

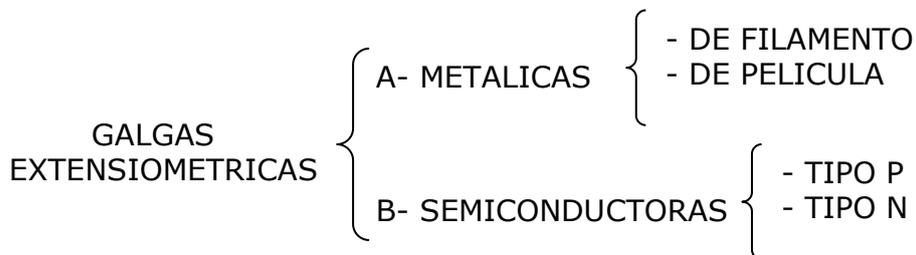
2. TRANSDUCTORES DE DEFORMACIONES Y DE FUERZAS

2.1 TRANSDUCTORES DE DEFORMACIONES O PEQUEÑOS DESPLAZAMIENTOS

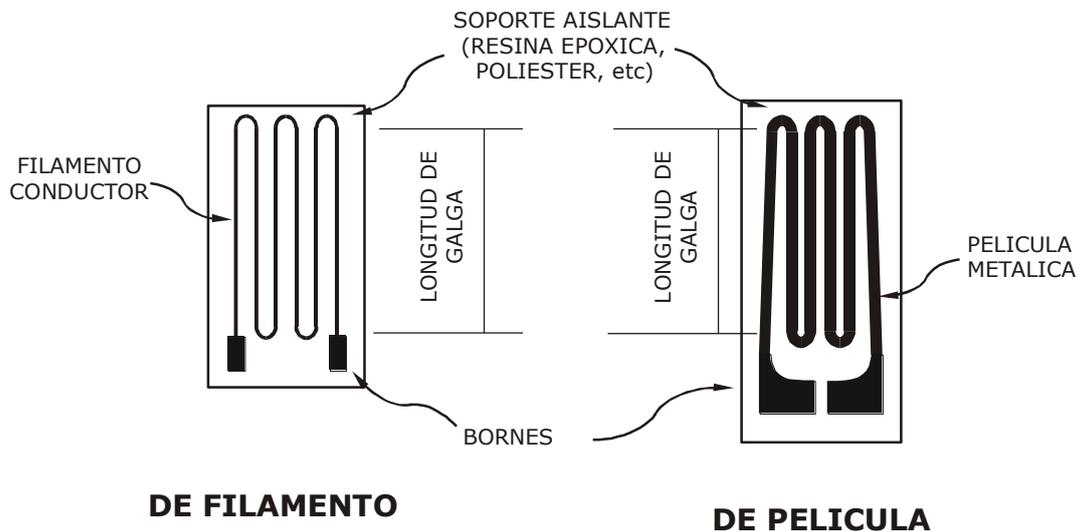
2.1.1 GALGAS EXTENSIOMETRICAS

• Principio de funcionamiento, Clasificación

Las galgas extensiométricas son transductores resistivos que permiten medir la deformación de un cuerpo elástico. Estos transductores se comportan como una resistencia variable ante la deformación que sufren. Para realizar la medición con éste tipo de transductores, se los debe pegar al cuerpo en cuestión, de manera tal que también queden afectados por la deformación del mismo. Las galgas extensiométricas se pueden clasificar de la siguiente forma:

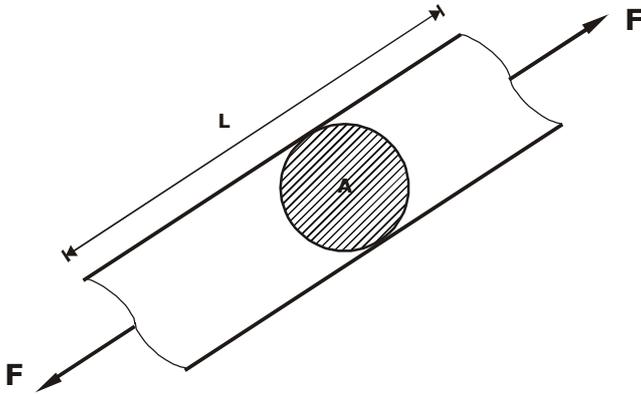


A- Galgas Metálicas



Las galgas metálicas de filamento poseen como elemento sensible a la deformación un filamento conductor, el cual puede ser de Constanan (aleación de níquel y cobre). Este conductor tiene una sección circular de aproximadamente 0,025 mm de diámetro, y se encuentra pegado sobre una base o soporte aislante. Las galgas metálicas de película poseen como elemento sensible una película metálica de unas pocas micras de espesor, recortada como se muestra en la figura anterior.

Para comprender el principio de funcionamiento de las galgas metálicas, consideremos un filamento conductor de sección A y longitud L , el cual se someterá a una deformación longitudinal (ΔL) debido al esfuerzo que realiza una fuerza F dada:



La resistencia eléctrica de un conductor está dada por la siguiente expresión:

$$R = \rho \cdot L / A$$

Donde:

ρ = Resistividad del Material ($\Omega \cdot m$)

L = Longitud Inicial del conductor (m)

A = Sección Inicial (m^2)

Como se puede apreciar la fuerza F está traccionando al conductor, provocando así un incremento en la longitud y una disminución en la sección del mismo. Teniendo en cuenta la expresión anterior, se puede ver que lo antes mencionado se traduce en un aumento de la resistencia R del conductor. Por lo tanto se puede concluir que la variación de las dimensiones geométricas de un conductor, producen en él una variación de la resistencia eléctrica. Este es el principio de funcionamiento de las galgas extensiométricas metálicas, ya que se las dispone sobre los cuerpos cuya deformación se desea conocer, sometiéndolas así a una variación de su longitud (por ende una variación de su resistencia).

La variación de resistencia en función de la deformación, para las galgas metálicas, se puede expresar de la siguiente forma:

$$\Delta R_G / R_G = G \cdot \Delta L_G / L_G = G \cdot \epsilon$$

Donde: ΔR_G = Variación de la resistencia de galga.

R_G = Resistencia de la galga (sin deformación).

G = Factor de galga (valor adimensional típico para cada galga).

ΔL_G = Variación de la longitud de galga.

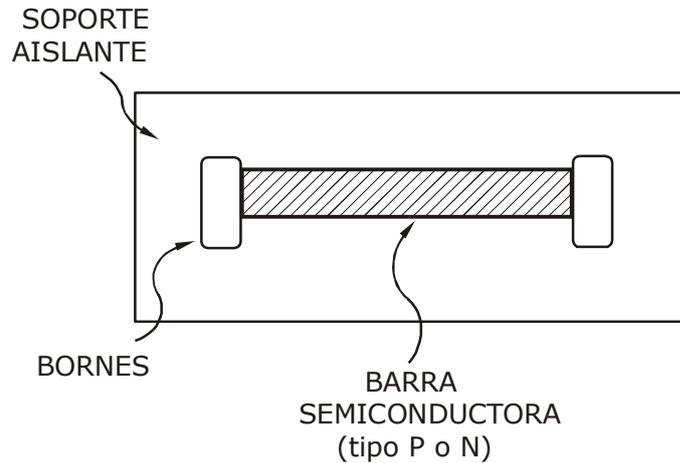
L_G = Longitud de galga (sin deformación).

ϵ = Deformación longitudinal unitaria.

La forma constructiva en zig-zag de las galgas metálicas, tiene como objeto obtener una longitud lo suficientemente grande en un área reducida. A ésta forma se la denomina *rejilla*.

B- Galgas Semiconductoras

En éste tipo de galgas, el elemento sensible es un material semiconductor que puede estar dopado con impurezas tipo P o tipo N.



Cuando semiconductor es del tipo P, al traccionarse la galga habrá un incremento de su resistencia. En cambio cuando el semiconductor es del tipo N, al traccionarse la galga habrá un decremento de su resistencia. El principio de funcionamiento de éste tipo de galgas se basa en la variación de la resistividad ρ del semiconductor, debido a la deformación sufrida.

• Comparación entre las galgas metálicas y las semiconductoras

Las galgas mencionadas poseen ciertas ventajas y desventajas a saber:

- El factor G de las galgas metálicas está alrededor de 2, mientras que para las galgas semiconductoras está alrededor de 100. Esto implica que en las galgas semiconductoras la variación de su resistencia es mayor que en las galgas metálicas, ante iguales valores de deformación. Esto indica que las galgas metálicas son menos sensibles que las semiconductoras.
- Las galgas semiconductoras poseen un alto coeficiente de temperatura comparado con el de las galgas metálicas, esto constituye una desventaja ya que la resistencia de las primeras varía mucho con las temperaturas.
- Las galgas metálicas son más lineales que las semiconductoras.
- Las galgas metálicas soportan más sollicitaciones que las semiconductoras.
- La respuesta dinámica de las galgas semiconductoras es mayor (hasta 10 KHz) a la que poseen las galgas metálicas. Es decir las galgas semiconductoras pueden percibir mejor las deformaciones que se producen durante un tiempo reducido (como por ejemplo vibraciones).

• Características técnicas de las galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas poseen algunas de las siguientes características técnicas:

Resistencia Nominal (R_G): Es la resistencia eléctrica de la galga. Los valores estándares de estas son: 120; 350; 600 y 1000 Ω , con tolerancias del 0,15%.

Factor de Galga (G): Es un valor adimensional significativo de la sensibilidad de la galga. Cuanto más grande es G, la galga será más sensible. Para las galgas extensiométricas metálicas este valor es próximo a 2, y para las galgas semiconductoras está entre 50 y 200.

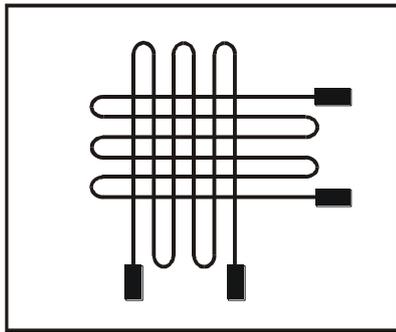
Temperatura de Referencia: Es la temperatura para la cual las características técnicas son válidas. Por lo general la temperatura de referencia es de 23°C.

Coficiente de Temperatura: Este valor indica cuánto cambia la resistencia de la galga por cada grado centígrado de temperatura. Se expresa en $\Omega/^\circ\text{C}$. Cuanto más sea este valor mayor será el cambio de la resistencia de la galga con la variación de la temperatura, lo cual no es deseable ya que puede llevar mediciones erróneas.

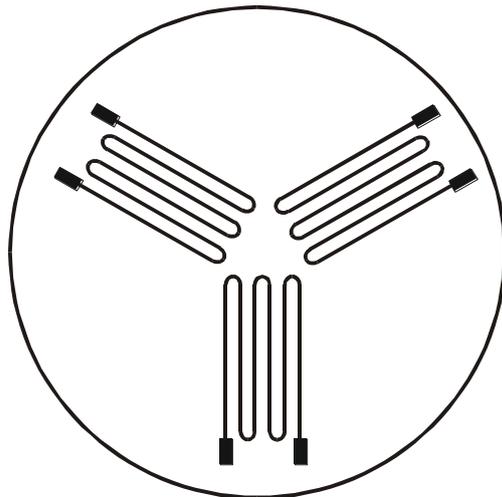
• Formas de las galgas extensiométricas

Según el tipo de esfuerzo con los que van a trabajar las galgas metálicas, se pueden clasificar en:

A- Para esfuerzos axiales: Cuando se trata de un esfuerzo uniaxial, es decir a lo largo de un eje, se utiliza una sola galga que va ubicada de forma tal que su lado activo coincida con el eje del esfuerzo. Ahora, cuando el esfuerzo es biaxial, es decir a lo largo de dos ejes, se utilizan las galgas biaxiales o rosetas como las que se ven a continuación:



DE 2 ELEMENTOS A 90°



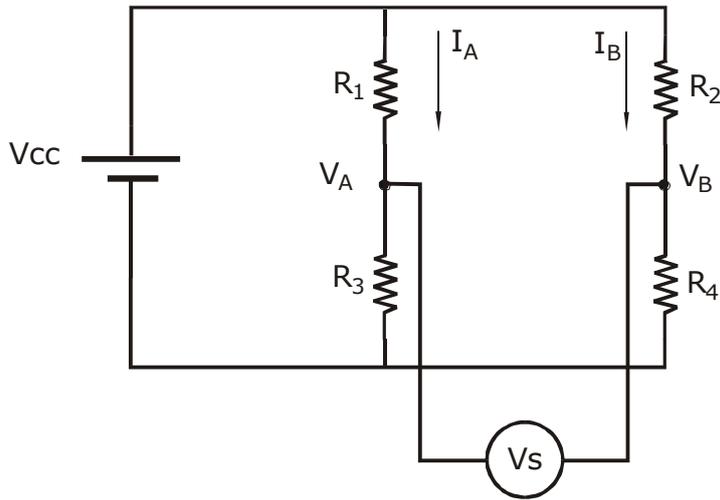
DE 3 ELEMENTOS A 120°

B- Para esfuerzos radiales y tangenciales: Las galgas metálicas de película se pueden construir con formas tales que las mismas sean sensibles a esfuerzos radiales y/o tangenciales, como se muestra a continuación:

(DIBUJO EN PIZARRA)

• Puente de Wheastone

Como se había visto anteriormente, las galgas extensiométricas se comportan como una resistencia variable ante la deformación geométrica que sufre la misma. Para medir dicha variación de resistencia se utiliza el puente de Wheastone:



La condición de equilibrio del puente es:

$$V_S = V_A - V_B = 0 \Rightarrow V_A = V_B$$

Por lo tanto, para que se cumpla la condición anterior se deberá guardar la siguiente relación entre las resistencias del puente:

$$\begin{aligned}
 V_A &= I_A \cdot R_3 \quad ; \quad V_B = I_B \cdot R_4 \\
 V_A = V_B &\Rightarrow I_A \cdot R_3 = I_B \cdot R_4 \Rightarrow \frac{V_{CC}}{R_1 + R_3} \cdot R_3 = \frac{V_{CC}}{R_2 + R_4} \cdot R_4 \\
 \frac{R_3}{R_1 + R_3} &= \frac{R_4}{R_2 + R_4} \Rightarrow \frac{R_1 + R_3}{R_3} = \frac{R_2 + R_4}{R_4} \\
 &\Rightarrow \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}
 \end{aligned}$$

Como podemos ver, siempre que esta relación se mantenga el puente estará en equilibrio ($V_S=0$). Si hubiera un desequilibrio, la tensión de salida será:

$$V_S = V_{CC} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right)$$

Si cada una de las resistencias sufre una pequeña variación ΔR , la tensión de salida será:

$$\begin{aligned}
 V_S &= V_{CC} \left[\left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + R_3 + \Delta R_1 + \Delta R_3} - \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_2 + R_4 + \Delta R_2 + \Delta R_4} \right) - \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right) \right] \\
 V_S &= V_{CC} \left[\frac{R_1 R_3}{(R_1 + R_3)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) - \frac{R_2 R_4}{(R_2 + R_4)^2} \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right]
 \end{aligned}$$

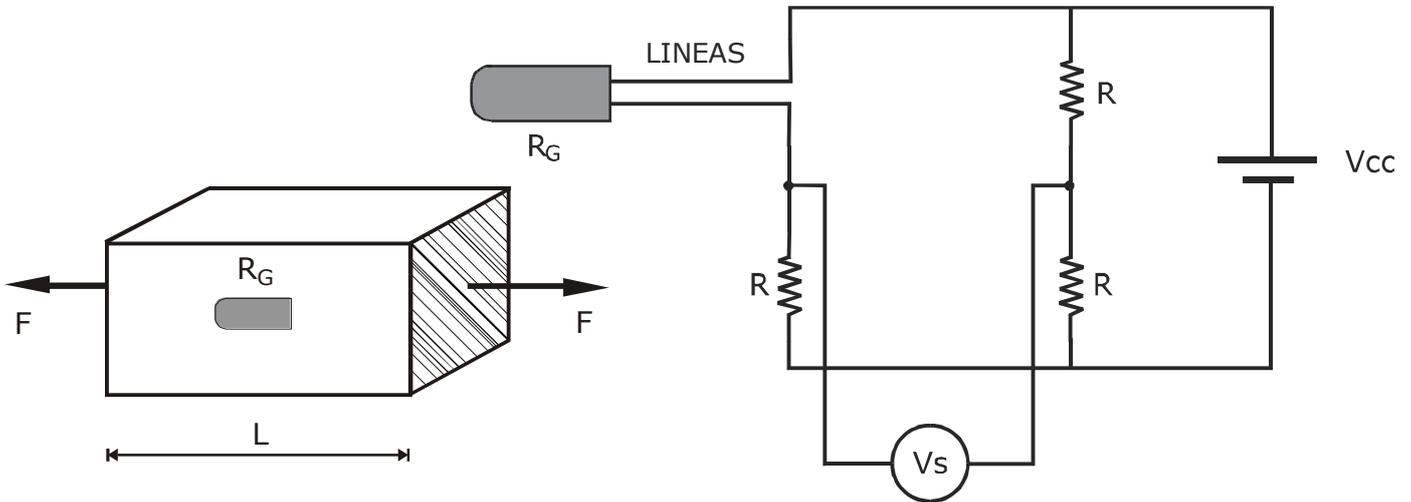
De la expresión anterior se puede comprobar lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 \uparrow R_1 \quad (+\Delta R_1) &\Rightarrow \uparrow V_S & \uparrow R_3 \quad (+\Delta R_3) &\Rightarrow \downarrow V_S \\
 \uparrow R_2 \quad (+\Delta R_2) &\Rightarrow \downarrow V_S & \uparrow R_4 \quad (+\Delta R_4) &\Rightarrow \uparrow V_S
 \end{aligned}$$

Con esto vemos que **el incremento en las resistencias de brazos adyacentes provocan variaciones opuestas en la tensión de salida.**

• Montaje de las Galgas Extensiométricas

Veamos como se realiza el montaje de las galgas extensiométricas para la medición de deformaciones en un cuerpo que es sometido a esfuerzos, para esto la galga es pegada sobre la superficie del mismo. Como ejemplo tomaremos el caso en que el cuerpo se tracciona:

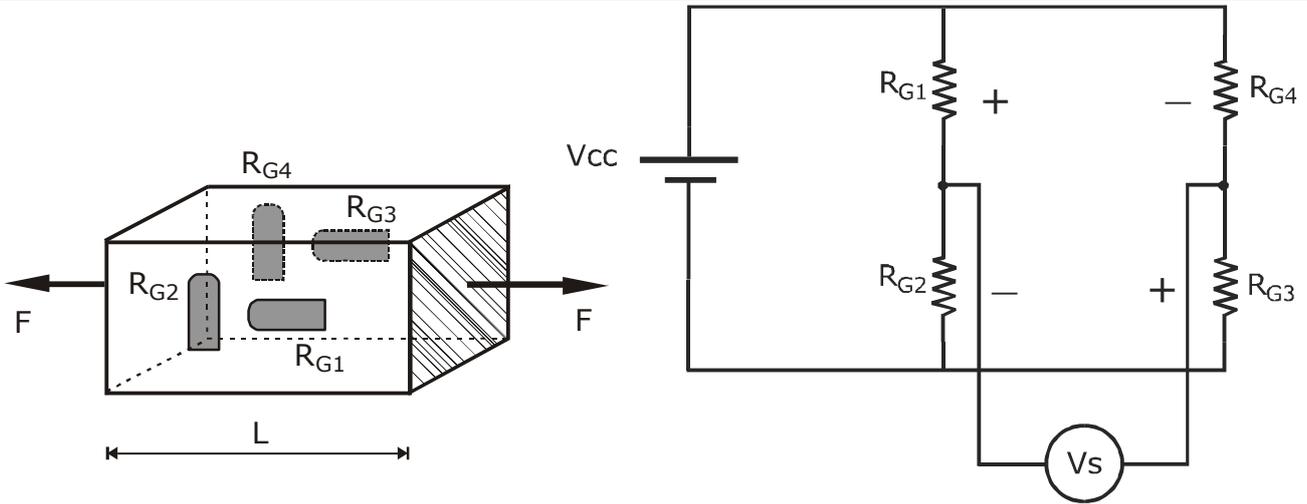


Considerando que las cuatro ramas del puente de Wheatstone poseen iguales resistencias cuando el cuerpo no se somete a esfuerzos, la salida será $V_s = 0V$ (equilibrio). Ahora, si el cuerpo se tracciona con una fuerza F , el mismo sufrirá una deformación longitudinal ΔL que también se manifiesta en la galga ($\Delta L = \Delta L_G$), por lo tanto al deformarse la misma se produce una variación ΔR_G en su resistencia. La consecuencia de dicha variación es el desequilibrio ($V_s \neq 0V$) del puente Wheatstone, de ésta forma tendremos $V_s = \Delta V$, es decir un voltaje dependiente de la deformación sufrida por el cuerpo.

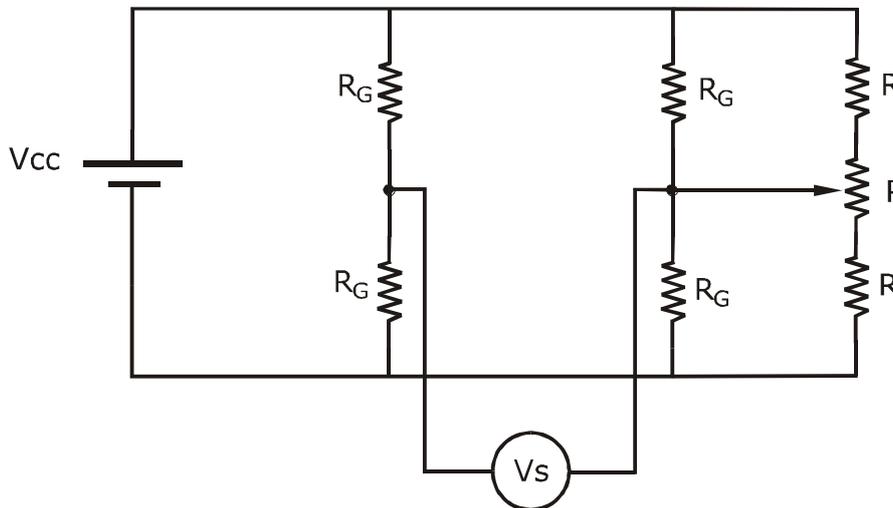
Las variaciones de la temperatura ambiente también producen el desequilibrio del puente ya que:

- Provocan la dilatación y contracción del cuerpo.
- Provocan la variación de la resistencia de la galga R_G .
- Provocan la variación de la resistencia de la línea (conductor) que une a la galga con el puente.

Estos factores son perjudiciales en la medición de deformaciones, ya que el valor de la misma queda expuesto a las variaciones de la temperatura ambiente. Para descartar la influencia de la temperatura ambiente en la medición se recurre al montaje de cuatro galgas en puente sobre el cuerpo, como se muestra a continuación:

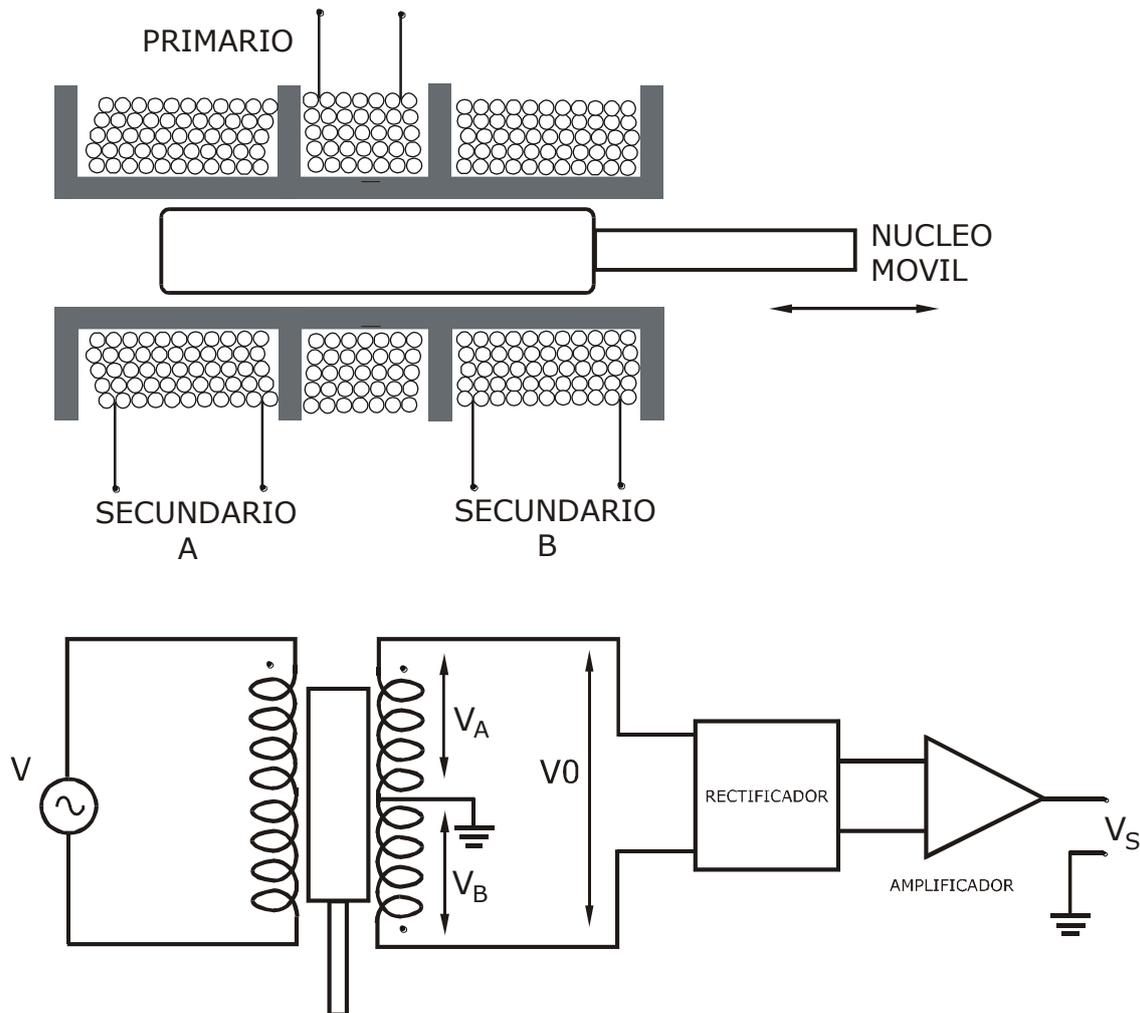


Este montaje presenta la desventaja de que las cuatro galgas deben ser iguales para que el puente se mantenga en equilibrio cuando $F = 0$, como esto es difícil de lograr se recurren a circuitos adicionales que permiten equilibrar al puente. Un ejemplo de estos circuitos es el siguiente:



2.1.2 TRANSFORMADOR DIFERENCIAL DE VARIACIÓN LINEAL

A éste transductor se lo denomina LVDT (siglas en inglés), y consiste de un transformador que posee dos bobinados secundarios idénticos conectados en serie-oposición, y un núcleo móvil como se muestra a continuación:



Este dispositivo convierte el desplazamiento de su núcleo móvil en una señal eléctrica proporcional (tensión V_s). Supongamos que en el bobinado primario se aplica una tensión senoidal V , entonces en cada bobinado secundario tendremos:

$$V_A = K_A \text{sen}(\omega.t) \quad V_B = K_B \text{sen}(\omega.t)$$

Donde K_A y K_B son valores que entre otras cosas dependen de la posición del núcleo móvil (es decir el acoplamiento entre primario y secundario). Si observamos la figura anterior, podemos ver que:

$$V_0 = V_A - V_B = (K_A - K_B) \cdot \text{sen}(\omega.t)$$

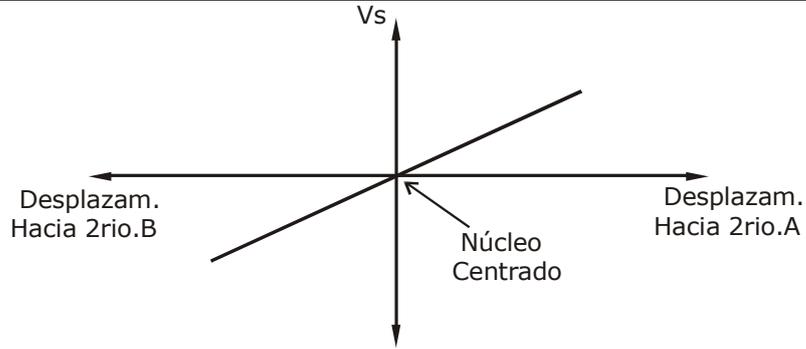
Analicemos que sucede con la tensión V_0 cuando el núcleo móvil se encuentra en distintas posiciones:

$$\text{POSICION INTERMEDIA} \rightarrow K_A = K_B \Rightarrow V_0 = 0 \text{ V}$$

$$\text{HACIA EL SECUNDARIO "A"} \rightarrow K_A > K_B \Rightarrow V_0 = (K_A - K_B) \cdot \text{sen}(\omega.t)$$

$$\text{HACIA EL SECUNDARIO "B"} \rightarrow K_A < K_B \Rightarrow V_0 = -(K_A - K_B) \cdot \text{sen}(\omega.t)$$

Entonces, como se puede ver, cuando el núcleo se desplaza hacia el secundario A, la tensión V_0 mantiene su polaridad instantánea; ahora cuando se desplaza hacia el secundario B, la polaridad instantánea se invierte. Por lo tanto, con lo analizado, la tensión continua V_s del esquema anterior se representará gráficamente de la siguiente forma:

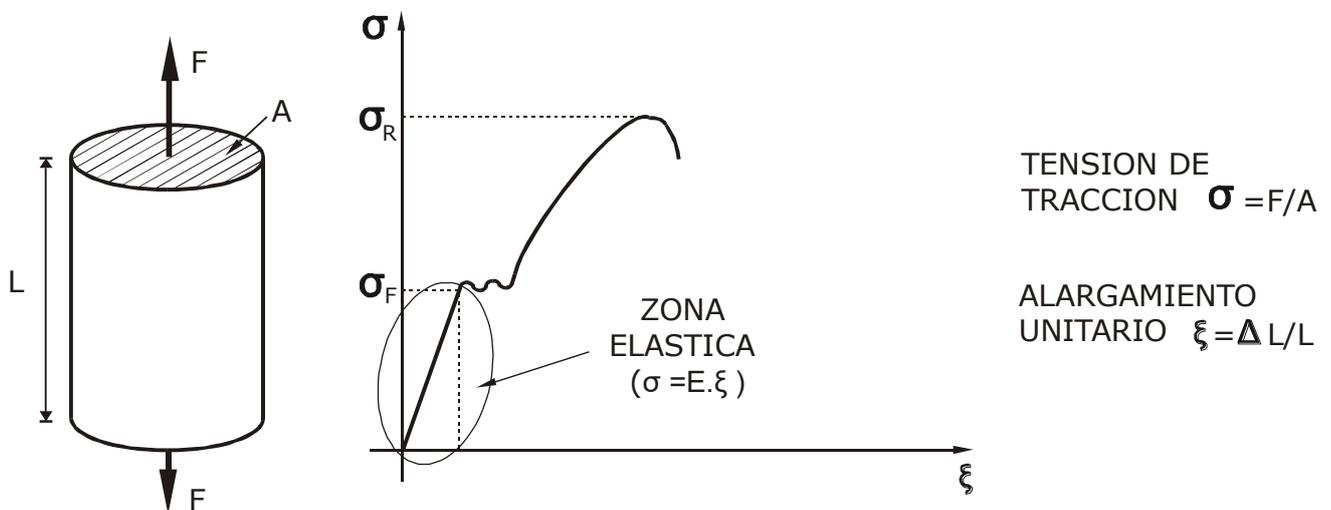


Los Transformadores Diferenciales de Variación Lineal pueden medir desplazamientos que van desde los 0,25 mm a 250 mm.

2.2 TRANSDUCTORES DE FUERZAS

2.2.1 GENERALIDADES

Consideremos un cilindro metálico que se somete a una tracción con una fuerza F , de éste se podrá graficar la tensión a la que se somete en función de la deformación provocada, quedando de la siguiente forma:



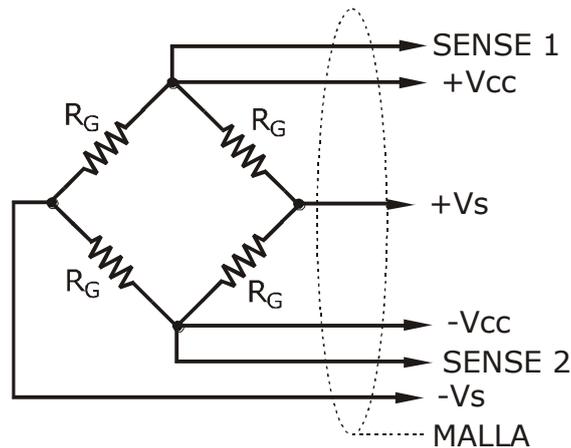
Como se puede apreciar, existe una zona donde el material retornará a su forma inicial si se deja de aplicar la fuerza F . A ésta zona se la denomina *ZONA DE DEFORMACIÓN ELÁSTICA*, y es donde la fuerza F es proporcional a la deformación longitudinal ΔL . Esto permite la medición de la fuerza F en forma indirecta, es decir midiendo dicha deformación longitudinal, lo puede hacerse mediante cualquiera de los transductores mencionados. Por lo tanto los transductores de fuerza necesitarán de un elemento elástico que convierta la fuerza en deformación.

2.2.2 CLASIFICACIÓN

Para medir fuerzas se utilizan las denominadas *CELDAS DE CARGA*, que se pueden clasificar de la siguiente forma:

A) CELDAS DE CARGA BASADAS EN GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

Estas celdas de carga son las más utilizadas, y contienen en su interior cuatro galgas extensiométricas conectadas en puente de Wheastone, que están estratégicamente ubicadas.



Los terminales indicados como SENSE1 y SENSE2 permiten indicar al circuito de acondicionamiento de señal que voltaje de alimentación está llegando a la celda de carga. Hay varios tipos de celdas de carga con galgas, según la forma en que se les aplica el esfuerzo:

(VER AL FINAL)

Las celdas que trabajan por tracción se utilizan para fuerzas del orden de los 100 Kg, mientras que las que trabajan por compresión y por cizalladura se utilizan para pesos del orden de las toneladas.

Veamos a continuación algunas de las características técnicas principales que los fabricantes dan para estas celdas:

- **Capacidad:** Es la fuerza máxima a la que se puede someter la celda de carga, éste valor se puede expresar en libras o kilogramos. Para que la celda de carga trabaje en un buen rango de desempeño la misma de tener un capacidad 50% mayor a la máxima carga a la que se va someter en la aplicación.
- **Carga Mínima:** Es la fuerza mínima que debe aplicarse a la celda para que a la salida de la misma tengamos un voltaje confiable. Es decir, es el menor valor capaz de traducir la celda de carga. Se puede expresar en libras o kilogramos.
- **Resolución:** Este valor indica el voltaje de salida por cada voltio de alimentación, con una carga igual a la capacidad de la celda. Se expresa en mV/V, y los valores típicos de resolución están entre 2 y 3 mv/V. Supongamos que deseamos hallar el voltaje de salida para una celda con resolución 2,001 mV/V y capacidad 100 Kg, que soporta una carga de 600 Kg y se alimenta con una tensión de 12V; dicho voltaje será:

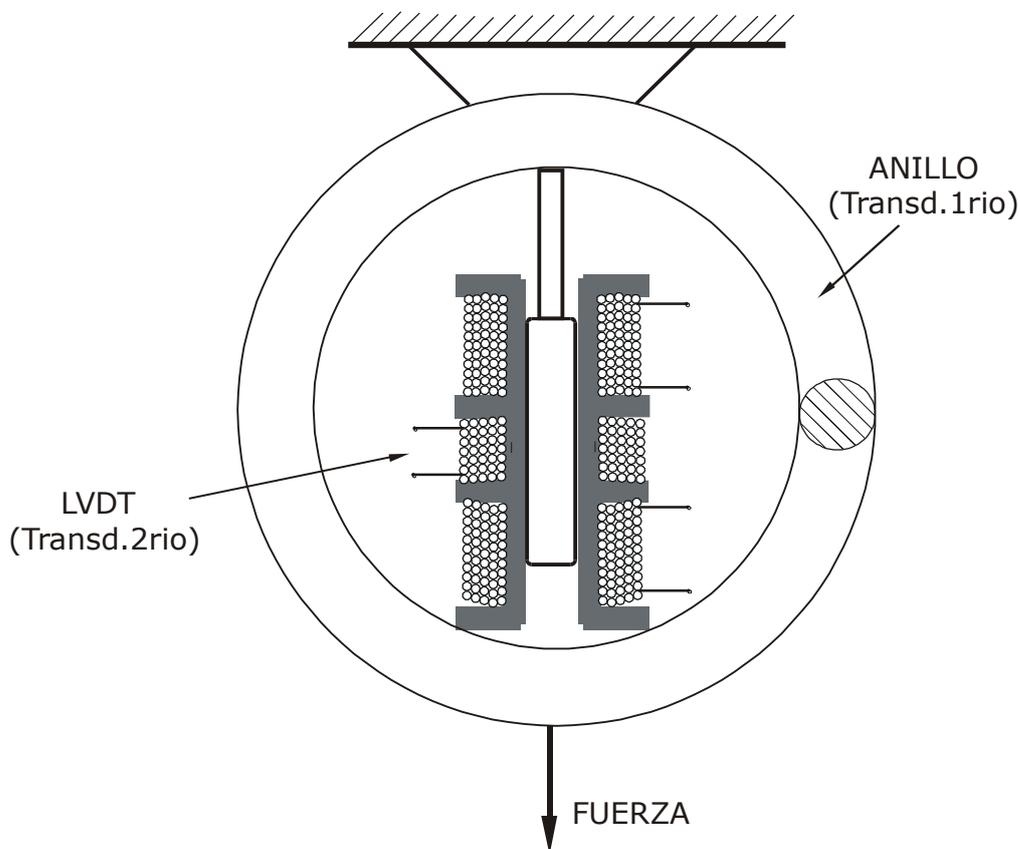
Con: $F=C=1000\text{ Kg}$ y $V_{cc}=1\text{ V}$ tenemos $V_s=2,001\text{ mV}$

Con: $F=600\text{ Kg}$ y $V_{cc}=12\text{ V}$ tenemos $V_s = \frac{F \cdot V_{cc} \cdot R_{es}}{C} = \frac{600\text{ Kg} \cdot 12\text{ V}}{1000\text{ Kg}} \cdot 2,001 \frac{\text{mV}}{\text{V}}$
 $V_s = 14,4\text{ mV}$

• **Otras características técnicas:** También aparece el rango de tensión de alimentación, el rango de temperatura de trabajo, la precisión, etc.

B) CELDAS DE CARGA BASADAS EN LVDT

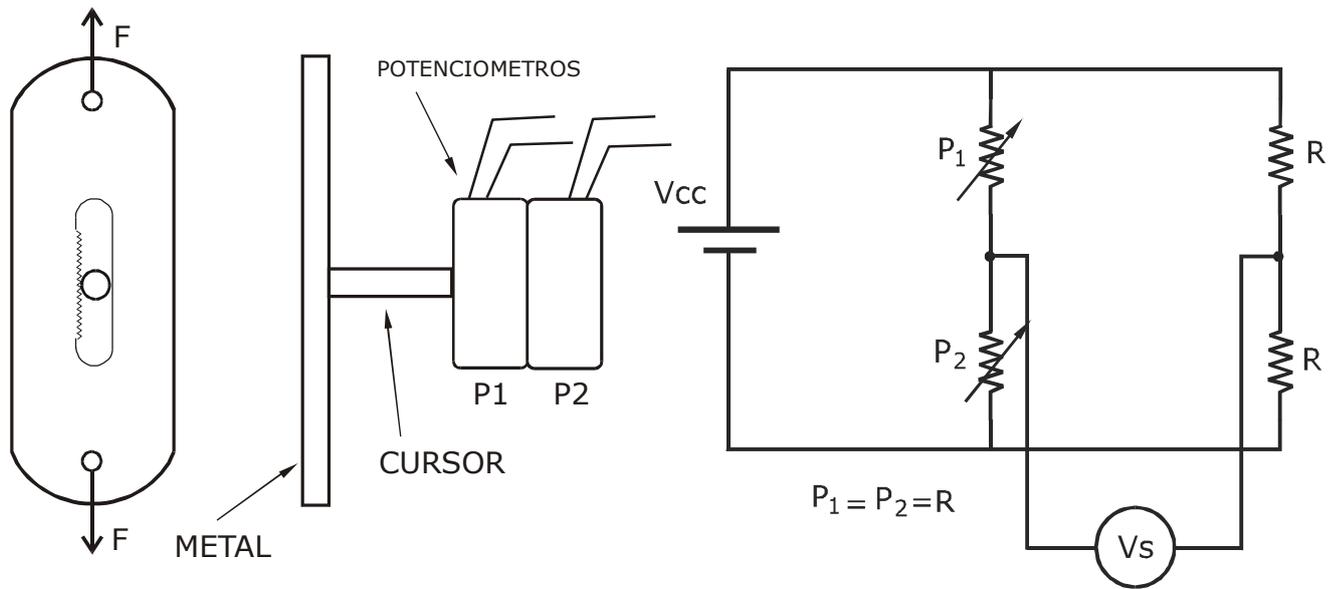
Como habíamos visto el LVDT traduce desplazamiento en voltaje, por lo tanto si se desea medir fuerza habrá que asociarlo a un elemento elástico que permite traducir dicha fuerza en un desplazamiento. Una de las celdas clásicas que utilizan LVDT es la siguiente:



Al traccionarse al anillo mediante una fuerza F , se provocará la deformación elástica del mismo. Esta deformación se traduce en un desplazamiento del núcleo móvil del LVDT, el cual entregará una señal eléctrica de salida aproximadamente proporcional a dicha deformación.

C) CELDAS DE CARGA POTENCIOMÉTRICAS

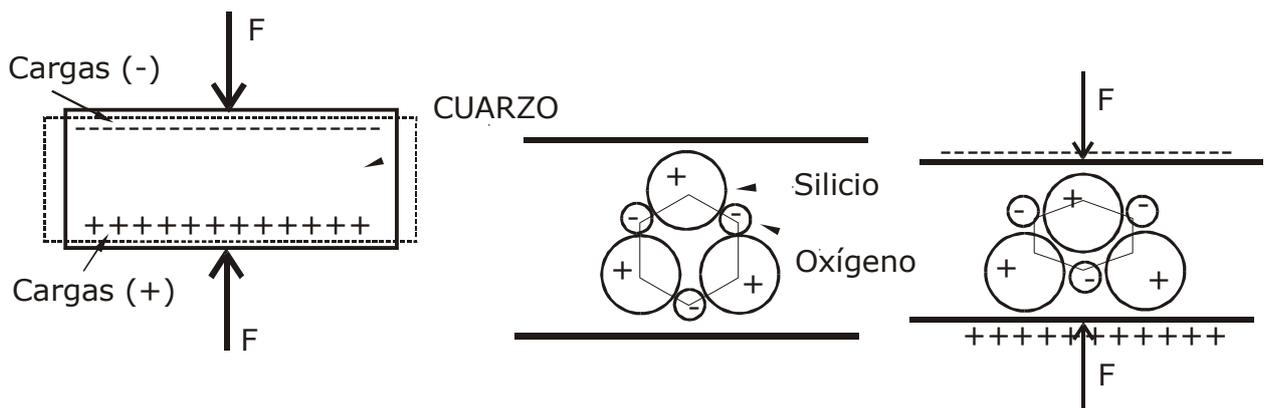
En éste caso el elemento elástico está vinculado al cursor de un potenciómetro de alta sensibilidad, el cual formar parte de un puente de Wheastone. Entonces al producirse una deformación del elemento elástico, se moverá el cursor del potenciómetro causando una variación de resistencia y por ende el desequilibrio del puente.



Este tipo de transductores poseen inconveniente con la sensibilidad del potenciómetro, por más sensibles que sean estos requieren que el cursor efectúe desplazamientos relativamente grandes para obtener una buena variación de la señal de salida. Y para que esto suceda es necesario que el transductor primario sea bastante elástico, lo cual implica que el sistema pierda rigidez.

D) CELDAS DE CARGA PIEZOELÉCTRICAS

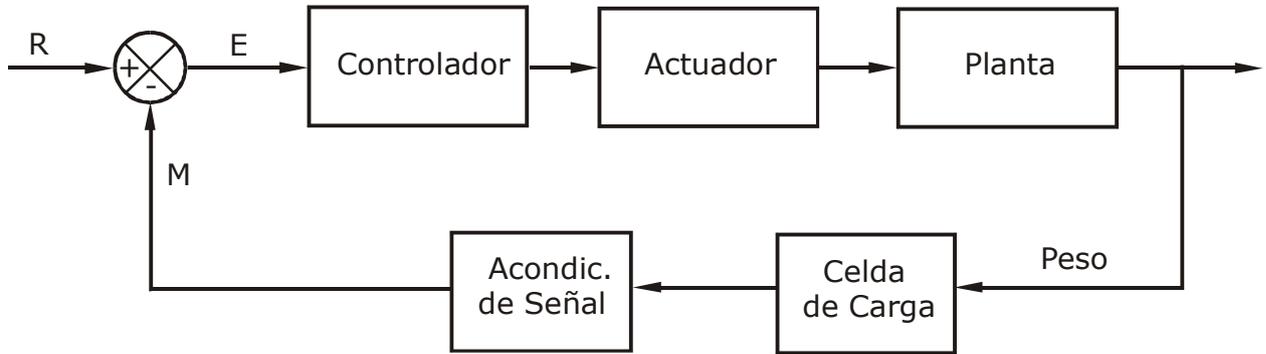
Algunos cristales como el cuarzo poseen la capacidad de que su superficie se cargue eléctricamente (cargas electrostáticas) cuando son sometidos a esfuerzos de compresión o de cizalladura. Esta carga eléctrica es proporcional a el esfuerzo que se encuentra sometido el material.



Esa carga acumulada en la superficie, luego debe convertirse a un voltaje, el cual será proporcional a la fuerza a la que se somete el cristal.

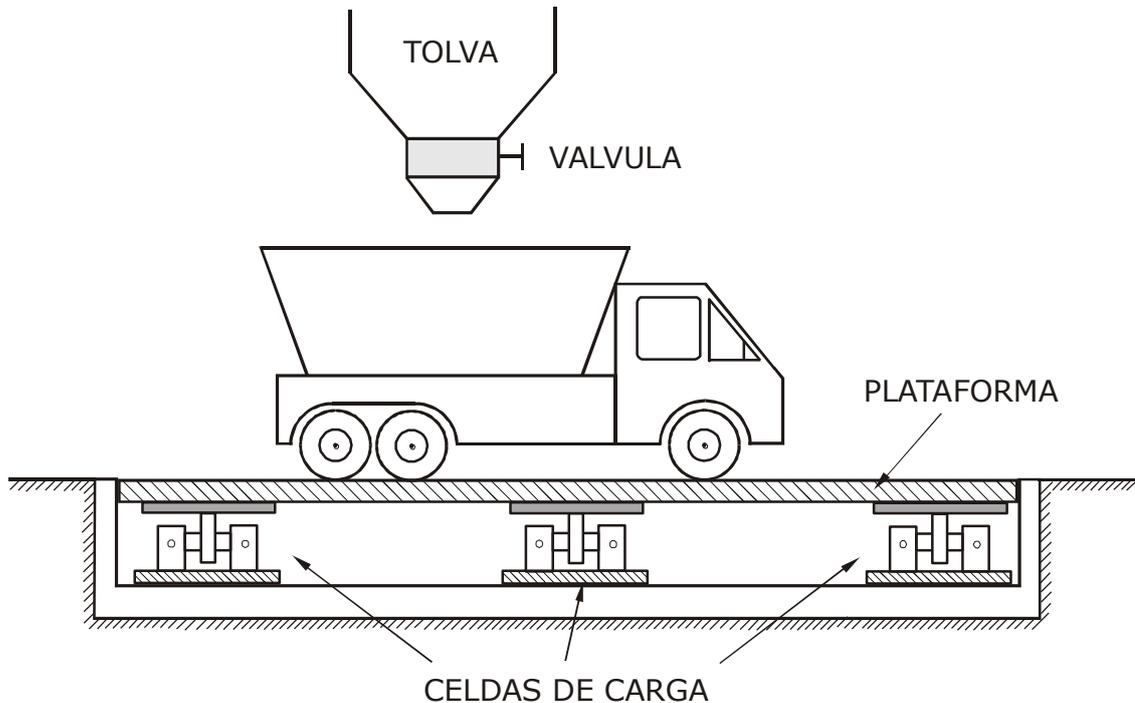
2.2.2 APLICACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES DE FUERZA

Las celdas de carga vistas anteriormente, poseen como aplicación principal a los *sistemas de pesaje*. Estos sistemas son de vital importancia en la automatización industrial, ya que pueden manejar materias primas y productos finales con buena precisión y rapidez. Un esquema básico y general de un sistema de pesaje automático puede ser como el que sigue:

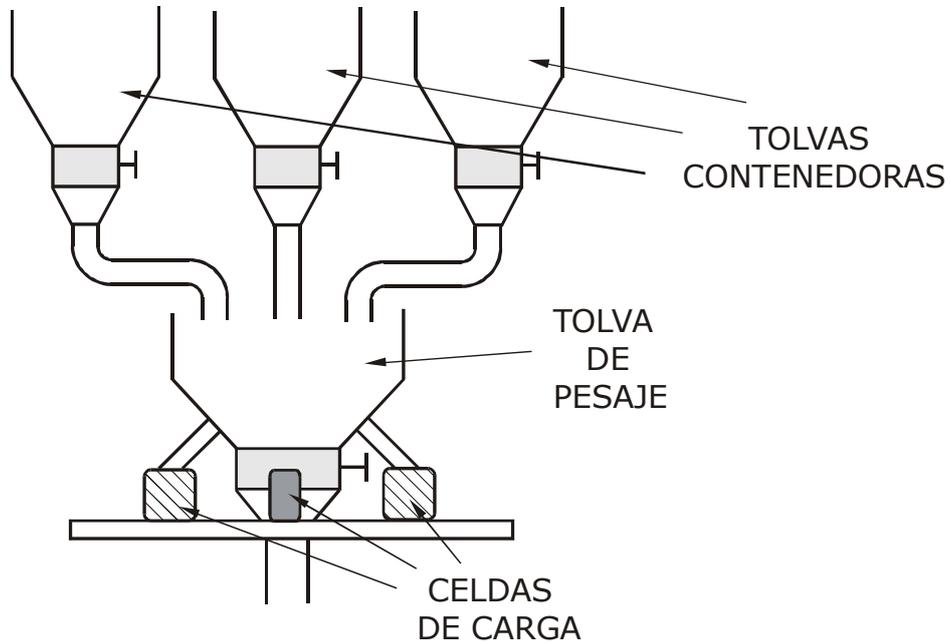


Existen distintos sistemas de pesaje utilizados en diferentes aplicaciones, a continuación se dan los más utilizados:

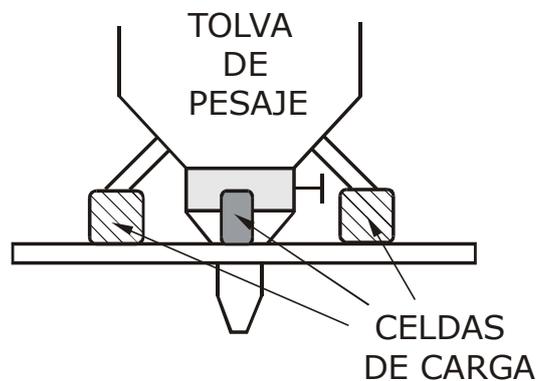
- A) **POR PLATAFORMA:** Este es el sistema de pesaje más conocido y el más sencillo de implementar. Consiste de una plataforma suspendida por una o varias celdas de cargas las cuales envían la señal correspondiente al peso, al controlador que se encarga de abrir o cerrar la válvula, como se muestra a continuación.



- B) **POR DOSIFICACIÓN:** La dosificación es un método de pesaje en el cual los materiales se depositan en un recipiente que se encuentra suspendido por una o varias celdas de carga. Este tipo de sistema de pesaje es ampliamente utilizado en la producción de alimentos.

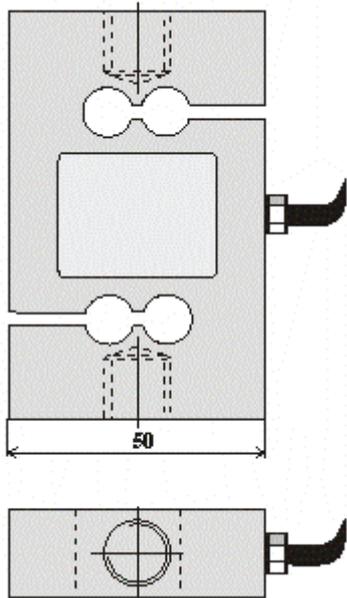


- C) **POR PERDIDA DE PESO:** Este sistema consiste en un recipiente que contiene el material y que se encuentra sobre las celdas de carga. Cuando se desea obtener cierta cantidad de dicho material, éste se deja caer del recipiente midiendo la diferencia de peso, es decir, la cantidad será lo que pesaba el recipiente al inicio menos lo que pesa luego de perder material.

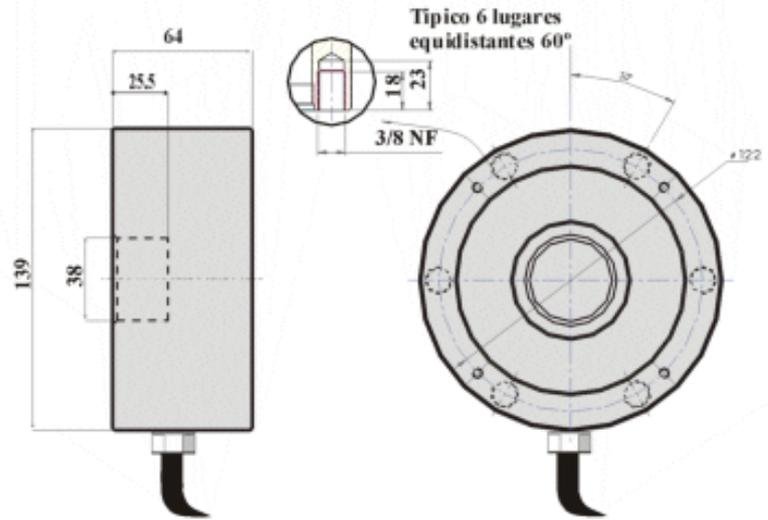


TIPOS DE CELDAS DE CARGA

POR TRACCION



POR COMPRESION



POR CIZALLADURA

