

Capítulo 2

MEDICIÓN DE PRESIÓN

Una de las propiedades básicas de los procesos industriales es la presión y la variación de presión. La presión está influenciada por la temperatura, el nivel y/o el flujo en un proceso, ya que la medición de presión esta directa o indirectamente relacionada con ellas. Es por ello que la medición y el control de la presión son fundamentales en el diseño, construcción y mantenimiento del proceso. El control de la presión en los procesos industriales da condiciones de operación seguras. Cualquier recipiente o tubería posee cierta presión máxima de operación y de seguridad variando este, de acuerdo con el material y la construcción. Las presiones excesivas no solo pueden provocar la destrucción del equipo, sino que también puede provocar la destrucción del equipo adyacente y ponen al personal en situaciones peligrosas, particularmente cuando están implícitos, fluidos inflamables o corrosivos. Para tales aplicaciones, las lecturas absolutas de gran precisión con frecuencia son tan importantes como lo es la seguridad extrema.

Por otro lado, la presión puede llegar a tener efectos directos o indirectos en el valor de las variables del proceso (como la composición de una mezcla en el proceso de destilación). En tales casos, su valor absoluto medido o controlado con precisión es de gran importancia ya que afectaría la pureza de los productos poniéndolos fuera de especificación.

A pesar de que la presión es una de las variables más comunes en los procesos industriales, no puede ser medida directamente. Generalmente, es utilizado un dispositivo

mecánico que convierte el cambio de presión en un desplazamiento y éste a su vez es convertido en una señal eléctrica utilizando un transductor eléctrico.

2.1. DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

En este capítulo se describen los transductores industriales más utilizados en la medición de Presión. Se comienza con el concepto de presión, uso de unidades, clases de presión, leyes asociadas a los cambios de presión, aplicaciones y métodos de medición de presión. Se clasificarán los instrumentos medidores de presión en transductores mecánicos y transductores eléctricos. Debido a su gran aplicabilidad los transductores mecánicos que se van a estudiar son los de miembro elástico, entre los cuales se tienen el tubo de Bourdon, el diafragma y el fuelle, que pueden formar parte en la medición de presiones absolutas, manométricas, vacío o diferenciales.

Los dispositivos de miembro elástico mencionados pueden ser adaptados para ser utilizados con diversos transductores electromecánicos. Así, el indicador de presión puede estar adaptado para producir una salida eléctrica que es proporcional a la presión y el resultado es un transductor eléctrico para medir la presión. Entre los principios eléctricos más utilizados, para convertir el desplazamiento del elemento elástico a señal eléctrica, se incluyen: capacitivo, transformador diferencial, piezoeléctrico, potenciométrico, piezoresistivo (Strain Gage, SG). Todos estos principios serán estudiados y presentados así: principio de funcionamiento, análisis circuital, características, ventajas, desventajas y aplicaciones. Se hará una excepción con el SG que se estudiará con más detalle debido a la gran versatilidad y aplicabilidad de este dispositivo.

Al terminar de estudiar este capítulo se deberá ser capaz de:

- Definir presión.
- Usar correctamente las unidades de medición de presión.
- Listar las clases de presión.
- Definir las leyes asociadas a los cambios de presión.
- Desarrollar una lista de aplicaciones de la medición de presión en el ámbito industrial.
- Listar y describir los dispositivos de miembro elástico utilizados con diversos transductores electromecánicos para medición de presión.
- Listar y describir los principios eléctricos más utilizados para medición de presión.
- Elegir el transductor más apropiado para la medición de presión.
- Especificar el medidor de presión.

2.2. CONCEPTO DE PRESIÓN

La presión puede definirse como una fuerza por unidad de área o superficie, en donde para la mayoría de los casos se mide directamente por su equilibrio con otra fuerzas conocidas que puede ser la de una columna líquida, un resorte, un émbolo cargado con un peso o un diafragma cargado con un resorte o cualquier otro elemento que puede sufrir una deformación cualitativa cuando se le aplica la presión. También se define como la fuerza ejercida por un cuerpo contra el área de una pared confinada. La fuerza es debida a la masa del cuerpo y al bombardeo cinético de las moléculas contra la pared del recipiente. Matemáticamente:

$$P=F/A \tag{2.1}$$

donde: P = Presión, F = Fuerza, A = Área.

Para ilustrar la expresión anterior se muestra un ejemplo en la figura 2.1.

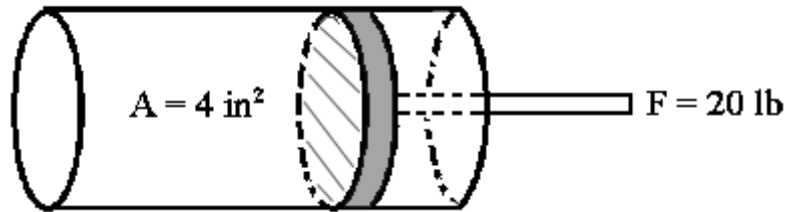


Figura 2.1 Pistón y cilindro para ilustrar un ejemplo.

En la Figura 2.1 se muestra un pistón al cual se le está ejerciendo una fuerza de 20 lb. El pistón comprime el fluido que se encuentra dentro del cilindro ejerciendo a su vez, presión contra las paredes del mismo. Si el área de la pared del pistón es de 4 in². Se puede determinar la presión utilizando la Ec. (2.1).

$$P = 20/4 \text{ lb/in}^2 = 5 \text{ psi (34 474 Pa)}$$

2.3. UNIDADES DE PRESIÓN

La unidad normalizada de presión en el Sistema Internacional de Unidades es el Pascal, cuyo símbolo es Pa y su equivalencia es dada en la Tabla 1.2.

Otras unidades de presión utilizadas son dadas en la Tabla 2.1 con sus correspondientes factores de conversión.

2.4. CLASES DE PRESIÓN

La presión puede medirse en valores absolutos o diferenciales. En la Figura 2.2 se muestran los tipos de presión que pueden medirse comúnmente en la industria que son la presión absoluta, atmosférica, manométrica, diferencial y vacío. Estos términos asociados con la medición de presión se definen a continuación.

Tabla 2.1 Factores de conversión para la unidades de presión.

	psi o lb/in ²	in cda	in cd Hg	atm	cm cda	kg/cm ²	mm Hg	bar	Pa
psi o lb/in ²	1	27,686	2,035	0,068	70,31	0,070 3	51,715	0,069	6 896
in cda	0,0361	1	0,073	0,0024	2,540	0,0025	1,868	0,0025	249,09
in cd Hg	0,4912	13,6	1	0,0334	34,53	0,0345	25,4	0,0333	3 386,5
atm	14,696	406,79	29,92	1	1 033	1,033	760	1,013	1,01x10 ⁵
cm cda	0,0142	0,3937	0,0289	0,000 96	1	0,001	0,735 5	0,000 9	98,04
kg/cm ²	14,22	393,7	28,96	0,9678	1 000	1	735,6	0,98	98 100
mm Hg	0,019 3	0,5353	0,0393	0,001 3	0,001 3	0,001 3	1	0,0013	133,3
bar	14,503	401,46	29,529	0,987	1 024	1,02	750,062	1	1x10 ⁵
Pa	1,45x10 ⁻⁴	3,9x10 ⁻³	2,9x10 ⁻⁴	0,987 x10 ⁻⁵	0,01	1,02 x10 ⁻⁵	0,075	1x10 ⁻⁵	1

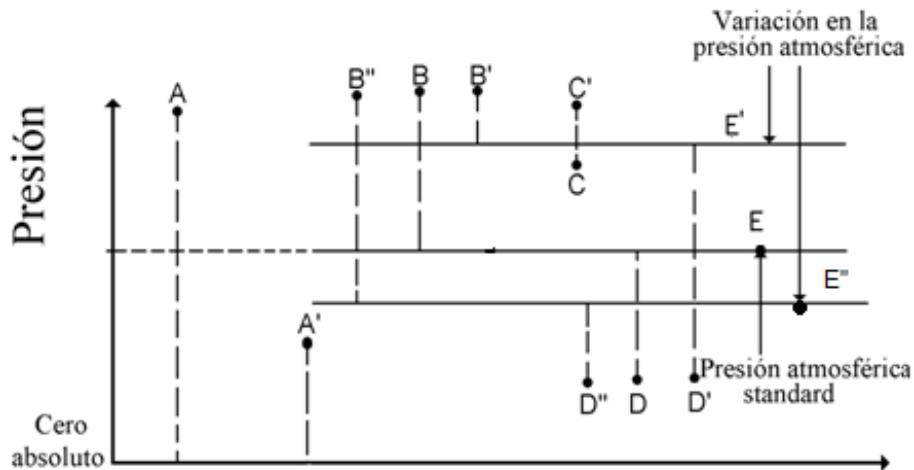


Figura 2.2 Relación entre los diferentes términos de presión.

2.4.1. Presión Absoluta

Presión absoluta es la presión medida con referencia al vacío perfecto o a la presión absoluta equivalente a cero; puntos A y A', Figura 2.2.

$$P_{absoluta} = P_{manométrica} + P_{atmosférica}$$

2.4.2. Presión Atmosférica

Desde la antigüedad, los pronósticos del tiempo se han basado fundamentalmente en las variaciones de la presión atmosférica. En el siglo XVII, Evangelista Torriceli midió el peso del aire en función de los milímetros que subía o bajaba el mercurio en un tubo, una unidad de medida que aún perdura en la actualidad.

Presión atmosférica es la ejercida por la atmósfera de la tierra, tal como se mide normalmente por medio del barómetro. Al nivel del mar el valor de la presión es cercano a 14,7 psi (760 mm Hg), disminuyendo estos valores con la altitud; puntos E, E' y E'', Figura 2.2. En la figura 2.3 se ilustra otro ejemplo de presión atmosférica.

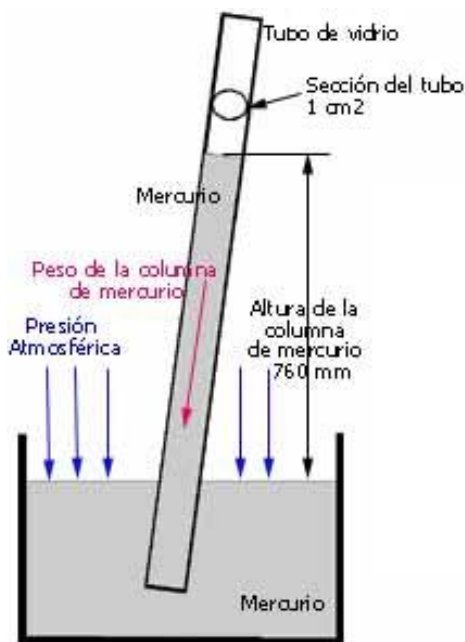


Figura 2.3 Ejemplo de presión atmosférica.

2.4.3. Presión Manométrica

Presión manométrica es la presión superior a la atmosférica; puntos B, B' y B'', Figura 2.2. Analizando la Figura 2.2, se hace evidente que el valor absoluto de la presión

manométrica puede obtenerse adicionando al valor real de la presión atmosférica, la lectura del manómetro.

2.4.4. Presión Diferencial

Presión diferencial es la diferencia entre dos presiones como se representa con los puntos C y C', Figura 2.2.

2.4.5. Vacío

Vacío se refiere a la presión diferencial medida por medio de un elemento que define la diferencia entre la presión desconocida inferior a la atmosférica y la presión atmosférica existente, es representada en la Figura 2.2 por los puntos D, D' y D".

2.5. LEYES ASOCIADAS A LOS CAMBIOS DE PRESION

Los fluidos ejercen fuerza y a partir de ella se puede determinar la presión. Estos comprenden los gases y los líquidos. Los gases pueden estar en tanques confinados, tomando la forma del recipiente que los contiene y los líquidos pueden estar en tanques abiertos y cerrados.

2.5.1. FLUIDOS:

En medición de presión con líquidos, hay que considerar si el tanque está abierto a la atmósfera o si está cerrado, así como también si esta presurizado o no.

2.5.1.1. Para Tanques Abiertos

En un **tanque abierto** la fuerza, y por lo tanto, la presión que ejerce el líquido sobre las paredes y el fondo del tanque, depende de la altura (h) del líquido dentro del tanque, su gravedad específica (SG ó s) y su temperatura (T). Es decir: $P = f(h, s, T)$.

La presión ejercida por el agua en un **tanque abierto** (Figura 2.4), depende de la **altura del agua** por arriba del punto donde se está haciendo la medición; es por ello que:

$$P_1 > P_2 > P_3 > P_4 > P_5.$$

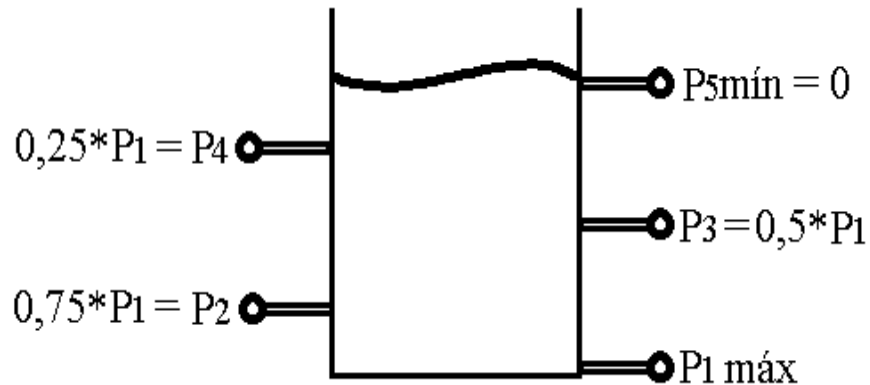


Figura 2.4 La Presión Manométrica ejercida por un fluido en un tanque abierto.

En las Figura 2.5a y 2.5b se ilustra un ejemplo de la presión ejercida por el agua en un tanque abierto. Se sabe que 1 ft³ de agua pesa 62,34 lb, por lo tanto la presión P_1 en el tanque de la Figura 2.5a es de 62,34 lb/ft². Sin embargo la presión P_1 en el tanque de la Figura 2.5b es tres veces el valor anterior (187,02 lb/ft²) ya que la altura del agua en este caso es de 3 ft. Si se coloca un instrumento de medida a 2 ft del fondo (P_2) entonces la presión ejercida tendrá un valor de $P_2 = 62,34 \cdot 2 = 124,68$ lb/ft² (5 969,68 Pa).

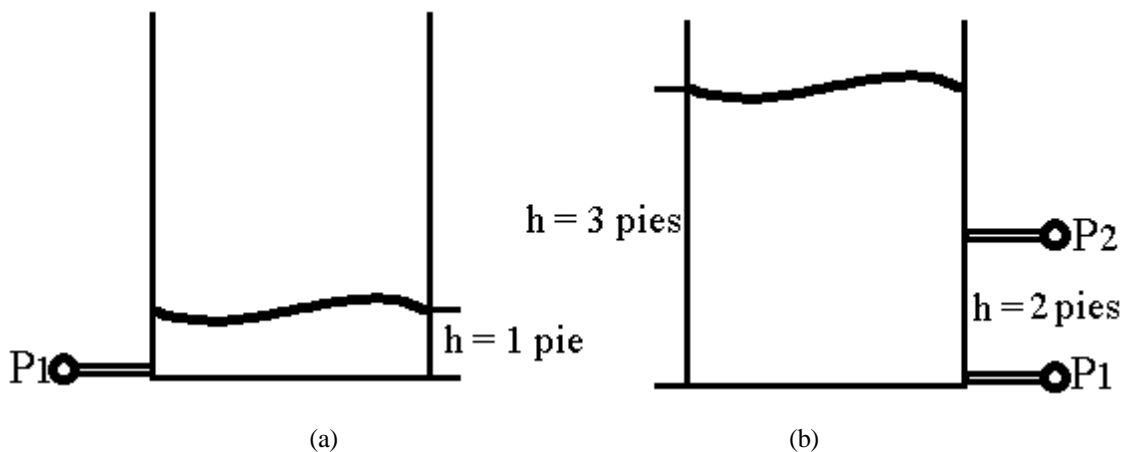


Figura 2.5 Presión ejercida en un tanque abierto.

La **gravedad específica**, representada por “s”, afecta a la fuerza ejercida por un líquido, definiéndose por la relación:

$$s = \frac{\text{Densidad de la sustancia considerada a la temperatura especificada}}{\text{Densidad del agua a } 60\text{ }^\circ\text{F}} \quad (2.2)$$

La expresión anterior es válida para líquidos y sólidos. Además, no se especifica la presión porque el efecto de la misma sobre la densidad de los líquidos es muy pequeño.

La gravedad específica (s) compara la masa por unidad de volumen del líquido en estudio con respecto a la masa por unidad de volumen del agua a 60 °F.

Gravedad específica:
$$S_{\text{agua}} = \frac{\text{Densidad del agua a } 60\text{ }^\circ\text{F}}{\text{Densidad del agua a } 60\text{ }^\circ\text{F}} = 1 \quad (2.3)$$

Densidad: $\rho_{\text{agua}} = 1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/dm}^3 \text{ a } 60\text{ }^\circ\text{F}$

En estas condiciones, numéricamente:

$$S = \rho_{\text{líquido a } 60\text{ }^\circ\text{F}} \quad \text{cuando} \quad \rho_{\text{agua a } 60\text{ }^\circ\text{F}} = 1$$

$$F = h \cdot S = h \cdot \rho_{\text{líquido en g/cm}^3, \text{ a } 60\text{ }^\circ\text{F}}$$

La densidad del agua es de 1 kg/dm³, es decir, 1 g/cm³, esto quiere decir que 1 dm³ de agua a 60 °F pesa 1 kg. Si se tiene un recipiente de peso despreciable de 1 dm³ y se llena de agua, este pesará 1 kg, Figura 2.6.

La presión ejercida en el fondo del recipiente es 1 kg/dm² = 1 kg/100 cm² = 0,01 kg/cm² = 10 g/cm². Esta presión es la ejercida por una columna de agua (cda) de 10 cm sobre una superficie de 1 cm², luego, 1 cm ejerce una presión de:

$$\frac{10 \text{ g/cm}^2}{10 \text{ cm cda}} = \frac{1 \text{ g/cm}^2}{1 \text{ cm cda}}$$

donde:

$$1 \text{ g/cm}^2 = 1 \text{ cm cda}$$

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 1000 \text{ cm cda} = 10 \text{ m cda}$$

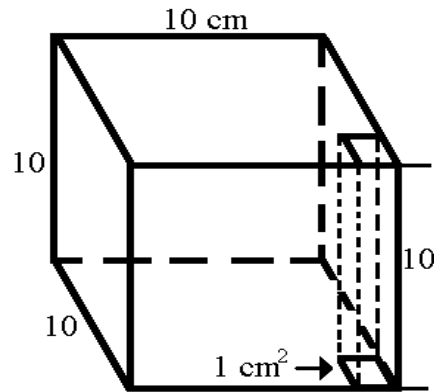


Figura 2.6 Relación entre presión y columna de líquido.

En caso de que el peso específico sea diferente de uno, para determinar la columna necesaria para ejercer igual presión sobre la misma área, se aplica la ecuación de presión hidrostática, Ec. (2.4).

$$P = h \cdot (1) \cdot s = h \cdot s \tag{2.4}$$

donde:

P = Presión hidrostática

s = Gravedad específica del líquido

1 = Presión causada por 1 cm cda

h = Altura

La Ec. (2.4) indica que la presión es función de la gravedad específica del líquido y de la altura para las condiciones dadas. En la figura 2.7 se muestra la relación entre la presión y la altura para una gravedad específica constante.

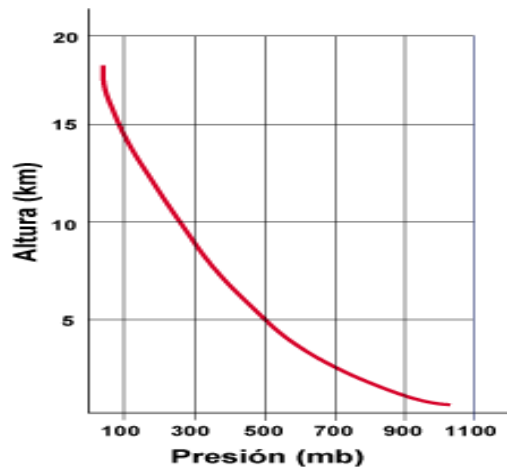


Figura 2.7 Relación entre la presión y la altura.

Si el líquido a ser utilizado es mercurio, el cual posee una gravedad específica de $13,6 \text{ g/cm}^3$, la columna necesaria para ejercer una presión de 1 kg/cm^2 debe tener una altura de $1000/13,6$, es decir, $73,53 \text{ cm de Hg}$.

La **temperatura** (T) también afecta la fuerza ejercida por un líquido en un tanque abierto, (Figura 2.8), para un volumen constante de líquido al disminuir su temperatura aumentará el peso del líquido, modificándose así la fuerza ejercida, y por lo tanto, la presión.

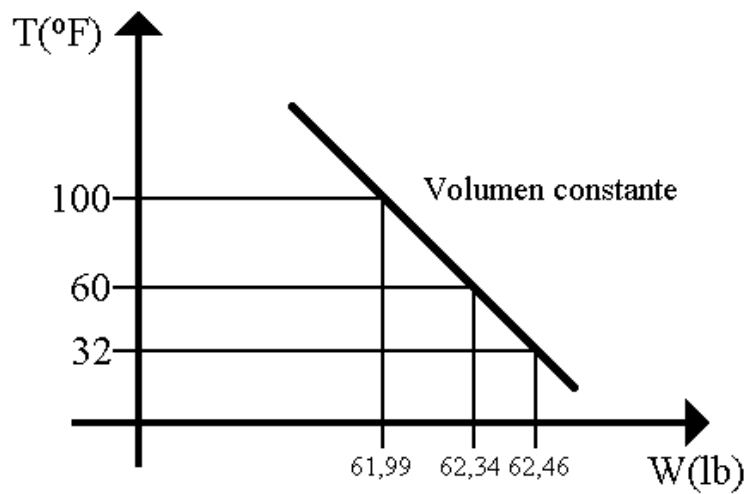


Figura 2.8 Variación de la fuerza con la temperatura.

A una temperatura de 60 °F el peso (W) de 1 ft³ de agua es de 62,34 lb.

Para un volumen dado de líquido al disminuir su temperatura aumentará el peso (W) de éste. Un ejemplo de lo antes expuesto es el agua, (Figura 2.8), la cual posee un peso de 62,34 lb a una temperatura de 60 °F; si la temperatura disminuye a 32 °F entonces el peso aumentará a 62,46 lb. Pero si la temperatura aumenta a 100 °F el peso disminuye, a 61,99 lb.

Por lo tanto cuando se está midiendo la Fuerza (F) que ejerce un líquido sobre las paredes de un tanque se debe considerar la Temperatura (T) del líquido. Es de hacer notar que las consideraciones anteriores son para líquidos en tanques abiertos.

2.5.1.2. Para Tanques Cerrados

La fuerza aplicada a un fluido que se halla en un **recipiente cerrado** se transmite íntegramente a cada punto del mismo y a las paredes del recipiente con una presión constante (Ley de Pascal).

Cuando se aplica una fuerza a un **líquido confinado** por una superficie movable, la fuerza será transmitida a través del fluido a toda la superficie del recipiente, así que no importa donde se mida la fuerza ya que se indicará el cambio en fuerza ejercida por superficie del fluido ejercido en movimiento.

Para ilustrar el significado de la **ley de Pascal**, se considera la prensa hidráulica de la Figura 2.9. Al aplicar una fuerza al pistón del área 1 (A_1), la fuerza se distribuye igual a través de todo el sistema incluyendo el área 2 (A_2). Pequeñas fuerzas que se ejercen sobre el pistón pequeño causan grandes fuerzas sobre el pistón grande, por lo tanto la relación existente entre el mecanismo hidráulico y la presión en todos los puntos es igual.

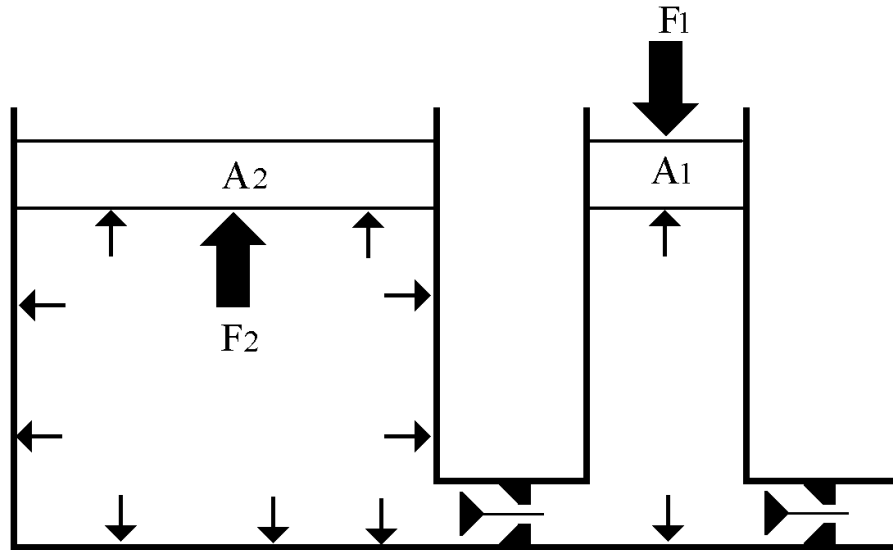


Figura 2.9 Prensa hidráulica.

Ejemplo N° 1: Si la prensa hidráulica de la Figura 2.9 posee las siguientes especificaciones:

$$A_1 = 0,5 \text{ in}^2$$

$$A_2 = 4 \text{ in}^2$$

$$F_1 = 150 \text{ lb}$$

Obtener F_2 .

Solución: se sabe que: $P_1 = F_1/A_1 = P_2 = F_2/A_2$

$$\text{Por lo tanto: } F_2 = (A_2/A_1) F_1 = 1\ 200 \text{ lb } (5\ 337,84 \text{ N})$$

2.5.2 GASES:

El gas no tiene forma definida debido a que se expande para llenar completamente el volumen del recipiente y ejerce una fuerza igual en toda la superficie del recipiente. La altura del gas por encima del punto de medición no es factor crítico cuando se selecciona un punto de medición para gases. En general hay dos factores que influyen en la fuerza que un gas ejerce sobre las paredes de un recipiente: Volumen del recipiente y Temperatura del gas.

La gravedad específica, también afecta a la fuerza ejercida por un gas, definiéndose por la relación:

$$S = \frac{\text{Densidad del gas a la temperatura y presión requeridos}}{\text{Densidad del aire a determinada temperatura y presión}} \quad (2.5)$$

En la industria: $T = 60 \text{ }^\circ\text{F}$

$$P = 1 \text{ atm} = 14,7 \text{ psi (a)} = 1,013 \text{ 25} \times 10^5 \text{ Pa.}$$

Con fines científicos y universitarios: $T = 32 \text{ }^\circ\text{F}$

$$P = 1 \text{ atm} = 14,7 \text{ psi (a)} = 1,013 \text{ 25} \times 10^5 \text{ Pa.}$$

El aire que rodea la tierra ejerce una presión sobre todos los cuerpos de aproximadamente 1 kg/cm^2 (98 100 Pa).

La presión que ejerce la capa de aire se denomina atmósfera, la cual se considera como $1,033 \text{ kg/cm}^2$, 76 cm de Hg , $1,013 \text{ 25} \times 10^5 \text{ Pa}$ ó $10,33 \text{ m cda}$.

2.5.2.1. Ley de Boyle

A **temperatura constante**, el volumen ocupado por un gas es inversamente proporcional a la presión a la que está sometido.

$$\text{A temperatura constante: } P = \alpha/V; \quad (2.6)$$

donde: $P = \text{Presión}$, $\alpha = \text{Constante}$, $V = \text{Volumen}$

El valor de α queda determinado al fijar la masa del gas y su temperatura,

Si se toma el ejemplo de la Figura 2.1 se puede observar que a mayor fuerza ejercida se producirá una disminución del volumen y a menor fuerza ejercida se producirá un aumento del volumen.

2.5.2.2. Ley de Charles

Si en un recipiente que contiene gas se considera el **volumen constante**, la presión ejercida por el gas sobre las paredes del recipiente varía directamente con la temperatura del mismo.

$$P = \alpha T \quad (2.7)$$

donde: P = Presión, α = Constante, T = Temperatura

Si la temperatura aumenta la presión sobre las paredes del recipiente también aumenta; si por el contrario la temperatura disminuye la presión también disminuirá.

2.6. APLICACIONES DE LAS MEDICIONES DE PRESIÓN

En conjunto con la temperatura y el flujo, las mediciones de presión se emplean en la industria de proceso o de manufactura, en el laboratorio y en otros campos de acción tales como: la neumática, en compresores e instalaciones de bombas, el campo de la química para el control de procesos, mediciones en tanques, el aeroespacio, el sector de la fabricación, en procesos de presión de aire, en el sector de la industria de plástico, la comprobación de recaladas de válvulas (pérdida de presión de aire antes y después), aviación y embarcaciones marítimas.

Las razones para medir la presión son muy diversas, por lo general, una o más de las que se describen a continuación son las que constituyen el motivo para la medición y/o control automático, de la presión: mantenimiento de condiciones seguras de operación, la optimización y control de procesos, el ámbito de la investigación y el desarrollo entre otros.

2.7 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN

Se dispone de una gran variedad de dispositivos para la medición de la presión, en las secciones siguientes se estudian los más utilizados en la industria, haciendo referencia a sus características, ventajas, desventajas y aplicaciones. Los instrumentos de presión se clasifican en: transductores mecánicos y transductores eléctricos.

2.7.1. Transductores mecánicos

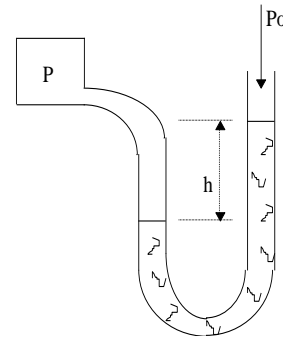
Los dispositivos mecánicos representan el medio más simple para la medición de presión. Estos se dividen en: elementos de medición directa y elementos de miembro elástico.

2.7.1.1. Elementos de Medición Directa

Los elementos de medición directa miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocidas. Entre los elementos de medición directa se encuentran: barómetro de cubeta, manómetro de tubo en U, manómetro de tubo inclinado.

El dispositivo más utilizado es el manómetro de tubo en “U” abierto. La parte superior del tubo se encuentra abierta y por tanto a la presión atmosférica “ P_o ” y el otro extremo del tubo se conecta al proceso a una cierta presión “ P ”. Obteniéndose:

$$P - P_o = \rho h.$$



2.7.1.2. Elementos de Miembro Elástico

Los Elementos de miembro elástico se deforman por la presión ejercida por el fluido que contienen, convirtiendo la presión aplicada en un desplazamiento. Son de gran

aplicabilidad y entre estos elementos se tienen: el tubo de Bourdon, el diafragma y el fuelle, que pueden formar parte en la medición de presiones absolutas, manométricas, vacío o diferenciales.

2.7.1.2.1. Tubo de Bourdon

El tubo de Bourdon es un dispositivo comúnmente utilizado para medir la presión. Consiste en un tubo que es de sección transversal ovalada. El tubo está normalmente doblado en forma de un anillo casi completo, una espiral, una hélice o enroscado alrededor de un eje común. Un extremo del tubo está abierto y el otro está cerrado y puede moverse libremente como se puede observar en la Figura 2.10.

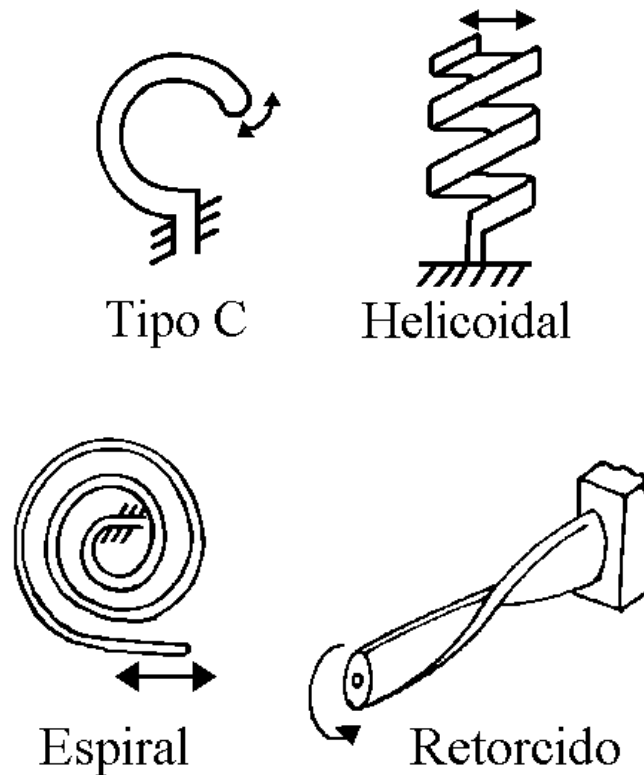


Figura 2.10 Tipos de dispositivos de Bourdon.

El fluido cuya presión se está midiendo puede estar conectado directamente al extremo abierto del tubo. La presión del fluido dentro del tubo tiende a rectificar la curvatura, haciendo mover el extremo libre del tubo. El movimiento es transmitido a la aguja indicadora.

La ley de deformación del tubo de Bourdon es bastante compleja y ha sido determinada empíricamente a través de numerosas observaciones y ensayos en varios tubos. El material empleado normalmente en el tubo de Bourdon es de acero inoxidable, aleación de cobre o aleaciones especiales como hastelloy y monel. Se utiliza para mediciones de presión en el intervalo de (0,5 a 100 000) psi.

2.7.1.2.2. El diafragma

El funcionamiento de este elemento elástico se ilustra en la Figura 2.11. El cuerpo del recipiente es rígido y la presión interna hace que el extremo flexible sea empujado hacia el exterior. Dependiendo de la forma de presentar el extremo flexible, éstos dispositivos pueden ser denominados plano, corrugado o cápsula como se puede observar en la Figura 2.11. Se emplean para pequeñas presiones en el intervalo de (0,071 a 28,466) psi.

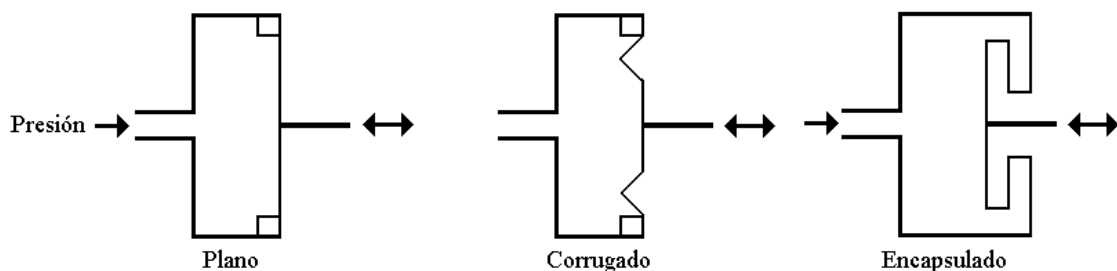


Figura 2.11 Dispositivos de Diafragma.

2.7.1.2.3. El fuelle

Su principio de funcionamiento se ilustra en la Figura 2.12. El cuerpo del indicador de fuelle es flexible debido a la estructura similar de un acordeón que tienen las paredes laterales

y le permite dilatarse o contraerse con desplazamiento considerable. La presión interna distiende el cuerpo y hace que se extienda el extremo; se utiliza para pequeñas presiones en el intervalo de (0,142 a 28,466) psi.

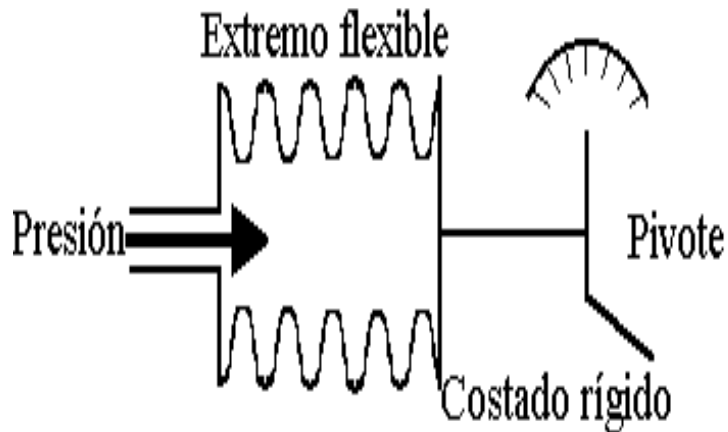


Figura 2.12 Indicador de Fuelle.

2.7.1.2.4. Manómetros

El extremo móvil de los dispositivos mecánicos estudiados anteriormente se pueden conectar a un sistema de relojería, el cual, amplifica el desplazamiento y lo transforma en una rotación angular, que se detecta mediante una aguja ubicada sobre una escala graduada en unidades de presión, Figura 2.18.

2.7.1.2.4.1. Accesorios para manómetros

Por regla general, los manómetros son instrumentos diseñados para medir la presión bajo condiciones estáticas, es decir, en ausencia de vibraciones, pulsaciones, golpes de ariete, sobre-presiones intempestivas, etc., a temperaturas comprendidas entre (-20 a 100) °C y a fluidos que no presenten corrosión excesiva, no sean pastosos ni cristalizables. Si sus condiciones de operación presentan alguna de las características señaladas anteriormente, es necesario que sean tomadas en cuenta ya que de lo contrario, el manómetro se verá seriamente

afectado sufriendo un desgaste o una rotura prematura y en consecuencia una duración de vida muy inferior a la que debería presentarse. Por lo tanto, se recomienda especificar los accesorios necesarios en función de las condiciones de operación, siguiendo el orden indicado en cada caso.

2.7.1.2.4.1.1. Medición de presión a un fluido que presenta pulsaciones

Si la amplitud (A) de la pulsación, Figura 2.13, es mayor a $1/10$ del valor tolerado definido por la precisión del instrumento, se debe usar un **amortiguador de pulsaciones**. Para que el manómetro y el amortiguador de pulsaciones estén calibrados en planta, se debe suministrar los valores de la amplitud A y la frecuencia de la pulsación.

Si el manómetro a ser utilizado tiene una escala comprendida entre (0 a 1 000) psi y una precisión de $\pm 1\%$; entonces el valor tolerado definido por la precisión es de 10 psi. Luego $1/10$ de 10 psi es 1, si $A > 1$ psi, se debe usar un amortiguador de pulsaciones.

Si la amplitud A es menor de 0,1 del valor tolerado definido por la precisión del instrumento, se puede usar un manómetro lleno con un baño de aceite, Figura 2.15b, el cual amortiguará las pulsaciones presentes.

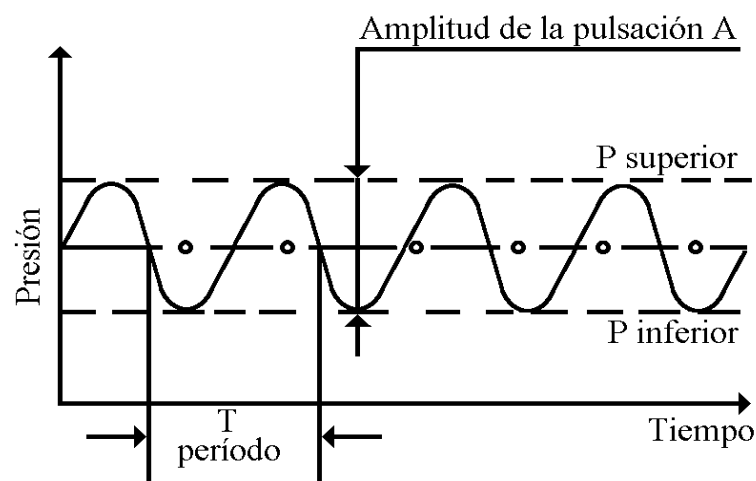


Figura 2.13 Pulsación típica en un fluido.

2.7.1.2.4.1.2. Medición de presión cuando están presentes vibraciones

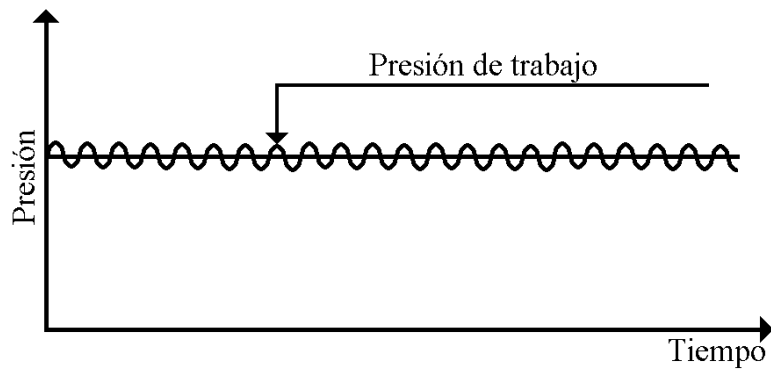


Figura 2.14 Vibración en un fluido.

En este caso, la presión no varía siendo difícil detectar una amplitud de la vibración, Figura 2.14. La solución está en usar un **instrumento con baño de aceite**, Figura 2.15b, cuando la vibración no sea muy intensa, en caso contrario, el instrumento se debe aislar de la fuente productora de vibraciones (generalmente la tubería o el envase donde se conecta el manómetro) por medio de una **conexión elástica**, Figura 2.15a. Se recomienda utilizar al menos 1 m de tubo elástico enrollado el cual debe ser capilar y del menor diámetro posible.

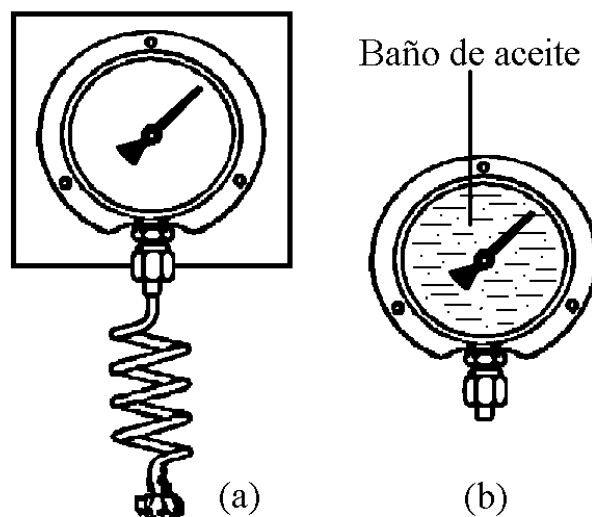


Figura 2.15 Manómetros con a) tubo elástico, b) baño de aceite.

2.7.1.2.4.1.3. Medición de presión cuando se presentan sobrepresiones accidentales

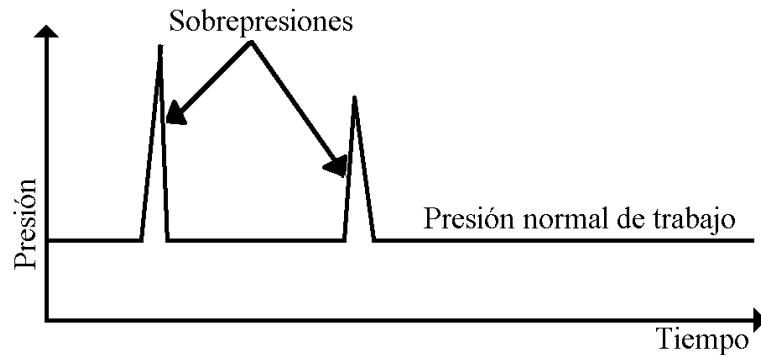


Figura 2.16 Sobrepresión en un fluido.

En el caso de presentar sobrepresiones, Figura 2.16 se debe usar un amortiguador de sobrepresiones, el cual, es un dispositivo igual al mostrado en la Figura 2.15a.

2.7.1.2.4.1.4. Medición de la presión de un fluido a alta temperatura

Cuando la temperatura de los fluidos a los cuales se mide la presión sea superior a 80 °C para los manómetros con elemento sensor de bronce y de 100 °C para los manómetros con elemento sensor de acero o monel, se recomienda el uso de un sifón o rabo de cochino, Figura 2.17.

2.7.1.2.4.1.5. Medición de la presión de fluidos corrosivos, pulvúido, pastosos, cristalizables ó a altas temperaturas

En estos casos se recomienda el uso de un “separador” (sello diafragma o sello químico).

A diferencia de los demás accesorios, el sello forma un conjunto indisoluble con el manómetro al cual va a ser instalado.

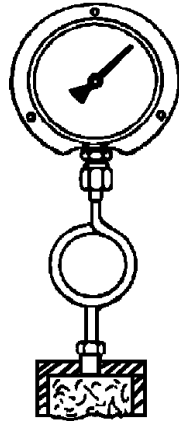


Figura 2.17 Manómetro con rabo de cochino.

El principio de funcionamiento del separador consiste en interponer entre el manómetro y el fluido, un líquido tapón (en general aceite) que transmita íntegramente la presión.

De acuerdo a la toma de presión y al fluido a medir, se utilizan dos tipos de separadores:

- Separador de membrana: está compuesto por dos cámaras separadas por una membrana, dicha membrana es totalmente estanca (e inatacable químicamente por el fluido que se va a medir), así como lo más flexible posible, por lo cual es muy delgada. La membrana se fija con bridas.
- Sello a sonda: está constituido por un tubo obturado en una extremidad el cual actúa como sonda y una conexión roscada en el otro extremo. La sonda y el sistema de medición del manómetro deben estar llenos completamente de un fluido (aceite). Para medir la presión se sumerge la sonda directamente en el fluido a medir.

2.7.2. Transductores eléctricos

La importancia de convertir cualquier señal en una señal eléctrica se basa en que ésta permite ser manipulada con mayor facilidad, es decir, su amplificación, transmisión, modulación y otras características que no presentan otros tipos de señales como la mecánica y la calórica. Ahora bien, se han estudiado diferentes dispositivos mecánicos para la medición de la variable presión y se observa que para su medición, se obtiene previamente un desplazamiento.

Los dispositivos de miembro elástico mencionados pueden ser adaptados para ser utilizados con diversos transductores electromecánicos como se mencionó anteriormente. El extremo móvil se conecta a un sistema de relojería que, además de amplificar el desplazamiento, lo transforma en una rotación angular que se detecta mediante una aguja que está ubicada sobre una escala graduada en unidades de presión, para realizar lecturas en el sitio, Figura 2.18, o tomar el movimiento del extremo para impulsar un transductor que convierta ese movimiento en señal eléctrica.

Así, el indicador de presión puede estar adaptado para producir una salida eléctrica que es proporcional a la presión y el resultado es un transductor eléctrico para medir la presión. Entre los principios eléctricos más utilizados, para convertir el desplazamiento a señal eléctrica, se incluyen: capacitivo, transformador diferencial, piezoeléctrico, potenciométrico, piezoresistivo (Strain Gage, SG). Todos estos principios serán estudiados a continuación y presentados así: principio de funcionamiento, análisis circuital, características, ventajas, desventajas y aplicaciones. Se hará una excepción con el SG que se estudiará con más detalle debido a su gran versatilidad y aplicabilidad.

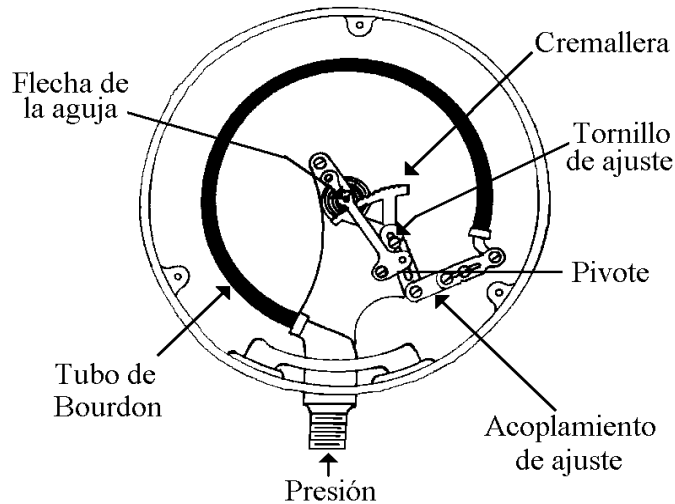


Figura 2.18 Manómetro de Tubo de Bourdon.

2.7.2.1. Transductor capacitivo

El transductor capacitivo básico consiste de dos placas paralelas separadas por un dieléctrico. La variación de capacitancia puede ser obtenida por cambios de la distancia entre placas, cambios en el área común de coincidencia de las placas o cambios físicos o químicos en el dieléctrico. Las variaciones de capacitancia, producidas por un desplazamiento, pueden convertirse en variaciones de tensión utilizando un puente capacitivo en corriente alterna (ac) para la instalación del capacitor variable.

Un ejemplo de este tipo de dispositivo es ilustrado en la Figura 2.19. La capacitancia en picofarad está dada por:

$$C = (0,225 \cdot A \cdot K) / x \quad (2.8)$$

donde:

A = Área común de coincidencia en pulgadas cuadradas

x = Distancia entre placas en pulgadas

C = Capacitancia en pico farad

K = Constante dieléctrica ($K = 1$ si el dieléctrico es aire).

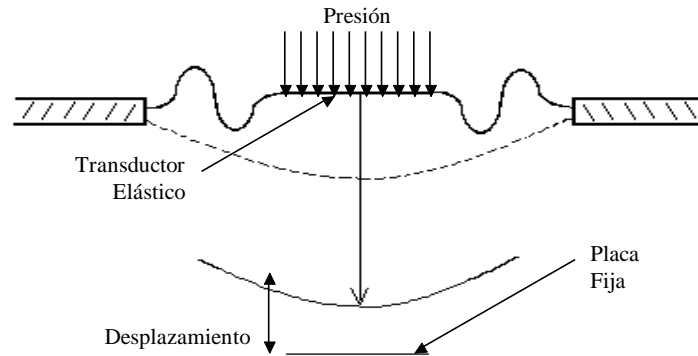


Figura 2.19 Transductor Capacitivo.

2.7.2.1.1. Análisis Circuital

La forma más común de un capacitor variable que se usa en los transductores, es el capacitor de placas paralelas de separación variable. La Ec. (2.8) rige este comportamiento; por ejemplo, la capacitancia de un capacitor de aire con placas de 1 in² de área, separadas 0,01 in, es 22,5 pF. La impedancia $1/j\omega C$ de este capacitor a una frecuencia de 10 kHz, tiene una magnitud de 708 k Ω . Este alto nivel de impedancia es responsable de algunos de los problemas principales con respecto a los voltajes de ruidos parásitos, sensibilidad a la longitud y posición de los cables de conexión. En la Ec. (2.8) se observa también que la capacitancia no es lineal con la separación de las placas x ; así, el porcentaje de cambio en x con respecto a la posición de referencia elegida, debe ser pequeña para obtener una buena linealidad. La sensibilidad de la capacitancia a los cambios de separación de las placas puede calcularse de la Ec. (2.8):

$$dC/dx = -(0,225 \cdot A) / x^2 \quad (2.9)$$

Se observa que la sensibilidad aumenta al disminuir x . Sin embargo, el porcentaje de cambio en C es igual al porcentaje de cambio en x para cambios pequeños con relación a cualquier posición de referencia.

Sustituyendo la Ec. (2.8) en la Ec. (2.9) se obtiene:

$$dC/dx = -C/x \quad (2.10)$$

Ordenando la Ec. (2.10):

$$dC/C = -dx/x \quad (2.10a)$$

El circuito más simple empleado para ilustrar el principio de funcionamiento del transductor capacitivo es el micrófono de condensador, Figura 2.20.

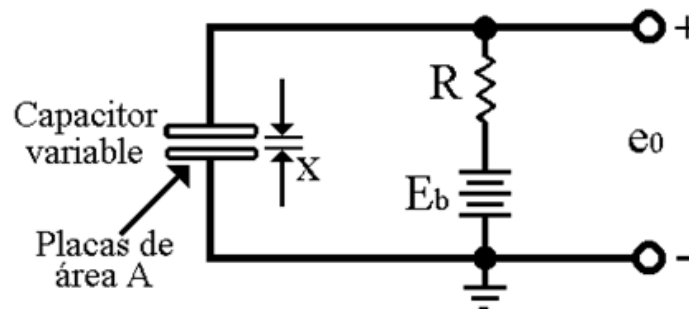


Figura 2.20 Micrófono de condensador.

Cuando las placas del condensador están fijas con una separación entre ellas de x_0 , no circula corriente en el circuito, por lo tanto $e_0 = E_b$. Luego si ocurre un desplazamiento x_1 desde la posición x_0 , el voltaje de salida tendrá un valor $e_1 \approx e_0 - E_b$, el cual se produce y se relaciona a x_1 por la ecuación:

$$e_1/x_1(D) = (K \cdot \tau \cdot D) / (\tau \cdot D + 1) \quad (2.11)$$

donde: $K \approx E_b/x_0$ (2.12)

$$\tau \approx 0,225 \cdot 10^{-12} \cdot ((A \cdot R)/x_0) \quad (2.13)$$

A través de la Ec. (2.11) se demuestra que el circuito de la Figura 2.20 permite la medición de desplazamientos desde un valor de voltaje de salida igual a cero hasta cualquier valor de x_I , sin embargo, para variaciones lo suficientemente rápidas en x_I la señal de salida captará fielmente las mediciones. Esto se puede observar en la respuesta de frecuencia mostrada en la Figura 2.21.

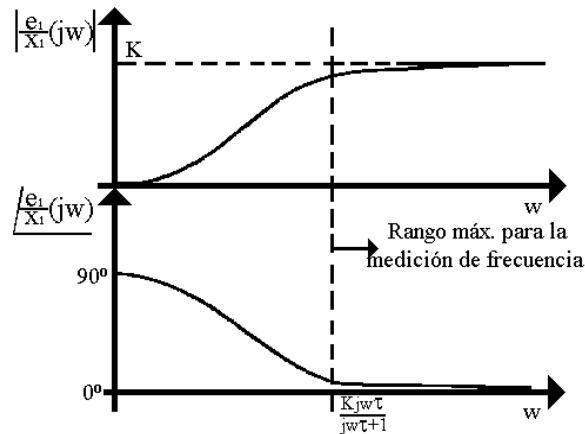


Figura 2.21 Respuesta de frecuencia del micrófono de condensador.

De la Figura 2.20 se tiene que:

$$e_1/x_I(j\omega) = (K \cdot \tau j\omega) / (\tau j\omega + 1) \quad (2.14)$$

si se hace $\omega\tau \gg 1$ entonces:

$$e_1/x_I(j\omega) \approx K \quad (2.15)$$

Para hacer a $\omega\tau \gg 1$ para frecuencia bajas se requiere una τ grande. Para un condensador dado el valor de τ puede aumentarse únicamente aumentando a R . Típicamente, R será de $1 \text{ M}\Omega$ ó más. Esto, con el fin de evitar la carga del circuito transductor de capacitancia, es decir, el dispositivo conectando a los terminales de salida (e_0) debe tener una impedancia elevada de entrada de $10 \text{ M}\Omega$ ó más, para lo cual se requiere el uso de un amplificador de carga.

En los sistemas para medir diferencia de presiones se puede usar una configuración denominada D.P. CELL (Differential Pressure Cell), la cual consiste en una caja rígida, dividida por un diafragma, formando así dos compartimientos, uno de los cuales tiene comunicación externa que sirve para obtener la presión a medir y el otro puede tener o no orificio al exterior de la caja, dependiendo de la aplicación, Figura 2.22.

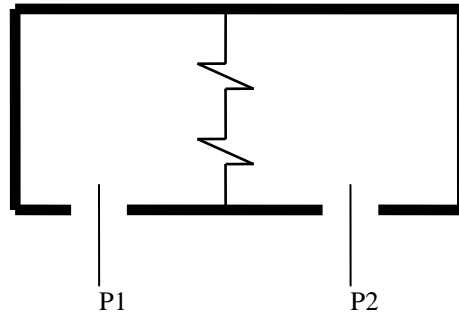
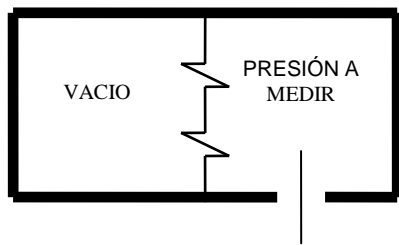
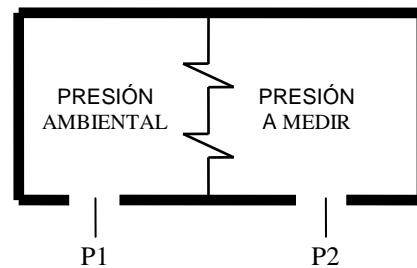


Figura 2.22 Configuración básica del D.P. CELL.

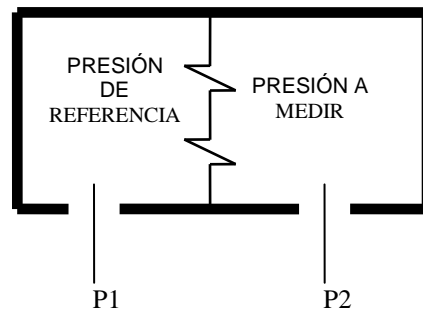
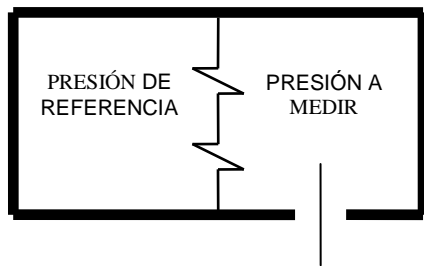
Estos sistemas son muy versátiles para medir presiones tales como los que se representan en la Figura 2.23. El uso de un capacitor variable diferencial con un circuito puente es mostrado en la D.P. Cell (transductor diferencial de presión) de la Figura 2.24.



a) Presión Absoluta



b) Presión manométrica (gage pressure)



c) Presión diferencial con referencia sellada.

d) Presión diferencial con referencia abierta

Figura 2.23 Medición de presión diferencial utilizando la configuración D.P. CELL.

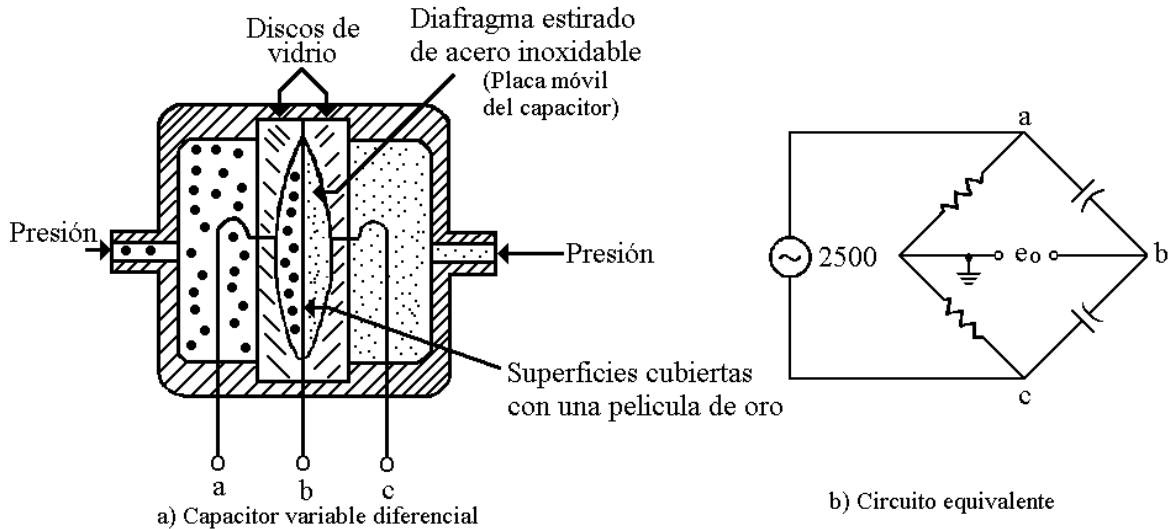


Figura 2.24 Transductor capacitivo para presión diferencial.

Los platos fijos del condensador diferencial están constituidos por dos depresiones esféricas que tienen una profundidad de 0,001 in o más, estas están enterradas dentro de dos discos de vidrio; las depresiones esféricas poseen un revestimiento de oro. Un delgado diafragma de acero inoxidable se sujeta entre los discos y sirve como placa móvil del condensador. Al aplicar presiones iguales en ambos extremos, el diafragma está en una posición neutral, por lo tanto, el puente se equilibra y e_o es cero. Sin embargo si una presión es mayor que la otra, el diafragma se desvía en la misma proporción a la presión, obteniéndose así un valor de e_o proporcional a la presión diferencial. Para la presión diferencial contraria e_o presenta un cambio de fase de 180° . Nuevamente para este caso se requiere un nivel alto de impedancia en la salida. Para obtener salidas en corriente continua o directa (dc) se pueden utilizar técnicas convencionales de demodulación y filtrado. El D.P. CELL permite la medición de deflexiones estáticas, estos dispositivos de capacitor para presión diferencial

presentan también una linealidad considerablemente mayor que la que presenta los tipos de capacitor sencillo.

Para evitar la no linealidad que existe entre x y C en la Ec. (2.8) se utiliza un amplificador de gran ganancia, el cual a su salida genera la tensión de salida e_0 . El amplificador está conectado con una configuración inversora, Figura 2.25.

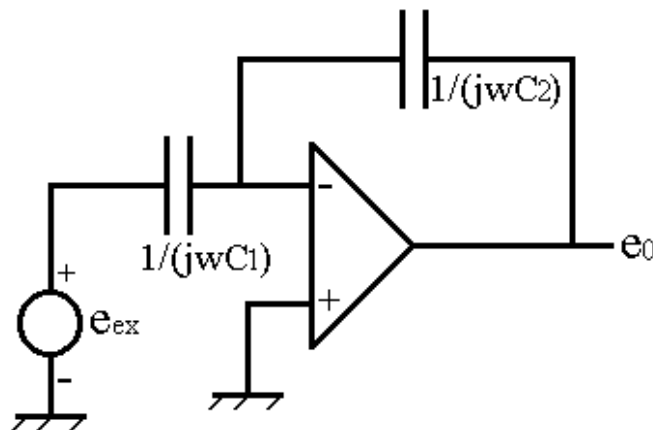


Figura 2.25 Amplificador conectado con una configuración inversora.

De la Figura 2.25 se obtiene que:

$$e_0 = -(C_1/C_2)e_{ex} \quad (2.16a)$$

donde:

e_{ex} = Tensión de alimentación del amplificador operacional en volt

C_1 = Capacitancia en pico farad

$C_2 = C = (0,225 \cdot A)/x$ en pico farad

Sustituyendo en valor de C en la Ec. (2.16a) se obtiene que:

$$e_0 = -(C_1 \cdot x \cdot e_{ex}) / (0,225 \cdot A) = K \cdot x \quad (2.16b)$$

donde además,

x = Separación entre las placas en pulgadas

A = Área de las placas en pulgadas cuadradas

K = Ganancia del amplificador operacional

2.7.2.1.2. Características

- Excitación: con corriente alterna (ac)
- Rango de capacitancia: (2 a 100) pF
- Exactitud: $\pm 0,05$ %
- Linealidad: ± 1 % fe
- Respuesta de frecuencia: (0 a >100) Hz
- Sensibilidad a golpes y vibración: buena
- Sensibilidad: 0,442 5 pF/mm
- Estabilidad: $\pm 0,05$ %/año
- Nivel de salida: alto > 100 mV
- Rango de presión: (1 a 1×10^{-6}) atm
- Rango de temperatura: (0 a 816) °C
- Histéresis, repetibilidad: 0,01 % fe

2.7.2.1.3. Ventajas

- Excelente respuesta de frecuencia.
- No es afectado por vibración.
- Poco volumen.
- El diafragma tiene poca masa.
- Construcción rígida.

- Mediciones estáticas o dinámicas.
- Desplazamiento volumétrico pequeño.
- Resolución continua.
- Alta capacidad de sobre-presión.
- Amplia gama de rangos de presión.

2.7.2.1.4. Desventajas

- Debido a que los cambios de capacitancia son muy pequeños puede producir distorsión.
- Alta impedancia de salida.
- Muy sensibles a variaciones de temperatura.
- Las desventajas anteriores se eliminan con diseños avanzados de acondicionamiento de señal.
- Necesita balance resistivo y capacitivo.
- Los elementos receptores pueden ser complejos.

2.7.2.1.5. Aplicaciones

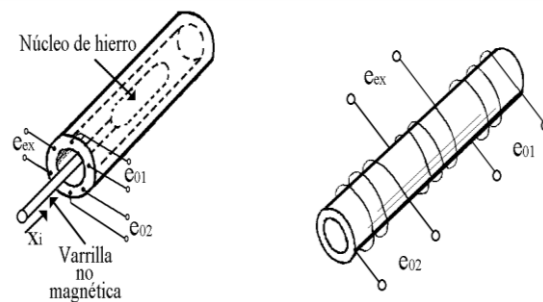
Se utiliza para la medición de variables tales como: desplazamiento, posición, flujo, nivel, vibración, presión absoluta, manométrica y diferencial y sonido. Se usa además en gases secos, limpios y corrosivos.

2.7.2.2. Transformador Lineal Diferencial Variable

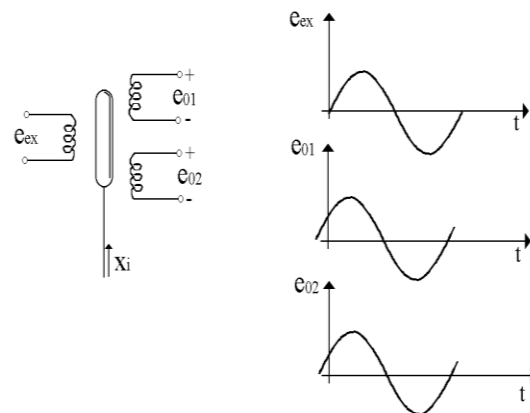
En la Figura 2.26a se presenta la construcción y el diagrama circuital de un Transformador Lineal Diferencial Variable (LVDT).

El LVDT está formado por tres bobinas colocadas en una disposición lineal, con un núcleo magnético que se puede mover libremente dentro de ellas, Figura 2.26b. La construcción de este dispositivo se indica en la Figura 2.26c. A la bobina central (primaria) se le aplica un voltaje alterno de excitación, de manera que el voltaje de salida de las dos bobinas externas (secundarias) depende del acoplamiento magnético entre el núcleo y las bobinas. Este acoplamiento, a su vez, depende de la posición del núcleo. Por lo tanto, el voltaje de salida del LVDT es indicación del desplazamiento del núcleo.

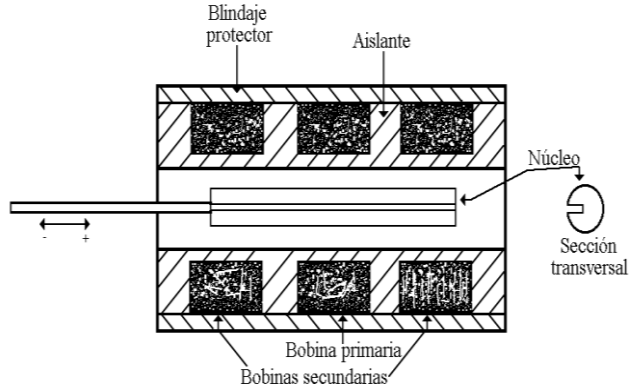
La fuente de excitación tiene un voltaje de salida que varía entre 3 V y 15 V y una frecuencia de (60 a 20 000) Hz. Las dos bobinas del secundario son mecánica y eléctricamente iguales, sus voltajes inducidos son de la misma frecuencia que la fuente de excitación, pero la amplitud varía con la posición del núcleo. Las dos bobinas del secundario están colocadas en forma simétrica con respecto a la bobina del primario.



a) Vista esquemática de los devanados.



b) Núcleo en la posición cero.



c) Construcción de un LVDT.

Figura 2.26 Transformador Lineal Diferencial Variable.

Cuando los secundarios son conectados en serie, pero de tal forma de que los flujos se resten, va a existir una posición del núcleo $x_i = 0$ de tal forma que la salida sea cero, $e_0 = 0$, Figura 2.27.

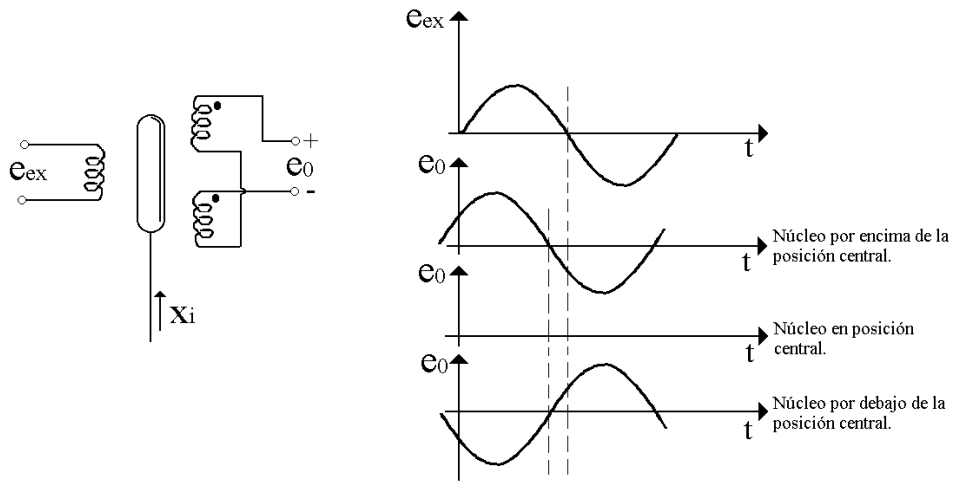


Figura 2.27 Conexión de los secundarios del LVDT.

Cuando el núcleo es desplazado hacia arriba, la tensión inducida en esa bobina es mayor que la de abajo, aumentando, la tensión de salida y disminuyendo a medida que el núcleo vuelve a la posición central, haciendo que la tensión de salida sea igual a cero nuevamente. El mismo análisis es válido si el núcleo se desplaza hacia abajo pero tomando en cuenta que se produce un cambio de fase de 180° entre un lado y otro de la posición central,

como se puede observar en la Figura 2.27. En conclusión, la tensión de salida e_o es función de la posición del núcleo y por lo tanto, el voltaje de salida del dispositivo es una indicación del desplazamiento del núcleo, como se observa en la figura N° 2.28.

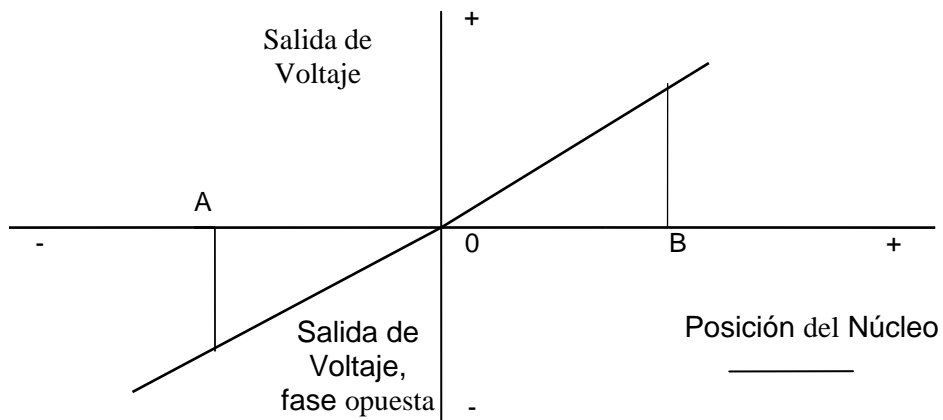


Figura 2.28 Voltaje del LVDT.

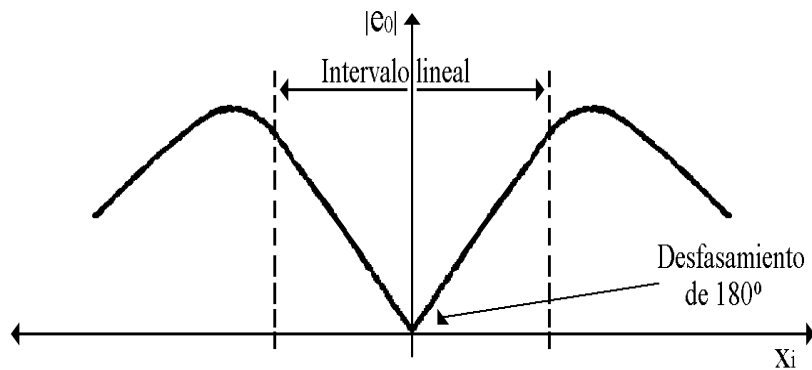


Figura 2.29 Características de salida de un LVDT.

La tensión de salida del LVDT, es lineal con respecto al desplazamiento de entrada, en casi todo el recorrido del núcleo como se observa en la Figura 2.29. El rango lineal de los LVDT comerciales se especifica claramente y en raras ocasiones, los dispositivos se hacen operar fuera de este rango. Cuando opera en el rango lineal, el dispositivo se denomina transformador lineal diferencial variable, LVDT. Cerca de la región central, se presenta un

ligero comportamiento no lineal como lo ilustra la Figura 2.30. En ella se indica la magnitud en valor absoluto de la salida en función de la posición del núcleo.

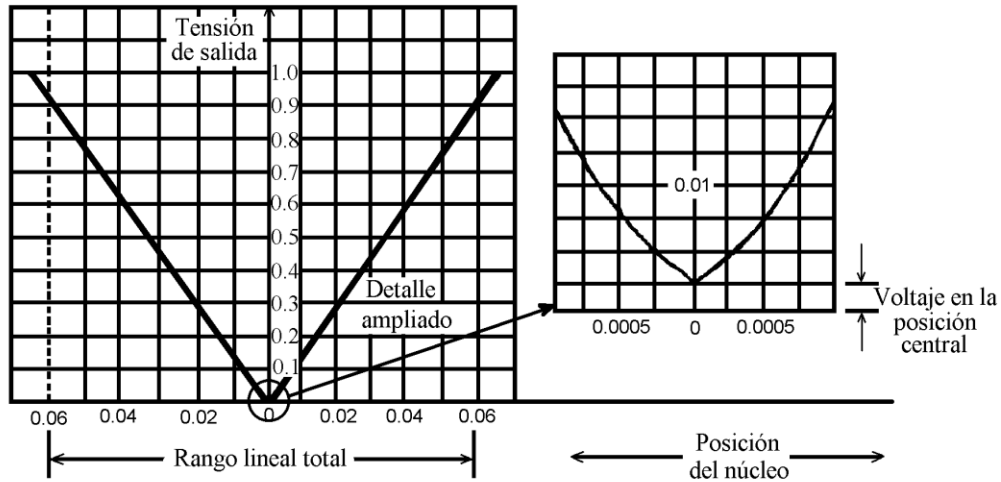


Figura 2.30 Gráfica en “V” para un LVDT.

2.7.2.2.1. Análisis Circuital

La salida e_o está generalmente desfasada con respecto a la excitación e_{ex} como se puede observar en las Figs. 2.26b y 2.27. El origen de este cambio de fase puede obtenerse analizando el circuito mostrado en la Figura 2.31.

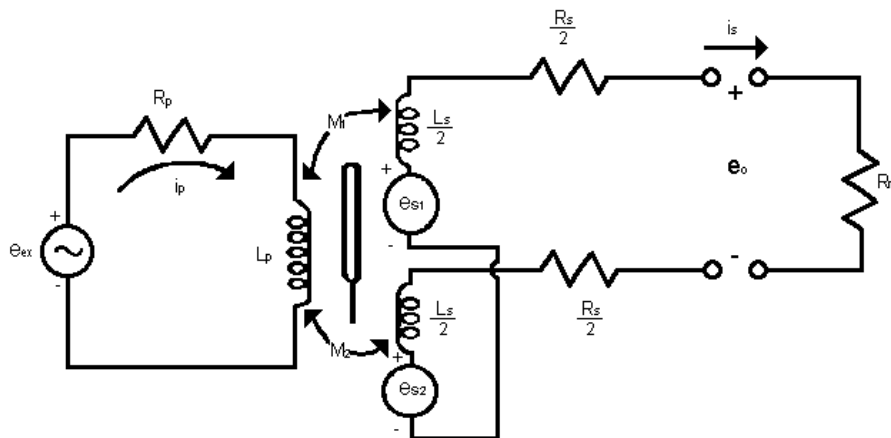


Figura 2.31 Circuito para el análisis del LVDT.

En el lado primario se tiene:

$$i_p \cdot R_p + L_p(di_p/dt) - e_{ex} = 0 \quad (2.17)$$

donde:

R_p = Resistencia del lado primario del transformador

i_p = Corriente que circula en el lado primario del transformador

L_p = Inductancia del lado primario del transformador

di_p/dt = Derivada de la corriente del primario del transformador en función del tiempo

e_{ex} = Fuente de alimentación del lado primario del transformador

Las tensiones inducidas en las bobinas del secundario vienen dadas por:

$$e_{s1} = M_1(di_p/dt) \quad (2.18)$$

$$e_{s2} = M_2(di_p/dt) \quad (2.19)$$

donde:

M_1 y M_2 = Inductancias mutuas del lado primario y secundario respectivamente.

En el lado del secundario, el voltaje de salida viene dado por:

$$e_s = e_{s1} - e_{s2} = (M_1 - M_2)(di_p/dt) \quad (2.20)$$

La diferencia entre M_1 y M_2 es la cantidad que varía linealmente con el movimiento del núcleo. Si la salida es a circuito abierto, se tiene para una posición fija del núcleo:

$$e_o = e_s = (M_1 - M_2) \left(s / (L_p s + R_p) \right) e_{ex} \quad (2.21)$$

donde:

$$e_o / e_{ex} (s) = \left((M_1 - M_2) / R_p \right) s / (\tau_p s + 1) \quad (2.22)$$

siendo la constante de tiempo:

$$\tau_p = L_p/R_p \quad (2.23)$$

En dominio de la frecuencia se tiene:

$$e_0/e_{ex}(j\omega) = \left((M_1 - M_2)/R_p \right) / \sqrt{(\omega\tau_p)^2 + 1} \quad \left| \begin{array}{l} \phi \end{array} \right. \quad (2.24)$$

siendo:

$$\phi = 90^\circ - \tan^{-1} \omega\tau_p \quad (2.25)$$

Se obtiene de esta forma el cambio de fase que existe entre las tensiones de salida y de entrada del LVDT. Si se tiene en los terminales de salida una carga tal como R_m , Figura 2.31, en el secundario también fluye corriente (i_s) y se puede escribir:

$$i_p R_p + L_p s i_p - (M_1 - M_2) s i_s - e_{ex} = 0 \quad (2.26)$$

$$(M_1 - M_2) s i_p + (R_s + R_m) i_s + L_s s i_s = 0 \quad (2.27)$$

donde:

$$e_0/e_{ex} = A \quad (2.28)$$

con:

$$A = (R_m (M_2 - M_1) s) / \left[\left((M_1 - M_2)^2 + L_p L_s \right) s^2 + \left((L_p (R_s + R_m) + L_s R_p) s \right) + (R_s + R_m) R_p \right]$$

donde:

R_p = Resistencia del lado primario del transformador

i_p = Corriente que circula en el lado primario del transformador

L_p = Inductancia del lado primario del transformador

R_s = Resistencia del lado secundario del transformador

i_s = Corriente que circula en el lado secundario del transformador

L_s = Inductancia del lado secundario del transformador

s = Transformada de Laplace

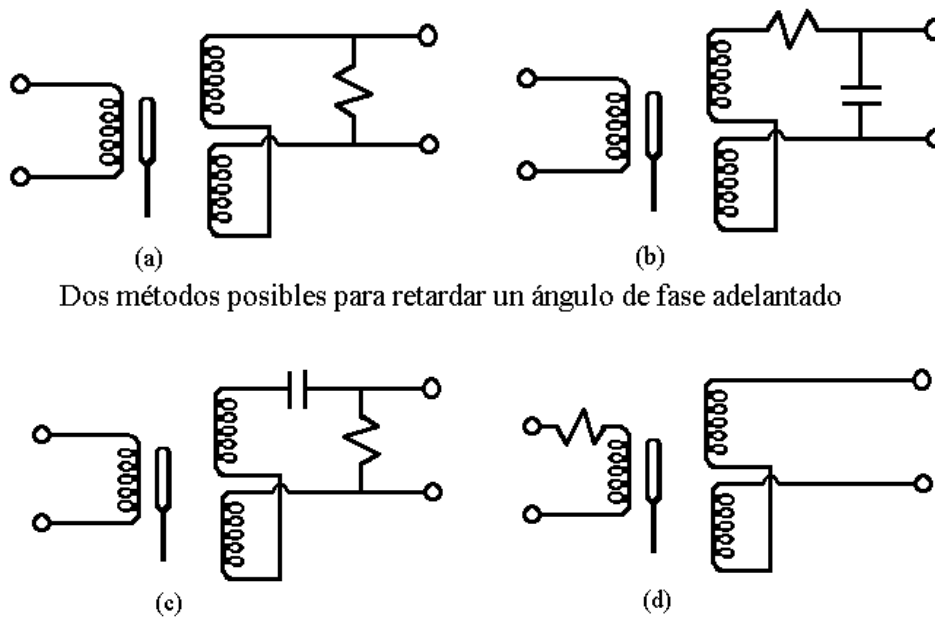
M_1 y M_2 = Inductancias mutuas del lado primario y secundario respectivamente

R_m = Resistencia de carga

e_{ex} = Fuente de alimentación del lado primario del transformador

e_0 = Tensión de salida del transformador

Analizando la respuesta en frecuencia de $e_0/e_{ex}(j\omega)$ se tiene un ángulo de fase de $+90^\circ$ para bajas frecuencias y -90° para altas frecuencias, obteniéndose en algún punto entre ellos, un ángulo de fase igual a cero. Si por alguna razón, la frecuencia de excitación no puede ser ajustada a este valor, se puede obtener el mismo efecto haciendo una compensación en frecuencia, utilizando uno de los métodos mostrados en la Figura 2.32.

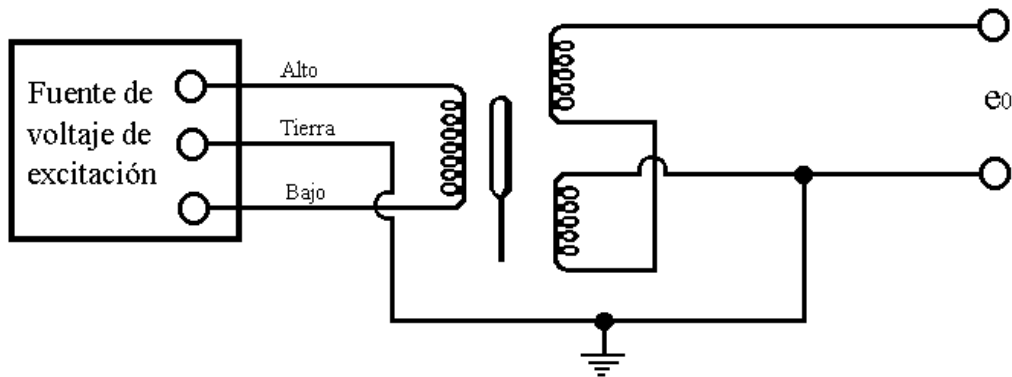


Dos métodos posibles para retardar un ángulo de fase adelantado

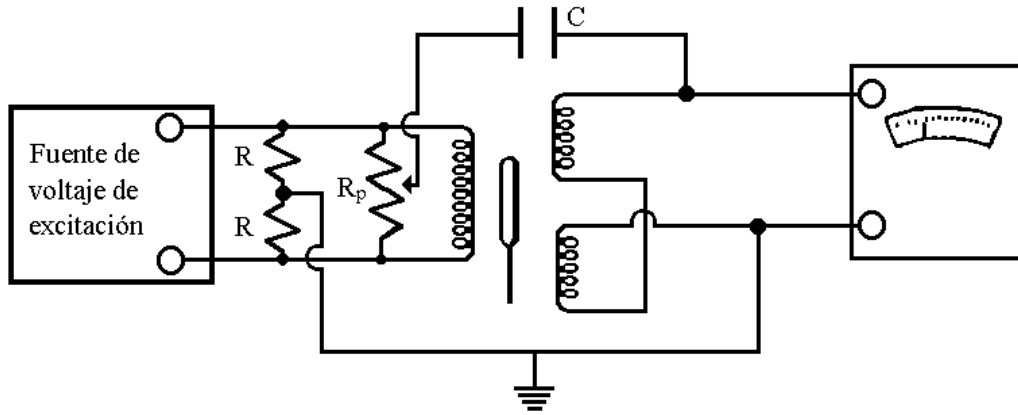
Dos métodos posibles para adelantar un ángulo de fase atrasado

Figura 2.32 Circuito para el ajuste del ángulo de desfasaje entre e_0 y e_{ex} .

El voltaje de salida en la posición central del núcleo es idealmente cero, pero puede ser que exista, para esa posición, una pequeña tensión de salida debido a las armónicas en el voltaje de excitación y a las capacitancias creadas debido al acoplamiento entre el primario y el secundario. En condiciones normales, son aceptables valores menores que el uno por ciento del voltaje de salida. El montaje de la figura 2.33a se usa cuando la fuente de voltaje de excitación tiene tres terminales de salida. La conexión a tierra tiende a disminuir el efecto de las capacitancias entre los acoplamientos. Si se tiene una fuente de tensión solamente con dos terminales de salida, se puede usar el montaje de la Figura 2.33b. En este circuito, con el núcleo del LVDT en la posición de tensión de salida mínima y colocando el detector, se ajusta el potenciómetro hasta que la lectura obtenida sea la mínima. Los valores de R y R_p no son críticos, pudiendo ser sus valores tan pequeños como sea posible sin que cargen la fuente de excitación.



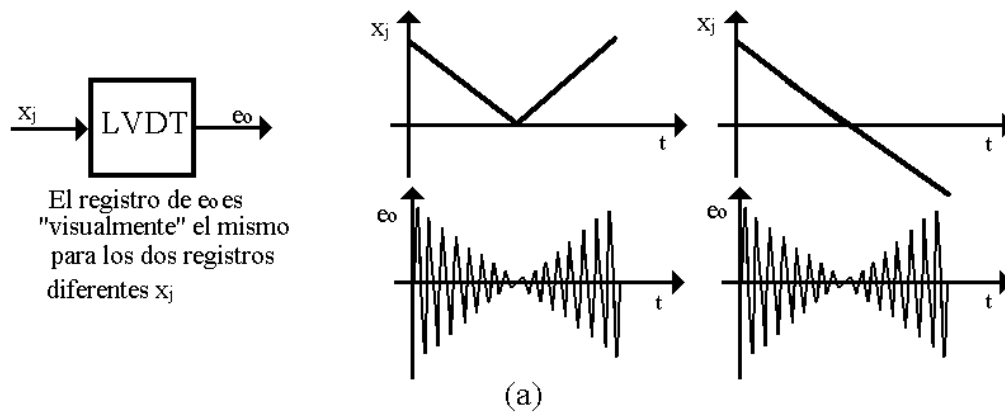
(a) Fuente con tres terminales



(b) Fuente con dos terminales

Figura 2.33 Métodos para reducción de nulo.

La salida de un LVDT es una onda senoidal cuya amplitud es proporcional al movimiento del núcleo. Si esta salida es aplicada a un voltímetro ac, la lectura del medidor puede ser calibrada directamente en unidades de movimiento. Este arreglo es satisfactorio para mediciones estáticas o desplazamientos que varíen muy lentamente sin tomar en cuenta el sentido del desplazamiento del núcleo, ya que el voltímetro no detecta el cambio de fase de 180° del mismo, figura 2.34a. Si los desplazamientos del núcleo son rápidos y se desea detectar el cambio de fase, se puede utilizar un osciloscopio para captar la señal de salida del LVDT.



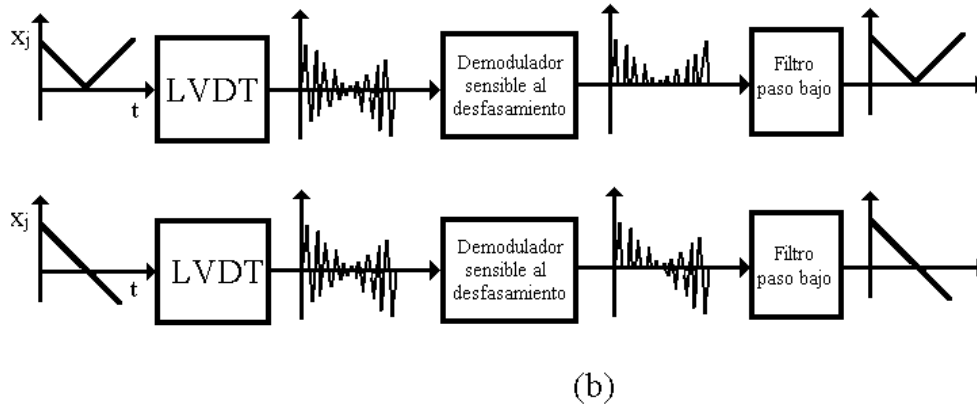


Figura 2.34 Demodulación y Filtraje de la señal de salida del LVDT.

En general, la frecuencia del movimiento del núcleo es baja y si la frecuencia de la fuente de excitación es baja también, se tiene a la salida una señal modulada en amplitud de baja frecuencia, donde la señal que representa el movimiento del núcleo es difícil de detectar. Para evitar este problema se realiza el montaje de la Figura 2.34b donde se tiene a la salida del LVDT una señal modulada en amplitud, en la cual la portadora es de una frecuencia por lo menos diez veces mayor que la frecuencia de la señal moduladora (movimiento del núcleo). Luego se pasa la señal a través de un demodulador sensible a la fase con la finalidad de detectar el movimiento del núcleo en los dos lados del cero de referencia y finalmente a través de un filtro paso bajo para obtener la señal deseada que es la producida por el desplazamiento del núcleo.

2.7.2.2.2. Características del LVDT

Una característica muy importante en los LVDT es la linealidad del mismo. El esfuerzo de diseño se centra en lograr que sea lineal. La linealidad se considera como la cercanía de la curva de calibración a una recta. El grado de linealidad, es la máxima desviación de la curva de calibración respecto a la línea recta más cercana que pase por el origen.

En no todos los transductores esta línea recta pasa por el origen, pero en los LVDT debe pasar por el origen, aunque la curva de calibración no lo haga, como es el caso ya estudiado cuando existen armónicos en el voltaje de excitación y a las capacitancias creadas debido al acoplamiento entre el primario y el secundario. Este caso se presenta en la Figura 2.35.

En un caso típico se tiene que el núcleo se desplaza en un rango lineal de 0,635 cm. Para ese desplazamiento se tiene que la tensión de salida es 1,25 V en el extremo del rango lineal de excitación de 5 V. Si para este caso 5 mV es la máxima desviación, se tiene que el dato de linealidad es:

$$\text{linealidad} = (0,005/1,25) \cdot 100 = 0,4 \% \quad (2.29)$$

que es un valor que da una apreciación de la cercanía de la curva de calibración a la recta.

Con los datos anteriores se obtiene la sensibilidad del LVDT.

$$\text{sensibilidad} = 1,250 \text{ V} / (5 \text{ V} \cdot 0,250 \text{ in})$$

$$\text{sensibilidad} = 1 \text{ mV} / (1 \text{ V} \cdot 0,001 \text{ in}) \quad (2.30)$$

quiere decir que se obtiene 1 mV en la salida por cada volt aplicado al primario cuando el núcleo tiene un desplazamiento de una milésima de pulgada. Este valor de sensibilidad es un valor real y promedio. Un LVDT más sensible tiene 2 mV/(1 V·0,001 in)

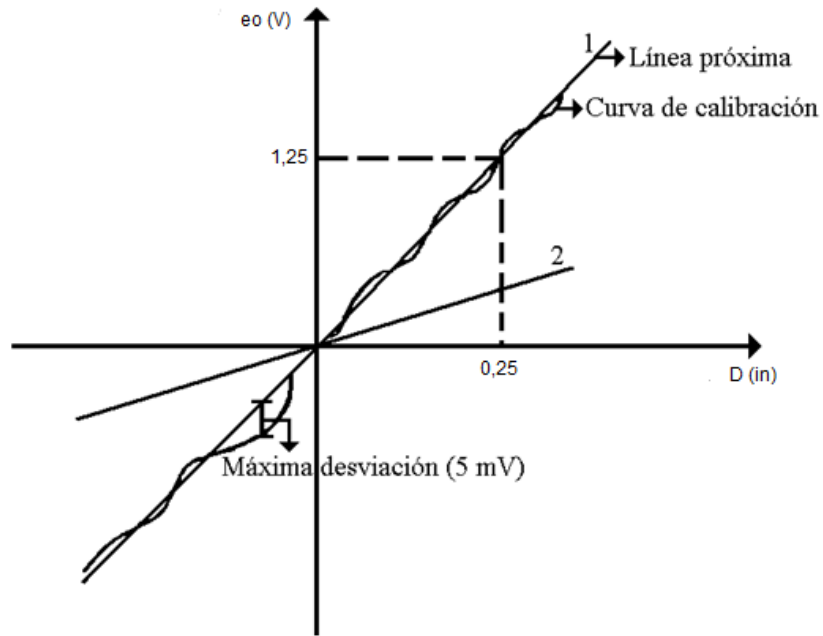


Figura 2.35 Característica Lineal del LVDT.

La resolución del LVDT depende del instrumento de salida. Por si solo, es teóricamente infinita, pero al ser utilizado tiene una resolución típica del 0,1 % de plena escala, con la cual se puede conocer el mínimo desplazamiento que el transductor puede detectar. En el ejemplo anterior se tiene un desplazamiento máximo de 0,250 in, que al tomar el 0,1 % se obtiene 0,000 25 in que es el mínimo desplazamiento que el LVDT detectaría.

La sensibilidad depende de la frecuencia; al analizar la Ec. (2.24) se encuentra un valor mínimo de frecuencia, por debajo del cual, la relación entre la salida y la entrada va a disminuir afectando claramente el valor de la sensibilidad como se puede obtener al analizar la Ec. (2.30), debido a que la tensión de salida disminuye. Cuando se analiza la Ec. (2.28) se obtiene un par de frecuencias dentro de las cuales se garantiza que el LVDT es lineal; si se trabaja fuera de ellas la tensión de salida va a disminuir y por lo tanto la sensibilidad también.

Analizando la Ec. (2.28) en función de la resistencia de carga R_m se tiene que cuando es mucho mayor que la impedancia de salida del secundario, no afecta a la tensión de salida,

pero a medida que se disminuye hasta hacerse comparable, el valor de tensión de salida va a disminuir, cambiando la pendiente de la característica lineal del LVDT por lo que la tensión de salida disminuye, haciendo lo mismo la sensibilidad, aunque la linealidad se mantiene como se puede observar en la línea 2 en la Figura 2.35.

Los LVDT pueden tener núcleo en forma de E ó en forma de π , los cuales producen una variación grande de reluctancia debida a los pequeños movimientos de la armadura, haciendo variar así los flujos generados en los devanados secundarios del transformador.

Entre las características típicas comerciales de los LVDT se tienen:

- Excitación: (3 a 15) V
- Frecuencia (60 a 20 000) Hz
- Nivel de salida: alto > 100 mV
- Rango de presión: (30 a 10×10^3) psi
- Rango de temperatura: (-55 a 150) °C
- Sensibilidad: (0,6 a 30) mV / (3 a 6) V x 0,001 in aumentando con la frecuencia
- Sensibilidad a golpes y vibración: buena
- Exactitud: $\pm 0,05$ %
- Linealidad: $\pm 0,5$ % fe
- Respuesta de frecuencia: >100 Hz
- Estabilidad: $\pm 0,25$ %/año
- Potencia requerida: < 1 W
- Desplazamiento máximo típico: $\pm (0,005$ a 3) in ó $\pm (0,127$ a 76,2) mm

2.7.2.2.3. Ventajas

- Medición sin fricción.
- Vida mecánica muy larga.
- Resolución continua.
- Baja o nula histéresis.
- Alta tensión de salida.
- Excelente linealidad.
- Mediciones estáticas y dinámicas.
- Aislamiento entre la entrada y la salida.

2.7.2.2.4. Desventajas

- Excitado solo con corriente alterna (ac).
- Salida diferente de cero en la posición de nulo es afectada por armónicas en el voltaje de excitación y capacitancias de acoplamiento.
- Sensibilidad es función de la frecuencia y de la resistencia de carga.

2.7.2.2.5. Aplicaciones

Se utiliza para la medición de variables tales como: desplazamiento, posición, vibración, fuerza, presión, nivel y flujo.

2.7.2.3. Piezoeléctrico

Considere el arreglo mostrado en la Figura 2.36. Si se coloca un cristal piezoeléctrico entre dos placas que hacen las veces de electrodos y se aplica una fuerza a las placas, se produce un esfuerzo y, por ende, una deformación. En ciertos cristales, esta deformación

producirá una diferencia de potencial en su superficie; a este efecto se le denomina efecto piezoeléctrico.

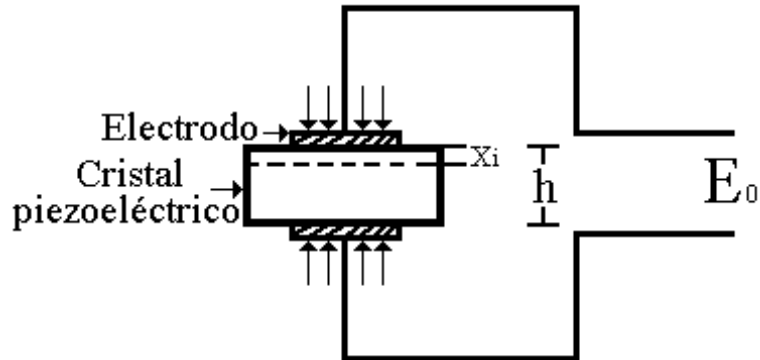


Figura 2.36 Transductor piezoeléctrico.

La carga inducida sobre el cristal es proporcional a la fuerza aplicada y está dada por:

$$Q = d \cdot F \quad (2.31)$$

donde:

Q = Carga eléctrica inducida

F = Fuerza aplicada

d = Constante piezoeléctrica

El voltaje de salida del cristal está dado por:

$$E_0 = Se \cdot h \cdot P \quad (2.32)$$

donde:

E_0 = Voltaje de salida diferencial en volt

Se = Sensibilidad de voltaje del transductor

$Se = d/\epsilon$ en (volt/metro)/(newton/metro cuadrado)

h = Distancia entre placas en metro

P = Presión aplicada newton por metro cuadrado

ϵ = Permitividad del material entre placas

Los valores de la constante piezoeléctrica y de la sensibilidad de voltaje para algunos materiales piezoeléctricos comunes se presentan en la Tabla 2.2.

El voltaje de salida depende de la dirección en la cual se realiza el corte del cristal con respecto a los ejes del mismo. En la Tabla 2.2, un corte en X (o en Y) significa que la perpendicular a la cara más grande del corte está en la dirección de eje x (o eje y) del cristal.

Los cristales piezoeléctricos también pueden sujetarse a esfuerzos cortantes, en vez de fuerzas compresivas simples como las mostradas en la Figura 2.36, pero en este caso el voltaje de salida es una función complicada de la orientación exacta del cristal. Los cristales piezoeléctricos se usan ampliamente como transductores baratos de presión para mediciones dinámicas y se emplean comúnmente como fonocaptores.

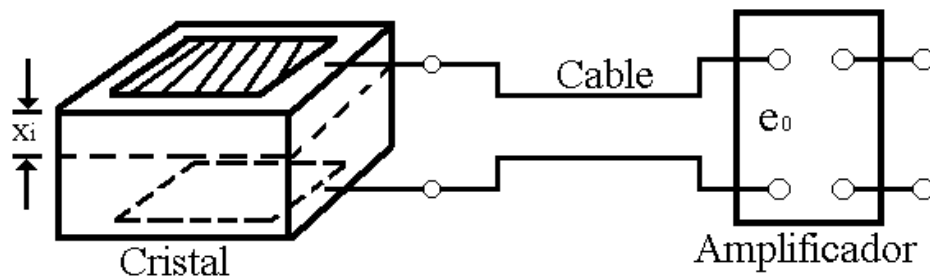
Tabla 2.2 Constantes piezoeléctricas.

Material	Orientación	Sensibilidad de carga (d) en (C/m²)/(N/m²)	Sensibilidad de voltaje (Se) en (V/m)/(N/m²)
Cuarzo	Corte X ; largo sobre Y , largo longitudinal	$2,25 \times 10^{-12}$	0,055
	Corte X ; espesor longitudinal	-2,04	-0,050
	Corte Y ; esfuerzo cortante al espesor	4,4	-0,108
Sal de Rochelle	Corte X , 45°; largo longitudinal	435,0	0,098
	Corte Y , 45°; largo longitudinal	-78,4	-0,29
Fosfato dihidrogenado de amonio	Corte Z , 0°; esfuerzo cortante frontal	48,0	0,354
	Corte Z , 45°; largo longitudinal	24,0	0,177
Cerámicas comerciales de titanato de bario	A polarización	130 a 160	0,010 6
	A polarización	-56,0	0,004 2 a 0,005 3

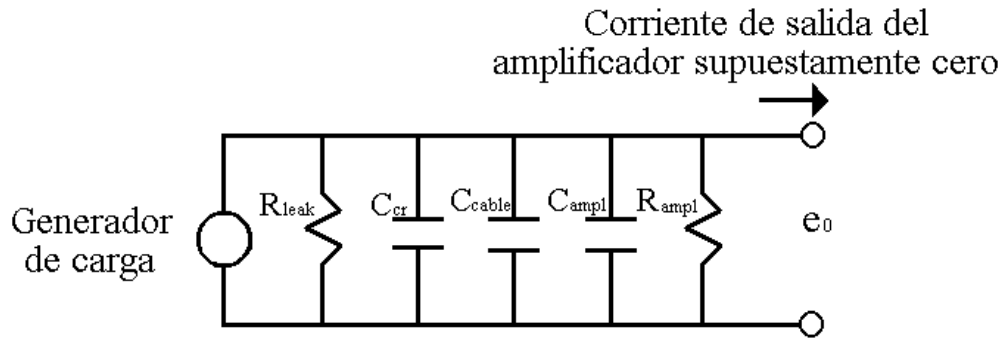
2.7.2.3.1. Análisis Circuital

Para el análisis circuital es necesario considerar el transductor, el cable de conexión y el amplificador como una sola unidad. La impedancia del transductor es generalmente muy elevada, por lo tanto, el amplificador es generalmente un amplificado de carga, que se usa como adaptador de impedancia con ganancia la unidad. La capacitancia del cable puede ser importante, en especial cuando es largo. Para el transductor sólo, si se aplica una flexión estática x_i y se mantiene, se produce un voltaje en los terminales, pero la carga se perderá a través de la resistencia de fuga del transductor. Como la R de fuga es generalmente muy grande del orden de $100 \text{ G}\Omega$, esta disminución será muy lenta, permitiendo una respuesta casi estática. No obstante, cuando se conecta al transductor un voltímetro con baja impedancia, la carga se escapa con rapidez impidiendo la medición de los desplazamientos estáticos. Ni aún los amplificadores de carga de alta impedancia permiten por lo general, hacer mediciones estáticas. Algunos sistemas de fabricación comercial que usan transductores de cuarzo (con resistencia de fuga muy elevada) logran una resistencia totalmente efectiva de $100 \text{ T}\Omega$, lo cual produce una fuga lo suficientemente lenta para permitir las medidas estáticas.

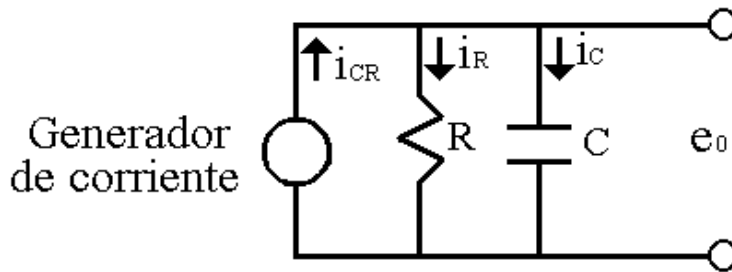
Para un análisis cuantitativo, se considera la Figura 2.37.



(a) Transductor piezoeléctrico como una sólo unidad



(b) Circuito equivalente eléctrico



(c) Circuito eléctrico combinado

Figura 2.37 Circuito equivalente del transductor piezoeléctrico.

La carga generada por el cristal puede expresarse como:

$$Q = k_q \cdot x_i \quad (2.33)$$

donde:

k_q = Carga que posee el cristal

x_i = deflexión

Las resistencias y capacitancias de la Figura 2.37b pueden combinarse como en la Figura 2.37c. Además, se convierte el generador de carga en generador de corriente, de acuerdo a:

$$i_{cr} = dq/dt = k_q(dx_i/dt) \quad (2.34)$$

Se puede entonces escribir,

$$i_{cr} = i_c + i_R \quad (2.35)$$

$$e_0 = e_c = (\int i_c dt)/C = (\int (i_{cr} - i_R) dt)/C \quad (2.36)$$

$$C(de_0/dt) = i_{cr} - i_R = k_q(dx_i/dt) - e_0/R \quad (2.37)$$

arreglando la Ec. (2.37), se obtiene una relación de primer orden:

$$e_0/x_i(s) = k\tau s/(\tau s + 1) \quad (2.38)$$

donde:

$$k \cong \text{sensibilidad} \cong k_q/C \quad (2.39)$$

$$\tau_{(s)} \cong \text{constante de tiempo} \cong RC \quad (2.40)$$

Se observa que la respuesta de régimen permanente a un x_i constante es cero, por lo tanto no se pueden medir los desplazamientos estáticos. Para una respuesta escalón dentro de un 5% de amplitud, la frecuencia debe exceder a ω_1 , donde

$$(0,95)^2 = (\omega_1\tau)^2/((\omega_1\tau)^2 + 1) \quad (2.41)$$

$$\text{y } \omega_1 = 3,04/\tau \quad (2.42)$$

así, un τ grande da una respuesta precisa a bajas frecuencias.

La respuesta de estos transductores se aclara más al considerar el desplazamiento de entrada de la Figura 2.38.

La ecuación diferencial es:

$$(\tau s + 1)e_0 = K\tau s x_i \quad (2.43)$$

como $x_i = A$ para $0 < t < T$, ésta se convierte en:

$$(\tau s + 1)e_0 = 0 \quad (2.44)$$

ahora, a $t = 0^+$ el desplazamiento x_i es A y, en consecuencia, la carga aumenta repentinamente, a $k_q A$, y e_o aumenta de súbito a $(k_q A)/C$. Así, la condición inicial es:

$$e_o = (k_q A)/C \quad \text{para} \quad t = 0^+ \quad (2.45)$$

Resolviendo la Ec. (2.44) con la condición inicial (2.45) da:

$$e_o = (k_q A/C)e^{-t/\tau} \quad 0 < t < T \quad (2.46)$$

La Ec. (2.46) es válida hasta $t = T$. En este instante se debe dejar de usarla debido al cambio de x_i . Para $T < t < \infty$ la ecuación diferencial es:

$$(\tau s + 1)e_o = 0 \quad (2.47)$$

a $t = T$ la Ec. (2.46) todavía es válida y

$$e_o = (k_q A/C)e^{-T/\tau} \quad (2.48)$$

Ahora, en $t = T$, x_i repentinamente disminuye una cantidad A , produciendo un cambio brusco de carga de $k_q A$ y un cambio en e_o de $(k_q A)/C$ de su valor a $t = T^-$. Así, en $T = T^+$, e_o está dada por:

$$e_o = (k_q A/C)(e^{-T/\tau} - 1) \quad (2.49)$$

que se convierte en la condición inicial para la Ec. (2.47). La solución se convierte entonces en:

$$e_o = (k_q A/C)(e^{-T/\tau} - 1)e^{-(t-T)/\tau} \quad T < t < \infty \quad (2.50)$$

La Figura 2.38 muestra el proceso completo para tres valores diferentes de τ . Es claro que conviene un τ grande para la reproducción exacta de x_i . Si la disminución y las "señales inversas" en $t = T$ deben mantenerse dentro del 5% del valor verdadero, τ debe ser

por lo menos $20T$. Si se requiere un aumento de τ para una aplicación específica, puede obtenerse aumentando R , C ó ambas. El aumento de C se obtiene conectando un capacitor externo en paralelo a los terminales del transductor, porque los capacitores en paralelo se suman directamente. El precio pagado por este aumento de τ es una pérdida de la sensibilidad de acuerdo a $k = k_q/C$. Esto puede tolerarse a menudo debido a la elevada sensibilidad de los dispositivos piezoeléctricos. Un aumento en R generalmente requiere un amplificador de mayor resistencia de entrada. Si puede sacrificarse la sensibilidad, un resistor conectado en serie fuera del amplificador, como se muestra en la Figura 2.39, aumentará τ sin necesidad de obtener un amplificador diferente (se asume que la R de drenaje y la C del amplificador son despreciables).

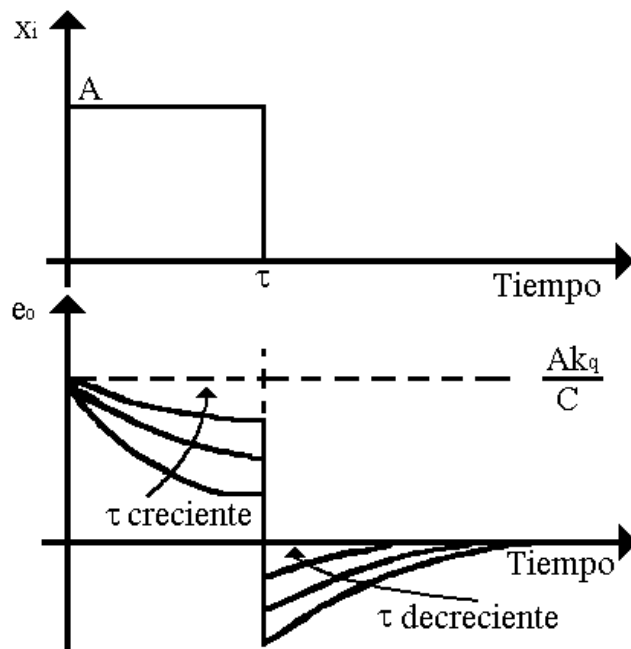


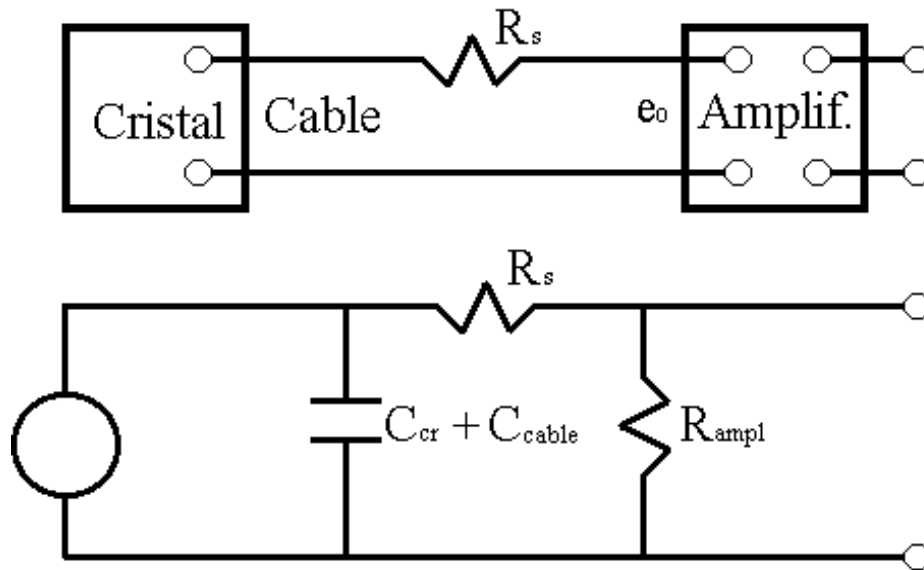
Figura 2.38 Pulso de respuesta del transductor piezoeléctrico.

De la Figura 2.39 se puede obtener:

$$K \approx (k_q / C) (R_{ampli} / (R_{ampli} + R_s)) \quad (2.51)$$

$$\tau \approx (R_{\text{ampli}} + R_s)C \quad (2.52)$$

$$C \approx C_{\text{cr}} + C_{\text{cable}} \quad (2.53)$$



Nota: la resistencia de drenaje y la capacidad de amplificador son despreciables

Figura 2.39 Uso de un resistor en serie para aumentar la constante de tiempo.

2.7.2.3.2. Características.

Los elementos piezoeléctricos pueden ser interconectados en serie o en paralelo. La conexión serie conduce a una tensión de salida mayor para la misma fuerza y en paralelo se obtiene una impedancia más pequeña de salida.

Las placas de cristal pueden estar arregladas de modo que la respuesta de cristales adyacentes a una vibración externa o a una fuerza indeseada sea compensada eléctricamente.

Pocos materiales son prácticos para transductores con entrada por efecto piezoeléctrico; en primer lugar el cuarzo, es mecánica y térmicamente el más estable entre

ellos. Su resistividad es alta, $100 \text{ T}\Omega/\text{cm}$. Su aplicación es restringida a los usos donde existe alta estabilidad mecánica o en operaciones a elevadas temperaturas (el material puede ser operado sin peligro hasta $550 \text{ }^\circ\text{C}$).

Las placas de cuarzo son aplicables por su espesor y su buena operación transversal en compresión ó expansión. Los efectos de compresión a lo ancho (espesor) y compresión transversal son opuestos en signo pero no son iguales en magnitud.

El voltaje de salida versus la deformación de entrada, forman una característica que no es lineal, excepto sobre un pequeño rango de operación.

Entre las características típicas comerciales de los transductores piezoeléctricos se tienen:

- Excitación: autogeneración de ac
- Nivel de salida: bajo $< 100 \text{ mV}$
- Exactitud: $\pm 1 \%$
- Respuesta de frecuencia: 1 Hz a $> 100 \text{ kHz}$
- Estabilidad: $\pm 1 \%$ /año
- Impedancia de salida alta: $R = 10 \text{ G}\Omega$ y $C = 500 \text{ pF}$.
- Rango de presión: $(0,1 \text{ a } 10 \times 10^3) \text{ psi}$
- Rango de temperatura: $(-240 \text{ a } 260) \text{ }^\circ\text{C}$
- Sensibilidad de voltaje: $(0,06 \text{ a } 1,2) \text{ (V/m)(N/m}^2\text{)}$
- Materiales piezoeléctricos comunes: cuarzo, sal de rochelle, fosfato dihidrogenado de amonio, cerámicas comerciales de titanio de bario

2.7.2.3.3. Ventajas.

- Alta salida: (1 a 30) mV/Se.
- Alta respuesta de frecuencia.
- Es autogenerador.
- Pequeño tamaño.
- Cambio de fase despreciable.
- Construcción robusta.
- Opera en un amplio rango de temperatura.
- Mediciones dinámicas y estáticas.
- Responde a niveles altos de choque.

2.7.2.3.4 Desventajas.

- Muy sensible a cambios de temperatura.
- Alta impedancia de salida.
- Usualmente requiere un amplificador de tensión a la salida.
- Muy sensible a otro sentido de aceleración.
- Cables largos generan ruido y/o armónicos.

2.7.2.3.5. Aplicaciones.

Se utiliza para la medición de variables tales como: fuerza, presión, nivel, flujo, desplazamiento, vibración y aceleración.

2.7.2.4. Potenciométrico.

Básicamente consiste de un elemento resistivo provisto con un contacto móvil. El movimiento del contacto puede ser lineal, angular o una combinación de los dos, dependiendo del tipo de medición requerido, Figura 2.40.

El elemento resistivo puede ser excitado con tensión continua o alterna y el voltaje de salida es (idealmente) una función lineal del desplazamiento del contacto móvil (cursor). El elemento resistivo puede ser un conductor sólido o una pieza de grafito. Este tipo de transductor tiene problemas de linealidad por carga y por construcción.

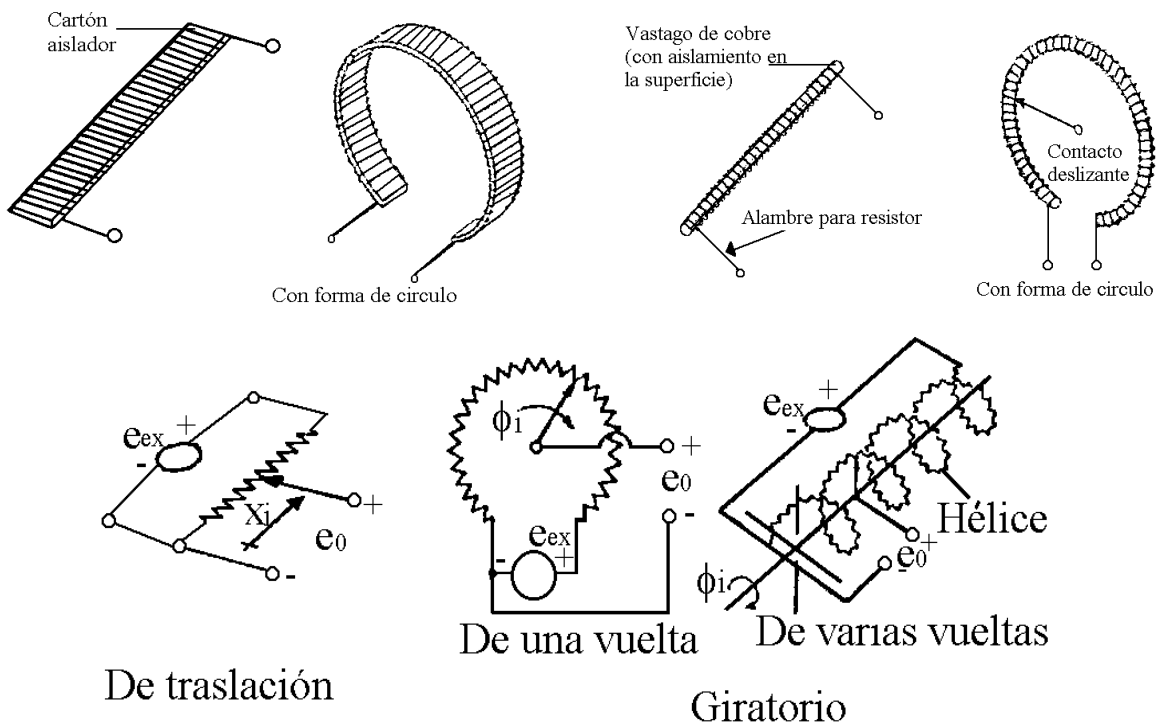


Figura 2.40 Transductor potenciométrico.

2.7.2.4.1. Análisis Circuitual.

Para hacer un análisis circuitual del Potenciómetro se usará el circuito mostrado en la Figura 2.41a. A partir de él se obtiene la relación entre las señales de entrada y salida.

$$e_0/e_{ex} = 1 / \left(1 / \left((x_i / x_t) + (R_p / R_m) (1 - (x_i / x_t)) \right) \right) \quad (2.54)$$

donde:

x_i = Longitud a la cual está el cursor en el potenciómetro

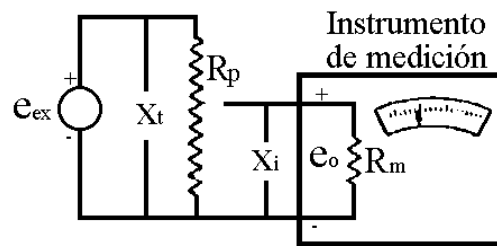
x_t = Longitud total del potenciómetro

R_p = Resistencia del potenciómetro

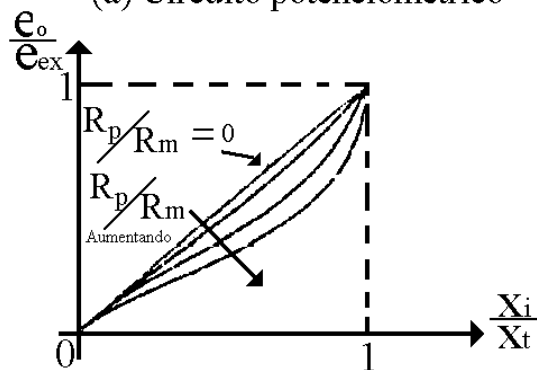
R_m = Resistencia de carga del instrumento de medición

Si la salida es a circuito abierto se tiene para: $R_p/R_m = 0$

$$e_0/e_{ex} = x_i/x_t \quad (2.55)$$



(a) Circuito potenciométrico



(b) Relación voltaje vs desplazamiento

Figura 2.41 Efecto de carga en potenciómetro.

Luego, la relación es lineal cuando la resistencia de carga es infinita, Figura 2.41b. Ahora, si se tiene una carga diferente de infinito, la relación entre el voltaje de salida e_0 y la posición del cursor x_i , no es lineal como se puede observar en la Figura 2.41b. A medida que

la relación entre R_p/R_m va aumentando el error en la medición va aumentando también. El error máximo es cerca del 12 % del fondo de escala si $R_p/R_m=1,0$ y disminuye a cerca de 1,5 % cuando $R_p/R_m=0,1$. Para valores de $R_p/R_m < 0,1$ la posición del máximo error se obtiene para $x_i/x_t = 0,67$ y el valor de error es aproximadamente $15 R_p/R_m$ % del fondo de escala.

Conocida la relación entre e_0 y x_i para un valor dado e_{ex} y x_t , se puede graduar directamente la escala del voltímetro en desplazamiento, presión, nivel o flujo.

Haciendo un análisis en frecuencia de la Ec. (2.54) se observa que no depende de la frecuencia la tensión de salida del potenciómetro como era de esperarse.

La resolución está en función de la resistencia total del potenciómetro por lo que, no se puede seleccionar en forma independiente el valor de R_p y la resolución. En el caso de requerir buena resolución y alta resistencia, se debe seleccionar una resistencia de película de carbón, donde se puede obtener una resolución de 5×10^{-6} in.

Se obtuvo que para buena linealidad, se debe utilizar un voltímetro con una R_m de por lo menos diez veces R_p . Ahora, la sensibilidad depende de la resistencia del potenciómetro, R_p y conociendo que e_0 es directamente proporcional con e_{ex} , se puede incrementar la sensibilidad incrementando e_{ex} , pero R_p está limitada por su disipación de potencia P , luego la máxima tensión de excitación viene dada por:

$$e_{ex(m\acute{a}x.)} = \sqrt{PR_p} \quad (2.56)$$

donde:

P = Potencia eléctrica

Así, con valores bajos de R_p , se obtienen tensiones pequeñas dando como resultado, disminución en la sensibilidad. En este análisis se concluye que, al seleccionar un potenciómetro, R_p , se debe considerar el efecto de carga debido al dispositivo de medición y el efecto sobre la sensibilidad. La sensibilidad varía de un tipo a otro así como el tamaño en un mismo tipo de potenciómetro.

La resolución del potenciómetro es fuertemente influenciada por la construcción del elemento resistivo. Se consigue una perfecta linealidad si el elemento resistivo es un alambre, pero tiene el inconveniente de que el valor de resistencia está limitado por la longitud. Una solución a esto puede ser disminuir la sección del alambre para aumentar la resistencia, pero éste se hace frágil.

Para obtener valores altos de resistencia en pequeño espacio se enrolla alambre alrededor de un eje central formando un círculo o hélice si se desea un dispositivo angular, Figura 2.40. En estos dispositivos la variación de resistencia no es continua, sino a pequeños pasos como se puede observar en la Figura 2.42. Los escalones quedan disminuidos al reducir el diámetro del conductor, logrando los pasos más pequeños pero nunca perfectamente continuos. El valor de resolución dado por el fabricante es el caso más favorable. Se puede llegar a tener 500 a 1 000 vueltas por pulgada, en casos prácticos, y detectar movimientos de (0,002 a 0,001) in.

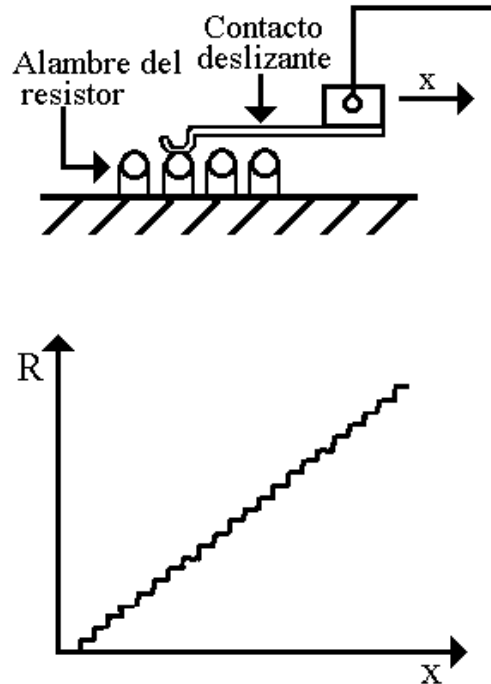


Figura 2.42 Resolución de un potenciómetro lineal.

Si ha de considerarse el efecto debido al ruido, se debe tener en cuenta que el ruido en un potenciómetro, se refiere a las fluctuaciones aleatorias de la tensión de salida que ocurren durante el movimiento del cursor, en el cual está incluido el efecto debido a la resolución.

Desde el punto de vista dinámico, los potenciómetros se pueden considerar como instrumentos de orden cero, puesto que su impedancia es puramente resistiva y no depende de la frecuencia.

En la selección de un potenciómetro se deben tomar en cuenta los factores ambientales tales como temperatura, choque, vibración, humedad y altitud.

2.7.2.4.2. Características.

Entre las características típicas comerciales de los transductores potenciométricos se tienen:

- Excitación: ac y dc regulada
- Exactitud: $\pm 1 \%$
- Respuesta de frecuencia: 0 a > 50 Hz
- Resolución: $\pm (0,05 \text{ a } 1) \%$
- Histéresis: $\pm 0,5 \%$
- Nivel de salida: alto > 100 mV
- Rango de presión: (5 a 10×10^3) psi
- Rango de temperatura: (-54 a 149) °C
- Error de temperatura: $\pm 0,8 \%$
- Estabilidad: $\pm 0,5 \%$ /año
- Linealidad:
 - 1 % para potenciómetros de una vuelta y de 0,5 in de diámetro
 - 0,02 % para potenciómetros multivoltas y de 2 in de diámetro
 - 0,002 % para potenciómetros multivoltas y de 10 in de diámetro
 - de (0,05 a 0,10) % para potenciómetros lineales (de traslación)
- Sensibilidad de voltaje: pobre
- Sensibilidad: (3 a 30) V/in para un desplazamiento máximo de 0,25 in

2.7.2.4.3. Ventajas.

- No requiere amplificación ni adaptación de impedancia.
- Alta tensión de salida.
- Mantenimiento sencillo.
- Puede ser excitado con ac o dc.
- No es costoso.

- Fácil de instalar y excitar.
- De amplio uso.

2.7.2.4.4 Desventajas.

- Usualmente de gran tamaño.
- Resolución pequeña en la mayoría de los casos.
- Alta fricción mecánica.
- Tiempo de vida limitada.
- Genera altos niveles de ruido con el desgaste.
- Baja respuesta de frecuencia.
- Requiere más fuerza para mover el cursor que en el núcleo del LVDT.

2.7.2.4.5. Aplicaciones.

Se utiliza para la medición de variables tales como: desplazamiento, posición, presión, fuerza, nivel y flujo.

2.7.2.5. Piezoresistivo (Strain Gage).

El análisis de esfuerzos está relacionado con la determinación de la distribución de esfuerzos en materiales de varias formas y bajo diferentes condiciones de carga. El análisis experimental de esfuerzos se lleva a cabo midiendo la deformación de la pieza bajo carga, para allí inferir los esfuerzos locales. La medición de la deformación es solamente una faceta de todo el problema, ya que el trabajo analítico que se debe aplicar a los datos experimentales para poder determinar los esfuerzos locales es de igual importancia.

2.7.2.5.1. Ley de Hooke

Robert Hooke estableció en 1678 la relación que existe entre las deformaciones en los cuerpos sometidos a tensiones mecánicas (tracción, compresión, flexión) y el alargamiento (deformación) de un material.

Se puede medir el alargamiento total por medio de un aparato de medida mecánico y hallar, a partir de estos valores, el alargamiento por unidad de longitud llamado **deformación normal** y representado por:

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad (2.57)$$

donde :

ΔL = Alargamiento total

L = Longitud patrón

Cuando se aumenta gradualmente la carga se mide el alargamiento de la longitud patrón para cada incremento, conociendo el área original de la sección transversal puede obtenerse la **tensión normal o mecánica**, representada por σ , para cada valor, utilizando la relación:

$$\sigma = P / A \quad (2.58)$$

donde:

P = Carga y A = Área de la sección transversal

Con varios pares de valores de σ y de ε se pueden representar gráficamente los datos experimentales, obteniéndose así un diagrama tensión - deformación, Figura 2.43.

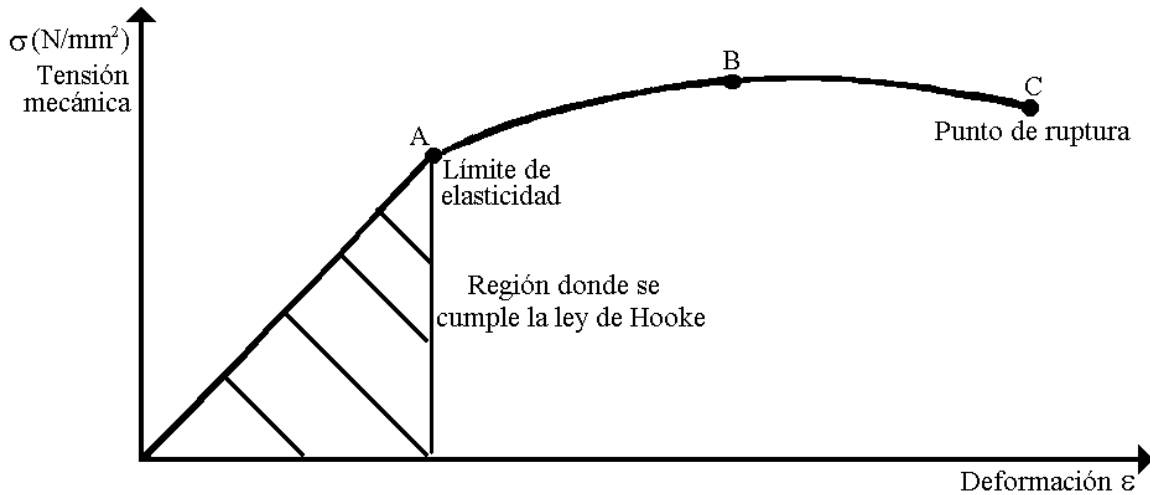


Figura 2.43 Curva de tensión-deformación de un material.

La tensión o esfuerzo mecánico que soporta una estructura se define en términos de fuerza por área, newton por milímetro cuadrado y el alargamiento en micrómetros.

Cuando una barra metálica se somete a una tensión mecánica creciente se encuentra experimentalmente que la deformación unitaria varía según indica la Figura 2.43. La primera parte de la curva, desde 0 hasta A, es una línea recta. Esto indica que en esta región hay una relación lineal entre tensión y deformación y el material obedece a la Ley de Hooke.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.59)$$

donde:

E = Pendiente de la parte recta de la curva 0A

ε = Deformación

La cantidad E , es decir, la relación de la tensión unitaria a la deformación unitaria se llama módulo de elasticidad o módulo de Young, el cual está expresado en newton por metro cuadrado.

Si la tensión no se aumenta más allá del valor correspondiente al punto A, la barra recobra su longitud inicial cuando se suprime la tensión. En otras palabras, la porción de curva desde 0 hasta A es la región de perfecta elasticidad. Si la tensión aumenta hasta el valor correspondiente al punto B y después se suprime, la barra no recobra su longitud inicial sino que conserva una deformación permanente. El punto A corresponde al límite de elasticidad del material. Por último, cuando la tensión se aumenta suficientemente, la barra se rompe en el punto C. Considérese la barra mostrada en la Figura 2.44, sujeta a la tensión axial T .

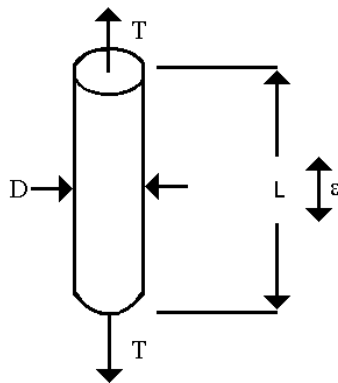


Figura 2.44 Barra simple sujeta a tensiones axiales.

Sin la carga aplicada, la longitud de la barra es L , su diámetro es D y el área de la sección transversal es A . Si se aplica una carga (T) tal que el esfuerzo no exceda el límite elástico del material, la deformación unitaria axial está dada por:

$$\varepsilon = (T/A)/E = \sigma_a/E \quad (2.60)$$

donde:

σ_a = Esfuerzo axial

E = Módulo de Young del material

La deformación unitaria axial (ε_a) está definida por la relación:

$$\varepsilon_a = dL/L \quad (2.61)$$

esto es, la **deformación unitaria axial por unidad de longitud**. Como resultado de la deformación en la dirección axial, se presenta una deformación en la sección transversal de la barra. La variación en el área se hace evidente por la variación en el diámetro o, más específicamente, por una variación en la dimensión transversal ($dD/D = -\varepsilon_t$). Al cociente definido por la deformación unitaria en la dirección transversal (ε_t) y la deformación unitaria en la dirección axial (ε_a) se le conoce como **módulo de Poisson (μ)**:

$$\mu = -\varepsilon_t / \varepsilon_a = -(dD/D) / (dL/L) = -(dD/D) / \varepsilon_a \quad (2.62)$$

$$\mu \varepsilon_a = -dD/D$$

y debe determinarse experimentalmente para los diversos materiales.

El valor del módulo de Poisson está entre 0 y 0,5, para todos los materiales. Un valor típico del módulo de Poisson para muchos materiales es 0,3. Si el material se encuentra en el rango plástico, su volumen se mantiene constante independiente de los cambios en la deformación, de manera que:

$$dv = LdA + AdL = 0 \quad (2.63)$$

o sea:

$$dA/A = -dL/L$$

Si se expresa esta relación en función del diámetro, se tiene:

$$A = \pi r^2 = \pi (D/2)^2 = (\pi/4) D^2$$

$$dA/A = (2\pi/4) D = (\pi/2) D$$

$$dA/A = (\pi/2)(DdD/A) = 2(dD/D) \quad (2.64)$$

Luego:

$$2(dD/D) = -dL/L \quad (2.65)$$

comparando y sustituyendo se obtiene: $\mu = 0,5$

por lo tanto, el módulo de Poisson está entre 0 y 0,5 para todos los materiales.

2.7.2.5.2. Extensómetros Eléctricos.

Los extensómetros eléctricos son los dispositivos de mayor uso en la medición de deformación unitaria, también se les denomina Galgas Extensométricas o STRAIN GAGE (S.G.). Su operación se basa en el principio de que la resistencia eléctrica de un conductor cambia cuando se le somete a deformación mecánica (Efecto Piezoresistivo). En el caso típico, se pega un S.G. a la muestra, en condiciones libres de tensión, con un pegamento aislante. A continuación se aplica la tensión mecánica, lo cual produce una deformación en la muestra y en el elemento resistivo. El valor de la deformación se obtiene por medio de la medición del cambio de resistencia eléctrica en el elemento.

La resistencia eléctrica de una barra viene dada por la Ec. (2.66). Al someter esta barra a un esfuerzo, estos tres factores cambian. El cambio de resistencia que acompaña al esfuerzo se debe a cambios geométricos y a cambios en la resistividad del material.

$$R = \rho L/A \quad (2.66)$$

donde: L = Longitud, A = Área de la sección transversal y ρ = Resistividad del material

Diferenciando se tiene:

$$dR/R = ((d\rho/\rho) + (dL/L) - (dA/A)) \quad (2.67)$$

El área es proporcional al cuadrado de alguna dimensión transversal tal como el diámetro. Si esta dimensión es D , se tiene:

$$dA/A = 2(dD/D) = -2\mu\varepsilon_a = -dL/L \quad (2.68)$$

Introduciendo en la Ec. (2.67) las Ecs (2.61) y (2.68), se tiene:

$$dR/R = ((d\rho/\rho) + (\varepsilon_a) - (-2\mu\varepsilon_a))$$

ordenando se tiene:

$$dR/R = \varepsilon_a (1 + 2\mu) + (d\rho/\rho) \quad (2.69)$$

El factor de calibración K , llamado también factor de galga (FG), es el parámetro esencial y se define como el cambio unitario en la resistencia sobre el cambio en la deformación por unidad de longitud.

$$K = (dR/R)/(dL/L) = (dR/R)/\varepsilon_a \quad (2.70)$$

sustituyendo la Ec. (2.69) en la Ec. (2.70) se tiene:

$$K = 1 + 2\mu + ((d\rho/\rho)/\varepsilon_a) \quad (2.71)$$

donde:

El primer término es el cambio de resistencia debido al cambio de la longitud

El segundo término es el cambio de resistencia debido al cambio del área

El tercer término es el cambio de resistencia debido al efecto piezoresistivo

Si la resistividad del material no varía con la deformación se tiene que $K = 1 + 2\mu$ y tomando el valor típico del módulo de Poisson igual a 0,3 se tiene un valor de $K = 1,6$. En este caso, el cambio en la resistencia del material se debe exclusivamente a los cambios en las dimensiones físicas. Si la resistividad disminuye con la deformación unitaria, el valor de K será menor que 1,6. Cuando la resistividad aumenta con la deformación unitaria, K será mayor de 1,6. Se ha observado que los factores de galgas de los materiales fluctúan entre -140 y +175. Si el material del extensómetro se deforma de tal manera que se alcanza el rango plástico, se tiene que $\mu = 0,5$ y la resistividad permanece esencialmente constante; en este caso, se observa que el factor de galga tiende al valor 2.

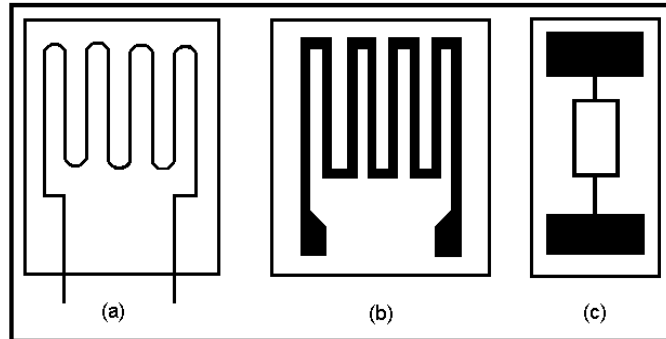
Despejando la deformación unitaria axial en la Ec. (2.70) se tiene:

$$\varepsilon_a = (\Delta R/R)/K \quad (2.72)$$

En la que se observa que solamente se necesita medir el valor de ΔR para poder determinar la deformación unitaria axial ya que los valores del factor de calibración y de la resistencia, generalmente los especifica el fabricante. Para la mayoría de los extensómetros eléctricos comerciales, el factor de calibración es el mismo para deformaciones por tracción o por compresión. En la práctica, es deseable que el factor de calibración tenga un valor alto, ya que con esto se produce un mayor cambio de resistencia ΔR para una deformación dada, lo que permite que el equipo necesario de registro sea de menor sensibilidad.

Se usan como elementos sensibles los metales y los semiconductores; éstos últimos tienen más sensibilidad pero su estabilidad con la temperatura es menor, por lo que, en general se usan los metales o aleaciones.

En la Figura 2.45 se muestran tres tipos comunes de extensómetros eléctricos (Strain Gage).



a) S.G. de alambre; b) S.G. laminar; c) S.G. semiconductor.

Figura 2.45 Tipos de S.G.

Los metales que se utilizan en la fabricación de S.G., deben cumplir con ser elásticos (a largo plazo) y resistentes a la fatiga. Estas características se cumplen en aleaciones como cobre-níquel (constantan) con $K = 2$; níquel-cromo con $K = 2,2$; níquel-cromo-molibdeno-hierro con $K = 3,5$.

Los materiales con mayor factor de calibración tienden a ser más sensibles a la temperatura y menos estables que los materiales de bajo factor de calibración. Con materiales semiconductores (silicio) como elemento sensor y controlando la cantidad y tipo de dopaje (grado de contaminación), puede optimizarse el transductor para una aplicación específica.

En general un transductor de deformación de silicio tiene mayor factor de calibración que el de metal (50 o 60 veces mayor), pero con mayor coeficiente de temperatura.

En la tabla 2.3 se presenta un resumen de las características de los tres materiales más comunes de que están hechos los extensómetros eléctricos.

Tabla 2.3 Características de algunos materiales que se utilizan en los Strain Gage.

Material	Factor de Calibración aproximado, K	Resistencia aproximada, Ω	Coefficiente de temperatura por resistencia, $^{\circ}\text{F}^{-1} \times 10^6$	Observaciones
57 % Cu, 43 % Ni (Constantan)	2,0	100	6,0	K es constante sobre un amplio rango de deformaciones unitarias; se utiliza en aplicaciones de baja temperatura (< 500 $^{\circ}\text{F}$)
Aleaciones de platino	4,0	50	1 200	Apropiado para usarlo a temperaturas elevadas, (> 1000 $^{\circ}\text{F}$)
Semiconductor de Silicio	-100 a 150	200	50 000	Es frágil, su factor de calibración es alto; no es adecuado para mediciones de grandes deformaciones unitarias

2.7.2.5.3. Circuitos con Strain Gage

Para un análisis circuital, se considera el circuito puente de la Figura 2.46.

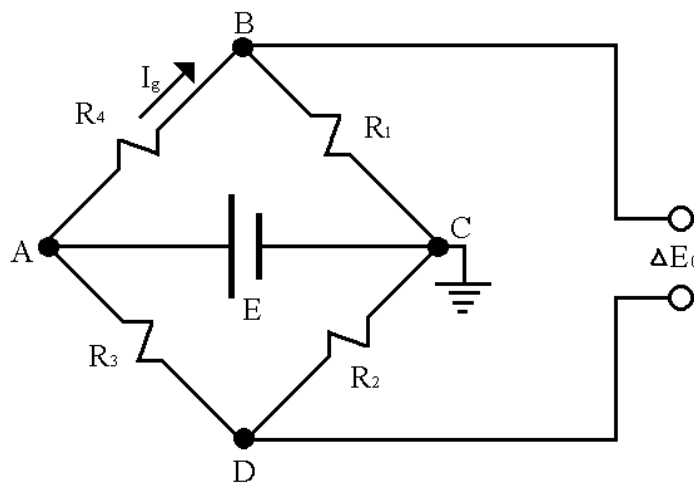


Figura 2.46 Representación del Puente de Wheatstone.

Para un pequeño desbalance en el puente, se tiene que la tensión de salida viene dada por:

$$\Delta E_o = V_{BC} - V_{DC} \quad (2.73)$$

siendo:

$$V_{BC} = (R_1 / (R_1 + R_4)) E \quad (2.74)$$

$$V_{DC} = (R_2 / (R_2 + R_3)) E \quad (2.75)$$

Luego, sustituyendo las Ecs. (2.74) y (2.75) en la Ec. (2.73) se tiene:

$$\Delta E_o = E \left((R_1 R_3 - R_2 R_4) / ((R_1 + R_4)(R_2 R_3)) \right) \quad (2.76)$$

Si el puente está balanceado, esto es $\Delta E_o = 0$ se obtiene:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (2.77)$$

que es la condición de balance del puente de Wheatstone.

Si las resistencias sufren variaciones a partir de la condición de equilibrio, se obtendrá un valor de tensión de salida del puente diferente de cero:

$$R_1 = R_1 + \Delta R_1$$

$$R_2 = R_2 + \Delta R_2$$

$$R_3 = R_3 + \Delta R_3$$

$$R_4 = R_4 + \Delta R_4 \quad (2.78)$$

Sustituyendo las Ecs. (2.78) en la Ec. (2.76) se obtiene:

$$\Delta E_o = E \left(\frac{((R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4))}{M} \right) \quad (2.79)$$

donde:

$$M = (R_1 + \Delta R_1 + R_4 + \Delta R_4)(R_2 + \Delta R_2 + R_3 + \Delta R_3)$$

multiplicando y despreciando los términos de segundo orden Δ^2 :

$$\Delta E_o = E \left(\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \right) \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.80)$$

reordenando el término:

$$\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} = \frac{R_1 R_2}{R_1^2 (1 + R_2/R_1)^2} = r/(1 + r)^2 \quad (2.81)$$

donde:

$$r = R_2/R_1 \quad (2.82)$$

sustituyendo la Ec. (2.81) en la Ec. (2.80):

$$\Delta E_o = E \left(\frac{r}{(1 + r)^2} \right) \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.83)$$

Si se considera:

$$\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0 \quad (2.84)$$

$$\Delta E_o = \left(\frac{r}{(1 + r)^2} \right) \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) E = \left(\frac{r}{(1 + r)^2} \right) K \varepsilon_a E \quad (2.85a)$$

Si en la Ec. (2.85a) se considera r , K y E constantes, la tensión de salida viene dada

por:

$$\Delta E_o = N \varepsilon_a \quad (2.85b)$$

donde:

$$N = \left(\frac{r}{(1 + r)^2} \right) K E$$

Luego, la escala del milivoltímetro se puede graduar directamente en deformaciones unitarias.

Si se coloca un S.G. en la rama 1 del puente, y se considera su disipación de potencia, con todas las resistencias iguales se tiene un valor máximo de tensión de alimentación del puente.

En la Figura 2.46 si $\Delta E_0 = 0$

$$E = I_g (R_1 + R_4) = I_g R_1 (1 + r) \quad (2.86)$$

como:

$$R_1 = R_g \quad (2.87)$$

y

$$P_g = I_g^2 R_g \quad (2.88)$$

la tensión máxima de alimentación del puente viene dada por:

$$E_{max} = \sqrt{P_g R_g} (1 + r) \quad (2.89)$$

Sustituyendo la Ec. (2.89) en la Ec. (2.83) se obtiene que la tensión de salida del puente es:

$$\Delta E_o = \left(r / (1 + r) \right) \sqrt{P_g R_g} \left((\Delta R_1 / R_1) - (\Delta R_2 / R_2) + (\Delta R_3 / R_3) - (\Delta R_4 / R_4) \right) \quad (2.90)$$

A partir de la Ec. (2.90) se analizarán varios casos:

2.7.2.5.3.1. Caso #1:

Un S.G. activo en la rama 1 solamente, Figura 2.47.

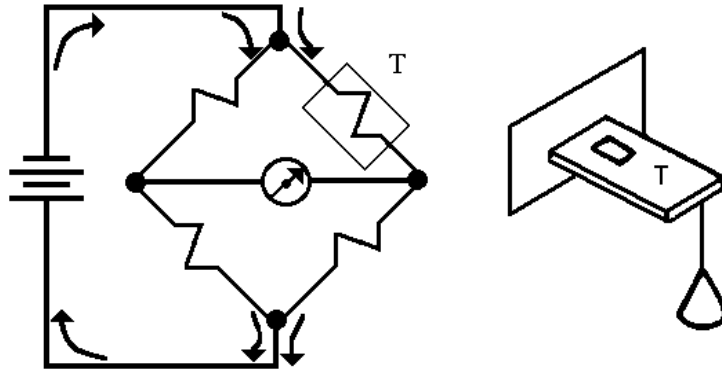


Figura 2.47 Viga voladiza en 1/4 de puente.

De la Ec. (2.90):

$$\Delta E_o = (r/(1+r))\sqrt{P_g R_g}(\Delta R_1/R_1) \quad (2.91)$$

Debido a que la resistencia cambia con la deformación y la temperatura, se consideran estas dos variaciones en la rama 1, así:

$$\Delta R_1/R_1 = (\Delta R_g/R_g)_\varepsilon + (\Delta R_g/R_g)_T \quad (2.92)$$

donde:

$(\Delta R_g/R_g)_\varepsilon$ = Variación debida a la deformación

$(\Delta R_g/R_g)_T$ = Variación debida a la temperatura

Luego, se obtiene un desbalance del puente debido a la variación de la resistencia en la rama 1, pero esa medición está afectada por la temperatura.

La sensibilidad que se obtiene en este caso viene dada por:

$$\text{sensibilidad} = \Delta R_o/(\Delta R_g/R_g) = (r/(1+r))\sqrt{P_g R_g} \quad (2.93)$$

Ahora, de ser necesaria la sensibilidad puede ser aumentada de varias formas a saber:

Aumentado E y/o Aumentando R_g y/o Agregando otro S.G.

El valor de la fuente de alimentación (E) está limitado por el valor de la disipación del S.G. y colocar un S.G. más grande va a depender de las condiciones específicas de la aplicación.

2.7.2.5.3.2. Caso #2:

S.G. activo en rama 1 y S.G. no activo en rama 4, Figura 2.48.

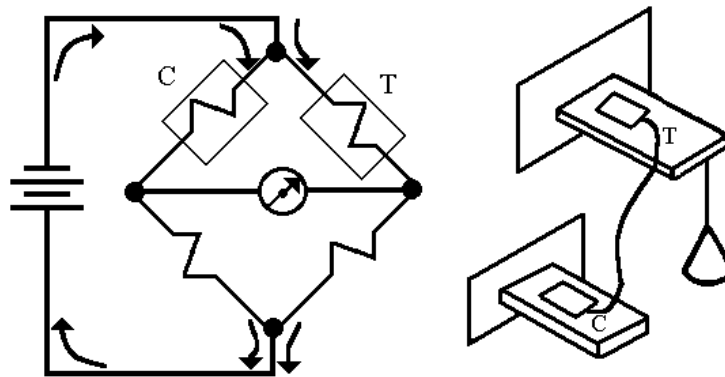


Figura 2.48 Viga voladiza en 1/2 puente.

En este caso:

$$\Delta R_3 = \Delta R_2 = 0$$

La resistencia de la rama 1 está sometida a variaciones debidas a deformación y temperatura.

$$\Delta R_1/R_1 = (\Delta R_g/R_g)_\varepsilon + (\Delta R_g/R_g)_T \quad (2.94)$$

La resistencia de la rama 4 no está sometida a deformación pero si a la misma temperatura que la resistencia de la rama 1.

$$\Delta R_4/R_4 = (\Delta R_g/R_g)_T \quad (2.95)$$

Sustituyendo estas condiciones en la Ec. (2.90) se obtiene:

$$\Delta E_o = (r/(1+r))\sqrt{P_g R_g} \left[(\Delta R_g/R_g)_\varepsilon + (\Delta R_g/R_g)_T - (\Delta R_g/R_g)_T \right] \quad (2.96)$$

Luego, se obtiene desbalance del puente debido a la variación de la resistencia en la rama 1, siendo compensada la variación de la resistencia por temperatura con la variación de resistencia por temperatura de la rama 4. La sensibilidad es igual a la del caso 1.

2.7.2.5.3.3. Caso #3:

S.G. activos en ramas 1 y 4, Figura 2.49.

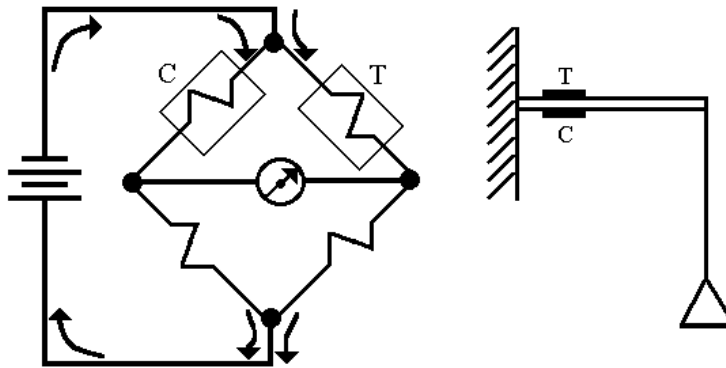


Figura 2.49 Viga voladiza en 1/2 puente.

En este caso se tienen las siguientes condiciones:

$$\Delta R_3 = \Delta R_2 = 0$$

$$\Delta R_1/R_1 = \Delta R_4/R_4 = (\Delta R_g/R_g)_\varepsilon + (\Delta R_g/R_g)_T \quad (2.97)$$

Para que sea aumentada la sensibilidad, se requiere que K esté sometido a tracción y R_4 a compresión. Se deben tomar las precauciones necesarias para que los S.G. adheridos en la viga sean adecuadamente conectados al puente de trabajo.

Sustituyendo estas condiciones en la Ec. (2.90) se obtiene:

$$\Delta E_o = (r/(1+r))\sqrt{P_g R_g} \left[(\Delta R_g/R_g)_\varepsilon + (\Delta R_g/R_g)_T - (\Delta R_g/R_g)_\varepsilon - (\Delta R_g/R_g)_T \right] \quad (2.98)$$

Con este arreglo se obtiene compensación de temperatura y la sensibilidad viene dada por:

$$\Delta E_{\sigma} / (\Delta R_g / R_g) = 2(r / (1 + r)) \sqrt{P_g R_g} \quad (2.99)$$

obteniéndose que la sensibilidad es dos veces el caso 1. Ec. (2.93).

2.7.2.5.3.4. Caso #4:

Dos S.G. activos:

Se puede obtener el mismo efecto que en el caso 3, si se colocan los S.G. activos en las ramas:

- 1 y 2: R_1 a tracción y R_2 a compresión
- 3 y 2: R_3 a tracción y R_2 a compresión
- 3 y 4: R_3 a tracción y R_4 a compresión

teniendo cuidado de colocar los S.G. en forma adecuada en la viga de prueba y conectados en forma correcta al puente de trabajo.

2.7.2.5.3.5. Caso #5:

Tres S.G. activos:

Se pueden colocar tres S.G. activos, teniendo cuidado de colocarlos a tracción o a compresión, en tres ramas diferentes; por ejemplo en 1 y 3 a tracción, y en 2 a compresión.

Para este caso se tiene que:

$$\Delta R_4 = 0$$

$$\Delta R_1 / R_1 = \Delta R_2 / R_2 = \Delta R_3 / R_3 = (\Delta R_g / R_g)_{\varepsilon} + (\Delta R_g / R_g)_{\tau} \quad (2.100)$$

Siguiendo el mismo procedimiento anterior se obtiene que la sensibilidad es:

$$\Delta E_o / (\Delta R_g / R_g) = 3(r / (1 + r)) \sqrt{P_g R_g} \quad (2.101)$$

obteniéndose que la sensibilidad es tres veces mayor que el caso 1.

2.7.2.5.3.6. Caso #6:

Cuatro S.G. activos, Figura 2.50.

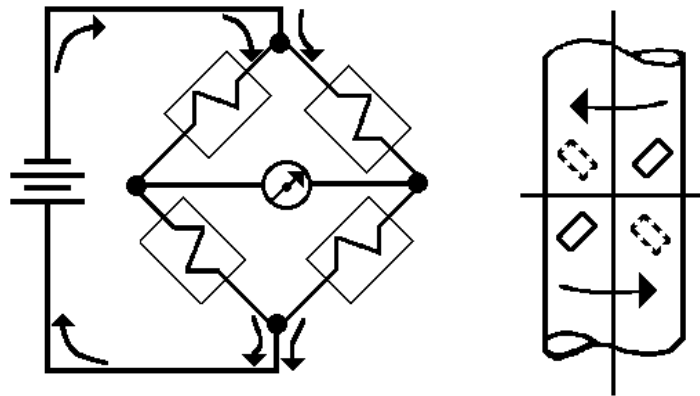


Figura 2.50 Torsión de una columna.

Aplicando el procedimiento de los casos anteriores se obtiene que la sensibilidad será:

$$\Delta E_o / (\Delta R_g / R_g) = 4(r / (1 + r)) \sqrt{P_g R_g} \quad (2.102)$$

siendo cuatro veces mayor que el caso 1 y obteniéndose compensación de temperatura.

2.7.2.5.4. Calibración Simulada.

La puesta a punto de un proceso de medición exige la determinación exacta de la correspondencia entre los valores del parámetro físico a medir y las indicaciones del instrumento (micro-deformaciones por unidad de tensión).

En el caso de un puente de Wheatstone, la calibración simulada consiste en desequilibrar una de sus ramas mediante la adición de una resistencia en serie o en paralelo, Figura 2.51.

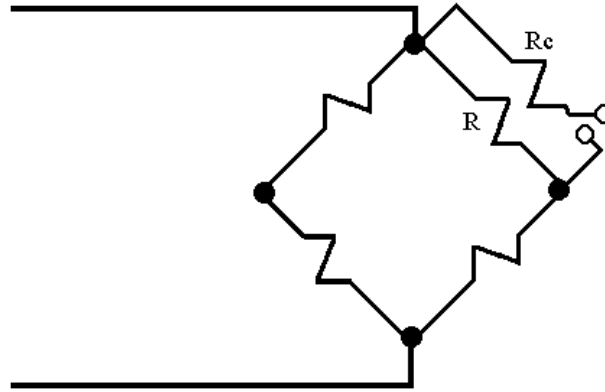


Figura 2.51 Circuito para realizar la calibración simulada.

Del circuito se obtiene:

$$dR = R - (RR_c / (R + R_c)) \quad (2.103a)$$

Reordenando:

$$dR = R^2 / (R + R_c) \quad (2.103b)$$

Así:

$$dR/R = R / (R + R_c) = K \varepsilon_a \quad (2.104)$$

Luego:

$$\varepsilon_a = (1/K)(R / (R + R_c)) \quad (2.105)$$

de esta forma, conociendo el valor de R_c , se puede conocer el valor de ε_a que es la deformación a simular.

Ahora, si se desea simular un determinado ε_a , se obtiene el valor de R_c que se debe conectar para poder realizar la simulación de acuerdo a la siguiente Ec.

$$R_c = (R(1 - K\varepsilon_a))/K\varepsilon_a \quad (2.106)$$

que se obtiene despejando R_c de la Ec. (2.105).

Si lo que interesa es obtener la señal de tensión producida al conectar la resistencia de calibración, se colocan en el puente cuatro resistencias iguales y un pequeño desbalance en una de las ramas y se obtiene ΔE_o de la Ec. (2.85a).

Pero se conoce de la Ec (2.105) que $K\varepsilon_a = R/(R+R_c)$, luego la tensión producida para un valor de R_c será:

$$\Delta E_o = (E/4)(R/(R + R_c)) \quad (2.107)$$

Despejando R_c :

$$R_c = R((E/4\Delta E_o) - 1) \quad (2.108)$$

lo que quiere decir que para un valor de tensión de salida deseada, se puede conocer el valor de R_c que hay que colocar en el puente para lograr tal efecto.

Las ecuaciones anteriores son linealizadas con las cuales se obtienen resultados aproximados; ahora, el puente inicialmente no queda exactamente balanceado debido al valor de la tolerancia de la resistencia de los S.G., la cual hay que tomar en cuenta porque esa tolerancia es grande comparada con las variaciones de resistencia que producen las deformaciones y se compensa utilizando el circuito de la Figura 2.52.

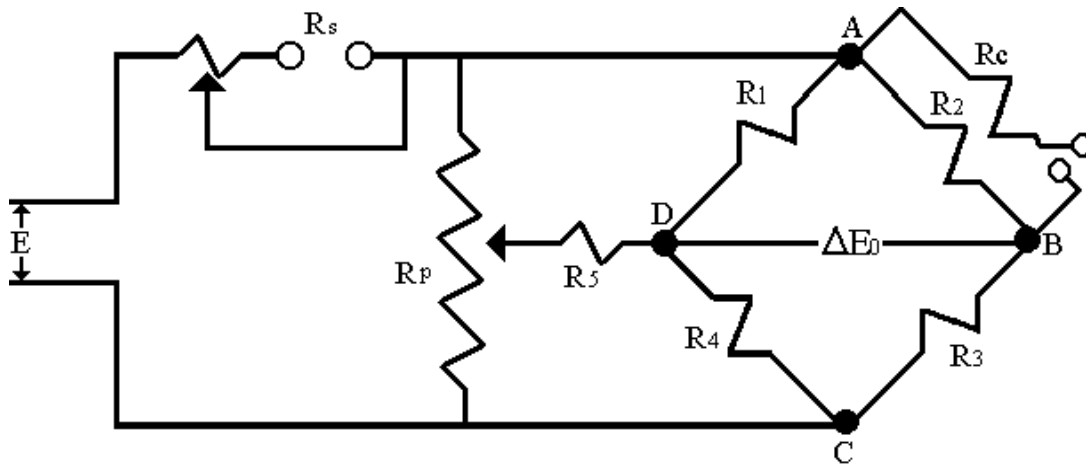


Figura 2.52 Circuito que compensa el efecto de tolerancia de los S.G.

En el circuito se tiene:

- R_c = Resistencia de calibración, la cual es cuatro veces mayor cuando los cuatro brazos del puente tienen S.G.. que cuando existe uno solo E_c . (2.108).
- R_s = Determina la sensibilidad del puente.
- $R_1 \approx R_2 \approx R_3 \approx R_4 \approx R < 1\,000\ \Omega$.
- $R_5 \approx$ Resistencia de aislamiento.
- $R_p = 25\ \text{k}\Omega$ = Potenciómetro que determina el balance del puente.

Al conectar las cuatro resistencias del mismo valor a los brazos del puente, la tensión leída entre los terminales BD debe ser cero. Debido a la tolerancia de las resistencias es posible que ΔE_0 sea diferente de cero; para compensar esa variación se ajusta el contacto de R_p de tal forma que ΔE_0 sea igual a cero.

Como los valores de R_5 y de R_p son elevados con respecto a los de R , no tienen influencia sobre el circuito original del puente y sirven para compensar el efecto debido a la tolerancia. Una vez realizada esta compensación se realiza la medición deseada.

Las variaciones de R_s hacen variar la tensión de alimentación del puente variando de esta forma su sensibilidad, pero al aumentar la tensión va a aumentar la disipación de potencia en las resistencias.

2.7.2.5.5. Fuentes de error

Los problemas asociados con la instalación de S.G. generalmente caen dentro de las siguientes tres categorías:

- Efectos de temperatura.
- Efectos de humedad.
- Efectos debidos a los conectores.

2.7.2.5.5.1. Efectos de Temperatura

Cuando el puente tiene cuatro S.G. hay que tomar en cuenta cuatro coeficientes de temperatura:

- Expansión del elemento resistivo.
- Expansión del material donde está pegado.
- Del factor de calibración K .
- De la resistencia.

En general el puente de Wheatstone compensa muchos de los errores. Los errores de expansión del S.G. y la expansión del material donde está pegado, se pueden eliminar seleccionando un S.G. con igual coeficiente de temperatura de expansión que el del material donde está pegado, tomando en cuenta que los materiales estructurales son generalmente: aluminio, acero, concreto, plástico.

Las variaciones del factor de calibración con la temperatura son suministradas por el fabricante.

El coeficiente de temperatura de la resistencia se compensa utilizando el puente de Wheatstone. Se coloca en una rama adyacente a la rama donde se encuentra el S.G. de prueba, otro con idénticas características adherido a una pieza idéntica pero que no sufrirá deformaciones durante la prueba y que se mantendrá a la misma temperatura que la pieza de prueba. De esta forma cualquier cambio debido a la temperatura será igual en los dos S.G. y la variación de tensión a la salida del puente se deberá únicamente a la variación de resistencia del S.G. de prueba como se demostró en los casos estudiados anteriormente.

Otra forma de compensar el puente por temperatura es utilizando un S.G. con diferente coeficiente de temperatura. Existen aleaciones de metales cuyo coeficiente de temperatura de la resistencia es negativo, aunque los coeficientes de los metales componentes sean positivos. Por ejemplo, la aleación de níquel-cromo tiene un coeficiente de temperatura de resistencia positivo pero las siguientes aleaciones tienen dicho coeficiente negativo tales como: 22,5% Cr - 5,5% Al - 72% Fe; 20% Cr - 10% Al - 70% Fe.

Se pueden obtener S.G. con coeficiente de temperatura de resistencia nulo, autocompensados, superponiendo dos S.G. con diferente coeficiente, compensándose el gradiente de temperatura transversal.

2.7.2.5.5.2. Efectos de humedad

La absorción de humedad por el papel o el pegamento puede cambiar la resistencia eléctrica entre el S.G. y el potencial de tierra y, por lo tanto, afectar las lecturas finales de

salida. Existen algunos métodos para proteger contra la humedad que no serán tratados en este texto.

2.7.2.5.5.3. Efectos debidos a los conectores

La introducción de S.G. de alambre en casi todas las aplicaciones presenta el problema de errores por efecto de temperatura sobre los conectores que unen el S.G. al circuito de medición. Este problema no existe en aplicaciones convencionales con S.G. donde tanto un S.G. activo como uno de compensación son empleados de la forma ilustrada en la Figura 2.53.

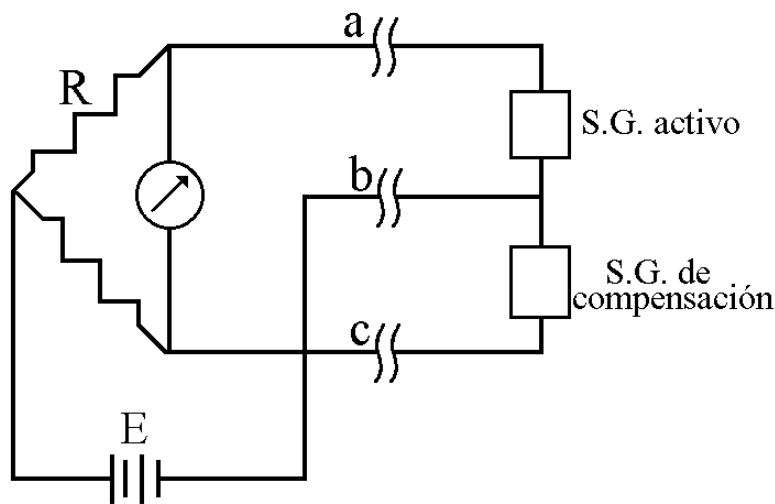


Figura 2.53 Compensación de un S.G. en rama adyacente.

En este caso los dos S.G. están localizados muy lejos del circuito de medición y se conectan a él mediante tres conductores a, b y c. Resistores R de una magnitud conveniente, completan el circuito del puente. Puesto que los conductores a y c son de la misma resistencia y están sujetos a la misma temperatura, se ve que aunque cambie la resistencia con cambios de temperatura, su efecto sobre la medición del S.G. es despreciado debido a la simetría del puente. El conductor b puede ser diferente en resistencia a los otros dos y no necesita estar sujeto a la misma temperatura puesto que está en el circuito de la batería y por lo tanto, no tiene efecto sobre el balance del puente.

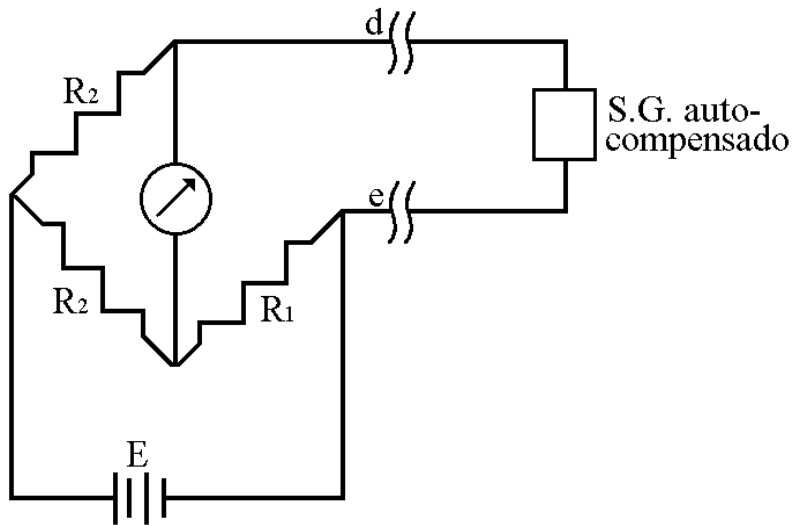


Figura 2.54 S.G. auto-compensado.

Cuando se usa un S.G. auto-compensado no es necesario emplear un S.G. de compensación excepto en circunstancias poco comunes. El circuito más simple para un S.G. auto-compensado es el mostrado en la Figura 2.54, donde los conductores d y e unen el S.G. al circuito de medición; R_1 se hace normalmente igual a la resistencia del S.G. y las R_2 son de cualquier magnitud conveniente. Ahora, si los conductores d y e son de muy baja resistencia ó si se hace de un alambre de bajo coeficiente de temperatura, tal como el constantan, este circuito puede ser usado satisfactoriamente. En muchas ocasiones, sin embargo, no es práctico satisfacer estas condiciones porque si se usa un alambre de cobre es posible que se requiera un calibre muy grande ó si se usa constantan ó manganina de resistencia "muerta", puede ser demasiado grande.

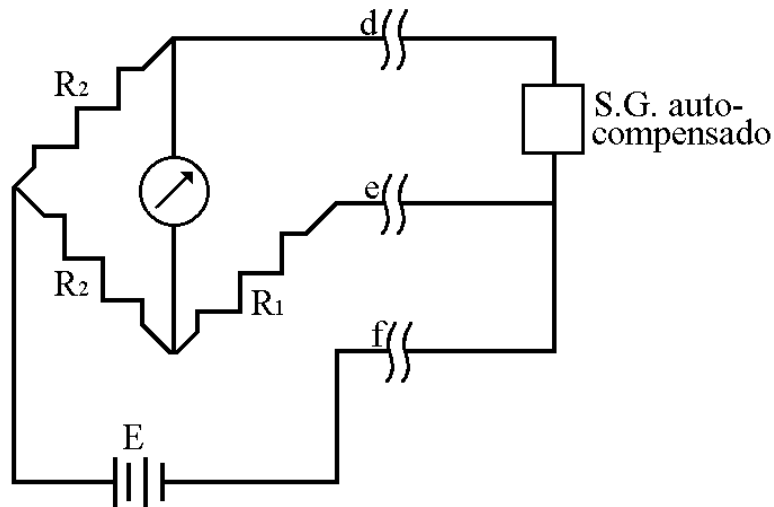


Figura 2.55 S.G. auto-compensado con tres conductores.

Existe la disposición de los termómetros resistivos que es una solución práctica y sencilla de este problema. Este es el método de los tres conductores ilustrado en la Figura 2.55, que muestra el S.G. auto-compensado conectado al circuito de medición por tres conductores d , e y f .

De nuevo d y e son iguales y sujetos a la misma temperatura a lo largo de toda su longitud. La resistencia R_1 se hace aproximadamente igual a la resistencia del S.G. y las resistencias R_2 se escogen de una magnitud conveniente. El conductor f puede tener diferente resistencia de d y e , y no tiene que estar sujeto a la misma temperatura, aunque normalmente los tres conductores van juntos. Se observa que en el arreglo de la Figura 2.55 se colocan las resistencias de d y e en brazos adyacentes del puente y f está externo al puente y en serie a la fuente de alimentación. El resultado es que todos los conductores pueden estar sujetos a una amplia variación de resistencia debida a la temperatura y aún producen errores despreciables en la lectura del S.G. Este es un circuito muy apropiado para usarse con el S.G. auto-compensado y debe ser empleado, cuando las condiciones de temperatura sean tales que en el circuito de la Figura 2.54 se produzca un error inaceptablemente grande.

2.7.2.5.6. Strain Gage Autocontenido

Una innovación del S.G. la constituyen los transductores de presión de silicio difundido. Consisten en un elemento de silicio situado dentro de una cámara conteniendo silicona que está en contacto con el proceso a través de un diafragma flexible. El sensor está fabricado a partir de un monocristal de silicio en cuyo seno se difunde boro para formar varios puentes de Wheatstone constituyendo así un S.G. autocontenido. El espesor del sensor determina el intervalo de medición del instrumento.

El sensor con su puente de Wheatstone incorporado forma parte del circuito de la Figura 2.56.

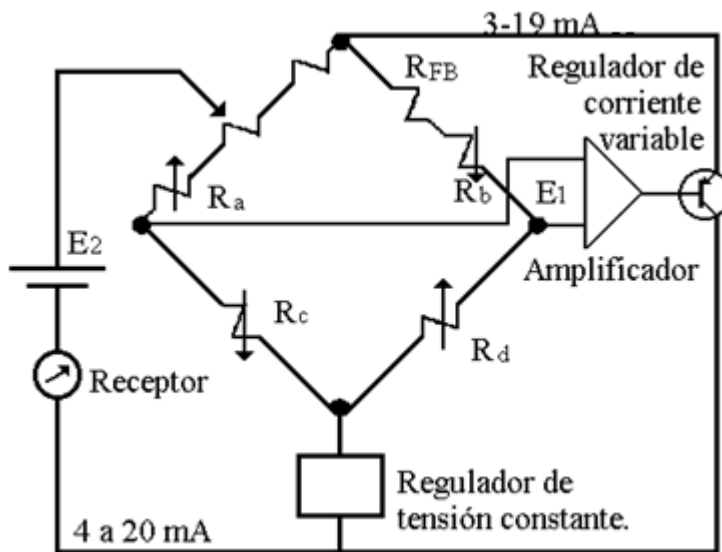


Figura 2.56 Transductor de presión de silicio difundido.

Cuando no hay presión, las tensiones E_1 y E_2 son iguales y al aplicar la presión del proceso, R_b y R_c disminuyen su resistencia y R_a y R_d la aumentan dando lugar a caídas de tensión distintas y a una diferencia entre E_1 y E_2 .

Esta diferencia se aplica a un amplificador de alta ganancia que controla un regulador de corriente variable. Un margen de corriente continua de 3 a 19 mA con 1 mA del puente,

produce una señal de salida de corriente continua de 4 a 20 mA. Esta corriente circula a través de la resistencia de realimentación R_{FB} y produce una caída de tensión que equilibra el puente. Como esta caída es proporcional a R_{FB} , esta resistencia fija el intervalo de medición (span) del transductor. El cero del instrumento se varía intercalando resistencias fijas en el brazo izquierdo del puente (cero basto) y un potenciómetro en el brazo derecho (cero fino).

El intervalo de medición de los transductores de silicio difundido varía de (0 a 2) kg/cm^2 a (0 a 600) kg/cm^2 y de (0 a 196 200) Pa a (0 a 58 860) KPa, con una exactitud del orden de $\pm 0,2 \%$.

2.7.2.5.7. Strain Gage tipo Roseta

La instalación de un S.G. en una barra es una aplicación útil que, sin embargo, representa un caso muy especial. En esta situación, la deformación unitaria que se mide es una deformación principal, ya que se supone que la barra está operando solamente a tracción o compresión. En un problema de medición más general, se tendrán deformaciones en más de una dirección y no se conocerá la orientación de los ejes principales de esfuerzo. Sería desde luego, muy afortunado que los S.G. que se fijaran a la muestra tuvieran la misma orientación que los ejes principales. A continuación, se consideraran algunos métodos que se pueden emplear para calcular los esfuerzos y las deformaciones principales en un punto de un material a partir de las mediciones con tres S.G. A los arreglos de S.G. para tales aplicaciones se les conoce con el nombre de rosetas. En esta sección, sólo se darán las expresiones finales que se utilizan para propósito de cálculo.

Considérese la roseta rectangular mostrada en la Figura 2.57a.

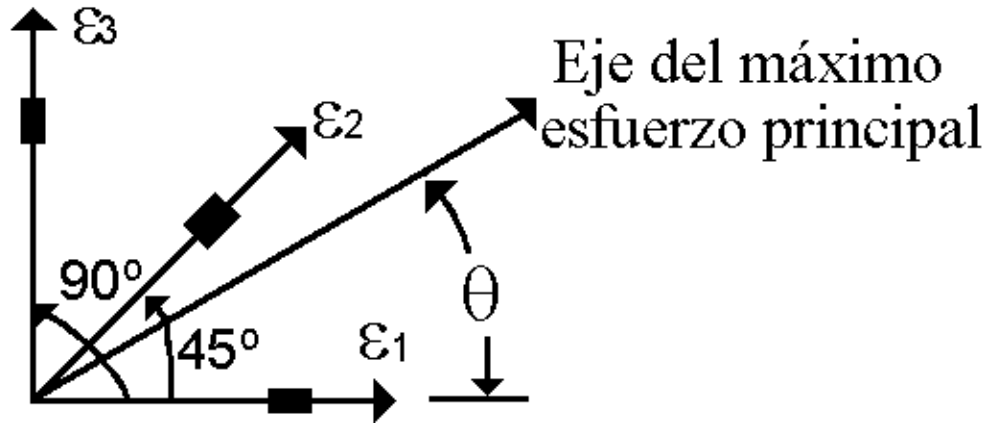


Figura 2.57a S.G. tipo roseta rectangular.

Los tres S.G. están orientados como se muestran y las deformaciones unitarias que mide cada uno de ellos son ϵ_1 , ϵ_2 , y ϵ_3 . Los valores de las deformaciones principales para esta situación se obtienen así:

$$\epsilon_{max}, \epsilon_{min} = ((\epsilon_1 + \epsilon_3)/2) \pm (1/\sqrt{2})\sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (2.109)$$

Y los esfuerzos principales

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = (E(\epsilon_1 + \epsilon_3)/2(1 - \mu)) \pm \left((E/\sqrt{2}(1 + \mu)) \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \right) \quad (2.110)$$

donde:

E = módulo de Young y μ = relación de Poisson

El máximo esfuerzo cortante, simbolizado por $\tau_{máx}$ se obtiene a partir de:

$$\tau_{max} = (E/\sqrt{2}(1 + \mu))\sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (2.111)$$

La localización de los ejes principales se obtienen a partir del ángulo θ según la siguiente relación:

$$\tan(2\theta) = (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3)/(\epsilon_1 - \epsilon_3) \quad (2.112)$$

En este eje es en el que ocurre el máximo esfuerzo τ_{max} . Si se analiza la Ec. (2.112) se observa que se presenta el problema de localizar el cuadrante en el que se encuentra θ , ya que esta ecuación tiene dos soluciones. Sin embargo, la ambigüedad anterior se elimina con las siguientes relaciones adicionales:

θ estará en el primer cuadrante, es decir $0 < \theta < \pi/2$ si:

$$\varepsilon_2 > (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/2 \quad (2.113)$$

y si ε_2 es menor que este valor, θ estará en el segundo cuadrante.

Otro tipo de roseta de uso común es la roseta en delta que se muestra en la Figura 2.57b.

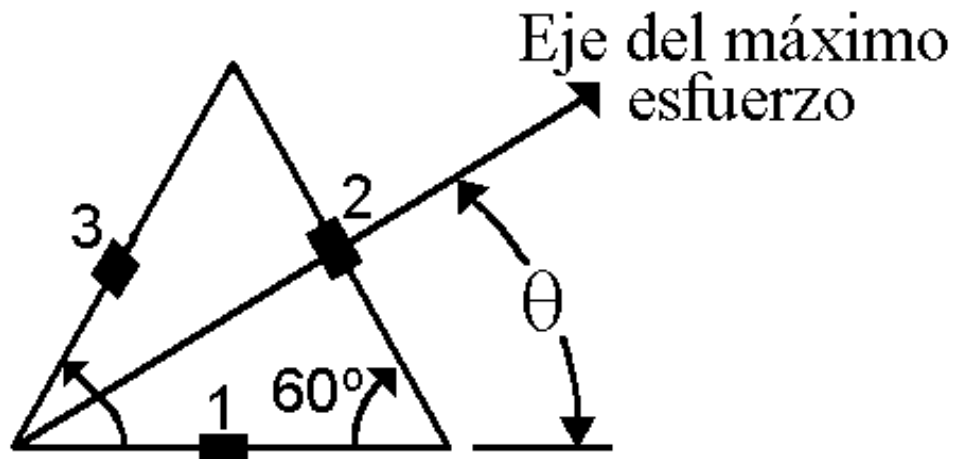


Figura 2.57b S.G. tipo roseta en delta.

Para este caso, las deformaciones principales están dadas por:

$$\varepsilon_{max}, \varepsilon_{min} = ((\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/3) \pm (\sqrt{2}/3) \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2.114)$$

Los esfuerzos principales son:

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = (E(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/(3(1 - \mu))) \pm (\sqrt{2}E/(3(1 - \mu))) \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2.115)$$

El máximo esfuerzo cortante se calcula a partir de:

$$\tau_{max} = \left(\sqrt{2}E / (3(1 + \mu)) \right) \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

(2.116)

Y la localización de los ejes principales de esfuerzos está dada por:

$$\tan(2\theta) = \left(\sqrt{3}(\varepsilon_3 - \varepsilon_2) \right) / (2\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3) \quad (2.117)$$

El ángulo θ estará en el primer cuadrante cuando $\varepsilon_3 > \varepsilon_2$, y en el segundo cuadrante cuando $\varepsilon_2 > \varepsilon_3$.

Resulta pertinente mencionar que los S.G. pueden ser sensibles tanto a las deformaciones transversales como a las axiales. Sin embargo, generalmente el cambio de resistencia que produce una deformación transversal comúnmente es menor que el 2 ó 3% del cambio producido por una deformación axial. Por esta razón, este efecto se puede despreciar en muchas aplicaciones. Cuando se quiere tomar en cuenta el esfuerzo transversal es necesario modificar las fórmulas anteriores para las rosetas.

Ejemplo: Se coloca una roseta rectangular sobre una placa de acero cuyo $E = 29 \times 10^6$ Pa y $\mu = 0,3$. Los valores medidos de las tres deformaciones unitarias son:

$$\varepsilon_1 = 500 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_2 = 400 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_3 = -100 \mu\text{m/m}.$$

Calcular las deformaciones y los esfuerzos principales, el máximo esfuerzo cortante, y localice los ejes principales de esfuerzo.

Solución:

Sean:

$$A = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/2 = 200 \mu m/m$$

$$B = \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} = 510 \mu m/m$$

Entonces,

$$\varepsilon_{max} = A(1/\sqrt{2})B = 561 \mu m/m$$

$$\varepsilon_{min} = A - (1/\sqrt{2})B = -161 \mu m/m$$

$$\sigma_{max} = (EA/(1 - \mu)) + (EB/(\sqrt{2}(1 + \mu))) = 16,330 Pa$$

Análogamente $\sigma_{min} = 230 Pa$

$$\tau_{max} = EB/(\sqrt{2}(1 + \mu)) = 8,050 Pa$$

También:

$$\tan(2\theta) = (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)/(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) = 0,667$$

$$2\theta = 33,7 \text{ ó } 213,7^\circ$$

$$\theta = 16,8 \text{ ó } 106,8^\circ$$

Se escoge el ángulo del primer cuadrante, es decir, $\theta = 16,8^\circ$.

2.7.2.5.8. Características

- Excitación: dc - ac
- Material: constantan, platino-tungsteno
- Nivel de salida: bajo
- Exactitud: $\pm 0,25 \%$
- Respuesta de frecuencia: 0 Hz a >5 kHz

- Sensibilidad a choque y vibración: muy buena
- Rango de presión: (0,5 a 10×10^3) psi ó ((3,447 a $68,948 \times 10^3$) kPa)
- Factor de calibración, K: (2,1 a 4,5)
- Variación de K con temperatura: (1 a 1,5) %/38 °C
- Elongación máxima: (0,5 a 12) %
- Resistencia: (120 a 500) Ω
- Tolerancia: \pm (0,2 a 2,0) %
- Estabilidad: 0,5 %/año
- Longitud: (0,8 a 12,7) mm
- Rango de temperatura: (-270 a 371) °C
- Sensibilidad: 50 $\mu\text{V/V/cm}$ (para 7,5 V de excitación)

2.7.2.5.9. Ventajas

- Rápida respuesta de tiempo.
- Alta exactitud.
- Bajo costo.
- Baja sensibilidad a cambios de temperatura.
- Flexible.
- Tamaño pequeño.
- Mínimo movimiento mecánico.
- Compensación por temperatura relativamente fácil.
- Varios métodos de compensación de temperatura.
- Alta resistencia.

- Opera a elevadas temperaturas.
- Generalmente no son influidas por campos magnéticos.
- Pueden utilizarse en medidas estáticas y dinámicas.
- Alta sensibilidad a esfuerzos.
- Pueden alimentarse con dc ó ac.
- Tienen respuesta frecuencial excelente.
- Resolución continua y buena.
- Tienen capacidad para determinar deformaciones que cambian con el tiempo.
- No requieren el conocimiento preciso de las tensiones que actúan en la pieza de prueba.
- Múltiples configuraciones.

2.7.2.5.10. Desventajas

- Especial cuidado en la instalación.
- La señal de salida es baja.
- Instalación inadecuada puede causar cambios en el factor de galga y en la resistencia inicial del S.G. Estos cambios también pueden ser producidos por humedad, temperatura y conectores.

2.7.2.5.11. Aplicaciones

El puente de Wheatstone se presta a diferentes montajes con S.G. para mediciones de desplazamiento, fuerza, presión, nivel, flujo. El estudio de cada uno de ellos parte de casos concretos donde es preciso medir una deformación determinada.

2.7.2.5.1.2. Selección de medidores de presión:

Entre los transductores estudiados, los piezoresistivos y los strain gage son los preferidos debido a su gran aplicabilidad. En segundo lugar se considera el tipo capacitivo. En la selección del instrumento debe existir compatibilidad entre el proceso y el instrumento a elegir.

Al escoger un dispositivo de presión se deben considerar básicamente las siguientes características, para tratar de acoplarlo a las exigencias requeridas por el proceso en estudio:

- Rango de presión.
- Exactitud.
- Ambiente de operación.
- Sobrepresión.
- Rango de temperatura.
- Susceptibilidad a golpes y vibraciones

Para completar la selección del instrumento, se debe hacer uso de las normas recomendadas para el tipo de instrumento específico seleccionado.