

E.E.T.P. N° 460



"G. Lehmann"
RAFAELA

SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACION
INDUSTRIAL.

6° "E".

SENSORES DE TEMPERATURA.

La temperatura es una variable crítica utilizada para controlar la calidad de los productos en muchos procesos industriales. Examinaremos las características generales de algunos tipos de sensores electrónicos empleados comúnmente en los ambientes industriales para medir y controlar temperatura de forma precisa, incluyendo termostatos, termoresistencias, termocuplas, pirómetros de radiación y sensores de silicio.

GENERALIDADES.

Muchos procesos industriales requieren el control de la temperatura para producir resultados de calidad o prevenir sobrecalentamientos, rupturas, explosiones y otro tipo de problemas. Las temperaturas elevadas, por ejemplo, son necesarias para ablandar metales y fundir plásticos antes de ser moldeados en formas específicas. Asimismo, las bajas temperaturas son necesarias para conservar los productos perecederos en una industria procesadora de alimentos. De otro lado, una condición de sobre temperatura en un sistema cerrado, digamos una caldera, puede provocar una excesiva presión. También se requieren condiciones de temperaturas precisas para combinar los ingredientes de productos químicos.

Actualmente se dispone de una gran variedad de dispositivos e instrumentos para la medición precisa de la temperatura, los cuales proporcionan una indicación visual o una señal de realimentación mecánica o eléctrica que puede ser utilizada en un sistema de lazo cerrado para permitir el control automático de procesos térmicos. Nos referiremos a los principales tipos de sensores electrónicos, que pueden ser clasificados, dependiendo de su principio de funcionamiento, así:

¥ Sensores bimetalicos.

Popularmente conocido como termostatos, son básicamente interruptores que producen una salida del tipo "todo o nada" y conmutan de un estado al otro cuando se alcanza un determinado valor de temperatura.

¥ Sensores termoresistivos.

También denominados termoresistencias, son dispositivos cuya resistencia cambia a medida que lo hace la temperatura. Los más conocidos son los detectores de temperatura resistivos o RTD (resistance temperature detectors), basados en materiales metálicos como el platino y el níquel, y los termistores, basados en óxidos metálicos semiconductores.

¥ Sensores termoeléctricos.

Popularmente conocidos como termocuplas o termopares, son dispositivos que producen un voltaje proporcional a la diferencia de temperatura entre el punto de unión de dos alambres metálicos disímiles (unión caliente) y cualquiera extremos libres (unión fría). Este fenómeno se denomina efecto Seebeck.

¥ Sensores piroeléctricos.

También denominados termómetros de radiación, son dispositivos que miden indirectamente la temperatura a partir de la medición de la radiación térmica infrarroja que emiten los cuerpos calientes.

Los termostatos, termoresistencias y sensores de silicio son dispositivos generalmente invasivos, es decir deben estar en contacto físico con la sustancia u objeto cuya temperatura se desea medir. Los pirómetros de radiación, por su parte, son dispositivo invariablemente no invasivos, es decir realizan la medición a distancia.

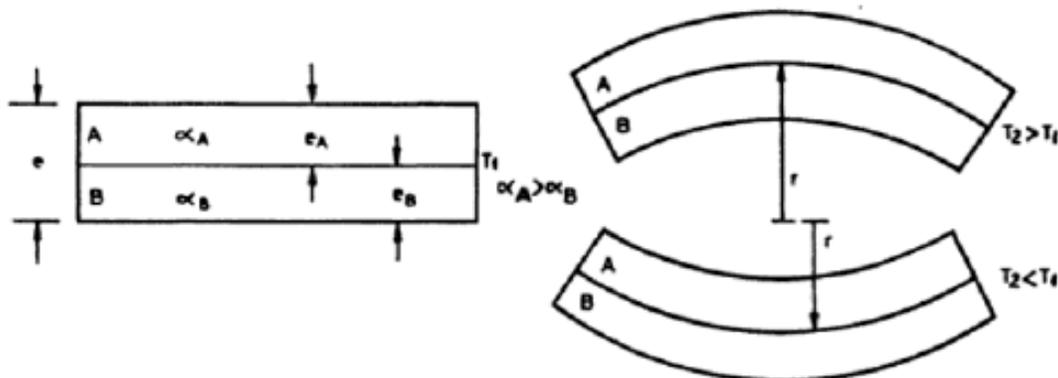
Estos últimos se utilizan para la medición de temperaturas muy altas o en situaciones donde los sensores no puedes ser empleados por ejemplo cuando los cuerpos son pequeños, se mueven, son irregulares.

TERMOSTATOS.

Los termostatos son sensores del tipo todo o nada que conmutan automáticamente de un estado al otro cuando la temperatura a su alrededor alcanza un valor determinado. Constan de un bimetal, de una pieza formada por dos metales con distinto coeficiente de dilatación térmica, la cual se deforma según un arco circular uniforme cuando se produce un cambio de temperatura. El radio de este arco (r) varía en forma inversamente proporcional a la diferencia de temperatura ($T_2 - T_1$). Dicho movimiento puede ser utilizado uno o más contactos eléctricos (mando ON – OFF) o convertirlo a través de un sensor de posición o desplazamiento en una señal eléctrica equivalente.

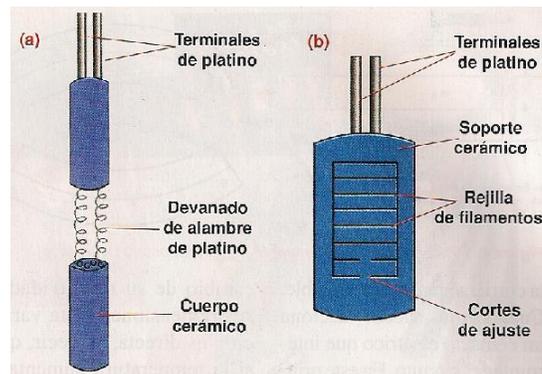
La pieza bimetalica tiene un espesor de $10 \mu\text{m}$ a 3mm . Como metal A se emplean latones y otras aleaciones. El metal B es generalmente una aleación de acero al níquel conocida como Invar. Este tipo de sensores se fabrican para detectar temperaturas desde $-75 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta $+540 \text{ }^\circ\text{C}$.

Son también empleados como protección de circuitos eléctricos, en los cuales el bimetal es calentado por la por la propia corriente que se desea monitorear hasta que alcanza una temperatura límite, relacionada con la corriente máxima admisible. Cuando esto sucede, acciona un contacto eléctrico que interrumpe el circuito. En este principio se basan los relés térmicos.

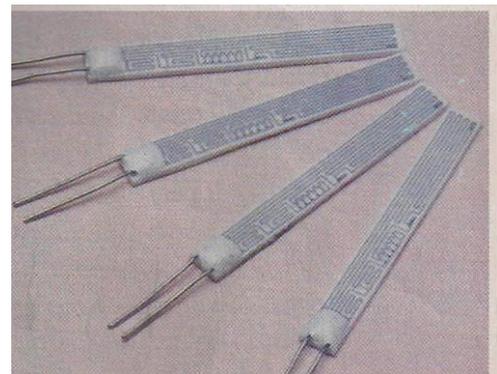


RESISTENCIAS DETECTORAS DE TEMPERATURA (RTD).

Las RTD, son dispositivos basados en la variación normal que experimenta la resistencia de un conductor metálico puro con la temperatura, como resultado del cambio de su resistividad y sus dimensiones. Esta variación es directa, es decir, que si la temperatura aumenta o disminuye, la resistencia también aumenta o disminuye en la misma proporción. Se dice, entonces, que son dispositivos con coeficiente de temperatura positivo (PTC). Todos los metales puros exhiben este comportamiento. Sin embargo, no existen dos metales con el mismo coeficiente de temperatura. Por lo tanto una vez conocidas las propiedades de un metal puede ser establecida una curva de resistencia – temperatura única para él.



El elemento sensor es típicamente un fino alambre de platino o una delgada película del mismo material aplicada a un sustrato cerámico. Otros metales comúnmente utilizados como elementos sensores son: el níquel, el cobre y el molibdeno. En el primer caso, el alambre está bobinado a través de unos diminutos agujeros sobre un soporte aislante de cerámica, mica o vidrio. Los sensores de película fina., en general, son más robusto, rápidos y económico que los de hilo bobinado y sus prestaciones son casi de la misma calidad.



Las RTD, principalmente las versiones de platino, se caracterizan principalmente por su precisión y su amplio rango de temperaturas de operación, el cual se extiende desde $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $+850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tienen también una sensibilidad, estabilidad y repetibilidad muy altas, y ofrecen una respuesta más lineal que las termocuplas o los termistores. Su principal desventaja, en el caso de las PRT, es el costo, el cual se incrementa debido a la necesidad de utilizar circuitos externos de procesamiento para conseguir una salida lineal. Obviamente, no se pueden medir temperaturas próximas ni superiores a la de fusión del elemento metálico.

En general, las sondas de níquel ofrecen una mayor sensibilidad que las de platino pero su margen lineal, es decir, el rango donde la resistencia varía linealmente o temperatura es menor ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+320\text{ }^{\circ}\text{C}$ contra los $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+850\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Los valores nominales de resistencias (R_0) más comunes en los cuales se consiguen las sondas de platino son de 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 Ω . Estos valores están definidos a 0 °C. Las populares sondas **Pt 100**, por ejemplo, son RTD de platino con una R_0 de 100 Ω .

Valores típicos de R_0 para las sondas de níquel son: 50, 100 y 120 Ω y para las sondas de molibdeno son: 100, 200, 500, 1000 y 2000 Ω .

Las de cobre trabajan en el rango de - 70 °C a 150 °C, son generalmente de 10 Ω a 20 °C.

En cuanto a la disposición física, hay modelos diseñados tanto para la inmersión en fluidos como para la medición de temperaturas superficiales. Las primeras son normalmente de hilo bobinado, mientras que las segundas pueden ser de hilo o de película metálica. Ambos tipos son ampliamente utilizados en una gran variedad de situaciones industriales, así como automóviles, electrodomésticos, construcciones, dispositivos de protección contra sobre corriente, arrancadores de motores, etc.

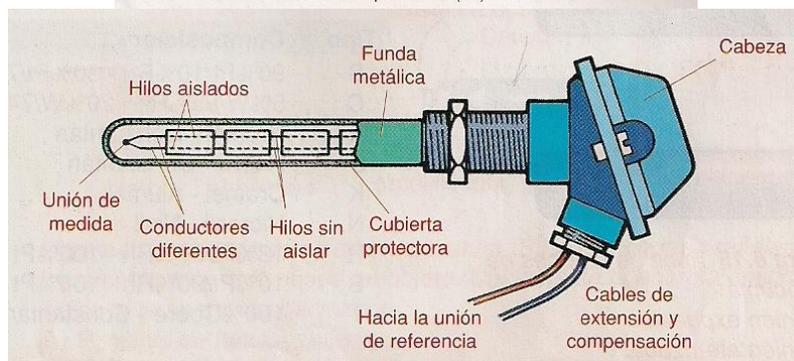
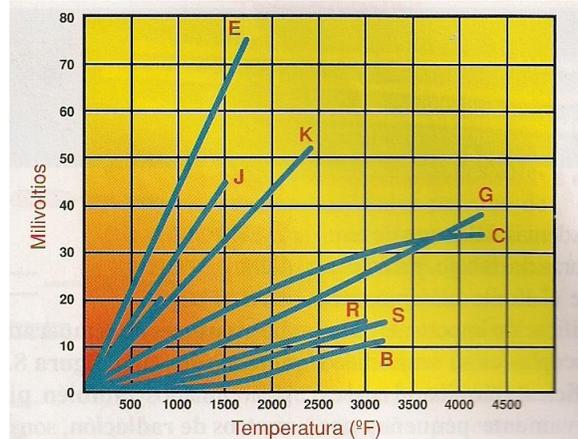
Las RTD se utilizan generalmente con un acondicionador de señales que convierte su salida a un voltaje o a una corriente proporcional a la temperatura. Esta señal de alto nivel puede ser transmitida a una unidad de visualización, registro o control.

TERMOCUPLAS.

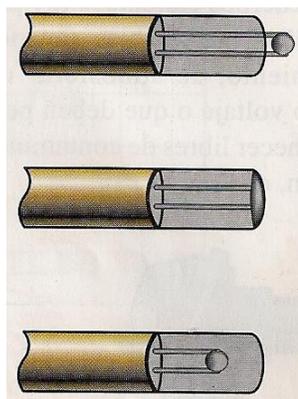
Las termocuplas o termopares, son transductores de temperatura constituidos por dos alambres conductores hecho de metales diferentes y soldados por uno de sus extremos formando una unión. Al calentar esta última (unión de medida) produce entre los extremos de la termocupla (uniones frías) un voltaje proporcional a la diferencia de temperaturas entre la unión caliente y cualquiera de las uniones frías, las cuales deberán estar a una misma temperatura de referencia, generalmente 0 °C. Este fenómeno se conoce como Efecto Termoeléctrico o Seebeck.

Los elementos de los termopares se fabrican a base de metales y aleaciones metálicas especiales, como platino (Pt), hierro (Fe), cobre (Cu), radio (Rh), renio (Re), tungsteno (W), cromel, constantán, alumel, nicrosil, nilil, etc. Los mismos están protegidos mediante una funda o cubierta metálica, generalmente de acero inoxidable, cuyo espesor determina la velocidad de respuesta y la robustez de la sonda. Dependiendo de la combinación o calibración particular de metales utilizados, las termocuplas reciben diferentes nombres o designaciones (J, K, T, E, B, C, N, R, S, etc) En la tabla se relacionan las características normalizadas de algunos de estos tipos y en la figura, la forma como varía el voltaje de salida en función de la temperatura para los más comunes. Cada una de estas calibraciones tiene un rango de temperaturas diferente y limitaciones propias cuando se exponen a ciertos ambientes.

Tipo	Composición	Rango (°C)
B	90%Pt/10%Ro - 30%Pt/70%Rh	38 a 1800
C	5%W/95%Re - 26%W/74%Re	0 a 2300
E	Cromel - Constantán	0 a 982
J	Hierro - Constantán	0 a 760
K	Cromel - Alúmel	-184 a 1260
N	Nicrosil - Nisil	-270 a 1300
R	13%Pt/87%Rh - 100%Pt	0 a 1593
S	10%Pt/90%Rh - 100%Pt	0 a 1538
T	100%Cobre - Constantán	-184 a 400



Las termocuplas pueden ser también clasificadas de acuerdo al estilo de la unión de medida. Desde este punto de vista, se habla de termocuplas de unión expuesta, aterrizada o no aterrizada, dependiendo de si la unión se extiende más allá de la cubierta metálica de protección o está conectada aislada eléctricamente a la misma.



UNION EXPUESTA.

UNION ATERRIZADA.

UNION NO ATERRIZADA.

TIPOS DE UNIONES DE TERMOCUPLAS.

Las termocuplas de unión expuesta, en particular, se emplean principalmente para realizar mediciones de temperatura en ambientes no corrosivos y donde se requieren tiempos de respuesta rápidos, particularmente gases estáticos o fluyentes no sometidos a altas presiones.

Las termocuplas de unión aterrizada, por su parte, permiten la medición de temperaturas estáticas o de gases o líquidos corrosivos en movimiento sometidos a altas presiones. Puesto que la unión está soldada a la cubierta, la respuesta térmica es más alta, pero también la susceptibilidad al ruido.

Finalmente, las termocuplas de unión no aterrizada, se emplean para medir temperatura en ambientes corrosivos o ruidosos donde se requiera un buen aislamiento eléctrico y la velocidad de respuesta no sea crítica. Como aislantes se emplean óxido de magnesio, aceite, mercurio, alúmina, óxido de berilio, etc.

Además del rango de temperaturas de trabajo, particularmente el límite máximo, otra especificación importante de las termocuplas es su sensibilidad o coeficiente térmico, el cual es relativamente pequeño, por ejemplo, 50 mV/°C para termopares J. Por esta razón, las termocuplas deben ser utilizadas en conjunción con amplificadores de bajo offset para producir voltajes de salida útiles. De cualquier modo, la relación entre voltaje y temperatura no es absolutamente lineal en todo el rango de trabajo. Por tal razón, para obtener una buena precisión, deben emplearse circuitos que compensen las variaciones de temperatura en la unión fría. Esto implica el uso de un sensor adicional, digamos un termistor NTC o un sensor de silicio.

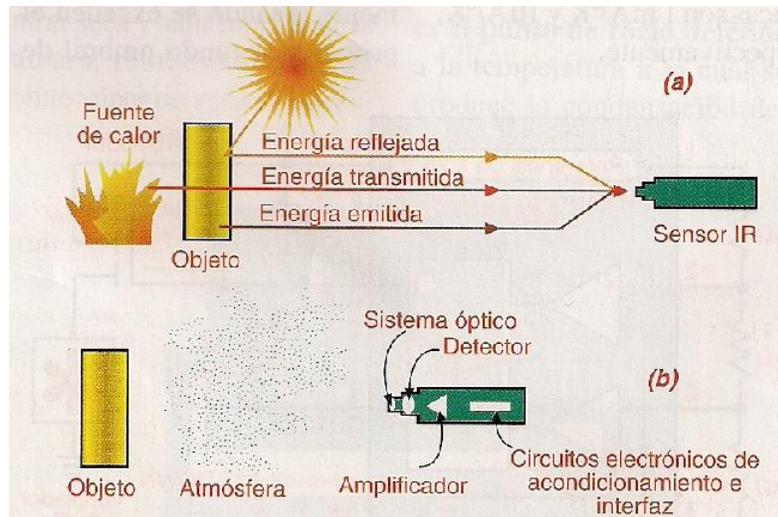
SENSORES DE TEMPERATURA INFRARROJOS.

Los sensores de temperatura infrarrojos (IR), denominados también pirómetros de radiación, son dispositivos de no contacto que miden indirectamente la temperatura de cuerpos calientes a partir de la radiación térmica emitida en forma natural por los mismos. Se utilizan en los casos en los cuales resulta imposible o peligroso el uso de un termistor, una termocupla u otro tipo de sensor de contacto. Es el caso, por ejemplo, de procesos industriales donde se manejan temperaturas muy superiores a las del punto de fusión del transductor, de cuerpos calientes muy pequeños, inaccesibles o en movimiento, de atmósferas de alto voltaje o que deben permanecer libres de contaminación, etc.

Los sensores IR están basados en el concepto de que todos los cuerpos, a temperaturas por encima del cero absoluto (-273.5 °C), producen radiación térmica en cantidad dependiente de su temperatura y sus propiedades físicas. Esta energía se incrementa a medida que el objeto se toma más caliente y puede ser evaluada a partir de la siguiente fórmula:

$$W = \epsilon \times \sigma \times T^4$$

En esta expresión, denominada la Ley de Stefan - Boltzman, W representa la energía térmica total radiada por el cuerpo en todas las longitudes de onda, ϵ es la emisividad propia del cuerpo, σ la llamada constante de Stefan - Boltzman ($5,6697 \times 10^{-12} \text{ W / cm}^2 \text{ K}^4$) y T la temperatura absoluta del cuerpo radiante (°K). En este principio se basan los pirómetros de radiación total o de banda ancha, los cuales miden la energía emitida reflejada y transmitida.



La superficie ideal para mediciones infrarrojas es un cuerpo negro, es decir un objeto con una emisividad igual a 1, lo cual implica que absorbe toda la energía incidente y emite radiación térmica en todas las longitudes de onda. La mayoría de objetos, sin embargo, no son radiadores tan perfectos, sino que reflejan y/o transmiten una porción de la energía que reciben, es decir tienen una emisividad inferior a 1 la cual depende de la longitud de onda, la temperatura, el estado físico y la constitución química de la superficie.

En general, entre más alta sea la emisividad de un objeto, más fácil es obtener una medición precisa de su temperatura por métodos infrarrojos.

En los sensores IR prácticos, la energía emitida, que es la que indica realmente la temperatura de un objeto, se captura mediante un detector apropiado, precedido de un sistema óptico, se amplifica y procesa mediante circuito electrónico.

La función de la óptica es concentrar la energía y limitar la influencia de la radiación proveniente de otras fuentes distintas del objeto bajo medida. Esta es la parte más crítica del sistema y la que determina el campo de vista (FOV) de la unidad.

El detector, por su parte, se encarga de convertir la energía IR a una variable eléctrica medible, es decir un voltaje, una corriente o una resistencia equivalente. Incluye típicamente un filtro espectral para limitar la energía a una banda estrecha.

El amplificador debe resolver y amplificar las débiles señales de salida enviadas por el detector, las cuales pueden ser por ejemplo del orden de $1 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$.

Una vez obtenida una señal estable y manejable la misma debe ser linealizada, es decir convertida en una función lineal de la temperatura y representada como una corriente de $4 - 20 \text{ ma}$, un voltaje de $0 - 5 \text{ V}$, una señal digital.

Actualmente se dispone también de sensores de temperatura IR inteligentes, los cuales pueden ser programados para comunicarse entre sí y con computadoras en una planta de manufactura. De este modo se facilita el direccionamiento, la configuración y el mantenimiento de las unidades desde sitios remotos durante la instalación y operación.

SENSORES DE FLUJO Y CAUDAL.

Los sensores de flujo, como su nombre lo indica, detectan y miden flujo, es decir transferencia de materiales de un sitio a otro a través de tuberías, mangueras, canales, bandas transportadoras, conductos abiertos o cerrados, etc. Estos materiales pueden ser materias primas, productos o desechos en forma de sólidos, líquidos, gases o sólido que flotan en líquidos. El flujo de un material es siempre la respuesta a una fuerza aplicada, producida, por ejemplo, por un motor, una bomba hidráulica, un compresor de aire una cabeza de presión estática, etc.



Los sensores de flujo se denominan comúnmente caudalímetros. Las mediciones exactas de flujo son importantes en los procesos industriales para garantizar que las materias primas se suministren a la velocidad apropiada y en las proporciones correctas, y prevenir la ocurrencia de presiones o temperaturas peligrosas, así como desbordamientos y otros efectos nocivos. También permiten determinar la cantidad de producto que ha pasado del proveedor al cliente, facilitando su inventario, valoración y contabilización. En todos estos casos importa primariamente conocer el caudal o rata de flujo del material, decir qué tan rápida o lentamente se está moviendo o desplazando.

Combinando las mediciones de caudal con mediciones de volumen o masa se puede determinar la cantidad de material que está siendo transportada.

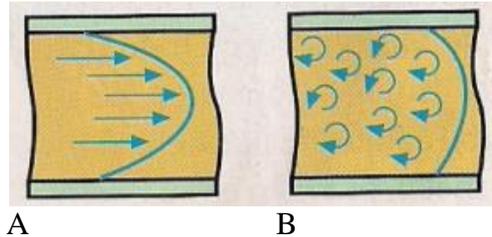
Desde este último punto de vista, se habla de flujo volumétrico y flujo másico, referidos, respectivamente, al volumen o masa de material que pasa por un punto determinado durante un período determinado. Por ejemplo, si un líquido fluye a una velocidad (v) de 4 m/s a través de una tubería de $0,3 \text{ m}^2$ de área transversal (A), entonces la rata de flujo volumétrico (Q) del mismo es simplemente $Q = v \times A = 4 \text{ m/s} \times 0,3 \text{ m}^2 = 1,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Por tanto, existen caudalímetros de flujo másico y caudalímetros de flujo volumétrico. Estos últimos son los más comunes.

El flujo de un líquido a través de una tubería depende esencialmente de cuatro factores: su velocidad de flujo (v), su densidad (δ), su viscosidad (μ) y el diámetro de la tubería (\emptyset). La viscosidad, en particular, se refiere a la mayor o menor facilidad que tiene el fluido para correr. Su medida es el Poise (P). La densidad, por su parte representa su peso por unidad de volumen. Tanto la viscosidad como la densidad son afectadas por los cambios de temperatura, disminuyendo a medida que aumenta esta última, y viceversa. Estos parámetros se relacionan entre sí mediante el llamado número de Reynolds (R)

así:

$$R = v \times \varnothing \times \delta / \mu$$

siendo v la velocidad (m / seg), \varnothing el diámetro (m), δ la densidad (kg / m³) y μ la viscosidad (P). Dependiendo del valor de R , se habla de flujo laminar o flujo turbulento.



PERFILES TÍPICOS DE MOVIMIENTOS DE FLUIDOS.

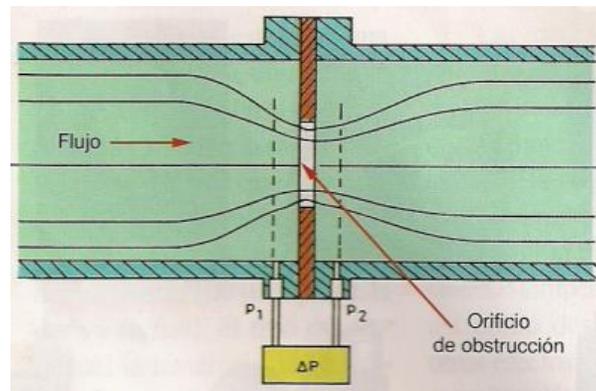
A – FLUJO LAMINAR.

B – FLUJO TURBULENTO.

El flujo laminar en particular, corresponde a valores de R inferiores a 7000 se presenta a bajas velocidades o líquidos muy viscosos. Se caracteriza porque el movimiento del fluido se realiza en capas paralelas cuya velocidad disminuye progresivamente a medida que se alejan del centro, siendo máxima en este último punto y mínima, prácticamente cero, en las paredes.

El flujo turbulento corresponde a valores de R por encima de 8000 y se presenta en altas velocidades o con líquidos poco viscosos. Se caracteriza porque el movimiento del fluido se realiza en forma de remolinos o torbellinos que viajan en todas las direcciones y producen una rata de flujo constante. Los flujos con valores de R entre 7000 y 8000 se denominan de transición y tienen características intermedias. Por lo general, un caudalímetro diseñado para medir flujo laminar no produce lecturas correctas en presencia de flujo turbulento, y viceversa. Por esta razón, al seleccionar un caudalímetro, es importante conocer el valor de R para el fluido particular considerado.

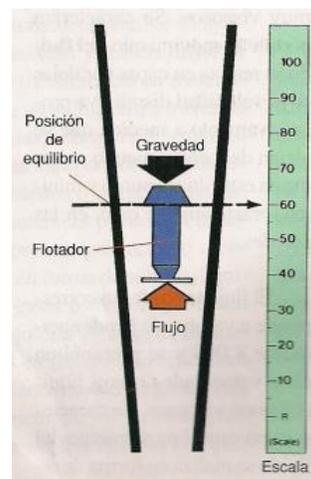
La mayoría de los caudalímetros se basan en métodos de medida indirectos, siendo los más comunes la presión diferencial, el desplazamiento positivo, la velocidad y el flujo másico. Los caudalímetros de obstrucción o presión diferencial, se utilizan para medir el flujo de fluidos a través de tuberías.



PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN CAUDALIMETRO DE OBTURAMIENTO O PRESION DIFERENCIAL.

En los mismos se interpone una placa con un orificio de tamaño y forma específica cuya función es reducir el área a través de la cual circula el líquido para cambiar su velocidad y crear así una diferencia de presiones (ΔP) a ambos lados. Esta última puede ser medida con un sensor de presión diferencial y utilizada para calcular la velocidad a la cual sale el fluido del orificio. Multiplicando esta velocidad por el área del orificio y un factor de corrección llamado coeficiente de descarga (C_d), del orden de 0,6 a 0,97, se obtiene el caudal volumétrico (Q).

Una variante son los rotámetros o caudalímetros de área variable, en los cuales, como su nombre lo indica, se mantiene constante la diferencia de presiones a ambos lados de la obstrucción y se varía la sección de paso del fluido.

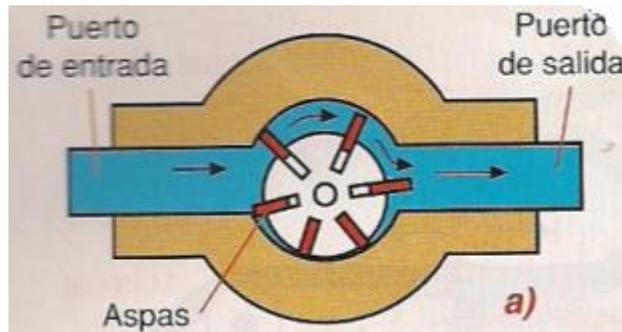


ROTAMETRO O CAUDALIMETRO DE AREA VARIABLE.

Consisten de un tubo cónico de plástico, vidrio o metal, provisto en su interior de un pistón o un flotador que es arrastrado por el fluido. Este último ingresa por la parte inferior y sale por la superior. Si no hay flujo, el flotador permanece en reposo en la parte del tubo que tiene su mismo diámetro. Al aumentar el caudal, el flotador se

desplaza hacia arriba hasta alcanzar una altura proporcional al caudal. Su posición puede ser leída sobre una escala graduada en el tubo o detectada mediante un captador magnético u óptico.

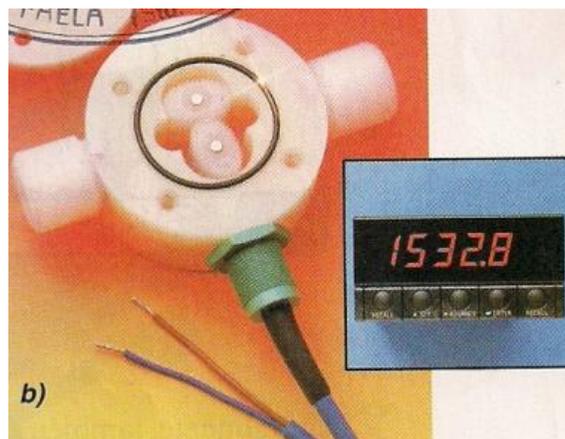
Los caudalímetros de desplazamiento positivo operan separando el fluido en segmentos de volumen conocido. La versión más común es el caudalímetro de aspas rotatorias, compuesto de una cámara cilíndrica con dos puertos, uno de entrada y otro de salida, y un rotor acanalado donde se alojan unas aspas resortadas.



CAUDALIMETRO DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO. DE ASPAS O PALETAS ROTATORIAS.

A medida que el fluido llena la cámara, el rotor obligado a girar a una cierta velocidad, provocando que las aspas entren y salgan del mismo, y así se mantengan en contacto constante con las paredes del cilindro. El fluido contenido en cada sección es descargado cuando la misma alcanza el puerto de salida. El caudal se obtiene multiplicando las r.p.m. de giro del rotor por el volumen descargado en cada vuelta.

Otra forma común de caudalímetro de desplazamiento positivo es el medidor de lóbulos, constituido por dos piñones de forma elíptica cuidadosamente mecanizados, que son impulsados por el movimiento del fluido y giran defasados 90° entre sí.

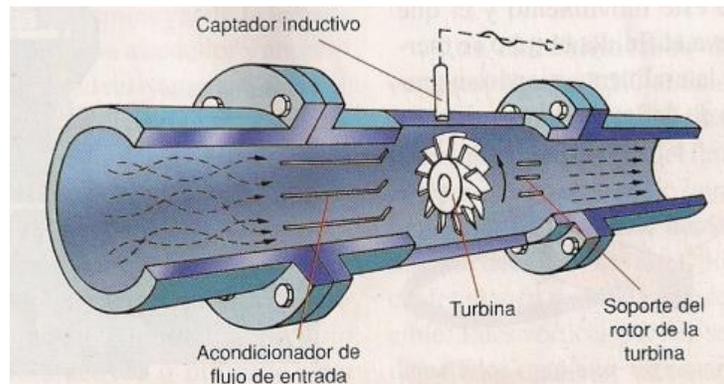


CAUDALIMETRO DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO. DE LOBULOS IMPULSORES.

Puesto que los piñones están en contacto permanente entre sí y con las paredes de la cámara, forman un sello, lo cual les permite transportar en cada vuelta un volumen de líquido conocido.

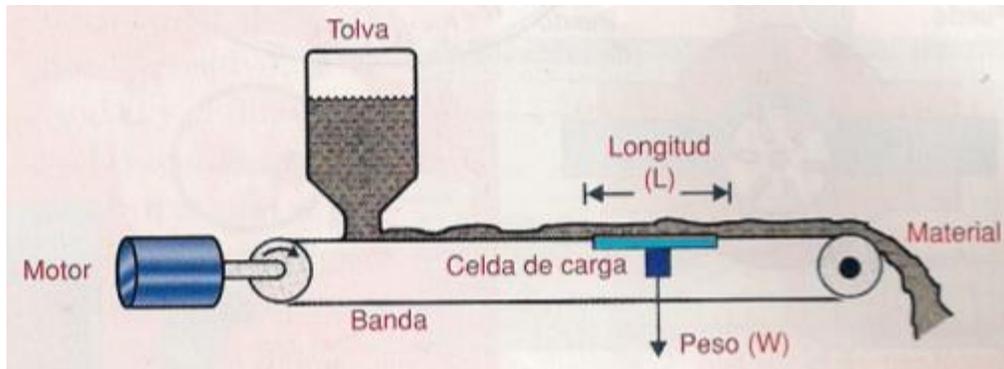
Multiplicando este volumen por el número de r.p.m se obtiene el caudal volumétrico. La información de las r.p.m puede ser suministrada, por ejemplo, por un sensor de proximidad inductivo asociado a un controlador.

Los caudalímetros de turbina, están constituidos por una rueda alabeada que gira con una velocidad proporcional a la velocidad de flujo del fluido. Multiplicando esta última velocidad por el área de la sección de paso se obtiene el caudal volumétrico. La velocidad de giro de las paletas se detecta mediante un captador magnético, formado por un imán permanente colocado dentro de una bobina. Cada vez que uno de los álabes o cuchillas de la turbina pasa a través del campo magnético del imán, distorsiona las líneas de flujo del mismo e induce un pulso de voltaje en la bobina. La frecuencia de estos pulsos es proporcional a la velocidad de rotación de la turbina y, por tanto, al caudal volumétrico.



CAUDALIMETRO DE TURBINA.

Los medidores de flujo másico proporcionan el peso real del fluido que pasa durante un penado dado de tiempo. Puesto que esta lectura es directa y no utiliza datos inferido de otras variables, la misma es exacta y no depende de la naturaleza sólida o líquida del fluido ni de su viscosidad, temperatura, presión y otros factores. Las mediciones de flujo másico se aplican principalmente a materiales sólidos presentados en forma de polvo, pastillas, granos y otros tipos de partículas pequeñas. Se muestra como ejemplo un método para determinar el flujo másico de un polvo conducido a través de una banda transportadora.



SISTEMA DE BANDA TRANSPORTADORA Y CELDA DE CARGA USADO PARA MEDIR EL FLUJO MASICO DE MATERIALES SOLIDOS.

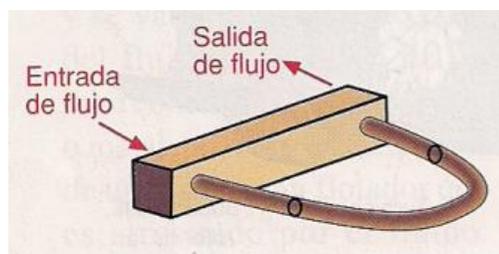
En este sistema, el polvo es liberado por la tolva y transferido a través de la banda transportadora a otro sitio, digamos: una tina de mezcla, un tanque de almacenamiento, la bodega de un barco, etc. La celda de carga determina el peso (W) del material contenido en una longitud fija (L) de la correa. El flujo másico (M) está dado por:

$$M = W \times v / L$$

Siendo v la velocidad de la banda transportadora. Por ejemplo, si esta última se mueve a 0.25 m / s, la longitud de la plataforma de pesado es de 3 metros y el peso medido por la celda es de 150 kg, entonces el flujo másico es de $(150 \times 0.25) / 3 = 12.5$ kg / s. La cantidad de material transferida por la banda puede controlarse variando la velocidad de esta última o regulando la salida del mismo de la tolva.

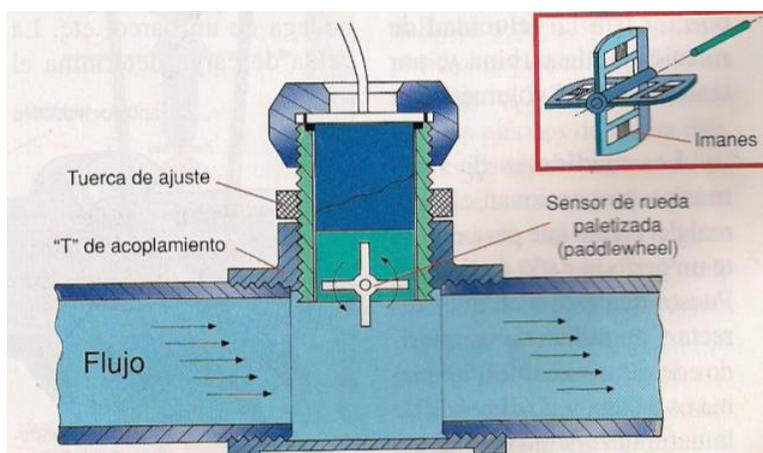
Naturalmente, también se dispone de caudalímetros electrónicos. Los más comunes son: los medidores de Coriolis, los detectores de flujo rotóricos, los detectores de flujo electromagnéticos, los caudalímetros térmicos, los caudalímetros de vórtice y los caudalímetros ultrasónicos.

El medidor de Coriolis, consiste de un tubo metálico en forma de U localizado en las inmediaciones de unas bobinas y a través del cual circula el fluido. Al aplicar una corriente pulsatoria a las bobinas, el campo magnético producido hace que el tubo vibre, en forma parecida a un diapasón. Como resultado de la interacción entre este movimiento y el que lleva el fluido, el tubo se tuerce lateralmente, siendo su grado de deflexión proporcional a la masa de líquido que pasa a través de él. La cantidad de torsión es registrada por sensores magnéticos montados en ambos extremos del tubo. Con este método se puede medir flujo másico de todo tipo de fluidos.



MEDIDOR DE CORIOLIS.

Los detectores rotóricos, se insertan dentro de las tuberías utilizando un accesorio en forma de T y recurren a un sencillo sistema de rotor de rueda paletizada (paddlewheel), impulsado por el fluido, que gira a una velocidad proporcional a la rata de flujo. El rotor consta de cuatro cuchillas, cada una de las cuales incluye un imán permanente que excita un dispositivo de efecto Hall y produce en cada paso un pulso de voltaje. Contando el número de pulsos producidos durante un determinado período de tiempo se obtiene una indicación del caudal volumétrico. Este tipo de sensores, que sustituyen a los caudalímetros de turbina en muchas aplicaciones, pueden ser utilizados con una amplia variedad de líquidos, incluyendo ácidos, solventes y fluido corrosivos.

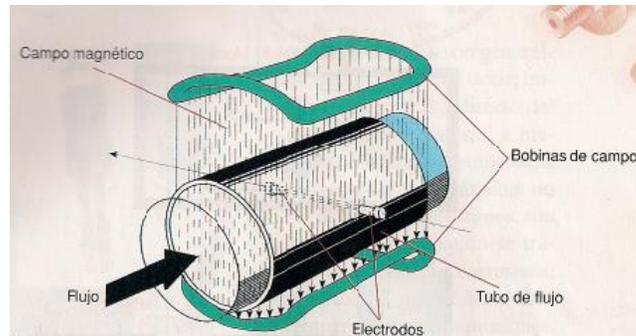


CAUDALIMETRO DE RUEDA DE PALETAS.

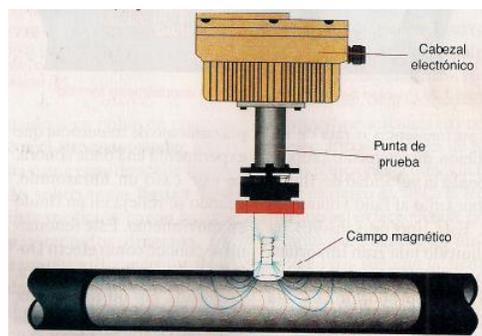
Los caudalímetros electromagnéticos, están basados en la Ley de Faraday, la cual establece que si un conductor se mueve a través de un campo magnético, entonces se induce en el mismo un voltaje proporcional a su longitud, su velocidad de desplazamiento y la intensidad del campo. En este caso, el fluido en movimiento actúa como conductor, mientras que el campo lo establecen dos bobinas montadas en las paredes exteriores de la tubería y excitadas por un voltaje DC pulsante. El voltaje inducido, que es proporcional al caudal volumétrico, se capta a través de dos electrodos localizados en las paredes internas del tubo. Este tipo de sensores se utilizan generalmente con fluidos difíciles y corrosivos, así como con emulsiones, ácidos, aguas residuales, detergentes, comidas líquidas, etc.

Lo caudalímetros electromagnéticos se denominan también magmetros y, dependiendo del método de montaje, pueden ser básicamente de dos tipos: de inserción y estilo galleta. En estos últimos, utilizados para aplicaciones de alta precisión, el campo magnético

se produce a través de toda la sección transversal del tubo de flujo, mientras que en lo primeros, se radia hacia fuera de la punta de la punta de prueba. De cualquier modo, para aplicar la Ley de Faraday a un fluido en movimiento, es absolutamente necesario que este último sea conductor. Por esta razón, los caudalímetros magnéticos trabajan mejor con soluciones acuosas que con hidrocarburos.

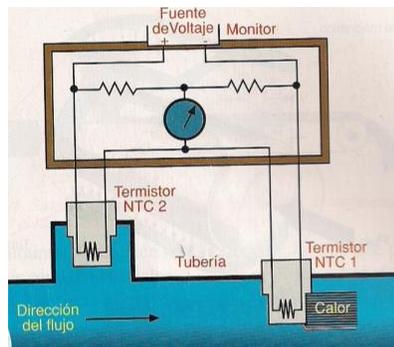


CAUDALIMETRO ELECTROMAGNETICO EN LINEA O TIPO GALLETA.



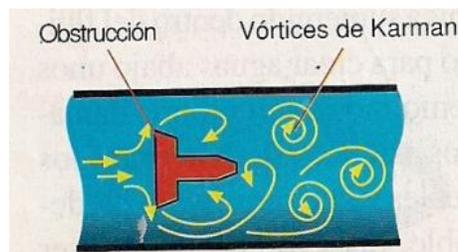
CAUDALIMETRO ELECTROMAGNETICO DE INSERCIÓN.

Los caudalímetros térmicos, utilizan dos termistores sumergidos dentro del fluido e integrados a un puente de Weathstone. El primer termistor (NTC1) está en contacto con el fluido, mientras que el segundo (NTC2) está blindado, actuando Como compensador de temperatura. A medida que pasa, el fluido retira calor del termistor 1, disminuyendo la temperatura a su alrededor y aumentando su resistencia. Como resultado, el puente se desbalancea y aumenta el voltaje de salida. Este último es proporcional a la rata de flujo y puede ser detectado directamente con un medidor análogo calibrado en unidades de flujo volumétrico o utilizado para excitar un medidor electrónico. La resistencia del termistor 2 no se ve afectada por el flujo, pero sí por la temperatura del fluido.



CAUDALIMETRO TERMICO.

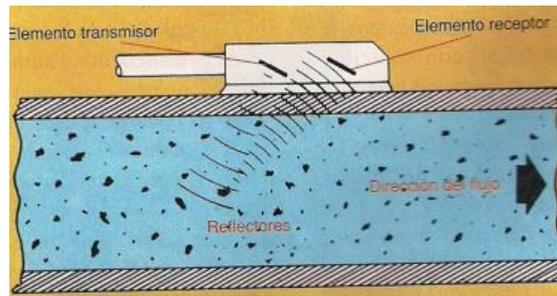
Los caudalímetros de vórtices, utilizan un objeto sin forma aerodinámica sumergido dentro del fluido para crear aguas abajo unos remolinos o torbellinos llamados vórtices de Karman, los cuales siguen un patrón predecible. Tales vórtices pueden ser detectados mediante un sensor de presión o ultrasónico, siendo su frecuencia o rata de repetición directamente proporcional a la velocidad del fluido y, por tanto al flujo volumétrico. Este tipo de sensores ha adquirido una gran importancia en los últimos años debido a que proporcionan una buena exactitud, del orden del 0.5 %, son robustos, no tienen partes móviles y están libres de mantenimiento. No obstante, para impedir atascamientos, deben utilizarse solamente con líquidos limpios, no abrasivos ni corrosivos.



CAUDALIMETRO DE VORTICES.

Finalmente, los caudalímetros ultrasónicos, están basados en el desplazamiento de frecuencia que experimenta una onda sonora, en este caso un ultrasonido, cuando se refleja en un fluido en movimiento. Este fenómeno se conoce como efecto Doppler. La onda ultrasónica, producida por un transductor piezoeléctrico, es reflejada desde el líquido por burbujas de aire o partículas sólidas en suspensión, y captada por otro transductor piezoeléctrico, el cual la convierte en una señal eléctrica equivalente. La diferencia de frecuencia entre la señal transmitida y la señal recibida es proporcional a la velocidad del fluido y, por tanto, a su caudal volumétrico. Este tipo de sensores se instalan fuera de las tuberías y por tanto son adecuados para todo tipo de fluidos. Los caudalímetros ultrasónico basados en el efecto Doppler requieren que exista por lo menos un nivel de 25 ppm (partes por millón) de burbujas o partículas sólidas en suspensión que actúen como reflectores y las mismas tengan un diámetro de 30 micras o superior. Para fluidos limpios, sin partículas reflectoras, existen también sensores ultrasónicos de flujo basados en la medición de los tiempos de tránsito de la onda, es decir los que demora la radiación en alcanzar el receptor cuando se propaga tanto en la

dirección del flujo (a favor) como en la dirección opuesta (en contra). La diferencia entre estos tiempos es proporcional a la velocidad del fluido y a su caudal.



CAUDALIMETRO ULTRASONICO DE EFECTO DOPPLER.