

## MEDIDORES DE DEFORMACION POR RESISTENCIA: GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

### RESUMEN

Este documento describe el principio de funcionamiento de un transductor para la medición de fuerza basado en la deformación causada por esfuerzos mecánicos: Las galgas extensiométricas. Además se establecen las formas de acondicionamiento, usando diferentes configuraciones del circuito denominado puente de Wheatstone. Como aplicación se presentan los resultados de una balanza básica construida con una viga en voladizo a la cual se le han instalado 4 galgas extensiométricas.

**PALABRAS CLAVES:** transductor, fuerza, galgas extensiométricas, acondicionamiento, puente Wheatstone, balanza.

### ABSTRACT

*This document describes the operation's principle of a transducer for force-measurement based on deformation caused by mechanic stress: The extensimetric gauges. Also some forms of signal conditioning using different configurations of the denominated Wheatstone Bridge Circuit are presented. As an application of the results, a basic scale constructed with a beam in projection has been modified installing 4 strain gauges.*

**KEYWORDS:** transducer, strain gauges, force, preparation, Wheatstone bridge, synchronous demodulation, balance, conditioned.

### 1. INTRODUCCIÓN

En 1856 Lord Kelvin descubrió que al aplicar una fuerza sobre un hilo conductor o un semiconductor se presenta una variación en su resistencia eléctrica. Este principio permite realizar mediciones de fuerzas muy tenues que provoquen pequeñas deformaciones en el conductor.

La utilidad de este principio se manifiesta en la construcción de las galgas extensiométricos. Estos dispositivos son transductores pasivos, que aplicados sobre un espécimen, permiten medir la fuerza ejercida sobre él a partir de la deformación resultante. Así, fuerzas de compresión, tracción o torsión, aplicadas sobre materiales elásticos, generan deformaciones que son transmitidas a la galga, respondiendo ésta con una variación de su propia resistencia eléctrica.

Las galgas se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones a nivel industrial, de investigación en ingeniería y en todos los campos donde se requieran mediciones precisas de fuerza. Esas mediciones pueden ser de tres tipos:

- Estáticas: las referidas a soportes y estructuras resistentes sometidas a cargas fijas.

### EDWIN JHOVANY ALZATE RODRÍGUEZ

Químico Industrial.  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira.  
jhovalz@utp.edu.co

### JOSE WILLIAM MONTES OCAMPO

Ingeniero Mecánico  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira.  
wizac@utp.edu.co

### CARLOS ARMANDO SILVA ORTEGA

Ingeniero Mecánico  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira.  
silva53@utp.edu.co

- Mixtas: cuando se realizan sobre soportes y estructuras sometidas a la acción de cargas de variación rápida.
- Dinámicas: realizadas sobre acciones de variación rápida: fenómenos de vibración. impacto, etc.

### 2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Su principio de funcionamiento se basa en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el material de que esta hecho y el diseño adoptado. [2]

Si se considera un hilo metálico de longitud  $l$ , sección transversal  $A$  y resistividad  $\rho$ , su resistencia eléctrica  $R$  es:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de  $R$  cambia, por tanto el cambio de  $R$  se puede expresar como:

$$dR = \frac{A(\rho dl + l d\rho) - \rho l dA}{A^2} \quad (2)$$

El cambio de longitud que resulta de aplicar una fuerza  $F$  a una pieza unidimensional (siempre y cuando no se supere su límite elástico, Figura 1), está dado por la ley de Hooke. [1]

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \varepsilon = E \frac{dl}{l} \quad (3)$$

donde  $E$  es modulo de elasticidad del material, denominado módulo de Young,  $\sigma$  es el esfuerzo uniaxial y  $\varepsilon$  es la deformación unitaria.

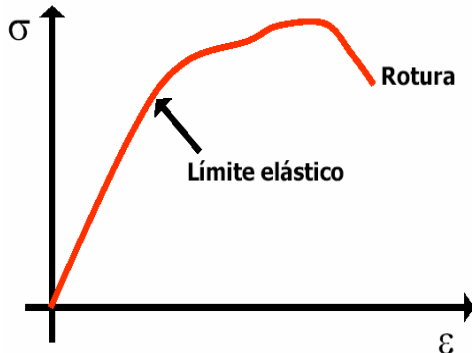


Figura 1. Relación entre esfuerzos y deformaciones.

Cuando el hilo se estira en dirección axial, el área de la sección transversal disminuye, ya que la masa total debe conservarse. La razón de la deformación lateral a la deformación axial también es una propiedad del material, esta propiedad se llama razón de Poisson y se define como:

$$\mu = -\frac{dD/D}{dl/l} \quad (4)$$

donde  $D$  es el diámetro del hilo y  $\mu$  es denominado coeficiente de Poisson. Su valor está entre 0 y 0.5, en términos de la razón de Poisson tendremos:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} [1 + 2\mu] + \frac{d\rho}{\rho} \quad (5)$$

Los cambios en la resistencia se originan por la modificación de la geometría en la longitud o el área y el cambio en la resistividad. La dependencia de la resistividad en deformación mecánica se expresa en términos del coeficiente de piezoresistividad  $\pi_1$  definido por la siguiente expresión:

$$\pi_1 = \frac{1}{E} \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \quad (6)$$

Por lo tanto el cambio en la resistencia es:

$$\frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\mu + \pi_1 E \quad (7)$$

El cambio en resistencia de un medidor de deformación por lo general se expresa en términos de un parámetro determinado por el fabricante empíricamente llamado factor de galga, GF expresado como:

$$GF = \frac{\delta R/R}{\varepsilon} \quad (8)$$

Relacionando las ecuaciones (7) y (8) se observa que el factor de galga depende de la razón de Poisson para el material del medidor y su piezoresistividad.

### 3. CARACTERISTICAS

La construcción típica de un medidor de deformación metálico Figura 2, muestra un patrón de hoja metálica que se forma por el procedimiento de fotograbado de una película que previamente ha sido montada en una base plástica de resina flexible.

Un medidor típico tiene un factor de calibración entre 2.0 y 2.2, una resistencia sin deformación de  $120 \pm 1 \Omega$ , una linealidad dentro de  $\pm 0.3\%$ , la deformación máxima por tensión de  $+2 \times 10^{-2}$ , una deformación máxima por compresión de  $-1 \times 10^{-2}$  y una temperatura máxima de operación de  $150^\circ \text{C}$ . El cambio en la resistencia a la deformación máxima por tensión es  $\Delta R = +4.8 \Omega$  y  $\Delta R = -2.4 \Omega$  a la deformación máxima por compresión. Se especifica una corriente máxima de calibración de 15mA a 100mA, según el área con el fin de evitar efectos de autocalentamiento. [3]

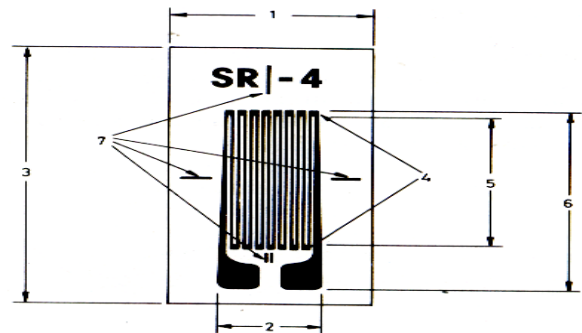


Figura 2. Parámetros de una galga impresa. 1 ancho del soporte; 2 ancho de la galga; 3 longitud del soporte; 4 extremos ensanchados; 5 longitud activa; 6 longitud total de la galga; 7 marcas de alineación.

La variedad de aplicaciones requiere diseños especiales y técnicas de montaje apropiadas, incluyendo variaciones de diseño en el material de soporte, configuración de rejilla, técnicas de pegado y resistencia eléctrica total del medidor

El proceso de instalación de las galgas consiste en su fijación sobre el espécimen de prueba de forma que las isostáticas de la estructura atraviesen la parte activa de la banda extensiométrica. Previamente, la superficie receptora habrá sido tratada convenientemente a fin de obtener la máxima eficacia del adhesivo (Figura 3).

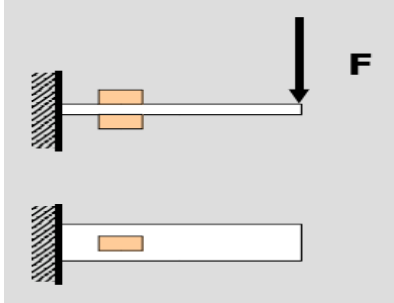


Figura 3. Montaje de una galga extensiométrica.

Existen dos tipos de galgas básicos:

- De hilo conductor o lámina conductora: el sensor está constituido básicamente por una base muy delgada no conductora y muy flexible, sobre la cual va adherido un hilo metálico muy fino con terminales adecuados en sus extremos.
- Semiconductor: Los cristales de silicio son el material básico, se cortan en secciones muy delgadas para formar medidores muy pequeños, presentan resistencia más alta, fatiga de vida más larga y menor histéresis con respecto a los medidores metálicos. Sin embargo, la salida del medidor de deformación del semiconductor es no lineal con la deformación, y la sensibilidad de deformación puede ser muy dependiente de la temperatura.

#### 4. ACONDICIONAMIENTO

Las mediciones de carga requieren detectar cambios muy pequeños de resistencia, el circuito de puente Wheatstone se usa predominantemente. La forma habitual de obtener una señal eléctrica como resultado de una medida empleando un puente de Wheatstone, es mediante el método de deflexión. En éste método, se mide la diferencia de voltaje entre ambas ramas o la corriente a través de un detector dispuesto en el brazo central.

Existen tres tipos de montajes básicos: con una, dos y cuatro galgas. El uso de múltiples medidores permite compensar los efectos no deseados, como componentes de temperatura y deformaciones específicas.

En el circuito puente de la Figura 4, las cuatro resistencias representan medidores de deformación activos, la salida  $V_d$  esta dada por: [4]

$$V_d = V \left[ \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] \quad (9)$$

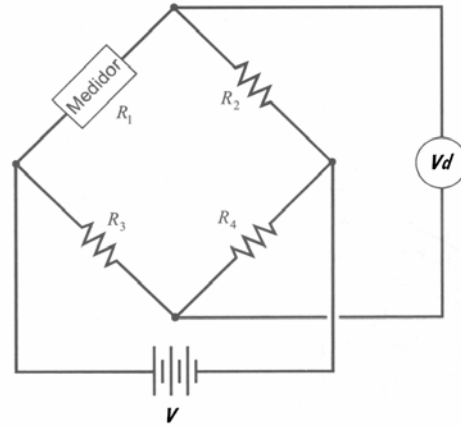


Figura 4. Puente de medida con una galga

Suponemos que inicialmente los medidores de deformación están en estado de cero deformación, si se someten a deformaciones tal que las resistencias cambian a  $dR_i$ , e  $i=1, 2, 3$  y  $4$ , el cambio de voltaje de salida será:

$$dV_d = \sum_{i=1}^{i=4} \frac{\partial V_d}{\partial R_i} dR_i \quad (10)$$

Evaluando las derivadas parciales obtenemos:

$$dV_d = V \left[ \frac{R_2 dR_1 - R_1 dR_2}{(R_1 + R_2)^2} + \frac{R_3 dR_4 - R_4 dR_3}{(R_3 + R_4)^2} \right] \quad (11)$$

Suponiendo  $dR_i \ll R_i$ , De las ecuaciones (8), (3),  $dR_i = R_i \varepsilon_i GF_i$  y  $dV_d$  puede determinarse el cambio de salida de voltaje  $\delta V_d$  así:

$$\delta V_d = V \left[ \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} (\varepsilon_1 GF_1 - \varepsilon_2 GF_2) + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} (\varepsilon_4 GF_4 - \varepsilon_3 GF_3) \right] \quad (12)$$

Es posible conseguir medidores tal que las resistencias sean iguales y sus factores GF también lo sean, por tanto

$$\frac{\delta V_d}{V} = \frac{GF}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_3) \quad (13)$$

En el caso de un solo medidor tenemos:

$$\frac{\delta V_d}{V} = \frac{GF}{4} \epsilon \tag{14}$$

Así las deformaciones iguales en los brazos opuestos se suman, mientras que las deformaciones iguales en brazos adyacentes se cancelan, el primer efecto se utiliza para aumentar la sensibilidad del medidor y el segundo para compensar efectos indeseados tal como el de temperatura ver Figura 5.

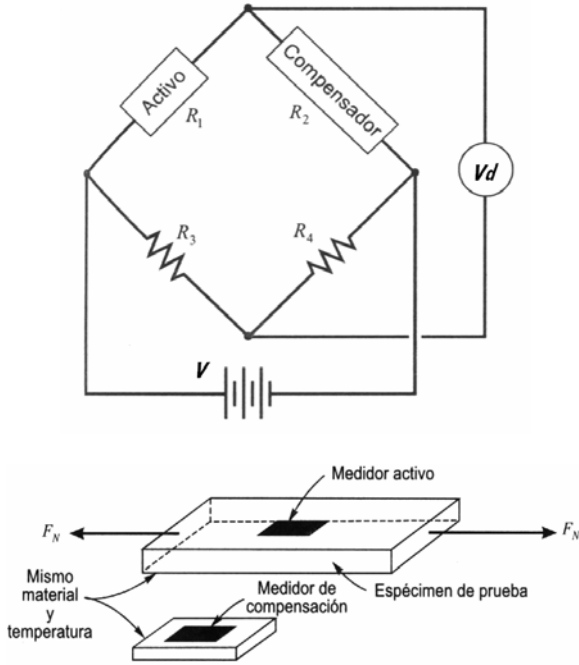


Figura 5. Arreglo de puente para compensar temperatura.

En la Tabla 1, se aprecian diferentes arreglos de medidores con la correspondiente compensación.

Arreglos	Compensación proporcionada
Un solo medidor bajo esfuerzo uniaxial	Ninguna $k=1$
Dos medidores detectan deformaciones iguales pero opuestas: arreglo típico para flexión	Temperatura $k=2$
Dos medidores bajo esfuerzo uniaxial	Sólo flexión $k=2$
Cuatro medidores con pares que detectan deformaciones iguales pero opuestas	Temperatura y flexión $k=4$
Un medidor axial y uno de Poisson	$k=1+\mu$
Cuatro medidores con pares que detectan deformaciones iguales pero opuestas: sensible sólo a la torsión. Arreglo típico de eje.	Temperatura y axial $k=4$

Tabla 1. Arreglos de puentes y su compensación.

### 5. CONSTANTE DEL PUENTE $k$

Se define como la razón de la salida del puente real a la salida de un solo medidor que detecta la deformación cuando las otras resistencias permanecen fijas, ecuaciones (13) y (14), para valores de  $\delta R/R \ll 1$ ; la salida del puente para un medidor será:

$$\frac{\delta V_d}{V} = \frac{kGF\epsilon}{4} \tag{15}$$

La constante del puente depende de la localización de los medidores en el espécimen de prueba y de la posición de la conexión del medidor en el circuito puente, de acuerdo con lo anterior, la sensibilidad del puente se puede asociar con la constante del puente, ver Tabla 1.

### 6. APLICACION

Usando las galgas extensiométricas dispuestas sobre la viga según la Figura 6. Se implementó una aplicación, en la cual se utilizó la linealidad del voltaje de salida del circuito puente para construir un instrumento medidor de masas (balanza).

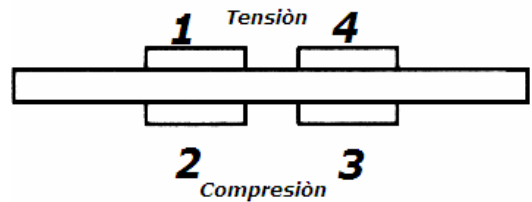


Figura 6. Distribución de galgas en la viga de la balanza.

#### 6.1 Las Galgas en una Balanza

La deformación producida sobre la viga en voladizo genera un voltaje que es linealmente proporcional al desplazamiento, Figura 7.

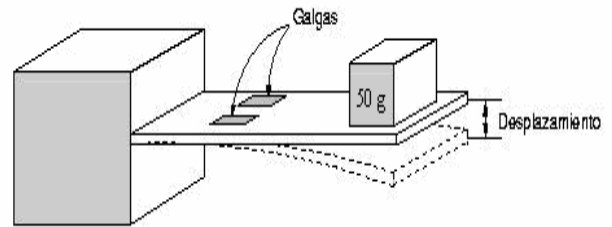


Figura 7. Dispositivo de medición de masas.

El circuito acondicionador, Figura 5, con salida de voltaje según la ecuación (13), nos muestra en qué lugar del circuito puente se conectan las galgas de medición: Las galgas adyacentes se compensan en temperatura; las galgas 1y4 deforman en tensión y por estar opuestas se suman sus salidas de voltaje; las galgas 2 y 3, están

opuestas y deforman en compresión, lo cual hace que el signo se invierta y suma sus salidas, de esta forma la sensibilidad se cuadruplica con respecto a la sensibilidad de un solo medidor.

Para obtener la relación lineal entre la masa y el voltaje de salida (con el puente alimentado con corriente directa) se obtuvieron diferentes medidas de voltaje con diferentes masas conocidas, colocadas sobre el extremo de la viga, Tabla 2.

Masa (g)	Voltaje (V)
0,0	0,720
147,5	1,394
200,0	1,658
295,0	2,032
400,0	2,543
547,5	3,192

Tabla 2. Datos del voltaje en función de la masa.

La gráfica de la Figura 8 muestra la relación lineal y la ecuación que se usó para el programa en MATLAB.

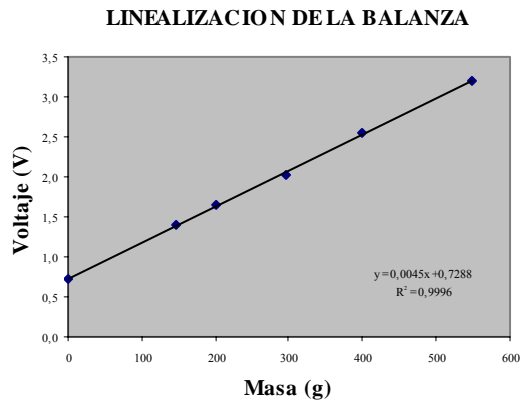


Figura 8. Relación entre el voltaje de salida del puente y la masa sobre la viga.

A través del software de MATLAB, se creó un programa para adquirir los datos desde una tarjeta apropiada, que permite visualizar el valor de la masa y el voltaje generado, también se puede determinar el error con el que se mide una masa patrón ubicada sobre la viga Figuras 9 y 10.

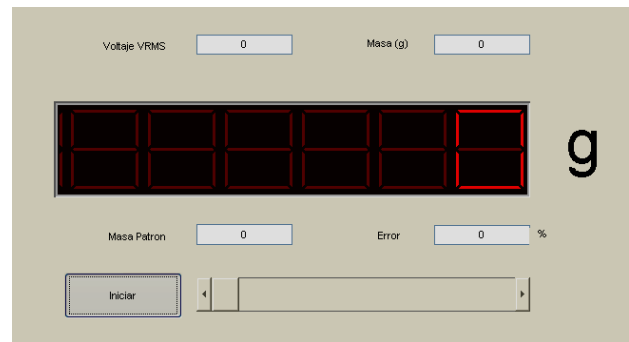


Figura 9. Presentación de la balanza en MATLAB.

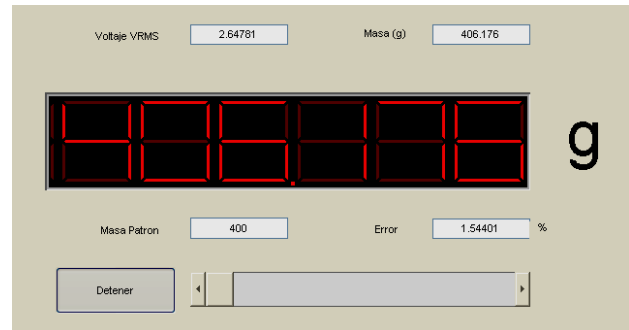


Figura 10. Pesaje de una masa patrón.

## 7. CONCLUSIONES

Las galgas extensiométricas permiten obtener, mediante el adecuado acondicionamiento de la señal resultante, una lectura directa de la deformación longitudinal producida en un punto de la superficie de un material dado, en el cual se ha adherido la galga.

El hecho de instalar dos galgas idénticas en brazos adyacentes elimina los efectos de temperatura en la galga medidora. Como es conocido, la temperatura afecta a la resistencia eléctrica, de forma que si se usa sólo una galga medidora, la resistencia eléctrica de la misma dependerá de la temperatura ambiente y su efecto habrá que descontarlo de la medida. Disponiendo de dos galgas, si se mide la diferencia de resistencia entre ambas, ya se descuenta con ello el efecto de la temperatura.

El acondicionamiento de la señal obtenida del puente, generalmente suele hacerse mediante amplificadores operacionales y de instrumentación.

Comercialmente las encontramos integradas en transductores completos, aunque también se puede disponer de ellas individualmente.

Debido a la utilización de más de una galga medidora se consigue aumentar la sensibilidad del circuito puente. Esto permite que para una misma deformación tengamos una mayor señal de salida con una tensión de alimentación dada.

Para realizar mediciones en dispositivos como la balanza, es necesario tener en cuenta que la fuerza ejercida por las masas a medir depende del punto donde se ubican, por tanto, debe garantizarse la ubicación de las masas siempre en el mismo punto. Además pueden presentarse deformaciones en otras direcciones sobre la galga, que generarán errores en las mediciones.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Pallas Areny, Ramón. Sensores y Acondicionadores de Señal. Marcombo, S.A. Barcelona, 2001.
- [2] Ferrero, Jose Maria. Guijarro, E. Instrumentación Electronica. Sensores. España, servicio de publicaciones UPV, 1994.
- [3] Bentley P. Jhon, Sistemas de Medición Principios y Aplicaciones. CECSA, México, 1993.
- [4] Figliola-Beasley, Mediciones Mecánicas Teoría y Diseño, Alfaomega Grupo Editor, México, 2003.
- [5] Khazan, Alexander. Transducers and their elements. USA, Pearson Education, 1994.