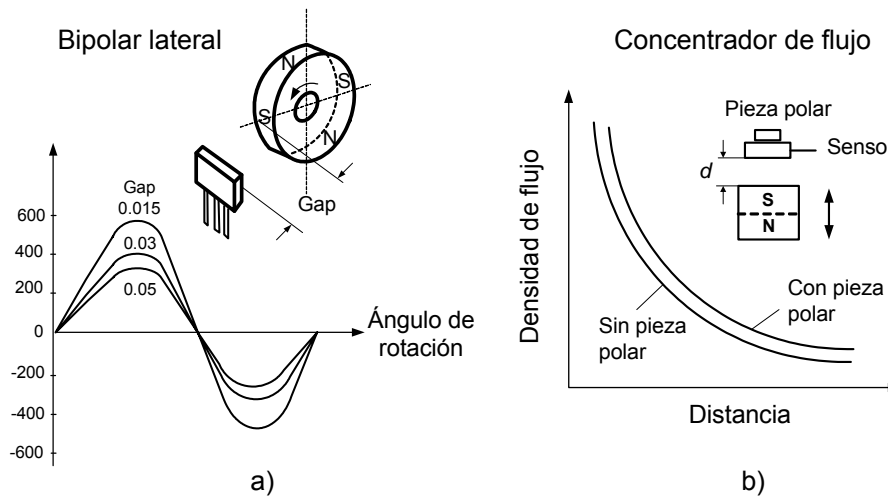
Dado que las características varían con la temperatura y de un sensor a otro, los fabricantes dan unos valores máximos y mínimos de densidad de flujo magnético para la conmutación de la salida del sensor Hall, B_{OP} y B_{RP} respectivamente. Según el valor de B_{OP} y B_{RP} , los interruptores Hall pueden ser:

- **Unipolares:** tanto el valor máximo de B_{OP} como el mínimo de B_{RP} son positivos.
- **Bipolares:** el valor máximo de B_{OP} es positivo y el mínimo de B_{RP} negativo. Si el estado de la salida se mantiene en ausencia de campo magnético el sensor se denomina **latch bipolar**.

En los sensores unipolares la dirección del desplazamiento del circuito magnético con respecto al sensor puede ser:

- **Frontal (Head-on mode):** la dirección de movimiento del imán es perpendicular a la cara activa del sensor, por lo que las líneas de flujo magnético atraviesan dicha cara activa. La densidad del campo magnético es inversamente proporcional a la distancia de separación. Es un modo simple, funciona bien y es relativamente insensible al movimiento lateral.
- **Lateral (Slide-by mode):** la dirección de movimiento del imán es paralela a la cara activa del sensor. La curva en este caso tiene forma de campana. Lógicamente se tendrá una curva para cada distancia de separación (*gap*) entre el plano del imán y el del sensor.

Configuraciones de medida



66

Los **modos bipolares** pueden adoptar también diferentes configuraciones. La figura a) muestra el ejemplo de un modo bipolar lateral en el que se tiene un imán en anillo con dos pares de polos. Dependiendo de la aplicación se puede disponer de diferente número de pares de polos. El movimiento de rotación del imán da lugar a una densidad de campo magnético con una forma de onda senoidal. Si se emplea con un sensor Hall de salida digital, en cada revolución se obtiene un pulso de salida por cada par de polos. Cuantos más pares de polos la amplitud de la onda es menor.

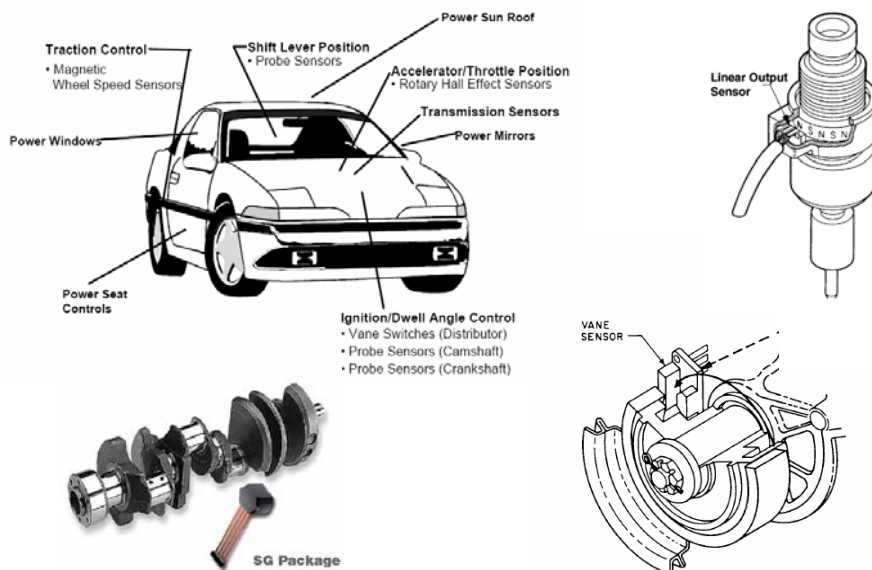
Con objeto de incrementar la densidad del flujo magnético, es frecuente el empleo de piezas polares o **concentradores de flujo**. Cuando se añaden a un sistema magnético ofrecen un camino de menor resistencia a las líneas de flujo. Cuando se colocan enfrentadas a la cara de un imán, la densidad de flujo en el aire entre ambas se incrementa. La figura b) muestra la variación del campo magnético en el modo unipolar frontal. El hecho de añadir la pieza polar aporta tres beneficios: un incremento en la densidad de flujo magnético, la distancia de actuación del sensor es mayor (para un nivel de flujo constante) y se puede emplear un imán con una intensidad de campo menor, por tanto, más barato. Estos concentradores suelen estar integrados en el sensor.

Aplicaciones

Aplicaciones en el automóvil		Aplicaciones industriales	
Sensor Hall digital	Sensor Hall lineal	Sensor Hall digital	Sensor Hall lineal
<ul style="list-style-type: none"> • Cigüeñal • Árbol de levas • Encendido • Motor de arranque • ABS • Ajuste de asientos • Boqueo de cerradura • Control tracción • Elevelunas • Techo corredizo • Ajuste de espejos • Ajuste de asientos • Cinturones seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> • Control suspensión • Medida de corriente • Nivel de líquido • Gestión de la batería • Dirección asistida • Frenos • Ajuste de los faros 	<ul style="list-style-type: none"> • Motores DC sin escobillas • Ventiladores • Medida de velocidad • Interruptor sin contactos • Nivel de líquidos • Flujo de líquidos • Interruptor de presión • Interruptor de rotación 	<ul style="list-style-type: none"> • Medida de corriente • Medida de posición • Medida de distancia • Medida de presión • Medida de fuerza • Medida de campo magnético • Medida de par

Las buenas características de los sensores basados en el efecto Hall, unidas a la bajada de precio que estos dispositivos han experimentado han dado lugar a un importante crecimiento en el número de aplicaciones. Uno de los campos de aplicación más importantes está en la industria del automóvil.

Aplicaciones en el automóvil

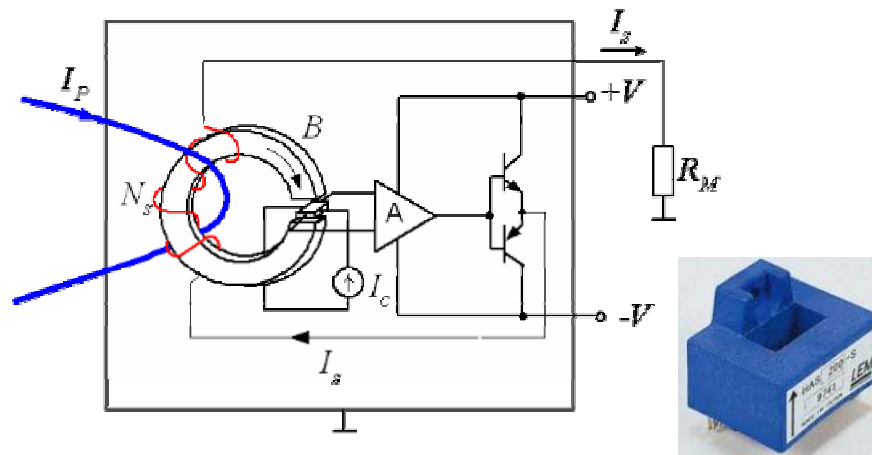


68

Referencias:

- Honeywell: <http://www.honeywell.com>
- Ahahi Kasei Electronics Co.: <http://www.asahi-kasei.co.jp>.
- Micronas: <http://www.micronas.com>.
- Infineon: <http://www.infineon.com>.
- Allegro Microsystems: <http://www.allegro.com>.
- LEM: <http://www.lem.com> (sensores de corriente y tensión)

Medida de corriente



$$I_P N_P = I_S N_S \Rightarrow (\text{Para } N_P=1 \text{ y } N_S=1000, I_S= 1\text{mA/A})$$

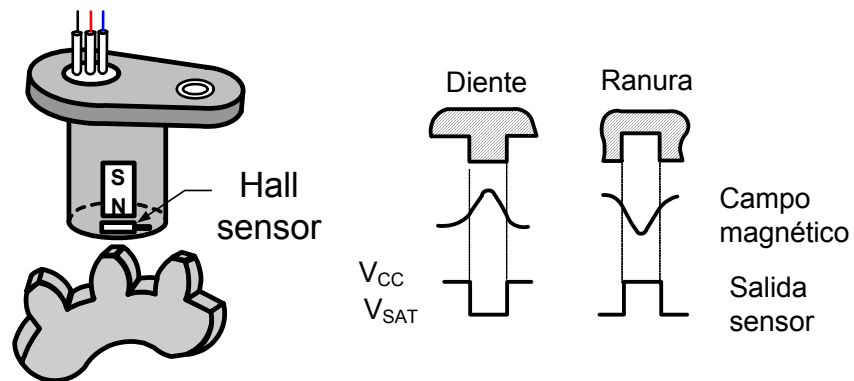
69

Un sensor de corriente con salida analógica puede realizarse mediante un núcleo de ferrita y un sensor Hall lineal montados en un encapsulado plástico. La corriente que circula por un conductor, crea un campo magnético. Este campo magnético es llevado por el núcleo de ferrita a un sensor Hall, que convierte dicho campo en una tensión de salida proporcional a la corriente en el conductor.

La medida de corriente puede realizarse en bucle abierto o en bucle cerrado. En la figura se muestra el esquema de un sensor Hall de corriente en bucle cerrado. La tensión Hall es amplificada y después excita una etapa en *push-pull* cuya corriente de salida circula por una bobina secundaria arrollada en el núcleo magnético. El campo magnético creado en la bobina secundaria cancela el flujo del primario, manteniendo un nivel de flujo en el núcleo próximo a cero. El valor de la corriente I_S se puede obtener midiendo la caída de tensión en una resistencia R_M . Los fabricantes suelen especificar un valor mínimo de R_M , que garantice la adecuada disipación de potencia del circuito y un valor máximo de R_M que evite la saturación del circuito.

La medida en bucle cerrado, al trabajar con un flujo magnético aproximadamente nulo, permite eliminar la influencia de las no linealidades del núcleo magnético y reducir los efectos de la sensibilidad a la temperatura en el elemento Hall.

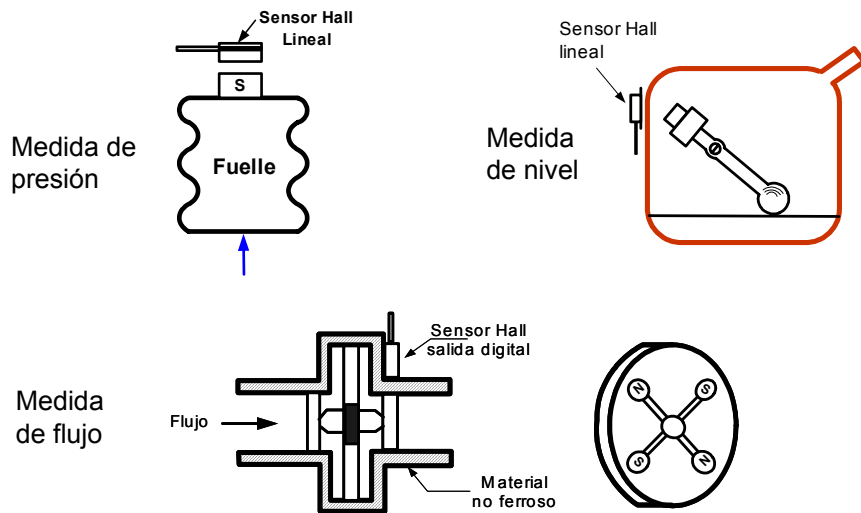
Detector de dientes de engranaje



70

Este dispositivo está encapsulado en una carcasa tipo sonda, permite detectar con gran precisión el movimiento de un objetivo de material ferromagnético. La figura muestra su aplicación como sensor de dientes de engranaje. Cuando el diente del engranaje pasa por la cara del sensor, detecta un cambio en el nivel del flujo y traslada este cambio a la tensión de salida, que conmuta entre la tensión de alimentación y la tensión de saturación del transistor de salida.

Medida de variables físicas



71

- **Medida de presión.** Cuando se expande o contrae el fuelle se mueve el imán hacia las proximidades del sensor Hall, proporcionando una tensión de salida proporcional a la presión.
- **Medida de nivel de un líquido.** El imán está unido al flotador de forma que cuando el nivel del tanque varía, el sensor Hall detectará estas variaciones y dará en su salida una tensión proporcional. De esta forma se evitan conexiones eléctricas en el interior del tanque. El material del tanque ha de ser no ferromagnético.
- **Medida de flujo:** el agua mueve unas aspas en las que se tienen dos pares de polos. Cuando estos imanes pasan por el sensor Hall, este genera dos pulsos de tensión por revolución. De esta forma se puede controlar la cantidad de agua que circula, haciendo un uso más eficiente de la misma.