
TRANSDUCTORES - INSTRUMENTACIÓN

Realizado por Ing. Pablo Morcelle del Valle

1. Introducción

En la mayoría de los procesos industriales es habitual la utilización de sensores con el fin de monitorear la evolución de los parámetros del mencionado proceso.

Magnitudes tales como *presión, temperatura, caudal, nivel*, entre otras; son variables que comúnmente se procesan en una planta petroquímica, por ejemplo.

Resulta común medir *esfuerzo y deformación* durante ensayos de determinación de resistencia de materiales, o a veces es necesario controlar las mencionadas variables para verificar el estado de estructuras civiles (puentes, edificios).

La utilización de transductores asociados a sistemas de medición y aún a sistemas de control, es hoy en día imprescindible; sobre todo en procesos de mediana o alta complejidad.

El presente texto no pretende cubrir todos los aspectos relacionados con los transductores y la instrumentación, ni mucho menos. La variedad de transductores existente es tan vasta como su campo de aplicación. El autor sólo aspira a que el material expuesto sirva de base e inspiración a las inquietudes de los lectores y que, en todo caso, sea la filosofía que domina al tema lo que prevalezca para que cada individuo pueda encarar sus propios desarrollos con otros elementos no presentados aquí, pero siempre en base a las herramientas básicas expuestas en este trabajo.

En los apartados que siguen se presentan algunas definiciones y se repasan especialmente conceptos asociados al circuito puente de Wheatstone, de amplia aplicación en el tema desarrollado en el presente artículo; para luego atacar de lleno el estudio de los transductores y sus aplicaciones.

2. Definiciones

Según la bibliografía que se consulte, se habla de *transductor* o de *sensor* en forma indiferente. En otros casos, se los trata como si fueran dispositivos distintos, dándose para cada uno de ellos una definición que termina resultando más o menos similar. Algunas de ellas son las siguientes:

Transductor

Convierte un tipo de energía en otro. Generalmente esta definición se puede aplicar a cualquier dispositivo conversor de energía; pero en particular, *transductor* identifica a aquellos conversores que manejan señales con información.

Sensor

Dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas *variables de instrumentación*, y transformarlas en variables eléctricas.

Como se anticipó, se puede observar que dichas definiciones son bastante parecidas, al menos en lo que respecta a las incumbencias de este capítulo. Por lo tanto, para nosotros serán sinónimos. El lector podrá apreciar a lo largo de la lectura del presente texto, cuál de las definiciones se adapta mejor a cada uno de los dispositivos estudiados.

Clasificación de los transductores:

Una clasificación bastante extendida divide a los transductores en *activos* y *pasivos*. Los primeros generan energía eléctrica a partir de la magnitud física que actúa sobre ellos; los segundos necesitan una fuente de energía eléctrica externa para poner de manifiesto las variaciones de las magnitudes que detectan.

Sistemas de instrumentación

La *instrumentación* en general, trata los sistemas integrados cuya finalidad es medir magnitudes físicas de un sistema externo, elaborar la información asociada a ellas y presentarla a un operador.

Los sistemas electrónicos de medición están compuestos por sensores, circuitos especiales para el tratamiento de las señales, instrumentos y sistemas de registro; los cuales se vinculan para llevar a cabo una función general de medición. Si bien, la palabra *instrumentación* corresponde a una denominación histórica, dado que antiguamente los datos eran presentados en un *panel de instrumentos*; en el presente se continúa empleando el término en forma general, aún cuando la tecnología actual permite la digitalización, almacenamiento y actuación sobre el proceso mediante la utilización de computadoras. Por ejemplo, el monitoreo de una magnitud (digamos, presión) puede requerirse momento a momento. La señal proveniente del sensor debe ser *acondicionada* o *conformada* (tratamiento de la señal), a los fines de adaptarse al sistema de registro o visualización. Por lo tanto, el *sensor*, el *conformador* de la señal, y el *sistema de registro o visualización*, configuran el *sistema de instrumentación*.

La Figura 1 muestra un sistema típico de instrumentación en el cual se destacan los principales componentes: sensor, conformador y sistema de registro. Se incluye, además un lazo de realimentación para el caso que el sistema deba actuar sobre el proceso.

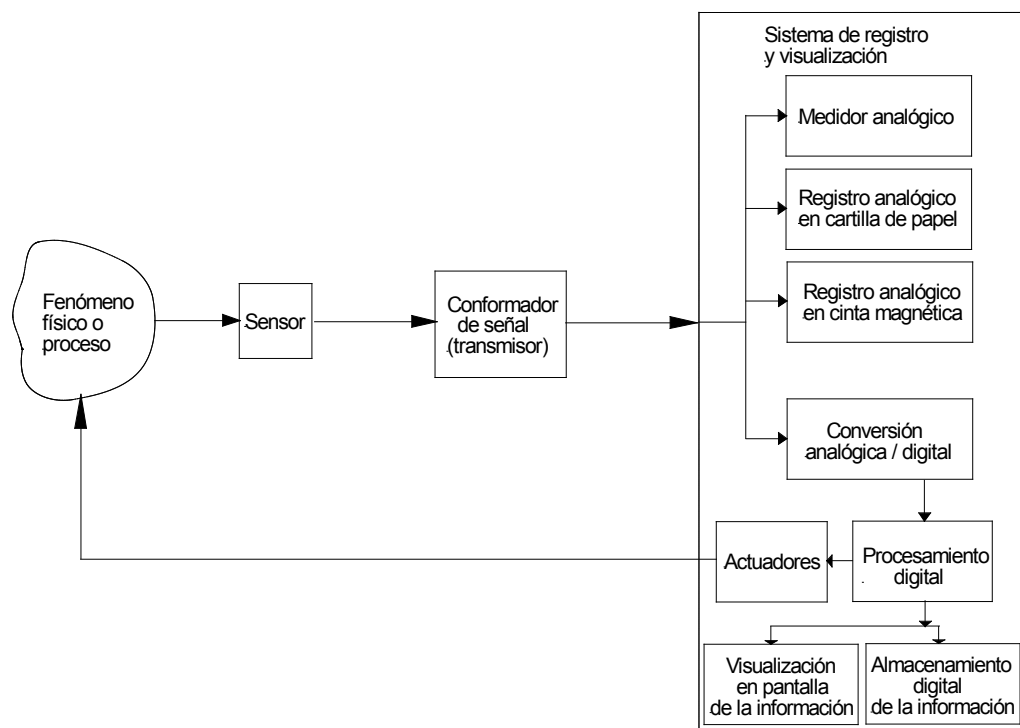


Figura 1 – Sistema de instrumentación

Muchos sistemas de instrumentación actuales están basados en una computadora, la cual resuelve todos los aspectos relativos al procesamiento y registro de la señal y a la transferencia y presentación de la información. A estos sistemas se los suele llamar *instrumentación inteligente*.

La principal diferencia entre un equipo de instrumentación convencional y uno inteligente es que, mientras en el convencional los datos de medida son generados uno a uno y deben ser visualizados e interpretados por el operador, en la instrumentación inteligente se puede registrar grandes cantidades de información de forma automática y luego presentarla de forma integrada y amigable al operador.

Acondicionamiento o conformación de la señal

Forma parte del tratamiento de la señal con el objeto de realizar el registro y visualización de la información y para la actuación sobre el proceso; incluye todas aquellas transformaciones que deben realizarse sobre señales eléctricas que resultan en la salida del transductor, y que son previas su procesamiento, que se realiza para extraer la información que se mide o evalúa.

Existen un par de razones por las que las señales de salida del transductor deben ser acondicionadas:

1. Cuando, debido a las características del tipo de transductor, la señal proporcionada no sea una tensión, se utiliza un conversor que adapte el tipo de señal de que se trate a tensión.
Así, en transductores resistivos es normal que se utilice un circuito puente para convertir el valor de resistencia a tensión.
Cuando el transductor es de tipo capacitivo o inductivo, éste se suele montar como parte de un oscilador, siendo la magnitud de salida una frecuencia, por lo cual debe utilizarse un conversor de frecuencia a tensión.
2. La señal debe ser acondicionada para incrementar la relación señal/ruido hasta niveles adecuados. Este tipo de acondicionamiento implica:
 - Amplificar las señales hasta niveles que sean suficientemente mayores al nivel de ruido eléctrico aleatorio.
 - Filtrar la señales para eliminar ruidos introducidos por interferencia eléctrica.
 - Cuando el procesamiento de la señal es digital, el acondicionamiento corresponde a la conversión analógica/digital.

Procesamiento de la señal

Incluye el conjunto de transformaciones a que debe ser sometida la señal eléctrica a fin de extraer de ella, la información que se busca.

El procesamiento de la señal suele implicar la realización operaciones muy diversas, ya sean lineales, no lineales; la composición de múltiples señales, o el tratamiento digital de las señales.

Registro de la señal

Consiste en el almacenamiento permanente o temporal de las señales para su posterior análisis o supervisión. Esta operación es necesaria si el flujo de información que se adquiere supera la capacidad de procesamiento de que se dispone.

El método tradicional de registro se ha basado en gráficos sobre cartillas de papel y luego en grabación de cintas magnéticas, ya sea a través de formatos analógicos o utilizando codificación digital. Actualmente los métodos de registro están basados en computadoras, y el soporte en que se almacena la información es cualquiera de los sistemas de memoria masiva de que disponen estos equipos (memoria, discos, disketes, cinta magnética, etc.).

Telemetría

Muchas veces las señales son adquiridas en puntos remotos, de difícil acceso o con condiciones ambientales hostiles, haciéndose necesario mantener aislados los sistemas sensores y los equipos de procesamiento y presentación o registro. En estos casos las señales deben transmitirse entre la la fuente y el sistema de procesamiento mediante un canal de comunicación (línea telefónica, enlace de radio, etc). Para adaptar las señales a las características de canal de comunicación es necesario introducir procesos de modulación, demodulación o codificación apropiados.

Actuación

En el caso de ser necesaria la intervención del sistema para realizar el ajuste de algún parámetro del proceso, la información brindada por diferentes sensores es procesada por el sistema de instrumentación. La misma, además de ser visualizada y registrada, puede ser utilizada para tomar decisiones en forma manual (*instrumentación* tradicional) o automática (*instrumentación* inteligente) respecto de la actuación sobre el proceso, produciendo la apertura y cierre de válvulas, arranque o parada de bombas o motores, etc.

Sistemas 4-20 mA

Dada la existencia de ruidos electromagnéticos de importancia en el ambiente industrial, y con el objeto de minimizar su incidencia en las señales (provenientes de las mediciones o enviadas a los actuadores), es común la utilización de *lazos de corriente* para la transmisión de la información. El rango que se utiliza más habitualmente es el denominado 4-20 mA, donde el valor 20 mA corresponde al fondo de escala y 4 mA a la ausencia de información. Se ha convenido que el valor mínimo sea distinto de cero, para evitar ambigüedades en el caso de fallas (si la corriente mínima fuese cero, no podríamos discernir una falla en el sistema respecto de un valor de señal realmente cero).

Los lineamientos y especificaciones de este sistema de señalización industrial se encuentran documentados en la norma *ANSI/ISA-50.1-1982 (R1992) "Compatibility of Analog Signal for Electronic Industrial Process Instruments"*.

3. Puente de Wheatstone

El estudio de este circuito se hace imprescindible, dada la importancia del mismo en aplicaciones relacionadas con transductores.

Veamos la Figura 2 siguiente:

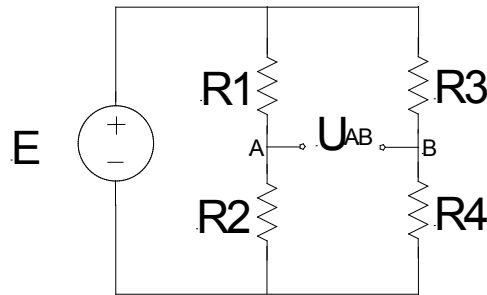


Figura 2 – Puente de Wheatstone

Las resistencias de las cuatro ramas son nominalmente iguales. Las tensiones de los nodos A y B valen, respectivamente:

$$U_A = \frac{E}{R_1 + R_2} R_2$$

$$U_B = \frac{E}{R_3 + R_4} R_4$$

La diferencia de tensión entre A y B resulta:

$$U_{AB} = U_A - U_B = E \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

Si $U_{AB} = 0$ el puente está en equilibrio y $\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$

luego $R_2 R_3 + R_2 R_4 = R_1 R_4 + R_2 R_4$

$$\Rightarrow R_2 R_3 = R_1 R_4 \quad (0)$$

Se observa que el equilibrio es independiente de E.

Si la resistencia de una de las ramas varía, se rompe el equilibrio y $U_{AB} \neq 0$.

Caso 1

Si sólo varía una de las resistencias del puente (supongamos, la de la rama 2) en un factor x , pudiendo escribirse $x = \frac{\Delta R}{R}$, es decir que el nuevo valor de dicha resistencia es $R_2(1+x)$, se tiene:

$$U_{AB} = \frac{E}{4} \frac{x}{\left(1 + \frac{x}{2}\right)} \quad (1)$$

Esta relación no es lineal. Pero si $x \ll 1$, se puede efectuar la siguiente aproximación:

$$U_{AB} \approx \frac{E}{4} x$$

En donde ahora U_{AB} es directamente proporcional a x , a través del factor $\frac{E}{4}$. De cualquier modo, la importancia en la elección del valor de E radica en que la *sensibilidad* del puente depende de dicha tensión de alimentación.

Caso 2

Si ahora varían las resistencias de las ramas 2 y 3 en un factor x , se tiene:

$$U_{AB} = \frac{E}{2} \frac{x}{\left(1 + \frac{x}{2}\right)}$$

y, como antes, si $x \ll 1$:

$$U_{AB} \approx \frac{E}{2} x \quad (2)$$

Con lo cual se puede observar que la sensibilidad del puente se duplicó respecto del caso anterior.

Caso 3

Finalmente, si varían las cuatro resistencias, pero las de las ramas 2 y 3 en un factor $+x$ y las de las ramas 1 y 4 en un factor $-x$, se tiene:

$$U_{AB} = E \cdot x$$

Donde la relación resulta lineal independientemente de la variación de x , volviéndose a duplicar la sensibilidad, respecto del valor del caso anterior.

4. Transductores

4.1 Desplazamiento

Potenciométrico

Consiste en un resistor variable. Se pueden medir tanto desplazamientos lineales como angulares, en función del tipo de resistor utilizado.

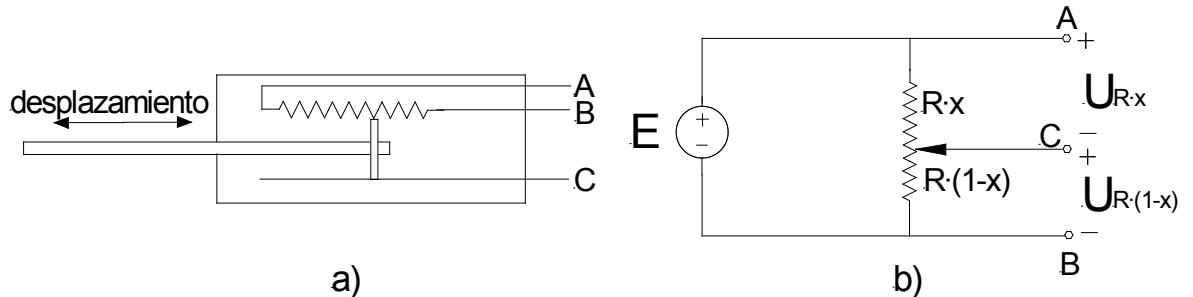


Figura 3 – Transductor de desplazamiento potenciométrico: a) Esquema del dispositivo; b) Circuito

Evidentemente, cualquiera de las dos tensiones proporcionadas por el divisor se puede utilizar como resultado de la medición (U_{R_x} o $U_{R(1-x)}$):

$$U_{R_x} = E \cdot x$$

$$U_{R(1-x)} = E \cdot (1-x)$$

La tensión de la fuente debe ser muy estable para no influir en la medición.

Transformador diferencial variable lineal o LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

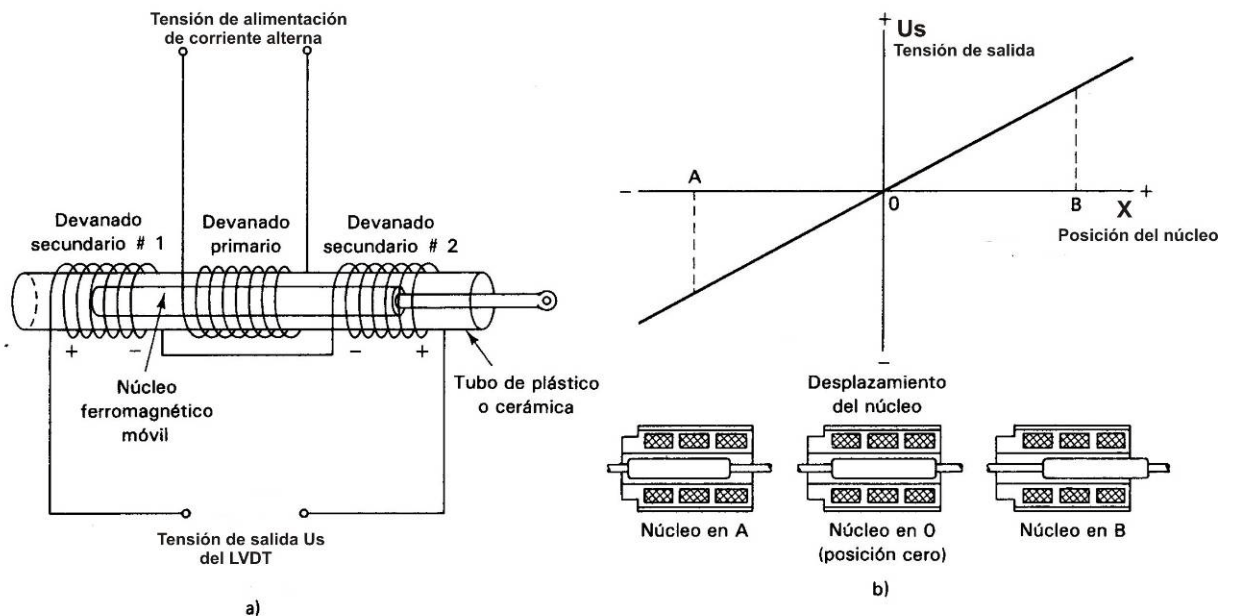


Figura 4 – Transformador diferencial variable lineal: a) esquema; b) tensión de salida en función de la posición del núcleo del LVDT (Schaevetz Engineering)

Los secundarios son idénticos y están devanados en serie y en oposición entre sí, con lo que el acoplamiento entre el primario y cada secundario resulta igual.

La tensión de la fuente debe presentar alta estabilidad de amplitud y frecuencia. Valores típicos están comprendidos entre 1 a 10 V y 1 a 100 kHz, respectivamente.

La *linealidad* se define como

$$L\% = \frac{\Delta U_{s_{\text{maxima}}}}{U_{s_{\text{maxima}}}} \cdot 100$$

que representa la desviación máxima de la curva de salida respecto de la recta de mejor ajuste que pase por el origen, expresada como un porcentaje de la salida nominal.

La Figura 5 muestra la característica tensión de salida vs. desplazamiento real (no lineal) comparada con la característica nominal (lineal).

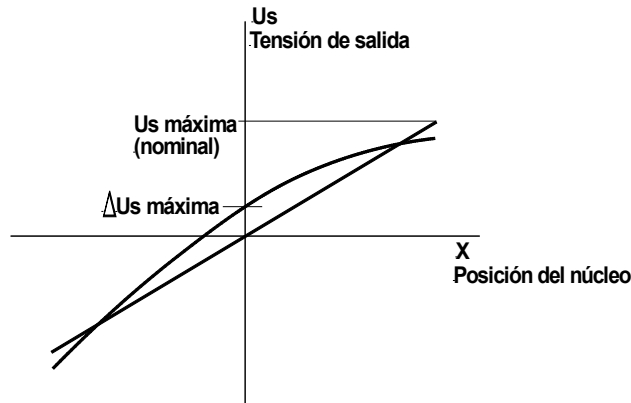


Figura 5 – Parámetros de la característica no lineal del LVDT

Como se observa, conviene que L sea lo más baja posible. Desde este punto de vista, sería mejor hablar de *alinealidad*.

Si se escribe la expresión de la tensión de salida en función del desplazamiento, la misma dependerá de la tensión de alimentación del primario y un factor denominado *sensibilidad*, obteniéndose:

$$U_s = S \cdot E \cdot x$$

Si $U_s = [\text{mV}]$, $E = [\text{V}]$, $x = [\mu\text{m}]$; resulta que $S = \left[\frac{\text{mV}}{\text{V} \cdot \mu\text{m}} \right]$

Una de las variadas aplicaciones del LVDT es en acelerómetros, disponiendo el LVDT de la forma que se muestra en la Figura 6 siguiente:

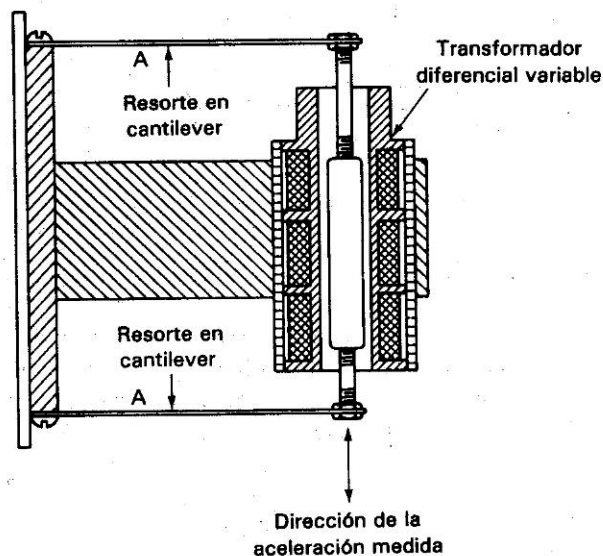


Figura 6 - Acelerómetro tipo LVDT (Guía para mediciones electrónicas, Wolf-Smith, Cap. 14)

4.2 Esfuerzo y deformación

Cuando se aplica una fuerza sobre un cuerpo, éste se deforma. Si las deformaciones no son permanentes y la fuerza aplicada se retira, el cuerpo retoma su forma original. Es en este rango, zona elástica, en el cual es posible aplicar la Ley de Hooke, que establece una relación lineal entre las tensiones o esfuerzos y las deformaciones soportados por un cuerpo, de acuerdo al siguiente gráfico:

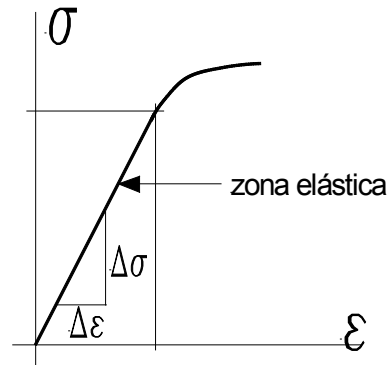


Figura 7 – Esfuerzo vs. deformación

donde $\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{mm}} \right]$ es la deformación y $\sigma = \frac{F}{A} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$. Además $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$ es el módulo de Young, válido para la zona elástica.

Más allá de dicho rango las deformaciones son permanentes y el cuerpo no recupera su forma original.

Galgas extensométricas

Son elementos cuya resistencia eléctrica varía en función de pequeños cambios en su longitud (se debe recordar la expresión $R = \rho \frac{l}{A}$) y se construyen de tal forma que dicha variación sea lineal.

Esos elementos van adheridos a la superficie del material bajo prueba, formando un conjunto solidario.

Los tipos más difundidos son las galgas metálicas y las semiconductoras. Las primeras se construyen en base a aleaciones de níquel con cobre o cromo, mientras que las segundas están constituidas por semiconductores (fundamentalmente silicio) con un grado de contaminación adecuado. Estas últimas son más sensibles a los cambios de longitud (50 ó 60 veces respecto de las metálicas), pero también son más sensibles a los cambios de temperatura.



Figura 8 – Galgas extensométricas metálicas: a) detalle; b) comparación de tamaños

En cualquier caso, se define el factor de la galga como

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (3)$$

La siguiente tabla compara diferentes características de las galgas metálicas y semiconductoras.

Tabla I – Características de las galgas

Tipo de galga Característica	Metálicas	Semiconductoras
Precisión [%]	0,1	1
Factor	2	50 a 200
Alargamiento [$\mu\text{m}/\text{m}$]	20.000×10^{-6}	5.000×10^{-6}
Resistencia nominal [Ω]	120; 350; 600; 1.000	120

Según el tipo de esfuerzo a medir, se encuentran en diferentes disposiciones (lineales, radiales, tangenciales, etc.).

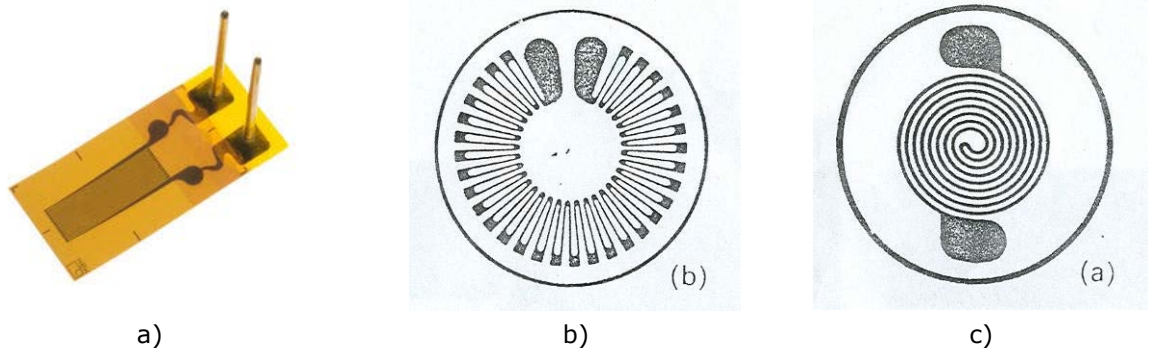


Figura 9 – Tipos de galgas según el esfuerzo a medir: a) lineal; b) radial; b) tangencial

Aplicación

Estos elementos se utilizan adecuadamente como parte integrante en circuitos tipo puente de Wheatstone. El caso de aplicación más simple es el siguiente:

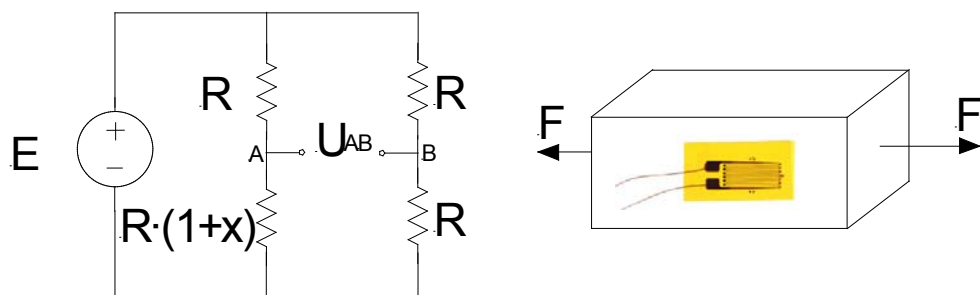


Figura 10 – Aplicación de una galga extensométrica con puente de Wheatstone

Recordando las fórmulas (1) y (3), teniendo en cuenta que x es una fracción de R , y sin olvidar que $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$, se tiene:

$$U_{AB} = \frac{E \cdot x}{4 \left(1 + \frac{x}{2}\right)} = \frac{\epsilon E \frac{\Delta R}{R} k \cdot \epsilon}{4 + 2 \frac{\Delta R}{R}} = \frac{E \cdot k \cdot \epsilon}{4 + 2 \cdot k \cdot \epsilon} \approx \frac{E \cdot k \cdot \epsilon}{4}$$

La aproximación es válida siempre que $k \cdot \epsilon \ll 1$.

Aumento de la sensibilidad

Se puede aumentar la sensibilidad del sistema en estudio con la inclusión de una galga adicional en la probeta bajo ensayo, la cual se conecta a la rama del puente opuesta a la galga original, como se ve en la Figura 11 siguiente.

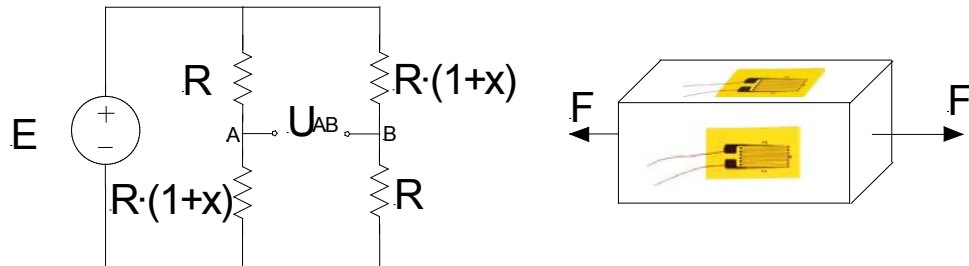


Figura 11 – Aumento de la sensibilidad agregando una galga adicional

Dado que el equilibrio del puente se consigue a partir de la fórmula (0), si las resistencias que se encuentran del mismo lado del signo igual varían en la misma cantidad, el desequilibrio resulta el doble del primer caso, con lo cual se duplica la sensibilidad.

Esto también se verifica matemáticamente mediante la expresión de la tensión de desequilibrio del puente para dos resistores variables correspondiente a la fórmula (2).

Compensación por variaciones de temperatura

Se puede realizar la compensación de la medición cuando la resistencia de la galga es afectada por variaciones de temperatura.

Durante un ensayo en el cual la probeta se deforma, dicha deformación puede provocar alteraciones en la temperatura de la pieza, en cuyo caso también es probable que la galga aumente su temperatura, modificando el valor de su resistencia eléctrica, lo cual influirá en el resultado de las mediciones.

Una forma de contrarrestar dicho efecto es instalando una galga adicional próxima a la primera como se muestra en la Figura 12, de manera tal que no se altere su resistencia por efecto de la deformación, pero sí como consecuencia de cambios en la temperatura de la probeta.

En el puente, la conexión de esta nueva galga (R_T) debe hacerse en una rama adyacente a la de la galga que mide la deformación (Figura 12).

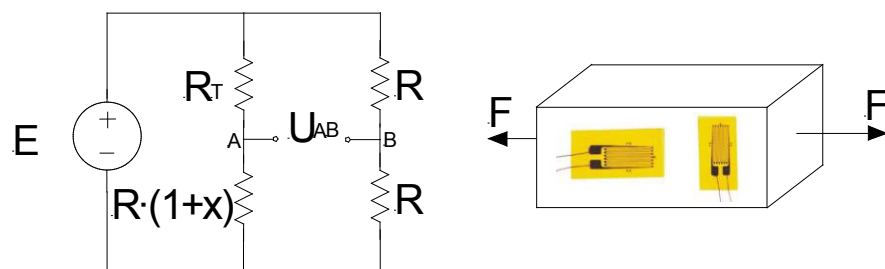


Figura 12 – Compensación de la temperatura agregando una galga adicional

Observando la fórmula (0) se puede entender cómo afecta la variación de la temperatura al equilibrio del puente: si ambas galgas manifiestan la misma variación de resistencia como consecuencia de la misma variación de temperatura, el equilibrio del puente no se ve afectado, por encontrarse dichas resistencias a ambos lados del signo igual.

Compensación de la longitud de los cables de conexión

Es evidente que un factor adicional que afecta a las mediciones es la resistencia de los conductores de los cables de conexión. Si dicha resistencia es sustancialmente menor, se podría despreciar; pero dado que las secciones de los conductores debe ser de valores razonables (es decir, no demasiado grandes) y que además las longitudes de los cables pueden ser variables y considerables, es probable que en ciertos casos la resistencia en cuestión sea comparable con la de la galga.

En tal caso, se podría incluir en el circuito un tercer conductor de las mismas características que los existentes, según se muestra en la Figura 13.

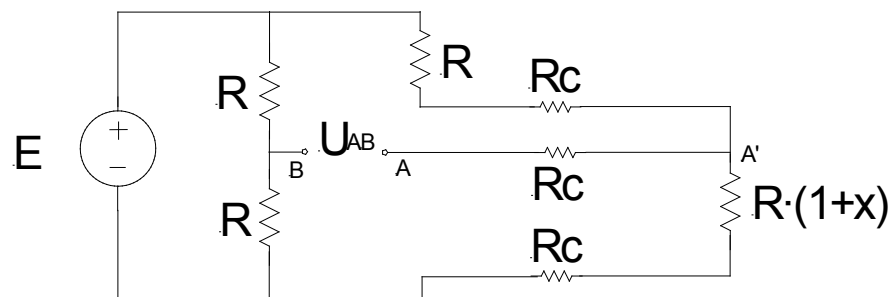


Figura 13 – Compensación de la longitud de los conductores de conexión

Como se observa, uno de los conductores está dispuesto en serie con la galga, otro en serie con el resistor de la rama adyacente y el tercero en serie con el instrumento detector.

Al igual que en el caso de la compensación por temperatura, las resistencias iguales de los conductores en las ramas adyacentes no alteran el equilibrio del puente, efectuando la compensación; mientras el tercer conductor en serie con el detector no altera la lectura de éste.

4.3 **Temperatura**

Termocuplas

También llamados *termopares*, estos elementos basan su funcionamiento en el principio físico de que si se unen dos alambres de metales diferentes y el punto de unión se calienta o se enfría, aparece una diferencia de tensión entre los dos extremos libres no sometidos a las variaciones temperatura. Este principio fue descubierto en 1.821 por T. J. Seebeck, en cuyo honor se denomina *efecto Seebeck*.

La magnitud de las diferencias de tensión que resultan del efecto Seebeck es bastante pequeña, del orden de los milivolt. Sin embargo, dado que dichas diferencias de tensión son directamente proporcionales a las respectivas diferencias de temperatura que existen entre la unión caliente y los extremos

fríos, es posible medir diferencias de temperatura con este elemento mediante detectores suficientemente sensibles.

La Tabla II muestra algunos termopares, sus rangos útiles de utilización, la variación de la tensión en dicho rango y sus iniciales normalizadas ANSI

Las termocuplas presentan un amplio rango de utilización: desde temperaturas criogénicas hasta mayores a las máximas que es posible encontrar en los escapes de los motores a reacción. Son económicas, resistentes y presentan buena estabilidad de largo plazo.

La selección del tipo de unión depende del tiempo de respuesta requerido, el rango de temperatura y las sollicitaciones del ambiente donde el sensor se vaya a utilizar (atmósferas corrosivas, abrasión mecánica, humedad, etc.).

Tabla II – Características de las termocuplas
(Guía para mediciones electrónicas, Wolf-Smith, Cap. 14)

Materiales de unión	Rango típico de temperatura de aplicación (°C)	Variación de la tensión en el rango (mV)	Designación ANSI
Platino-6% rodio/platino-30% rodio	38 a 1800	13.6	B
Tungsteno-5% renio/tungsteno-26% renio	0 a 2300	37.0	(C)
Cromel/constantan	0 a 982	75.0	E
Hierro/constantan	-184 a 760	50.0	J
Cromel/alumel	-184 a 1260	56.0	K
Platino/platino-13% rodio	0 a 1593	18.7	R
Platino/platino-10% rodio	0 a 1538	16.0	S
Cobre/constantan	-184 a 400	26.0	T

La Figura 14 muestra una gráfica comparativa de la señal de diferentes termocuplas en función de la temperatura.

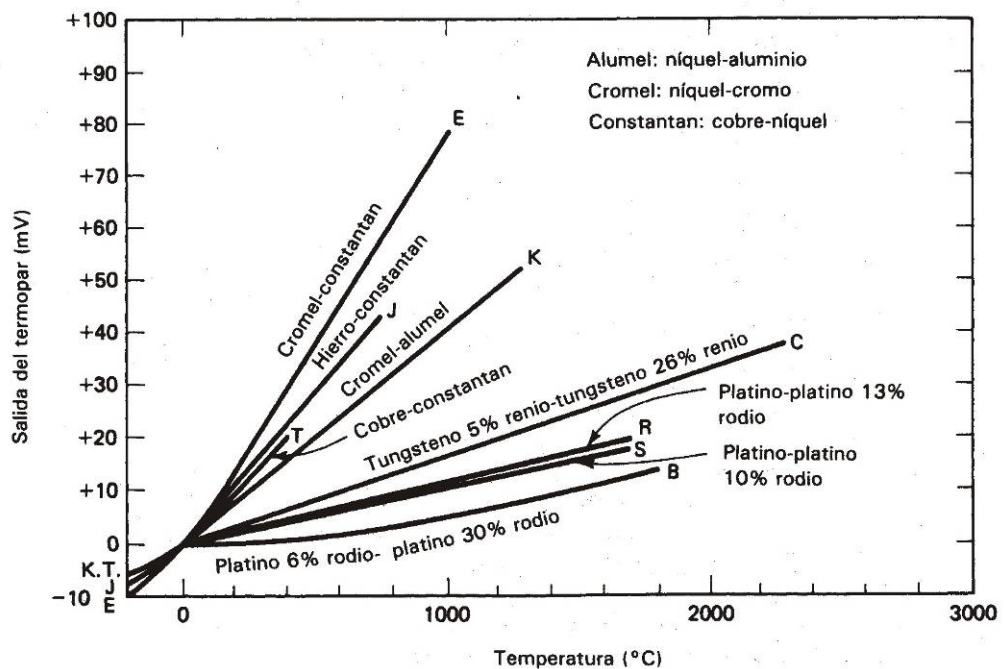


Figura 14 – Características de salida de diversos termopares en función de la temperatura
(Guía para mediciones electrónicas, Wolf-Smith, Cap. 14)

La Figura 15 presenta un circuito típico elemental para efectuar una medición con un termopar, empleando un baño de hielo para mantener la unión de referencia a 0°C. Esta unión de referencia es necesaria para los casos en que deban realizarse mediciones de temperatura "referidas", por ejemplo, al punto de congelación del agua.

En la actualidad, la tensión de la unión de referencia es proporcionada por circuitos electrónicos especiales.

Dado que la linealidad de las termocuplas no es muy buena, es común que las relaciones entre tensión de salida y temperatura de la unión se den en forma de tabla de valores.

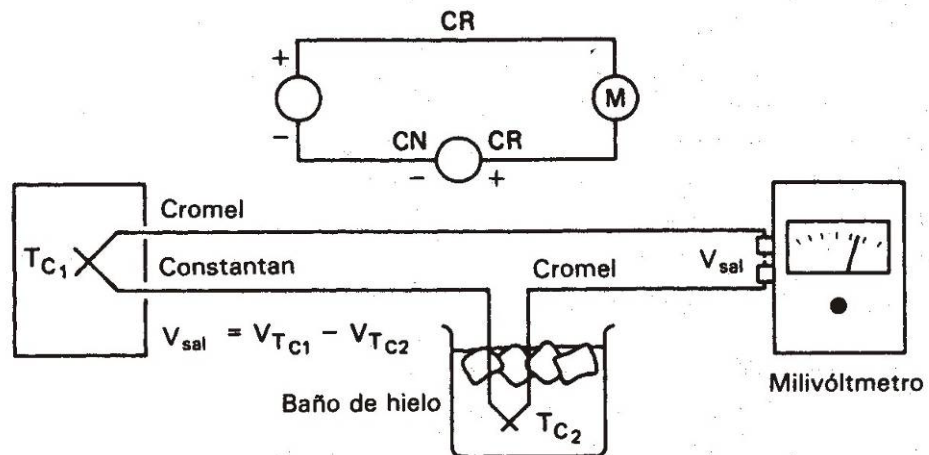


Figura 15 – Circuito simple de medición de temperatura que emplea un baño de hielo en la unión de referencia (Guía para mediciones electrónicas, Wolf-Smith, Cap. 14)

Las Fotos 1 y 2 muestran el detalle de un termopar tipo K (cromel-alumel) y otro termopar conectado a un instrumento digital para presentar lecturas de temperatura.

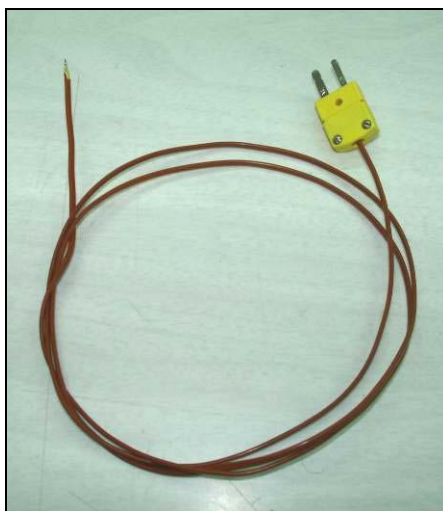


Foto 1 – Termocupla tipo K



Foto 2 – Termocupla conectada a un medidor

Termorresistencias

También denominados RTD (resistor dependiente de la temperatura), aprovechan las características de variación de la resistividad de diferentes materiales en función de la temperatura.

Básicamente, consisten de una bobina de alambre delgado de cobre, níquel o platino que se encuentra fija a un soporte adecuado; muchas veces encapsulado bajo una cubierta de vidrio fundido.

También se emplean termorresistores de película metálica, que se fabrican depositando una película delgada sobre un sustrato de cerámica.

Las RTD de platino son las preferidas cuando se requiere exactitud y linealidad. En este caso suelen utilizarse las denominadas Pt100, cuya denominación identifica al platino (Pt) y el número 100 indica que el valor de la resistencia del elemento a 0°C es 100 Ω .

Para detectar los cambios de resistencia del elemento sensor se utilizan los puentes de Wheatstone, de manera similar al caso de las galgas extensiométricas; recordando las limitaciones respecto de la linealidad en la medición.

Otra forma posible es alimentar el termosensor mediante una fuente de corriente constante y efectuar la medición de la tensión en los bornes de la termorresistencia mediante un voltímetro digital, conformando un sistema de medición de resistencia de *cuatro terminales*. Dado que la impedancia de entrada del voltímetro es muy elevada (por éste se deriva una corriente muy pequeña), y como se supone la corriente de la fuente constante e independiente de las variaciones de la resistencia del termoelemento; resulta que las tensiones medidas por el voltímetro son directamente proporcionales a las variaciones de resistencia del termosensor, éstas proporcionales a las variaciones de temperatura y las lecturas del voltímetro resultan también independientes de la longitud y resistencia de los conductores de conexión R_c . El circuito se muestra en la Figura 16.

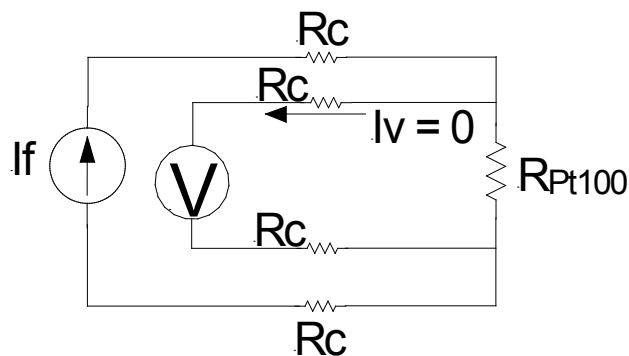


Figura 16 – Circuito de medición de cuatro terminales

Una variante más sofisticada y que a la vez economiza uno de los cuatro conductores, consiste en utilizar el circuito de la Figura 17.

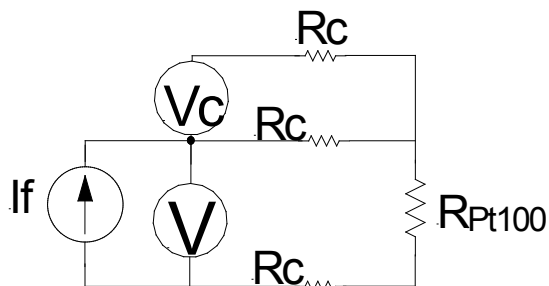


Figura 17 – Circuito de medición de tres terminales

En este caso, el valor de la tensión medida, que es proporcional a la resistencia y por lo tanto, a la temperatura; resulta de realizar el cálculo siguiente:

$$U_{R_{Pt100}} = IR_{Pt100} = V - 2 \cdot V_C$$

Esto es posible en sistemas de medición automáticos, en los cuales se pueden efectuar operaciones matemáticas con las señales involucradas; presentándose en un display el resultado de la medición de temperatura directamente.

En los casos en que se utilizan fuentes de corriente para alimentar RTDs, es necesario que la corriente entregada sea sumamente estable y resulta usual que los valores de la misma sea de menos de 5 mA, dado que valores mayores puede provocar variaciones en la resistencia del termosensor del orden de 1°C con corrientes de tan sólo 5 mA.

La Tabla compara los rangos y los coeficientes de temperatura de la resistividad de los materiales más empleados en la fabricación de RTDs.

Tabla III – Propiedades típicas de los RTD más usados
(Guía para mediciones electrónicas, Wolf-Smith, Cap. 14)

Material	Rango de temperatura (°C)	TC (%/°C)@25°C
Platino	-200 a +850	0.39
Níquel	-80 a +320	0.67
Cobre	-200 a +260	0.38
Níquel-hierro	-200 a +260	0.46

Las Fotos 3 a 5 muestran algunos sensores de temperatura tipo Pt100.

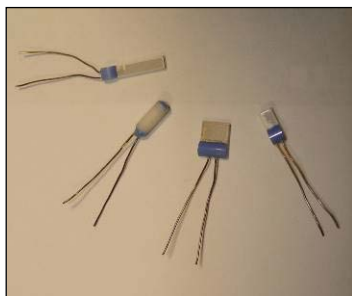


Foto 3 – Diversos formatos de Pt100



Foto 4 – Pt100 montada en un cable de tres conductores



Foto 5 – Detalle de montaje de la Pt100 en el cable

Termistores

Los termistores son dispositivos que también miden la temperatura mediante un cambio de resistencia.

A diferencia de los metales utilizados en la fabricación de los dispositivos RTD, la resistencia de los materiales que conforman los termistores decrece al aumentar la temperatura desde aproximadamente -100°C a +300°C.

La variación de la resistencia versus la temperatura en estos elementos no es lineal, pero en algunos materiales el cambio de la resistencia puede ser de hasta 6% por cada 1°C (aunque materiales con cambios del orden del 1% son más usuales).

Dado que las variaciones de resistencia por grado de temperatura de los termistores es tan importante, estos elementos son preferidos cuando es necesario presentar buena exactitud y resolución para medir en el rango indicado más arriba.

Empleando un amperímetro para medir corriente a través de un termistor, se pueden detectar cambios de temperatura del orden de $\pm 0,1\text{K}$. Si en su lugar se utilizara un puente de Wheatstone para medir las variaciones de resistencia, el sistema de medición sería capaz de detectar cambios tan pequeños como $\pm 0,005\text{K}$.

Para la fabricación de termistores se utilizan cerámicas semiconductoras, que consisten en una mezcla de óxidos metálicos de manganeso, níquel, cobalto, cobre y hierro.

La Figura 18 muestra la característica de resistencia versus temperatura de dos materiales típicos de termistor.

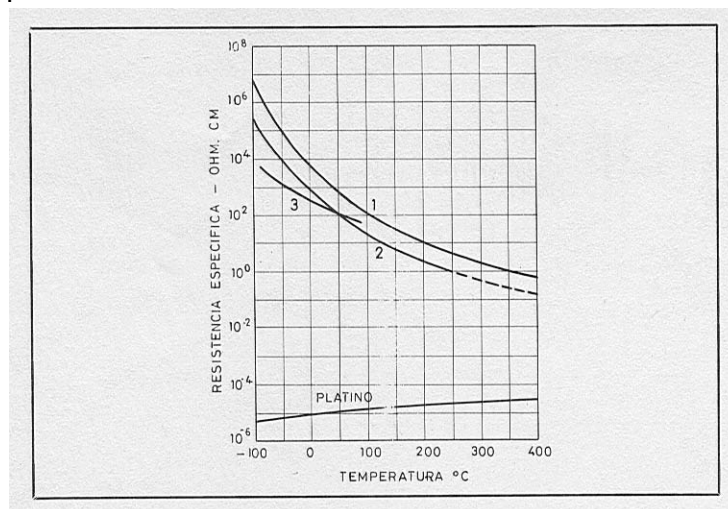


Figura 18 – Curvas características de termistores. Comparación de tres materiales distintos con la característica de la RTD de platino

(Transductores y medidores electrónicos, autores varios, Ed. Marcombo).

Una aproximación utilizada frecuentemente de la característica del termistor en forma generalizada es la siguiente:

$$R_t = A \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T_t} \right)}$$

Particularmente, si se tienen los datos de referencia de un dado termistor, la anterior se convierte en:

$$R = R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

en donde R: resistencia @ T en [K]

R_0 : resistencia @ T_0 en [K]

β : constante del ajuste de curva (entre 2000 y 4000 medido en [K])

Aún cuando la mayoría de los termistores del mercado poseen coeficiente de temperatura negativo (NTC), también se consiguen con coeficiente de temperatura positivo (PTC).

Generalmente, estos elementos se utilizan en sistemas digitales en los cuales es posible, mediante software adecuado, linealizar la característica resistencia-temperatura.

4.4 Presión

La medición de presiones es una actividad que tiene numerosas aplicaciones en la industria. Incluso las mediciones de otros parámetros muy diferentes (por ejemplo, caudales), se basan en la medición de presiones para determinar su valor. De aquí la importancia de presentar los transductores de este tipo más difundidos y su aplicación.

Piezoeléctricos

Un campo eléctrico aplicado en superficies opuestas de ciertos cristales provoca que éstos reaccionen deformándose mecánicamente. El fenómeno es reversible: las superficies de estos cristales se cargan eléctricamente bajo la acción de esfuerzos mecánicos. En esto consiste el denominado *efecto piezoeléctrico directo*.

El principio de funcionamiento del que se saca provecho en los materiales piezoeléctricos se basa en lo mencionado, y de los numerosos materiales piezoeléctricos existentes, el cuarzo es el más utilizado debido a su estabilidad.

Según el plano de corte del cristal (tallado), se obtienen elementos que son sólo sensibles a las presiones o bien a las fuerzas de cizalladura en una dada dirección.

El montaje de un cristal piezoeléctrico formando un dispositivo apto para medir presiones resulta en un capacitor de placas planas y paralelas, en el cual el dieléctrico es el mismo elemento piezoeléctrico, tallado y montado adecuadamente, cuya capacitancia vale:

$$C_d = \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$$

donde ε : constante dieléctrica del material del cristal

A: área de las placas

d: separación de las placas

A veces, y dependiendo del tipo de estudio que pretenda realizarse en un dispositivo eléctrico que incluya un cristal piezoeléctrico, debe tenerse en cuenta el modelo equivalente del cristal que incluya las características mecánicas del mismo, según se muestra en la Figura 19.

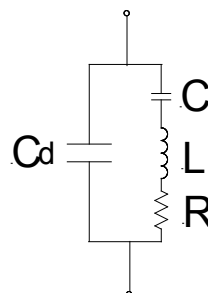


Figura 19 – Modelo equivalente de un cristal piezoeléctrico

donde C_d :capacitancia del dieléctrico

C : capacitancia que representa el equivalente eléctrico de la elasticidad del material

L : inductancia que representa el equivalente eléctrico de la masa del material

R : resistencia que representa las pérdidas mecánicas (amortiguamiento) del material

En nuestro caso, podemos utilizar un modelo simple considerando solamente la capacitancia del dieléctrico. Si además tenemos en cuenta que al aplicar una fuerza aparecen cargas según el eje que corresponda, un modelo simple que incluye el efecto de la aplicación de una fuerza tiene la forma de la Figura 20.

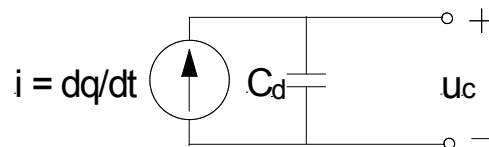


Figura 20 – Modelo simple de un cristal piezoeléctrico que incluye el efecto de una fuerza aplicada

La fuente de corriente se expresa en función de la variación de la carga respecto del tiempo, debido a que dicha corriente no tiene forma definida matemáticamente en la mayoría de los casos.

Esquema de un sensor de presión con cristal piezoeléctrico típico:

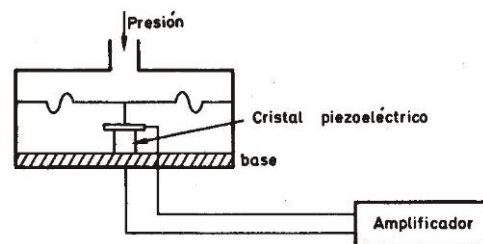


Figura 21 – Sensor de presión con cristal piezoeléctrico
(Transductores y medidores electrónicos, autores varios, Ed. Marcombo).

Es importante mencionar que los transductores piezoeléctricos precisan de un *amplificador de carga* que transforme las cargas electrostáticas generadas por el cristal en tensiones proporcionales a dichas cargas.

En este sentido, cabe recordar que el amplificador operacional utilizado debe presentar una elevada impedancia de entrada a fin de minimizar las fugas de carga hacia el mismo, de forma que todas las cargas generadas migren hacia el capacitor de realimentación.

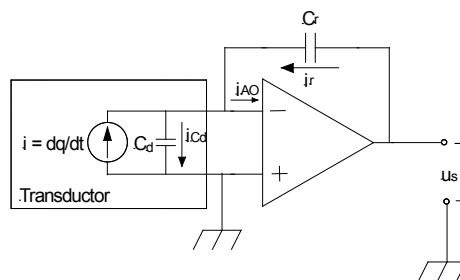


Figura 22 – Amplificador de carga asociado a un sensor de presión con cristal piezoeléctrico

Deben recordarse los detalles de funcionamiento de este circuito, con lo cual resulta que su tensión de salida vale:

$$u_s = - \frac{K_p \cdot x_i}{C_r}$$

con $q = -K_p \cdot x_i$

donde x_i : deformación provocada por la fuerza aplicada

K_p : constante que relaciona la carga generada q en el cristal y la deformación provocada x_i

C : capacitancia de realimentación

Resistivos

Básicamente están conformados por una galga extensométrica montada sobre un diafragma, y que forma parte de un puente de Wheatstone. Cualquier variación de presión que mueva el diafragma del transductor cambia la resistencia de la galga y desequilibra el puente.

Una innovación de la galga la constituyen los transductores de presión de silicio difundido. Consisten en un elemento de silicio situado dentro de una cámara conteniendo silicona que está en contacto con el proceso a través de un diafragma flexible. El sensor está fabricado a partir de un monocristal de silicio en cuyo seno se difunde boro, u otro contaminante adecuado, para formar un puente de Wheatstone, constituyendo así una galga autocontenida. El espesor del sensor determina el rango de medida del instrumento.

La construcción de este tipo de elementos responde prácticamente al esquema de la Figura 23.

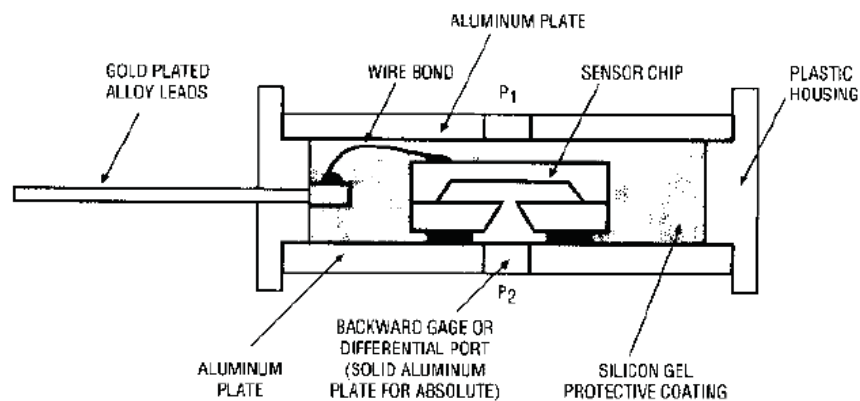


Figura 23 – Esquema constructivo de un sensor de presión resistivo tipo puente de Wheatstone (extraído de las hojas de datos de sensores de presión marca SenSym)

El circuito de aplicación es el bien conocido puente de Wheatstone asociado a un amplificador operacional en configuración diferencial, que se reproduce en la Figura 24.

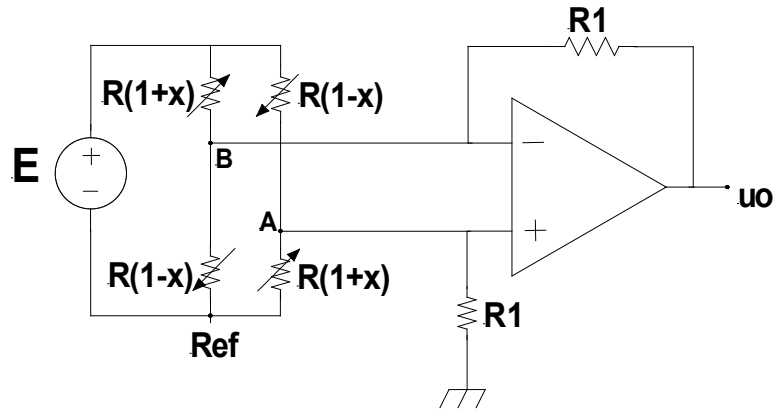


Figura 24 – Puentes de Wheatstone asociados a un amplificador diferencial

Un esquema más elemental de este tipo de transductor se muestra en la Figura 25.

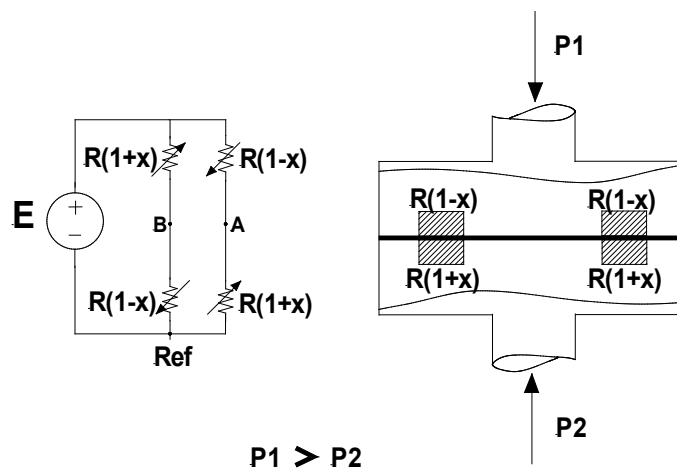


Figura 25 – Esquema didáctico de un sensor tipo puente

Este último esquema resulta gráfico a los fines conceptuales, pues cada resistor "real" del sensor se puede asociar a un resistor del puente de Wheatstone. Se puede observar que si el diafragma se deforma por efecto de $P_1 > P_2$; R_2 y R_4 disminuyen, mientras R_1 y R_3 aumentan. Si dicha variación es la misma y de muy pequeño valor en todos los resistores, entonces se justifica la representación del circuito como indica la figura anterior.

Como se ha visto del estudio del puente de Wheatstone asociado a un amplificador operacional en configuración diferencial, se puede observar que esta disposición presenta la máxima sensibilidad; y si además, las resistencias nominales del puente en reposo son iguales, la tensión de salida del amplificador operacional resulta:

$$u_0 = 2 \frac{R_1}{R} E \cdot x$$

donde R : resistencia nominal en reposo de cada rama del puente.

A las ventajas mencionadas se puede agregar que, debido a la propia construcción del dispositivo, estos elementos presentan compensación de temperatura y linealidad.

Existe una enorme variedad de formas y modelos de sensores de presión, según la aplicación y presiones a medir Las Fotos 6 y 7 muestran algunos de ellos.

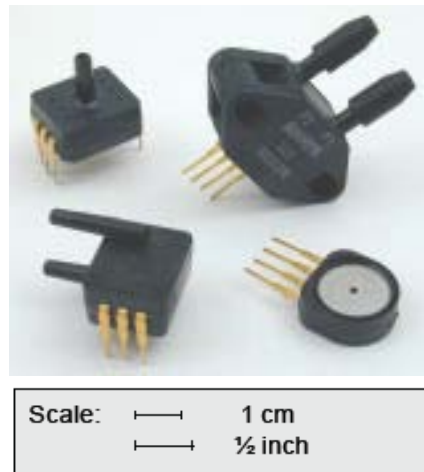


Foto 6 – Algunos sensores de presión con la escala para comparar tamaños (foto extraída de hojas de datos sensores marca SenSym)



Foto 7 – Otros modelos de sensores de presión (foto extraída de hojas de datos sensores marca Honeywell)

4.5 Caudal

En muchas aplicaciones industriales es deseable medir la tasa de flujo (caudal) de un fluido, sea líquido o gas. Este es un tema complejo, por lo que sólo se resumirán algunos conceptos, presentándose algunas de las técnicas más comunes de medición.

Placa orificio

Consiste en una placa perforada (orificio calibrado) instalada en la tubería por la cual circula el fluido a medir, con dos tomas que captan la presión diferencial. De este modo, medir la presión diferencial equivale a medir el caudal.

La Figura 26 muestra las presiones en la tubería en las proximidades de la placa.

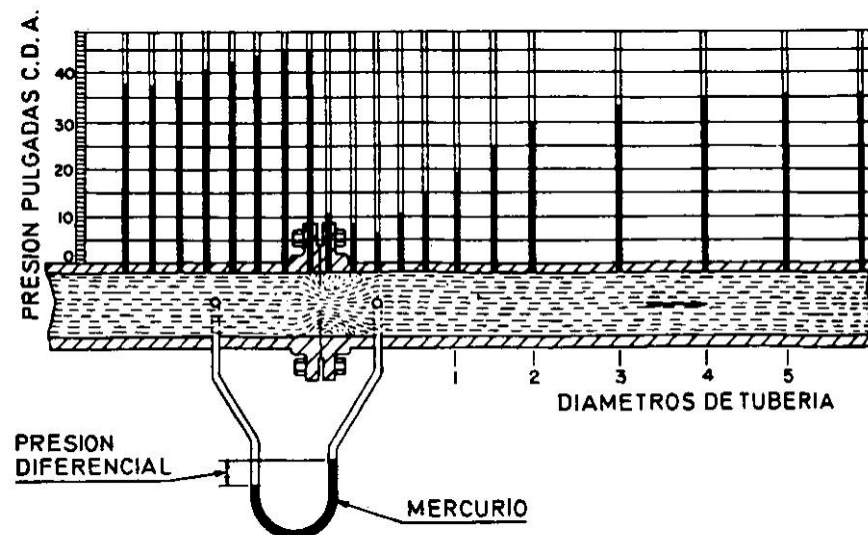


Figura 26 – Presión diferencial creada por la placa orificio (Transductores y medidores electrónicos, autores varios, Ed. Marcombo).

Los fundamentos y las ecuaciones que dominan el comportamiento de este tipo de sistemas provienen del teorema de Bernoulli, lo cual no es objeto del

presente análisis. En base a lo anterior, se puede determinar una fórmula teórica aproximada la cual, considerando factores de corrección que tienen en cuenta el reparto desigual de velocidades en la sección del caño, la contracción de la vena de fluido, rugosidades de la tubería, el estado el fluido, etc; da como resultado:

$$Q = k \sqrt{\frac{h}{\gamma}}$$

en la cual

- Q: caudal en las condiciones de medida
- k: coeficiente de proporcionalidad
- h: presión diferencial
- γ : peso específico del fluido en las condiciones de medida

La precisión obtenida con este tipo de sistemas es del orden de **$\pm 1\%$ a $\pm 2\%$** .

Generalmente, el tubo con mercurio de la Figura 26 es reemplazado por otros sistemas de medición de presión diferencial, siendo actualmente muy utilizados transductores de los tipos vistos en el apartado 4.4.

Tubo Venturi

El principio de medición es similar al de la placa orificio. El caudal se mide a partir de la diferencia de presión entre diferentes secciones del dispositivo. La Figura 27 muestra un esquema típico.

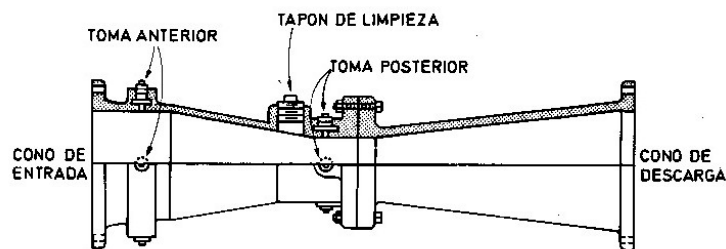


Figura 27 – Tubo Venturi

(Transductores y medidores electrónicos, autores varios, Ed. Marcombo).

Permite medir caudales superiores a los de la placa orificio con menores pérdidas de carga. A su gran precisión, del orden de **$\pm 0,75\%$** , se suma la ventaja de permitir el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos; aunque si estos son abrasivos, pueden influir en la geometría del elemento, afectando la exactitud de la medida.

Como desventaja puede mencionarse su elevado costo, comparado con la placa orificio.

Al igual que en el caso de la placa orificio, se pueden instalar sistemas de medición de presión diferencial entre las tomas anterior y posterior, como los transductores vistos en el apartado 4.4.

Turbinas

Consisten en un rotor que gira al paso de un fluido, con velocidad directamente proporcional al caudal. Dicha velocidad de giro del rotor es convertida por un dispositivo adecuado en una señal pulsante. Existen dos variantes de convertidor: *de reluctancia e inductivo*.

En el convertidor de reluctancia, las paletas del rotor están construidas con un material ferromagnético. El paso de cada paleta a través del campo magnético creado por un imán permanente montado como núcleo de una bobina captora exterior, determina el cambio de la reluctancia del circuito, generando una señal en los bornes de la mencionada bobina.

En el de tipo inductivo, el rotor lleva incorporado un imán permanente en una paleta (o uno en cada una de las paletas) y cada paso del imán genera una tensión inducida en bornes de la bobina captora exterior. A veces, en lugar de una bobina, suele utilizarse un sensor de efecto Hall, a la salida del cual se obtiene una señal de tensión.

La Figura 28 muestra una turbina axial, con cortes que permiten observar el rotor, los deflectores y la bobina captora.

Así, a partir de la señal de salida puede obtenerse un tren de pulsos, con la misma frecuencia que la de la señal original. Cualquiera sea el caso, midiendo la frecuencia de la señal de salida o bien contando los pulsos obtenidos, es posible determinar la velocidad de giro del rotor; y por lo tanto, el caudal del fluido.

La Figura 29 muestra un diagrama de bloques de un sistema de medición típico.

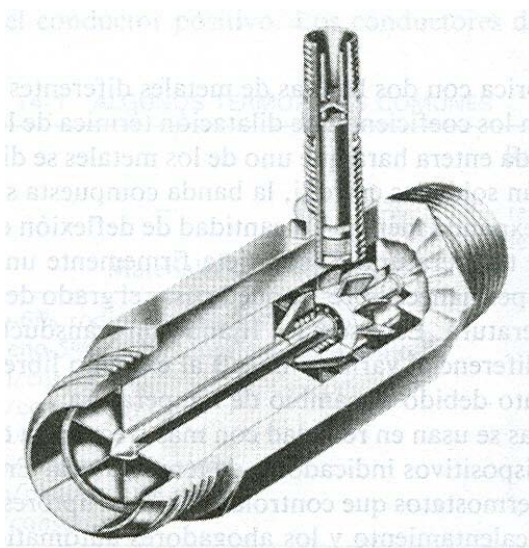


Figura 28 – Medidor de caudal del tipo turbina axial
(Guía para mediciones electrónicas, Wolf-Smith, Cap. 14)

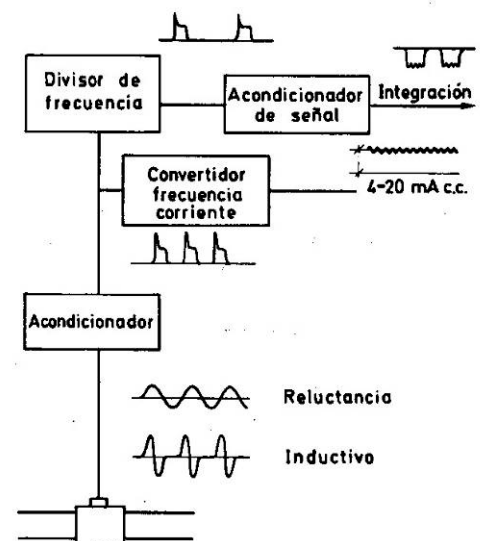


Figura 29 – Diagrama de bloques para medición de caudal mediante turbina
(Transductores y medidores electrónicos, autores varios, Ed. Marcombo).

La información obtenida del transductor suele ser presentada in situ mediante un totalizador indicador (Figura 30), o bien mediante el uso de convertidores tensión-corriente y lazos de 4-20 mA como entrada de indicadores remotos o de PLCs (controladores lógicos programables).



Figura 30 – Dos modelos de indicador totalizador de caudal (extraído del catálogo de la firma MAC S.R.L.)

La utilización de estos dispositivos se limita a fluidos limpios, es decir, no admiten la presencia de sólidos en suspensión.

La precisión es del orden de $\pm 0,3\%$ si el flujo es laminar; para cumplir esta condición, el equipo debe instalarse sobre una tubería recta de longitudes mínimas igual a 15 diámetros aguas arriba y 6 diámetros aguas abajo.

Debido a la elevada precisión de medida, estos dispositivos son muy utilizados en la industria petroquímica.

Medidores ovales

Forman parte de la familia de los denominados *medidores de desplazamiento positivo*.

Están básicamente constituidos por dos ruedas dentadas de forma ovalada que engranan entre sí y tienen un movimiento de giro debido a la presión diferencial creada por el líquido. La Figura 31 muestra una secuencia de funcionamiento de un dispositivo como el descrito.

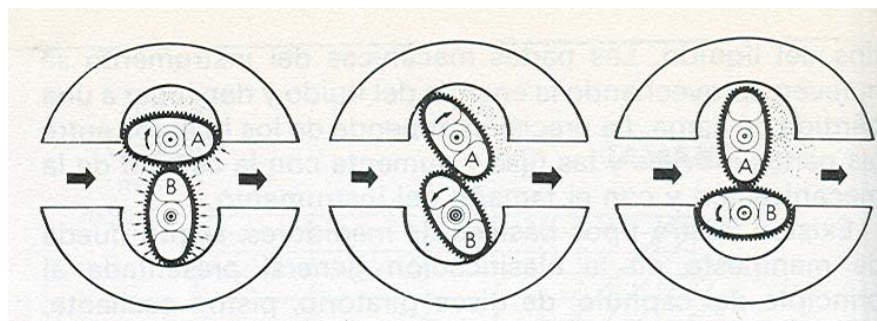


Figura 31 – Secuencia de funcionamiento de un caudalímetro de desplazamiento positivo (Transductores y medidores electrónicos, autores varios, Ed. Marcombo).

La acción del líquido se ejerce alternativamente sobre cada una de las ruedas dando lugar a un giro suave de un par casi constante. Debido a las características de su construcción, la medición obtenida es prácticamente independiente de las variaciones en la densidad y en la viscosidad del líquido.

Pueden tener acoplados diversos tipos de transductores para detectar el movimiento de las ruedas. Entre los más comunes se encuentran los *de impulsos por microinterruptor* y los *de impulsos por sensor magnético*.

En el primer caso, el eje del medidor acciona un interruptor mediante una leva. El interruptor está conectado a un contador electromecánico de baja velocidad.

En el segundo, se utiliza un rotor que tiene insertados unos pequeños imanes en combinación con una bobina captora, formando un conjunto similar al descrito en los medidores a turbina.

La precisión es del orden de $\pm 0,5\%$, siendo muy utilizados en la industria del petróleo para la medición de flujo de aceites u otros subproductos viscosos.

4.6 Caudal másico

Este tipo de medición es muy utilizada en gases licuados y otros fluidos que presentan importantes variaciones de densidad en función de la temperatura y presión a la que están sometidos.

La determinación del caudal másico puede efectuarse a partir de una medida volumétrica, compensándola para las variaciones de la densidad del fluido; o bien obtener la medición directamente aprovechando características medibles de la masa del fluido en cuestión. En este último caso se realiza directamente la medición el caudal másico, por lo que no se ven afectados por cambios en la temperatura, viscosidad, presión o densidad del fluido que circula por la cañería.

Medición por compensación

Esta opción proviene de la metodología utilizada históricamente en la industria petroquímica, cuando se efectuaban en forma independiente las mediciones de caudal volumétrico, temperatura y presión. Estas magnitudes eran registradas gráficamente en cartillas circulares de papel, para un mismo fluido. Los registros, que eran obtenidos periódicamente cada 24 horas, se procesaban manualmente a partir de dichos gráficos, y con los datos obtenidos se compensaban termodinámicamente los valores másicos a las condiciones de referencia preestablecidas (por ejemplo, 0°C y 1013 hPa) para las variaciones de temperatura y presión; resultando un proceso largo y tedioso.

Actualmente, y merced a los sistemas electrónicos e informáticos, es posible automatizar el proceso, presentado los resultados en tiempo real y disponibles para cualquier procesamiento posterior.

Un diagrama esquemático de un sistema como el descrito se muestra en la Figura 32.

En dicha figura, en lugar de una placa orificio, se podría haber utilizado otro tipo de medidor de caudal (tubo venturi o turbina).

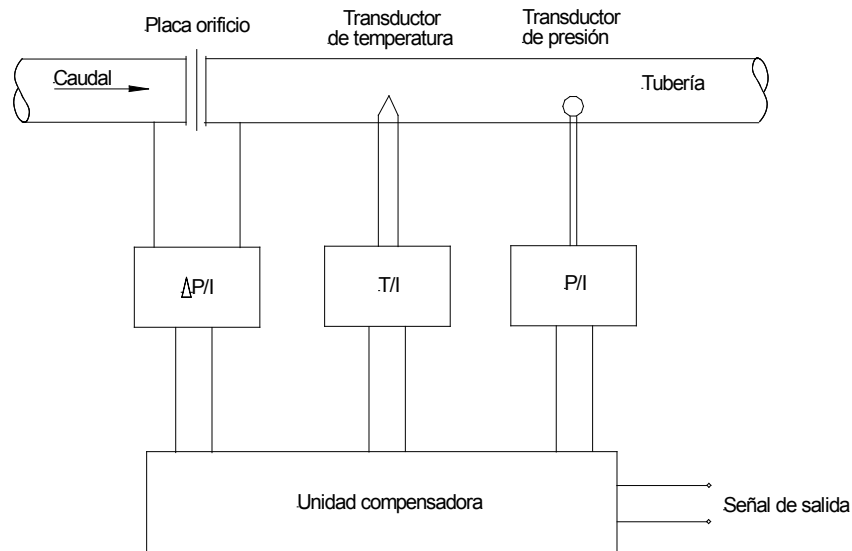


Figura 32 – Diagrama esquemático de un sistema medidor de caudal másico por compensación

En el presente esquema, y dado que se supone que en el ambiente industrial en el cual está instalado el equipamiento hay considerable ruido electromagnético, las señales de cada transductor se convierten en corrientes proporcionales a las respectivas señales. Estas corrientes se envían a la unidad compensadora, que en forma adecuada da origen a una señal proporcional a la masa de fluido circulante por la cañería.

Caudalímetro térmico

Los medidores térmicos de caudal se basan comúnmente en la elevación de la temperatura del fluido al pasar a través de un cuerpo caliente o bien en la pérdida de calor experimentada por un cuerpo caliente inmerso en el fluido. Sea cual sea la técnica que utilicen los caudalímetros térmicos, su funcionamiento se basa en la insensibilidad de los fluidos a la variación de su calor específico en función de la presión y de la temperatura, es decir, el calor específico de los fluidos se puede considerar prácticamente independiente de la presión y de la temperatura.

En base a lo anterior, la relación que debe aplicarse a este proceso corresponde al primer principio de la termodinámica:

$$Q = m \cdot C_e \Delta t$$

en donde

- Q: calor transferido
- m: masa del fluido
- C_e : calor específico del fluido
- Δt : variación de la temperatura del fluido

Si se conoce el fluido, se sabe su calor específico. El salto térmico se puede medir mediante sensores y el calor cedido es el aportado externamente para poder realizar la medición. Solo queda el caudal másico como incógnita y por tanto, se puede calcular.

Los medidores del primer tipo mencionado, también llamados de *Thomas*, están constituidos por una fuente de calor de precisión, que proporciona calor constante a una sección de la cañería donde se desea medir. La Figura 33 muestra un medidor de este tipo.

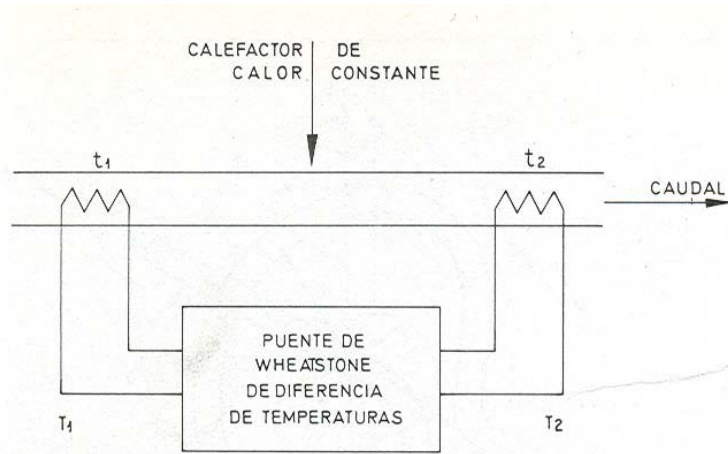


Figura 33 – Esquema de un medidor térmico del tipo de Thomas (Transductores y medidores electrónicos, autores varios, Ed. Marcombo).

En dos puntos equidistantes de la fuente de calor se sitúan transductores resistivos de temperatura. Cuando el fluido está en reposo, la temperatura es idéntica en ambos sensores. Cuando el fluido circula, transporta una cierta cantidad de calor hacia el segundo elemento R_{t2} , originándose una diferencia de temperatura entre ambos que va aumentando progresivamente a medida que aumenta el caudal. Esta diferencia es proporcional a la masa que circula en la tubería de acuerdo con la relación termodinámica ya vista, de la siguiente manera:

$$Q = m \cdot C_e (t_2 - t_1)$$

en donde t_1 : temperatura del sensor R_{t1}
 t_2 : temperatura del sensor R_{t2}

El sistema está conectado a un puente de Wheatstone que mide la diferencia de temperaturas y mediante la relación anterior se puede determinar el caudal.

En el segundo caso, un sistema muy usado lo constituye el *anemómetro de hilo caliente* (Figura 34).

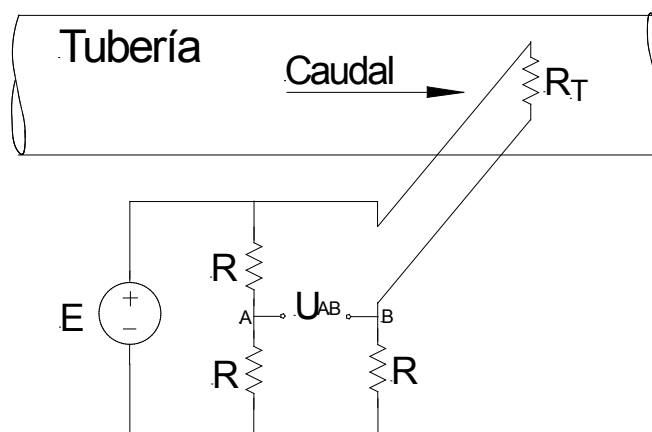


Figura 34 – Esquema de un medidor térmico del tipo de hilo caliente

Consiste de un hilo caliente que se enfría por efecto de la circulación del fluido. La resistencia eléctrica del hilo cambia con la temperatura, la cual dependerá del caudal del fluido: a mayor caudal, más se enfriará el hilo y mayor será el cambio en la resistencia. Estos cambios de resistencia son detectados por un puente de

Wheatstone, cuyo desequilibrio resulta proporcional al caudal, independientemente de la temperatura y presión el fluido.

Caudalímetro de efecto Coriolis

Efecto Coriolis

La Figura 35 muestra mediante un ejemplo didáctico cómo se origina la fuerza de Coriolis: Un cuerpo que se desplaza radialmente sobre una plataforma giratoria experimenta una fuerza que resulta tangente a la dirección del movimiento de la plataforma en el punto donde se encuentra el cuerpo; si se conocen la velocidad angular de la plataforma, la fuerza actuante y la velocidad del cuerpo, es posible determinar la masa del mismo.

A partir de la Figura 35, la expresión general de la fuerza de Coriolis viene dada por:

$$\vec{F}_c = 2 \cdot m \cdot (\vec{v} \times \vec{\omega})$$

donde, como se indica, la fuerza, velocidad de la masa y velocidad angular se representan como vectores, y la cruz denota "producto vectorial".

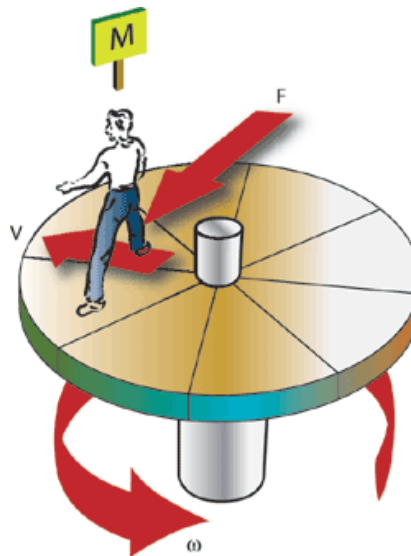


Figura 35 – Origen de la fuerza de Coriolis y las magnitudes relacionadas

Medidor

Basado en lo anterior, un caudalímetro de efecto Coriolis consiste de un tubo (a veces dos), uno de cuyos ejes se ve sometido a una vibración oscilante de frecuencia angular ω constante. Dicha vibración, que generalmente es la frecuencia de resonancia del tubo, se consigue mediante un actuador electromecánico. En estas condiciones, el movimiento en cualquier punto del tubo sigue una onda sinusoidal y, cuando existe flujo a través del tubo, éste se deforma proporcionalmente al caudal másico, siendo tal deformación captada por un elemento sensible.

Las fuerzas que se originan debido al movimiento de fluido en la tubería del instrumento dan lugar al denominado efecto Coriolis que, según la forma constructiva de la misma se deformará siguiendo patrones que serán captados por el elemento sensible.

Las Figuras 36 a 39 muestran algunas de las diversas formas constructivas que puede adoptar un caudalímetro de efecto Coriolis.

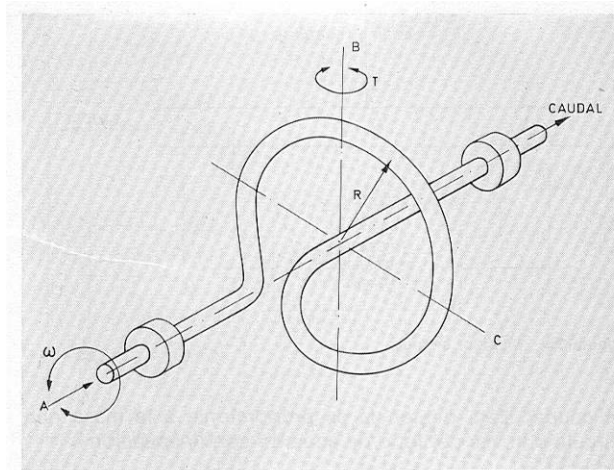


Figura 36 – El eje A se ve sometido a una oscilación de pulsación constante, mientras que el movimiento del fluido por la tubería da lugar a un momento de precesión alrededor del eje B que es captado por el detector

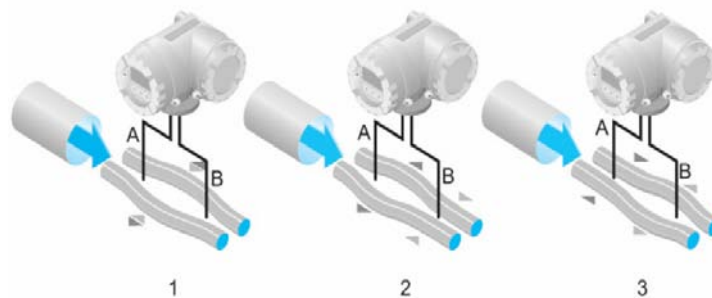


Figura 37 – Dos tubos paralelos que contienen fluido oscilan en fases contrarias; con lo que, en función de la masa circulante, las fuerzas de coriolis presentes en los tubos generan una alteración en la fase con la cuales estos oscilan

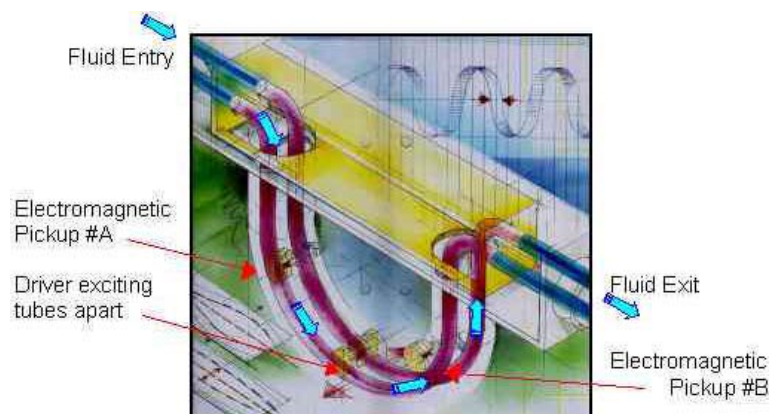


Figura 38 – Variante constructiva similar a la de la Figura 37

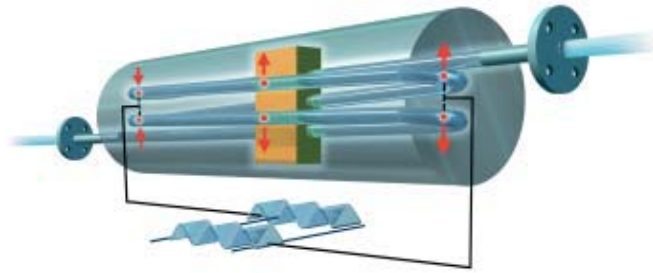


Figura 39 – Variante constructiva similar a las de las Figuras 37 y 38, pero con un sólo tubo

El principio de medición opera independientemente de la temperatura, presión, viscosidad, conductividad o perfil del flujo; lo cual permite que este método sea bastante robusto. La precisión en la medición resulta muy elevada (generalmente de $\pm 0,1\%$). Además, no requiere tramos de entrada/salida como en el caso de las turbinas.

5. Bibliografía

- "Transducer interfacing handbook. A guide to analog signal conditioning". Editado por D. H. Sheingold. Publicado por Analog Devices Inc.
- "Transductores y medidores electrónicos". Autores varios. Editorial Marcombo.
- "Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio". Stanley Wolf, Richard Smith. Editorial Prentice Hall.
- "Principios y aplicaciones de ingeniería eléctrica". Giorgio Rizzoni. Editorial McGraw Hill.