

CAPÍTULO IV: LAS CADENAS DE MEDIDA Y LOS TRANSDUCTORES DE FUERZA EXTENSIÓMETRICOS

4.1.-INTRODUCCIÓN.-

Hemos venido hablando de los instrumentos de medida y de sus características, algunas de las cuales han de determinarse mediante procesos de calibración.

Existen gran variedad de instrumentos de medida o “*cadenas de medida*” con multitud de configuraciones posibles. Uno de los elementos más importantes de cualquier cadena de medida es el dispositivo transductor, entre los que también se pueden encontrar muy diversos tipos y con principios físicos de funcionamiento de toda índole.

Sin embargo nos centraremos, en el presente capítulo, en los transductores basados en galgas extensiométricas, pues dichos dispositivos son los más comunes en lo que a sistemas de calibración e instrumentos de medida de fuerza y par se refiere.

Concretamente estos dispositivos están presentes en:

- Las células de carga, que como comentaremos posteriormente no difieren sustancialmente, en cuanto su principio físico de funcionamiento, con un transductor de fuerza extensiométrico.
- Instrumentos de medida de fuerza, dentro de los cuales los que presentan más prestaciones son los basados en galgas extensiométricas .
- Máquinas de ensayo de materiales uniaxiales, entre las cuales están muy extendidas aquellas en las que la medición de la carga se realiza en base a un instrumento de medida formado una célula de carga/ transductor de fuerza y un dispositivo indicador asociado.
- Transductores de par patrones para la Calibración de llaves dinamométricas.

En el presente proyecto se han elaborado procedimientos específicos de calibración, en los que todos estos dispositivos están presentes, tanto a modo de equipos “mensurando” como equipos “patrones”, por lo que es importante al menos, definir de

una forma básica, el concepto de cadena de medida, así como proporcionar los principios básicos de funcionamiento de los transductores basados en galgas extensiométricas.

En el Capítulo 1: “Antecedentes, Justificación y Objetivos”, ya se resaltó la importancia de conocer con la mayor profundidad posible, tanto el principio físico de funcionamiento como el modo de operación de los equipos de medida, puesto dicha circunstancia es fundamental tanto para la operatividad del laboratorio como para conseguir procedimientos de calibración y cálculos de incertidumbres fidedignos y ajustados a la realidad. Este hecho puede apreciarse especialmente, en el procedimiento dedicado al cálculo de la capacidad óptima de medida del sistema de calibración de fuerzas, así como en las hojas de cálculo elaboradas a tal efecto, en los que se aprecia que la forma de utilización del sistema de calibración (incertidumbre debida a la configuración del sistema) condiciona la obtención de una u otra incertidumbre.

4.2.-DEFINICIONES PREVIAS.-

La palabra transductor tiene varias acepciones. En el ámbito de la metrología significa elemento sensor. Puede decirse que un transductor *es un equipo que transforma una señal mecánica* (presión, velocidad, fuerza.....) *a una eléctrica* (tensión eléctrica o impedancia) por lo que puede entenderse como un convertidor.



Figura 7: Diagrama de funcionamiento de un transductor

Un transductor en sí mismo sirve para poco, su importancia radica, de una parte, en el entorno del que informa, y de otra, de la manera en la que lo hace. Por consiguiente la, utilidad de un **transductor** surge cuando se pretende medir alguna variable asociada a un fenómeno físico que se está estudiando, es por ello que la señal deba recibir un **tratamiento** previo (filtrada, amplificada...) antes de ser conducida a una **unidad de visualización**.

Debe señalarse que la señal que entrega el transductor es eléctrica pudiendo tratarse de una impedancia, tensión o corriente. En general, es deseable que dicha señal sea la tensión, debido a su tratamiento directo con osciloscopios, registradores etc.

A la cadena de elementos anteriormente descrita, que componen todo instrumento de medida se le denomina **cadena de medida**.

En contadas ocasiones y sólo para aplicaciones muy específicas, los laboratorios de metrología deben de diseñar y construir ellos mismos sus propias cadenas de medida por no encontrar en el mercado un dispositivo concreto que responda a sus necesidades, sin embargo, cada día es más difícil no encontrar varias empresas suministradoras para un mismo tipo de dispositivo, por lo que los laboratorios se limitan a contratar la compra de los mismos en base a sus necesidades, fijando criterios de funcionalidad.

4.3.-LAS CADENAS DE MEDIDA.-

La estructura básica de una cadena de medida, comprende un mínimo de tres elementos, como dijimos en el apartado anterior:

- Un **transductor**: sensible a las variaciones de la magnitud física que se desea medir.
- Un **acondicionador de señales**: cuyo papel fundamental es la amplificación de la señal entregada por el transductor, para darle un nivel compatible con la unidad de visualización o de utilización. Normalmente estas unidades integran filtros de cara a reducir las perturbaciones presentes en la señal.
- La **unidad de visualización**: que permite, como mínimo, leer el valor de la magnitud.

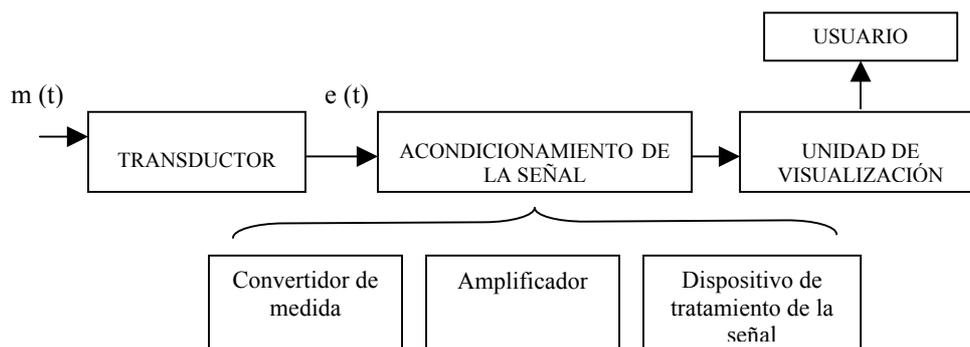


Figura 8: El transductor dentro del acondicionamiento de la señal- Cadena de medida

Esta estructura básica se encuentra en cualquier cadena de medida, por simple que esta sea. Adicionalmente a estos elementos básicos algunas cadenas de medida incluyen elementos adicionales que complican la estructura de la misma y que le dan funciones de control o de análisis y almacenamiento. Cuando la cadena de medida se utiliza para

controlar la acción de un dispositivo, la señal a salida de la cadena es comparada con una señal de referencia, el detector que efectúa esta comparación entrega una señal de error, que él mismo amplifica o transforma, con el fin de controlar el dispositivo, se trata, en definitiva, de cadenas realimentadas tal y como se muestra en el siguiente esquema:

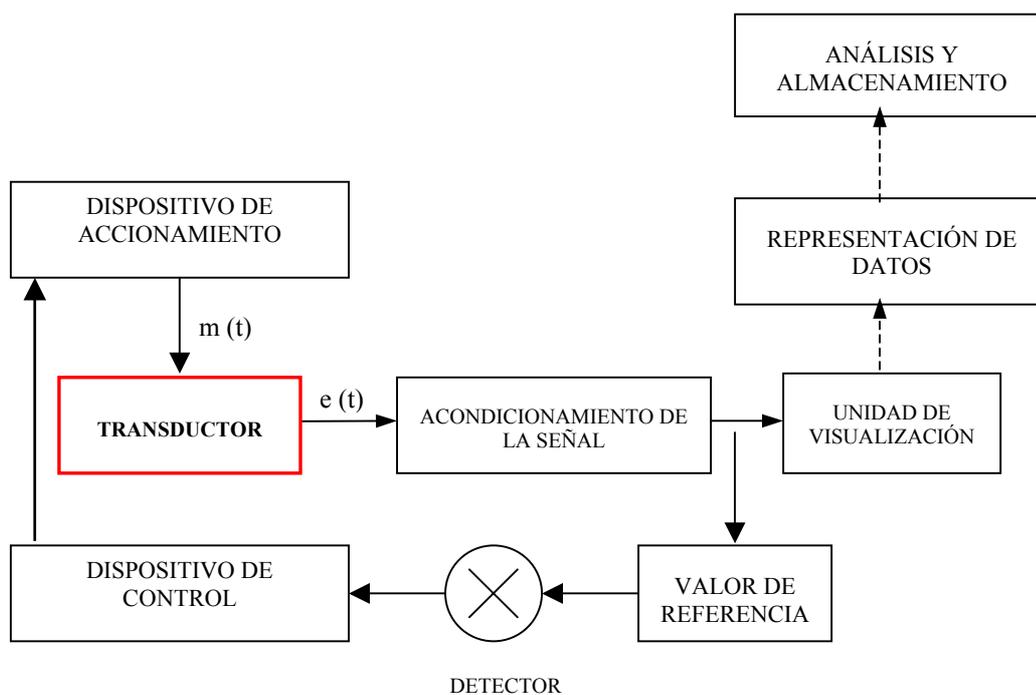


Figura 9 :Cadenas de medidas realimentadas

Es decir, la estructura básica de las cadenas de medida que antes mencionamos, está formada por un transductor de medida y un instrumento de medida.

El instrumento de medida tiene por tanto, las funciones de:

- alimentación del transductor,
- amplificación de la señal obtenida
- posterior visualización de dicha señal,

Teniendo en cuenta que cuando estos se integran en sistemas informáticos, cuentan con funciones añadidas de almacenamiento y representación de los datos. Estos instrumentos de medida basados o integrados en microprocesador asocian elementos de cálculo y de memoria que permiten una corrección por software de errores producidos en el proceso de medida, ya sean de linealidad o de influencias parásitas, con lo que se consiguen mayores niveles de precisión.

Por otra parte, permiten incorporar nuevas funciones entre las que cabe destacar:

- Memorización de máximos de fuerza.
- Generación de señales de paro por sobrecarga.
- Ajuste de niveles de alarma de fuerzas en toda la escala de medida, con visualización y accionamiento de dispositivos externos mediante relé.
- Salidas analógicas de señal.

4.4.-CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE TRANSDUCTORES.-

Atendiendo al tipo de excitación los transductores pueden clasificarse en:

- Activos: ellos mismos generan una tensión o corriente no necesitando por tanto alimentación externa.
- Pasivos: Requieren de una excitación o alimentación externa para generar la señal.

Atendiendo a la propiedad física cuya variación produce la excitación de los transductores, estos se pueden clasificar en:

- Transductores basados en la variación de la resistencia eléctrica como son los potenciómetros, las bandas extensiométricas o las termorresistencias.
- Transductores basados en la variación de inductancia.
- Transductores basados en la variación de la capacidad.
- Termopares basados en el efecto termoeléctrico.
- Elementos basados en el efecto piezoeléctrico que suelen ser cristales de cuarzo que sometidos a tensiones mecánicas provocan una tensión electrostática entre sus caras.

Se trata de una pequeñísima clasificación de transductores, con la única idea de mostrar que en la realidad, cualquier fenómeno que se conozca puede dar origen a un tipo de transductor más o menos complejo y con mayores o menores aplicaciones, y que se utilizan en los instrumentos con los que se miden gran variedad de magnitudes, utilizándose por tanto en multitud de aplicaciones como son la medida de presiones, aceleraciones, fuerzas o pares.

Serán estos dos últimas magnitudes, la medida de fuerzas y pares las que centren la atención en el presente Proyecto Fin de Carrera, por el momento decir, que cuando la medida de fuerza no puede hacerse directamente, lo cual ocurre en multitud de ocasiones,

esta se efectúa mediante el control de la deformación de un elemento elástico sobre el cual actúa dicha fuerza.

El principio de funcionamiento de los transductores de fuerza se abordará con mayor detenimiento en los próximos apartados.

4.5.-TRANSDUCTORES BASADOS EN GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS.-

4.5.1 Definición y principio físico de funcionamiento.-

Los transductores basados en galgas extensiométricas son transductores pasivos de tipo resistivo, es decir, son transductores que, aplicados sobre un elemento sensor permiten medir la fuerza ejercida sobre él a partir de la deformación resultante. Así a raíz de una excitación externa (Fuerzas de compresión, tracción o flexión), aplicadas sobre materiales elásticos, generan deformaciones que son transmitidas a la galga de filamento, la cual responde con una variación de su resistencia eléctrica.

La variación de resistencia se transformará para producir una señal de salida, que suele estar expresada en unidades de tensión (concretamente en mV/V).

El principio físico de funcionamiento está basado en la variación de la resistencia eléctrica con la deformación mecánica elástica (Lord Kelvin 1856).

Definida la resistencia eléctrica de un hilo metálico conductor uniforme como:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

donde como sabemos:

- ρ = resistividad del material.
- A = superficie de la sección transversal.
- L = Longitud del hilo.

si diferenciamos y dividimos por R obtenemos:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

El término dA representa el cambio en el área de la sección transversal del conductor, resultante de una fuerza aplicada para el caso de un estado de deformación uniaxial; tenemos:

$$\varepsilon_a = \frac{dL}{L} \quad \varepsilon_t = -\nu \varepsilon_a = -\nu \frac{dL}{L}$$

donde:

- ε_a es la deformación unitaria axial en el conductor.
- ε_t es la deformación unitaria transversal en el conductor.
- ν es el coeficiente de Poisson del metal usado como conductor.

teniendo esto en cuenta:

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = 2\varepsilon_t = -2\nu \frac{dL}{L}$$

siendo D el diámetro del conductor, luego:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L}(1 + 2\nu)$$

que puede ser escrito como:

$$S_A = \frac{\frac{dR}{R}}{\varepsilon_a} = \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon_a} + (1 + 2\nu) \quad (4.1)$$

Finalmente obtenemos una expresión, donde S_A es definido como la *sensibilidad del metal* utilizado como conductor.

Como podemos apreciar, la sensibilidad de deformación de un metal está influenciada por dos factores, a saber:

- Cambio en las dimensiones del conductor expresado por el término $(1 + 2\nu)$.

$$\frac{d\rho}{\rho}$$

- Cambio en la resistividad del conductor expresado por el término: $\frac{\rho}{\varepsilon_a}$

Es de observar que el posible cambio de la resistividad se le puede imputar a la variación del número de electrones libres y al incremento de su movilidad con la deformación aplicada.

Pues bien, en estos transductores, esta resistencia eléctrica está constituida por un elemento llamado *banda extensiométrica* o *galga*.

Una galga es fundamentalmente una resistencia eléctrica fabricada como una parrilla de hilos paralelos o láminas finas de metal embebidas en una base aislante de material epóxico, tal y como se observa en la siguiente figura:

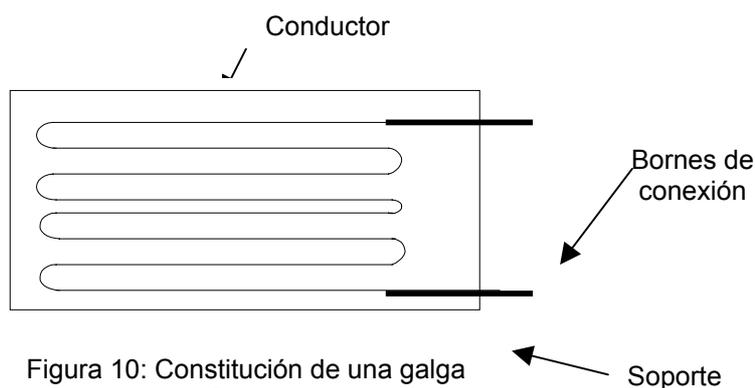


Figura 10: Constitución de una galga de filamento

Las bandas extensiométricas, muestran una resistencia al cambio $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)$ referida a la deformación ε en la dirección de las líneas de la parrilla expresada por:

$$\boxed{\frac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon} \quad (4.2)$$

donde S_g es el denominado *factor de galga*.

El factor de galga S_g es siempre menor que la sensibilidad de la aleación S_A definida en la ecuación (4.1), ya que la configuración de la parrilla es menos sensible a la deformación que un conductor uniforme. Este factor de galga es un dato fundamental que debe ser proporcionado por el fabricante (suele tener el valor $S_g = 2$) al igual que las resistencia R cuyo valor nominal suele estar comprendido entre 120 y 2000 Ω .

Existen gran variedad de tipos de galgas extensiométricas, las más comunes pueden ser las galgas metálicas, que están formadas por un conductor metálico de sección circular soportados por una fina lámina de material aislante. Los materiales conductores más comunes empleados en este tipo de galgas son:

- El Constantan: Aleación de Cobre (55%) y Níquel (45%)
- Nicrom: Aleación de Níquel (80%) y Cr (20 %).

En cuanto al material de soporte se suele utilizar el nylon, el vinilo, el polietileno o el teflón.

Existen otro tipo de galgas extensiométricas como las semiconductoras, en las que elemento activo es un cristal dopado de silicio, o las biaxiales que básicamente son 2 o más bandas extensiométricas fijadas sobre un mismo elemento de soporte y formando

entre sí ángulos de 45, 60, 90, o 120 grados, interesantes cuando lo que se pretende es medir esfuerzos ejercidos en distintas direcciones.

4.5.2.-Configuración y principio de medida.-

Los transductores de fuerza están compuestos, por tanto, generalmente por:

- Un elemento elástico, de rigidez, carga de rotura y límite elástico elevados.
- Unas bandas extensiométricas, como las que acabamos de definir, adheridas al elemento elástico y conectadas en puente de Wheatstone.
- Resistencias de compensación de temperatura, efectos de hilos, etc.
- Una cubierta exterior.

El principio de medida de un transductor lo podemos expresar en grandes rasgos como sigue:

Al aplicar una fuerza sobre el elemento receptor de carga del transductor, se produce una deformación del elemento elástico que es transmitida a las galgas pegadas solidariamente al mismo. Una deformación mecánica en la geometría de las galgas producirá una variación de las resistencias eléctricas de las mismas, en base al principio expuesto en el apartado anterior, variación proporcional a la fuerza aplicada.

Posteriormente se trata de trasladar una magnitud de fuerza a una magnitud eléctrica, labor que se realiza normalmente mediante un Puente de Wheatstone.

Esta conversión de una fuerza mecánica a una magnitud eléctrica “medible” la podemos sintetizar en el siguiente supuesto:

Sea una columna a la cual se le aplica axialmente una fuerza F. En esta dirección se causará una tensión:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

siendo A el área transversal de la columna.

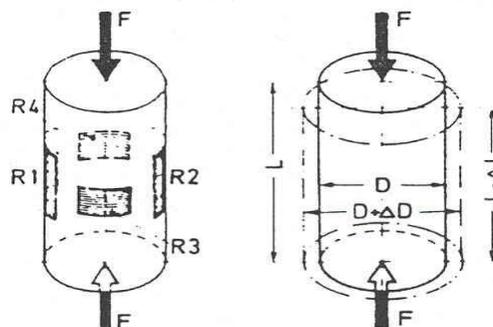


Figura 11: Deformación barra sometida a compresión

De acuerdo a la Ley de Hooke esa tensión la podremos expresar:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

donde como sabemos $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$

La galga, que está pegada sobre la superficie de la columna en sentido axial, está sometida a un cambio de longitud y en ella se producirá un cambio en sus resistencia de acuerdo a la expresión (4.2):

$$\frac{\Delta R}{R} = S_g \frac{\Delta L}{L}$$

De tal forma que combinando las expresiones:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta l}{L} E = \frac{E}{S_g} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

obtenemos finalmente :

$$\boxed{\frac{\Delta R}{R} = \frac{S_g}{E \cdot A} \cdot F} \quad (4.3)$$

que muestra que el cambio de resistencia ΔR es directamente proporcional a la fuerza aplicada (siempre que nos movamos dentro del límite de proporcionalidad o elástico del material).

Como es obvio, al aplicar la fuerza axial, se producirá una deformación también en sentido transversal (contracción o expansión) que afectará a las galgas pegadas en ese sentido y será:

$$\varepsilon_t = -\nu \cdot \frac{\sigma}{E}$$

donde ν es el coeficiente de Poisson.

Es usual para el acero que $\nu \approx [0,3 \div 0,5]$, por lo que la deformación que aparece en la galga transversal será del orden del 33% de la deformación en sentido axial.

4.5.3.-Puente de Wheatstone.-

La forma más usual para poder medir la variación de resistencia eléctrica que acabamos de definir, es la de conectar las galgas de un transductor mediante un circuito en puente de Wheatstone.

Dependiendo del tipo de medida que se quiera realizar (tracción /compresión, flexión o torsión), y de que se conozcan o no las direcciones principales de las tensiones, el montaje podrá realizarse en:

- $\frac{1}{4}$ de Puente: en donde solamente unas de las cuatro ramas del puente será una banda extensiométrica y el resto resistencia de valor fijo.
- $\frac{1}{2}$ de Puente: donde dos de las cuatro ramas del puente serán una banda extensiométricas y el resto de valor fijo.
- Puente completo: Las cuatro ramas del puente serán bandas extensiométricas.

En la siguiente figura, podemos observar la configuración de un *Puente Completo*, en el que las cuatro galgas pegadas en la columna están conectadas en puente de Wheatstone:

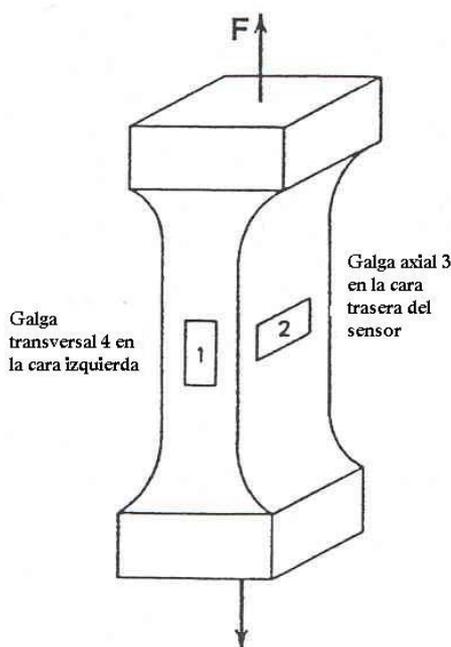


Figura 12.1: Deformación barra sometida a compresión

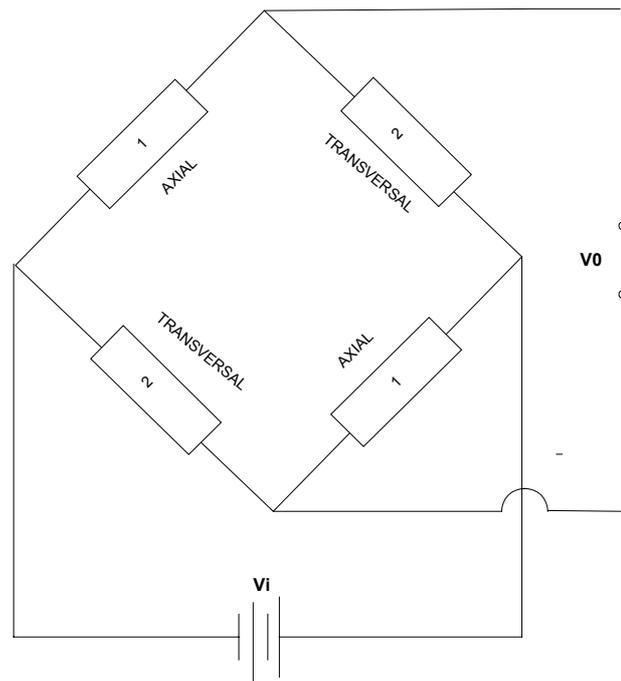


Figura 12.2: Conexión de las galgas en puente de Wheatstone

La forma más sencilla de puente de Wheatstone consta de 4 brazos con resistencias R_1 a R_4 conectados en anillo

Si se aplica un voltaje V_s a los puntos de alimentación del puente 2 y 3, este es dividido en las dos ramas del puente R_1 , R_2 y R_3 , R_4 y en proporción de las

correspondientes resistencias del puente; de forma que para que el puente esté en equilibrio se debe cumplir: $V_0 = 0$ y para ello debe ocurrir:

- Que todas las resistencias del puente sean iguales:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

- Que la relación de resistencias en las dos ramas del puente sean iguales

$$\frac{R_1}{R_2}$$

Normalmente, los transductores de fuerza utilizan 4 galgas extensiométricas iguales con lo que se tiene la expresión

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Al aplicar carga sobre la célula, las galgas cambian sus resistencias y obtendremos una tensión de salida V_0 proporcional a la carga aplicada.

La respuesta de las galgas a la carga aplicada F axial viene dada por:

$$\varepsilon = -\frac{F}{A \cdot E} \quad \varepsilon_T = -\nu \cdot \varepsilon$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = S_g \cdot \varepsilon = \frac{S_g \cdot F}{A \cdot E}$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = S_g \cdot \varepsilon_T = -\nu \cdot \frac{S_g \cdot F}{A \cdot E}$$

Sustituyendo en la ecuación de la relación de señal de salida tenemos:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{4} \left(\frac{S_g \cdot F}{A \cdot E} - \nu \cdot \frac{S_g \cdot F}{A \cdot E} + \frac{S_g \cdot F}{A \cdot E} - \nu \cdot \frac{S_g \cdot F}{A \cdot E} \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{S_g \cdot F(1 + \nu)}{A \cdot E}$$

luego:

$$V_o = \frac{1}{2} \cdot \frac{S_g \cdot F(1 + \nu) V_i}{A \cdot E}$$

y

$$F = \frac{2 \cdot A \cdot E_i}{(1 + \nu) V_o S_g} \cdot V_i = C \cdot V_i$$

Siendo C la constante de Proporcionalidad o calibración.

Finalmente, la sensibilidad del conjunto formado por transductor de fuerza - puente de Wheatstone viene dada por la siguiente expresión:

$$S = \frac{V_0}{F} = \frac{1}{C} = \frac{S_g(1+\nu)V_i}{2AE} \quad (4.4)$$

ecuación que nos indica que la sensibilidad en una célula de carga del tipo columna depende del área de la sección transversal del elemento elástico, la constante elástica del material usado, de la galga empleada (S_g) y de la tensión de entrada aplicada al puente de Wheatstone.

4.5.4.-Fuentes de error.-

En el campo de los transductores extensométricos nos encontramos una serie de fuentes de error, que es necesario tener en cuenta.

Los efectos de la temperatura sobre el punto de cero y sobre la sensibilidad del transductor son las dos mayores fuentes de error. Estos efectos se compensan en el diseño de la mayoría de los transductores, no obstante siempre queda un efecto remanente.

Otros errores son:

- linealidad (no linealidad)
- histéresis
- creep
- repetibilidad (no repetibilidad) .-

A continuación definiremos de forma individual cada uno de estos errores

4.5.4.1.- Efectos de la temperatura.-

Una variación de temperatura tiene un efecto sobre el balance de cero del puente de Wheatstone formada por las galgas y también sobre el módulo de elasticidad E del cuerpo elástico del transductor, afectando a la sensibilidad del mismo.

Estos efectos, en un circuito eléctrico típico de un transductor son compensados o al menos reducidos de la siguiente forma:

- El balance de cero: por medio de pequeñas resistencias con el apropiado coeficiente de resistividad térmica en los brazos del puente de Wheatstone.
- El módulo de elasticidad puede ser compensado por dos formas:

- por medio de una resistencia con el apropiado coeficiente de resistividad térmica en serie con la alimentación del puente.
- empleando galgas de una aleación que tengan un coeficiente de resistividad térmica que iguale el aumento de deformación del elemento elástico por medio del cambio en el módulo de elasticidad con la temperatura

A pesar de esta compensación siempre queda un efecto remanente, de forma que esta deriva respecto a la temperatura, se suele expresar en $\%/^{\circ}\text{C}$ referido a la carga nominal.

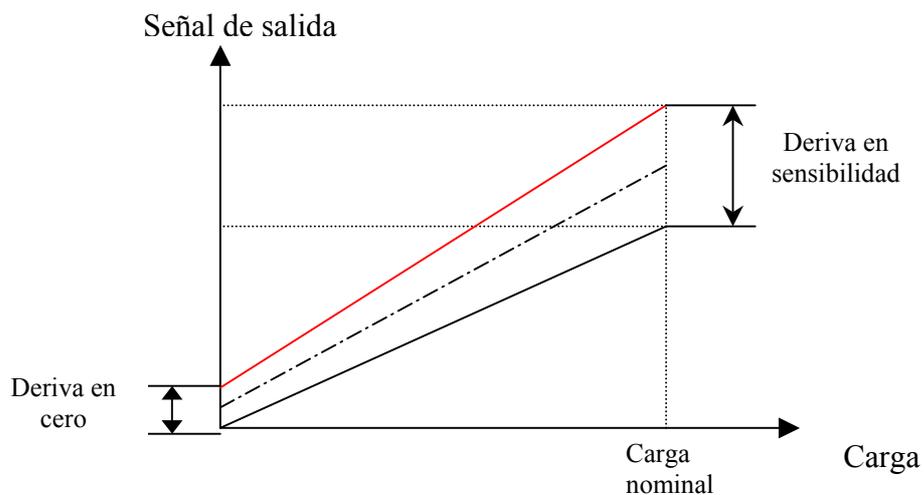


Figura 13: Deriva con respecto a la temperatura

4.5.4.2.-Histéresis.-

Se define el error de histéresis como la diferencia entre las lecturas de salida de la célula de carga para una misma carga. Una lectura obtenida con carga creciente desde carga mínima y la otra con carga decreciente desde la carga máxima.

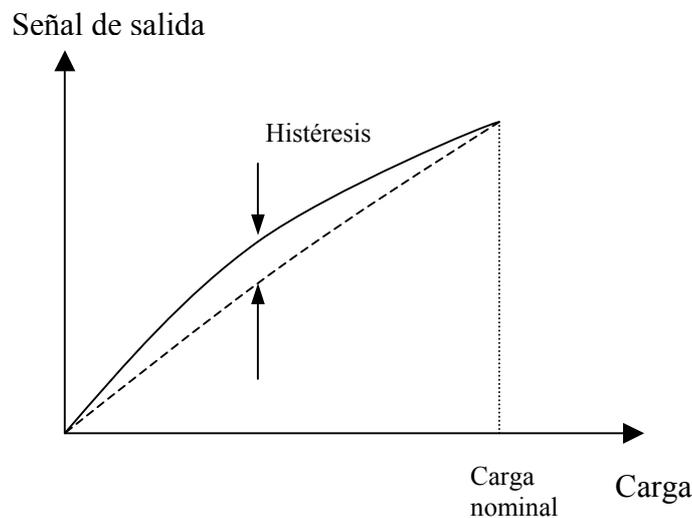


Figura 14: Histéresis

4.5.4.3.- Linealidad (no linealidad).-

El error de linealidad se define como la máxima desviación de la curva de calibración en carga respecto de una línea recta.

Esta línea recta se puede definir según criterios:

- entre carga nula y carga nominal
- entre carga mínima y 75% carga nominal
- otros

El error de linealidad se suele expresar en % de la señal de salida a carga nominal.

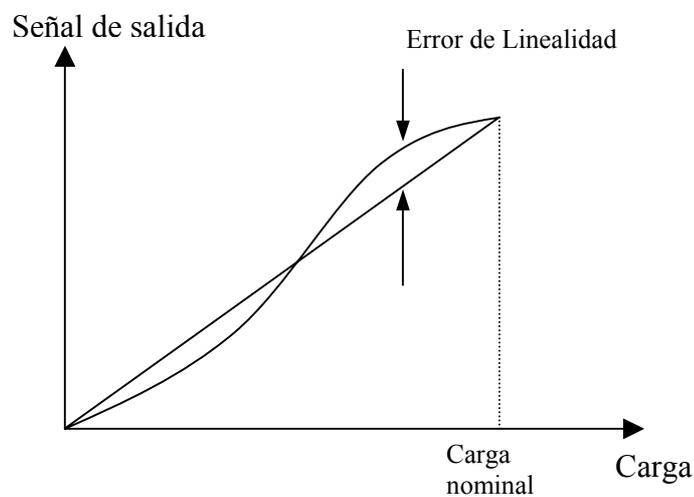


Figura 15: Error de Linealidad

4.5.4.4.-Creep.-

Es la variación en la señal de salida de la célula de carga ocurrida con el tiempo bajo una carga constante y manteniendo constantes las condiciones ambientales y otras variables. Usualmente se expresa en % de la salida a carga nominal para un período de tiempo dado (normalmente 20 o 30 minutos).

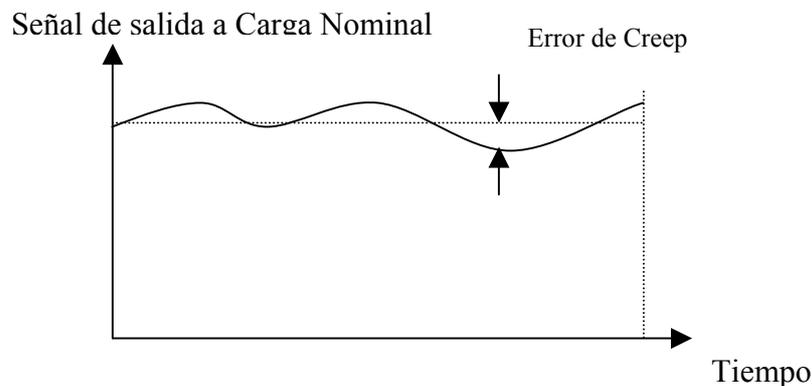


Figura 16: Efecto de Creep

4.5.4.5.-Repetibilidad

Es la máxima diferencia entre medidas repetidas de la misma carga en idénticas condiciones externas.

Se suele expresar en % de la salida a carga nominal

La repetibilidad es el parámetro más importante en cualquier sistema de medida con transductores.