

## Apéndice 1 - Transductores

### 1 Introducción

Los *transductores*, constituidos por un sensor y circuitos electrónicos, posibilitan la conversión de magnitudes físicas no eléctricas como temperatura, fuerza, presión, distancia, movimiento, etc., en magnitudes eléctricas ya sean tensiones o corrientes DC.

En particular, si la señal a medir es una *magnitud eléctrica*, el transductor es denominado *convertidor de medida* (CM). Éstos toman como fuente una señal eléctrica (tensión, corriente, potencia, frecuencia, etc.) y la transforman a otra señal eléctrica de DC proporcional a lo que se quiere medir.

### 2 Convertidores de Medida

En general, los CM suministran una señal de salida unificada, de manera que los aparatos de medida o registro, a ellos conectados, sean iguales salvo en la rotulación de sus escalas. Los CM más usados son:

1. *Convertidores de Medida de Tensión*: proporcionan una salida de DC proporcional el valor medio aritmético o al valor medio eficaz de la tensión alterna de entrada
2. *Convertidores de Medida de Corriente*: proporcionan una salida de DC proporcional el valor medio aritmético o al valor medio eficaz de la intensidad de corriente alterna de entrada
3. *Convertidor de Medida de Frecuencia*: suministra una DC proporcional a la frecuencia alterna aplicada a su entrada. La figura 1 muestra un diagrama de bloques del convertidor. El transformador de medida [1] adapta la tensión de entrada  $U$  al valor nominal de la unidad de medida [2], proporcionando también una separación galvánica entre la entrada y la salida. A su vez alimenta el circuito de tensión auxiliar [4]. El circuito de medida [2] se diseña para que los pulsos producidos sean de magnitud constante, con lo que el número de ellos depende de la frecuencia. y así el valor medio de la corriente de salida es proporcional a la misma. Esta corriente, una vez filtrada, pasa al amplificador de salida [3].
4. *Convertidores de Medida de Potencia*: se basan en la denominada "Multiplicación por división de tiempo". La potencia eléctrica supone una continuada multiplicación de los valores instantáneos de tensión con los de corriente, y su integración durante el tiempo T.

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt$$

En el diagrama bloque se muestra el principio de funcionamiento de un convertidor de potencia monofásico. Los TI y TV [2] sirven para la adaptación de impedancias y para la separación galvánica de los circuitos de entrada y salida. La señal emitida por el multiplicador [3] pasa por el amplificador [4] que da una corriente continua proporcional a la potencia activa de entrada. La unidad de medida y el amplificador están alimentados por una fuente continua estabilizada [5] que, a su vez, es alimentada por una tensión auxiliar externa. Debido al escaso consumo de potencia, el circuito de medida puede alimentarse en paralelo con la tensión de entrada.

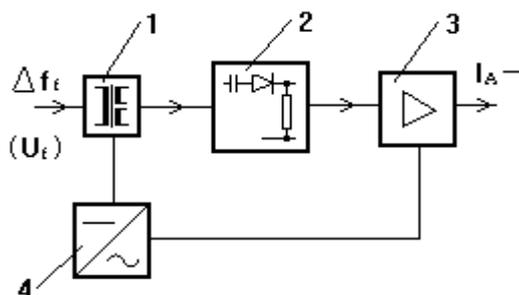


Figura 1

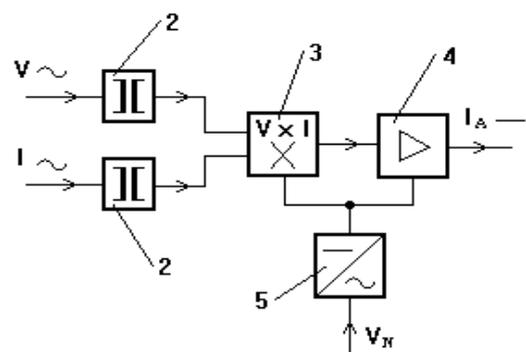


Figura 2

5. *Convertidores de Medida de Ángulo de fase*: proporciona una DC de salida proporcional a la diferencia de fase entre una tensión y una corriente, o entre dos tensiones. El inicio de la onda de tensión de un circuito abre una puerta y el inicio de la onda de tensión o de corriente del otro circuito, cierra dicha puerta. De esta forma, la anchura de los impulsos y con ella la intensidad de la corriente de salida, son proporcionales al ángulo de desfase entre las dos magnitudes alternadas de entrada.

### 3 Transductores

#### 3.1 Definición

El término transductor ha sido aplicado a dispositivos, o combinaciones de dispositivos, que convierten señales, o energía, de una forma física a otra forma. Más específicamente, en sistemas de medición, un transductor se define como un dispositivo que provee una salida usable, en respuesta a una medida especificada.

La medida es "una cantidad física, propiedad o condición, la cual es medida" y la salida es una "cantidad eléctrica, producida por un transductor, que es función de la medida".

#### 3.2 Elementos

Si bien los transductores actuales suelen estar integrados en una sola pieza, se pueden distinguir, en general, tres etapas en la generación de la salida eléctrica en respuesta a la medida física.

1. *Sensor*: es un elemento que responde directamente a la medida.
2. *Transductor* propiamente dicho: es el elemento en el que se transduce la señal física en una salida eléctrica.
3. *Circuito de acondicionamiento y procesamiento de la señal*: es un circuito, eléctrico o electrónico, que le da *formato* a la señal entregada por el transductor. Su principal función es *linearizar* la salida y *estandarizarla* dentro de los límites de la aplicación.

El circuito acondicionador puede estar colocado dentro de la empaquetadura del transductor, o totalmente separado. Si el transductor consiste en varios módulos, las interconexiones provistas por el usuario son parte del sistema de medida y el correcto cableado, aislado y puesta a tierra, son esenciales para conseguir la condiciones de trabajo especificada.

En general, se suele tratar al sensor y al transductor como un mismo componente, pero el circuito de acondicionamiento de la señal presenta algunas particularidades realmente importantes, por lo que se abarcará ahora este punto.

##### 3.2.1 Circuito de acondicionamiento y procesamiento de la señal

Las señales que tienen que ser traducidas del mundo físico al mundo eléctrico, pueden ser de las formas más extrañas, consecuencia de que la señal eléctrica obtenida es función de la variación de un proceso físico, químico, atmosférico, etc, que se está midiendo.

Se hace entonces necesario imponerle a la señal eléctrica, antes de insertarla en el circuito de medida (ó en un SAD), una serie de condiciones que hagan favorable su manejo dentro de un circuito eléctrico. El circuito acondicionador de la señal puede ser eléctrico o electrónico, y provee una variedad de funciones, como por ejemplo:

Generación de la excitación o voltaje y frecuencia, de *referencia*.

Generación de la señal de salida, típicamente por un circuito puente o un circuito potenciométrico.

Acondicionamiento de la señal, esto es, amplificación de las salidas de bajo nivel y adaptación de los niveles de salida de tensión (o corriente) a un *rango standard*.

Supresión de ruido, filtrado y aislación respecto a tierra.

Conversión de señales, como AC/DC o A/D (cuando incluye el conversor A/D).

Procesamiento de señales, como *linealización* de salidas intrínsecamente no lineales.

##### 3.2.2 Señales de Salida

El nivel y rango de la señal de salida debe estar comprendido dentro de límites muy precisos para asegurar la compatibilidad con el resto del sistema. Estos rangos se determinan, generalmente, por el tipo de fenómeno que se está midiendo, y por el tipo de transductor que se utiliza. Las salidas utilizadas son:

de corriente: 0...5, 0...10, 0...20 y 4...20 mA

de tensión: 0...+5, 0...+10, -5...+5 y -10...+10 V

La salida de 4 .. 20 mA es particularmente usada, considerándose como la *salida universal*. Su importancia es tal que a aquellos transductores que tengan este rango de salida se los distingue como *transmisores*.

### 3.2.3 Detección de variación de señales pequeñas

Como las variaciones que se deben medir suelen ser muy pequeñas, para detectarlas eléctricamente es usual utilizar conexiones en forma de potenciómetros o de puente de Wheatstone. Éstos circuitos pueden ser de deflexión o nulos:

*De deflexión:* la salida del puente o del potenciómetro pasa directamente al circuito acondicionador.

*Nulos:* la salida del puente o potenciómetro es empleada para ajustar otro elemento del circuito de manera que anule al puente, y recién luego pasa al circuito acondicionador.

## 3.3 Características de funcionamiento - linealidad de las señales de salida

Cada tipo de transductor tiene una relación *ideal* medida-salida, descrita por una ecuación teórica o por una representación numérica o gráfica. Esta característica ideal de transferencia puede ser en muchos casos lineal, en cuyo caso la pendiente de la recta es la relación de transferencia o *función transferencia* de ese transductor.

Si bien resulta prácticamente imposible construir transductores cuya relación medida-salida sea perfectamente lineal, en la práctica se manejan transductores cuya alinealidad es menor al 0,25%, pudiéndose considerar en ese caso la respuesta del transductor como lineal.

En el caso de una característica no lineal, la razón de transferencia es usada algunas veces para describir el transductor en un pequeño rango de entradas. Es decir, se limita a usar el transductor solo en aquellas zona de su rango de funcionamiento donde la respuesta sea lineal.

Cuando la alinealidad del transductor hace imposible su utilización en tales condiciones, entonces se debe *linealizar* dicha señal. La alinealidad de un transductor puede provenir tanto del elemento sensor, como también de la configuración utilizada para excitarlo o extraer su señal.

La *linealización* de las señales se puede hacer, básicamente, de dos maneras:

Uso de procesamiento en computadora (Linealización por Software).

Uso de redes o circuitos (Linealización por Hardware).

### 3.3.1 Linealización por Software

La señal recogida por el sensor es digitalizada y leída por una PC, o por un instrumento portátil (que contiene un microprocesador o un microcontrolador). Para corregir la alinealidad por software es preciso que la función transferencia (FT) esté perfectamente definida. Cuando esta FT está normalizada, y se presenta en forma de tablas, la PC puede consultar las tablas (almacenadas en su memoria) y así realizar la linealización. Así, la operación ejecutada es una *aproximación* de los valores medidos a la curva teórica de la FT.

La linealización por software tiene algunas limitaciones importantes a saber:

La FT debe definirse con un orden de magnitud superior a la precisión deseada.

Para digitalizar es necesario amplificar la señal del sensor hasta, al menos, 100 mV a fondo de escala.

Es necesaria una gran cantidad de circuitos de montaje complejo, sólo justificado si los comparten un cierto número de canales o si se necesita una precisión muy rigurosa.

### 3.3.2 Linealización por Hardware

Se utiliza cuando los sensores presentan una dispersión en sus características que harían necesario reprogramar la memoria de la PC que contiene la tabla de conversión entre la característica lineal y la real o entrar nuevos parámetros para el algoritmo linealizador.

Se trata de linealizar la respuesta del sensor con una *red pasiva*, al menos en un rango limitado. Existen diversos métodos, pero son complicados y engorrosos.

También se puede realizar algún tipo de procesamiento analógico a la señal de salida del transductor. Existen circuitos integrados (utilizando AO) que cumplen con una variedad de funciones simples tales como logaritmo, multiplicación o cociente y es posible combinarlos de manera de obtener funciones más complejas.

También se puede utilizar una aproximación lineal por tramos con tantas secciones (cada una con su AO y red de resistores de precisión) como precisión deseemos. Pero los circuitos se complican rápidamente y además son muy sensibles a la calidad de los componentes.

### 3.4 Indicaciones para seleccionar y emplear los transductores

Cuando hay que elegir un transductor en especial, se deben considerar los siguientes puntos para determinar su capacidad para una medición en particular:

*Rango:* el rango del transductor debe ser lo suficientemente grande tal que abarque todas las magnitudes esperadas de la cantidad a ser medida.

*Sensibilidad:* para obtener datos significativos, el transductor debe producir una señal de salida suficiente por unidad de entrada de medida.

*Efectos de carga:* como los transductores siempre consumirán algo de energía del efecto físico que se está probando, debe determinarse si se puede desprestigiar esta absorción o si se pueden aplicar factores de corrección para compensar las lecturas por pérdidas.

*Respuesta a la frecuencia:* el transductor debe ser capaz de responder a la velocidad máxima de cambio en el efecto que se está observando.

*Formato de salida eléctrica:* la forma eléctrica de la salida del transductor debe tener un valor que lo haga compatible con el resto del sistema de medición.

*Impedancia de salida:* la impedancia de salida del transductor debe tener un valor que lo haga compatible con las siguientes etapas eléctricas del sistema.

*Requerimiento de potencia:* los transductores pasivos necesitan de excitación externa. Entonces, si se deben emplear transductores pasivos, es necesario asegurar que haya disponibles fuentes de poder eléctricas adecuadas para operarlos.

*Medio física:* el transductor seleccionado debe poder resistir las condiciones ambientales a las que estará sujeto mientras se efectúe la prueba. Parámetros tales como temperatura, humedad y sustancias químicas corrosivas podrían dañar algunos transductores y a otros no.

*Errores:* los errores inherentes a la operación del mismo transductor o aquellos errores originados por las condiciones del ambiente en la medición, deben ser lo suficientemente pequeños o controlables para que permitan tomar datos significativos.

Una vez que el transductor está elegido e instalado, se deben seguir las siguientes recomendaciones para aumentar la exactitud de las mediciones:

*Calibración del transductor:* se debe calibrar la salida del transductor tomando algún estándar conocido al emplearlo en las condiciones reales de la prueba. Esta calibración se debe llevar a cabo con regularidad a medida que se haga la medición.

Se deben monitorear en forma continua los cambios en las condiciones ambientales del transductor. Si se sigue este procedimiento, los datos medidos podrán corregirse posteriormente para tomar en cuenta cualquier cambio en las condiciones ambientales.

Controlando artificialmente el ambiente de la medición, se pueden reducir errores posibles del transductor. Un control artificial del ambiente incluye, por ejemplo, el encerramiento del transductor en una caja de temperatura controlada y el aislamiento del dispositivo con respecto a golpes y vibraciones externas.

### 3.5 Errores

En la práctica, la respuesta de un transductor real se aparta de la ideal y en consecuencia el transductor real indicará un valor de medida que contendrá una componente de error. A este error contribuyen:

*Errores estáticos:* es la diferencia entre la curva función transferencia teórica y la curva de calibración determinada en condiciones estacionarias.

*Errores dinámicos:* son inherentes al funcionamiento del circuito electrónico (respuesta en frecuencia, respuesta temporal, función transferencia, etc.).

### 3.6 Transductores montados en circuitos integrados

En la actualidad, se pueden obtener muchos transductores montados en un circuito integrado. Se encuentran particularmente desarrollados transductores en circuitos integrados para medir temperatura, humedad, presión, etc.. Uno de los principios en que se basa el aspecto constructivo de estos integrados es en la variación de tensión sobre una juntura PN a corriente constante. Como ejemplo, un transductor integrado de temperatura, el cual se puede encontrar en el mercado, se compone internamente de tres bloques principales:

Un sensor

Un regulador de tensión paralelo de tipo activo

Un amplificador operacional

En el mismo el regulador de tensión (Zener) se halla en paralelo con todo el circuito y se alimenta con una tensión que sea superior a 6,8 V. La corriente total que circula por el circuito se debe ajustar a 1mA $\pm$ 10% mediante la resistencia y se genera a través del transistor.

De acuerdo a la conexión de los bornes Ent y Sal el amplificador operacional trabaja de dos formas distintas:

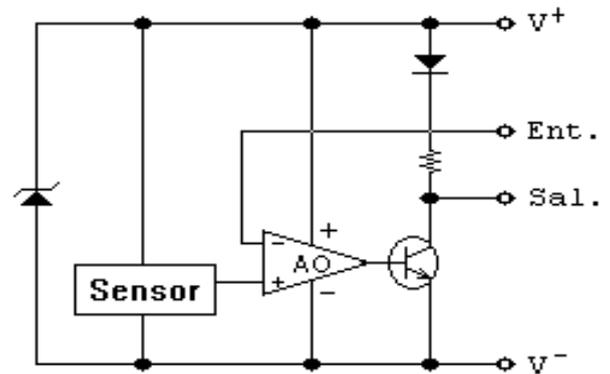


Figura 3

1. *Comparador:* Se conecta una tensión de referencia en ENT (conectada a la pata negativa del AO), que se compara con la que se recibe del sensor (pata positiva del AO). En la salida SAL se obtendrá una señal tipo ON/OFF de acuerdo al resultado de la comparación, que indicará si se está por encima o por debajo de una determinada temperatura de referencia.
2. *Seguidor:* Se cortocircuitan los bornes ENT y SAL (fijándose así la ganancia del AO) con lo cual variaciones de temperatura del sensor se manifiestan en la salida (tomada entre SAL y V<sup>-</sup>).

### 3.7 Clasificación de Transductores

Se puede clasificar los transductores según distintos puntos de vista. Por ejemplo:

Si necesitan excitación externa (pasivos o activos)

Por el tipo de salida (analógica o digital)

Por el principio de funcionamiento

Por la magnitud que miden, aunque esta clasificación presenta la dificultad de que un mismo transductor puede medir diversas magnitudes.

#### 3.7.1 Transductores activos y pasivos:

Se llaman transductores pasivos a aquellos que *requieren una fuente eléctrica externa como excitación*. En ellos, la magnitud medida produce un cambio en un elemento eléctrico pasivo del circuito (resistencia, capacitor, o inductancia).

Los transductores activos son aquellos que *generan un voltaje de salida por sí mismos*. Las salidas auto-generadas son usualmente de bajo nivel y requieren una etapa posterior de amplificación.

#### 3.7.2 Transductores analógicos y digitales

La mayoría de los transductores tienen una salida analógica. Se llama analógica a una *señal de salida que es una función continua de la medida*, excepto por la modificación debida a la resolución del transductor.

En los transductores pasivos, la salida analógica es a menudo proporcional, esto es, la información está contenida en la proporción de la salida de voltaje del transductor con respecto a algún voltaje de referencia, como puede ser la excitación del transductor.

Dentro de las salidas analógicas, podemos distinguir:

*Salidas analógicas de voltajes:* pueden ser DC o AC.

*Salidas analógicas de corrientes:* encuentran aplicación en procesos de control.

*Salidas analógicas de pulso:* esto es una serie de pulsos de frecuencia proporcional a la magnitud medida.

Los transductores inductivos y capacitivos, que se verán más adelante, son algunas veces empleados en circuitos que generan una señal de frecuencia variable, proporcional a la medición (modulación de frecuencia).

Estas señales de pulsos o frecuencia variable son fácilmente convertidas en digitales contando los pulsos o ciclos y guardando el valor. Los transductores pueden ser empleados como interruptores con solo dos valores de salida. Un ejemplo de este tipo de transductor es un interruptor de nivel de líquido.

3.7.3 Según el principio eléctrico que utilizan para convertir la cantidad variable.

Esta clasificación puede llevar a confusiones puesto que un mismo transductor puede medir diversas magnitudes..

1. *Transductores Resistivos.*

- 1.1. Extensiómetros (metálicos y con semiconductores).
- 1.2. Termómetros termoconductores (bulbos resistivos y termistores).
- 1.3. Sensores fotoconductores (fotocélulas de sulfuro de cadmio).
- 1.4. Medidores de conductividad química.

2. *Transductores Inductivos.*

- 2.1. Transformador Lineal diferencial variable (LVDT).
- 2.2. Pick ups de reluctancia variable (como en las cápsulas reproductoras).
- 2.3. Generadores y receptores Selsyn.

3. *Transductores Capacitivos.*

- 3.1. Sensores LC y RC de alta frecuencia (como en los pick ups de vibración).
- 3.2. Válvula reactancia para producir modulación de frecuencia (como en telemetría).

4. *Transductores divisores de voltaje.*

- 4.1. Sensor por posición de potenciómetro.
- 4.2. Divisor de voltaje accionado por presión.

5. *Transductores generadores de voltaje.*

- 5.1. Piezoeléctrico (micrófono y acelerómetro de cristal).
- 5.2. Tacómetro.
- 5.3. Sensor de termocupla.
- 5.4. Celda fotovoltaica.

3.7.4 Según sus aplicaciones

1. *Mecánicos:* extensiómetros (de movimiento) para fuerza, peso o torque; medidores de presión y flujo; acelerómetros; higrómetros.
2. *Térmicos:* termómetro de resistencia; termocupla; termistor.
3. *Ópticos:* fotovoltaicos (celdas o baterías solares); celdas fotoconductoras.
4. *Acústicos:* micrófonos.
5. *Magnéticos:* permeámetros; magnetómetros; semiconductores de Efecto Hall.
6. *Químicos:* pH y celdas de conductividad.
7. *Biológicos:* electroencefalógrafo.
8. *Nucleares:* tubo de Geiger, cámara de ionización; detectores de radiación por centelleo y por semiconductores.

#### **4 Descripción del principio de funcionamiento de los transductores**

En base a la clasificación hecha en el punto 3.7.4 se describen concisamente en que consiste el *principio de funcionamiento* de cada transductor. Se da también, dentro de cada grupo, una descripción mas detallada de los sensores mas comúnmente utilizados en la industria..

#### 4.1 Transductores Mecánicos:

Extensiómetros (de movimiento) para fuerza, peso o torque. Medidores de presión y flujo (para mecánica de fluidos). Acelerómetros. Higrómetros.

##### 4.1.1 Transductores de movimiento mecánico

- ❑ *Potenciómetros de resistencia:* Consisten en una resistencia con un contacto móvil. Con una excitación de voltaje fijo, el voltaje de salida es una función de la posición del contacto. Esta función es generalmente lineal pero hay potenciómetros con funciones especiales.
- ❑ *Transductores de desplazamiento inductivo:* El movimiento, que es la variable de entrada, se utiliza para cambiar la reluctancia de un camino de flujo magnético que se traduce en un cambio de voltaje en la salida. Otra subclase son los sensores de proximidad que registran por el mismo principio el movimiento de un metal conductor en un campo de corriente alterna.
- ❑ *Transformadores diferenciales:* Son transformadores cuyo núcleo de hierro es móvil. El movimiento del núcleo cambia el acoplamiento inductivo entre el primario y el secundario esto produce un voltaje de salida en función del desplazamiento.
- ❑ *Sincros:* El sincro es un transductor de posición angular con ángulo infinito (no tiene limitación en la cantidad de giros) y precisión de minutos de arco. Su construcción es similar a la de un motor trifásico.
- ❑ *Transductores de desplazamiento capacitivo:* Un movimiento relativo se puede usar para cambiar la capacitancia. Una implementación común es un sensor de proximidad que detecta el movimiento de un objeto como una permitividad diferente a la del medio. La medida puede ser usada para desplazar un electrodo con respecto a otro fijo (transductores de presión). Otro método es mover el dieléctrico entre los electrodos.
- ❑ *Codificadores digitales de eje:* Hay dos tipos absolutos e incrementales. El primero es un transductor de desplazamiento con una salida en forma de una palabra digital paralela, esto es un conversor analógico-digital electromecánico; el otro produce un pulso de salida para un movimiento especificado, puede ser empleado para sensar tanto velocidad como desplazamiento.
- ❑ *Sensores de esfuerzo:* Consisten en resistores que cambian su resistencia ante variaciones muy pequeñas en su longitud. Se utilizan generalmente en circuitos puente.
- ❑ *Acelerómetros absolutos:* Son utilizados para medir aceleración, golpes o vibraciones. Consisten en una masa con una restricción elástica de algún tipo conectada a un sensor de movimiento.
- ❑ *Transductores piezoeléctricos:* La piezoelectricidad es el fenómeno de acoplamiento entre elasticidad y campo eléctrico en ciertos tipos de cristales sólidos. Cuando un cristal de este tipo es deformado genera una carga eléctrica y viceversa. Se utilizan en transductores de desplazamiento, acelerómetros y generadores acústicos.
- ❑ *Servo Acelerómetros:* Este dispositivo emplea un transductor de fuerza o torque para llevar la masa de detección a cero. Este transductor de fuerza reemplaza al resorte de los acelerómetros comunes.
- ❑ *Transductores de velocidad:* Pueden ser clasificados en analógicos y de pulso. Pueden ser rotacionales (tacómetro) o translacionales. Los sensores analógicos de velocidad registran el voltaje inducido en un cable que se mueve en un campo magnético constante. Los tacómetros de pulso tienen una salida de pulsos de frecuencia proporcional a la velocidad.
- ❑ *Transductores de fuerza, torque y peso:* Estas magnitudes se miden en forma estática por comparación con una fuerza conocida y en forma dinámica aplicando la entrada a un elemento elástico y midiendo la deformación resultante.

**Principio de funcionamiento de los sensores de esfuerzo (strain gauges).** El principio de funcionamiento de las celdas de esfuerzo se basa en tres premisas:

- 1) El valor de la resistencia de un conductor es función de sus características geométricas (efecto enunciado por Lord Kelvin).
- 2) A todo aumento de longitud corresponde una disminución de la sección (efecto de Poisson).
- 3) La variación de resistividad es proporcional a la variación relativa de volumen (efecto enunciado por Bridgman).

Como resultante de estos efectos puede establecerse una relación bastante lineal entre deformación y resistencia. Hay diversos tipo constructivos:

**\*\*\*Celdas metalicas:** El elemento sensible es un alambre conductor metálico (aleaciones de níquel con cobre o cromo) con una sección circular de 0.025 mm aproximadamente de diámetro adherida sobre un soporte aislante de resina, poliéster o algún material análogo. Para lograr una resistencia considerable el conductor se dispone en forma de zig-zag como muestra la figura 4

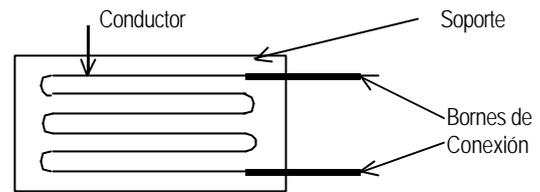


Figura 4

**\*\*\*Celdas de película metálica:** El elemento sensible es una película metálica muy delgada depositada sobre un material aislante. Los bornes de conexión se hacen suficientemente anchos de manera que sean prácticamente insensibles a variaciones de forma.

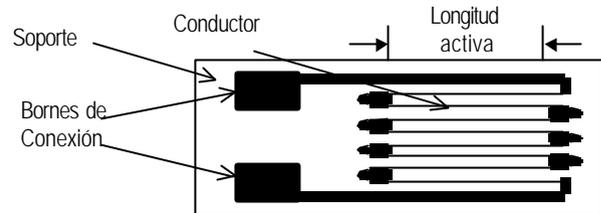


Figura 5

**\*\*\*Celdas semiconductoras:** El elemento sensible es un cristal semiconductor con cierto nivel de impurezas. La resistividad del cristal depende de la concentración específica de portadores y de la orientación cristalográfica respecto al esfuerzo principal (efecto piezorrestivo). Su sensibilidad a los cambios de longitud es 50 a 60 veces mayor que la de las celdas metálicas. Como todos los semiconductores es muy sensible a las variaciones de temperatura.

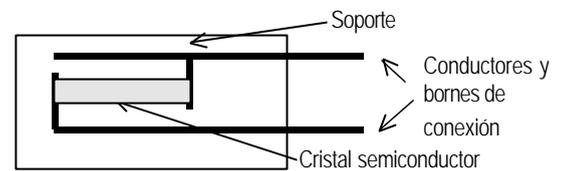
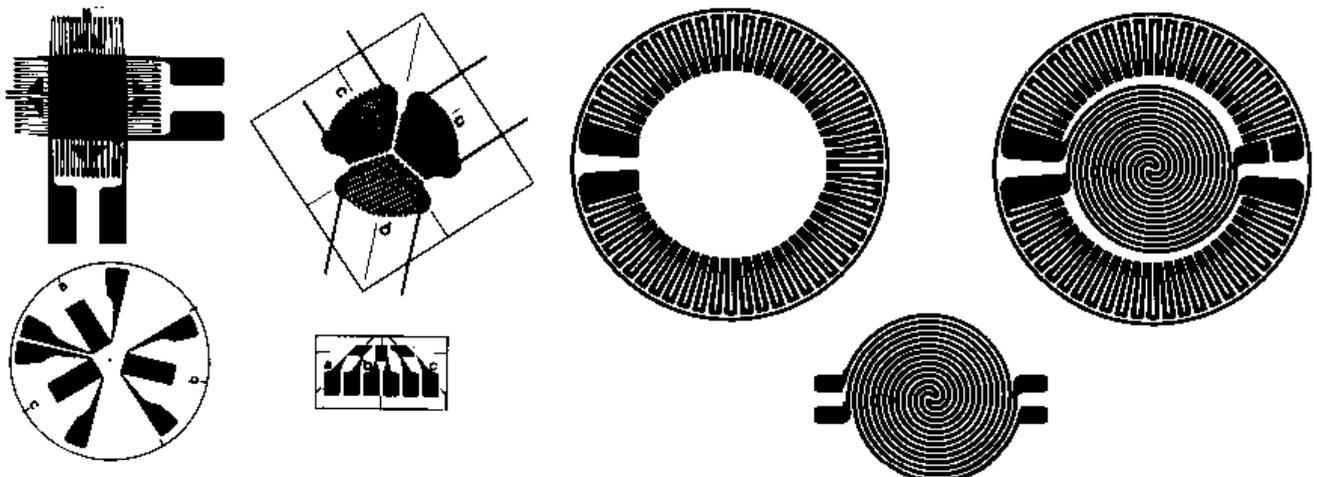


Figura 6

La medición de resistencia se efectúa utilizando una configuración tipo puente de Wheastone.. El puente de medida se suele incluir dentro del transductor de manera que el dispositivo ofrece 4 conductores de acceso; dos para la fuente de excitación y dos para el voltímetro o instrumento de medición.

Los valores de resistencia nominal para las celdas es de 120  $\Omega$ , 350  $\Omega$ , 600  $\Omega$  y 1000  $\Omega$ . Los elementos metálicos son mucho mas precisos que los semiconductores y pueden ser autocompensadas para contrarrestar los efectos de dilatación con la temperatura. Por otro lado, las celdas semiconductoras pueden medir esfuerzos mucho mas pequeños por su gran sensibilidad.

Según la forma geométrica y el número de elementos empleados las celdas se pueden utilizar para medir esfuerzos unidireccionales, bidireccionales, tridimensionales, tangenciales, radiales, etc. Algunos ejemplos de estas configuraciones pueden apreciarse en la figura 7.



medición en dos o mas direcciones

medición tangencial, radial y tangencial - radial

Figura 7

#### 4.1.2 Transductores para magnitudes de mecánica de fluidos

- ❑ **Transductores de presión:** La mayoría de estos sensores se basan en la medición de la deformación o desplazamiento que la presión ejerce en una membrana elástica. Para manómetros un lado del diafragma se expone a la presión ambiente y el otro a la del proceso. Para mediciones diferenciales ambos lados se exponen a las presiones a medir. El diafragma debe ser capaz de soportar la exposición al fluido a medir.
- ❑ **Transductores de vacío:** Se basan en la variación lineal de la conductividad termal que tienen los gases cuando su presión es muy baja. Son un caso particular de los transductores de presión.
- ❑ **Transductores fluxométricos:** Sirven para medir la velocidad lineal de un fluido en un punto del espacio con magnitud y dirección, la variación de flujo volumétrico a través de un área y el flujo de masa a través de un área determinada.
- ❑ **Transductores de nivel:** Existe una amplia variedad de estos dispositivos lo que da lugar a varias clasificaciones. Una de ellas distingue entre métodos de contacto (el elemento sensor está total o parcialmente inmerso en el fluido) y los medidores sin contacto en los que el sensor se encuentra fuera del recipiente que contiene al fluido. Estos últimos dispositivos se utilizan en caso de fluidos pegajosos que se adhieren al sensor. Los interruptores de nivel se usan cuando se desea obtener una indicación en el momento que un nivel predeterminado es alcanzado. El término medición de nivel continuo se aplica a aquellos transductores cuya salida es una función continua de la medida. Por otro lado se encuentran los medidores mecánicos (flotantes que transducen el nivel en desplazamiento mecánico que puede ser presentado en una escala o transformado en una señal eléctrica), los que miden el nivel por diferencia de presión entre la del líquido del fondo del tanque y la del gas sobre la superficie del líquido. Un dispositivo de peso y cable es usado para medir el nivel en silos u otros depósitos de sólidos. Los sensores de nivel de conductividad pueden ser usados con líquidos o polvos conductores (el fluido que sube cierra el contacto entre un electrodo y el tanque que está puesto a tierra). La cinta resistiva es un transductor del tipo de nivel continuo, es un resistor de alambre enrollado de precisión, la parte sumergida es puesta en corto por el fluido conductor variando así la resistencia. El transductor de nivel inductivo detecta la variación de la inductancia cuando el campo magnético se acopla con el fluido. Los transductores ultrasónicos aprovechan el fenómeno del eco para la medición del nivel de fluido. Existen también sensores ópticos y de microondas.
- ❑ **Transductores de densidad:** esta característica se mide siempre en forma indirecta. Generalmente se utiliza un elemento piezoeléctrico cuya frecuencia final de oscilación estará en función de la densidad del fluido.

#### Principio de funcionamiento de los sensores de presión.

**\*\*\*Transductores magnéticos de inductancia variable:** El desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de ésta en forma casi proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina. El devanado de la bobina se alimenta con una corriente alterna y la fem de autoinducción se opone a la tensión de alimentación, de tal modo que al ir penetrando el núcleo móvil dentro de la bobina la corriente presenta en el circuito se va reduciendo por aumentar la fem de autoinducción. (Figura 4.14). Estos transductores son bastante lineales, son pequeños, de construcción robusta y no precisan ajustes críticos en el montaje. Su precisión es del orden de +/- 1%.

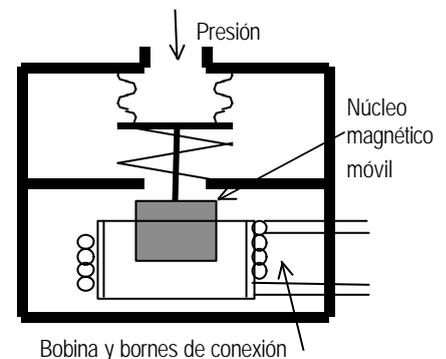


Figura 8

**\*\*\*Transductores magnéticos de reluctancia variable:** Un imán permanente o un electroimán crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético. El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante con lo cual, al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es por lo tanto proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.

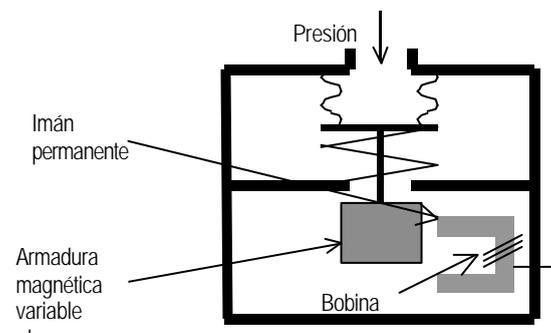


Figura 9

Estos transductores son mas precisos que los de inductancia variable pero también requieren mas cuidados en su montaje, son sensibles a las vibraciones y a la temperatura.

**\*\*\*Transductores capacitivos:** Se basan en la variación de la capacidad que se produce en un capacitor al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas. De este modo se tienen dos capacitores, uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, que pueden compararse en circuitos oscilantes o bien en circuitos tipo puente de Wheastone alimentados con corriente alterna. Estos transductores son de tamaño pequeño y construcción robusta. Su señal de salida es débil y debe ser amplificada antes de ser medida. Son sensibles a las variaciones de temperatura y requieren un ajuste cuidadoso de los circuitos oscilantes y de los puentes de medida. Su rango va de 0.05 - 5 a 0.05 - 600 Kg/cm y su precisión es del orden de  $\pm 0.2$  a  $\pm 0.5\%$ .

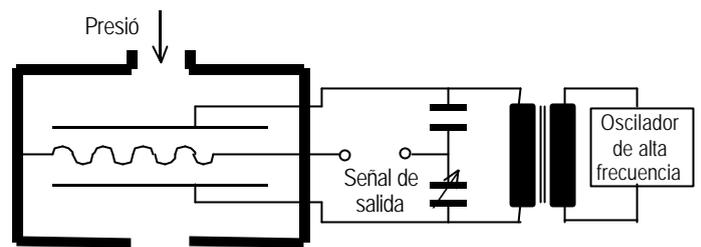


Figura 10

**\*\*\*Sensores basados en celdas de esfuerzo:** Los sensores modernos basados en celdas de esfuerzo consisten en un elemento de silicio situado dentro de una cámara conteniendo aceite siliconado que está en contacto con el proceso a través de un diafragma sensible. El sensor está fabricado a partir de un monocristal de silicio en cuyo seno se difunde boro para formar varios puentes de Wheastone constituyendo así una celda de esfuerzo autocontenida. El espesor del sensor determina el rango de medida del transductor. El intervalo de medida de estos transductores llega hasta los 1600 Kg/cm con una precisión de  $\pm 0.2\%$ . Como todos los semiconductores son sensibles a las variaciones de temperatura.

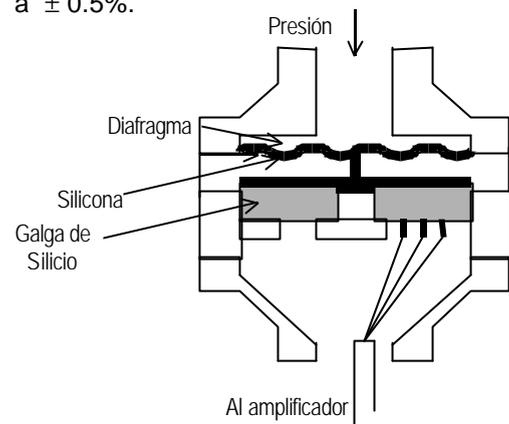


Figura 11

**\*\*\*Transductores piezoeléctricos:** Los elementos piezoeléctricos son materiales cristalinos que, al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario. Son elementos de pequeño tamaño y de construcción robusta y su respuesta en frecuencia supera 1 MHz. Son sensibles a los cambios de temperatura y normalmente requieren de un amplificador ya que su señal de salida es bastante débil.

**Nota:** al final del anexo se incluyen hojas de datos de celdas de esfuerzo

## 4.2 Transductores Térmicos

Termómetro de resistencia; termocupla; termistor.

### 4.2.1 Termocuplas:

Están basados en el efecto Seebeck. La corriente observada depende solamente de la diferencia de temperaturas de los materiales.

### 4.2.2 Transductores termoresistivos:

Los transductores termoresistivos están basados en la dependencia de la relación volt-ampere de conductores y semiconductores con la temperatura. Existen tres clases principales de transductores termoresistivos:

- ❑ *Resistance Temperature Detectors (RTD):* Son resistencias de arrollamiento de metal desnudo construidas de níquel o platino, su curva de  $R=F(t)$  es lineal en un amplio rango y su pendiente es del orden de  $0.4\%/^{\circ}\text{C}$ . Su principal desventaja es que suelen ser muy sensibles a los golpes y vibraciones.
- ❑ *Termistores:* Construidos con elementos semiconductores amorfos en variadas formas poseen una curva  $R = F(t)$  de pendiente negativa del orden de  $4\%/^{\circ}\text{C}$ . Esta alta sensibilidad es su principal atractivo. La conversión de resistencia en temperatura puede ser realizada por hardware o software pero es algo más dificultosa que la de los RDT ya que la relación es no lineal.

- ❑ *Sensores de semiconductores monolíticos*: Se basan en la dependencia con la temperatura de una juntura pn. Su uso está reducido a aplicaciones muy específicas.

#### 4.2.3 Termómetros de radiación (pirómetros):

Son transductores que registran la temperatura de un cuerpo midiendo el calor que irradia. Hay dos tipos:

- ❑ *Detectores termales*: consisten en un colector de color negro para maximizar la absorción de radiación con un transductor acoplado que mide su temperatura.
- ❑ *Detectores fotónicos*: con transductores fotovoltaicos o fotoconductivos que responden a radiación infrarroja o visible; al operar a nivel atómico son mucho más rápidos que los anteriores.

#### Principio de funcionamiento de la termocupla, RTD y termistor

**\*\*\*Termocupla** Cuando se unen los extremos de dos alambres de metales distintos y se calienta uno de los extremos, se establece una circulación de corriente continua en este circuito (llamado *termoeléctrico*). Este efecto fue descubierto por Thomas Seebeck en 1821.

Si se abre la espira metálica, la tensión a circuito abierto que aparece en los extremos (tensión de Seebeck) es función de la temperatura de la juntura y de la composición de los metales. Este efecto puede observarse para cualquier combinación de dos metales distintos. Para *cambios pequeños* en la temperatura la tensión de Seebeck es directamente proporcional a la temperatura:

$$e_{AB} = \alpha \cdot T$$

donde la constante de proporcionalidad  $\alpha$  es el coeficiente de Seebeck.

La medición de la tensión generada por la termocupla no puede ser realizada directamente ya que al conectar los cables del instrumento de medición se establecen nuevas junturas metálicas con efectos termoeléctricos propios. Por ejemplo, si se conecta un voltímetro con puntas de cobre sobre una termocupla de cobre-constantan (*tipo T*) se establece el circuito que muestra la figura 13. Se han creado dos nuevas junturas  $J_2$  y  $J_3$ . La juntura  $J_3$  es cobre-cobre y por lo tanto no produce efecto termoeléctrico ( $V_3 = 0$ ).  $J_2$  en cambio es una juntura cobre-constantan y produce una fuerza electromotriz por efecto térmico  $V_2$  que se opone a la  $V_1$  de la juntura  $J_1$  original. La lectura del voltímetro será por lo tanto proporcional a la *diferencia* de temperaturas entre  $J_1$  y  $J_2$ . Es decir para poder determinar la temperatura de  $J_1$  debemos conocer la temperatura de  $J_2$

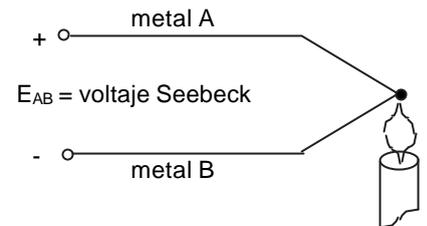


Figura 12 - Efecto Seebeck

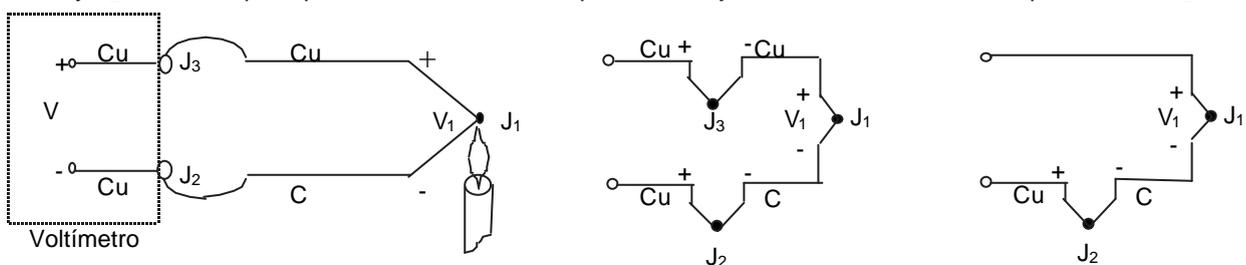


Figura 13 - Medición de la tensión de juntura con un voltímetro

Una forma de determinar la temperatura de  $J_1$  consiste en sumergir esta juntura en un baño de hielo y de esta manera forzar su temperatura a  $0^\circ\text{C}$ , estableciendo a  $J_2$  como *juntura de referencia*. En este caso la lectura del voltímetro será:

$$V = V_1 - V_2 = \alpha \cdot [(T_{J1} + 273.15) - (T_{J2} + 273.15)] = \alpha \cdot (T_{J1} - T_{J2}) = \alpha \cdot (T_{J1} - 0) = \alpha \cdot T_{J1}$$

Las constantes 273.15 se incluyen para convertir grados Kelvin a grados Celsius y permiten enfatizar el hecho de que la tensión  $V_2$  generada en la juntura  $J_2$  que está a  $0^\circ\text{C}$  no es cero, es función de la temperatura absoluta.

Para eliminar el baño de hielo, independizarse de las características de los metales utilizados en la termocupla y de los cables de conexión al instrumento de medición, se hace uso de la *ley de los metales intermedios*. Esta ley empírica establece que si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de unión A hasta otro punto B, la suma algebraica de todas las FEMs es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo A y B.

Aplicando esta ley para la termocupla hierro-constantan (*tipo J*) conectada como muestra la figura 14 se ve que la tensión de salida  $V$  es nuevamente  $V = \alpha_1 (T_{J_1} - T_{REF})$  donde  $\alpha_1$  es el coeficiente Seebeck de la termocupla  $J_1$ . Las juntas  $J_2$  y  $J_3$  toman el lugar del baño de hielo y constituyen la *juntura de referencia*. El paso siguiente consiste en medir la temperatura del bloque isotérmico (juntura de referencia) y utilizar esta información para calcular la temperatura desconocida  $T_{J_1}$ .

La compensación de la FEM introducida por la juntura de referencia se puede realizar de dos maneras: Por *software* o por *hardware*. En ambos casos es necesario disponer de un sensor electrónico que proporcione una señal de salida proporcional a la temperatura absoluta. Los más comunes son sensores integrados, termistores, RTDs, y elementos semiconductores (diodos o transistores).

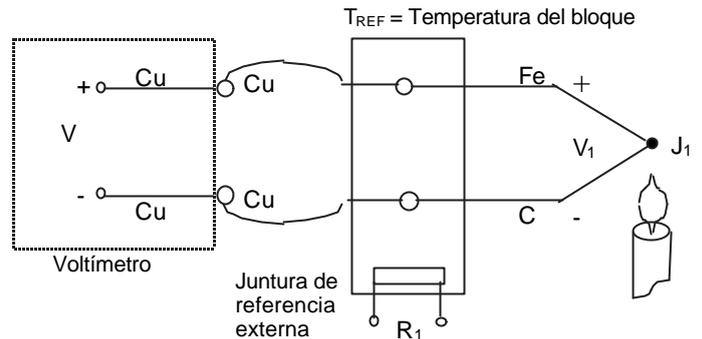


Figura 14 - Circuito equivalente

En la *compensación por software* el voltímetro de medición está bajo control de la computadora y la medición de temperatura se realiza en dos etapas:

- 1) Se mide la señal provista por el sensor de referencia que es proporcional a la temperatura del bloque de referencia obteniendo de esta manera  $V_{REF}$
- 2) Se mide  $V$  y se resta  $V_{REF}$  para obtener  $V_1$  que luego es convertida a temperatura.

La ventaja de la compensación por software es que es muy versátil. Sobre el bloque isotérmico pueden conectarse muchas termocuplas incluso de diferente tipo (figura 15). Es la computadora la que se encarga de realizar las conversiones correspondientes. La desventaja de este método es que se requiere cierto tiempo adicional para realizar la medición de la temperatura de la juntura de referencia y hacer las cuentas correspondientes. Si el objetivo es maximizar velocidad se debe recurrir a la compensación electrónica.

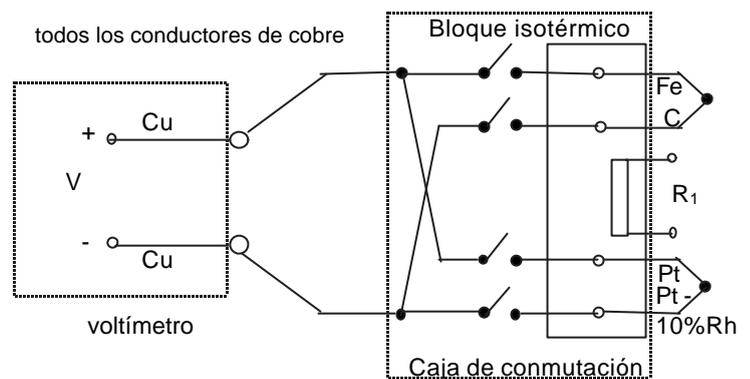


Figura 15

En la *compensación por hardware o electrónica* la señal provista por el sensor sobre el bloque isotérmico es escalada por un circuito electrónico de manera tal que cancele la tensión generada en la juntura de referencia. Este tipo de compensación es equivalente a poner la juntura a una temperatura de  $0^\circ\text{C}$ . En el circuito de la figura 16 por ejemplo, el sensor integrado produce una corriente proporcional a la temperatura absoluta. Esta corriente al circular por una resistencia (que debe ser muy estable térmicamente) produce una tensión en oposición a la generada por la juntura de referencia.

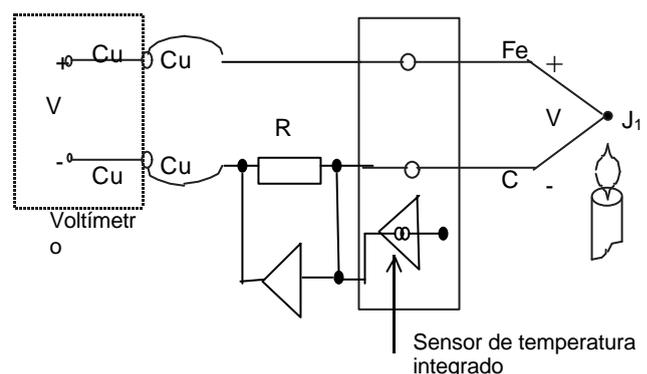


Figura 16 - Compensación Electrónica

Una vez medido la tensión es necesario realizar la conversión de tensión a temperatura, lo que puede hacerse de dos formas:

Mediante curvas tensión de salida vs temperatura, para la juntura de referencia a  $0^\circ\text{C}$  La figura 17 las presenta para las termocuplas más comunes. En la figura 17b se ha graficado la pendiente de las curvas (coeficiente de Seebeck) de la figura 17a en función de la temperatura y en curvas obtenidas se ve que las termocuplas son dispositivos no lineales, ya que una relación lineal entre temperatura y tensión de salida implicaría una recta horizontal (pendiente constante). De todas formas pueden hacerse aproximaciones

lineales por tramos. Por ejemplo la termocupla *tipo K* tiene un comportamiento que podría aproximarse con una recta en el rango 0 a 1000 °C y este mismo procedimiento podría realizarse para distintos tramos de las curvas considerando que el coeficiente de Seebeck se mantiene constante en cada tramo y lograr una mejor aproximación.

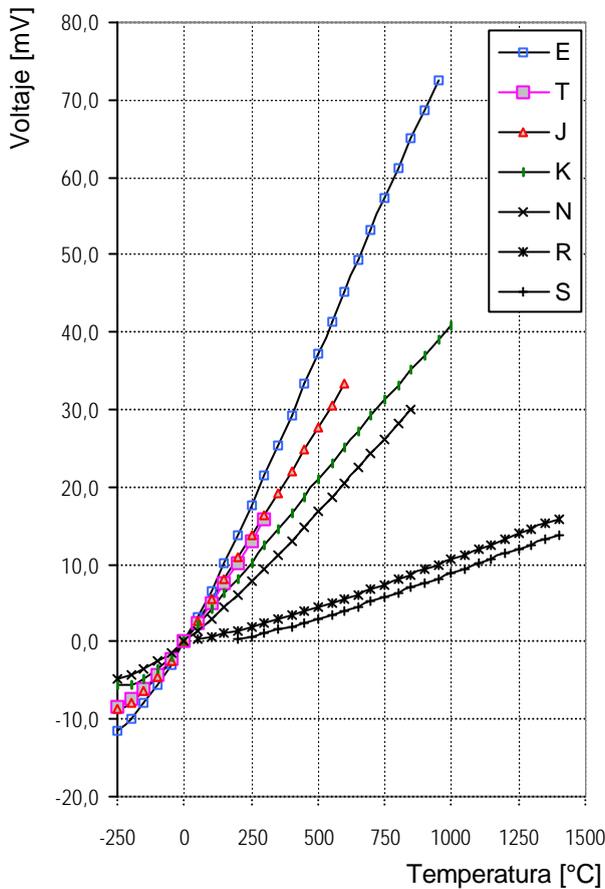


Figura 17a - Temperatura vs Tensión

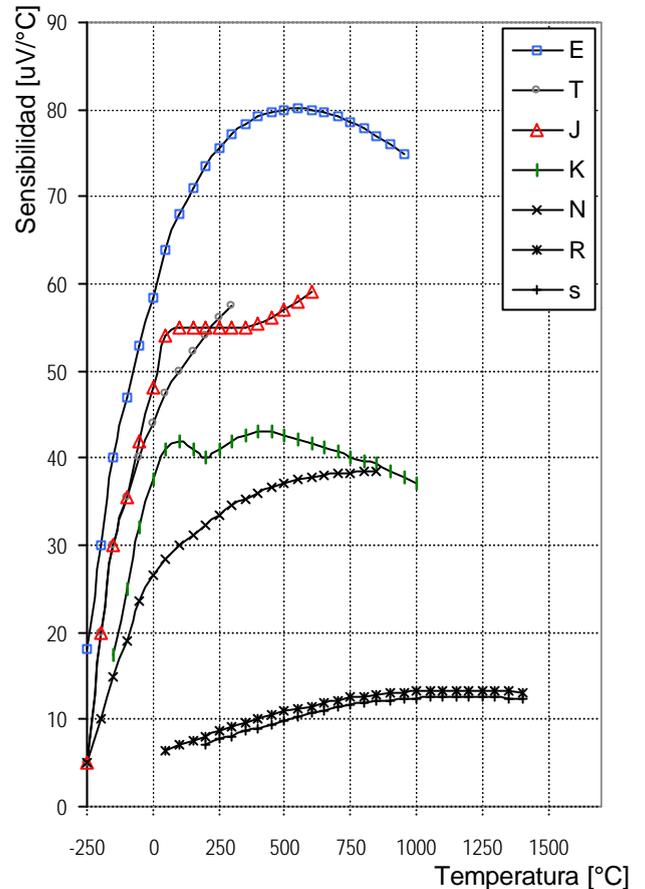


Figura 17b - Coeficiente Seebeck vs Temperatura

Mediante tablas provistas por los fabricantes. Se realiza la lectura en milivolts y se consulta la tabla para obtener la temperatura correspondiente según el tipo de termocupla utilizada. Estas tablas pueden almacenarse en la PC aunque suelen ocupar una cantidad de memoria considerable.

Aproximando las curvas de la figura 17a mediante polinomios:

$$T = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + \dots + a_n \cdot x^n, \text{ donde:}$$

T temperatura,

x tensión producida por la termocupla,

$a_i$  coeficientes del polinomio. (Un conjunto para cada tipo de termocupla).

n orden del polinomio.

A medida que aumenta el orden del polinomio, aumenta la precisión con que se aproxima la curva. Por ejemplo, para una precisión de +/- 1 °C el orden debe ser por lo menos nueve. La forma más adecuada para realizar las operaciones de cálculo cuando se utiliza este método con una PC es programar los polinomios en forma anidada. Por ejemplo, para un polinomio de orden cinco:

$$T = a_0 + x \cdot (a_1 + x \cdot (a_2 + x \cdot (a_3 + x \cdot (a_4 + x \cdot a_5))))$$

Este método de lectura de termocuplas insume cierto tiempo de cómputo para realizar los cálculos. El cual puede reducirse si se disminuye el orden del polinomio a costa de perder precisión.

Un método intermedio, más complejo de implementar y con una muy buena relación velocidad-precisión, consiste en dividir a la curva en sectores y aproximar cada sector con un polinomio de orden 2 ó 3.

La tabla siguiente muestra los tipos de termocuplas mas comunes, los metales que las componen y el coeficiente de Seebeck para las temperaturas indicadas. Resulta interesante observar que los niveles de tensión que entregan las termocuplas son muy bajos y se requieren voltímetros de gran sensibilidad para poder realizar las mediciones correctamente. Por ejemplo, para una termocupla *tipo K* con un coeficiente Seebeck de 40  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  se requiere un instrumento con una resolución de 4  $\mu\text{V}$  para detectar un cambio de 0.1  $^\circ\text{C}$ . La magnitud de esta señal es tan pequeña que requiere un acondicionamiento adecuado antes de su digitalización.

tipo	metales	coeficiente Seebeck	@ Temp.	Rango de uso
E	Niquel - 10% Cromo (+) / Constantán (-)	58.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0 $^\circ\text{C}$	-175 a 1000 $^\circ\text{C}$
J	Hierro (+) / Constantán (-)	50.2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0 $^\circ\text{C}$	-185 a 1200 $^\circ\text{C}$
K	Cromo (+) / Niquel (-)	39.4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0 $^\circ\text{C}$	-175 a 1375 $^\circ\text{C}$
R	Platino - 13% Rodio (+) / Platino (-)	11.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	600 $^\circ\text{C}$	125 a 1770 $^\circ\text{C}$
S	Platino - 10% Rodio (+) / Platino (-)	10.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	600 $^\circ\text{C}$	150 a 1770 $^\circ\text{C}$
T	Cobre (+) / Constantán (-)	38.0 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0 $^\circ\text{C}$	-170 a 400 $^\circ\text{C}$

La nomenclatura de las TC proviene de la ANSI

**Junturas de medición:** los metales que componen las termocuplas se aíslan entre sí y el conjunto puede estar protegido del medio donde debe realizarse la medición, mediante una vaina resistente al ambiente que la rodea. Además la junta puede disponerse de tres maneras: expuesta, protegida a tierra (en contacto con la vaina) o protegida sin tierra, como se muestra en la figura 18

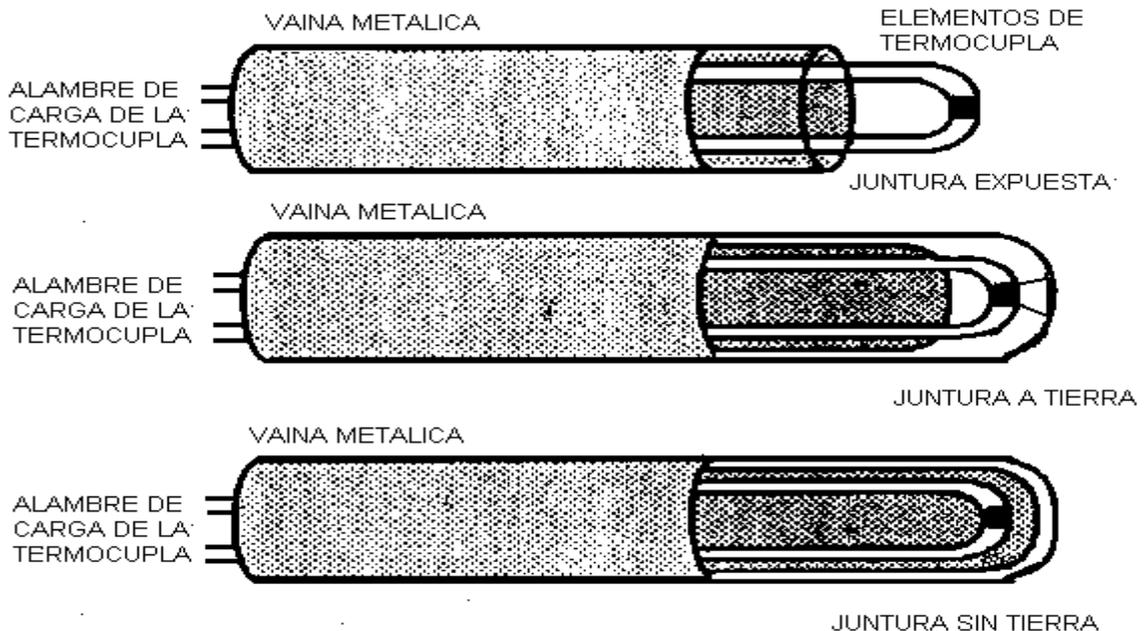


Figura 18 – Disposiciones de la junta

**\*\*\*Sondas de resistencia – RTD (Resistance Temperature Detector):** El mismo año que Seebeck hizo su descubrimiento sobre el efecto termoeléctrico, Sir Humphrey Davy anunció la fuerte dependencia de la resistencia eléctrica de los metales con la temperatura. Cincuenta años mas tarde, Sir William Siemens propone la utilización de platino como elemento para un termómetro de resistencia. Su elección probó ser la mas adecuada y actualmente el platino es el metal preferido para la fabricación de RTDs. El platino es especialmente apto para este fin ya que soporta temperaturas altas manteniendo excelente estabilidad. El elemento consiste usualmente de un arrollamiento de hilo muy fino del conductor bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica

La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia depende del coeficiente de variación de resistencia en función de la temperatura, del material que forma el conductor. Esta relación es mucho mas lineal que para una termocupla pero aún así requiere cierto ajuste para obtener buena precisión. Una ecuación que ha sido utilizada durante años para este fin es la propuesta por Callendar-Van Dusen:

$$R_T = R_0 \cdot \alpha \cdot [T - \delta(0,01 \cdot T - 1) \cdot 0,01 \cdot T - \beta(0,01 \cdot T - 1) \cdot 0,01 \cdot T^3], \text{ donde:},$$

- $R_T$  Resistencia a la temperatura T
- $R_0$  Resistencia a  $T = 0\text{ }^\circ\text{C}$
- $\alpha$  Coeficiente de temperatura a  $T = 0\text{ }^\circ\text{C}$  (  $0.00392\text{ }\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$  típico),
- $\delta$  1,49 (típico para platino),
- $\beta$  = 0,00 para  $T > 0$   
 = 0,11 (típico) para  $T < 0$

Los valores exactos de los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\delta$  se pueden determinar midiendo la RTD en cuatro temperaturas distintas y resolviendo las ecuaciones resultantes. Para obtener un ajuste mas fino, en trabajos de laboratorio y cuando se utiliza una computadora para realizar la conversión resistencia temperatura es común el empleo de un polinomio de orden 20 en lugar de esta ecuación.,

El valor mas común de resistencia de las RTDs es de 100 ohms a  $0\text{ }^\circ\text{C}$  y su coeficiente de temperatura es  $\alpha = 0.00385$  (para platino). Este valor es en realidad la pendiente promedio de la curva resistencia-temperatura en el rango  $0\text{-}100\text{ }^\circ\text{C}$ ,

Se ve que tanto la pendiente como el valor absoluto de resistencia son valores pequeños, sobre todo cuando los cables utilizados para llevar la señal provista por la RTD al sistema de adquisición pueden tener varios ohms de resistencia. Un cable de 10 ohms de resistencia introduce un error de  $10/0.3859 = 126\text{ }^\circ\text{C}$ . Para evitar este inconveniente se utilizan configuraciones circuitales tipo puente para realizar las mediciones. La figura 18 muestra cuatro de los circuitos mas comunmente utilizados.

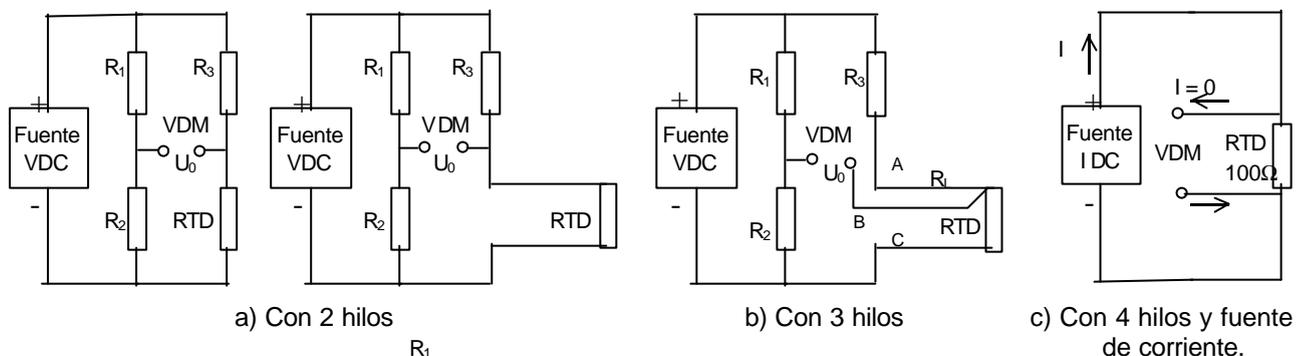


Figura 18 - Tipos de circuitos puente utilizados para medir RTDs.

En el montaje de dos hilos la RTD se conecta directamente a uno de los brazos del puente. Es el mas sencillo pero tiene el inconveniente de que la resistencia de los conductores a y b de conexión a la RTD varía con la temperatura e introduce errores en la lectura.,

El circuito de tres conductores mostrado en la figura 18b soluciona este problema ya que la variación de temperatura afecta por igual a dos brazos del puente siempre que la resistencia de los conductores A y C sea la misma.

El método mas preciso es el mostrado en la figura 4.8c. La lectura del voltímetro es directamente proporcional a la resistencia de la RTD. Este método requiere de un conductor adicional y una fuente de corriente para excitar a la RTD; se denomina de 4 hilos. Los multímetros de precisión preparados para medir temperatura a través de una RTD utilizan esta disposición.

**\*\*\*Termistor:** Al igual que las sondas de resistencia, los termistores son dispositivos que varían su resistencia con la temperatura. Si se puede clasificar a la termocupla como el sensor de temperatura mas versátil y a la RTD de platino como el sensor mas estable, los termistores se pueden catalogar como los sensores mas sensibles. Son los que exhiben mayor variación en sus parámetros con la temperatura.

Los termistores se construyen con materiales semiconductores. Los mas comunes tienen coeficientes de temperatura negativo (NTC), es decir, su resistencia disminuye con un aumento de temperatura. Este coeficiente tiene una magnitud importante, lo que permite que un transductor basado en un termistor pueda detectar cambios de temperatura del orden de décimas e incluso centésimas de grado. Por ejemplo, la resistencia nominal de un termistor es del orden de 5000 ohms con un NTC de  $-4\text{ } \%/^\circ\text{C}$ , lo que equivale a una variación de resistencia de  $200\text{ }\Omega/^\circ\text{C}$ .

El precio a pagar por una sensibilidad tan alta es una fuerte alinealidad. El termistor es altamente no lineal y requiere la utilización de una ecuación de ajuste para convertir lecturas de resistencia en temperatura. Una muy buena aproximación puede obtenerse utilizando la ecuación de Steinhart-Hart:

$$T^{-1} = \alpha + \beta \cdot \ln R + \delta \cdot (\ln R)^3, \text{ donde,}$$

T temperatura en grados Kelvin,  
R resistencia del termistor,  
 $\alpha, \beta$  y  $\delta$  coeficientes de ajuste,

$\alpha$ ,  $\beta$  y  $\delta$  se determinan a partir de tres puntos de la curva de resistencia vs temperatura dada por el fabricante y resolviendo el sistema de 3 ecuaciones simultáneas.

La precisión que se logra es notable. Por ejemplo, si elegimos un rango de trabajo de no más de 100 °C centrado sobre el rango de operación nominal del termistor, la ecuación anterior permite un ajuste con error del orden de  $\pm 0.02$  °C.

Las limitaciones de los termistores están dadas fundamentalmente por el hecho de ser semiconductores. Tienen rango de operación limitado con peligro de deterioro permanente si se excede. Son más frágiles que las termocuplas y las RTDs y además, debido a su tamaño pequeño, son susceptibles al autocalentamiento cuando son excitados por el circuito de medición.

**\*\*\*Sensores integrados:** Basados también en la variación de parámetros de los semiconductores con la temperatura, los sensores integrados proporcionan una salida de corriente o tensión prácticamente lineal con la temperatura. Valores típicos son  $1 \mu\text{A}/^\circ\text{K}$  y  $10 \text{ mV}/^\circ\text{K}$ . Tienen rangos de operación muy limitados (no superiores a los 200 °C) y adolecen de los problemas mencionados para los termistores.

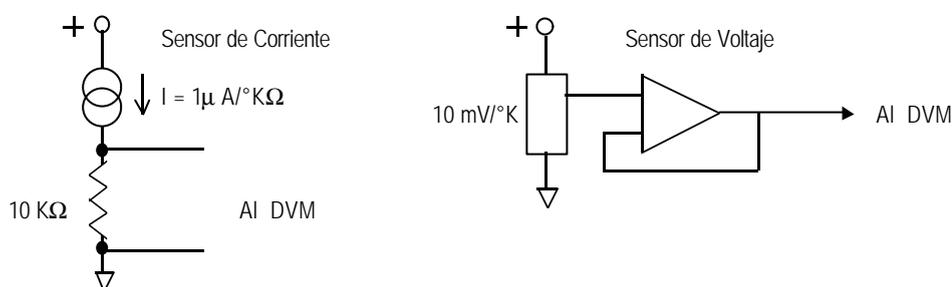


Figura 19 - Sensores de temperatura integrados

#### 4.3 Transductores Ópticos

Fotovoltaicos (celdas o baterías solares); celdas fotoconductoras.

Transductores para magnitudes ópticas e infrarrojas: Este tipo de dispositivos son o fuentes de luz que convierten electricidad u otra forma de energía lumínica o elementos fotosensores que convierten energía lumínica en energía eléctrica. Las principales fuentes de luz son las lámparas de filamento incandescente, las lámparas de descarga y arco, LEDs, láseres y pantallas fosforadas. Los principales elementos sensores de luz son los fotoresistencias y los dispositivos fotoconductoras (fotodiodos y fototransistores).

#### 4.4 Transductores Acústicos:

Micrófonos.

Transductores para magnitudes acústicas: Los llamados transductores receptores (micrófonos e hidrófonos) convierten las variaciones acústicas en señales eléctricas mientras que los transductores transmisores (altavoces o auriculares) convierten señales eléctricas en acústicas. Los métodos básicos usados son los mismos que para transductores de desplazamiento y presión.

#### 4.5 Transductores para campos magnéticos

Permeámetros; magnetómetros; semiconductores de Efecto Hall.

##### 4.5.1 De efecto Hall:

Mide el campo magnético usando el Efecto Hall que produce una diferencia de potencial ortogonal a la corriente circulante en un conductor atravesado por un campo magnético.

##### 4.5.2 Magnetoresistivo:

Mide el campo magnético teniendo en cuenta la variación de la conductividad de un conductor en función de la densidad del campo magnético que lo atraviesa.

##### 4.5.3 Transistor sensible al campo magnético:

Mide la alteración del flujo de corriente en una junta PN, que causa un campo magnético al incidir en ella.

#### 4.6 Transductores Químicos

pH y celdas de conductividad.

Los transductores electroquímicos miden propiedades químicas de las sustancias tales como PH y potencial de oxidación por medios electroquímicos

#### 4.7 Biológicos

electroencefalógrafo.

Los transductores para instrumentación de análisis tienen como propósito la detección, identificación y medición de los constituyentes químicos de una sustancia. Los métodos más conocidos son la espectroscopía y la cromatografía de gases.

#### 4.8 Nucleares

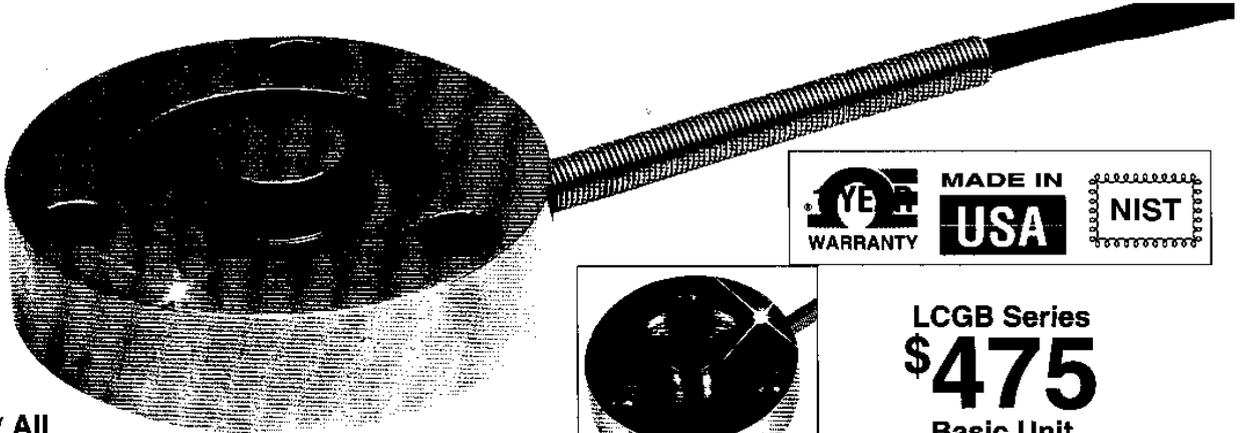
Tubo de Geiger, cámara de ionización; detectores de radiación por centelleo y por semiconductores.

Los transductores para radiación nuclear miden magnitudes relacionadas con radiaciones producidas por elementos radioactivos. En todos los transductores de este tipo (de cámara de gas, de ionización o de centelleo) la electrónica se encarga del conteo de las partículas detectadas por medios físico-químicos.

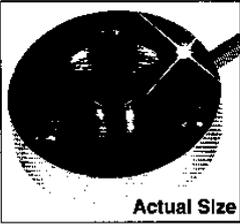
### 9 Bibliografía

- ❑ *Handbook of Modern Electronics and Electrical Engineering*, Charles Belove, Ed. John Wiley & Sons, 1986; Cap. 16, pp 483; Cap 31, pp 923; Cap 37, pp 1219.
- ❑ *Curso Superior de Instrumental Electrónico*, Sol D. Prensky, Ed. GLEM, 1974, Cap. 6, pp 121.
- ❑ *Sensores*, Secretaría de Ciencia y Tecnología, Presidencia de la Nación, 1994, pp 387-397.
- ❑ *Convertidores de Medida*, Folleto.
- ❑ *Transductor capacitivo de presión*, Revista Telegráfica Electrónica, Septiembre 1979, pp 1017.
- ❑ *Transductores Integrados de Temperatura*, Revista Telegráfica Electrónica, Mayo 1979, pp 464.
- ❑ *Linealización Analógica de características de Transductores*, Revista Telegráfica Electrónica, Marzo 1988, pp 241.
- ❑ *Gran Enciclopedia de la Electrónica*, Fascículo 1.
- ❑ *Transductores* Ejecución original de los alumnos de Instrumentos y Mediciones Eléctricas, año 1996, comisión n°6, constituida por:
  - ❑ Abate, Marcelo J. LU: 33644
  - ❑ Aguirre Grinma, Hernán LU: 32245
  - ❑ Benitez, Rodrigo LU: 32251
  - ❑ Bovo, Marcelo D. LU: 33660
  - ❑ Caviglia, Dardo LU: 32834
  - ❑ Jeva, Marcelo LU: 33962

# MINIATURE OEM BUTTON LOAD CELL WITH THROUGH HOLE MOUNTING 0-100 LB TO 0-50,000 LB CAPACITIES



**WARRANTY** **MADE IN USA** **NIST**



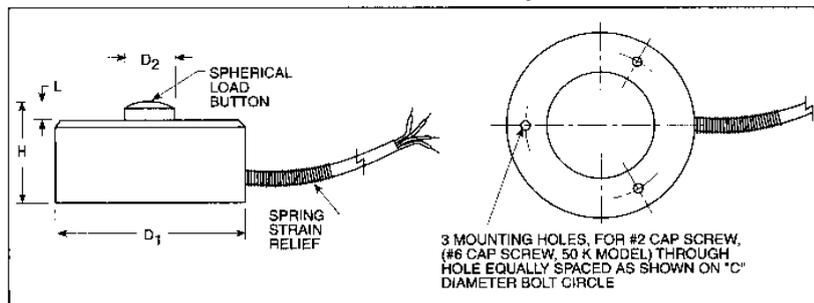
**LCGB Series**  
**\$475**  
**Basic Unit**

- ✓ All Stainless Steel Construction
- ✓ Counter Bored Through Hole Mounting
- ✓ NIST Calibration Provided
- ✓ OEM Discounts

The new LCGB Series is a miniature load cell designed for compression applications. It is similar to OMEGA's popular LCGA model, except it utilizes counter bored through holes instead of threaded bottom holes for mounting. The standard size makes it interchangeable with many miniature

load cells, but the through hole mounting provides easier installations and broader mounting applications.

The LCGB Series' size and mounting ease make it an ideal choice for robotic and industrial applications. The all stainless steel construction enables it to be used in harsh environments as well.



### SPECIFICATIONS

- Rated Output:** 2 mV/V nominal
- Excitation:** 10 Vdc, 12 Vdc max.
- Linearity:** 0.4% FS (BFSL)
- Hysteresis:** 0.2% FS
- Repeatability:** 0.2% FS
- Zero Balance:** 3 mV
- Operating Temp. Range:** -54 to 121°C (-65 to 250°F)
- Compensated Temp. Range:** 15.5 to 71°C (60 to 160°F)
- Thermal Effects:**
  - Zero 0.005% FS
  - Span 0.01% Rdg/°F
- Max. Overload:** 150% FS
- FS Deflection:** 0.003" nominal
- Construction:** 17-4 pH SS
- Electrical:** 10 ft., 4-cond. pigtail leads

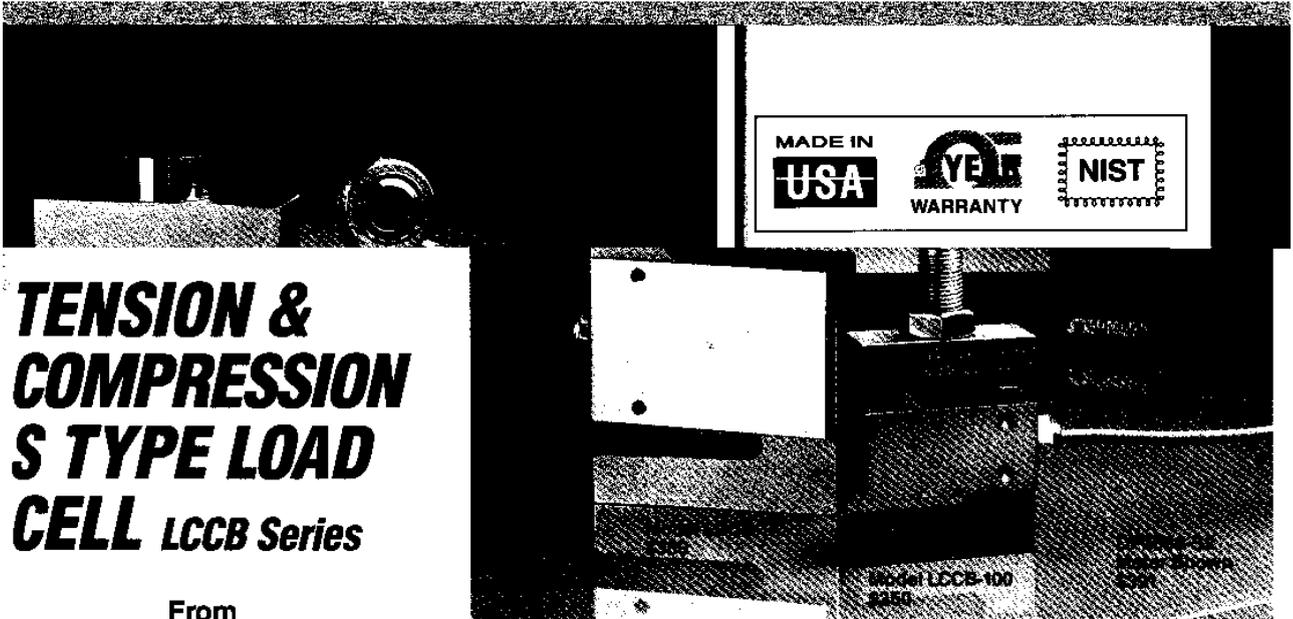
RANGES	D1"	D2"	H"	L"	A"	B	C
100 lbs.	1.00	.21	.62	.05	#4-40 UNC	.22	.75
250, 500, 1000 lbs.	1.25	.32	.39	.07	#6-32 UNC	.25	1.00
5,000, 10,000 lbs.	1.50	.43	.63	.08	#6-32 UNC	.25	1.25
50,000 lbs.	3.00	.78	1.50	.18	#6-32 UNC	.25	2.375

To Order (Specify Model Number)			
MODEL NO.	PRICE	CAPACITY	COMPATIBLE METERS
LCGB-100	\$475	100 lb	DP24-S, DP25-S, DP41-S
LCGB-250	475	250 lb	DP24-S, DP3002-S, DP41-S
LCGB-500	475	500 lb	DP24-S, DP25-S, DP3002-S
LCGB-1K	475	1000 lb	DP24-S, DP25-S, DP41-S
LCGB-2K	475	2000 lb	DP24-S, DP302-S, DP41-S
LCGB-5K	525	5000 lb	DP24-S, DP25-S, DP3002-S
LCGB-10K	525	10,000 lb	DP24-S, DP25-S, DP41-S
LCGB-50K	650	50,000 lb	DP41-S, DP24-S*, DP25-S*

\*These meters have 4 digits and count in ten pound increments.  
 Comes with complete operator's manual.  
**Ordering Example:** LCGB-10K miniature button load cell with 10,000 lb. capacity, \$525.

OMEGA's state-of-the-art calibration equipment has enabled the following OEM discounts for this product (if you require special quantity pricing, please contact your sales representative for a quotation):

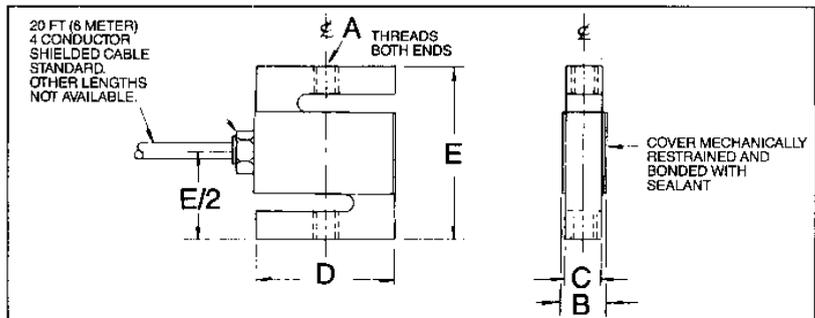
Discount Schedule	
1-4	.....List
5-10	.....9%
11-24	.....12%
25-49	.....15%
50-99	.....20%
100+	.....25%



# TENSION & COMPRESSION S TYPE LOAD CELL LCCB Series

From **\$350**

- ✓ N.I.S.T. Calibration Certificate Supplied
- ✓ 0.25% Interchangeable
- ✓ Water Resistant for Washdown Applications
- ✓ Ideal for Tank and Hopper Weighing



## SPECIFICATIONS

**Rated Output:** 3 mV/V ±0.0075 mV/V  
 (To eliminate .25% output end user must calibrate)

**Excitation:** 10 Vdc, 15 Vdc max.

**Accuracy:** 0.03% FS

**Operating Temp. Range:** -65 to 200°F

**Compensated Temp. Range:** 0 to 150°F

**Thermal Effects:** zero, 0.0015% FS/°F; output, 0.0008% Rdg/°F

**Max. Load:** Safe, 150%; ultimate, 300%; side load, 50%

**Bridge Resistance:** 350 Ohm

**Construction:** Nickel-plated steel

**Electrical:** 20', 4-conductor shielded cable

DIMENSIONS—INCH (MM)

CAPACITY	A	B	C	D	E
50-300	¼-28	.75	.50	2.0	2.5
50-1500	½-20	1.0	.75	2.0	2.5
2000	½-20	1.25	1.0	2.0	2.5
3000	½-20	1.25	1.0	3.0	4.0
5000-10000	¾-16	1.25	1.0	3.0	4.0

WIRING (TENSION)  
 FUNCTION COLOR  
 + EXCITATION RED  
 - EXCITATION BLACK  
 + OUTPUT GREEN  
 - OUTPUT WHITE  
 SHIELD ORANGE

## HIGHLIGHTED MODELS STOCKED FOR FAST DELIVERY

### To Order (Specify Model Number)

Model No.	Price	Rated Capacity	FS Defl.	Wt. Lbs.	Compatible Meters	Load Button	Price	Rod End	Price
LCCB-50	\$350	50 lbs.	0.013	0.8	DP25-S, DP2000-S2, DP87	LBC-014	\$40	REC-014M	\$15
LCCB-100	350	100 lbs.	0.013	0.8	DP25-S, DP2000-S3, DP41-S	LBC-014	40	REC-014M	15
LCCB-200	350	200 lbs.	0.013	0.8	DP25-S, DP2000-S4	LBC-014	40	REC-014M	15
LCCB-300	350	300 lbs.	0.013	0.8	DP41-S, DP2000-S2, DP87	LBC-014	40	REC-014M	15
LCCB-500	350	500 lbs.	0.018	1.0	DP41-S, DP2000-S2, DP87	LBC-012	40	REC-012M	35
LCCB-1K	350	1000 lbs.	0.018	1.0	DP25-S, DP2000-S3, DP41-S	LBC-012	40	REC-012M	35
LCCB-2K	350	2000 lbs.	0.023	1.0	DP25-S, DP2000-S4, DP41-S	LBC-012	40	REC-012M	35
LCCB-3K	420	3000 lbs.	0.023	1.0	DPS25-S, DP41-S, DP3002-S	LBC-012	40	REC-012M	35
LCCB-5K	535	5000 lbs.	0.033	3.3	DP87, DP41-S	LBC-034	55	REC-034M	65
LCCB-10K	535	10,000 lbs.	0.033	3.3	DP87, DP41-S	LBC-034	55	REC-034M	65

National Institute of Standards and Technology (formerly National Bureau of Standards)

