PN-ABC-375

AIRE
AGUA

M-004

equipo y técnicas de medición para el ahorro de energía

INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Proyecto de Eficiencia Energética en la Industria Regional

INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION
Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL
- I C A I T I -

EQUIPO Y TECNICAS DE MEDICION PARA EL AHORRO DE ENERGIA

(M-004)

Proyecto de Eficiencia Energética en la Industria Regional
1 9 8 5

RECONOCIMIENTO

Este manual fue escrito como referencia para el taller "Técnicas e instrumentación para la medición de energía". Este y otros talleres se ofrecen periódicamente a las industrias del Estado de Georgia por el Servicio de Extensión de Energía Industrial (IEES). El IEES es manejado por el Laboratorio de Aplicaciones Tecnológicas del Instituto de Investigación de Georgia Tech. y es auspiciado por la Oficina de Recursos Energéticos de Georgia, gracias a una aportación del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

SALVEDAD

El contenido de este manual se ofrece como una guía. El Instituto Tecnológico de Georgia (Georgia Institute of Technology), la Estación Experimental de Ingeniería (Engineering Experiment Station) y todas las fuentes técnicas referidas en este manual (a) no otorgan ninguna garantía o representación, expresa o implícita, con respecto a la exactitud, exhaustividad o utilidad de la información contenida, o que el uso de cualesquier información, aparato, método o proceso descrito en este informe no pudiera infringir derechos de propiedad particular; (b) no asumen responsabilidad alguna con respecto al uso de cualesquier información, aparato, método o proceso divulgados en este informe o con respecto a los daños que pudieren resultar del uso de los mismos. El presente informe no refleja los puntos de vista o las políticas de las instituciones arriba mencionadas. La mención de marcas o productos comerciales no constituye endoso o recomendación alguna de su uso.

PREFACIO

El uso de la energía industrial es a menudo considerado como un costo de producción invisible e incontrolable. En algunas plantas los medidores de gas y energía eléctrica son los únicos medios para medir el consumo de energía. Si la energía utilizada por procesos y equipos individuales puede ser medida, la energía se convierte en una cantidad tangible, conspicua, que puede ser controlada.

Por lo tanto, para establecer un programa de conservación de energía efectivo, la medición de la energía debe ponerse en práctica. El manual "Equipo y Técnicas de Medición para el Ahorro de Energía" puede ayudar a dar ese primer paso hacia la conservación de energía.

Este manual es una guía directa de instrumentación diseñada para uso regular por gerentes de planta, ingenieros y personal de mantenimiento. El manual provee una vista general de los instrumentos que están disponibles para medir:

- Flujo de fluidos
- Electricidad
- Temperatura
- Luz
- Análisis de gas de chimenea

Para cada instrumento se describen las operaciones básicas, su instalación, y las opciones de equipo disponible. Se discuten también las aplicaciones más importantes y las limitaciones de cada instrumento.

No se pretende reemplazar con este manual la información sobre instalación y uso recomendado que ofrecen los fabricantes de intrumentación; por el contrario, el manual trata de llenar el vacío que existe entre los manuales de instrumentación detallados y altamente teóricos y la información específica y esquemática del instrumento que se incluye en los catálogos de venta. Sin embargo, los manuales

de instrumentación —como los incluidos en la lista de la sección de referencias — y los catálogos de ventas son suplementos muy útiles para este manual.

El manual se divide en secciones individuales para cada instrumento. Por ejemplo, en el capítulo sobre "medidas de energía eléctrica" las secciones incluidas son las siguientes:

- Voltímetros
- Amperímetros
- Vatímetros
- Kilovatio-horímetros
- Medidores del factor de potencia

Cada una es una sección por sí sola, que puede ser utilizada sin necesidad de leer otra sección del manual.

Se usa un formato único para facilitar las comparaciones entre uno y otro instrumento. Debido a las marcadas variaciones en la complejidad de los instrumentos, no siempre se describe cada instrumento con el mismo nivel de detalle.

Sin embargo, se ha hecho el intento de proveer suficiente información en todos los casos para ganar una medida uniforme de comprensión de cada instrumento.

Al final de este manual se incluye un amplio glosario y una lista de referencias bibliográficas relacionadas con el tema. La bibliografía de referencia incluye una cita completa y una breve descripción de cada referencia. Al final de cada capítulo las referencias importantes se citan únicamente por número (como está asignado en la bibliografía de referencia), título, autor y fecha. Las referencias incluyen manuales de instrumentación que pueden ser usados para obtener información más detallada sobre un tema en particular. El alcance del manual está limitado al uso y selección de instrumentación de medidas de energía en el ambiente industrial.

Se han omitido, por lo tanto, instrumentos no industriales como aparatos estándar de laboratorio.

Tampoco se incluyen accesorios como indicadores, registradores e impresores. Este equipo está disponible en tan amplia variedad que un manual entero podría ser dedicado a la selección y uso de accesorios de instrumentación.

I N D I C E

1. INTRODUCCION A LA INSTRUMENTACION 1

2. MEDICIONES DE FLUJO

2.1 Placas de orificio 4
2.1.1 Operación básica e instalación 4
2.1.2 Principios de operación 13
2.1.3 Opciones de equipo 17
2.2 Tubos Venturi 25
2.2.1 Operación básica e instalación 26
2.2.2 Principios de operación 30
2.2.3 Opciones de equipo 32
2.3 Tubos Pitot 44
2.3.1 Operación básica e instalación 44
2.3.2 Principios de operación 50
2.3.3 Opciones de equipo 52
2.4 Medidores de turbina y de aletas 57
2.4.1 Operación básica e instalación 57
2.4.2 Principios de operación 60
2.4.3 Opciones de equipo 61
2.5 Medidores de desplazamiento positivo 71
2.5.1 Operaciones básicas e instalación 71
2.5.2 Principios de operación 73
2.5.3 Opciones de equipo 78
2.6 Forma vórtices 92
2.6.1 Operaciones básicas e instalación 92
2.6.2 Principios de operación 94
2.6.3 Opciones de equipo 97

3. MEDICIONES ELECTRICAS

3.1 Voltímetros 101
3.1.1 Operación básica e instalación 101
3.1.2 Principios de operación 103
3.1.3 Opciones de equipo 110

3.2 Amperímetros 117
3.2.1 Operación básica e instalación 117
3.2.2 Principios de operación 119
3.2.3 Opciones de equipo 125
3.3 Vatímetros de ca y medidores de demanda de kilovatios 134
3.3.1 Operación básica e instalación 136
3.3.2 Principios de operación 137
3.3.3 Opciones de equipo 140
3.4 Kilovatios - horímetros 146
3.4.1 Operación básica e instalación 146
3.4.2 Principios de operación 147
3.4.3 Opciones de equipo 148
3.5 Medidores del factor de potencia 151
3.5.1 Operación básica e instalación 151
3.5.2 Principios de operación 153
3.5.3 Opciones de equipo 154

4. MEDICIONES DE TEMPERATURA
4.1 Termómetros de expansión fluida 158
4.1.1 Operación básica e instalación 158
4.1.2 Principios de oreración 162
4.1.3 Opciones de equipo 163
4.2 Termómetros bimetálicos 167
4.2.1 Operación básica e instalación 167
4.2.2 Principios de operación 169
4.2.3 Opciones de equipo 169
4.3 Termopares 171
4.3.1 Operación básica e instalación 171
4.3.2 Principios de operación 175
4.3.3 Opciones de equipo 177
4.4 Termómetros de resistencia 192
4.4.1 Operación básica e instalación 192
4.4.2 Principios de operación 195
4.4.3 Opciones de equipo 195

4.5 Pirómetros de radiación 200
4.5.1 Operación básica e instalación 200
4.5.2 Principios de operación 202
4.5.3 Opciones de equipo 203
4.6 Indicadores sensibles a la temperatura 208
4.6.1 Operación básica e instalación 208
4.6.2 Principios de operación 208
4.6.3 Opciones de equipo 209

OTROS MEDIDORES PARA MEDICIONES INDUSTRIALES DE ENERGIA
5.1 Analizadores de gases de chimenea 214
5.1.1 Operación básica e instalación 214
5.1.2 Principios de operación 215
5.1.3 Opciones de equipo 217
5.2 Medidores de luz 221
5.2.1 Operación básica e instalación 221
5.2.2 Principios de operación 223
5.2.3 Opciones de equipo 223

GLOSARIO 226

BIBLIOGRAFIA 247

INTRODUCCION A LA INSTRUMENTACION

Existen varias características que son pertinentes a todos los instrumentos que se discuten en las diferentes secciones de este manual.

Esas características se presentan aquí como una introducción general, para no repetirlas en cada sección.

Clases de instrumentación

Todos los instrumentos pueden dividirse en 3 clases:

- Estándar
- Portátil
- Montado en tablero

Los instrumentos estándar son aparatos de medición muy precisos. Su principal uso se encuentra en laboratorios de investigación y a menudo se usan para calibrar otros instrumentos menos precisos. Los instrumentos portátiles son los más comunes para uso industrial. Generalmente son muy livianos, fáciles de llevar consigo, exactos, reutilizables y fáciles de calibrar. Generalmente vienen en un estuche adecuado para su transporte. A pesar de que mantienen sus valores de calibración en forma aceptable, los instrumentos portátiles no son particularmente recomendables para instalación permanente porque no están construidos para soportar el uso constante y la vibración que es común en muchas instalaciones industriales. Los instrumentos portátiles están diseñados para efectuar medidas instantáneas y/o puntuales de los parámetros, y no constituyen el elemento sensor para sistemas de control.

Por otro lado, los instrumentos montados en tableros, que incluyen la mayoría de los medidores de flujo están diseñados para conexión permanente y uso contínuo. Su construcción les permite soportar los

rigores de la vibración y el uso continuo, pero su exactitud es limitada. Sin embargo, con el advenimiento de la electrónica de estado sólido se ha mejorado sustancialmente la exactitud de los instrumentos que pueden ser utilizados como indicadores y sensores para sistemas de control. Generalmente no vienen con estuches y no son portátiles.

Tipos de instrumentación

Los instrumentos son a menudo descritos según el tipo de lectura que se obtiene de ellos. Los instrumentos indicadores proporcionan un valor instantáneo de la variable que se está midiendo. Los instrumentos indicadores comunes incluyen termómetros, vatímetros y manómetros. Las unidades de medida que se usan son grados Farenheit o Celcius (centígrados), vatios y psig respectivamente. Los instrumentos integradores ofrecen una lectura de variables que dependen del tiempo. Los valores que se obtienen representan la variación y la suma de la cantidad que se está midiendo por un determinado período de tiempo.

Algunas unidades utilizadas son: las libras, kilovatio-hora y Btu. Los instrumentos de registro permiten al usuario hacer un registro permanente de la variable instantánea por un período de tiempo. Generalmente estos instrumentos consisten de un elemento indicador y un elemento integrador; es posible efectuar medidas tanto de indicación como de integración.

Calibración

La calibración se define como la comparación y el ajuste de la lectura de un instrumento contra un estándar conocido. En la industria, donde el ambiente es generalmente severo, la calibración es necesaria

para asegurar la operación adecuada de los instrumentos, especialmente si forman parte de un sistema de control. Mientras que algunas calibraciones menores son generalmente posibles de efectuar "in situ" (como reemplazar orificios gastados o ajustar la aguja de un vatímetro), las calibraciones más finas deben de ser efectuadas por personal de servicio calificado. La falta de calibración regular de los instrumentos puede entrañar medidas incorrectas o comportamiento insatisfactorio de un sistema, el cual a su vez puede llevar a conclusiones incorrrectas acerca del equipo o la operación de un sistema.

2. MEDICIONES DE FLUJO

2.1 PLACAS DE ORIFICIO

Las placas de orificio son utilizadas para medir el flujo en tuberías. En mediciones de energía, pueden aplicarse a gases, como vapor o aire, y líquidos como agua o aceite. Aplicaciones comunes incluyen calderas de vapor, equipo de proceso calentado con vapor, y agua caliente para baños de proceso. Otros usos son mediciones de flujo de gas natural y aire dentro de equipo de combustión.

Las placas de orificio son ampliamente utilizadas en la industria. Mucha experiencia operacional ha sido acumulada en diversas situaciones de flujo. Los orificios son fáciles de fabricar a causa de su simple diseño: Un disco de metal con un agujero exactamente torneado. En muchas aplicaciones son baratos, siendo su costo de instalación el más elevado. Cuando se instalan y mantienen apropiadamente, suministran datos de flujo exactos y confiables.

Las placas de orificio son particularmente adecuados para flujos intermedios (30 000 $\leq$ Número de Reynolds $\leq$ 500 000) en tuberías. En situaciones de flujo elevado (500 000 $\leq$ Número de Reynolds $\leq$ 1 000 000), especialmente en grandes conductos, se emplean comúnmente tubos Venturi. Para flujos bajos (5 000 $\leq$ Re $\leq$ 30 000) y grandes conductos, se aconseja el uso de tubos de Pitot.

2.1.1 Operación básica e instalación

Las plantas de orificio pertenecen a la clase medidores de flujo conocidos como medidores inferenciales, o sea, no miden directamente el flujo pero en cambio miden algún parámetro que puede relacionarse con el flujo. Las placas de orificio provocan una caída de presión que es proporcional al flujo, lo que permite deducir el mismo. Midiendo la caída de presión, o presión diferencial, causada por el orificio y conociendo la relación proporcional con el flujo, puede calcularse un valor instantáneo para el flujo. El flujo puede totalizarse convirtiendo la caída de presión en una señal electrónica como la que emplea

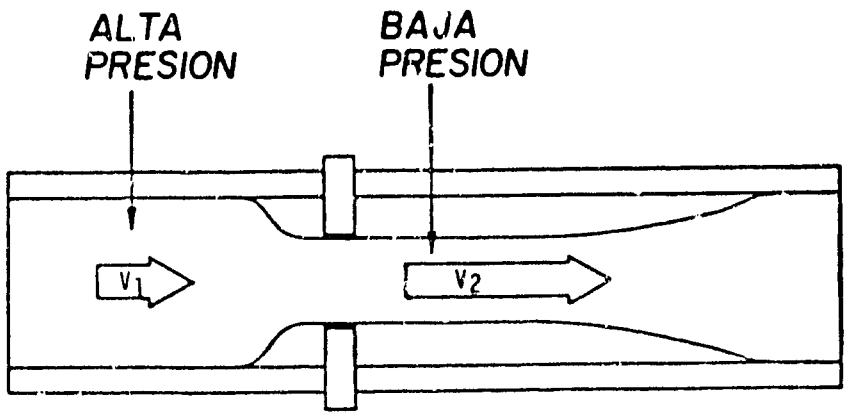


FIGURA 2-1 FLUJO A TRAVES DE UN MEDIDOR DE ORIFICIO

un microprocesador para calcular el flujo y luego integrarlo con respecto al tiempo.

Existen varios diseños de medidores de orificio entre los que están: borde rectangular, cuarto de círculo, entrada cónica, tubo Venturi y tubo Dall (1). Las diferencias básicas entre éstos se deben a la forma del orificio: secciones de círculo o concéntrico , redonda y configuraciones de entrada o salida: por ejemplo, secciones cónicas lisas de entrada o salida. Para la mayoría de mediciones que involucran gases, aire, vapor y agua, se recomienda usar la placa de orificio del tipo borde rectangular. Los otros diseños se emplean principalmente para alta viscosidad, fluidos erosivos, o flujos con material suspendido.

Para entender cómo funciona una placa de orificio, recuerde que la velocidad y la presión del fluido están relacionadas. Cuando una restricción, por ejemplo si se instala una placa de orificio de pequeño diámetro en una corriente, la velocidad del flujo debe incrementar cuando pasa a través de ella. El incremento en velocidad es acompañado por una caída de presión proporcional al flujo de masa como se ilustra en la figura 2-1 y en la siguiente ecuación:

$$M = \frac{C_D}{(1-B^4)^{\frac{1}{2}}} YA\,(dp\,e2g_c)^{\frac{1}{2}}$$

donde M = flujo de masa

C_D = coeficiente de descarga

B = relación Beta - proporcionalidad del diámetro del orificio con respecto al diámetro de la tubería.

Y = expansividad del fluido

A = área del orificio

dp = caída de presión medida

e = densidad del fluido

g_c = constante gravitacional

(1) Configuración similar al tubo Venturi, liviano y de corto tamaño. Su pérdida de presión oscila alrededor del 2.5% de la presión medida.

Note que para una placa de orificio instalada en un flujo específico esta ecuación se reduce a.

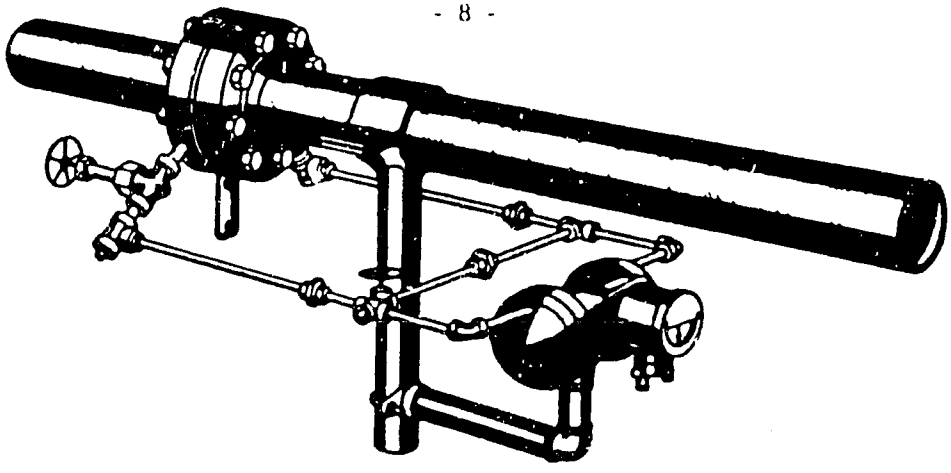
$$M = \text{constante} \times [\text{alta presión} - \text{baja presión}]^{\frac{1}{2}}$$

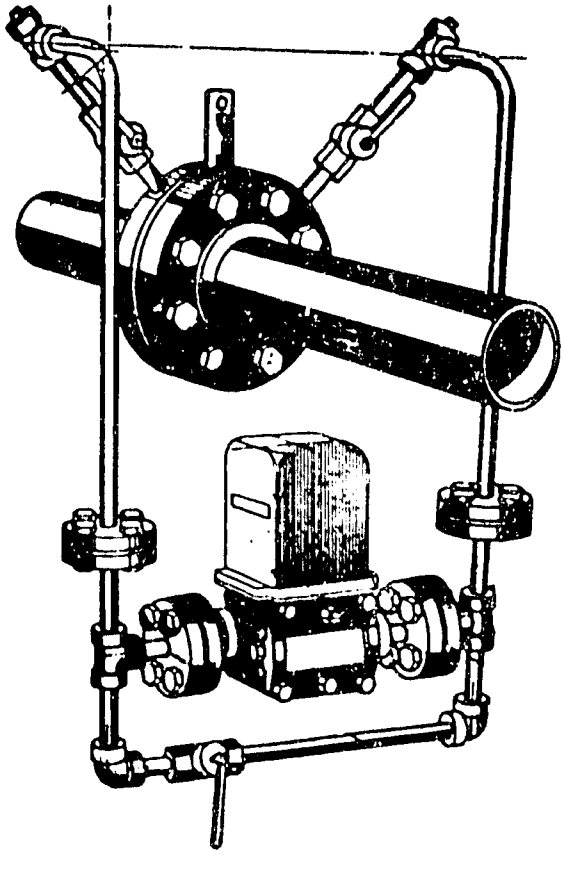
Sin embargo, esta ecuación es válida solamente cuando se siguen ciertas reglas de operación e instalación. Estas reglas incluyen longitudes mínimas rectas de tubería corriente hacia arriba o corriente hacia abajo con respecto a la placa de orificio, adecuada localización de las conexiones para medir presión para determinar la caída de presión, limpieza de esas conexiones, y estipulaciones mínimas de flujo. Cuando se siguen esas reglas, cualquiera de los términos de la ecuación de flujo son constantes o pueden medirse, de manera que el valor del flujo puede calcularse. El coeficiente de descarga, la relación Beta y el área son constantes de diseño y g_c es una constante por definición. La expansividad del fluido, se determina a partir de las condiciones de flujo y de las propiedades del fluido pero se considera constante dentro de una relación de capacidad del medidor para placas de orificio. La densidad del fluido, e, se determina de tablas estándar de densidad según el material empleado. Los cambios en densidad y presión con respecto a la temperatura para gases y vapor deben corregirse para incluirlos en los cálculos del flujo másico. La caída de presión, dp, provocada por el orificio puede medirse de varias formas que se discutirán más adelante. Una discusión completa para la ecuación de flujo puede encontrarse en la siguiente sección, Principios de operación.

Las plantas de orificio pueden instalarse en posición vertical u horizontal. La figura 2-2 muestra varias instalaciones típicas. Existen cuatro métodos comunes de instalación:

Bridas de orificio

Las bridas de orificio es el método más recomendado. Las conexiones para medir presión se perforan dentro de la misma brida, la cual se solda





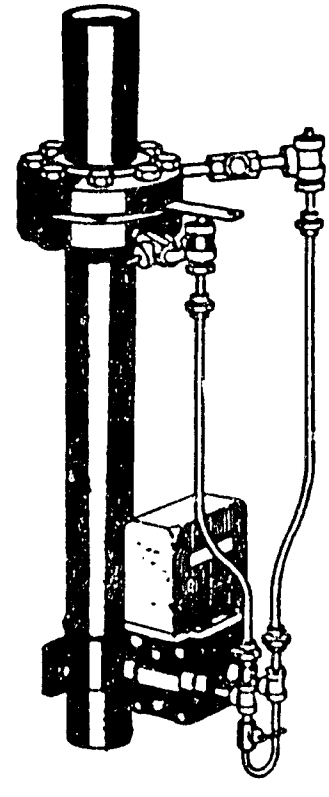


FIGURA 2-2 INSTALACIONES TIPICAS PARA PLACAS DE ORIFICIO

o atornilla a la tubería. La placa de orificio se inserta y asegura dentro de ellos.

Anillos portadores

Los anillos portadores es probablemente el segundo método más popular. Las conexiones para medir presión, típicamente conexiones de rincón, son perforadas en los anillos y la placa de orificio insertada dentro de ellos. El ensamble completo se inserta dentro de bridas existentes.

Bridas existentes y conexiones especiales

La placa puede insertarse dentro de las bridas existentes, y las conexiones para medir presión se pueden perforar en la misma tubería. Así como se usó ampliamente en el pasado, este método ha sido reemplazado por bridas de orificio más estandarizadas que incluyen conexiones en los mismo.

Tubos de medicion prefabricados

Consiste en una pieza de tubería cortada a una longitud determinada con una placa de orificio insertada y conexiones para medir presión perforadas. El aparato ensamblado se calibra e instala en la tubería. Esto es particularmente útil en diámetros menores de 5 cm donde la rugosidad de la tubería puede prohibir el uso de placas de orificio estándar (ver opciones para equipo más abajo).

La localización de la placa de orificio en la tubería es importante. Longitudes mínimas de tubería son requeridas corriente abajo y arriba de la placa con respecto a los accesorios y con respecto a las conexiones de recipientes grandes. Esto asegura condiciones de flujo estable a través del orificio. Si esas distancias mínimas no son observadas, la ecuación del flujo puede no ser válida. La figura 2-1 muestra

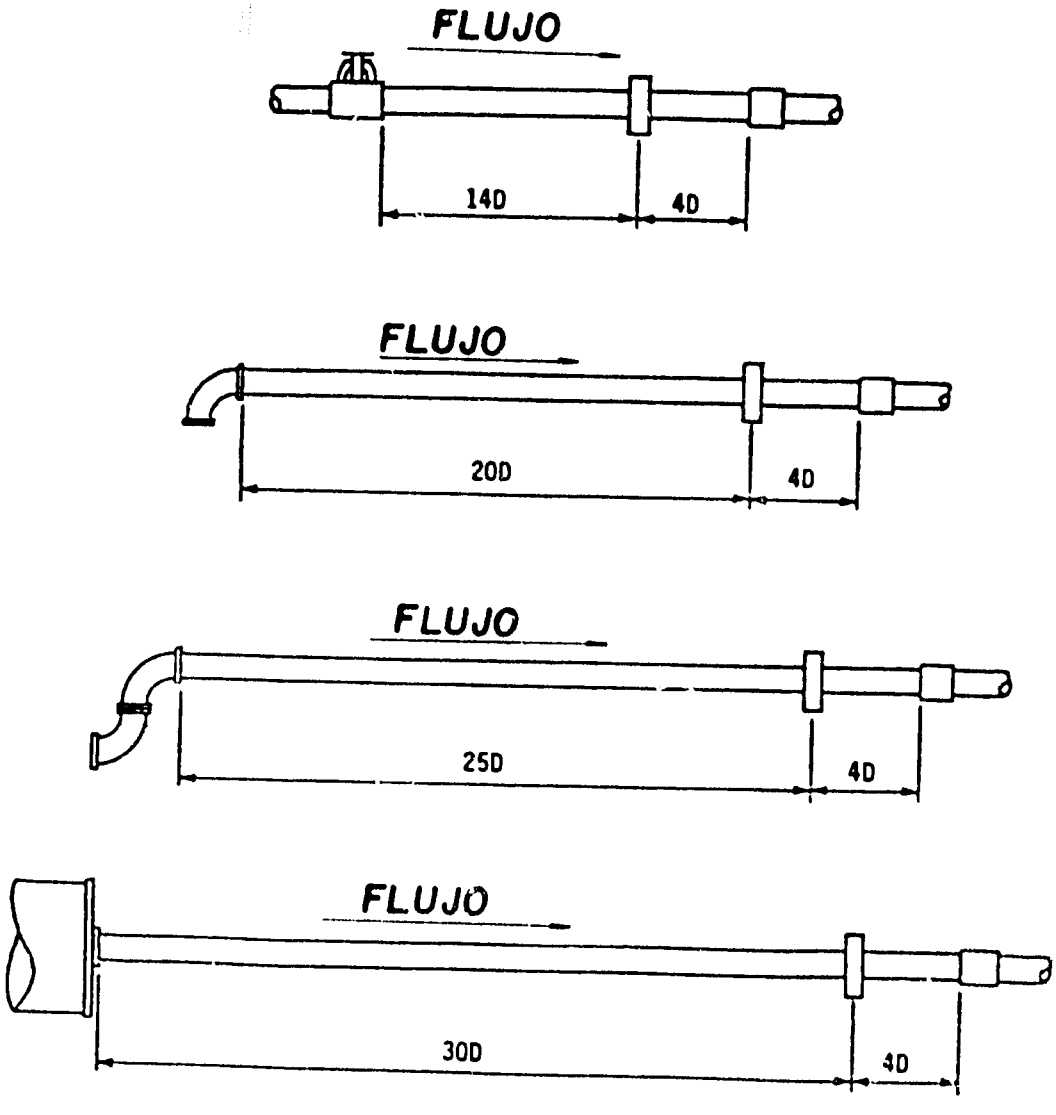


FIGURA 2-3 LONGITUDES MINIMAS RECTAS DE TUBERIA PARA PLACAS DE ORIFICIO Y TUBOS VENTURI

las longitudes mínimas requeridas para placas de orificio y tubos Venturi.

Para medir dp, se conecta a las conexiones para medir presión la tubería de presión y se conectan a un instrumento que mide la presión diferencial. Estos tubos usualmente se llenan con el fluido a ser medido.

La instalación normal requiere que éstos se inclinen para prevenir el atrape de burbujas de aire o gas si los líquidos son medidos, o columnas líquidas, si gas es medido. En el caso de condensables como vapor, el condensado es obligado a llenar los tubos. Si existen sólo pequeñas cantidades de condensado en el gas, éstos se colectan y drenan periódicamente.

Hay cuatro tipos básicos de equipo disponible para leer el dp y convertirla en valores de flujo usando la ecuación de flujo referida en la página 3.

Manómetros

Los manómetros son tubos abiertos por los extremos y llenados con líquido como aceite, agua o mercurio. Cuando se conecta a las conexiones para medir presión, la diferencia de presión entre las conexiones provoca que el líquido se eleve hacia la conexión de baja presión. La altura de la columna líquida es calibrada para indicar el dp en pulgadas de agua o de mercurio. El valor instantáneo de flujo es determinado con la ecuación de flujo, curvas de calibración, o tablas que relacionen dp con el valor del flujo. Los manómetros empleados con flujos de aire, ya sea portátiles o fijos, son típicamente construidos con plástico, llenados con agua o aceite, y graduados en pulgadas de agua. Los manómetros empleados para la medición de líquidos pesados como agua o aceite se llenan con mercurio y se gradúan en pulgadas de agua.

Son típicamente construidos de vidrio e instalados permanentemente. El precio de los manómetros varía entre $25 a $200.

Medidor de presión diferencial

Estos operan de la misma forma que los medidores de presión estándar. Sin embargo, donde un medidor estándar lee la diferencia entre la presión en la tubería y la presión atmosférica, un medidor de presión diferencial indica la diferencia en presión entre las conexiones de alta y baja presión. Se gradúan en pulgadas de agua con gamas típicas de 5, 10, 25, 50 y 150 pulgadas de agua. El flujo instantáneo es dado a partir de la ecuación de flujo, curvas de calibración, tablas que relacionan el dp con el flujo. Puede emplearse para tomar mediciones en forma portátil o permanente en aire, gases, aceite, agua y vapor. Se construyen de acero inoxidable, latón y bronce con varios diseños detectores de presión u mecanismos indicadores. Los precios de los medidores de presión diferencial varían entre $25 y $350.

Medidores de flujo másico

Estos son medidores de presión diferencial que detectan la diferencia de presión entre las conexiones para medir presión. Más que indicar el valor del dp, se calibran y gradúan en unidades específicas como pcm, gpm, o lbph. El valor instantáneo del flujo se lee directamente de la escala. Estos medidores son permanentes y se emplean para mediciones de aire, gases, aceite, agua y vapor. Su precio varía de $100 a $500.

Celdas de presión diferencial y microprocesadores

Son instrumentos electrónicos que suministran una gran flexibilidad en mediciones de flujo, y que se adecúan a las necesidades ingenieriles.

Cuando se conecta a las conexiones para medir presión, la celda de presión diferencial (celda dp o transductor de presión) convierte la diferencia de presión en una señal electrónica que es proporcional al dp. El valor instantáneo del flujo es determinado, alimentando esta señal a un microprocesador que la convierte en unidades específicas de flujo tales como pcm, gpm, o lbph. El flujo instantáneo puede integrarse contra el tiempo para totalizar el flujo. Celdas dp portátiles o permanentes y mircroprocesadores, pueden comprarse para efectuar mediciones de aire, gases, aceite, agua, y vapor. Si cierto número de flujos son medidos, estas unidades permiten efectuar varias lecturas secuenciales de varios flujos con una sola celda dp y un microprocesador. El precio para celdas dp varía de $300 a 600, y $1 500 a 2 500, para los microprocesadores.

2.1.2 Principios de operación

Una placa de orificio puede emplearse para medir flujo porque la presión y la velocidad del fluido están específicamente relacionadas. Cuando existe una restricción en el flujo provocada con un pequeño orificio, la velocidad aumenta y la presión baja. La ecuación de flujo para el orificio puede derivarse a partir de un balance de masa y de la ecuación de Bernoulli:

$$M = \frac{CD}{(1-B^4)^{\frac{1}{2}}} YA\,(dp\ 2\ g_c)^{\frac{1}{2}}$$

El flujo de masa (M), puede calcularse porque algunos términos de la ecuación son constantes o pueden ser medidos.

La ecuación de flujo no tiene un campo de aplicación infinito. Se basa en suposiciones teóricas como también en resultados experimentales observados. Las placas de orificio se dimensionan y aplican solamente en circunstancias para las cuales la ecuación es válida. A continuación se presenta una descripción de las variables y las

limitaciones relativas a las condiciones de flujo.

C_D es el coeficiente de descarga. Es la relación del flujo real a través del orificio con respecto al flujo teórico. Si no existen fricción y efectos de entrada o salida de flujo a través del orificio, C_D podría ser igual a 1.0. En la práctica éste no es el caso. Sin embargo, la experimentación ha revelado que C_D puede derivarse a partir de la geometría del orificio y tubería, y condiciones de flujo. Los siguientes parámetros mecánicos de diseño deben considerarse:

- Relación Beta, B - B es el cociente del diámetro del orificio sobre el diámetro interno de la tubería. Es el factor principal que influye el coeficiente de descarga, C_D. Existen límites prácticos para B sobre y bajo los cuales el flujo es inestable y C_D no es constante.

- Localización de la conexión para medir - Existen varias configuraciones posibles. Para un valor específico de B y dada una configuración de conexión, los valores de C_D tienen que determinarse experimentalmente.

- Número de Reynolds (Re_D) - Para un montaje dado de B y las conexiones para medir presión se tabula para $Re_D \geq 30\ 000$. Bajo este valor, C_D puede ser corregido con factores de corrección estándar, o encontrarse por calibración. A $Re_D < 5\ 000$, el flujo no es suficientemente estable y no es posible obtener un valor consistente para C_D.

- Rugosidad de la tubería - La rugosidad excesiva distorsiona el flujo y C_D. El efecto de la rugosidad se hace importante a diámetros pequeños. En la práctica, se especifica el diámetro mínimo para una rugosidad particular. La rugosidad restringe orificios no calibrados hasta tubería de 2 pulgadas o más de diámetro.

- Diámetro del tubo - El efecto del diámetro en C_D es pequeño pero puede compensarse si se desea gran exactitud.

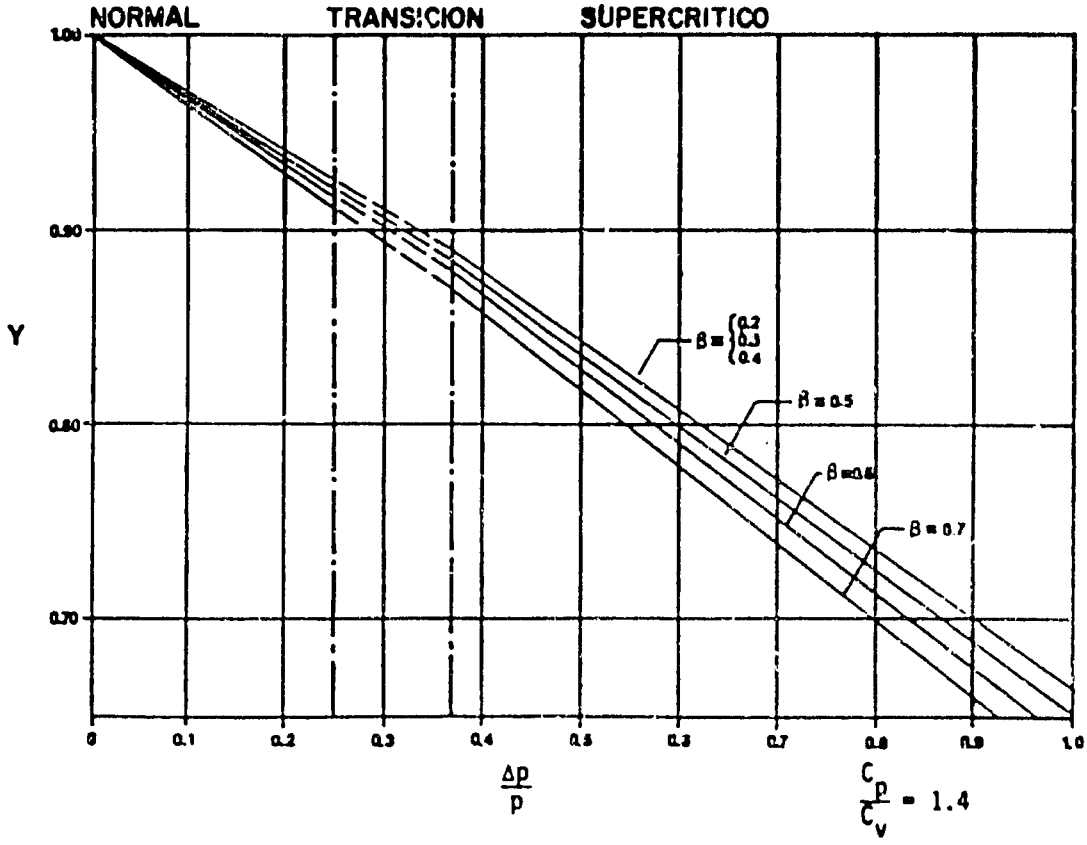
En la práctica, Cp se toma como una constante suponiendo que estos parámetros de diseño son considerados. Existen tablas estándar para el valor de CD o éste se obtiene por el fabricante.

Y es la expansividad de el fluido. Cuando un fluido compresible se mueve a través del orificio, de alta a baja presión, este se expande y afecta la relación entre la dp medida y el valor del flujo. El valor de Y es determinado a partir de las propiedades físicas del fluido y de las condiciones de flujo. Basada en la capacidad calorífica a volumen constante (C_v), la capacidad calorífica a presión constante (C_p), B y dp/p, Y puede encontrarse en tablas estándar. La figura 2-4 suministra los valores críticos de flujo de Y para placas de orificio de bordes rectangulares. Para líquidos Y es 1.0. A es el área del orificio. E es la densidad del fluido. Dp es el valor medido de la cáida de presión a través del orificio. Los orificios son diseñados para cubrir ciertos límites de dp a causa de las siguientes consideraciones:

- La dp se relaciona a M - Esto limita su relación de capacidad a 3:1. A dp altos, pequeños cambios en flujo provocan drásticos cambios en dp; A dp bajos, pequeños cambios en flujo casi no provocan cambio en dp. En un caso o en el otro, no se dispone de correlaciones exactas de dp con respecto a M. En la práctica, el orificio es dimensionado porque el dp medido bajo condiciones normales de flujo corresponde al 75% del valor máximo esperado a plena capacidad.

- Medidores disponibles - Los medidores comerciales de presión diferencial vienen con escalas o gamas no ajustables. Para muchas aplicaciones, se recomienda emplear 50 pulgadas de agua en la escala de medición.

- Flujo estrangulado - Con fluidos compresibles dp/p debe ser menor de 0.25. Sobre este valor la velocidad de flujo se aproxima a la condición de flujo estrangulado y la ecuación de flujo se transforma en una relación inválida.



NOTA: NO SE PUEDE USAR PARA CONEXIONES PARA MEDIR PRESION EN TUBERIA

FIGURA 2-4 EXPANSIBILIDAD DE FLUIDOS, Y, EN ORIFICIOS CUADRADOS.

2.1.3 Opciones de equipo

2.1.3.1 Placa de orificio de borde rectangular

Descripción

La cara principal del orificio es plana y el borde del orificio es afilado y "rectangular". El orificio se dimensiona para un valor de flujo anticipado. Los valores de C_D son suministrados según el flujo requerido y la configuración de las conexiones usadas para medir presión. El plato puede instalarse entre bridas con un anillo portador, o entre bridas existentes con conexiones para medir presión de diferentes configuraciones (ver abajo, tubos de medición prefabricados). La figura 2-5 es un dibujo esquematico del orificio de borde rectangular. El precio de estos orificios varía entre $25 a $100, dependiendo del tamano y materiales de construcción. Las bridas para orificios (con conexiones para medir) varían entre $200 a $ 1 000, dependiendo del tamaño.

Aplicaciones recomendadas

Flujos de gas, liquido, y vapor pueden medirse en tubería de 5 a 80 cm de diámetro. Para mediciones de energía éstas incluyen (pero no están limitadas a) suministro de vapor por calderas, vapor yendo al proceso, y agua para calderas o procesos.

Limitaciones

La placa de orificio limita el flujo porque provoca una pérdida permanente de presión debido a la fricción. Si la pérdida de presión es muy alta, el flujo puede reducirse severamente al incrementarse el costo del bombeo. Cuando las condiciones de flujo cambian, las placas pueden cambiarse. Si se requiere un campo de aplicación mayor, pueden insta-

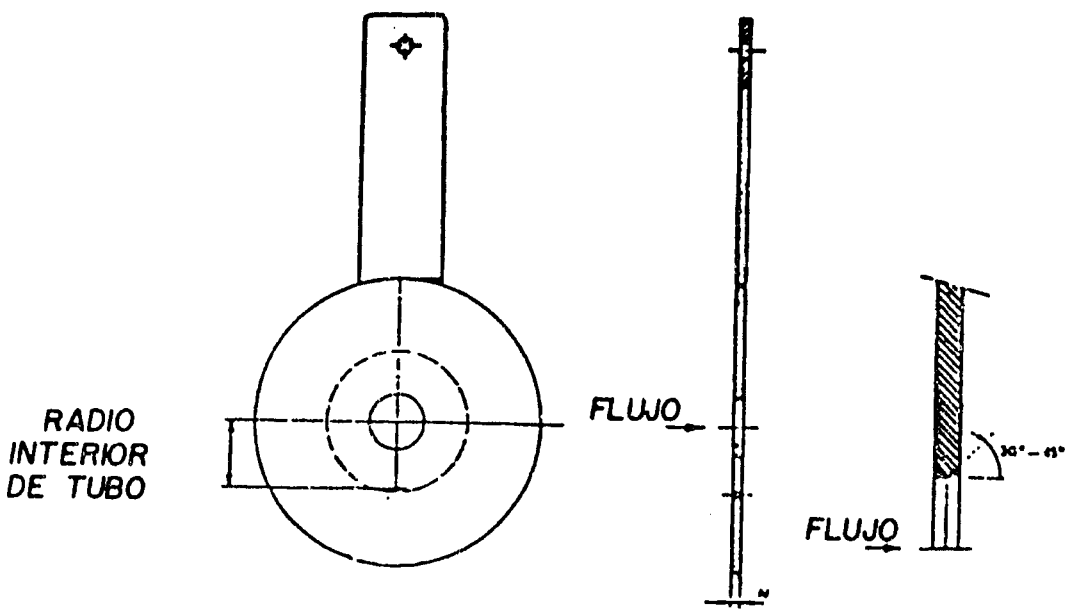


FIGURA 2-5 DISEÑO DE UNA PLACA DE ORIFICIO DE BORDE RECTANGULAR

larse dos planchas con diferentes valores de B localizados en la misma línea. Flujo desarrollado (o flujo estable) es requerido: Re $\geq$ 30 000 se recomienda y se especifican longitudes mínimas de tubería corriente arriba o abajo de los accesorios. Para evitar inestabilidad con gases compresibles y vapor, dp/p $\leq$ 0.25. La rugosidad de la tubería complica las aplicaciones a diámetros menores de 5 cm, y la dificultad en su fabricación establece el diámetro máximo en 80 cm.

Exactitud y confiabilidad

La exactitud de una placa de orificio sin calibrar es de $\pm$ 1.5% de escala completa. Un medidor dimensionado para medir 100 Lb/h se espera esté dentro $\pm$ 1.5 Lb/h en los límites de 30 a 100 Lb/h. Cuando se ha calibrado, se espera una exactitud de $\pm$ 0.75% de escala completa. Cuando se miden gases compresibles o vapor, Y debe incluirse porque puede contribuir hasta un error adicional de 5%.

Las placas de orificio son altamente confiables. Debe tenerse cuidado al considerar el Re, el dp y su gama, y las longitudes mínimas de tubería requeridas. Los problemas más comunes relativos a su confiabilidad se relacionan con desgaste y una instalación inadecuada de las conexiones para medir presión. El borde del orificio debe permanecer afilado y debería de revisarse por lo menos una vez cada seis meses. La tubería y las tomas de presión deben de mantenerse limpias y libres de gas atrapado cuando se miden líquidos, o libre de líquidos cuando se miden gases.

2.1.3.2 Tubos de medición prefabricados

Estos medidores se instalan permanentemente en tubería de longitud diseñada especialmente con conexiones para medir presión. El conjunto se instala en la tubería donde se va a medir el flujo. El medidor se dimensiona para cubrir una determinada gama de flujos y se calibra para encontrar el valor de C_D. Su precio típico varía

entre $ 200 y $ 500, el cual depende del tamaño y de los materiales de construcción.

Aplicaciones recomendadas

Adecuadas para flujos en tuberías de diámetro menor a 5 cm. Una aplicación común es la medición de gas natural dirigida hacia algún equipo de proceso.

Limitaciones

No se pueden medir sobre una gama infinita. Son dimensionados para un flujo determinado y tienen una relación de capacidad de medición de 3:1. Su nivel de flujo mínimo se determina por calibración a Re $\geq$ 30 000. Para evitar flujo estrangulado en gases, dp/p debe ser menor de 0.25. El tamaño de la tubería oscila entre 1 cm y 5 cm ó más. Cuando se obtienen condiciones de flujo diferentes a las del diseño, debe cambiarse el tubo de medición. La rugosidad no es un factor limitante, ya que el medidor está construido con tubería lisa.

Exactitud y confiabilidad

Cuando está calibrado, su exactitud es de $\pm$ 0.50% de la escala completa. Un medidor calibrado para 1 Lb/h tiene una exactitud de 0.005 Lb/h dentro de los límites de 0.3 a 1 Lb/h. Lo que más influye en la exactitud es la instalación; debe tenerse cuidado al instalar el medidor y la tubería de las conexiones para medir presión.

Tubos de medición prefabricados

Son altamente confiables cuando se emplean dentro de los límites de calibración. Si se remueven para limpieza o inspección deberían re-

calibrarse antes de ponerlos nuevamente en servicio. Las conexiones para medir presión y sus tuberías deben mantenerse limpias y libres de gas, líquido, y sólidos atrapados.

2.1.3.3 Orificios especiales: cuarto de círculo, entrada cónica, tobera ISA, tobera Venturi, tubo Dall (2)

Estos orificios son diseñados para situaciones especiales de flujo. Para flujos pequeños o de alta viscosidad se emplea el cuarto de círculo y el de entrada cónica. Su uso en mediciones de energía es limitado. Las toberas ISA y Venturi, y el tubo Dall (2) pueden usarse para mediciones de flujos elevados. Su precio varía de $ 50 a $ 300, dependiendo del tipo, tamaño y materiales de construcción. Dependiendo en su tamaño el precio de las bridas de orificio, varía de $ 200 a $ 1 000.

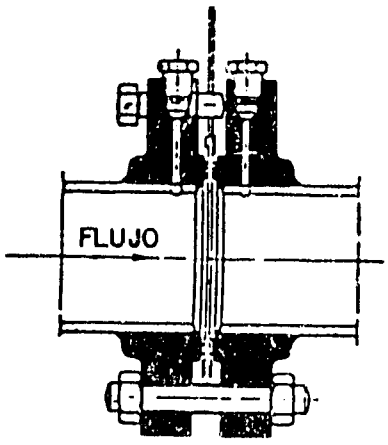
2.1.3.4 Configuraciones de conexiones para medir presión

Se dispone de varias configuraciones. La figura 2-6 ilustra cada una de las opciones existentes, las cuales se describen seguidamente:

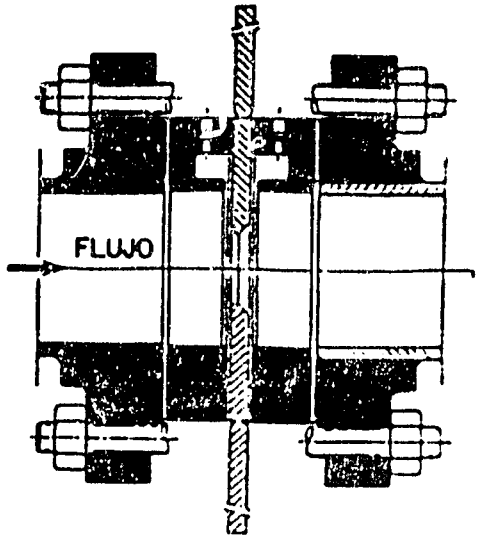
- Conexiones en brida - Son las más comúnmente recomendadas. Debido a su estandarización conviene su uso y fácilmente pueden reemplazarse. Las conexiones son perforadas en bridas especiales 2.5 cm en la corriente hacia arriba o hacia abajo de la placa. Los valores de los coeficientes de flujo se dan en la tabla 2-1.

- Conexiones de rincón - Son las segundas más ampliamente empleadas. Normalmente, se perforan en anillos portadores que pueden insertarse dentro de bridas existentes.

- Conexiones de radio, de vena contracta, y de tubería - Ampliamente utilizadas en el pasado y reemplazadas actualmente



CONEXIONES EN BRIDA



ANILLO PORTADOR CON CONEXION DE RINCON

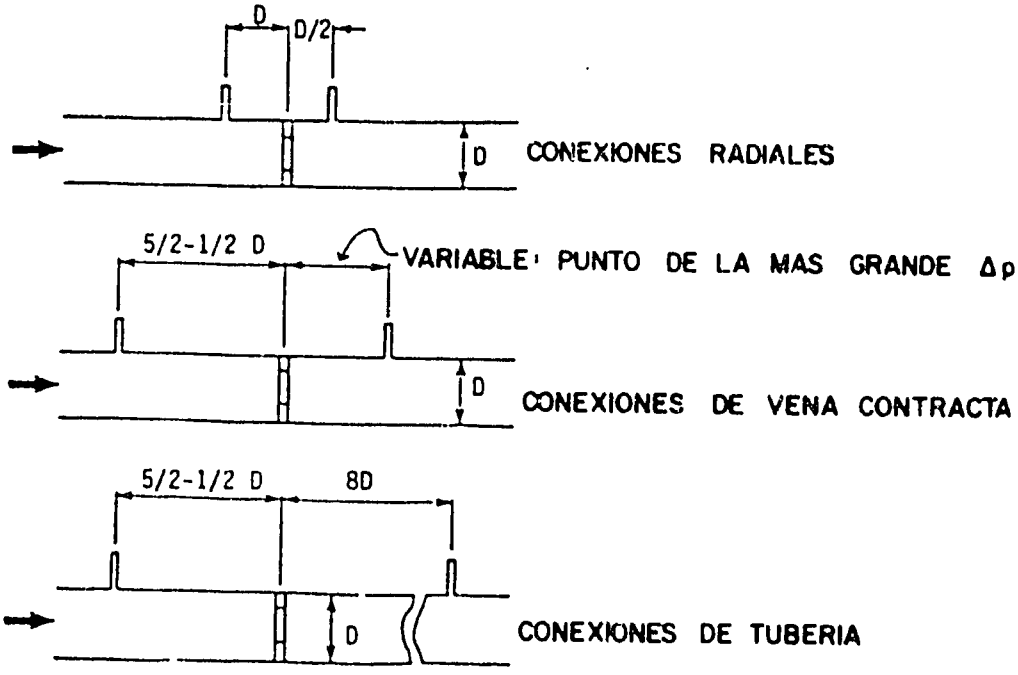


FIGURE 2-6 CONFIGURACIONES DE LAS CONEXIONES PARA MEDIR PRESION

CUADRO 2-1 COEFICIENTE DE FLUJO $C_p/\sqrt{1-B^4}$ EN FUNCION DEL NUMERO DE REYNOLDS Y LA RAZON BETA

Para un tubo de 3 pulgadas:

$\backslash R_D$ / β	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	8,000	10,000	15,000	20,000	30,000	40,000	50,000	100,000	500,000	10^6
0.100	0.6120	0.6054	0.6032	0.6021	0.6014	0.6010	0.6001	0.6001	0.5996	0.5994	0.5992	0.5991	0.5990	0.5989	0.5985	0.5983
.150	.6186	.6100	.6070	.6050	.6040	.5993	.5983	.5975	.5967	.5963	.5961	.5959	.5958	.5955	.5953	.5953
.200	.6287	.6119	.6061	.6031	.6015	.6007	.5992	.5984	.5974	.5968	.5963	.5960	.5958	.5955	.5952	.5952
.250		.6189	.6115	.6071	.6040	.6015	.6027	.6017	.6002	.5991	.5988	.5984	.5982	.5978	.5974	.5974
.300		.6274	.6153	.6119	.6110	.6090	.6067	.6055	.6037	.6029	.6019	.6014	.6012	.6007	.6002	.6002
.350			.6270	.6212	.6175	.6152	.6123	.6106	.6085	.6073	.6061	.6055	.6052	.6045	.6039	.6039
.400			.6390	.6311	.6270	.6239	.6201	.6178	.6147	.6132	.6117	.6109	.6101	.6094	.6089	.6088
.450				.6459	.6395	.6356	.6306	.6275	.6234	.6211	.6192	.6187	.6175	.6163	.6153	.6152
.500				.6606	.6550	.6524	.6484	.6465	.6432	.6422	.6391	.6380	.6371	.6354	.6341	.6339
.550				.6753	.6742	.6731	.6651	.6591	.6510	.6471	.6427	.6410	.6398	.6369	.6351	.6352
.600				.7335	.7169	.7056	.6917	.6834	.6722	.6666	.6610	.6583	.6566	.6532	.6506	.6502
.625				.7571	.7375	.7244	.7090	.6982	.6850	.6785	.6719	.6686	.6667	.6628	.6596	.6592
.650				.7813	.7613	.7459	.7266	.7151	.6995	.6922	.6845	.6805	.6782	.6737	.6701	.6695
.675				.8150	.7884	.7702	.7477	.7343	.7163	.7073	.6953	.6938	.6911	.6858	.6815	.6809
.700				.8499	.8106	.7977	.7715	.7559	.7350	.7245	.7143	.7091	.7058	.6995	.6916	.6939

Para un tubo de 4 pulgadas:

$\backslash R_D$ / β	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	8,000	10,000	15,000	20,000	30,000	40,000	50,000	100,000	500,000	10^6
0.100	0.6115	0.6015	0.6010	0.5996	0.5986	0.5983	0.5975	0.5971	0.5967	0.5964	0.5961	0.5960	0.5959	0.5955	0.5957	0.5956
.150	.6213	.6050	.6033	.6039	.5995	.5986	.5978	.5966	.5956	.5951	.5947	.5944	.5943	.5941	.5940	.5939
.200		.6151	.6081	.6059	.6040	.6017	.6000	.5990	.5977	.5970	.5963	.5960	.5958	.5955	.5951	.5950
.250		.6230	.6144	.6102	.6076	.6059	.6038	.6025	.6006	.5995	.5989	.5987	.5984	.5979	.5975	.5974
.300		.6317	.6212	.6160	.6126	.6107	.6081	.6065	.6044	.6034	.6023	.6018	.6015	.6015	.6011	.6002
.350			.6360	.6236	.6195	.6165	.6135	.6116	.6090	.6076	.6061	.6057	.6053	.6045	.6039	.6038
.400			.6429	.6343	.6291	.6257	.6214	.6178	.6152	.6135	.6119	.6110	.6105	.6094	.6056	.6055
.450				.6463	.6431	.6354	.6324	.6259	.6247	.6215	.6194	.6182	.6175	.6161	.6150	.6148
.500				.6731	.6631	.6564	.6481	.6431	.6364	.6330	.6296	.6281	.6271	.6251	.6235	.6233
.550					.6863	.6793	.6692	.6625	.6535	.6484	.6439	.6413	.6400	.6371	.6350	.6347
.600					.7292	.7158	.6991	.6891	.6757	.6690	.6633	.6590	.6569	.6530	.6498	.6494
.625					.7530	.7371	.7173	.7054	.6896	.6817	.6737	.6698	.6674	.6626	.6588	.6584
.650					.7768	.7611	.7378	.7238	.7054	.6958	.6864	.6818	.6790	.6735	.6690	.6686
.675					.8101	.7886	.7613	.7439	.7229	.7120	.7016	.6956	.6923	.6857	.6794	.6797
.700					.8454	.8197	.7868	.7655	.7421	.7301	.7172	.7109	.7071	.6994	.6932	.6925
.725						.8554	.8182	.7958	.7760	.7512	.7362	.7268	.7253	.7163	.7081	.7072
.750						.8793	.8557	.8295	.7946	.7774	.7600	.7513	.7461	.7356	.7272	.7262

Todos los valores debajo de la línea escalonada son extrapolaciones.

por conexiones en bridas estandarizadas. Se perforan directamente en la tubería y el orifico se localiza entre bridas existentes. Las conexiones de radio se sitúan un diámetro corriente arriba y ½ diámetro corriente abajo. La conexión de vena contracta se localiza un diámetro corriente arriba, y la posición de la conexión corriente abajo depende de la relación Beta (B). Las conexiones de tubería se localizan dos y ½ diámetros corriente arriba y ocho corriente abajo.

(2) Ver páginas 4 y 6

2.2. TUBOS VENTURI

Los tubos Venturi son empleados para medir el flujo en tuberías y conductos. En mediciones de energía pueden aplicarse a gases, como aire y vapor y líquidos como agua y aceite. Algunas aplicaciones comunes incluyen medición de flujo de aire en grandes conductos, vapor al proceso, agua de proceso y vapor de salida en calderas de vapor.

Se aplican ampliamente en la industria. Son moderadamente fáciles de fabricar consisten en un tubo que converge suavemente a un diámetro menor (garganta) y luego diverge hacia el diámetro corriente abajo. Los tubos Venturi usualmente están hechos de piezas fundidas de metal, las cuales suelen tornearse. En conductos rectangulares, los Venturi se fabrican con hojas de metal. Así como los Venturi son más caros que las placas de orificio, su costo de instalación es bajo. Sin embargo, en muchos casos, su costo instalado total es comparable. Cuando se instalan y mantienen adecuadamente suministran datos exactos y confiables para mediciones de flujo.

Los tubos Venturi son adecuados para algunas situaciones especiales de flujo. Si el costo del fluido suministrado es alto, los Venturi son atractivos por su baja pérdida permanente de presión. Si es necesario medir el flujo de fluidos compresibles de alta velocidad (Re $\geq$ 500 000), los tubos Venturi son escogidos porque evitan el flujo estrangulado. Los tubos Venturi tienen baja sensibilidad al desgaste y encuentran uso en flujos erosivos como aire con sólidos suspendidos. Finalmente en conductos largos, especialmente rectangulares donde otros medidores de flujo son caros de fabricar o calibrar, los tubos Venturi son especialmente apropiados.

2.2.1 Operación básica e instalación

Los tubos Venturi son similares a las placas de orificio con respecto a su instalación y operación. Al igual que las placas de orificio, los tubos Venturi son medidores inferenciales que no miden directamente el flujo, pero que en cambio, miden la caída de presión o presión diferencial, que es proporcional al valor del flujo.

Midiendo la caída de presión y conociendo la relación proporcional de la velocidad del flujo, se puede calcular una velocidad del flujo inferida. La velocidad de flujo calculada es un valor instantáneo. Un flujo totalizado puede determinarse mediante la conversión de la caída de presión medida a una señal electrónica que un microprocesador utiliza para calcular la velocidad de flujo y luego integrarlo con respecto al tiempo.

Los tubos Venturi están disponibles en una gama de diseño que dependen primariamente del diseño del conducto o tubería portadora del fluido a ser medido. Para tubería con diámetro menos de 80 cm, los tubos Venturi se fabrican por fundición de acero inoxidable u otro metal. En grandes conductos como entradas para ventiladores o salida de gases de chimenea, los tubos Venturi se fabrican con hojas de metal, ya sea rectangulares o redondos. Los tubos Venturi pueden medir los mismos fluidos que las placas de orificio, pero como ellos pueden ser construidos para coincidir con el tamaño y la forma de casi cualquier conducto, pueden emplearse donde no se utilizan los medidores de orificio. En adición, los tubos Venturi provocan menos caída de presión que las placas de orificio y se emplean donde los costos de bombeo son altos o donde una placa de orificio provoca una caída de presión muy elevada que interfiere con la exactitud de la medida. Finalmente, el diseño de los tubos Venturi los hace menos susceptibles al desgaste ocasionado por fluidos erosivos y pueden ser escogidos cuando se mide vapor húmedo o fluidos con material suspendido.

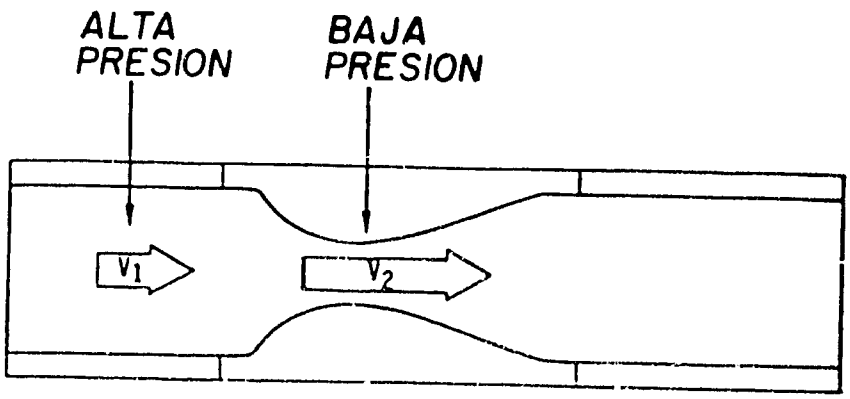


FIGURA 2-7 FLUJO A TRAVES DE UN TUBO VENTURI

- Conexiones por brida (flange) - En grandes diámetros de tubería (mayor de 10 cm) y en conductos rectangulares, las entradas y salidas tienen conexiones por bridas para insertar el tubo Venturi en la tubería.

Para los métodos anteriores, no se requieren conexiones especiales para medir presión. Las conexiones son a menudo suministradas por el fabricante del equipo.

Para asegurar la exactitud en las medidas obtenidas con el tubo Venturi, se requieren longitudes mínimas de tubería para flujo no distorsionado corriente arriba y abajo del tubo Venturi (vea figura 2-3). La presencia de flujo distorsionado (ausencia de flujo estable y alineado) a través del tubo Venturi puede significar la invalidez de la ecuación de flujo.

Hay cuatro tipos básicos de equipo disponibles para leer la dp y convertirla en valores de flujo usando la ecuación de flujo referida en la página 2.

- Manómetros - Son tubos abiertos por los extremos y llenados con líquido como aceite, agua o mercurio. Cuando se conectan a las conexiones para medir presión, la diferencia de presión entre las conexiones provoca que el líquido se eleve hacia la conexión de baja presión. La altura de la columna líquida es calibrada para indicar el dp en pulgadas de agua o de mercurio. El valor instantáneo del flujo es determinado con la ecuación de flujo, curvas de calibración, o tablas que relacionen dp con el valor del flujo. Los manómetros empleados con flujos de aire, ya sea portátiles o fijos, son típicamente construidos con plástico, llenados con agua o aceite, y graduados en pulgadas de agua. Los manómetros empleados para la medición de líquidos pesados como agua o aceite se llenan con mercurio y se gradúan en pulgadas de agua. Son típicamente construidos de vidrio e instalados permanentemente. El precio de los manómetros varía entre $ 25 a $ 200.

Medidor de presión diferencial - Estos operan de la misma forma que los medidores de presión estándar. Sin embargo, donde un medidor estándar lee la diferencia entre la presión en la tubería y la presión atmosférica, un medidor de presión diferencial indica la diferencia en presión entre las conexiones de alta y baja presión. Se gradúan en pulgadas de agua con gamas típicas de 5, 10, 25, 50 y 150 pulgadas de agua. El flujo instantáneo es dado a partir de la ecuación de flujo, curvas de calibración, o tablas que relacionan el dp con el flujo. Pueden emplearse para tomar mediciones en forma portátil o permanente en aire, gases, aceite, agua y vapor. Se construyen de acero inoxidable, latón y bronce con varios diseños detectores de presión y mecanismos indicadores. Los precios de los medidores de presión diferencial varían entre $ 25 a $ 350.

Medidores de flujo másico - Estos son medidores de presión diferencial que detectan la diferencia de presión entre las conexiones para medir alta y baja presión. Más que indicar el valor del dp, se calibran y gradúan en unidades específicas como pcm, gpm o lbph. El valor instantáneo del flujo se lee directamente de la escala. Estos medidores son permanentes y se emplean para mediciones de aire, gases, aceite, agua y vapor. Su precio varía de $ 100 a $ 500.

Celdas de presión diferencial y microprocesadores - Son instrumentos electrónicos que suministran una gran flexibilidad en mediciones de flujo, y que se adecúan a las necesidades ingenieriles. Cuando se conectan a las conexiones para medir presión, la celda de presión diferencial (celda dp o transductor de presión) convierte la diferencia de presión en una señal electrónica que es proporcional al dp. El valor instantáneo del flujo es determinado alimentando esta señal a un microprocesador que la convierte en una unidad específica de flujo, tales como pcm, gpm o lbph. El flujo ins-

tantáneo puede integrarse contra el tiempo para totalizar el flujo. Celdas dp portátiles o permanentes y microprocesadores, pueden comprarse para efectuar mediciones de aire, gases, aceite, agua y vapor. Si cierto número de flujos son medidos, estas unidades permiten efectuar varias lecturas secuenciales de varios flujos con una sola celda dp y un microprocesador. El precio para celdas dp varía de $ 300 a $ 600, y $ 1 500 a $ 2 500 para los microprocesadores.

2.2.2 Principios de operación

El tubo Venturi opera exactamente como los medidores de orificio. Cuando existe una restricción en el flujo provocada con un pequeño orificio, la velocidad aumenta y la presión baja. La ecuación de flujo para el orificio puede derivarse a partir de un balance de masa y de la ecuación Bernoulli:

$$M = \frac{Cd}{(1-B^4)^{\frac{1}{2}}} YA\,(dp\ e\ 2\ g_c)^{\frac{1}{2}}$$

El flujo másico (M), puede calcularse porque algunos términos de la ecuación son constantes o pueden ser medidos.

La diferencia importante entre ambos se refiere a los límites de aplicacion, los cuales definen la validez de la ecuación de flujo. La entrada convergente y la salida divergente del tubo Venturi causa menos turbulencia y pérdidas debido a fricción que las de las placas de orificio y, entonces, cambian los límites de aplicación. C_D es el coeficiente de descarga: es la relación de flujo real a flujo teórico y compensa para efectos de fricción y viscosidad. Para Venturis, C_D puede ser mayor de 1.0. Experimentalmente se ha comprobado que C_D puede definirse a partir de la geometría del tubo Venturi y las condiciones de flujo. Por lo cual deben considerarse los siguientes parámetros de diseño:

Relación Beta - B, es el cociente del diámetro de la garganta con respecto al diámetro de entrada. Existen límites prácticos para B (sobre y bajo), en los cuales el flujo es inestable y C_D no es una constante.

Número de Reynolds (Re) - Para una B dada, C_D se tabula experimentalmente a Re = 200 000. A valores menores de este Re, los valores de C_D no son consistentes.

- Rugosidad de tubería - Excesiva rugosidad en la tubería distorsiona el flujo y C_D. La influencia de la rugosidad se incrementa cuando el diámetro de la tubería decrece. En la práctica, se especifica un diámetro mínimo para un rugosidad determinada. Por lo cual ésta restringe el diámetro a 5 cm o más en tubos Venturi no calibrados.

- Diámetro del tubo - El efecto del diámetro en C_D es muy pequeño pero puede compensarse si se desea gran exactitud.

En la práctica, C_D es supuesta constante según lo anterior. El valor de C_D debe ser suministrado por el fabricante del tubo Venturi.

Y = es la expansividad del fluido (ver página 8)

A = es el área de la garganta

e = es la densidad del fluido

dp = es la medida de la caída de presión. Los tubos Venturi se dimensionan para proporcionar ciertos valores de dp:

- Flujo estrangulado - Con fluidos compresibles dp/p debe ser menos de 0.25. Sobre este valor la velocidad del fluido se acerca a flujo estrangulado que invalida la ecuación del flujo.

dp relacionado con M - Esto limita la relación de capacidad del medidor a 3:1. A alta presión, un pequeño cambio en flujo ocasiona un cambio drástico en dp; a muy bajo dp, un pequeño cambio en flujo casi no provoca cambio en dp. En cualquiera de los dos casos no es posible correlacionar con exactitud el dp con el M. En la práctica el tubo Venturi se dimensiona para que la dp medida en condiciones normales de flujo corresponda a un 75% del máximo valor esperado a flujo pleno.

- Medidores disponibles - Medidores de presión diferencial son vendidos con un juego de escalas de varios límites. Para muchas aplicaciones, se recomienda 50" de agua en la escala de medición.

Los tubos Venturi tienen diferentes relaciones entre dp y el flujo que placas de orificio. Para el mismo flujo, los tubos Venturi tienen bajo dp. Esto favorece el uso de los Venturi a condiciones de flujo elevado y el de las placas de orificio a bajos valores de flujo.

2.2.3 Opciones de equipo

2.2.3.1 Tubo Venturi fundido con convergencia torneada.

Descripción

Este tubo Venturi se fabrica por fundición, típicamente en acero. Como se observa en la figura 2-8, el diámetro de entrada es el mismo que el de la tubería, así como la sección convergente se estrecha suavemente en un ángulo de 20°.

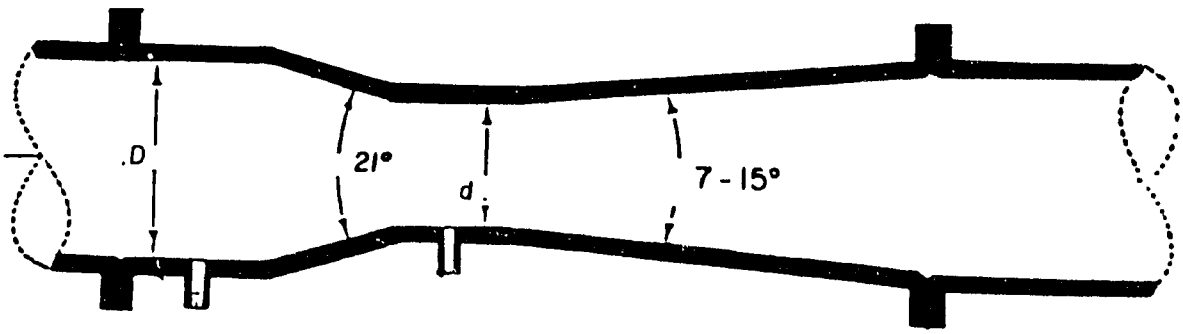


FIGURA 2-8 TUBO VENTURI FABRICADO POR FUNDICION

El diámetro de la garganta es determinado por la B seleccionada y la sección de salida diverge en un ángulo de 7° a 15°. La entrada, convergencia y la sección de garganta son torneadas para conseguir paredes lisas. Las conexiones para medir presión son colocadas por el fabricante. Los tubos Venturi pequeños, con diámetros menor de 10 cm, normalmente se roscan o soldan a la tubería. Modelos de mayor diámetro se equipan con bridas. El costo de los tubos Venturi fundidos y maquinados varía de $ 200 a $ 1 000 dependiendo del tamaño y materiales de construcción. Este costo no incluye el medidor de presión.

Aplicaciones recomendadas

Apropiados para medir gas, vapor y líquidos en tuberías o conductos de 5 a 25 cm de diámetro. Los de menor tamaño, con diámetros menores de 5 cm están disponibles pero se recomienda calibrarlos. Los tubos Venturi se recomiendan especialmente donde se requiere mantener una caída de presión baja a causa de el costo elevado del bombeo, o donde una alta caída de presión puede reducir severamente el flujo. También se recomiendan con fluidos erosivos, como aire o agua con sólidos en suspensión, o con vapor húmedo. Son particularmente adecuados para altos flujos donde la placa de orificio podría provocar alta caída de presión y una velocidad de fluido próximo a la condición de flujo estrangulado. Usos en mediciones de energía incluyen vapor de calderas, requerimentos de agua y vapor para proceso, agua para calderas.

Limitaciones

El tubo Venturi limita el flujo porque provoca una pérdida permanente de presión. Si la pérdida es muy alta, el flujo puede reducirse severamente, o incrementar los costos de bombeo. Los tubos Venturi

se dimensionan para cubrir ciertos límites de flujo particular y tienen una relación de capacidad de 3:1. Si las condiciones de flujo cambian con respecto a las de diseño, debe instalarse un nuevo tubo Venturi con diferente B y C_D. Se requiere flujo desarrollado: Re $\geq$ 200 000 se recomienda y se especifican las longitudes mínimas corriente arriba y abajo con respecto a los accesorios. Para evitar inestabilidad con gases comprensibles y vapor, dp/p debe ser menor de 0.25.

Exactitud y confiabilidad

Cualquier tubo Venturi no calibrado tiene una exactitud de $\pm$ 1.5% de escala completa. Un tubo Venturi de 100 lb/h se espera esté con $\pm$ 1.5 lb/h dentro de los límites de 30 a 100 lb/h. Típicamente, la exactitud es disminuida conforme se opera a la más baja capacidad. La exactitud calibrada es $\pm$ 0.75% de escala completa. En mediciones de gases o vapor, la expansividad del fluido puede contribuir con un 5% de error adicional.

Los tubos Venturi son altamente confiables. Con fluidos erosivos los tubos Venturi son más confiables que las placas de orificio porque son menos sensitivos y menos susceptibles al desgaste. Debe seguirse cuidadosamente las recomendaciones que especifican los límites de Re, dp y su gama de aplicación y longitudes mínimas de tubería. Asimismo, es importante asegurarse de que la tubería y las conexiones para medir presión estén libres de suciedad o gas atrapado cuando se miden líquidos y libre de líquidos atrapados cuando se miden gases.

La primera desventaja de los tubos Venturi se presenta cuando las condiciones de flujo cambian drásticamente, por lo cual se requiere un nuevo tubo Venturi con diferente diseño. Con placas de orificio, este cambio es barato y puede representar un paro de producción corto; caso contrario de los Venturi, los cuales son caros y su instalación representa un paro de producción mayor.

Para entender cómo funciona un tubo Venturi, recuerde que las velocidades y presión del fluido están relacionadas. El tubo Venturi reemplaza una sección de tubería o conducto, por lo cual el flujo debe pasar a través de él. La velocidad del flujo debe incrementarse al pasar la garganta (ver figura 2-7). Este aumento de velocidad es acompañado por una caída proporcional de presión que relaciona el flujo másico por la ecuación:

$$M = \frac{CD}{(1 - B^4)^{\frac{1}{2}}} YA\,(dp\ e2g_c)^{\frac{1}{2}}$$

donde:
- M = flujo de masa
- CD = coeficiente de descarga
- B = relación Beta - proporcionalidad del diámetro del orificio con respecto al diámetro de la tubería
- Y = expansividad del fluido
- A = área del orificio
- dp = caída de presión medida
- e = densidad del fluido
- g_c = constante gravitacional

Note que para un tubo Venturi instalado en un flujo específico, esta ecuación se reduce a:

$$M = \text{constante} \times (\text{alta presión} - \text{baja presión})^{\frac{1}{2}}$$

Sin embargo, esta ecuación es válida solamente cuando se siguen ciertas reglas de operación e instalación. Estas reglas incluyen longitudes mínimas rectas de tubería "corriente hacia arriba" o "corriente hacia abajo" con respecto al tubo Venturi, adecuada localización de las conexiones para medir la caída de presión, limpieza de esas conexiones y estipulaciones mínimas de flujo. Cuando se siguen esas reglas, cualquiera de los términos de la ecuación de flujo son constantes o pueden medirse, de manera que el valor del flujo puede calcularse. El coeficiente de descarga (C_D), la relación Beta y el área son constantes de diseño y g_c es una constante por definición. La expansividad del fluido, se determina a partir de las condiciones de flujo y de las propiedades del fluido, pero se considera constante dentro de la relación de capacidad de medidor de 3:1 para tubos Venturi. La densidad del fluido, e, se determina de tablas estándar de densidad según el material empleado. Los cambios en densidad y presión con respecto a la temperatura para gases y vapor deben corregirse para incluirlos en los cálculos del flujo másico. La caída de presión, dp, provocada por el tubo Venturi puede medirse de varias formas que se discutirán más adelante. Una discusión completa para la ecuación de flujo puede encontrarse en la siguiente sección, Principios de Operación.

Los tubos Venturi pueden instalarse vertical y horizontalmente. Existen tres métodos estándar de instalación:

- Conexiones roscadas - En pequeños diámetros (menor de 10 cm), los tubos Venturi son fundidos de metal y equipados con conexiones roscadas que se colocan a la entrada y salida. En tubo Venturi se enrosca sequidamente a la tubería.

- Conexiones soldadas - Para tubería los tubos Venturi pueden instalarse por soldadura.

2.2.3.2 Tubo Venturi fundido con convergencia rugosa

Descripción

Se fabrica por fundición de metal como acero. Su geometría es idéntica a la descrita anteriormente para el Tubo Venturi fundido. Las únicas secciones torneadas son la entrada y la garganta. La presión con convergencia torneada se coloca por el fabricante. Los Tubos Venturi varían en diámetros de 10 a 80 cm y las conexiones para medir son equipadas con bridas. El valor de C_D se suministra por el fabricante. Su precio oscila entre $200 a $ 4 000 dependiendo del tamaño y materiales empleados. El costo del medidor de presión es adicional.

Aplicaciones recomendadas

Apropiados para medir gas, vapor, y líquidos en tuberías o conductos de 5 a 25 cm. de diámetro. Los de menor tamaño, con diámetros menores de 5 cm. son disponibles pero se recomienda calibrarlos. Los Tubos Venturi se recomiendan especialmente donde se requiere mantener una caída de presión baja a causa de el costo elevado del bombeo, o donde una alta caída de presión puede reducir severamente el flujo. También se recomiendan con fluidos erosivos, como aire o agua con sólidos en suspensión, o con vapor húmedo. Son particularmente adecuados para altos flujos donde la placa de orificio podría provocar alta caída de presión y una velocidad de fluido próximo a la condición de flujo estrangulado. Usos en mediciones de energía incluyen vapor de calderas, requerimientos de agua y vapor para proceso, agua para calderas.

Limitaciones

El Tubo Venturi limita el flujo porque provoca una pérdida permanente de presión. Si la pérdida es muy alta, el flujo puede reducirse severamente, o incrementar los costos de bombeo. Los tubos Venturi

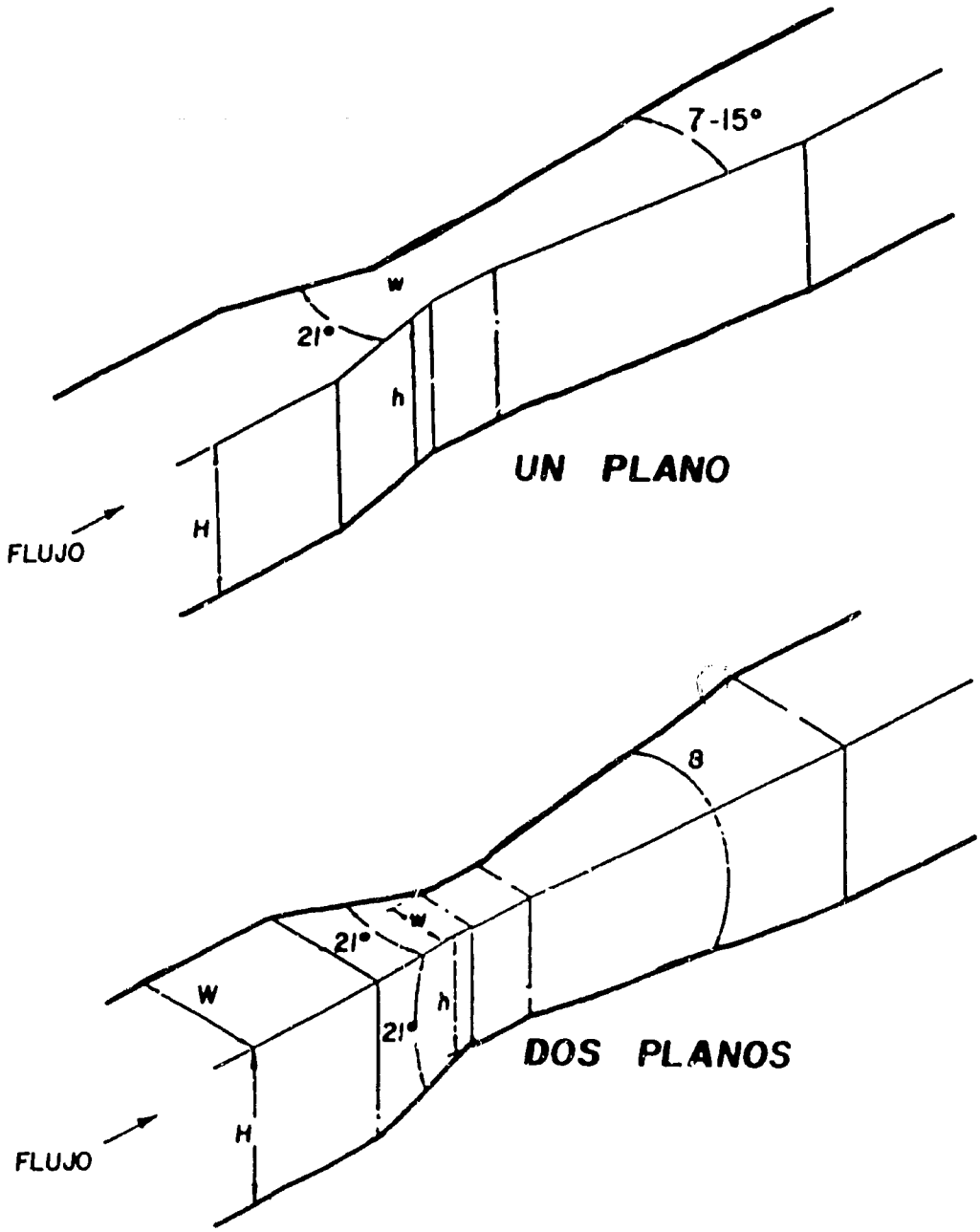


FIGURA 2-9 TUBOS VENTURI RECTANGULARES

se dimensionan para cubrir ciertos límites de flujo particular y tienen una relación de capacidad de 3:1. Si las condiciones de flujo cambian con respecto a las de diseño, debe instalarse un nuevo Tubo Venturi con diferente B y C_D. Se requiere flujo desarrollado: Re 200,000 se recomienda y se especifican las longitudes mínimas corriente arriba y abajo con respecto a los accesorios. Para evitar inestabilidad con gases comprensibles y vapor, dp/p debe ser menor de 0.25.

Exactitud y confiabilidad

Cualquier Tubo Venturi no calibrado tiene una exactitud de ± 1.5% de escala completa. Un Tubo Venturi de 100 Lb/h se espera esté con ± 1.5 Lb/h dentro de los límites de 30 a 100 Lb/h. Típicamente, la exactitud es disminuida conforme se opera a la mas baja capacidad. La exactitud calibrada es ± 0.75% de escala completa. En mediciones de gases o vapor, la expansividad del fluido puede contribuir con un 5% de error adicional.

Los Tubos Venturi son altamente confiables. Con fluidos erosivos los Tubos Venturi son más confiables que las placas de orificio porque son menos sensitivos y menos susceptibles al desgaste. Debe seguirse cuidadosamente las recomendaciones que especifican los límites de Re, dp y su gama de aplicación y longitudes mínimas de tubería. Asimismo, es importante asegurarse de que la tubería y las conexiones para medir presión estén libres de suciedad o gas atrapado cuando se miden líquidos y libre de líquidos atrapados cuando se miden gasas.

2.2.3.3. Venturi de láminas soldadas

Descripción

Se fabrica con lámina delgada metálica. Su geometría es la de los modelos descritos anteriormente (ver páginas 32-40). Las conexiones para medir presión se colocan por el fabricante. Se varían en longi-

tud de 20 a 120 cm. Deben equiparse con bridas o soldarse a la tubería. Su precio varía de $ 200 a $ 2 000 según el tamaño y los materiales empleados. El costo del medidor de presión es adicional.

Aplicaciones recomendadas

Apropiados para medir gas, vapor,y líquidos en tuberías o conductos de 5 a 25 cm. de diámetro. Los de menor tamaño, con diámetros menores de 5 cm. son disponibles pero se recomienda calibrarlos. Los Tubos Venturi se recomiendan especialmente donde se requiere mantener una caída de presión baja a causa de el costo elevado de bombeo o donde una alta caída de presión puede reducir severamente el flujo. También se recomiendan con fluidos erosivos, como aire o agua con sólidos en suspensión, o con vapor húmedo. Son particularmente adecuados para altos fluidos donde la placa de orificio podría provocar alta caída de presión y una velocidad de fluido próximo a la condición de flujo estrangulado. Usos en mediciones de energía incluyen vapor de calderas, requerimientos de agua y vapor para proceso, agua para calderas.

Limitaciones

El Tubo Venturi limita el flujo porque provoca una pérdida permanentemente de presión. Si la pérdida es muy alta, el flujo puede reducirse severamente, o incrementar los costos de bombeo. Los Tubos Venturi se dimensionan para cubrir ciertos límites de flujo particular y tienen una relación de capacidad de 3:1. Si las condiciones de flujo cambian con respecto a las de diseño, debe instalarse un nuevo Tubo Venturi con diferente B y C_D. Se requiere flujo desarrollado: Re 200,000 se recomienda y se especifican las longitudes mínimas corriente arriba y abajo con respecto a los accesorios. Para evitar inestabilidad con gases y vapor, dp/p debe ser menor de 0.25.

Exactitud y confiabilidad

Cualquier Tubo Venturi no calibrado tiene una exactitud de ± 1.5% de escala completa. Un Tubo Venturi de 100 Lb/h se espera esté con

± 1.50 Lb/h dentro de los límites de 30 a 100 Lb/h. Tipicamente, la exactitud es disminuida conforme se opera a la mas baja capacidad. La exactitud calibrada es ± 0.75% de escala completa. En mediciones de gases o vapor, la expansividad del fluido puede contribuir con un 5% de error adicional.

Los Tubos Venturi son altamente confiables. Con fluidos erosivos los Tubos Venturi son más confiables que las placas de orificio porque son menos sensitivos y menos susceptibles al desgaste. Debe seguirse cuidadosamente las recomendaciones que especifican los límites de Re, dp y su gama de aplicación y longitudes mínimas de tubería. Asimismo, es importante asegurarse de que la tubería y las conexiones para medir presión estén libres de suciedad o gas atrapado cuando se miden líquidos y libre de líquidos atrapados - cuando se miden gases.

2.2.3.4 Tubo Venturi rectangular

Descripción

El Tubo Venturi se construye con lámina delgada de metal y tiene una sección rectangular. La figura 2-9 muestra dos variaciones del tubo Venturi rectangular. La entrada iguala el ancho y altura del conducto, la sección convergente se estecha a 20° en cualquiera de los dos planos, el área de la garganta se diseña para dar el m requerido (análogo a la relación β en tubería), y las salidas divergen de 8 a 15°. Las conexiones para medir presión son localizadas por el fabricante. El tamaño no es restringido. Estos Venturi se equipan con bridas o se sueldan al conducto. Su precio varía de $ 200 a $ 4 000 dependiendo de tamaño y materiales empleados. Su precio no incluye el medidor de presión.

Aplicaciones recomendadas

Son apropiados para medir flujos de aire en conductos donde otros medidores no pueden aplicarse. Esto incluye flujo de aire para calentamiento o equipo de aire acondicionado.

Limitaciones

El Tubo Venturi limita el flujo porque provoca una pérdida permanente de presión. Si la pérdida es muy alta, el flujo puede reducirse severamente, o incrementar los costos de bombeo. Los Tubos Venturi se dimensionan para cubrir ciertos límites de flujo particularmente y tienen una relación de capacidad de 3:1. Si las condiciones de flujo cambian con respecto a las de diseño, debe instalarse un nuevo Tubo Venturi con diferente B y C_D. Se requiere flujo desarrollado: Re 200,000 se recomienda y se especifican las longitudes mínimas corriente arriba y abajo con respecto a los accesorios Para evitar inestabilidad con gases comprensibles y vapor, dp/p debe ser menor de 0.25.

Exactitud y confiabilidad

La exactitud no calibrada es de aproximadamente 5% a plena capacidad. La exactitud es de aproximadamente 1%.

2.3 TUBOS PITOT

Los tubos Pitot son usados para medir el flujo en tubería y conductos. En mediciones energéticas se aplican a gases y vapor. Las aplicaciones más comunes son para la entrada (o salida) de flujos a secadores, evaporadores, y sistemas de aire acondicionado. Los tubos Pitot también pueden medir bajas velocidades.

Son ampliamente utilizados en la industria especialmente donde se necesita verificar el flujo. Generalmente, los tubos Pitot tienen diámetros menores de 1 cm. Se insertan en la corriente en ángulo recto con respecto al flujo, y solamente miden la velocidad en un punto simple. Cuando se manejan apropiadamente, suministran datos exactos y confiables.

Son especialmente adecuados en conductos grandes con flujos bajos o medios. Los tubos Pitot tienden a ser menos caros que las placas de orificio o los tubos Venturi. A causa de su pequeño tamaño, los tubos Pitot provocan una pequeña pérdida permanente de presión y son apropiados para aplicaciones donde se dispone de baja caída de presión como en servicios de calentamiento y ventilación. Son muy atractivos donde no se requiere su instalación permanente, ya que pueden fácilmente insertarse o retirarse en los puntos elegidos.

2.3.1 Operacion básica e instalación

Los tubos Pitot, al igual que los medidores de orificio y los tubos Venturi, son medidores inferenciales que no dan una medida directa del flujo, pero que en cambio miden una diferencia de presión que la relaciona con el valor del flujo. A diferencia de las placas de orificio y los tubos Venturi, el flujo no pasa a través del tubo Pitot. En cambio el flujo produce una alta presión por impacto. La diferencia entre la presión de impacto y la presión estática (la diferencia se llama presión dinámica) se relaciona con la velocidad del flujo. Nótese que el tubo Pitot solamente infiere velocidad en un punto simple.

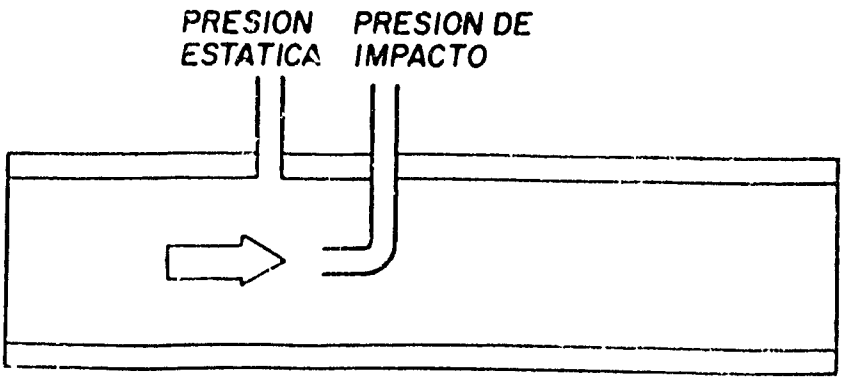


FIGURA 2-10 TUBO PITOT

La velocidad promedio se determina al promediar la velocidad en varios puntos; el valor del flujo se consigue al considerar la geometría de tubo o conducto y las propiedades del fluido. El flujo calculado es un valor instantáneo, el cual se totaliza en un microprocesador.

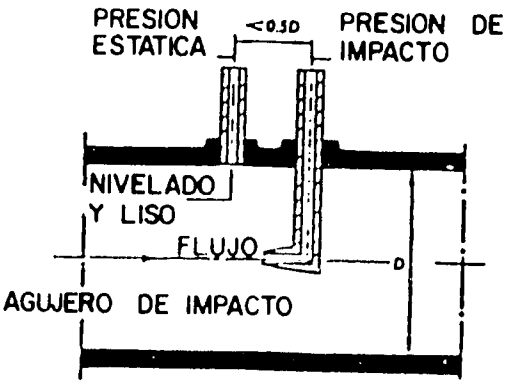
Las principales diferencias en cuanto al diseño de tubos Pitot, se relacionan con la localización de las conexiones para medir presión estática y dinámica o si el tubo debe ser de instalación portátil o permanente. La posición de las conexiones para medir presión es una consideración más de conveniencia que de la exactitud o de la aplicación. Con algunos diseños, éstas se separan con la conexión estática localizada en la pared del conducto y la conexión de impacto al final del tubo Pitot. Otros diseños colocan las conexiones en el propio tubo Pitot y algunos emplean varias conexiones de impacto para producir una diferencia promedio de presión. Algunos de éstos pueden instalarse permanentemente en el conducto de flujo. Los tubos Pitot equipados con las conexiones estática y de impacto, y aquéllos con la conexión estática abierta a la atmósfera, están disponibles como modelos portátiles conocidos como velómetros. Tanto los modelos portátiles como fijos pueden emplearse para medir flujos de gases, aire, y vapor, y son particularmente útiles, cuando están involucrados conductos grandes o de configuración extraña que impiden el uso de placas de orificio o tubos Venturi.

Para entender como funcionan los tubos Pitot, recuerde que cuando un flujo golpea un objeto, su velocidad se reduce a cero y la presión de impacto se incrementa (ver figura 2-10). Esta presión de impacto es más grande que la presión de la corriente libre (o la presión estática) medida en la pared. El valor del flujo se relaciona con la diferencia de presión de acuerdo a la siguiente ecuación:

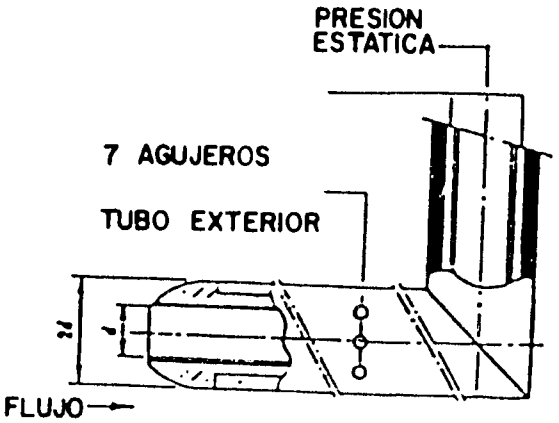
$$M = a_p \, C_p \, A \, (dp \; e \; 2 \; g_c)^{\frac{1}{2}}$$

donde M = flujo másico

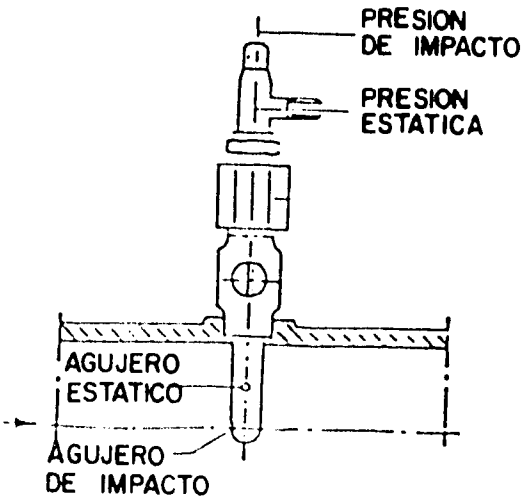
a_p = relación de la velocidad promedio a la velocidad en el punto de medición



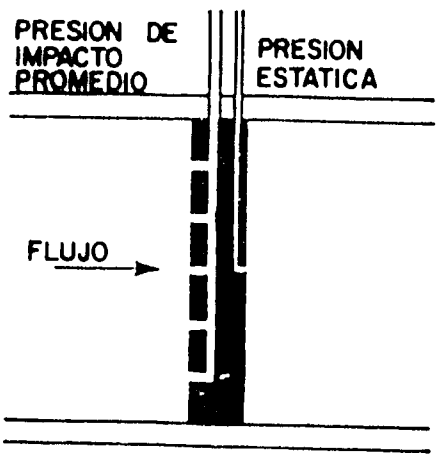
TUBO PITOT DE AGUJERO SIMPLE CON TOMA ESTATICA SEPARADA



CABEZA HEMISFERICA NPL



TUBO PITOT CORRIENTE



TUBO PITOT QUE PROMEDIA

FIGURA 2-11 DISEÑO E INTALACION DE TUBOS PITOT

C_p = coeficiente Pitot
A = área del tubo o conducto
dp - presión diferencial medida
e - densidad del fluido
g_c = constante gravitacional

Para un tubo de Pitot específico en un fluido específico, esta ecuación se reduce a:

$$M = \text{constante} \times [\text{alta presión} - \text{baja presión}]^{\frac{1}{2}}$$

Sin embargo, esta ecuación es válida cuando se siguen ciertas reglas, como exacta determinación de la velocidad promedio, impacto recto del flujo en la conexión de impacto, limpieza de las conexiones y estipulaciones de flujo. Si se siguen estas reglas, los términos de la ecuación son constantes o son medibles, permitiendo el cálculo de flujo. El coeficiente Pitot es una constante por diseño del tubo Pitot, g_c es constante por definición, y el area es constante determinada por el comportamiento del flujo en el conducto. Esta se encuentra por la medición de la velocidad a diferentes puntos y determinando la velocidad promedio y su relación al punto donde dp debe medirse. La densidad del fluido, e, se determina a partir de tablas de densidad. Si la densidad cambia con la temperatura y presión como con los gases, aire, y vapor, estos cambios deben incluirse para el cálculo del flujo. La diferencia entre presión estática y de presión puede medirse de varias maneras que se tratan abajo.

El tubo Pitot es insertado en el conducto con la conexión de impacto orientada en ángulo recto con respecto al flujo que se aproxima a ella. La conexión para medir presión estática se efectúa en la pared del conducto, o en el mismo tubo Pitot. La figura 2-11 ilustra una variedad de instalaciones de tubos Pitot.

La colocación del tubo Pitot es crítica. El tubo Pitot mide la velocidad en un solo punto, pero su velocidad debe representar la velocidad promedio para que la ecuación de flujo sea válida. En todos los

conductos, la velocidad varía con la posición. Para encontrar el punto de velocidad promedio, el conducto se divide en secciones y la velocidad es medida en varios puntos para calcular el promedio. El tubo Pitot puede colocarse luego en el punto de velocidad promedio para mediciones prolongadas.

Para tubería que requiere longitudes mínimas rectas, el punto de velocidad promedio, V, varía levemente con el Número de Reynolds (Re), la distancia a partir de la pared a V es conocida:

Re	Punto de V	% Error
< 2 000	0.29 D	± 1.50
2 000 - 10 000	0.27 D	± 2.00
> 10 000	0.25 D	± 1.25

A este punto a_p es 1.00 porque la velocidad coincide con la velocidad promedio para el conducto. Note que la exactitud en la localización de V varía con Re debido a las variaciones en la turbulencia y la estabilidad del flujo.

Un segundo método para determinar V se consigue al situar el tubo Pitot en el centro y corregir la ecuación de flujo para a_p. Para tubería, el valor de a_p se conoce para cada Re dado. La figura 2-12 puede utilizarse para determinar a_p. Note que el tubo Pitot instalado en el centro no se usa para 2 000 Re 10 000 ya que en esta gama la transición de flujo laminar a turbulento proporciona valores inconsistentes de Cp.

En conductos que no cumplen con requerimientos de longitud mínima recta o no son redondos, a_p debe determinarse a partir de mediciones. El conducto se divide en secciones y la velocidad se mide para cada uno. El promedio se calcula posteriormente y se emplea en la ecuación de flujo.

Para encontrar el flujo, dp debe ser medido y convertido a flujo másico. Los tubos Pitot son esencialmente conexiones especiales para

medir presión, por lo cual no se requieren otras conexiones. La señal de presión debe ser transmitida; sin embargo, para un indicador de dp; tubería de plástico es típicamente usada. Existen tres métodos básicos para medir dp:

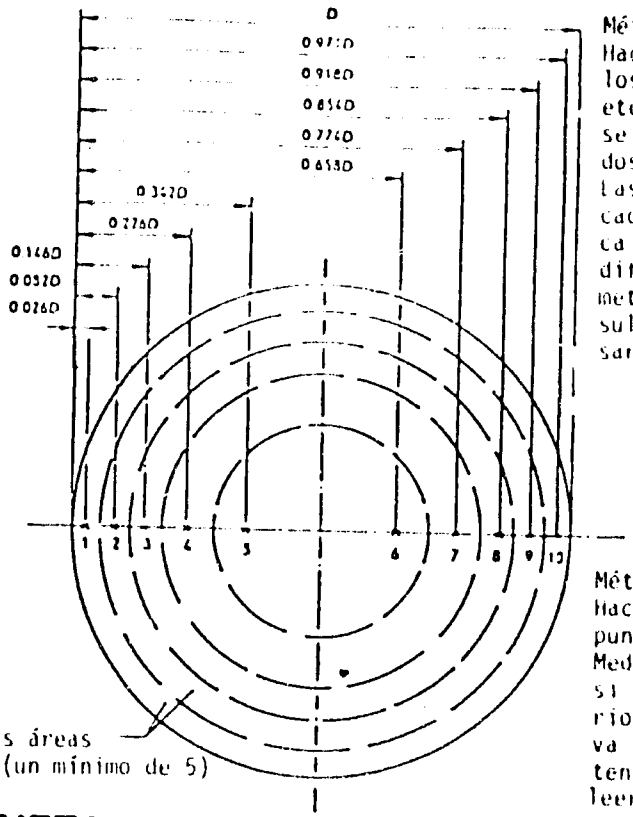
- Manómetros - Estos son en forma de U con la terminación abierta llenados con agua o aceite cuando se usan con tubos Pitot. Cuando se conectan a conexiones para medir presión, la diferencia de presión provoca que el líquido se eleve sobre la conexión de baja presión. La altura de la columna de líquido indica el dp en pulgadas de agua. Típicameate los manómetros deben calibrarse en ppm o pulgadas de agua. El valor instantáneo de flujo se determina por la ecuación de flujo, curvas de calibración o tablas. Manómetros portátiles o fijos son construidos de plástico o vidrio. Su precio varía de $ 25 a $ 200.

- Velómetros - Son medidores mecánicos que detectan la diferencia de presión entre las conexiones de alta y baja presión. Además de lo anterior, se calibran para dar la velocidad en ppm. El valor de la velocidad que se lee en el velómetro es la velocidad instantánea; el flujo se puede determinar por curvas de calibración, la ecuación de flujo o tablas. Los modelos portátiles o fijos tienen precios de $ 200 a $ 400.

- Celdas de presión diferencial y microprocesadores - Su uso principal con tubos de Pitot es para controlar flujos en sistemas de aire acondicionado (ver páginas 12-13). El costo de celdas de presión diferencial varía de $ 300 a más de $ 600, y para microprocesadores de $ 1 500 a más de $ 2 500.

2.3.2 Principios de operación

El tubo Pitot se conforma a la ecuación de flujo como placas de orificio y tubos Venturi. Debe usarse sólo cuando la ecuación de flujo es

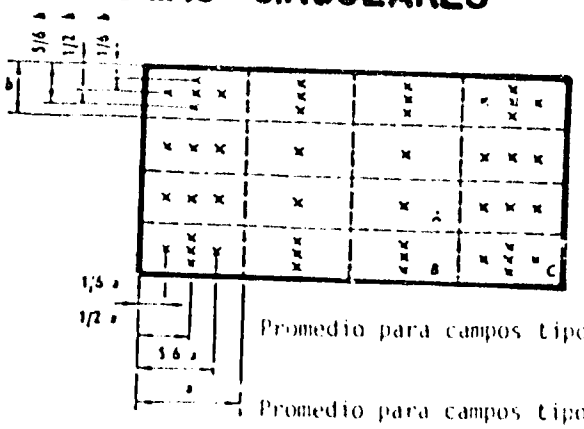


Método 1:
Hacer mediciones en los puntos 1, 2, 3, etc. deben repetirse la operación en dos o más diámetros. Las dimensiones indicadas en la gráfica son para 10 puntos diferentes, por diámetro, pero puede resultar necesario usar más puntos.

Anillos cuyas áreas son iguales (un mínimo de 5)

Método 2:
Hacer mediciones en puntos equidistantes. Medir en otros puntos si resultara necesario. Dibujar una curva con los valores obtenidos, y en ella leer valores para los puntos 1, 2, 3, etc.

METODOS POR SECCIONES TRANSVERSALES PARA TUBERIAS CIRCULARES



Hacer mediciones en el centro de cada campo y mediciones adicionales en los campos vecinos a las paredes, si resultan aquéllas ser menos de 100.

Promedio para campos tipo A = medida del centro

Promedio para campos tipo B = promedio de tres mediciones

Promedio para campos tipo C = $\frac{Ph \times Pv}{C}$

Ph = promedio de mediciones horiz.
Pv = promedio de mediciones verticales.
C = valor en el centro del campo.

POR SECCIONES TRANSVERSALES

FIGURA 2-12 DETERMINACION DE a_p PARA TUBOS DE PITOT

válida, para lo cual se define el valor de las variables y se estipulan las condiciones límites de flujo.

C_p es la constante del tubo Pitot. C_p debe ser la unidad si no existieran efectos de fricción y si el diseño mecánico no afecta dp. Sin embargo, a veces este no es el caso. En la práctica C_p es una constante suministrada por el fabricante.

A es el área de flujo. Este se calcula a partir de los valores reales de las dimensiones del conducto. La posición del dp medida debe tomarse en cuenta. La velocidad, y el dp varían con la posición en el conducto. Si el área completa es utilizada como una medida de dp, el tubo Pitot debe ser posicionado para leer la velocidad promedio. Si el punto de velocidad promedio no es conveniente, el área de flujo se divide en secciones y la dp y velocidad se miden en cada una de ellas. Si un punto es medido, la ecuación de flujo es corregida por a_p.

La correlación de la presión a la velocidad se mantiene bajo una gama de flujo que es infinito. Sin embargo, existen algunas consideraciones (ver página 15).

2.3.3 Opciones de equipo

2.3.3.1 Instalación permanente con conexión para medir presión estática separada

Descripción

La conexión para medir presión de impacto del tubo Pitot se instala fija y enfrente directamente del flujo. Se coloca en el punto donde la velocidad medida representa la velocidad promedio si se mide al otro punto la lectura es corregida por a_p. La conexión estática es perforada en la pared de la tubería a una distancia menos de o igual a medio diámetro corriente arriba de la conexión de impacto. Ambas

conexiones se atornillan para instalarse, el valor de C_p se provee por el fabricante.

Aplicaciones recomendadas

Apropiados para medir flujos de gas y vapor en tubería con diámetros mayores de 10 cm, especialmente donde los tubos Venturi y placas de orificio son caros y provocan una elevada y permanente caída de presión. Recomendados donde sean posibles el flujo desarrollado y el concurso de longitudes mínimas rectas de tubería. La instalación permanente es especialmente atractiva cuando deben hacerse lecturas repetitivas o cuando otros medidores son muy caros.

Limitaciones

Sólo pueden medirse líquidos limpios, a causa del taponamiento potencial. La localización de las lecturas de dp es crítica (ver operación e instalación básica, página 44). El tubo puede instalarse en el centro y los valores de a_p deben determinarse de relaciones conocidas entre Re, velocidad promedio y velocidad central.

Exactitud y confiabilidad

La exactitud no calibrada es del ±4% a escala completa. La exactitud calibrada es de 0.75%. Los tubos Pitot son confiables cuando miden líquidos limpios. El pequeño agujero de la conexión de impacto es susceptible de bloquearse con suciedad, o por gotas de líquido si se miden gases. Por lo cual las aberturas deben permanecer limpias de material extraño.

2.3.3.2 Tubos Pitot que promedian

Descripción

Existe más de un agujero de impacto a lo largo de la longitud de este tubo Pitot. Estos enfrentan el flujo, y la conexión estática se localiza en la parte trasera del tubo. Este arreglo proporciona una velocidad promedio a lo largo de la tubería más que un simple punto de medición. El tubo Pitot se rosca a la tubería. Su precio varía desde $ 100 a $ 400, dependiendo del tamaño.

Aplicaciones recomendadas

Apropiados para medir flujos de gas y vapor en tubería con diámetros mayores de 10 cm, especialmente donde los tubos Venturi y placas de orificio son caros y provocan una elevada y permanente caída de presión. Recomendados donde sean posibles el flujo desarrollado y el concurso de longitudes mínimas rectas de tubería. La instalación permanente es especialmente atractiva cuando deben hacerse lecturas repetitivas o cuando otros medidores son muy caros.

Limitaciones

Así como proporciona una velocidad promedio a lo largo de la tubería, es completamente susceptible a errores de flujo no desarrollado. Se debe seguir las reglas del uso de longitudes mínimas de tubería recta. Adicionalmente se presenta otras limitaciones (ver página 53).

Exactitud y confiabilidad

La exactitud no calibrada es del ± 4% a escala completa. La exactitud calibrada es de 0.75%. Los tubos Pitot son confiables cuando miden

líquidos limpios. El pequeño agujero de la conexión de impacto es susceptible de bloquearse con suciedad, o por gotas de líquido si se miden gases. Por lo cual las aberturas deben permanecer limpias de material extraño.

2.3.3.3 Tubos Pitot portátiles con conexión para medir presión

Descripción

Las conexiones para medir presión estática y de impacto están localizadas en el mismo tubo. Existen varios diseños con las mismas descripciones generales. La conexión de impacto enfrenta directamente el flujo. La conexión estática se localiza corriente abajo de la conexión de impacto, o a ángulo recto con el flujo. El tubo puede instalarse permanentemente con accesorios roscados, o puede ser portátil. Su precio oscila entre los $ 50 a $ 200.

Aplicaciones recomendadas

Pueden medir gas y vapor en tubería con diámetros mayores de 10 cm y en conductos rectangulares. Son especialmente útiles en la medición de flujos de entrada y/o salida en conductos abiertos. La medición puede ser rápida y sin disturbios al proceso.

Limitaciones

Sólo pueden medirse líquidos limpios. Ya que el flujo es medido a varios puntos, no se requiere longitudes mínimas de tubería recta o Re específico.

Exactitud y confiabilidad

la exactitud no calibrada es del ± 4% a escala completa. la exactitud calibrada es de 0.75%. Los tubos Pitot son confiables cuando miden líquidos limpios. El pequeño agujero de la conexión de impacto es susceptible de bloquearse con suciedad, o por gotas de líquido si se miden gases. Por lo cual las aberturas deben permanecer limpias de material extraño.

2.4 MEDIDORES DE TURBINA Y DE ALETAS

Los medidores de turbina y de aletas son medidores inferenciales. A diferencia con los medidores de desplazamiento positivo que miden directamente el flujo al llenar alguna cámara, estos medidores infieren el flujo a partir de parámetros de flujo. En este caso, la velocidad rotacional de un elemento móvil en la corriente es medida y relacionada al flujo. Aunque otros medidores de flujo, como tubos Venturi o placas de orificio, también miden el flujo por inferencia, el término medidor inferencial es usado comúnmente para referirse exclusivamente a las turbinas y ventiladores, también referidos como medidores de flujo tipo corriente.

2.4.1 Operación básica e instalación

Los medidores de turbinas y de aletas son instrumentos volumétricos que utilizan la energía cinética del fluído para producir un par en un rotor que actúa como elemento detector. Las relaciones entre la velocidad rotacional del rotor y la velocidad del fluido son constantes sobre la escala completa de estos medidores. El flujo volumétrico se obtiene al multiplicar la velocidad por el área seccional. Como cada rotación del elemento detector corresponde a una cantidad de flujo definido, estos medidores producen resultados consistentes bajo condiciones constantes de operación sobre amplios límites de flujo (ver figura 2-13).

La instalación de medidores de flujo inferenciales involucra la colocación del elemento o detector sensible directamente en el canal de flujo. En el caso de medidores de turbina, el eje de la turbina es fijado a lo largo de la línea imaginaria que pasa por el centro de la tubería. Como estos medidores se insertan en la tubería es necesario cortar el flujo para hacer la instalación. También, para efectuar inspecciones periódicas, el flujo debe cortarse o desviarse. Los medidores de este tipo tienen una respuesta lineal para cambios en capacidad, produciendo exactitudes de 0.2% operando a flujos tan bajos como a 20% de la plena capacidad.

En medidores inferenciales que tienen sus ejes paralelos al flujo, debe incorporarse en el diseno un elemento que controle el error de remolino. Esto se soluciona suministrando aletas directrices corrientes arriba del elemento sensible. Estas aletas minimizan la posibilidad de que un fluido corriente arriba tenga un componente de velocidad rotacional que podría reducir la exactitud de medición. El elemento sensible dentro de la corriente implica que éste está sujeto a suciedad, corrosión, erosión, y cualquier material extraño en el flujo. Los cojinetes mecánicos, también están expuestos a los riesgos anteriores lo cual limita su vida útil. Como consecuencia, los medidores de turbina y de aletas son limitados a materiales limpios y no corrosivos. Acoplando a la tubería un colador corriente arriba, se protege el mecanismo de material extraño en la corriente de flujo.

Las pérdidas de presión en los medidores inferenciales, incluyen pérdidas en las aletas directrices y el rotor a flujo completo, y son mayores que con conexiones para medir presión que tienen bordes afilados. Usando aletas directrices corriente abajo y arriba se adquiere flujo alineado, lo cual maximiza la recuperación de presión. Como la pérdida de presión varía con el cuadrado de la velocidad, las pérdidas pueden reducirse utilizando un medidor con área mayor de flujo mientras que se sacrifica algo de su gama. La pérdida de presión esperada para este mecanismo es de 0.4 a 0.8 psi. Dependiendo del medidor seleccionado, la gama de flujo es de 1 500 a 150 000 pie^3/h. Los medidores tipo impulsor de lóbulos y de aletas rotatorias, no requieren longitud recta de tubería en la tubería antes del punto de instalación, a pesar de eso, la longitud recomendada de tubería recta es de 4 a 10 diámetros antes de ellos. Los medidores inferenciales como medidores de aletas rotatorias o de turbina tienen restricciones adicionales en el sentido de instalar los mismos horizontalmente y a nivel.

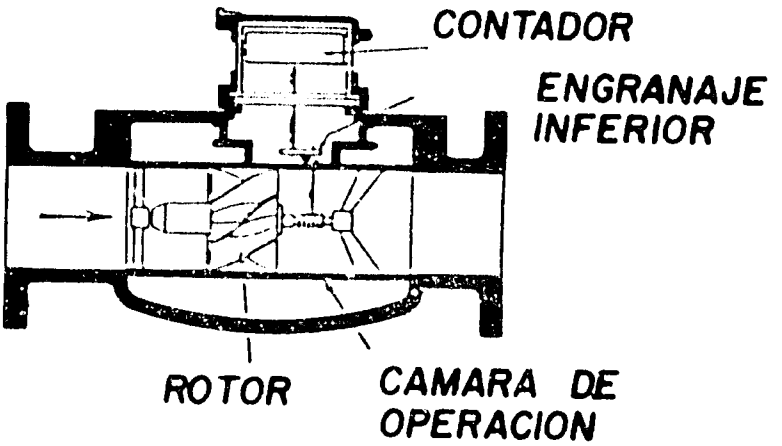


FIGURA 2-13 MEDIDOR DE FLUJO AXIAL TIPO TURBINA

2.4.2 Principios de operación

Todos los medidores inferenciales consisten de un rotor móvil diseñado para que la velocidad rotacional del rotor mantenga una relación lineal con la velocidad a través del medidor. La cantidad de movimiento del fluido medido suministra el par impulsor para el medidor. Las fuerzas que se oponen al par resultan del amortiguamiento, fricción del fluido (arrastre viscoso), y fricción mecánica. Para fluidos de densidad constante, el par impulsor es proporcional a V^2, donde V es la velocidad relativa a las aletas. El par amortiguador es proporcional a N^2, donde N es la velocidad del rotor. El par debido a la fricción del fluido es proporcional a V^2, y el par debido a la fricción mecánica es constante. El establecimiento de un medidor que opere con exactitud requiere que los pares de amortiguación y fricción sean grandes en relación a la fricción mecánica. Esto se adquiere a través de un diseño cuidadoso del cojinete del rotor y del elemento sensible de velocidad. Los medidores antiguos emplearon un captor mecánico para medir la velocidad rotacional la cual incrementa significativamente la fricción mecánica del rotor. Los medidores modernos emplean un sistema medidor electromagnético rotativo con el sensor de velocidad colocado afuera de la tubería.

Al disminuir la velocidad, el flujo tiende a ser laminar; la fricción del fluido bajo esas condiciones es menor que la fricción por flujo turbulento. Como una consecuencia de esa transición, se adquiere una región donde la velocidad del rotor se incrementa relativamente a la velocidad del flujo. La combinación de esos dos factores opuestos producen un "pico" en la curva característica de operación de exactitud contra flujo a algún porcentaje bajo de capacidad. En un medidor bien diseñado, la desviación de el "pico" en la curva de operación no debería de exceder el 1%.

2.4.3 Opciones de equipo

2.4.3.1 Medidores de turbina axial

Descripción

El tipo más común de medidor rotacional es el de turbina o impulsor. El rotor de forma helicoidal, se instala en un eje paralelo a la dirección del flujo. La relación entre el volumen cedido y la configuración de la hélice para una revolución es dada por:

$$V = PA$$

donde:

V = volumen cedido en una revolución
P = claro de las aletas
A = área neta del área seccional de la cámara de operación

Estos medidores son construidos con un cuerpo de metal en el cual la cámara de operación es suspendida. La figura 2-13 muestra el diseño interno del medidor de turbina. Esta configuración permite la remosión del cartucho del medidor sin remover el cuerpo de la tubería. Los medidores de turbina de calibre completo para medición de líquidos tienen precio que varía del $ 1100 para un medidor de 5 cm de diámetro hasta $ 7000 para un medidor de 30 cm de diámetro. Los medidores de gas son más costosos, ya que ellos miden flujos de alta velocidad y por lo cual rotan más rápido. El costo base para un medidor de 10 cm de diámetro es de aproximadamente $ 2 500.

Aplicaciones recomendadas

Los medidores de turbinas de flujo axial son aplicadas en dos formas distintas: medidores de turbina de calibre completo y de in-

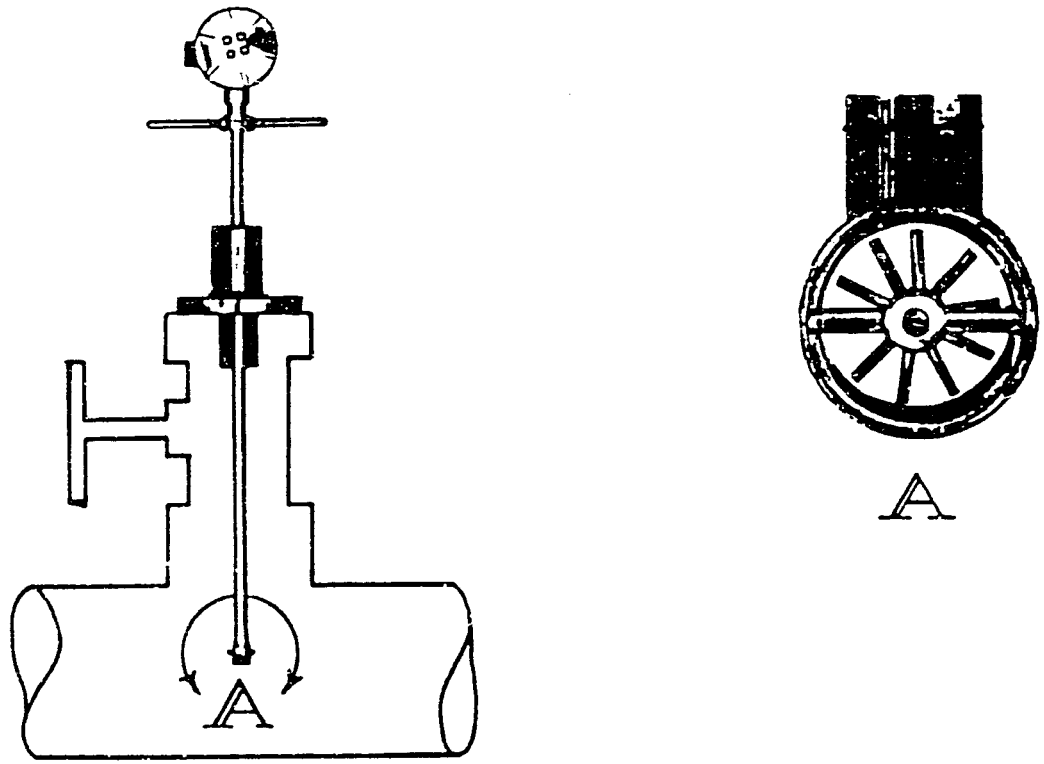


FIGURA 2-14 INSTALACION DEL MEDIDOR DE INSERCION Y DETALLE DEL ELEMENTO DETECTOR

serción. Los medidores de calibre completo tienen un elemento rotativo igual al diámetro de la tubería, y de donde miden el flujo total. Están disponibles para ensamblarse a la tubería con diámetros entre 1 cm y 30 cm y pueden ser diseñados para usarse con líquidos o gases. Los medidores de inserción (ver figura 2-14) son mecanismos de muestreo de velocidad, que infieren el flujo total a partir de una muestra de velocidad local. Pueden emplearse en tubería de diámetro de 7.5 cm o mayor, y son capaces de medir flujos de líquidos, gas y vapor. En adición a su rápido tiempo de respuesta, los medidores de inserción ofrecen ventajas económicas que favorecen su instalación. Ya que los medidores de inserción se consideran de costo fijo (por ejemplo el costo del medidor es independiente del tamaño de la tubería) son menos caros que los medidores de calibre completo para tubería de diámetro medio a grande. Similarmente, por el mismo tipo de tubería sus costos de mantenimiento son bajos. La más severa limitación es que a diferencia con los medidores de calibre completo que miden la velocidad mediana en el área seccional ellos infieren la velocidad promedio a partir de una muestra local. De donde, la colocación de la punta de prueba de inserción dentro de la tubería es crítica.

La colocación óptima de esos medidores es dependiente de la geometría de tubería y características de flujo (primariamente el Número de Reynolds). La posición de la línea central de flujo es preferida para pequeños diámetros de tubería. Sin embargo, otra posición de la punta de prueba a menudo utilizada se refiere como de posición crítica. Esta es definida como el punto donde la velocidad local iguala la velocidad mediana. Cálculos de flujo indican que la posición crítica es casi independiente del flujo, situados en la posición crítica exhiben mejor linearidad que los situados en la posición central.

Los medidores de inserción o de calibre completo se seleccionan a menudo por su relación de capacidad de medición. En situaciones donde el flujo a ser medido muestra una amplia variación pero donde

deben mantenerse mediciones exactas, los medidores de turbina representan una excelente elección. Los medidores de turbina tienen una relación de capacidad de por lo menos 10:1 hasta 30:1 comparada con las placas de orificio, las cuales solamente tienen 3:1. La figura 2-15 ilustra los límites de operación de los medidores de turbina. Para este tipo, la exactitud de 1% es mantenida dentro de 5 a 100% de capacidad, o sea una relación de capacidad de 20:1.

Limitaciones

Las turbinas de flujo axial han probado ser exactas, demostrando amplia gama y mínima caída de presión. Sin embargo, presentan varias limitaciones que algunas veces restringen su aplicación. Una limitación mayor es que están restringidas a fluidos limpios. Los niveles elevados de partículas tienden a erosionar el rotor, y los objetos extraños pueden obstruirlo. La temperatura es otra limitación. A menos que se diseñen especialmente, se restringen a fluidos con temperaturas abajo de 65°C. Esta limitación se deriva de los cojinetes del rotor que tienen una vida corta a alta temperatura. Otra limitación es su costo, el cual es más grande que el de medidores de presión diferencial de placas de orificio. Una limitación final es su orientación. Para operar correctamente deben localizarse horizontalmente en una sección de tubería recta.

Exactitud y confiabilidad

Como se muestra en la figura 2-15, los medidores de turbina exhiben alta exactitud a baja capacidad. A través de gran parte de la gama de flujo, la exactitud es hasta ± 0.5%, pero a causa del pico causado por la desviación a bajas capacidades, la exactitud garantizada es ± 1%. Los medidores de inserción producen cierta inexactitud como consecuencia de que se introduce una fuente de error al convertir la velocidad local en velocidad promedio. Con adecuada ubicación tienen también exactitudes de ± 1%.

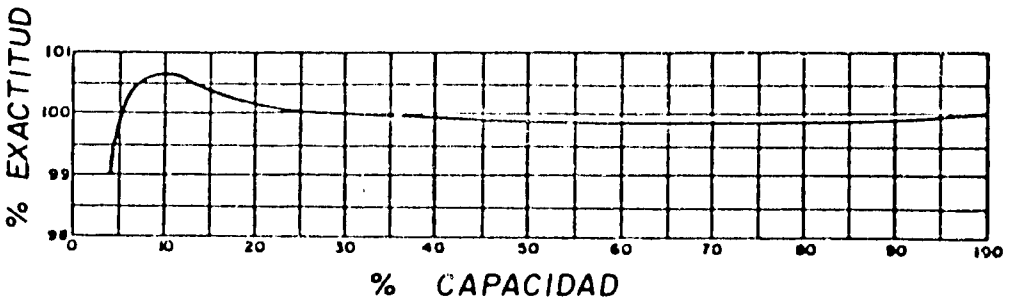


FIGURA 2-15 EXACTITUD VS. CAPACIDAD DEL MEDIDOR DE FLUJO AXIAL TIPO TURBINA

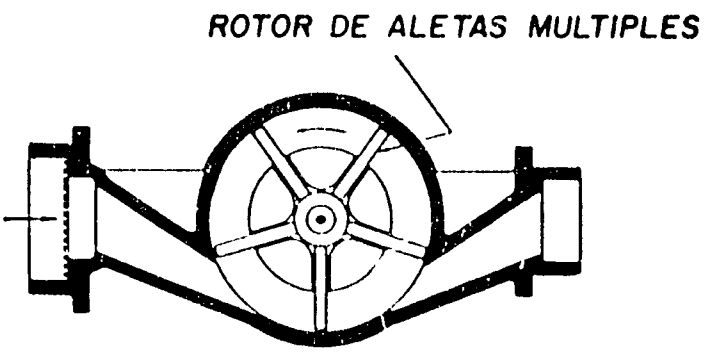


FIGURA 2-16 MEDIDOR DE CHORRO SIMPLE CON ALETAS

La confiabilidad de la turbina es altamente dependiente de las condiciones de flujo a las que se sujeta. Un medidor instalado en el medio adecuado y con mantenimiento moderado debería producir 4) años en promedio entre reparaciones y extender la expectativa de vida de 10 a 25 anos.

2.4.3.2 Medidores de aletas

Descripción

La segunda clase de medidores inferenciales son los medidores de aletas o medidores vórtice. En este tipo de medidor, el detector toma la forma de un rotor de aletas múltiples montados en un eje el cual está a ángulos rectos con respecto a la dirección de flujo (Ver figura 2-16). La caja del rotor consiste de una protuberancia semicilíndrica dispuesta en la caja cilíndrica. El flujo entra a la caja y golpea el rotor tangencialmente provocando rotación. La velocidad de rotación es determinada por la velocidad del líquido y las dimensiones físicas de la cámara y el rotor. Como existe un espacio libre entre las aletas del rotor y la caja, el flujo crea un vórtice de remolino el cual prácticamente elimina la fricción. Obviamente, así como la mayor parte del flujo pasa sobre el rotor y sale en la dirección general de flujo, una pequeña cantidad de fluido fluye bajo el rotor (ver figura 2-17) y elimina el vacío parcial que podría existir.

El medidor de chorro simple es el tipo más sencillo. En éste, el fluido ingresa al medidor a través de una entrada tangencial. Una salida simple es localizada diametralmente opuesta a la entrada. El tipo de chorro múltiple tiene la misma característica general que el tipo simple, pero en su diseño el líquido ingresa a la cámara de operación a través de un conjunto de orificios tangenciales alrededor de la circunferencia y sale a través de otro juego colocado a un

nivel más alto en la cámara. Los chorros múltiples o ranuras sirven para eliminar resonancias y balancear el rotor. Esto ayuda a reducir las pérdidas por fricción y extiende la gama de operación a flujos bajos. No existe una diferencia de precio significativa entre los medidores antes expuestos, excepto que los de chorro múltiple son generalmente más grandes y por lo tanto más costosos debido a su tamaño. Los medidores de aletas capaces de medir flujos entre 4 y 84 pm cuestan entre $ 150 y $ 700.

Aplicaciones recomendadas

Su uso se limita a mediciones de agua caliente y fría. Están construidos de un cuerpo de bronce. El tipo chorro simple es recomendado para temperaturas cercanas a 90 °C y el tipo chorro múltiple hasta 150 °C.

Los tamaños típicos comerciales para estos medidores se muestran en la tabla 2-2. Como con los medidores de turbinas axiales, los medidores de aletas tienen amplias gamas de operación. Poseen relaciones de capacidad superiores a 10:1. Mantienen buena exactitud aunque no tan precisa como los medidores de turbina axiales sobre la gama de operación; la caída de presión para los medidores de aletas es en función del flujo como se observa en la figura 2-18. Sobre todo, la caída de presión es baja, típicamente menor que 1 psi a todas las condiciones de flujo.

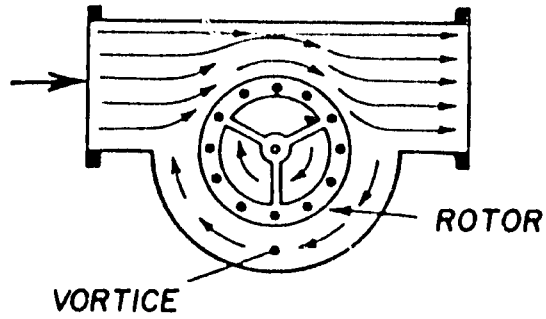


FIGURA 2-17 CONFIGURACION DE FLUJO EN MEDIDOR DE ALETAS

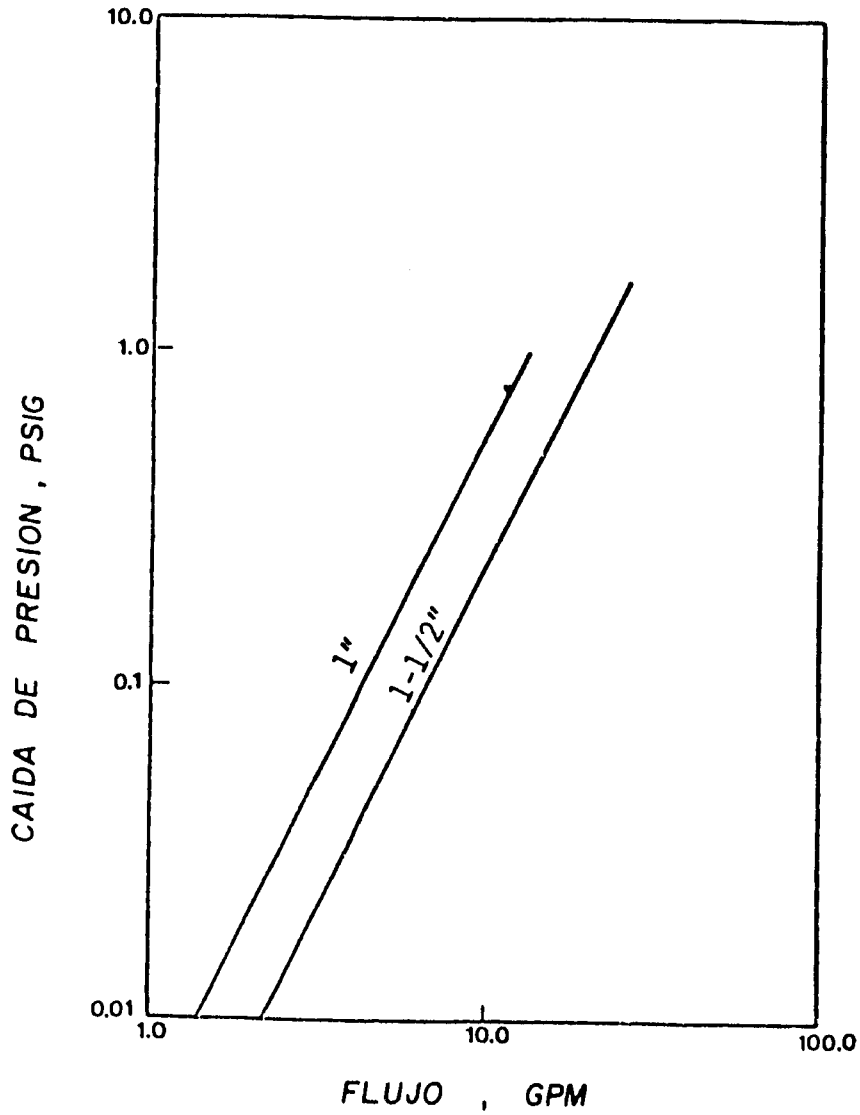


FIGURA 2-18. FLUJO VS. CAIDA EN PRESION PARA MEDIDOR DE ALETAS

TABLA 2-2

Datos de operación para medidores tipo ventilador

Tipo	Tamaño tubería (centímetros)	Gama de flujo (lpm)	Flujo máximo continuo (lpm)	Exactitud
Chorro simple	2	3.8 a 84	42	± 1.5%
Chorro múltiple	2.5	2.3 a 68	30	± 2 %
Chorro múltiple	4	5.3 a 167	84	± 2 %

Limitaciones

La mayor limitación es su exactitud y gama de operación. Los medidores de chorro sencillo son exactos a ± 1% sobre una gama de flujo de 10:1. Todos los medidores se recomiendan para usarlos con fluidos limpios para evitar desgaste y daño excesivo.

Exactitud y confiabilidad

Los medidores de aleta no son tan exactos como los medidores de turbina o medidores de desplazamiento positivo. Tienen una exactitud de ± 1.5% a 2% sobre la gama de flujo. Alguna exactitud se pierde al operar a bajas capacidades de flujo. Tienen confiabilidad similar a los medidores tipo turbina, la cual es de 4½ años promedio entre reparaciones y una expectativa de vida de 10 a 25 años.

2.5 MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Medidores de desplazamiento positivo junto con los medidores inferenciales comprenden las dos clases de medidores mecánicos de flujo. Un medidor de desplazamiento positivo es definido como uno que opera alternativamente llenando y vaciando una cavidad de un volumen fijo. Se emplean para suministrar mediciones exactas en volúmenes de flujo bajo a moderado.

2.5.1 Operaciones básicas e instalación

Los medidores de desplazamiento positivo son unos de los pocos tipos que producen una medida directa del flujo. Así como otros medidores la determinación del flujo es por relación de éste con la caída de presión, estos miden el flujo directamente a través de un proceso alternativo de vaciado y llenado de compartimientos o cavidades de volumen fijo. Para totalizar el flujo, el proceso de llenado y vaciado es usualmente trasladado a movimiento rotatorio, el cual opera un contador o carátula cuadrante calibrado. Los medidores de desplazamiento positivo efectúan la medición por separación mecánica del flujo en porciones individuales y por el conteo de esas porciones.

Estos medidores son diferenciados por el medio utilizado para obtener la división del flujo. Los mecanismos "repartidores" incluyen diafragmas, paletas rotatorias, engranajes lobulados, discos mecedores y pistones rotativos y reciprocantes. Existen medidores de desplazamiento positivo específicos para medir tanto líquidos como gases.

Para entender la operación de varios tipos de los medidores de desplazamiento positivo, piense en ellos como "motores fluidos". La diferencia de presión a través del medidor es la fuerza impulsora,

la cual lo opera con alta eficiencia volumétrica bajo una carga liviana. Conociendo las dimensiones físicas de la cavidad, el volumen del flujo puede computarse por el conteo automático del número de veces que es llenado. La eficiencia volumétrica de este instrumento bien diseñado es prácticamente 100%.

Como la densidad del líquido no es fuertemente afectada por la temperatura y presión, no es necesario utilizar un factor de corrección cuando se miden líquidos. Pero los medidores de desplazamiento positivo para gas miden el volumen de gas a las condiciones de la tubería, por lo que la temperatura y presión afectan la densidad y el volumen. Para obtener lecturas en condiciones bases (estándares) como 60°F y 14.7 psia, las variaciones en temperatura y presión deben grabarse, integrarse, o controlarse. Los medidores modernos de gas pueden ser equipados para compensar automáticamente los cambios de temperatura y presión.

La instalación de los medidores de desplazamiento positivo involucran la colocación del elemento medidor, directamente en el canal de flujo. Las velocidades tienden a ser altas cuando se mide gas, a causa de su baja densidad. Para reducir el desgaste en las partes de trabajo y reducir pérdidas por fricción, la velocidad del gas debe ser reducida. Esto se consigue construyendo un medidor grande. La posición del mecanismo medidor puede ser crítica para mediciones exactas, por lo que deben seguirse las instrucciones del fabricante. Por ejemplo, algunos fabricantes recomiendan que los medidores de diafragma deben instalarse verticalmente, pero que la posición del medidor de paletas rotatorias no es crítica. Ya que ellos miden directamente el flujo, los medidores de desplazamiento positivo no están sujetos a controlar las condiciones de flujo. Por lo cual, no se requiere el empleo de longitudes mínimas de tubería recta como en los tubos venturi o las placas de orificio. A causa de la ajustada tolerancia mantenida en estos medidores, son restringidos a fluidos limpios, ya que los objetos extraños tienden a alojarse en los elementos móviles provocando

que ellos los atrapen. Por esta razón, aún cuando el fluido sea considerado limpio y libre de contaminantes, se recomienda usar un colador corriente arriba del medidor. Antes de instalar el medidor, algo de fluido debería de soplarse a través de la tubería para remover rebaba de soldadura o cualquier otro residuo que podría estar presente.

Los medidores de gas tienen otras recomendaciones específicas de instalación. En algunos casos (particularmente medidores de diafragma), un orificio restringidor es instalado corriente abajo porque si se excede la capacidad límite puede producirse velocidad en exceso acompañada de daño interno. Cuando la instalación es completa el medidor debe ponerse en servicio poco a poco, y el flujo excesivo debe estar evitado para prever algún daño interno ocasionado por una excesiva presión diferencial.

2.5.2 Principios de operación

Estos medidores son mecanismos inherentemente cuantitativos o volumétricos. El fluído pasa a través del elemento primario en cantidades más o menos aisladas y sucesivas a través del tiro llenado y vaciado de compartimientos de capacidad fija. La acción de llenado y vaciado se traslada a movimiento rotatorio y es empleada para registrar la cantidad total en cuadrantes graduados. Producen alta exactitud de registro volumétrico y baja caída de presión sobre una amplia gama de flujo. En la figura 2-19 se presenta la gama de flujo existente para tres medidores comunes de gas. El medidor de diafragma se extiende bajo la gama de los medidores industriales, el medidor de lóbulo rotatorio se extiende sobre ésta hasta 100 000 pch. De esta figura se puede ver que cada uno de estos medidores tienen una relación de capacidad máxima a capacidad mínima más grande que 50:1, y en efecto, el medidor de diafragma tiene una flexibilidad de operación hasta 200:1. De la misma manera, para medidores de líquidos, la figura 2-20 indica que ellos también poseen una amplia gama de flujo.

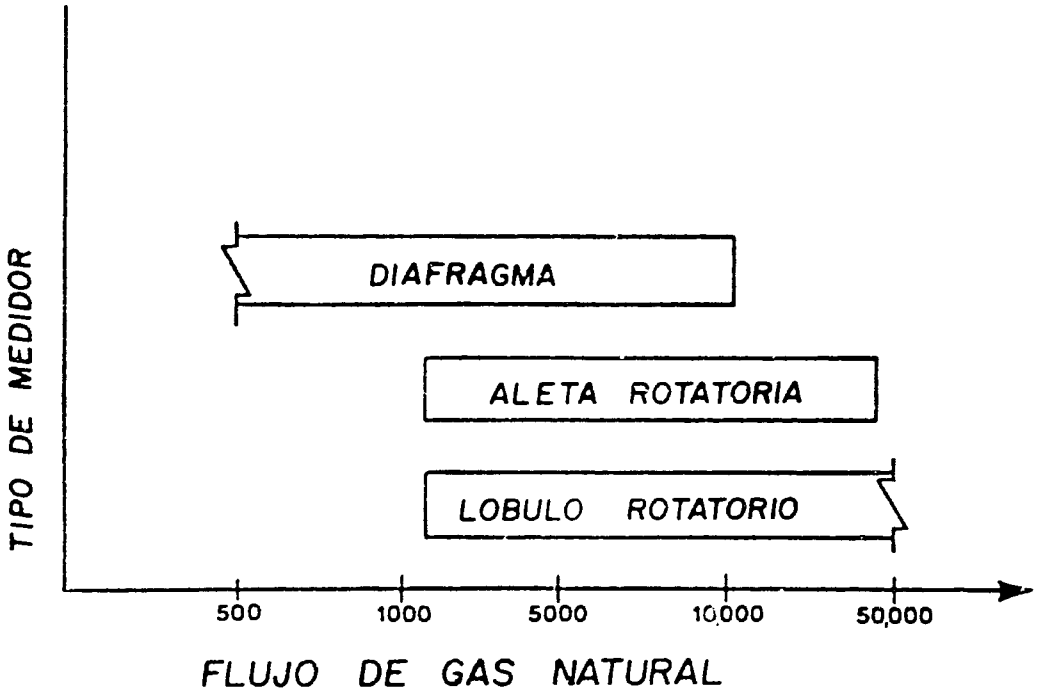


FIGURA 2-19 GAMAS DE FLUJO PARA MEDIDORES DE GAS POR DESPLAZAMIENTO POSITIVO

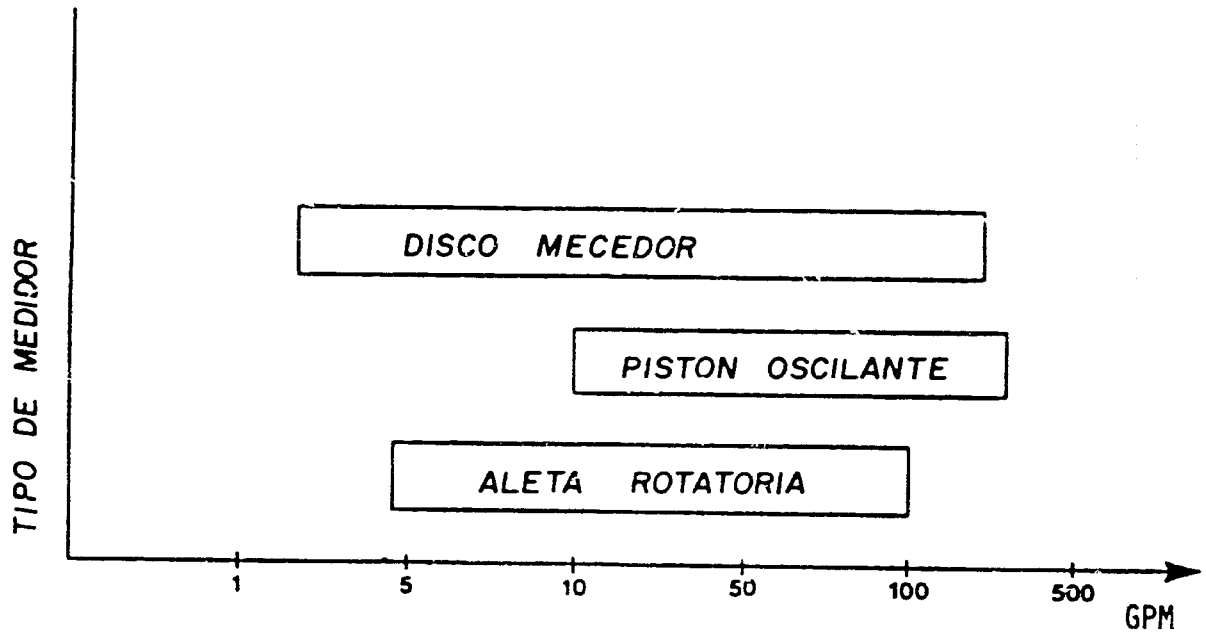


FIGURA 2-20 GAMAS DE FLUJO PARA MEDIDORES DE LIQUIDO POR DESPLAZAMIENTO

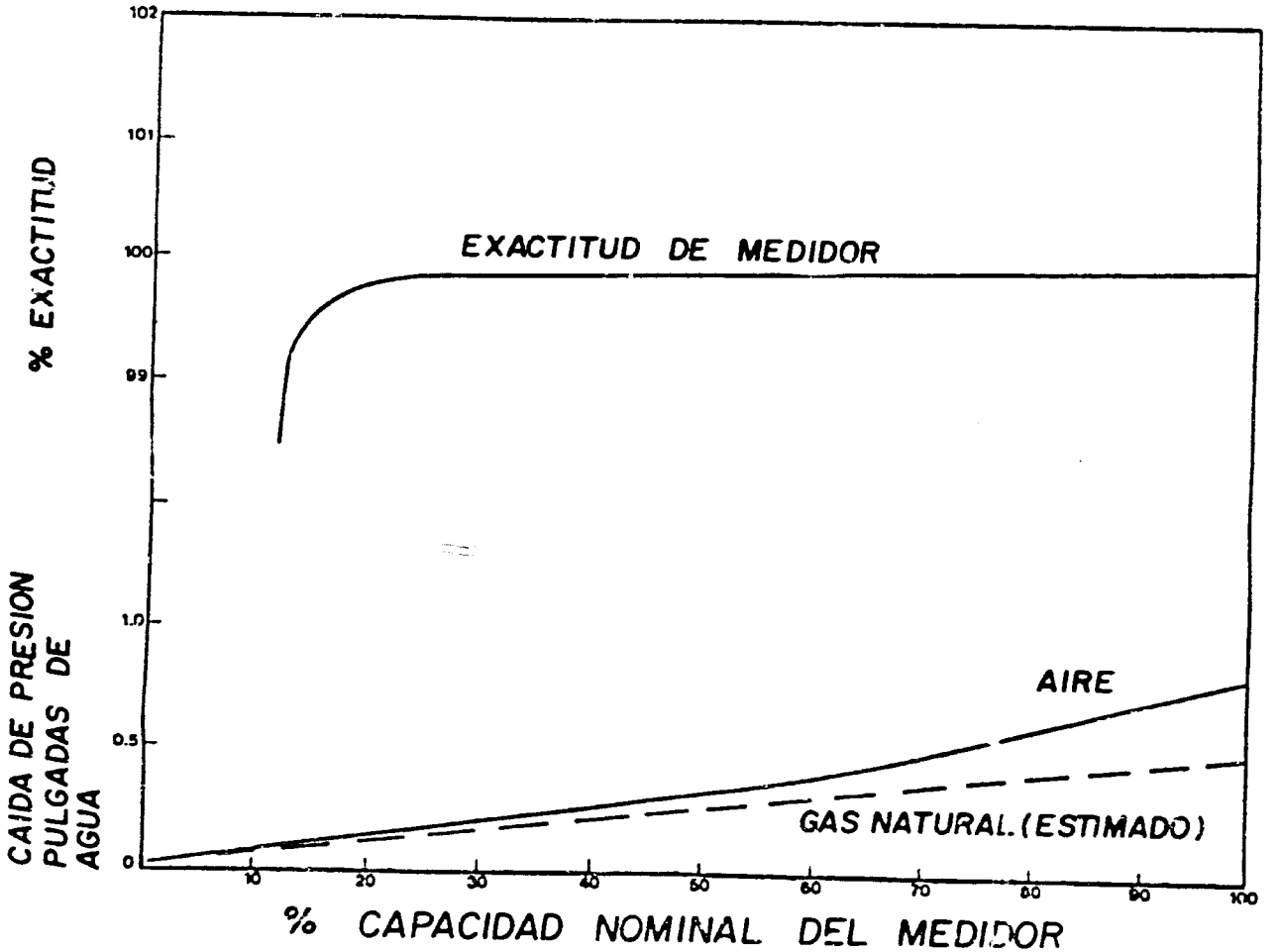


FIGURA 2-21 EXACTITUD Y CAIDA DE PRESION VS. CAPACIDAD NOMINAL DEL MEDIDOR DE DIAFRAGMA

La figura 2-21 presenta una curva de exactitud del medidor contra capacidad, la cual es típica para estos medidores. Producen alta exactitud sobre una amplia gama de capacidades de flujo. El valor de la exactitud es una función del diseño de compartimientos del medidor y de los claros entre las partes de trabajo. Los medidores de exactitud muy elevada (como medidores de hélice, engranaje ovalado, veletas y ciertos tipos de pistón usados en la industria de gas y aceite) tienen tolerancias ajustadas y en algunos casos mantienen exactitudes de ± 0.1%. Los medidores con exactitudes muy altas son extremadamente caros y apropiados solamente cuando se usan para mediciones de transferencia bajo custodia. Los medidores menos caros con exactitud más baja son adecuados para mediciones de energía. Los medidores para este tipo de servicio tienen exactitudes superiores a ± 2% y generalmente estarán dentro de ± 1%. La pérdida de exactitud a bajos flujos es típica de todos estos tipos de medidores: El flujo es tan bajo que éste pasa entre los claros en la cámara de operación sin registrarse. La figura 2-21 ilustra el curso de la caída de presión a través del medidor. Así como la caída de presión es baja, ésta es incrementada de acuerdo al valor del flujo.

Cuando se miden gases, se requiere atención especial, ya que los cambios en la temperatura y presión cambian la densidad y afectan la gama de flujo del medidor. Los medidores son equipados para convertir las condiciones de operación en la tubería a condiciones estándares. Las correcciones a presión son hechas con un integrador continuo de índice de presión base (ICIPB) instalado en el medidor. El ICIPB registra el flujo volumétrico en pie^3 a una presión base específica. Cada volumen de gas que pasa por el medidor es en efecto multiplicado por un factor de presión, el cual lo contabiliza para la tubería de presión, presión atmosférica y presión base. También se registra el volumen total no corregido.

La corrección simultánea de la presión y de la temperatura puede conseguirse con un integrador continuo de índice de volumen base (ICIVB) el cual registra y corrige a pie^3 estándar de gas pasando a través del medidor. Cada volumen de gas medido a cierta temperatura y presión es multiplicado por un factor de corrección para obtener temperatura y presión estándar. Nuevamente, se registra el volumen no corregido.

El peso específico del gas afecta la capacidad del medidor de diafragma. La capacidad del medidor a un peso específico base puede convertirse a otro peso específico multiplicando por el factor de corrección:

$$F = \frac{(SG_1)^{\frac{1}{2}}}{SG_2}$$

Donde F = Factor de corrección de peso específico

SG_1 = Peso específico base

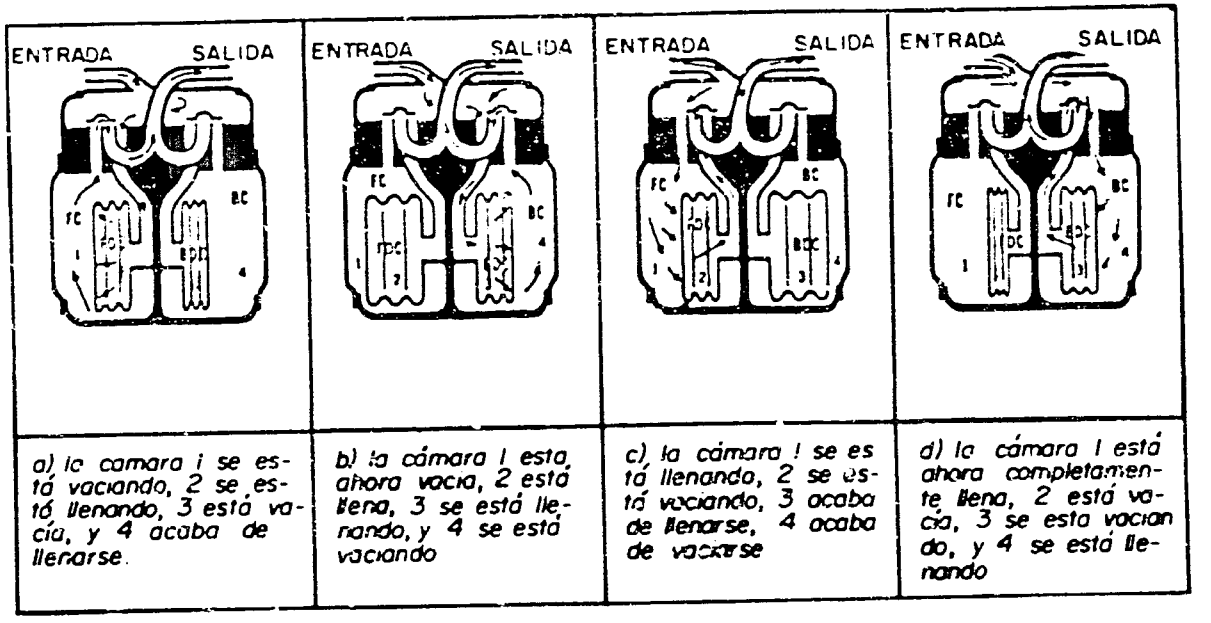
SG_2 = Peso específico del gas medido

2.5.3 Opciones de equipo

2.5.3.1 Medidores de diafragma

Descripción

Han sido empleados por muchos años para medir flujos de gas natural para consumidores, residencias, comerciales e industriales. La medición es obtenida para el alternado, llenado y vaciado de cuatro cámaras dentro del medidor. La secuencia de eventos que ocurren durante el ciclo son ilustrados en la figura 2-22. Válvulas corredizas controlan la entrada y salida a los compartimientos medidores, 2 y 3, los cuales están encerrados por fuelles de material sintético. Tienen



a) la camara 1 se está vaciando, 2 se está llenando, 3 está vacía, y 4 acaba de llenarse.	b) la cámara 1 esta ahora vacía, 2 está llena, 3 se está llenando, y 4 se está vaciando	c) la cámara 1 se está llenando, 2 se está vaciando, 3 acaba de llenarse, 4 acaba de vaciarse	d) la cámara 1 está ahora completamente llena, 2 está vacía, 3 se esta vaciando, y 4 se está llenando

FIGURA 2-22 CUATRO ETAPAS DE MEDICION EN UN MEDIDOR DE DIAFRAGMA TIPICO

una presión máxima de trabajo de 350 psig. Las cajas de medidor son construídas con hierro dúctil, acero prensado y aleaciones de aluminio. Su tamaño es adecuado para tuberías con diámetros de 2 cm a 10 cm. Exhiben una extremadamente amplia relación de capacidad aproximándose a 200:1 y producen una relativa baja caída de presión de 0.080 psig. Pueden acomodar flujos hasta de 12 000 pch. Los medidores pequeños construídos en aluminio y empleados en servicio residencial de 175 pie cúbico estándar por hora (PCEH) se venden en aproximadamente $ 75. Los medidores más grandes para servicio industrial pueden manejar hasta 11 000 pceh y cuestan alrededor de $ 3 000.

Aplicaciones recomendadas

Producen flujos exactos con relativa baja caída de presión si su máxima capacidad (12 000 pch ó 12 millones Btu/h equivalentes de gas natural) es adecuada para la demanda industrial requerida.

Limitaciones

Tienen dos limitaciones principales cuando se consideran para servicio industrial: gama máxima y costo. El límite superior de 12 000 pch no es suficientemente grande para muchos consumidores industriales de gas. También, como los medidores de diafragma son muy exactos, su costo es de alrededor dos veces el de los mecanismos que no emplean desplazamiento positivo, como las placas de orificio.

Exactitud y confiabilidad

Tienen alta exactitud, la cual está próxima a ± 1% a lo largo de la gama completa de capacidad. Son muy durables y bajo condiciones estándar de operación tienen una vida útil de 30 años o mayor. Tienden a operar por lo menos 10 años entre cada mantenimiento, por lo cual el costo de los mismos es bajo.

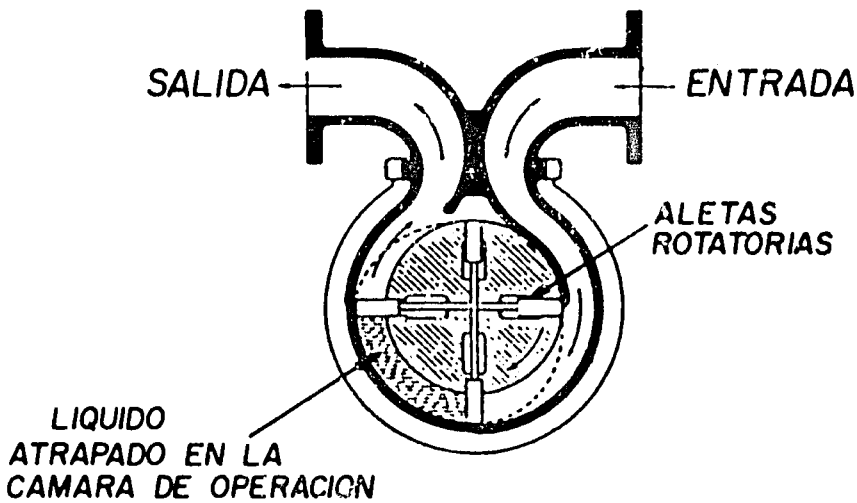


FIGURA 2-23 MEDIDOR DE ALETA ROTATORIA

2.5.3.2 Medidores de aletas rotatorias

Descripción

El medidor de aletas rotatorias es otro tipo de medidor de desplazamiento positivo que puede aplicarse en la industria. Este medidor consiste de un rotor contenido en una cámara cilíndrica y ajustado con aletas móviles (ver figura 2-23). El líquido a ser medido ingresa a la cámara de operación viniendo del lado derecho, chocando con las aletas y moviendo el rotor en la dirección de las agujas del reloj. Las aletas son mantenidas en contacto con la pared de la cámara de operación a través de la acción combinada de la presión del líquido, fuerza centrífuga y gravedad. La cámara formada por aletas sucesivas, la superficie exterior del rotor, y la pared de la cámara de operación suministran una excelente medida del flujo volumétrico.

Para mediciones de gas, son limitadas a una presión de trabajo de 1 400 psig. La gama de flujo máxima para medidores de gas es de 3 000 a 40 000 pch. Las capacidades máximas para medidores líquidos varían de 15 000 a 90 000 gph. Se ensamblan a tubería normal con diámetros de 5 a 15 cm. Tienen exactitudes mayores de ± 1% y una relación de capacidad de aproximadamente 25:1. La pérdida de presión es una función del fluido medido. Un medidor pequeño de aletas rotatorias de 4 000 pceh cuesta alrededor de $ 850, así como los grandes de 30 000 costarían $ 7 500.

Aplicaciones recomendadas

Empleados para medir flujos de líquidos y gases. Los líquidos medidos incluyen petróleo y aceites, agua y soluciones químicas neutras. Cuando se desea medir gas se modifican un poco los medidores que se usan para líquidos, consiguiendo buena exactitud y gama de operación.

Limitaciones

Comparten las mismas limitaciones que otros medidores de desplazamiento positivo. A causa de la ajustada tolerancia existente entre las partes de trabajo, los mecanismos son recomendados para ser empleados solamente con líquidos limpios. Los fluidos con pequeñas cantidades de contaminantes producen alto desgaste y alto mantenimiento en estos medidores. El costo individual es moderado y los costos de mantenimiento son típicamente mayores que los medidores de diafragma.

Exactitud y confiabilidad

Tienen alta exactitud. Los medidores empleados para medir líquidos tienen exactitudes tan grandes como ± 0.1% y pueden ser utilizados en diferentes líquidos sin recalibrarse, y a la vez manteniendo ± 0.3% de exactitud. Los medidores para gas tienen exactitudes de ± 1% sobre la escala completa de flujo, pero su exactitud efectiva es cercana a ± 0.1% hasta cuando son empleados a capacidad inferiores al 10%.

Bajo condiciones correctas de operación deberían de operar de 3 a 6 años antes de necesitar reparaciones. Cuando se siguen procedimientos normales de mantenimiento, estos mecanismos pueden suministrar un servicio de 10 a 25 años.

2.5.3.3 Medidores tipo pistón

Descripción

Operan de forma similar a los medidores de aletas rotatorias. Estos medidores funcionan como una bomba de pistón en reverso; o sea, un volumen conocido pasa a través del cilindro durante cada ciclo y el

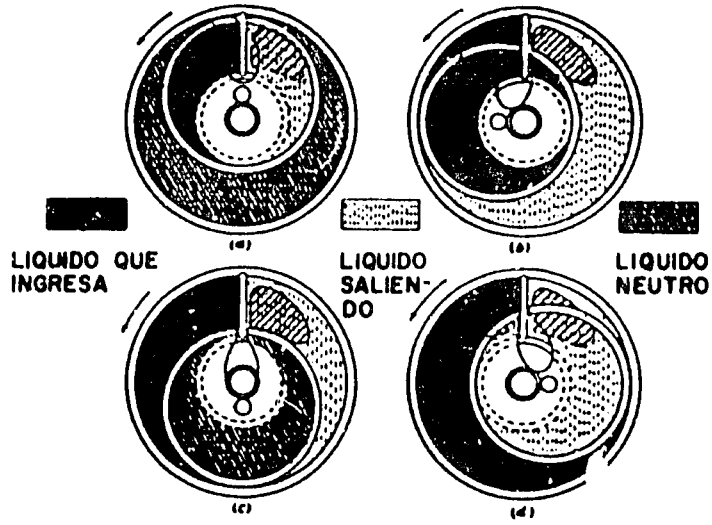


FIGURA 2-24. CICLO DE OPERACION DEL MEDIDOR DE PISTON OSCILANTE

volumen es totalizado por el conteo del número de carreras. El tipo de medidor más adecuado para aplicar en la industria es el medidor de pistón oscilante. Otros tipos como los de engranaje y de pistón reciprocante que tienen alta exactitud así como costo, son utilizados principalmente en aplicaciones de transferencia bajo custodia. Un pequeño medidor de pistón rotativo capaz de medir flujos tan bajos como 2.3 lph tiene un costo de $ 350; el costo se incrementa dependiendo de los materiales de construcción. Un medidor más grande con una capacidad de 380 lpm costaría $ 2 000. Los medidores de pistón oscilante cubren una gama desde 0.25 a 600 lpm con costo desde $ 100 a $ 700 dependiendo del tamaño y material utilizado.

A la par del disco mecedor, el cual es presentado en la siguiente sección, el medidor de pistón oscilante es el tipo más popular de los medidores de desplazamiento positivo empleado para medir líquidos. Suministra buena exactitud, simplicidad y bajo costo. Tienen sensibilidad a bajos flujos mayor que el medidor de disco mecedor. Esta ventaja es algunas veces contrarrestada por el crítico torneado requerido y su alta sensibilidad a daño por contaminación. Están disponibles para diámetros de tubería normal de .6 a 10 cm a 4". Su capacidad medida de flujo varía de 1.5 a 600 lpm. Los medidores de este diseño mantienen exactitud sobre una relación de capacidad máxima a mínima de 40:1 y el límite para el medidor más flexible es de 96:1. Los materiales de construcción dependen del fluido medido. Para agua, el cuerpo del medidor es de bronce o plástico copolímero y las partes internas son también de plástico. Para aceites combustibles los cuerpos y cámaras de trabajo se construyen de latón niquelado o acero inoxidable, y un pistón de aluminio anodizado. La presión de trabajo depende de los materiales de construcción y varía de 125 a 400 psi.

El medidor oscilante emplea un pistón por el cual el flúido rota en la cámara de trabajo. Cada revolución es equivalente a un flujo de volumen conocido. La figura 2-24 ilustra el ciclo de operación

de este medidor. Las partes principales de este medidor son la cámara de trabajo, un pistón circular ranurado y una partición. El pistón y la partición tienen la misma altura que la cámara de trabajo. La entrada está a un lado de la partición así como la de salida está en el otro lado, tanto que el pistón forma una barrera movible entre la entrada y salida. En la posición (a), los dos están en comunicación con la parte interior del pistón. El fluido que ingresa por la izquierda provoca que el pistón rote y expela líquido a través del pórtico de salida. El líquido en el exterior del pistón está en posición neutral y no puede salir del medidor. En la posición (b), existe el líquido que está entrando y saliendo en lados opuestos del pistón. En posición (c), el líquido que está entrando se localiza en el exterior del pistón en el lado izquierdo de la partición, el líquido que está saliendo, a su vez, se localiza en el exterior del pistón en el lado derecho de la partición y el flúido dentro del pistón está en posición neutra. Con más rotación a la posición (d), el fluído dentro del pistón se transforma en fluido saliendo. En este punto, el pistón está 90° antes de la posición (a). El pistón siempre rota en contra de las agujas del reloj, y cada ciclo permite que pase a través del medidor un volumen definido de flujo.

La caída de presión en los medidores de pistón oscilante es independiente del flujo y viscosidad del fluido. La figura 2-25 muestra la caída de presión para un medidor de aceite combustible. La caída de presión es una función del flujo y de la viscosidad del fluido. En esta figura, la viscosidad es medida en unidades SSU (segundos Saybolt universales).

Aplicaciones recomendadas

Son adecuados para usarlos con líquidos a temperatura ambiente. Los líquidos medidos principalmente son aceite combustible y agua fría. Comparados a los medidores de turbina de tamaño similar ellos tienen menor capacidad "pico", pero mejor habilidad a flujos bajos, exactitud similar y una caída de presión más alta.

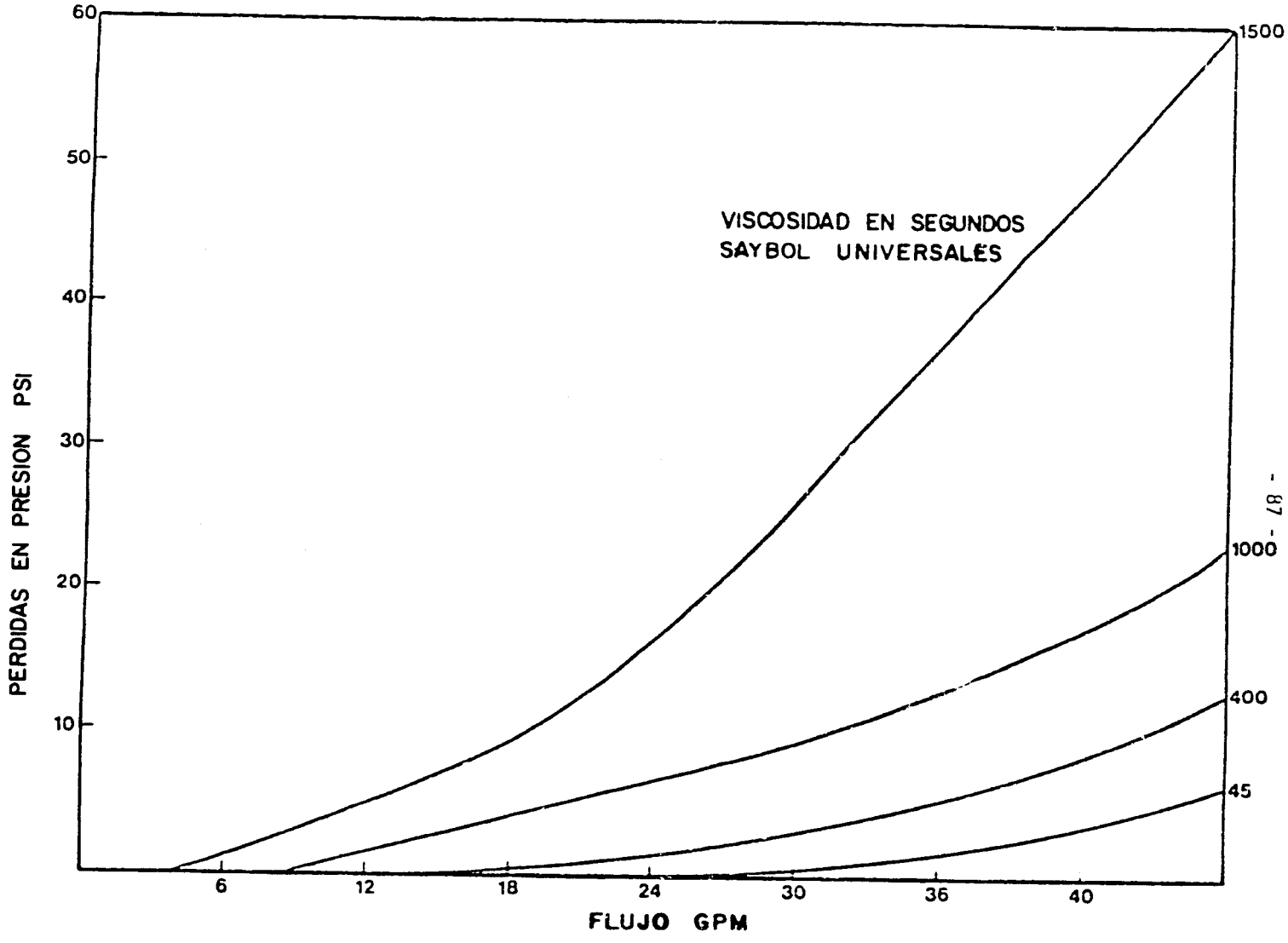


FIGURA 2-25 PERDIDA PERMANENTE DE PRESION EN MEDIDOR DE PISTON OSCILANTE

Limitaciones

A causa de sus ajustadas tolerancias deben limitarse a flúidos limpios. Los que miden agua fría están limitados a una temperatura de 50°C. Los que miden aceite son construidos con materiales más resistentes al calor, por lo que pueden operarse hasta 100°C. Otra restricción a ser considerada es la alta caída de presión con estos medidores, lo cual limita su aplicación o requiere una bomba de mayor presión.

Exactitud y confiabilidad

La exactitud de los medidores de pistón oscilante depende de las tolerancias internas. Los medidores de agua fría tienen exactitudes de ± 1.5% y los medidores de aceite hasta ± 1% sobre la gama de flujo. No existen requerimientos de lubricación o mantenimiento para estos medidores, los cuales son construidos de materiales resistentes a la corrosión y desgaste, y que proporcionan una larga vida de trabajo.

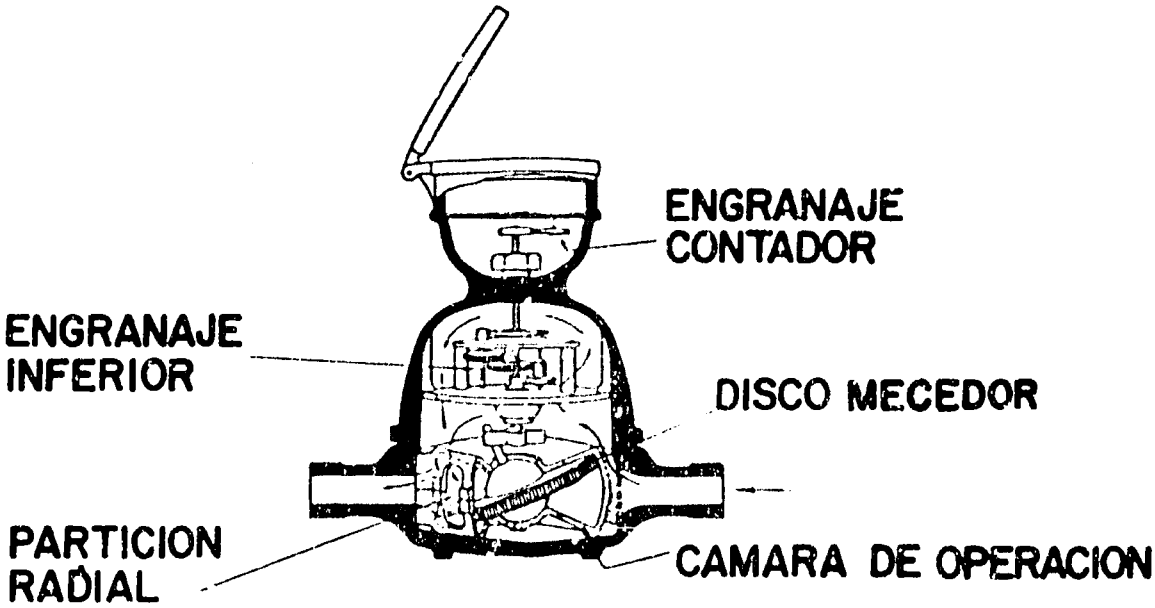
2.5.3.4 Medidores de disco mecedor

Descripción

Es el medidor de desplazamiento positivo más empleado para la medición de líquidos. Ofrece simplicidad de construcción, larga vida, relativa alta exactitud y baja caída de presión. El elemento móvil es un disco circular plano por el cual el líquido fluye impartiéndole un movimiento mecedor. La figura 2-26 muestra la construcción interna del disco mecedor. De esta figura puede verse que el disco es pivotado en el centro de la cámara de trabajo, la cual tiene un lado hemisférico y unas muescas cónicas localizadas en el fondo y en la

parte superior de la misma. A cualquier ánqulo el disco es inclinado y hace contacto con los lados de la cámara a través de su circunferencia. En el plano de esta posición inclinada extrema, existe un contacto lineal entre la superficie superior del disco y la superficie superior de la cámara de trabajo. Contacto similar ocurre entre la superficie inferior de el lado diametralmente opuesto del disco y la superficie del fondo de la cámara de trabajo. El disco se evita que gire sobre su propio eje empleando una partición radial que se extiende por la altura completa de la cámara de trabajo. El disco es dividido para ensamblarlo sobre la partición y separar los lados de entrada y salida. La figura 2-27 ilustra el ciclo de operación del medidor de disco balanceante. El líquido que ingresa llena la parte superior del cuerpo del medidor hasta el punto de línea de contacto y como el líquido continúa fluyendo, empuja la línea de contacto lejos y alrededor de la cámara de trabajo hasta que el disco cierra la entrada. En este punto el líquido neutral (momentáneamente) en la parte inferior del disco empieza a descargarse. El flujo es continuo, y para pasar líquido de la entrada a la de salida, el mismo debe fluir alrededor de la cámara de trabajo y desplazar el disco.

Los medidores de disco mecedor son disponibles para su montaje a tubería con diámetro entre 1.6 a 10 cm a 4". Son diseñados para presiones de 125 psi y menores. La caída de presión es función de la capacidad y de la viscosidad. Las caídas de presión típicas son del orden de 6 a 10 psi a máxima capacidad. Tienen una relación de capacidad de 10:1. Con agua como fluido de trabajo, la capacidad mínima es de 7.5 lpm para el medidor de 1.6 cm de diámetro y la capacidad máxima es de 2 450 lpm para el medidor de 10 cm de diámetro. Para servicio industrial el medidor de disco mecedor se construye en bronce y cuesta $ 250. Este medidor puede medir flujos tan pequeños como 11 lpm. Un medidor más grande de 600 lpm de capacidad puede costar alrededor de $ 900.



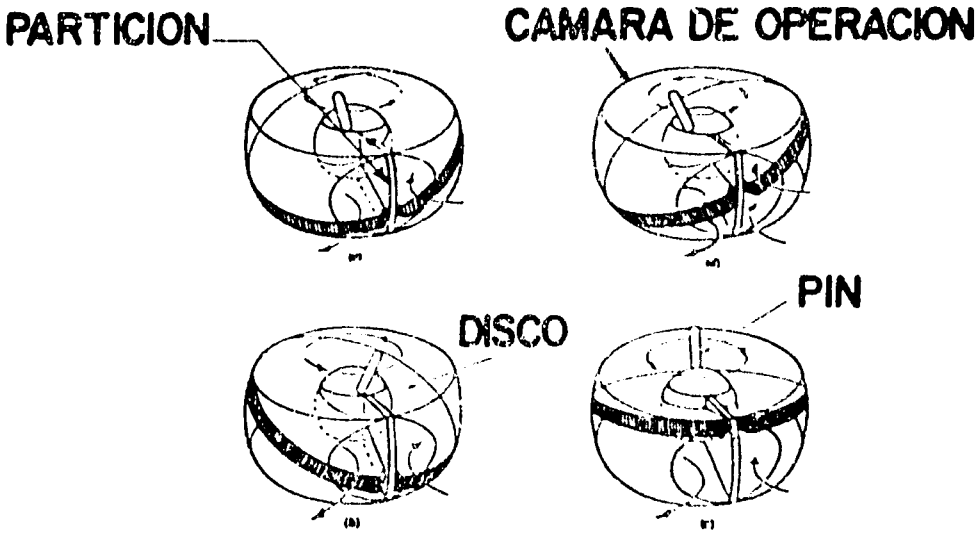


FIGURA 2-27 CICLO DE OPERACION DEL MEDIDOR DE DISCO MECEDOR

Aplicaciones recomendadas

Han sido utilizados para medir agua fria por muchos años. En adición al agua, pueden ser utilizados para medir aditivos químicos e ingredientes para mezcla. Típicamente, esas aplicaciones requieren diferentes materiales de construcción, como teflón, el cual es resistente al ataque de líquidos corrosivos.

Limitaciones

Sufren las mismas limitaciones que los medidores de desplazamiento positivo: son restringidos a usar fluídos limpios porque sus tolerancias no son tan exigentes como con los otros, pueden tomar partículas de material extraño (como arena) que provocan daño y desgaste. Se limitan a fluidos con temperaturas abajo de 50 C. También, al operarlos arriba de su capacidad máxima puede provocarse daño al equipo. Finalmente, la exactitud y la gama de flujo no es tan alta como el de los otros medidores de desplazamiento positivo.

Exactitud y confiabilidad

Son capaces de mantener una exactitud de ± 1% sobre una gama de flujo de 10:1. Son altamente confiables, habiendo estado en mediciones de agua residencial e industrial por 50 años. La vida esperada es una función de varios factores, incluyendo temperatura y limpieza del fluido y exposición a sobrecapacidad.

2.6 FORMA VORTICES

Las mediciones de flujo efectuadas por intermedio de forma vórtices es una adición relativamente reciente a la escena de mediciones de energía. Ofrecen la gran promesa de resolver los problemas exhibidos por los medidores de placa orificio. Operan sobre una amplia gama de flujo con alta exactitud, y no son afectados por los cambios de viscosidad y densidad.

2.6.1 Operaciones básicas e instalación

Operan con el principio de que un cuerpo romo sumergido en el flujo esparce vórtices alternativamente a sus lados (ver figura 2-28). Los vórtices imparten un movimiento oscilante al flujo. Como existe una relación directa entre la velocidad y la frecuencia de la distribución del vórtice, este método puede utilizarse para mediciones de flujo.

El costo de este medidor instalado puede ser significativamente más bajo que el de una combinación de medidor de placas de orificio y cédula de presión diferencial. También elimina las conexiones para medir presión y los cálculos tediosos tanto para determinar el tamaño del orificio, como las calibraciones de presión diferencial. Ofrecen exactitudes consistentes con los medidores de turbina y de desplazamiento positivo, con la ventaja adicional de no tener partes móviles en la corriente de fluido. No presentan el problema de los medidores de turbina de que se sobrepase la velocidad de diseño en presencia de flujo de dos fases y que se dañe el sensor por choque de líquido. Al igual que los medidores de turbina, la señal de salida se incrementa linealmente con el flujo.

El equipo sensor consiste de un cuerpo del medidor que contiene el forma vórtice conectado a una caja que contiene equipo electrónico.

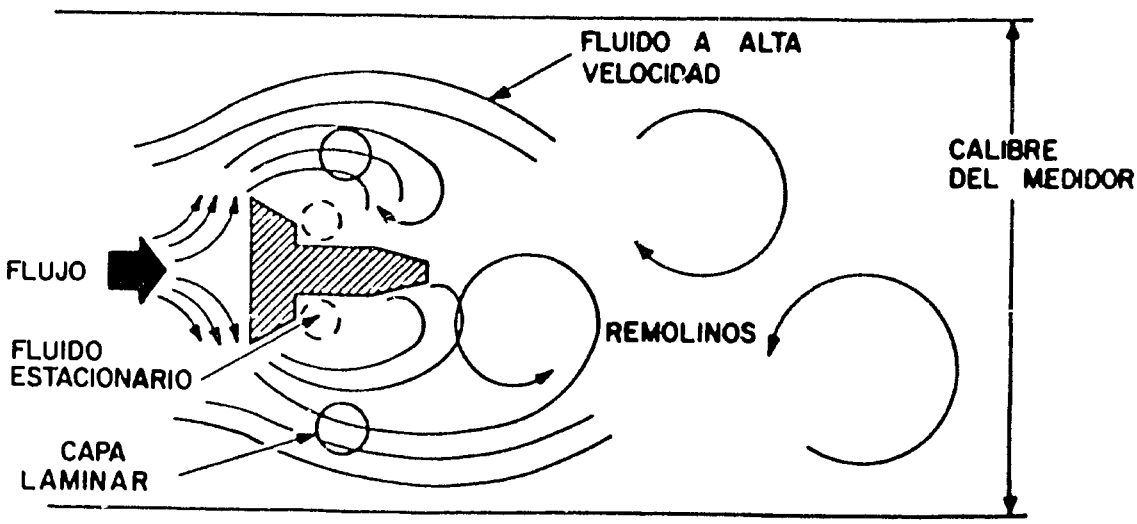


FIGURA 2-28 FENOMENO DE ESPARCICION DE VORTICES

Están disponibles para tubería entre 5 y 20 cm. Su operación es limitada a procesos con temperaturas entre 0 y 400 °F. La humedad relativa no afecta su operación. Cuerpos delgados y pequeños, diseñados para ser abrazados entre bridas de tubería, tienen un límite de presión de operación de 1 500 psi. La opción en acero inoxidable (cuerpo, elemento, exparcidor, diafragma) es ofrecido para ambientes corrosivos.

Pueden montarse en posiciones horizontales verticales e inclinadas. Los vértices producidos por el cuerpo romo crean variaciones de presión a través del elemento esparcidor, las cuales están detectadas por un sensor que está lleno de líquido, tiene dos caras y es circular en forma. Vibraciones extrañas en la tubería pueden interferir con la operación del diafragma. Para minimizar los efectos de vibración, el medidor debe colocarse en tal posición que las vibraciones sean paralelas al diafragma sensor. La medición exacta depende de flujo recto del fluido. Esto requiere una longitud mínima de tubería recta corriente arriba del medidor, lo cual puede variar de 10 a 20 diámetros de tubería.

Un suministro de voltage eléctrico de 14 a 30 voltios cd es requerido para la operación. Para transmisión en distancias hasta de 100 metros, puede emplearse cable sin blindaje. Para distancias mayores a 100 metros, se recomienda cable blindado y retorcido.

La operación de medida sobre gamas más allá del 20% del flujo máximo puede resultar en daño al equipo. El flujo mínimo medible es inversamente proporcional a la viscosidad. El flujo mínimo que puede medirse es el equivalente a un Re de 10 000. Este punto corresponde al punto mínimo de generación de vórtices.

2.6.2 Principios de operación

Operan bajo el principio de que un cuerpo romo colocado en la corriente de flujo esparce o genera alternativamente vórtices a sus lados a

una tasa proporcional al flujo. El elemento generador de vórtices tiene la forma de una "T" (ver figura 2-29). Esta forma ha sido optimizada para la producción y esparcimiento de vórtices. El detector del vórtice es ubidado en la cola de la "T" porque la razón señal/ruido a este punto es alta. Esta ubicación suministra protección máxima de objetos extranos en la corriente de flujo.

El flujo pasa a través del elemento generador de vórtices, el cual produce los vórtices y luego los destruye alternativamente a cada lado del elemento. A medida que el fluido fluye a través del medidor, se divide en dos direcciones de flujo diferentes determinadas por el elemento generador, el cual los extiende a lo largo de todo el diámetro del cuerpo del medidor de flujo. Partículas del fluido a alta velocidad pasan a las partículas de baja velocidad cerca del elemento generador. Las partículas próximas a este elemento tienen baja velocidad porque son restringidas por fuerzas viscosas. Existe un gradiente grande de velocidad dentro de esta capa lo cual los hace inherentemente inestables. Debido a esto, el fluido corriente abajo de esta capa eventualmente se rompe en vórtices bien definidos (ver figura 2-30). Los vórtices cuando se separan crean una presión diferencial que oscila, la cual es detectada por el sensor en la cola del elemento. Las variaciones de presión actúan el detector a una frecuencia proporcional a la cantidad de vórtices generados.

Su operación es definida en parte por el Re de flujo. El Re mínimo para la esparción de vórtices ocurre a 10 000. Sobre este valor, existe una amplia gama sobre la cual la relación del flujo y la generación de vórtices es lineal. El efecto de medir fluidos de más viscosidad es aumentar el flujo mínimo que puede medirse. Los valores mínimos y máximos de flujos medibles para agua, aire, y vapor se muestran en la tabla 2-3.

Como los medidores se extienden a través de una porción del diámetro del tubo, algún disturbio de flujo es creado con subsecuente pérdida de presión. Como regla, la caída de presión permanente es aproximadamente equivalente a un medidor de placas de orificio con

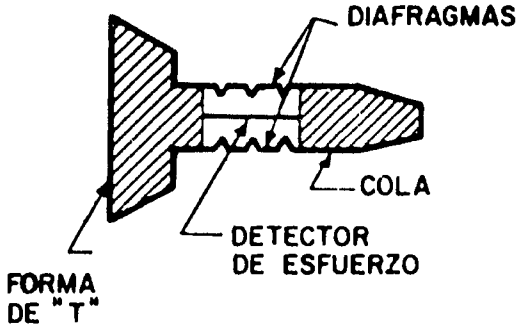


FIGURA 2-29. SECCION TRANSVERSAL DEL ELEMENTO ESPARCIDOR

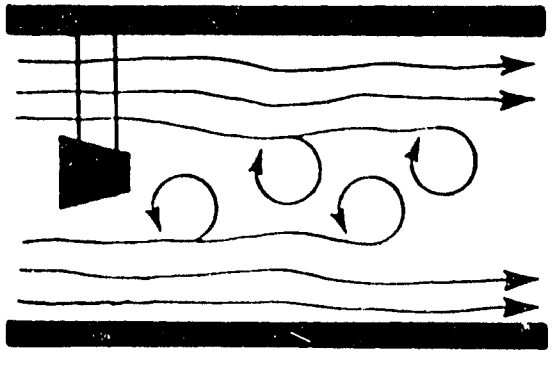


FIGURA 2-30. FORMACION DE REMOLINOS ALREDEDOR DE UN CUERPO ROMO EN UNA CORRIENTE DE FLUJO

un diámetro de orificio 0.7 veces el diámetro de la tubería. La pérdida total de presión es una función de la densidad del fluido y el flujo a partir de la ecuación:

$$dp = XVe$$

donde:

dp = pérdida de presión, psi.
X = coeficiente de pérdida de presión
V = valor de flujo
e = densidad

Las unidades de V dependen del fluido medido y deben ser gpm, lb/h, o pceh. La pérdida de presión es mayor para líquidos que para gases debido a su alta densidad. Una pérdida de presión típica para agua a flujo máximo es 5.0 psi, comparada con 0.95 psi para el vapor. Los coeficientes de pérdida de presión son suministrados por el fabricante.

2.6.3 Opciones de equipo

2.6.3.1 Forma vórtices

Descripción

Como el forma vórtices sólo requiere que un cuerpo romo sea colocado en la corriente de flujo, se deduce, que estos no involucran partes móviles en la corriente de flujo y no requieren conexiones externas para medir presión. Estos medidores no son altamente sensitivos a objetos extraños en el flujo, de donde, pueden manejar fluidos sucios con pocos problemas. También, el desgaste no es factor crítico, por lo cual, dentro de los límites, esto no influye en su exactitud. Exhiben gamas de relación de capacidad 10:1 generalmente, pero pueden aproximarse a valores hasta 16:1. Tienen un bajo con-

sumo eléctrico para condicionar la señal, una relativamente baja pérdida de presión, y un precio moderado. Su costo depende del tamaño de la tubería en la cual se instalará y de accesorios seleccionados. Un medidor sencillo especificado para generar una señal eléctrica en miliamperios que es proporcional al flujo cuesta $ 1 200 para tubería de un diámetro de 2.5 cm hasta $ 3 600 para tuberías de 20 cm.

TABLA 2 -3

Flujo mínimo y máximo medible

Fluido	Flujo Mínimo	Diámetro Correspondiente Tubería (pulgadas)	Flujo Máximo	Diámetro Correspondiente Tubería (pulgadas)	Unidades
Agua	13	2	2 850	8	gpm
Aire	3040*	2	286 000*	8	Pie^3/h
Vapor	164	2	10 900	8	Lb/h

* Condiciones base de 59°F y 14.7 psi

Aplicaciones recomendadas

Pueden medir líquidos y gases. Han sido usados para medir aire, vapor, y agua. Se recomiendan fluidos de baja viscosidad, ya que un incremento en la viscosidad aumenta el flujo mínimo que puede medirse.

Limitaciones

Tiene pocas limitaciones propias pero deben considerarse algunas limitaciones generales. Un requerimiento importante es que se

necesita flujo completamente desarrollado. Las medicioens se limitan a fluidos con baja viscosidad porque fluidos con alta viscosidad aumentan el flujo mínimo que el forma vórtices puede medir. Se recomienda que el medidor no sea operado arriba del 20% de su capacidad superior porque se puede dañar el sensor. Cuando se miden líquidos a alta temperatura, puede necesitarse una válvula de retroceso de presión, ya que el flujo de dos fases no puede medirse, y la baja presión corriente abajo del elemento generador puede provocar la evaporación instantánea del líquido a vapor.

Exactitud y confiabilidad

Tienen exactitudes de aproxiamdamente 1% y una rotación típica de capacidad hasta de 10:1. Estos medidores se consideran confiables. No son afectados por depósitos en el elemento generador desde que esto no cambia la formación del vórtice. Los problemas con estos medidores son fácilmente indentificados, ya que la señal de medición es de forma digital, y un mal funcionamiento representa la pérdida completa de la señal.

REFERENCIAS

(6) Flow Measurement and Meters, A. Linford 1961.

(7) Fluid Meters: Their Theory and Application, ASME Research Committee on Fluid Meters, 1959.

(8) Gas Engineers Handbook, Gerge Segeler, ed., 1977.

(9) "Guide to Gas Meters," Giles Crabtree, 1974.

(10) Handbook of Instrumentation and Controls, Howard P. Kallen, 1961.

(15) Kent Liquid Measurement Meter Catalog AP-4, Kent Meter Sales, 1983.

(16) "On the Application and Performance of Insertion Turbine Meters for Steam Flow Measurement," C. E. Miller, 1978.

(17) Principles and Practice of Flow Meter Engineering, Leland Spink, 1967

(18) Shell Flow Meter Engineering Handbook, T. S. Preston, ed., 1968

(19) "Special-Purpose Flowmeters Offer Better Accuracy, Range, Linearity," Power, John Reason, March 1983

(20) Steam Metering Guidebook, Engineering Measurements Company.

(25) Vortex Flowmeters - Technical Information, Foxboro Corporation, 1982.

3. MEDICIONES ELECTRICAS

3.1 VOLTIMETROS

El voltaje se define como la diferencia de potencial eléctrico entre dos conductores. Una analogía útil es el agua que corre en una tubería. El voltaje es una medida del potencial o la habilidad de mover electrones, al igual que la presión es una medida del potencial de la tubería para mover el agua. El voltaje es el valor eléctrico que se mide más comúnmente y los voltímetros son excelentes instrumentos para detectar fallas en piezas individuales de equipo, y también en el sistema de distribución de toda la planta de generación de potencia. Los voltajes incorrectos en la planta pueden ocasionar una falla prematura del equipo, un mal desempeño del equipo, y cuentas mayores por concepto de servicio eléctrico. Existe una amplia variedad de voltímetros para usos industriales. En lo que sigue se da una descripción de la instalación y manejo de los voltímetros, sus principios de funcionamiento y las opciones de equipo.

3.1.1 Operación básica e instalación

Todos los voltímetros necesitan la conexión de por lo menos dos alambres con el sistema que se va a medir. Se suministran voltímetros portátiles provistos de alambres flexibles de plomo y contactos de prueba aislados para efectuar verificaciones de punto. Los voltímetros de panel vienen dotados de bornes con puntales de adhesión en la parte posterior de la envoltura para efectuar conexiones permanentes. Los voltímetros portátiles no están diseñados para uso continuo y no deben estar conectados permanentemente a un sistema de potencia.

Los voltímetros de corriente directa (cd) llevan indicaciones para (+) y (-) conexiones y/o tienen bornes de conexión con códigos. Al usar un voltímetro de cd, hay que asegurarse de que la polaridad sea la correcta, ya que una conexión incorrecta puede ocasionar la quema

de un fusible o hasta daños al voltímetro. En cuanto a los voltímetros de corriente alterna (ca), la conexión no es, por regla general, importante, pero debe tenerse cuidado cuando se efectúen conexiones con sistemas trifásicos. Una conexión incorrecta del voltímetro entre una fase y neutro a través de fases puede resultar en voltajes excesivos en el voltímetro con el subsiguiente daño del aparato.

Los voltímetros de corriente continua y los de corriente alterna no son intercambiables. La aplicación de un voltaje de ca a un voltímetro de cd o al contrario puede dar una lectura incorrecta. Las conexiones durante períodos prolongados con el tipo de voltaje incorrecto puede causar daños permanentes al voltímetro. Algunos voltímetros que utilizan circuitos electrónicos pueden conmutar automáticamente entre ca y cd.

Con el fin de obtener mejores resultados, los voltímetros (y cualquier otro equipo de medición eléctrica) deben emplearse de modo que el voltaje medido se sitúe en el tercio superior de la escala medidora. Ya que el error del voltímetro es siempre un porcentaje de la escala medidora completa, una lectura en el tercio superior de la escala asegurará que el error real sea lo más bajo posible.

El voltaje puede medirse con los cables del sistema de suministro conectados o no a una carga (motor, luces, etc.). Al determinar el voltaje aplicado a un equipo específico se recomienda que el equipo esté conectado y que funcione normalmente. Esto asegurará que cualquier caída de voltaje asociada a la conexión del equipo esté tomada en cuenta en la medición.

Cuando se haga funcionar un voltímetro, hay que estar seguro de que se está usando en la posición para el cual fue diseñado. La mayoría de los voltímetros de panel deben estar en posición vertical para dar una lectura correcta, mientras que los portátiles pueden funcionar en posición vertical u horizontal. Los voltímetros que tienen presentación digital no son, por regla general, sensibles a la posición.

Los voltímetros que funcionan cerca de tableros grandes de distribución de potencia pueden ser afectados por las corrientes que pasan por el tablero. Por consiguiente, siempre que sea posible, el voltímetro debe mantenerse lo más alejado posible de los conductores de alta tensión.

Los voltímetros portátiles tienen elementos móviles de medición que usualmente no estan disenados para funcionamiento continuo. Una conexión durante un período largo puede producir suficiente calor dentro del voltímetro para dañar algunos componentes vitales del aparato. Aunque no es probable que ocurra una falla completa, los daños en el voltímetro pueden causar cambios de calibración permanentes.

Cuando se use un voltímetro con intervalos múltiples, se empieza en la escala de mayor intervalo y luego se va bajando hasta la gama apropiada. Esto asegurará que el movimiento del medidor no sea dañado por las condiciones de sobrevoltaje.

3.1.2 Principios de operación

Casi todos los voltímetros de tipo analógico (indicador de dial) emplean uno de los dos tipos corrientes de elementos móviles de medidor (el elemento móvil del medidor es la parte indicadora del instrumento). El galvanómetro d'Arsonval, o elemento móvil de imán permanente de bobina móvil, es uno de los instrumentos indicadores de uso más corrientes. El elemento móvil d'Arsonval es un dispositivo sumamente sensible a la cd. En la gráfica 3-1 se muestra la construcción del elemento móvil. Consiste en una bobina giratoria adherida a la aguja indicadora que está rodeada de un imán permanente. Una pequeña corriente que pase por la bobina del núcleo suscita una atracción entre el núcleo y el imán. Esta atracción causa el giro del núcleo y el imán. Esta atracción causa el giro del núcleo y el movimiento de la aguja indicadora. Los galvanómetros corrientes necesitan corrientes muy bajas, entre 10^{-3} y 10^{-6} amperios, para impartir una deflexión de escala completa. Esto limita en mucho la aplicación del galvanómetro cuando se usa sólo

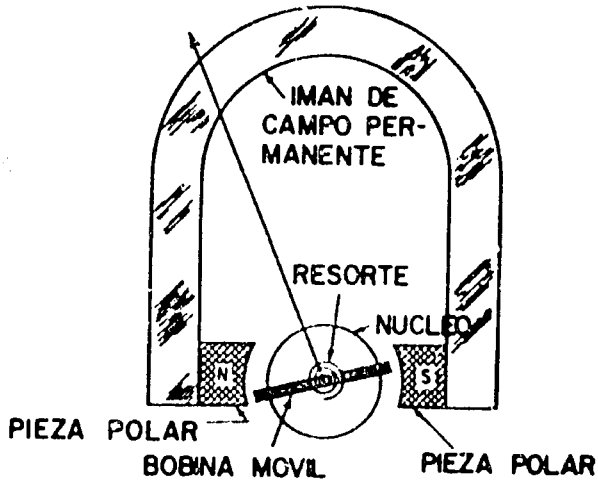


FIGURA 3-1. GALVANOMETRO D'ARSONVAL

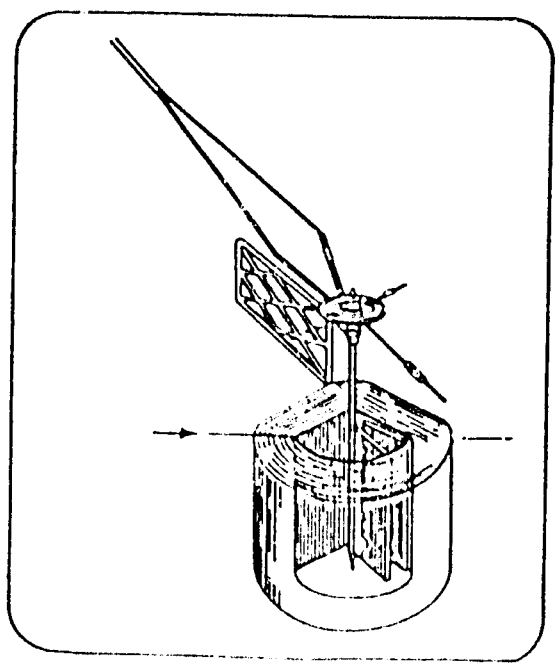


FIGURA 3-2. GALVANOMETRO DE ELEMENTO MOVIL DE ALETA DE HIERRO

como un instrumento de medición. En combinación con otros instrumentos, sin embargo, se convierte en un aparato versatil.

El elemento móvil de aleta de hierro, que se muestra en la gráfica 3.2, es el otro dispositivo popular de medición de voltaje. Emplea una bobina fija, una aleta de hierro móvil, y una aleta estacionaria. La corriente que pasa por la bobina exterior produce una repulsión entre la aleta fija y el elemento móvil. Los elementos móviles de aletas de hierro no son tan exactos como los aparatos de bobina móvil, pero son menos sensibles a la vibración y la humedad que los de bovina móvil. Los elementos móviles de aleta de hierro se emplean en la fabricación de instrumentos que no son críticos como, por ejemplo, amperímetros o voltímetros para cargadores de baterías.

Voltímetros de corriente directa

El voltímetro de cd, en su forma más sencilla, consiste en un resistor y un elemento móvil sensible a la corriente. En la gráfica 3-3 se muestra un esquema de un voltímetro sencillo de cc. El resistor R, tiene un valor alto y la corriente que pasa a través del medidor, es pequeña, corrientemente algunos miliamperios (10^{-3} amperios). El movimiento de la aguja del medidor indica el paso de corriente. Ya que la resistencia total del circuito del medidor es constante, la corriente que pasa por el circuito del medidor (y el movimiento de la aguja) es proporcional al voltaje medido:

$$V = I \times R_T$$

donde:

V = voltios aplicados.

I = corriente en el circuito del medidor.

R_T = resistencia del circuito del medidor ($R + Rm$)

Si R_T es constante, $V \propto I$

Voltímetros de Corriente Alterna

Los voltímetros más comunes de corriente alterna son semejantes a los voltímetros de cd, pero tienen un circuito de diodo llamado rectificador. El rectificador transforma la corriente alterna que pasa por el circuito del medidor en corriente directa. El elemento móvil medidor indica el paso de corriente y, como antes, el flujo de carga es proporcional al voltaje (ca) aplicado. En la gráfica 3-4 se muestra el esquema de un voltímetro sencillo de ca. La resistencia del medidor de los voltímetros de ac es generalmente más baja que la de los medidores de cd, ya que los diodos en el rectificador no producen una señal cd perfecta para el elemento móvil, por lo cual es deseable una mayor señal de corriente.

Voltímetros electrónicos

Los voltímetros electrónicos de estado sólido emplean circuitos especiales para aislar el elemento móvil del circuito de medición. En la gráfica 3-5 se muestra un voltímetro electrónico sencillo. Típicamente, el circuito electrónico tiene una resistencia tan alta que se necesita una batería externa para amplificar la señal de medición. La mayoría de los voltímetros electrónicos, tanto de ca como de cd, tienen una resistencia que es 40 000 veces la escala de voltaje total. Esto permite que el voltímetro efectúe mediciones sumamente precisas mientras que extrae una cantidad mínima de corriente del circuito que se está probando. Muchos voltímetros electrónicos reemplazan los indicadores sensibles a la corriente por presentaciones electrónicas digitales.

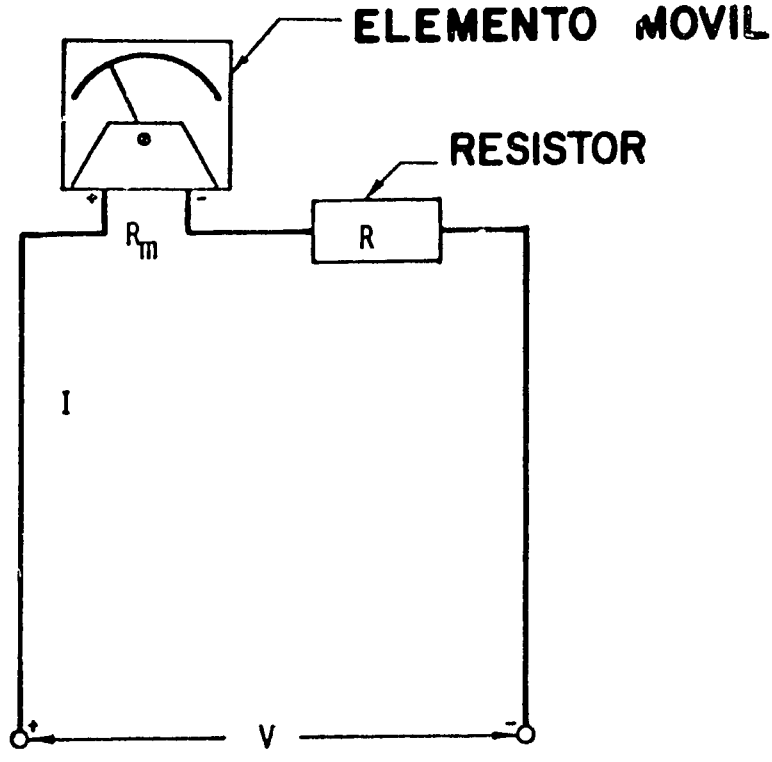


FIGURA 3-3 VOLTIMETRO DE C. D.

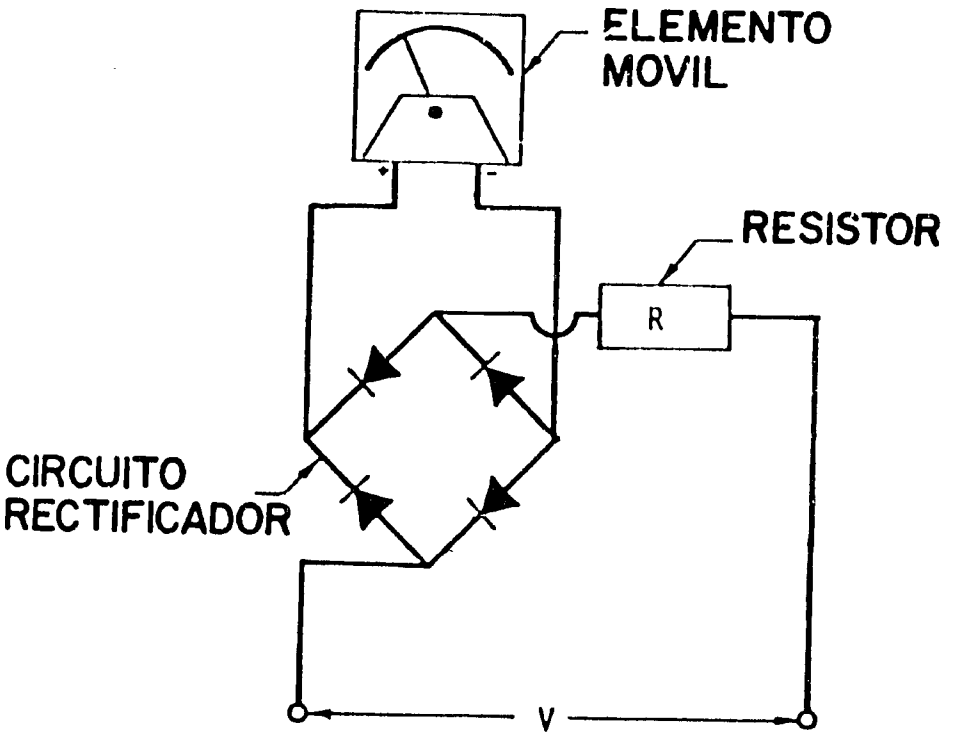


FIGURA 3-4. VOLTIMETRO C.A.

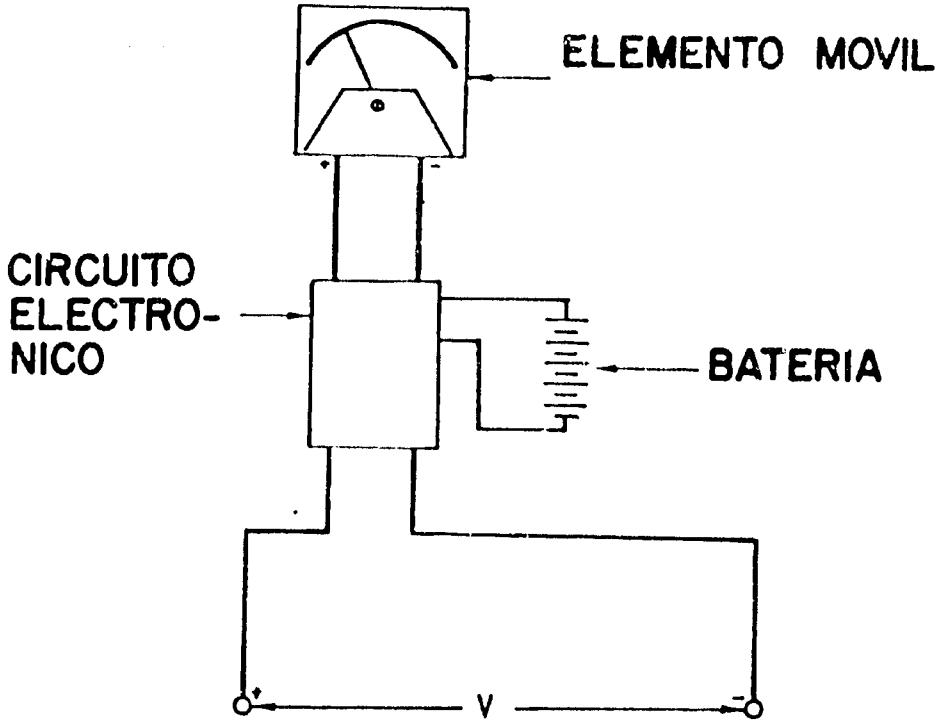


FIGURA 3-5. VOLTIMETRO ELECTRONICO

3.1.3 Opciones de equipo

Existen voltímetros para casi cualquier gama de voltaje que pueda darse en la industria. Los tipos de equipo que se describen en seguida no representan toda la variedad de instrumentos que hay disponibles para medición de voltaje, sino solamente aquéllos que son más apropiados para uso en la industria.

3.1.3.1 Voltímetros de Tablero

Descripción

Un voltímetro de panel o de tablero es, por regla general, un medidor de una sola función diseñado para conexión permanente y montado en un panel o tablero. Los voltímetros de tablero están disponibles para medir todos los voltajes desde milivoltios (10^{-3} V) a kilovoltios (10^{3} V), tanto de corriente alterna como corriente directa. Los voltímetros de tablero de hasta 1 000 voltios son de los tipos que se describieron en Principios de Operación. Para más de 1 000 voltios, muchos voltímetros de tablero emplean un transformador para disminuir la señal de voltaje enviada al medidor. Los transformadores de potencial reducen el voltaje enviado al medidor según la razón de los devobinados del transformador. Los transductores especiales reducen los altos voltajes de cd a niveles de señal que puedan usarse. En la gráfica 3-6 se muestran algunos voltímetros de tablero comunes. Hay a disposición una amplia gama de tamaños, estilos y diseños de medidores. En general, los voltímetros de tablero no son caros, pero los medidores de precisión y los que tienen escalas especiales pueden ser costosos. El costo de los voltímetros de tablero varían, generalmente, entre $40 y $100.

Usos recomendados

Los voltímetros de tablero deben emplearse donde exista una necesidad regular de medir voltaje y/o donde es difícil o impráctica la

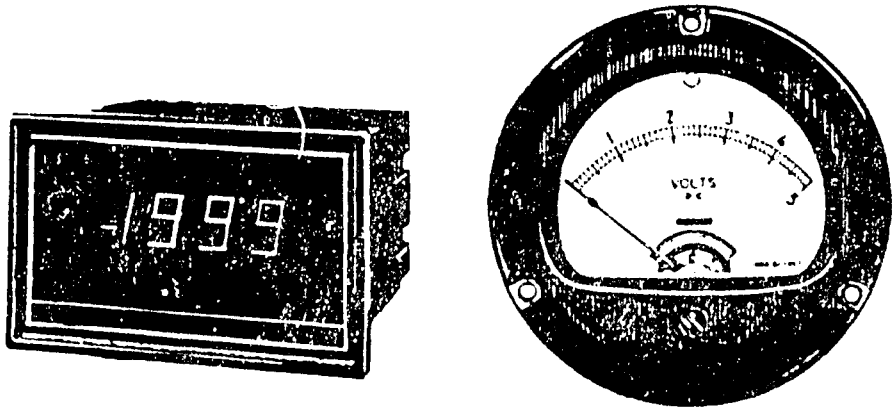


FIGURA 3-6. VOLTIMETROS DE TABLERO

conexión de voltímetro portátil. Los voltímetros para tablero se fabrican para uso continuo. Poseen una ventilación adecuada para evitar los daños del medidor debido a recalentamiento dentro de la envoltura. Los móviles del medidor son de construcción sólida para resistir la vibración que ocurre en los tableros y en los paneles de equipo de control.

Los voltímetros para tableros deben ser instalados en posición vertical, usualmente al nivel de la vista o cerca de él. Si hay que medir varios voltajes en un mismo tablero, la mayoría de los fabricantes ofrecen conmutadores de posiciones múltiples para tal propósito.

Limitaciones

Debido a que los voltímetros de tablero están previstos para servicio continuo y, frecuentemente, arduo, se sacrifica alguna sensibilidad y exactitud a expensas de la durabilidad. Los voltímetros de tablero no deben emplearse para mediciones críticas, y las lecturas inusitadas en el tablero deben verificarse con un medidor portátil más exacto. Los voltímetros que emplean elementos móviles de aletas de hierro deben usarse únicamente para mediciones sumamente burdas.

Ya que los voltímetros para tableros están previstos para trabajos arduos, no han sido diseñados para ser portátiles. El propio medidor es, frecuentemente, sensible a la orientación y puede dar registros incorrectos si no se coloca en posición vertical. Además, los bornes expuestos en la parte posterior de la caja del medidor aumentan el riesgo de sacudidas o cortos circuitos cuando se emplean en posición desmontada.

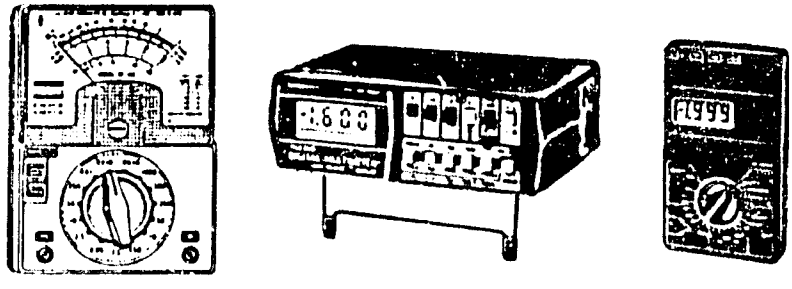


FIGURA 3-7. MULTIMETROS

Exactitud y confiabilidad

Al igual que la mayoría de instrumentos de medición eléctrica de tablero, los voltímetros de tablero son sólo marginalmente exactos (± 5% a 10% de la escala completa), pero pueden obtenerse medidores de precisión a un costo extra. Los voltímetros de tablero que usan elementos móviles de aletas de hierro son, generalmente, menos exactos que los que emplean elementos móviles d'Arsonval. Los voltímetros electrónicos de tablero tienen circuitos precisos, pero la exactitud de las mediciones está limitada por el número de unidades digitales provistas en la presentación de lectura.

Los voltímetros de tablero están diseñados para muchos años sin necesidad de mantenimiento. Aunque no son sumamente precisos, son muy confiables.

3.1.3.2 Multímetros

Descripción

El multímetro es el tipo más común de voltímetro portátil. Es un medidor completo, portátil, de múltiples funciones que sirve para medir voltios de ca ó cd, además de miliamperios de cd y resistencia (ohmios). En la gráfica 3-7 se muestran tres multímetros corrientes. El medidor viene provisto de puntas de prueba aisladas para efectuar mediciones de punto. Los circuitos dentro del propio multímetro pueden variar entre los bancos de resistores convencionales y circuitos electrónicos complicados. Las presentaciones pueden variar entre elementos móviles d'Arsonval convencionales y presentaciones digitales electrónicas.

En general, el costo de los multímetros depende de la selección de la gama y la precisión. Los medidores con un gran número de selecciones de intervalos son proporcionalmente más caros que los que

disponen de pocas gamas. El precio de estos voltímetros varía entre $ 40 y $ 450, según fuere su complejidad.

Usos recomendados

Los multímetros se emplean para efectuar verificaciones instantáneas de voltajes de ca y cd hasta de 1 000 voltios. Las funciones adicionales del medidor permiten realizar mediciones de corrientes bajas y de resistencias. En cuanto a usos industriales comunes, los multímetros electrónicos ofrecen escasas ventajas sobre los multímetros convencionales, pero son más útiles cuando se trabaja en sistemas de mando electrónicos u otros dispositivos electrónicos de baja potencia. Los multímetros deben emplearse cuando es innecesaria o impráctica la conexión con un medidor de tablero. Además, pueden emplearse para verificar lecturas en medidores de tablero cuando se registren valores inusitados.

Limitaciones

Los multímetros están previstos para registrar mediciones de voltaje instantáneas y precisas. La conexión durante largo tiempo de un multímetro ocasiona, por lo general, una excesiva generación de calor que, a su vez, da por resultado una disminución en la exactitud del aparato. La conexión por tiempo prolongado puede averiar permanentemente los resistores del medidor y el elemento móvil. Ya que los multímetros están diseñados para precisión y portabilidad, se sacrifican la resistencia a los golpes mecánicos y la protección eléctrica. Los móviles de los multímetros son muy sensibles, y un fuerte golpe o sacudida puede averiar el móvil. En vista de que el blindaje electromagnético es mínimo, el medidor debe mantenerse tan alejado como sea posible de conductores de alta tensión.

Exactitud y confiabilidad

El precio de un multímetro es, en gran parte, una función de la exactitud deseada. Los multímetros convencionales baratos tienen, por lo general, una exactitud escasamente mejor que los medidores de tablero (3% a 7% de la escala completa), mientras que los medidores electrónicos de precisión tienen exactitudes de - 0.01% de la escala plena. La mayoría de los multímetros industriales de alta calidad tienen una exactitud que varía entre el 1% y el 5% de la escala completa.

Con buen tratamiento hasta un multímetro de bajo costo puede proporcionar años de servicio sin problemas. El multímetro está diseñado para precisión y portabilidad. El cuidado apropiado de la caja o estuche y del medidor garantizará un funcionamiento confiable y seguro.

3.2 AMPERIMETROS

La corriente eléctrica se define como el flujo de cargas eléctricas (en amperios) a través de un conductor. El amperímetro, en sus diversas formas, es un dispositivo para medir el flujo de carga o sea la corriente. En la mayoría de las aplicaciones industriales, donde el suministro de voltaje es casi constante, las mediciones de corriente proporcionan una indicación de la carga del equipo o el sistema y del consumo de potencia. Debido a que las pérdidas de energía del equipo y del sistema de suministro están relacionadas con la corriente, en vez del voltaje, los amperímetros tienen su principal utilización en la identificación y localización de las pérdidas de energía del sistema y el equipo.

3.2.1 Operación básica e instalación

Muchos amperímetros, aunque no todos, necesitan interrupción de las líneas de suministro de potencia. Los amperímetros de derivación y algunos amperímetros de transformador de corriente deben insertarse en la línea que se está midiendo. Los amperímetros de transformador más populares solamente necesitan ser colocados alrededor de la barra colectora o del cable que se ha de medir.

Tal como indica el nombre, los amperímetros de transformador de corriente emplean un transformador especial y solamente pueden funcionar con corriente alterna. Aunque la conexión de un amperímetro TC a un sistema de corriente directa no causaría, por regla general, ningún daño al medidor, la medición de corriente directa no es posible.

Los amperímetros de derivación deben conectarse en serie con la carga que se desea determinar. La conexión de un amperímetro de derivación en paralelo con la carga puede causar graves averías al medidor. Los amperímetros derivadores de corriente directa deben ser conectados con la polaridad apropiada. Una conexión incorrecta puede dar por resultado daños en el elemento móvil del medidor.

Los transformadores de corriente externa, por otra parte, están diseñados para conexión en paralelo y operación casi en corto circuito, y solamente entregarán una corriente de 5 amperios. En las gráficas 3-8 y 3-9 se muestran los diagramas de conexión para los amperímetros de derivación y de transformador de corriente (TC). Antes de conectar un amperímetro hay que consultar siempre las instrucciones del fabricante.

Cuando se conecten los transformadores de corriente externa o se les dé mantenimiento, las puntas secundarias no deben quedar desconectadas cuando la línea que está midiendo lleva corriente. Ya que los transformadores de corriente están diseñados para operar en condición de corto circuito, los bornes secundarios (del medidor) deben ponerse en corto circuito mediante un alambre antes de desconectar el amperímetro. Si no se cortocircuitan los bornes se permitirá la generación de un alto voltaje dentro del transformador. El alto voltaje puede entrañar un peligro de golpe eléctrico o dañar el aislamiento dentro del transformador.

Al igual que los voltímetros, los amperímetros de ca y cd no son intercambiables. Una conexión momentánea a la fuente incorrecta no causa, por regla general, daño alguno, pero una conexión durante largo tiempo puede averiar el elemento móvil. La conexión de un amperímetro de corriente alterna a una fuente de corriente directa o viceversa, puede dar lecturas incorrectas.

Para obtener mejores resultados, los amperímetros deben usarse de tal modo que la corriente medida se sitúe en el tercio superior de la escala medidora. Ya que el error del medidor es siempre un porcentaje de la escala medidora total, una lectura en el tercio superior de la escala garantizará que los errores sean lo más mínimos posibles. La corriente debe ser medida con el suministro conectado a una carga, ya que no pasa corriente si el circuito está abierto.

Al igual que cualquier otro medidor eléctrico, un amperímetro debe operar en la posición para la cual ha sido diseñado. Los medidores

de tablero deben ser instalados verticalmente, mientras que los portátiles deben funcionar en posiciones vertical u horizontal. Los amperímetros digitales no son sensibles a la posición, y los transformadores de corriente no son sensibles a la orientación.

Los amperímetros portátiles no están diseñados usualmente para funcionamiento continuo. Estos medidores emplean un resistor en derivación, y, aunque el calor generado en el resistor derivador no afecta su funcionamiento, sí podría afectar la operación de otros componentes del aparato. Aunque la conexión durante largo tiempo no causa usualmente una falla completa, puede ocasionar que el amperímetro se vuelva permanentemente inexacto.

Cuando se utilice un amperímetro con intervalos o gamas múltiples, se empieza por el intervalo más alto y se va bajando hasta el intervalo apropiado. Este método garantizará que el elemento móvil del medidor no sea dañado por condiciones de sobrecorriente.

3.2.2 Principios de operación

Casi todos los amperímetros analógicos (indicador de dial) utilizan uno o dos tipos comunes de elemento móvil. (el elemento móvil es la parte indicadora del instrumento). El galvanómetro d' Arsonval, o elemento móvil de imán permanente de bobina móvil, es uno de los instrumentos indicadores que más se emplean. El elemento móvil d' Arsonval es un dispositivo medidor de corriente continua sumamente sensible. En la gráfica 3-1 se muestra la construcción del elemento móvil. Este consiste sencillamente en una bobina de núcleo giratorio que está adherida a la aguja indicadora rodeada de un imán permanente. Una escasa corriente que pase a través de la bobina ocasiona una atracción entre el núcleo y el imán. Esta atracción causa la rotación del núcleo y el movimiento de la aguja indicadora. Los galvanómetros comunes necesitan entre 10^{-3} y 10^{-6} amperios para una deflexion de la escala completa. Esto limita en mucho el empleo del galvanómetro

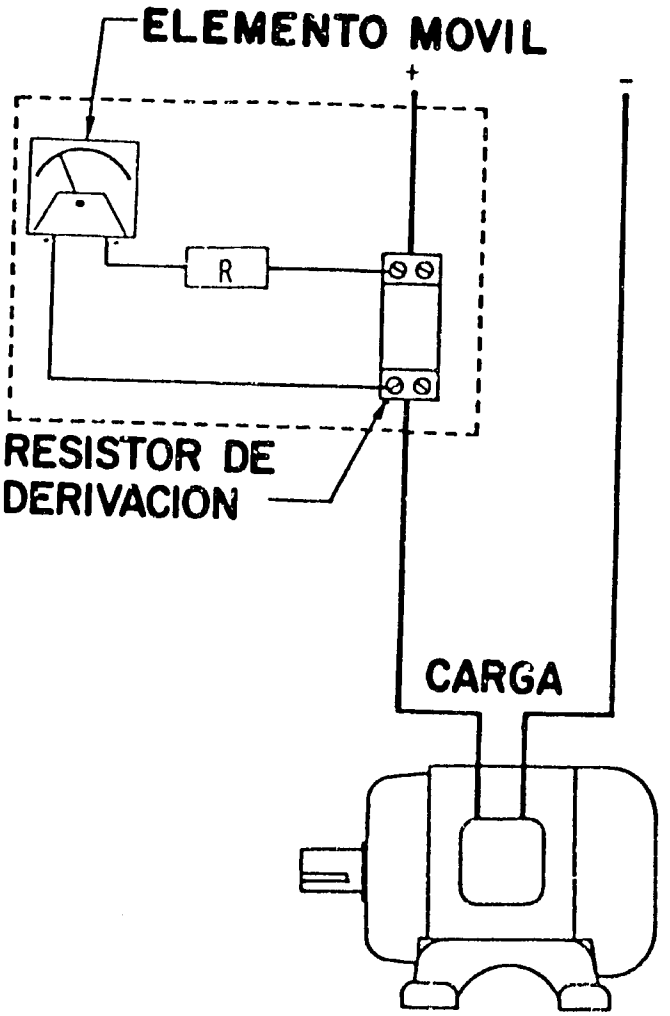


FIGURA 3-8 AMPERIMETRO DE DERIVACION DE C. D.

como un instrumento único de medición. Sin embargo, en combinación con otros componentes, se convierte en un instrumento muy versátil.

El elemento móvil de aleta de hierro, que se muestra en la gráfica 3-2, es un segundo aparato popular para medición de corriente. Emplea una bobina fija, una aleta de hierro móvil y una aleta estacionaria. La corriente que pasa por la bobina exterior produce una repulsión entre la aleta fija y la móvil. El movimiento de las aletas (y agujas) es proporcional a la corriente. Los elementos móviles de aletas de hierro no son tan exactos como los aparatos de bobina móvil. Los móviles de aleta se emplean en la fabricación de instrumentos que no son críticos como, por ejemplo, voltímetros o amperímetros para cargadores de baterías.

Amperímetros de derivación para corriente directa

Los amperímetros de derivación se emplean para medir corrientes directa y alterna. En la gráfica 3-8 se muestra un esquema de un amperímetro derivador para corriente continua. El derivador, un resistor metálico de baja resistencia, se inserta en la línea que se va a medir. La combinación del elemento móvil y resistor mide la caída de voltaje a través del derivador. Los amperímetros derivadores para corriente alterna funcionan en base al mismo principio pero llevan diodos para convertir la corriente del medidor a corriente continua.

Amperímetros de transformador de corriente

Estos amperímetros emplean un transformador de anillo para medir la corriente. En la gráfica 3-9 se ilustra un sencillo amperímetro de TC. Debido a que funciona en base a principios de inducción, el amperímetro de TC se emplea solamente para mediciones de corriente alterna. El núcleo en forma de anillo está fabricado de una lámina-ción de hierro para especificaciones de transformador. La corriente

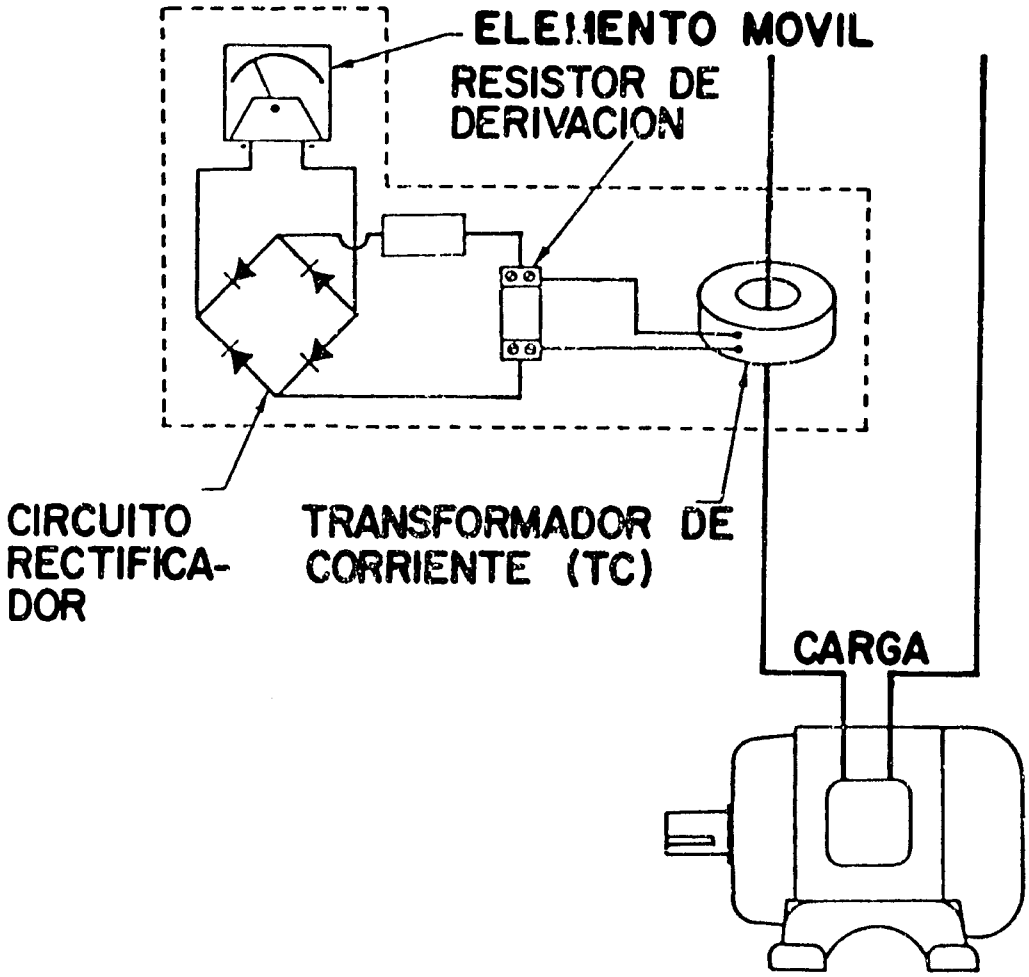


FIGURA 3-9 AMPERIMETRO (TC) DE CA

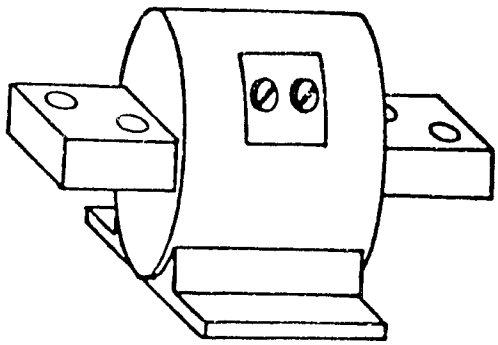
que pasa por el alambre que se mide induce una corriente en el devanado secundario del núcleo. Esta corriente secundaria pasa a través de un derivador.

El resto del medidor funciona como un amperímetro derivador de ca. Muchos medidores de menor precisión llevan el elemento móvil conectado directamente a través de los devanados secundarios del TC. Los registros que dan estos instrumentos se ven afectados por las variaciones en el voltaje y la frecuencia de las líneas medidas. Los amperímetros de TC de escala múltiple tienen devanados secundarios múltiples o de derivación para diferentes gamas de corriente.

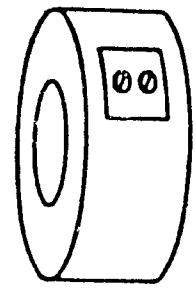
Hay una amplia variedad de transformadores de corriente externa para aumentar la gama de los amperímetros de derivación. En la gráfica 3-10 se muestran dos variaciones de transformadores de corriente. Con el TC de anillo que se muestran en la gráfica 3-10 (b), el conductor que es medido actúa como un devanado primario. En la gráfica 3-10 (a) se muestra un transformador de corriente de tipo en línea que tiene devanados internos, y que la corriente que se mide debe pasar a través del transformador. En cualquier caso, el devanado primario induce un campo magnético en el núcleo laminado. Este campo, a su vez induce una corriente en el devanado secundario. Debido a que el voltaje de línea medido es constante y los devanados secundarios están casi en corto circuito (el derivador tiene una resistencia baja), la corriente que pasa a través del devanado secundario es proporcional a la corriente que pasa por la línea medida.

Amperímetros de abrazadera para corriente directa

Algunos amperímetros portátiles de abrazadera utilizan circuitos electrónicos para medir el campo magnético producido por el paso de la corriente a través del conductor. La intensidad del campo magnético es proporcional a la corriente directa. El circuito del medidor transforma la intensidad del campo magnético en un registro calibrado de corriente directa.



TIPO EN LINEA



TIPO DE ANILLO

FIGURA 3-10. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

3.2.3 Opciones de equipo

Hay a disposición una gran variedad de amperímetros para casi cualquier intervalo de corriente que se da en la industria. Los tipos de aparatos que se describen a continuación no representan toda la gama de los instrumentos disponibles, sino más bien los que son más apropiados para uso industrial.

3.2.3.1 Amperímetros de derivación integrales

Descripción

Los amperímetros de derivación de panel o tablero existen en una amplia variedad de tamaños y estilos. Aunque los hay para intervalos de corriente de hasta 100 amperios, la mayoría están en la gama de 30 amperios o menos. Los medidores contienen en un estuche completo un amperímetro de derivación y un detector de caída de voltaje. Los elementos móviles varían entre el tipo de aleta para indicadores baratos para cargadores de batería hasta medidores de corriente (caros) con presentación digital. El precio de estos instrumentos varía, por lo general, entre $ 40 y $ 150.

Usos recomendados

Los amperímetros de derivación integrales para tableros se emplean generalmente para la medición de corriente en paneles de control tanto para corriente alterna como para directa. Estos medidores se emplean para aplicaciones que no sean críticas, tales como, indicadores de amperios de cargadores de acumuladores. Como lo indica su nombre, estos amperímetros están diseñados para instalación en paneles o tableros. La corriente que se mide pasa a través del medidor por conducto de los bornes situados en la parte posterior de la caja del medidor.

Limitaciones

Debido a la acumulación de calor del derivador dentro de la caja y de la longitud de los cables que se necesita para llevar la corriente al medidor, la mayoría de los amperímetros de derivación integrales tiene aplicación en áreas de baja corriente. Los amperímetros externos o medidores de transformación de corriente se prefieren para corrientes mayores de 30 amperios.

Exactitud y confiabilidad

Al igual que los amperímetros de panel, los amperímetros de derivación integrales están diseñados para servicio arduo y confiable. Aunque proporcionan una indicación relativa (solamente una exactitud de ± 15% para medidores de aletas de hierro), las mediciones críticas deben efectuarse con un amperímetro de transformación de corriente para ca, o bien una combinación de derivador preciso y un milivoltímetro para corriente directa.

3.2.3.2 Amperímetros de derivación externos

Descripción

Para corrientes directas mayores de 30 amperios, el derivador del amperímetro es generalmente aparte de la caja del medidor. Esto asegura que el calor generado por el derivador no dañe el elemento móvil y también permite una conexión conveniente del derivador con alambres largos. El derivador se inserta en la línea que se va a medir. El medidor del panel es, en realida, un milivoltímetro cuya deflexión de escala total se sitúa usualmente entre 50 y 500 milivoltios (10^{-3} voltios), y cuya escala de lectura está graduada en amperios que corresponden al tamaño del derivador. El medidor se conecta a través del derivador

mediante alambres especialmente calibrados. La caída de voltaje a través del derivador es proporcional a la corriente que pasa por el derivador.

Las combinaciones de derivador y milivoltímetro están a disposición para corrientes directas que varían entre 10 y miles de amperios y para voltajes de hasta 1 000 voltios. Si bien los derivadores en sí son generalmente muy precisos, la precisión de los milivoltímetros varían según su precio. Los medidores más comunes varían entre medidores de aletas sencillos (y baratos) de "carga/descarga" y aparatos de precisión electrónicos con presentación digital. El precio de estos instrumentos es mayor que el de los medidores integrales debido al costo extra del derivador, y los precios fluctúan, por lo general, entre $60 y $120.

Usos recomendados

Los amperímetros de derivación externos se emplean en la vigilancia continua o regular de corriente continua alta y mediana. Estos medidores se encuentran comúnmente en dispositivos de distribución de plantas de corriente directa. Frecuentemente, se incluye un conmutador para vigilar derivadores múltiples con un voltímetro. Ya que los medidores de transformador de corriente no funcionan con corriente directa, los amperímetros derivadores externos de cd son la única opción para la vigilancia continua del paso de corriente en grandes cargas cd, tales como motores de cd, tanques de plancheado, o imanes de alza, etc.

En la gráfica 3-11 se muestran algunos derivadores comunes y los medidores asociados de panel. Como su nombre lo indica, los medidores están diseñados para montaje permanente en el tablero. Los derivadores están diseñados para ser instalados en el tablero y conectados en serie con los conductores que se han de medir. El voltaje en las puntas del medidor es bastante bajo y no se corre el riesgo de sacudidas eléctricas siempre que esté aislado adecuadamente.

Limitaciones

Los amperímetros de derivación externos de tablero están limitados a sistemas de suministro de voltaje de 1 000 voltios o menos. Debido a que los derivadores están descubiertos para enfriamiento adecuado, los riesgos de sacudidas y efecto de arco son problemas que ocurren a más de 1 000 voltios.

Exactitud y confiabilidad

Al igual que otros dispositivos de medición eléctrica, el costo de un amperímetro derivador está en función de la exactitud requerida. Aunque la mayoría de los amperímetros de derivación comercialmente disponibles son bastantes exactos (± 1% a 5% de la deflexión de la escala total), los milivoltímetros baratos de aletas de hierro pueden ser menos exactos, mientras que los milivoltímetros digitales pueden tener una exactitud de ± 0.001%.

Los amperímetros de derivación externos para corriente directa son fabricados para largos años de servicio arduo y confiable. Se emplean únicamente en tableros y paneles y, por consiguiente, están diseñados para resistir vibraciones, uso contínuo, y hasta golpes leves.

3.2.3.3 Amperímetros de transformador de corriente

Descripción

Las corrientes alternas mayores de 30 amperios se miden empleando un transformador de corriente y el amperímetro adjunto. Ya que no hay conexión física entre el circuito medidor y la línea medida, los medidores de TC pueden emplearse para casi cualesquier voltaje y corriente ca industriales. El transformador de corriente está diseñado de modo que el devanado secundario produzca de 0 a 5 amperios a medida que la corriente medida varía entre el cero al máximo.

La señal de corriente de 0 a 5 amperios es medida, entonces, por un amperímetro derivador integral cuya escala está marcada para corresponder con la capacidad de medición de corriente del TC. En general, los amperímetros de TC son más caros que los correspondientes derivadores de cc, pero son muy precisos y fiables. Sin embargo, el diseño de los transformadores de corriente los hace sumamente peligrosos si no se toman la debidas precauciones de operación (véase los Principios de Operación anteriores). Los precios varían generalmente entre $60. y $150.

Usos recomendados

Los amperímetros de transformación de corriente para tablero están diseñados para conexión permanente en subestaciones y dispositivos de distribución. En la gráfica 3-12 se muestran algunos transformadores de corriente comunes y los amperímetros adjuntos. Los TC están disponibles en dos estilos principales. Un estilo, que se semeja mucho a un fusible grande, debe ser insertado en la línea que se ha de medir. Estos se emplean generalmente en líneas que portan 600 voltios o menos. El segundo tipo o estilo, que es un transformador de anillo, está a disposición en una gran variedad de tamaños, pero casi siempre se emplea para 1 000 voltios o más.

Los medidores para medir la salida del TC están disponibles en los tamaños y estilos que corresponden a los voltímetros comunes de tablero. De nuevo, la precisión y la confiabilidad del medidor son una función del costo. Los medidores de aletas de hierro pueden tener precisiones tan bajas como de ± 15% de la escala toda, mientras que los medidores digitales programables pueden tener precisiones de ± 0.01% de la escala total.

Limitaciones

Los amperímetros de TC están circunscritos a mediciones de corriente alterna. Existen en gran número de tamaños, y los TC fabricados

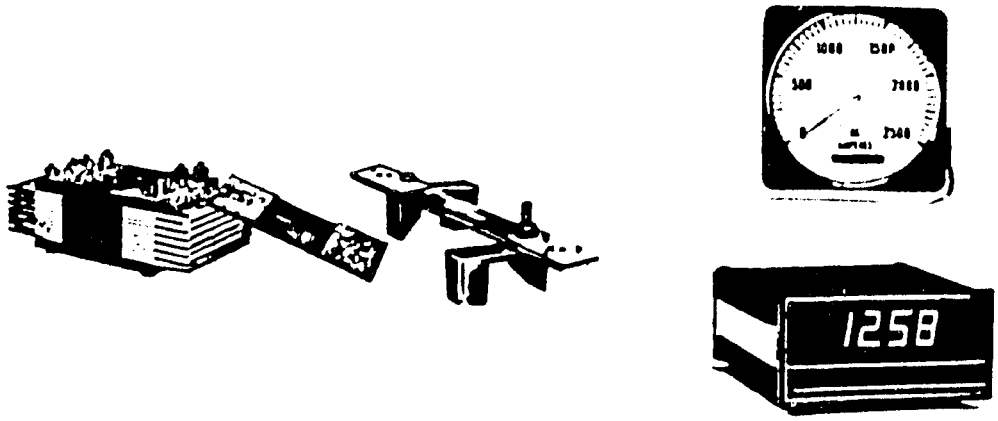


FIGURA 3-11. DERIVADORES Y AMPERIMETROS DE TABLERO

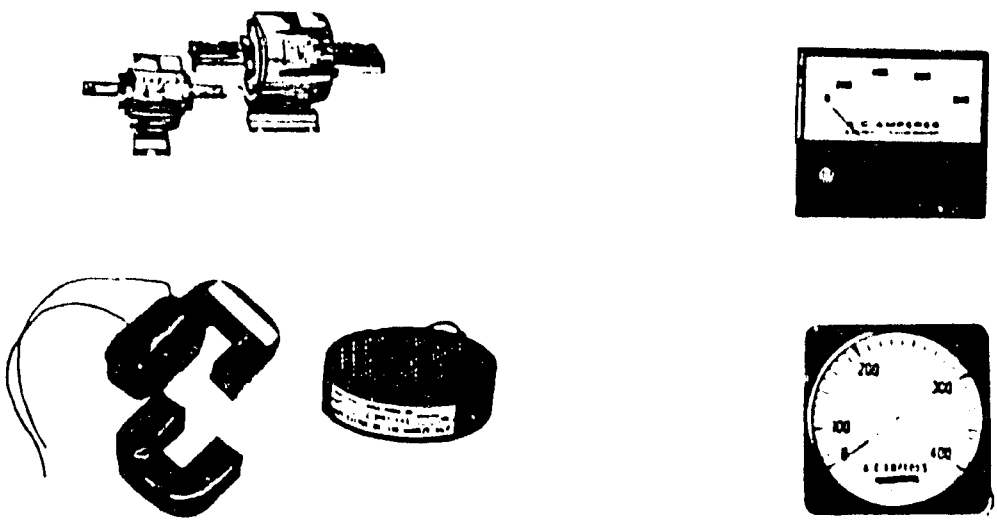


FIGURA 3-12. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y AMPERIMETROS DE TABLERO

según pedido pueden obtenerse fácilmente. En general, los amperímetros de TC no se fabrican para corrientes menores de 10 amperios.

Exactitud y confiabilidad

Los amperímetros de TC para panel de precio moderado tienen exactitudes del orden de ± 2% de la escala total. Los meros transformadores de corriente, al igual que los derivadores de cd, son por lo general muy precisos. El mayor margen de error se deriva del medidor, y no del TC. A diferencia de los amperímetros de derivación, sin embargo, la señal principal impulsadora del medidor para los amperímetros de TC es de 0 a 5 amperios, en vez de 0 a 50 milivoltios que dan los amperímetros de derivación. Esto hace que los amperímetros de TC sean considerablemente más confiables y menos sensibles a las condiciones dentro del tablero.

Los amperímetros de transformación de corriente estan diseñados para mantener su exactitud y confiabilidad bajo condiciones industriales adversas. Debido a que no existe conexión física entre el medidor y la línea, los amperímetros de TC, por regla general, no se desgastan o deterioran. Los propios medidores, al igual que todo equipo de tableros, están previstos para resistir las vibraciones y el uso constante del servicio del tablero.

3.2.3.4 Amperímetros portátiles de transformación de corriente

Descripción

Para verificaciones locales de la extracción de corriente, hay disponibles amperímetros de TC. Estos instrumentos se conocen comúnmente como "amperímetros de prueba" o "amperímetros de candado o ganchо", y consisten en un TC de "quijadas' de hierro laminado con un devanado secundario, un derivador secundario interno, y un medidor

indicador o presentador digital. Por regla general, tienen una variedad de escalas desde uno a varios miles de amperios y también pueden estar dotados para realizar mediciones de voltaje y resistencia.

Semejantes en apariencia a los amperímetros portátiles para ca, también hay disponibles amperímetros portátiles para cd con quijadas o tenazas metálicas para aferrarse al conductor y que no requieren una conexión directa con el circuito por medir. Son también muy útiles para verificaciones locales de corriente. Al igual que los amperímetros portátiles de TC, tienen una gran variedad de gamas y pueden incorporar otras funciones tales como mediciones de voltaje o resistencia. La información que se da en seguida es válida para ambos tipos de instrumentos.

El costo del aparato depende de las gamas, la precisión y los accesorios. Aunque la mayoría de los amperímetros portátiles son bastante precisos, muchos medidores baratos están limitados en cuanto al tamaño de las quijadas y las gamas de corriente. Los precios varían entre $ 100 y $ 300.

Usos recomendados

Los amperímetros portátiles de TC están diseñados para mediciones momentáneas de corriente alterna en máquinas y dentro de los sistemas de abastecimiento. Hay a disposición instrumentos con gran variedad de tamaños de quijadas e intervalos, para mediciones en barras colectoras y cables largos, y también para alambrado de equipo.

Limitaciones

No se recomienda el uso de amperímetros portátiles de TC en sistemas con voltajes superiores a 1 000 voltios. Además, la conexión

durante largo tiempo puede generar suficiente calor interno para dañar el elemento móvil u otras piezas interiores. Estos medidores no deben usarse en conexiones permanentes o prolongadas.

Exactitud y confiabilidad

Los amperímetros portátiles estan diseñados para ser exactos, confiables y portátiles. En virtud de su portabilidad, no están previstos para resistir un uso continuo o excesivo calor y vibración. Los portátiles típicos tienen exactitudes de ± 1% de la escala total o aún mejor. Los modelos electrónicos (que utilizan un milivoltímetro electrónico para medir la caída del voltaje del derivador secundario) pueden alcanzar exactitudes hasta de ± 0.01% de la lectura real (no de la escala total). El uso y el manejo adecuados de estos aparatos garantizará muchos años de servicio confiable.

3.3 VATIMETROS DE CA Y MEDIDORES DE DEMANDA DE KILOVATIOS

Potencia es la energía suministrada o consumida por unidad de tiempo. Se mide en vatios o, más comúnmente, en kilovatios. La potencia es un parámetro eléctrico instantáneo, al igual que el voltaje y la corriente. Los vatímetros miden el consumo de potencia en un instante dado. La potencia se determina para evaluar el trabajo del equipo o el sistema.

Los vatímetros comunes son, en realidad, una combinación de amperímetros y voltímetros, o sea, voltamperímetros. Para corriente directa (cd), la potencia es sencillamente el producto del voltaje por la corriente (en amperios). En realidad, los vatímetros no son aparatos muy comunes, ya que las mediciones de voltaje y corriente dan la información necesaria para calcular la potencia de cd. Ya que las mediciones de potencia de cd son un tanto sencillas, no se consideran aquí.

Las mediciones de potencia de corriente alterna (ca) no son tan sencillas y directas como las mediciones de potencia de cd. Debido a que tanto la corriente alterna como el voltaje varían con el tiempo, y ya que las formas de las ondas del voltaje y la corriente pueda que no coincidan, los vatímetros de ca deben medir la magnitud y las relaciones de fase entre el voltaje y la corriente (véase Medidores de Factor de Potencia abajo). Los sistemas trifásicos que se encuentran comúnmente en la industria complican aún más las mediciones de potencia.

La demanda de kilovatios (kW) se define como el consumo instantáneo promedio de potencia para un intervalo dado de tiempo. En la gráfica 3-13 se ilustra este concepto. Para las tarifas de empresas eléctricas, la demanda pico se define como el máximo consumo promedio de potencia en un lapso de 15 minutos. La mayoría de los medidores de demanda que se emplean actualmente usan vatímetros y una "memoria" electrónica que promedia continuamente la demanda en una "ventana" de 15 minutos. Con anterioridad a los contadores de demanda electrónicos, la demanda se determinaba mediante el uso de un electrodinamó-

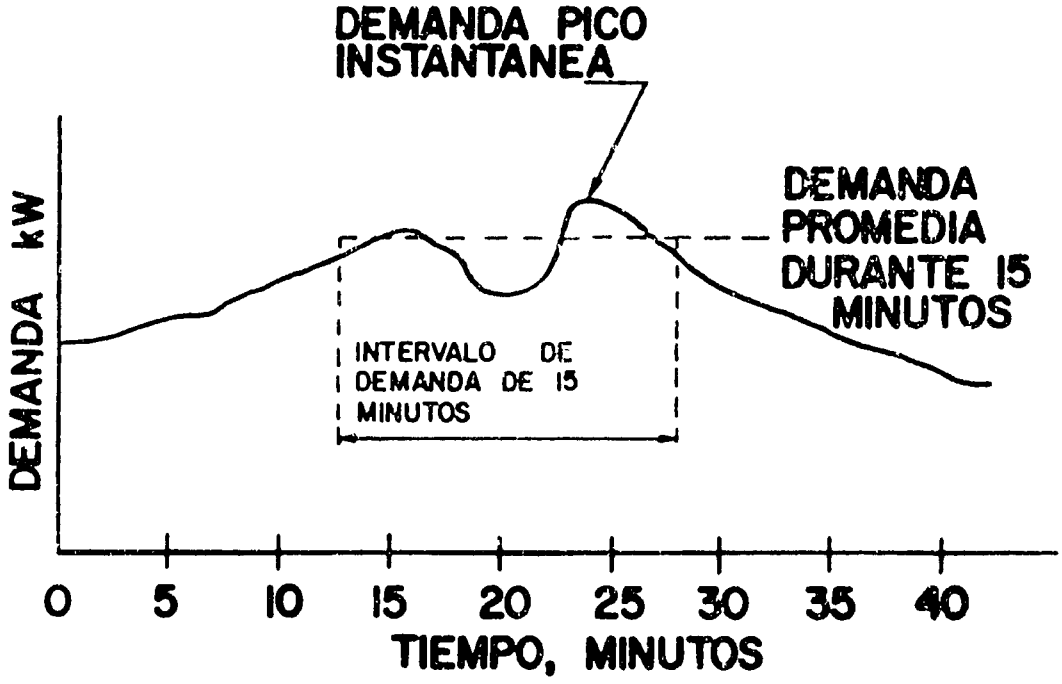


FIGURA 3-13. DEMANDA ELECTRICA

metro diseñado especialmente (véanse Principios de Operación abajo) que estaba restringido mecánicamente por medio de un amortiguador para dar un valor en kilovatios dependiente del tiempo. Luego se calculaba la demanda pico mediante este valor en kilovatios. Los medidores de demanda pico de kilovatios se considerarán, en esta sección, solamente los que se usan en plantas, y no los de uso para servicio. Aunque estos medidores son generalmente tan precisos como los medidores de servicio, no tienen las características de seguridad contra aperturas ilegales que se incorporan en la mayoría de los medidores de servicio.

3.3.1 Operación básica e instalación

La mayoría de los vatímetros necesitan la conexión tanto del voltaje como de los sensores de corriente. Aunque los estilos convencionales requieren la interrupción de la corriente para la inserción de los transformadores de corriente (TC), los vatímetros electrónicos usan un sensor electrónico o transductor que solamente necesita ser aferrado alrededor del conductor que se ha de medir. Todos los vatímetros necesitan la conexión de las puntas de voltaje.

Para la medición de corrientes intensas, la mayoría de los vatímetros convencionales emplean transformadores de corriente. Cuando se conecten o desconecten los TC, las puntas secundarias (del medidor) deben ponerse en corto circuito para evitar la acumulación de un alto voltaje en los devanados. Este alto voltaje entraña un grave riesgo de golpe eléctrico y puede averiar el transformador.

Muchos vatímetros también usan transformadores de potencia (TP) para reducir el voltaje que se imparte al medidor. Hay que tener sumo cuidado de no confundir los PT con los TC: NUNCA PONGA EN CORTO CIRCUITO LA PUNTA DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA. Si las puntas de un transformador de potencia se ponen en corto circuito cuando el circuito está excitado, el transformador puede estallar.

La mayoría de los medidores de demanda que existen hoy en día emplean una "memoria" para calcular la demanda pico. Debido a que la demanda pico es función del tiempo, estos medidores tienen relojes electrónicos que deben mantenerse activados, aún cuando la potencia sea interrumpida. El acumulador de reserva para un contador de demanda pico debe ser inspeccionado y mantenido regularmente. Si la batería de respaldo no es mantenida en condiciones de funcionamiento, el medidor puede quedar inutilizado en caso de una falla de potencia.

Al conectar los medidores de demanda o los vatímetros, asegúrese de seguir al pie de la letra las instrucciones de alambraje que recomienda el fabricante. Una conexión incorrecta puede ocasionar daños al medidor, al transductor, al sensor o al transformador.

Siempre que sea posible, las lecturas del vatímetro deben tomarse en el tercio superior de la escala medidora. Esto reduce al mínimo los errores de las lecturas.

Los vatímetros deben usarse en la posición para la cual fueron diseñados. Esto reviste especial importancia para los contadores electrodinamómetros. Los vatímetros digitales con TC o transductores son insensibles a la posición de montaje.

Los vatímetros portátiles no están diseñados para conexiones durante largo tiempo. El calor generado dentro del medidor debido al uso por largo tiempo puede averiar los circuitos electrónicos internos.

3.3.2 Principios de operación

Electrodinamómetros

estos instrumentos son, en realidad, pequeños motores de inducción, cuyo movimiento está restringido por un resorte de control. En la gráfica 3-14 se muestra un diagrama de construcción de un electrodi-

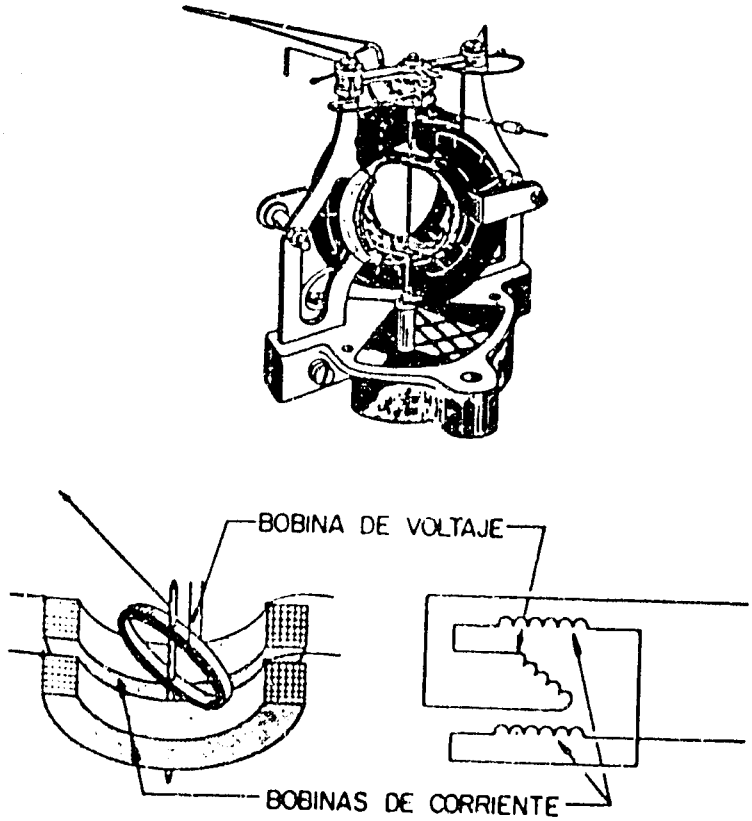


FIGURA 3-14 ELECTRODINAMOMETRO

namómetro. La bobina de voltaje está devanada en torno al núcleo central móvil, mientras que las dos bobinas de corriente son fijas. El movimiento del núcleo central (y la aguja) es producido por la atracción magnética inducida entre el núcleo (y bobina de voltaje) y la bobina de corriente. La magnitud del movimiento del núcleo central depende del voltaje, la corriente y la relación de fase entre ambos. Los medidores trifásicos tienen bobinas de voltaje y corriente múltiples (la configuración real y el número de bobinas dependerán de la utilización).

Vatímetros electrónicos

Los vatímetros electrónicos de estado sólido se utilizan principalmente en medidores portátiles en que el poco peso y la durabilidad son necesarios y en que no ocurren conexiones durante largos períodos de tiempo. Estos medidores consisten en un transformador de corriente (TC) con abrazadera, un circuito electrónico que percibe el voltaje, la corriente, y las relaciones de fase entre ambos. El circuito electrónico convierte esta información en una señal de corriente directa, que impulsa un elemento móvil d'Arsonval o una presentación digital.

Sensores de efecto Hall y transductores

Una nueva generación de vatímetros de tablero han sido elaborados en base a un dispositivo semiconductor conocido como el sensor de efecto Hall. El sensor de efecto Hall es un transistor que es "conmutado" por campos magnéticos. El sensor de efecto Hall, acoplado a un "concentrador" de campo magnético en forma de anillo, se coloca en torno al conductor que se ha de medir. La energía de salida del sensor de efecto Hall es proporcional a la corriente del conductor, sea cual fuere la forma de la onda. Los transductores de efecto Hall pueden emplearse para percibir corriente alterna hasta de 400 Hz y también corriente continua.

Al igual que los dispositivos semiconductores, el sensor de efecto Hall tiene una señal de salida muy débil. Se necesitan condicionadores extras de señal para amplificar la señal de efecto Hall y traducirla en una señal de salida que es proporcional al consumo de potencia. Debido a que los transductores de efecto Hall son sensibles solamente a la corriente, los vatímetros de efecto Hall todavía necesitan un suministro de voltaje al transductor.

3.3.3 Opciones de equipo

Hay a disposición una gran variedad de vatímetros y medidores de demanda para usos industriales. El equipo que se describe a continuación no representa toda la gama de instrumentos disponibles para la medición de potencia y demanda, sino más bien los aparatos que son más apropiados para utilización en la industria.

3.3.3.1 Electrodinamómetros

Descripción

Los vatímetros electrodinamómetros están disponibles en un número limitado de estilos y tamaños. Mientras que los modelos portátiles son difíciles de encontrar, las versiones de tablero están disponibles para casi todos los voltajes y corrientes industriales. Aunque también los hay para medir la potencia de cd, los vatímetros de cd de tipo electrodinamómetro son sumamente sensibles a campos magnéticos dispersos y son muy desconfiables. Para corrientes grandes y voltajes altos, existen vatímetros electrodinamómetros estándar con entradas máximas de 120 voltios y 5 amperios, para acoplamiento con transformadores de corriente y de potencial. El precio de estos instrumentos varía generalmente entre $70 y $200.

Usos recomendados

Los electrodinamómetros se emplean para la vigilancia continua de equipo o sistemas de consumo de potencia. Se encuentran disponibles en el mercado solamente para montaje en tablero y en formas estándar de laboratorio y raramente se usan en mediciones momentáneas en ambientes industriales.

Limitaciones

Aunque los vatímetros electrodinamómetros no sufren averías, por lo general, debido a sobrevoltajes momentáneos o condiciones de sobrecorriente, las perturbaciones o transientes pueden afectar su precisión.

Los electrodinamómetros de corriente alterna son sumamente sensibles a la frecuencia del voltaje y la corriente medidos. Aún una ligera variación en frecuencia dará por resultado un error de medición significativo. Existen, asimismo, electrodinamómetros para medir la potencia de cd, pero estos medidores son caros y poco confiables.

Al igual que otros medidores de bobina móvil, el electrodinamómetro es sensible a la orientación del medidor, y siempre debe estar colocado o utilizado en posición vertical.

Exactitud y confiabilidad

Los vatímetros electrodinamómetros son, en general, bastante exactos, pero solamente marginalmente confiables. Las exactitudes normales varían entre 1% y 3% de la escala total en condiciones ideales, pero la confiabilidad del instrumento se ve reducida debido a los campos magnéticos dispersos y a las variaciones en la frecuencia de la línea

de potencia. Estos medidores, al igual que otros medidores de tablero, están diseñados para sustentar una operación continua y resistir las vibraciones que comúnmente se encuentran en los tableros industriales.

3.3.3.2 Vatímetros de efecto Hall

Descripción

Los vatímetros de efecto Hall se componen de tres componentes principales, a saber: el sensor Hall, en transductor electrónico, y la presentación. Los sensores Hall están disponibles en una amplia variedad de corrientes máximas nominales y están encajadas en diversas formas estándar para ser instaladas en torno a barras colectoras y cables. Existen transductores de varias clases, dependiendo de la precisión deseada. Las clases corrientes son ± 0.5%, 1% a 5%, etc., ya que la salida de energía del transductor es usualmente de 0 a 1 miliamperios de cd, la presentación puede ser un elemento móvil d'Arsonval con una escala especial o una presentación digital. Estos medidores son sumamente caros y muy precisos.

Usos recomendados

Los vatímetros de efecto Hall se usan para la medición continua de consumo de potencia crítica. Debido a que hay tantos componentes frágiles incorporados en un vatímetro de efecto Hall, no son prácticos estos instrumentos en forma portátil. Ya que los sensores de efecto Hall producen una salida de energía muy pequeña, el medidor se coloca usualmente tan cerca como sea posible de la carga que se mide.

Los vatímetros de efecto Hall se amplían frecuentemente con circuitos adicionales para constituirse en medidores de demanda. Los usos comunes varían entre sencillas presentaciones de demandas pico y opciones complicadas de control de demanda en sistemas de manejo de energía.

Estos vatímetros electrónicos son sumamente caros. En general, tienen un costo tres veces más que el precio de un medidor electrodinamómetro similar.

Limitaciones

Los usos de los vatímetros de efecto Hall están restringidos únicamente por la clase de aparatos disponibles por los fabricantes. Existen en gamas desde solamente unos cuantos vatios hasta megavatios en frecuencias que varían desde CD a radio frecuencias. En general, los transductores no están disponibles comercialmente para potencias nominales menores de 150 watts, pero hay transductores que se fabrican a especificación del cliente.

Exactitud y confiabilidad

Se puede obtener una exactitud adicional (hasta de ± 0.5%) a un costo extra. La exactitud media varía entre ± 1% y ± 5%).

Combinando un sensor de efecto Hall, un transductor electrónico y una presentación electrónica digital, se construye un sistema de vatímetro de tablero, sin piezas móviles, que es preciso y sumamente confiable.

3.3.3.3 Vatímetros portátiles (TC)

Descripción

La mayoría de los vatímetros portátiles que están a disposición hoy en día son una combinación de un voltímetro y un amperímetro de abrazaderas, o sea un voltamperímetro. El circuito electrónico detecta la magnitud y el cruce cero de las formas de onda de la corriente y el voltaje. El cruce cero se define como el punto en que el voltaje o corriente (ca) cambia signo de positivo a negativo o al contrario. Mediante la detección de estos cruces cero el medidor puede determinar la no coincidencia del voltaje y la corriente a fin de modificar en forma correspondiente las mediciones de potencia.

La unidad portátil integral consiste en un amperímetro de abrazadera, tres puntas de acople de voltaje (para un medidor trifásico) y dos selectores (uno para voltaje y uno para corriente). La presentación puede ser un elemento móvil d'Arsonval convencional o una forma digital.

Los vatímetros portátiles no son muy caros, pero generalmente son más costosos que los miliamperímetros-voltámetros-ohmímetros o los amperímetros portátiles. Los precios varían entre $ 500 y $ 1 000.

Usos recomendados

Los vatímetros portátiles están diseñados para la verificación del consumo de potencia de ca del equipo o sistemas. Hay a disposición una amplia gama de tamaños de quijadas para acomodar las barras colectoras o los cables de diferentes tamaños.

Limitaciones

Los vatímetros portátiles no funcionan en sistemas de cd y no se recomiendan para sistemas con voltajes mayores de 600 voltios. Al igual que otros medidores portátiles, los componentes internos pueden sufrir daños a causa del calor generado durante una conexión por largo tiempo. Los vatímetros portátiles deberían usarse únicamente para mediciones momentáneas.

Exactitud y confiabilidad

Los vatímetros portátiles de tipo TC (transformación de corriente) están diseñados para funcionar en forma bastante exacta, confiable y portátil. Estos medidores son sensibles al calor excesivo y a la vibración y no deben usarse en verificaciones en tableros durante largos períodos de tiempo. En general, los vatímetros portátiles de TC tienen exactitudes de ± 1% a ± 5% de la escala toda. Desafortunadamente, el circuito electrónico es sensible a las perturbaciones eléctricas y transientes y la exactitud disminuye considerablemente cuando ocurren éstas.

3.4 KILOVATIOS - HORIMETROS

El consumo de la energía eléctrica es la base de las cuentas de cobro de las empresas eléctricas y la unidad básica de medida es el vatio-hora, o más comúnmente el kilovatio-hora (kWh). Debido a que el consumo de energía es función del tiempo, la instrumentación de kilovatios-hora necesita un componente de referencia al tiempo que no es necesario para el voltaje la corriente, y la potencia. Los contadores de kilovatios-hora son una combinación de medidor de potencia y de reloj.

En vista de que el motivo principal del uso de contadores de kilovatios-hora en la industria es para la verificación de las cuentas eléctricas, los contadores de kWh que se consideran a continuación son los adecuados para medir potencia estándar de 60 Hz en el tablero. No se consideran los contadores portátiles de cd.

3.4.1 Operación básica e instalación

Los contadores de kilovatios-hora necesitan la conexión de los elementos tanto de voltaje como de corriente. La mayoría de los contadores de kWh industriales usan voltajes de línea primaria para cumplir los requisitos de voltaje y también transformadores de corriente para limitar la entrada de corriente a 5 amperios (véase Amperímetros en sección anterior). Los contadores de kWh electrónicos modernos utilizan una conexión de voltaje directa y sensores de corriente de estado sólido (véase Vatímetros en sección anterior).

Los contadores de kilovatios-hora son insensibles, generalmente, a la orientación, pero son más fáciles de leer cuando están instalados a nivel de la vista en una posición vertical.

Muchos contadores de kWh electrónicos tienen memorias que deben estar activas aún cuando hay paralizaciones de potencia. La batería de respaldo debe verificarse regularmente. La falta de mantenimiento de esta batería puede resultar en una pérdida de valores de kWh en caso de una falla de potencia.

Al conectar o dar mantenimiento a los transformadores de corriente, las puntas secundarias no deben dejarse desconectadas cuando la línea medida porta corriente. Los bornes secundarios (del medidor) del transformador de corriente deben ponerse en corto circuito con alambre. Si no se ponen las puntas en corto circuito, se permitirá la generación de un alto voltaje dentro del transformador. Este voltaje entraña un peligro de descarga eléctrica y puede dañar el transformador.

3.4.2 Principios de operación

Kilovatio-horímetros

Los contadores de kWh mecánicos son fundamentalmente un pequeño motor de inducción y un juego de engranajes. El motor impulsa los engranajes que indican los kWh acumulados (o algún múltiplo de kWh). El motor en sí consiste en un disco de aluminio montado en un eje con cojinetes coronados. Dos bobinas (o juegos de bobinas), una para voltaje y una para corriente, hacen girar el disco. Se utilizan varios medios de amortiguación eléctrica y mecánica para generar un movimiento del disco que sea proporcional al consumo de kWh.

Kilovatio-horímetros electrónicos

Estos aparatos electrónicos emplean un circuito semiconductor para determinar el consumo de kilovatios (véase Vatímetros en sección anterior). El valor de kilovatio integrado a lo largo del tiempo por

medio de un segundo circuito electrónico llamado totalizador. La salida de energía del totalizador impulsa un reloj de engranajes movido a motor o una presentación digital.

3.4.3 Opciones de equipo

Los dos tipos de contadores que se describen en seguida representan dos clases básicas de contadores de kWh. Existen muchas variedades de estos dos tipos.

3.4.3.1 Kilovatio-horímetros mecánicos

Descripción

Un contador mecánico de kWh consiste en un pequeño motor de inducción que impulsa un reloj de engranajes. Estos contadores están disponibles en tamaños que varían entre contadores residenciales monofásicos y contadores industriales trifásicos que sirven para voltajes y corrientes muy altos. El precio de los contadores es alto en comparación al de los voltímetros y amperímetros, pero aún es menor que el de los contadores electrónicos de kWh.

Usos recomendados

Los contadores mecánicos de kWh se emplean casi exclusivamente para mediciones de empresas eléctricas y verificación de los servicios de electricidad.

Limitaciones

El mecanismo de reloj de engranajes que se usa en los contadores limita la resolución. Muchos contadores grandes no dan registros en incrementos menores de 100 kWh.

Exactitud y confiabilidad

La índole mecánica de estos contadores limita su exactitud entre el 1% y el 2%, pero los hace muy fuertes y confiables.

3.4.3.2 Kilovatio-horímetros electrónicos

Descripción

Los contadores electrónicos de kWh consisten en un sensor de corriente, un transductor de kilovatios, un totalizador electrónico, y una presentación analógica o electrónica digital. Las combinaciones de presentación/sensor/transductor/totalizador están disponibles para lecturas entre watts-horas y megawatts-horas (10^6 watts-hora). Al igual que la mayoría del equipo electrónico de medición de potencia, el costo es sumamente alto; los precios varían entre $ 500 y $ 1 000 o más.

Usos recomendados

La mayoría de los kilovatio-horímetros electrónicos se utilizan juntamente con sistemas computarizados de manejo de energía. El contador puede emplearse para verificar los cobros por electricidad y puede conectarse a un subsistema dentro de la planta para desglosar los costos de operación de equipo o procesos específicos.

Limitaciones

Hay a disposición diversos contadores electrónicos de kilovatios-hora para la mayoría de usos industriales. Sistemas fabricados a pedido pueden obtenerse fácilmente.

Exactitud y confiabilidad

La exactitud de los contadores electrónicos de KWh dependen de la selección de los sensores y los circuitos electrónicos. Hay a disposición aparatos con una amplia gama de exactitudes. La mejora de la exactitud (± 0.5%) entraña un costo mayor. Debido a que estos contadores tienen pocas piezas delicadas, si las tienen, los aparatos son sumamente fuertes y confiables.

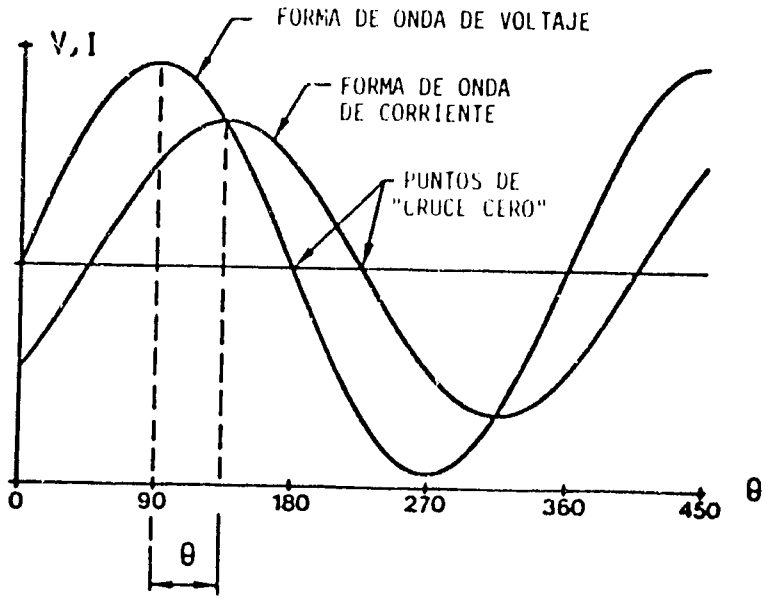
3.5 MEDIDORES DEL FACTOR DE POTENCIA

3.5.1 Operación básica e instalación

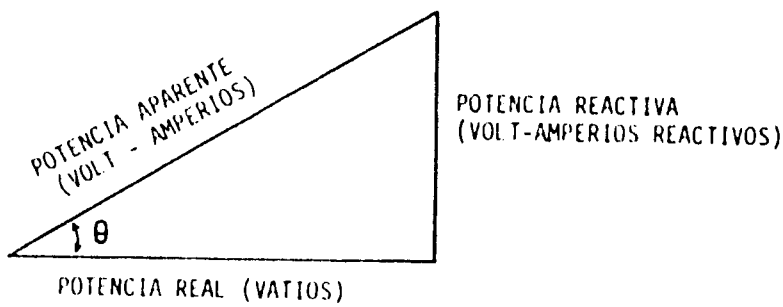
Todos los medidores de factor de potencia (FP) requieren la conexión de los elementos sensores de voltaje y corriente. La mayoría de los medidores tanto portátiles como de tablero, emplean transformadores de corriente (CT) o transductores de corriente para mediciones de corriente, por lo cual necesitan conexión directa de voltaje. Los medidores o contadores de factor de potencia montados en tableros pueden ser muy sensibles a la orientación y deben emplearse en una posición vertical. Los medidores de potencia trifásicos dan valores exactos solamente cuando las cargas en las tres fases son iguales. Los medidores de factor de potencia portátiles no están diseñados para conexiones durante largo tiempo. El calor generado dentro del medidor por uso continuo puede dañar los componentes internos del aparato.

Debido a que hay una amplia variación en los sistemas de distribución eléctrica y en las configuraciones de los medidores, hay que observar siempre las instrucciones de cableado del fabricante cuando se instalen medidores de factor de potencia. Una conexión indebida puede ocasionar daños permanentes al aparato.

Al conectar o dar servicio a los transformadores de corriente, siempre hay que poner en corto circuito las puntas secundarias (del medidor) por medio de un alambre. Esto evitará la acumulación de un alto voltaje en el transformador, que puede producir una descarga eléctrica o dañar el transformador.



$$\text{FACTOR DE POTENCIA} = \cos\theta = \frac{\text{POTENCIA REAL (VATIOS)}}{\text{POTENCIA APARENTE (VOLT-AMPERIOS)}}$$



POTENCIA REAL = POTENCIA APARENTE (VA) x FACTOR DE POTENCIA

$= V \times I \times \cos\theta$

FIGURA 3-15 RELACION VOLTAGE/CORRIENTE Y FACTOR DE POTENCIA

3.5.2 Principios de operación

Medidores electrodinamómetros de factor de potencia

Estos medidores electrodinamómetros se construyen igual a los vatímetros electrodinamómetros (véase Vatímetros en sección anterior) y se operan de la misma manera. El electrodinamómetro es, en realidad, un pequeño motor de inducción cuyo movimiento es restringido por un resorte de control. En la gráfica 3-14 se muestra un esquema de un electrodinamómetro. La bobina de voltaje está devanada en torno al núcleo central móvil y dos bobinas de corriente son inmóviles. El movimiento del núcleo central (y la aguja) es producido por la atracción magnética entre el núcleo (y bobina de voltaje) y las bobinas de corriente. Las bobinas fijas (de corriente) y las móviles (de voltaje) están cableadas de modo que el movimento de la bobina sea afectada por la relación (factor de potencia) entre el voltaje y la corriente.

Medidores de factor de potencia de cruce cero

Los medidores cruce cero emplean un circuito electrónico especial para medir las entradas de voltaje y corriente. Este circuito localiza los puntos exactos en que las formas de onda del voltaje y la corriente cambian de signo de positivo (+) a negativo (-) o al contrario. Mediante la comparación entre las ubicaciones de los cruces cero del voltaje y la corriente, el medidor determina el factor de potencia. La salida de energía del circuito impulsa un medidor d'Arsonval de diseño especial o una presentación digital.

3.5.3 Opciones de equipo

El equipo que se describe a continuación no representa toda la gama de medidores de factor de potencia que están disponibles para usos industriales. Solamente se incluyen los que se utilizan más comúnmente.

3.5.3.1 Medidores de FP de electrodinamómetro instalados en tablero

Descripción

Los medidores de FP instalados en tablero están disponibles en diseños de electrodinamómetro o de cruce cero. Los contadores electrodinamómetros de FP para altos voltajes (más de 600 V) usualmente utilizan transformadores de potencial y de corriente. Los medidores de FP de cruce cero montados en tablero consisten en transformadores de corriente o sensores de efecto Hall, un transductor electrónico separado, y una presentación d'Arsonval o digital. En general, los medidores de FP de tablero son bastante caros y se utilizan solamente cuando es absolutamente necesario. El precio de estos instrumentos varía generalmente entre $ 250 y $ 500.

Usos recomendados

Los medidores de factor de potencia para tableros se utilizan casi exclusivamente para vigilancia continua de factor de potencia en el tablero de potencia principal de la planta.

Limitaciones

Los medidores electrodinamómetros de FP son sensibles a las corrientes momentáneas de la línea (perturbaciones momentáneas) y las corrientes momentáneas graves los hacen completamente inexactos. Los medidores trifásicos deben usarse solamente cuando la carga en cada fase esté equilibrada. Las cargas trifásicas en desequilibrio darán valores incorrectos del factor de potencia.

Exactitud y confiabilidad

Los medidores de factor de potencia electrodinamómetros son exactos generalmente a solo el 5% del real FP, mientras que los contadores de cruce cero tienen generalmente una exactitud de ± 1% a 2% del FP real. La exactitud en ambos medidores es afectada severamente cuando la carga trifásica está desequilibrada o cuando hay corrientes transientes.

3.5.3.2 Medidores portátiles de cruce cero

Descripción

Los medidores portátiles de FP de cruce cero consisten en un transformador de corriente (TC) de abrazadera, puntos de prueba para el voltaje, circuitos electrónicos, y un elemento móvil d'Arsonval o presentación digital. Todos estos componentes están encajados en un estuche compacto y liviano. Algunos medidores tienen TC de "anillo" independiente, mientras que otros se semejan a los "amperímetros de prueba" con el TC aferrado en el extremo del medidor. Los contadores de FP portátiles se comparan en precio con los vatímetros portátiles de tamaño similar y son más caros que los amperímetros de abrazadera. Los precios varían ampliamente segun las características y la complejidad, pero por lo general fluctúan entre $ 500 y $ 3 000.

Usos recomendados

Los medidores portátiles de FP están diseñados para mediciones momentáneas del factor de potencia en equipo o sistemas.

Limitaciones

Los medidores portátiles de FP no deben usarse para mediciones de largo tiempo del factor de potencia. Los medidores trifásicos no deben utilizarse cuando hayan cargas en desequilibrio.

Exactitud y confiabilidad

Los medidores comunes de cruce cero tienen una exactitud de ± 1% de lo real, siempre y cuando tanto el voltaje como la corriente sean ondas senoidales sin distorsión. Al igual que los medidores de FP de tablero, los medidores portátiles son menos exactos cuando hay corrientes transientes o cargas en desequilibrio. Al igual que otros aparatos portátiles, los medidores portátiles de FP no están diseñados para conexiones durante largo tiempo o para el calor y la vibración inherentes en los tableros.

REFERENCIAS

(3) Electric Power Metering, A. E. Knowlton, 1934.

(4) Electric and Electronic Measurement Instruments, Larry D. Jones, ed., 1983.

(5) Electronic Instrumentation, Sol D. Prensky and R. L. Castellucis, 1982.

4. MEDICIONES DE TEMPERATURA

4.1 TERMOMETROS DE EXPANSION FLUIDA

Los termómetros de expansión fluida incluyen tanto los de líquido como los del sistema hermético. El más simple y común es el termómetro de mercurio; virtualmente cada edificio industrial tiene por lo menos uno de éstos para medir la temperatura del aire. Sin embargo, los termómetros de líquido son útiles solamente cuando son fácilmente accesibles para la lectura. Para lectura remota está disponible una amplia variedad de dispositivos que utilizan un sistema hermético.

4.1.1 Operación básica e instalación

A. Termómetro de líquido

Los termómetros de líquido son instrumentos íntegros; el elemento sensible y el indicador están localizados en el mismo vástago de vidrio. La figura 4-1 muestra dos termómetros típicos de este tipo; el elemento sensible consiste en un volumen de líquido, usualmente mercurio, en un pequeño depósito de la base del vástago. A medida que la temperatura se eleva, el volumen líquido se expande en un pequeño tubo capilar, en cuyo exterior se ha marcado una escala de temperatura. El instrumento se calibra de modo que el nivel de líquido en el tubo capilar indica la temperatura sobre la escala.

El termómetro debe usarse solamente en la orientación para la cual fue calibrado; por ejemplo, un termómetro calibrado para lectura vertical no debe usarse en posición horizontal. En la misma manera, un termómetro de inmersión total no proporcionará lecturas exactas si solamente se sumerge en forma parcial. En los termómetros de inmersión parcial, normalmente el vástago se encuentra marcado con una línea que indica la profundidad de la inmersión requerida.

Utilice solamente termómetros de alta calidad. El vidrio es un líquido superenfriado y se comporta como un fluido viscoso, aún a bajas tem-

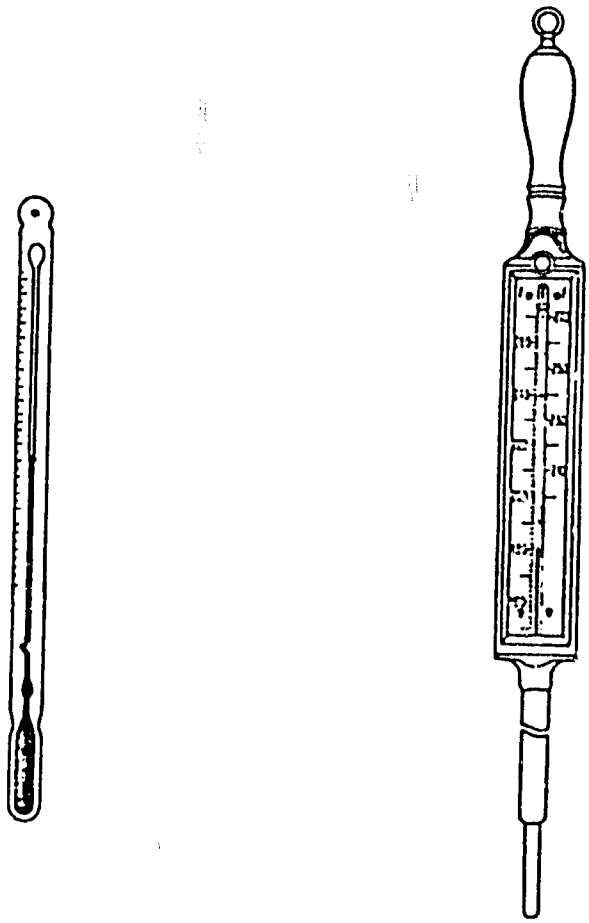


FIGURA 4-1 TERMOMETROS DE LIQUIDO

peraturas. Este flujo viscoso causa cambios en el volumen y consecuentemente, en la calibración. En termómetros bien construidos este efecto es mínimo por debajo de los 150°C. La aleación correcta es también un factor crítico; un termómetro que no llene este requisito cuando se calienta por encima de 315°C puede presentar cambios en la calibración hasta de 20°C.

Para aplicaciones industriales debe proveerse protección al vástago de vidrio; los termómetros con frecuencia están provistos con un forro metálico con una abertura a través de la cual puede leerse la columna de líquido. Protección adicional puede darse al bulbo, aunque ésta reducirá la velocidad de respuesta.

En áreas refrigeradas, debe insertarse un material de baja conductividad entre la caja de la escala y el vástago; esta medida prevendrá la acumulación de escarcha sobre la escala y obstaculizará la lectura de temperatura.

B. Termómetros de sistema hermético

La Asociación de Fabricantes de Aparatos Científicos (SAMA) hace la siguiente clasificación:

- Clase I — Llenados de líquido (incluyendo mercurio)
- Clase II — Presión de vapor (llenados de vapor)
- Clase III — Llenados de gas
- Clase IV — Llenados de mercurio

Todos estos termómetros comparten la misma construcción básica que se muestra en la figura 4-1. Un bulbo se llena con el fluido sensitivo de la temperatura y se conecta al aparato de medición mediante un tubo capilar; éste es un resorte sensible a la presión tal como el tubo Bourdon, que responde a la expansión del fluido en el tubo capilar. El elemento sensible a la presión se vincula a una carta circular o a una escala in-

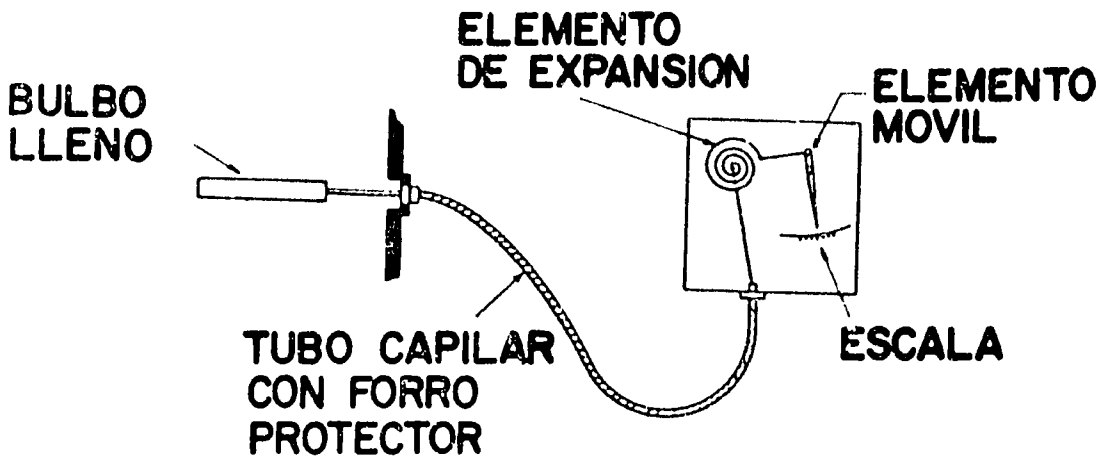


FIGURA 4-2 TERMOMETRO DE SISTEMA HERMETICO

dicativa calibrada en gradación Ferenheit o Celsius (centígrados). Debido a que el tubo Bourdon es el elemento de presión usado con mayor frecuencia, los sistemas herméticos se denominan frecuentemente termómetros Bourdon.

Siempre cuando sea posible los bulbos deben utilizarse sin protección, ya que, como se indicó, ésta reduce el tiempo de respuesta e incrementa el costo del instrumento. Sin embargo, los forros de los bulbos dan protección contra la corrosión, abrasión, impacto, y alta presión. La cobertura protectora es normalmente sobre el tubo capilar para proveer resistencia mecánica y contra la corrosión.

Durante la medición, el bulbo sensible deberá localizarse en una zona de temperatura representativa y sumergirse suficientemente para minimizar las pérdidas de conducción a lo largo del tubo. Para aplicaciones en hornos u otras zonas de alta temperatura los efectos de radiación pueden y deben evitarse por una adecuada protección del bulbo.

4.1.2 Principios de operación

La mayoría de los fluidos se expanden al calentarse; cuando no se permite la expansión, el calentamiento resulta en un incremento de la presión del fluido. Este principio de comportamiento de fluidos gobierna la operación de todo este tipo de termómetros. En los termómetros de líquido el incremento de la presión del fluido provoca su elevación en un tubo capilar transparente a medida que la temperatura se incrementa. Los sistemas herméticos (clase I y IV) también operan solamente en base al principio de expansión de fluidos.

Los sistemas de presión de vapor (Clase II) están gobernados por la ley de Dalton, que establece que la presión de un vapor saturado depende solamente de su temperatura; como ésta se incrementa, la presión de vapor también lo hace.

La operación de sistemas llenados con gas (Clase III) depende de la ley de los gases ideales; si el volumen de un gas confinado permanece constante; la presión ejercida por el gas es directamente proporcional a su temperatura.

4.1.3 Opciones de equipo

4.1.3.1 Termómetros de líquido

Descripción

Casi todos los termómetros de este tipo se construyen en la forma discutida anteriormente. Aunque el mercurio es el líquido usado con mayor frecuencia, también se utilizan el alcohol y otros líquidos. Dependiendo del líquido utilizado, este tipo de termómetros pueden usarse para medir temperaturas en la gama de 185°C hasta los 650°C. Cualquier diseño particular de instrumento solamente cubrirá una pequeña porción de esta gama. Estos termómetros son baratos, y cuestan entre los US$ 5 y los US $ 15.

Aplicaciones recomendadas

Las aplicaciones industriales de estos termómetros se limitan usualmente a la medición de temperatura del aire ambiente y en algunos casos la temperatura de líquidos. Estos termómetros son adecuados para usarse en ambientes medianamente corrosivos, ya que la exposición prolongada a materiales de alta corrosividad resultará en el deterioro del vástago de vidrio.

Limitaciones

Los termómetros de vidrio solamente se pueden usar en sitios que tengan fácil acceso. La escala de estos termómetros es mucho más difícil de leer que una carátula o que otra forma de indicación, ya que lecturas exactas no pueden hacerse a mayor distancia de un metro del instrumento.

Los termómetros de vidrio son muy frágiles y se rompen fácilmente. Un forro de metal da alguna protección pero no es adecuado para uso pesado.

Debe permitirse suficiente tiempo de respuesta, antes de proceder a leer un termómetro de líquido; bulbos de diámetros mayores requieren tiempos más largos. Por ejemplo, se debe permitir un tiempo de respuesta de 30 segundos para un bulbo con un diámetro de 0.5 cm en agua agitada y 10 minutos para la misma en aire tranquilo.

Exactitud y confiabilidad

Aunque el diseño correcto del instrumento puede significar una mayor exactitud en éste, los termómetros de líquido no son muy exactos, usualmente ± 1.5 °C. Si el instrumento se usa para temperaturas relativamente bajas (por ejemplo debajo de los 150°C), la confiabilidad es buena; arriba de esta temperatura cambios en el vidrio, aún en instrumentos de alta calidad, causan desviaciones impredecibles en la calibración.

4.1.3.2 Termómetros de sistema hermético

Descripción

Se utiliza una amplia variedad de este tipo de termómetros. El cuadro 4-1 indica las características típicas de cada una de las 4 clases de

CUADRO 4-1
CARACTERISTICAS DE TERMOMETROS DE SISTEMA HERMETICO

	DE LIQUIDO		TENSION DE VAPOR	GAS
	CLASE I	CLASE V	CLASE II	CLASE III
nado	Xileno u otro hidrocarburo	Mercurio	Líquido volátil	Gas noble
gitud mínima del bulbo	1 pulgada	3 a 5 pulgadas	2 pulgadas	5 pulgadas
erial del bulbo	Acero inoxidable, bronce, monel o níquel	Acero o acero inoxidable	Latón, monel, acero, silicón, bronce, etc.	Latón, monel, acero, silicón, bronce, etc.
mpo promedio de res-esta:				
a bien agitada	6s.	5s.	4s.	7s.
e quieto	750s.	600s.	500s.	850s.
gitud máxi del tubo	5 - 50m	8m	80m	100m
nite inferior del in-rvalo	-100°C	-38°C	-185°C	-240°C
mite superior del in-rvalo	400°C	540°C	370°C	540°C
ngitud comercial máxima un intervalo	315°C	540°C	120°C	430°C
ngitud comercial mínima un intervalo	5°C	7°	30°C	30°C

depende de la compensación de la temperatura ambiente.

Aplicaciones recomendadas

Los termómetros de sistema hermético son instrumentos para servicios industriales usados para medir a distancia las temperaturas de gases y líquidos. Las cuatro clases de estos termómetros están disponibles en una gama amplia de temperatura, como se indica en el cuadro 4-1, pero un instrumento solamente cubre una gama limitada de pocos cientos de °C.

Limitaciones

Los termómetros de sistema hermético no se emplean como instrumentos portátiles, sino solamente como instrumentos instalados; son comunes en equipo antiguo. Actualmente los termopares y los termómetros de resistencia los han desplazado en muchas aplicaciones. Su utilización para mediciones precisas de temperatura está limitada por las relativamente grandes dimensiones de los bulbos sensibles (normalmente de 6 a 12 cm).

Exactitud y confiabilidad

La exactitud dada por los fabricantes de estos termómetros es generalmente de ± 0.5 de la amplitud de la escala, pero muchas veces en la práctica es mucho menor. Los errores en la exactitud resultan de una inmersión incorrecta, cambios en la presión y temperatura ambientes y la diferencia de la elevación entre el bulbo sensible y el resorte de presión. Muchos termómetros de este tipo incluyen aparatos para la compensación de la temperatura que corrigen los errores debidos a la variación de temperatura a lo largo del tubo o al resorte de presión.

4.2 TERMOMETROS BIMETALICOS

Los termómetros bimetálicos son robustos, no requieren mantenimiento y son fáciles de usar. La carátula indicativa y los elementos sensibles están contenidos dentro del mismo cuerpo; esto ofrece la ventaja de muy bajo costo pero limita sus aplicaciones a lecturas locales. Se utilizan donde se requiere resistencia al uso y un servicio de mucho tiempo, y donde la exactitud y el tiempo de respuesta no se consideran críticos.

4.2.1 Operación básica e instalación

La mayoría de los termómetros bimetálicos comercialmente disponibles tienen un elemento hélico bimetálico como se muestra en la figura 4-3 Generalmente uno de los metales utilizados es un "Invar" (una aleación de níquel con bajo coeficiente de expansión térmica), y el otro metal es bronce (para aplicaciones de baja temperatura) o una aleación de níquel (para la medición de temperaturas más altas). Con el cambio de la temperatura la distorción del elemento bimetálico causa un movimiento del eje central que actúa como una aguja indicativa sobre la cara de la carátula.

Los termómetros bimetálicos se utilizan en aplicaciones tanto portátiles como fijas. La consideración primordial en la instalación y uso de uno de estos termómetros es la inmersión o inserción del elemento bimetálico sensible. El elemento bimetálico entero debe estar a la misma temperatura para asegurar lecturas representativas.

Estos termómetros son extremadamente robustos y casi no requieren mantenimiento. La mayoría de los modelos pueden tolerar breves sobrecalentamientos hasta del 50% sobre su gama.

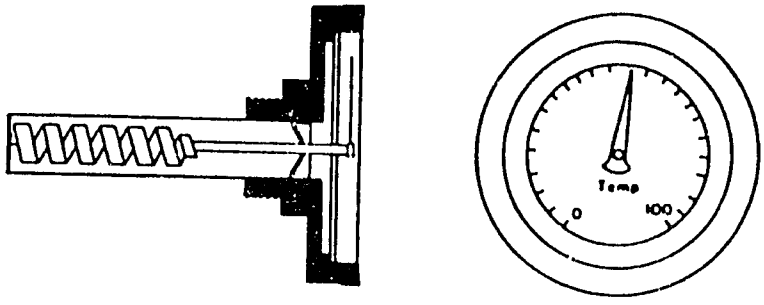


FIGURA 4-3 TERMOMETRO BIMETALICO

4.2.2 Principios de operación

Todos los metales se expanden cuando se calientan. La cantidad de expansión es determinada por la temperatura circundante y por el coeficiente de expansión térmica del metal. Si se unen 2 tiras de metales con coeficientes de expansión térmica distintas, la tira metálica se distorcionará con el cambio de temperatura. Si toda la tira metálica está a la misma temperatura la diferencia en expansión térmica, y por consecuencia el movimiento de enrollado es constante a lo largo de la longitud del elemento. Los termómetros bimetálicos utilizan este movimiento para hacer mover una aguja o indicador en una carátula calibrada para la temperatura.

4.2.3 Opciones de equipo

4.2.3.1 Termómetros bimetálicos

Descripción

La mayoría de los termómetros bimetálicos comercialmente disponibles comparten la misma configuración básica que se muestra en la figura 4-3. La longitud del vástago, gama de temperatura y conexión de montaje pueden especificarse de acuerdo a los requerimientos cuando se ordena un termómetro bimetálico. Para aplicaciones resistentes a la corrosión los vástagos usualmente se construyen en acero inoxidable. Una variación sin vástago de este tipo de termómetros está disponible para medición de temperaturas superficiales. Los precios fluctúan entre US $ 20 y US $ 70.

Aplicaciones recomendadas

Los termómetros bimetálicos estándar están disponibles sobre una gama de -18 a 550°C, aunque generalmente un solo instrumento cubre una gama más estrecha.

Este tipo de termómetros es utilizado en aplicaciones industriales donde es práctica la realización de lecturas locales. Aplicaciones típicas incluyen la medición de gases de chimenea, líquidos en tanques y semisólidos, tales como alimentos congelados y carnes. Un vástago de acero inoxidable permite la inserción de termómetros bimetálicos en gases y líquidos corrosivos.

Limitaciones

Debido a que el indicador de temperatura es tan próximo al elemento sensible, estos termómetros solamente pueden usarse para mediciones locales de temperatura. Esto limita su uso a las áreas donde la carátula, conectada directamente al elemento bimetálico, puede ser fácilmente montada, y leída; carátula de gran tamaño y montajes rotatorios se encuentran disponibles para facilitar la lectura de temperaturas a distancias y a ángulos inconvenientes.

Este tipo de termómetro no se adapta para aplicaciones donde se requiere una respuesta inmediata; los tiempos de respuesta de un minuto son típicos.

Exactitud y confiabilidad

La exactitud de los termómetros bimetálicos varían entre un 1% bajo condiciones ideales y un 5% a la escala total. Su operación es confiable y la construcción robusta del cuerpo exterior asegura larga vida de servicio.

4.3 TERMOPARES

El termopar es el instrumento de medición de temperatura más utilizado en la industria. Se usa para mediciones de temperatura en líquidos, gases, y sólidos, para flujos turbulentos y estancados, y en aplicaciones de inmersión y de superficie. Una amplia variedad de termopares se encuentra disponible, y pueden construirse para casi cualquier aplicación de medición de temperatura. Aunque el costo del termopar es usualmente bajo, los instrumentos de lectura que se utilizan con ella pueden ser relativamente caros.

Estos instrumentos pueden comprarse como unidades ensambladas o construidas separadamente por sus distintos componentes. Su construcción, operación e instalación se discuten en las siguientes secciones.

4.3.1 Operación básica e instalación

Un termopar consiste en:

- Dos alambres disímiles de termopar se unen para formar la "juntura" caliente que actúa como el elemento sensible;

- Forro protector y aislamiento de los alambres de termopar, si son necesarios;

- Suficiente longitud de alambre de extensión

- Un bloque terminal para conectar el alambre del termopar al alambre de extensión; y

- Un instrumento de medición que incluye la juntura de referencia y el indicador.

Un esquema simple de lo que constituye un termopar se muestra en la figura 4-4.

Para alcanzar máxima confiabilidad y tiempo de servicio, los termopares deben instalarse cuidadosamente y revisarse periódicamente. Los procedimientos y precauciones que se indican seguidamente dan lineamientos generales para su instalación y uso; pueden verificarse las instrucciones provistas por el fabricante del termopar para información adicional.

Coloque el termopar en una zona de temperatura promedio. Evítese zonas estancadas en fluidos en movimiento, ya que no indican una temperatura representativa.

No se exponga el termopar a llama directa; las lecturas de temperatura pueden ser altamente inexactas; y aún cuando el termopar esté protegido con un tubo protector, la llama directa acortará su vida de servicio.

Asegúrese de que el termopar se inserta a la profundidad recomendada. Como una regla empírica, una distancia de inserción mínima es cuatro veces el diametro externo del tubo protector. Si el termopar pasa a través de paredes de un horno de muflas o de paredes enfriadas con agua, la profundidad de inserción debe ser por lo menos de 10 veces el diámetro exterior del tubo protector. El termopar debe extenderse suficientemente lejos de la pared exterior de modo que la temperatura en el bloque terminal no exceda los 200°C.

Para operación en altas temperaturas, el termopar debe instalarse en posición vertical siempre que sea posible. Esto previene la distorción del tubo protector y se alarga el tiempo de servicio.

Minimice las pérdidas de conducción a lo largo del termopar. Estas pérdidas al ambiente exterior crean una depresión local en la temperatura del elemento sensible. Permitiendo la inmersión de una longi

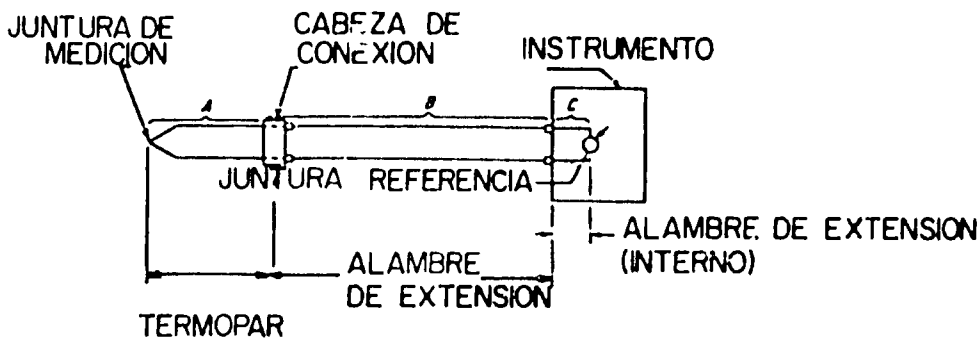


FIGURA 4-4 COMPONENTES DE UN MONTAJE DE TERMOPAR

tud suficiente, minimizando el diámetro del alambre del termopar o el tubo protector y seleccionando el material de baja conductividad térmica, constituyen medidas productivas para la reducción de pérdidas de conducción.

Minimice los efectos de calor radiante. Cuando se mide la temperatura, la energía radiante de los alrededores a una temperatura diferente (ejemplo: paredes de un horno) puede causar errores significativos en la lectura del termopar. Los efectos apreciables de radiación generalmente se limitan a mediciones de temperatura en gases por encima de los 550°C. Estos efectos pueden ser eliminados en gran parte con el uso de escudos de radiación. Si esto no es posible los efectos de radiación pueden reducirse minimizando el diámetro del termopar. En la mayoría de los libros de texto sobre transferencia de calor, se encuentran disponibles ecuaciones para corregir estos efectos.

No deben instalarse las terminales o los alambres de termopares más cerca de 30cm de una línea de corriente alterna. La corriente alterna inducida en el circuito del termopar puede afectar las lecturas.

Verifíquese regularmente todos los termopares en operación; una vez al mes será suficiente. La verificación debe efectuarse con el termopar instalado siempre que sea posible. Si debe removerse, asegúrese de que la reinserción se efectúa a la misma profundidad. No continue usando un termopar cuyo tubo protector está "quemado".

Cuando se construye un montaje de termopares, deben tenerse precauciones adicionales. Los dos termopares deben estar permanentemente conectados en la juntura caliente. Las técnicas comunes incluyen soldadura a punta, soldaduras de tope, o unión a presión. No es aceptable la simple retorción de los dos alambres, esta técnica resulta en una reducción de la vida de servicio y en un incremento de los tiempos de respuesta. Límpiense los extremos de los alambres del termopar antes de unirlos y ensamblarlos en el bloque terminal. Asegúrese de que los alambres se inserten con la polaridad correcta. Todas las conexiones deben ser apre

tadas para prevenir alta resistencia de contacto. El alambre de éstos debe ser correctamente apareado al alambre del termopar. Una lista de combinaciones de alambre de extensión se muestra en el cuadro 4-2. Obsérvese el código de color de los alambres y asegúrese que se conecten con la polaridad adecuada tanto en el bloque terminal como en el instrumento de medición.

4.3.2 Principios de operación

Cuando dos alambres metálicos disímiles se unen en cada extremo y uno de los extremos se calienta una FME (fuerza electromotriz) es creada a través de las dos junturas. La FME varía con la diferencia de temperatura entre las dos junturas. Si una de estas junturas (conocida como la juntura fría o juntura de referencia) puede ser mantenida a una temperatura constante, la temperatura de la juntura opuesta (conocida como la juntura caliente o juntura de medición) puede medirse como una función de la magnitud de la FME producida. Un milivoltímetro o potenciómetro se inserta en el circuito para medir la FME.

En la práctica no es posible mantener la junta fría a temperatura constante, por lo cual un dispositivo compensatorio, tal como un resistor sensible a la temperatura, es utilizado para cancelar las variaciones en la temperatura de la juntura fría, causadas por los cambios en la temperatura ambiente. Los circuitos estándar utilizan una juntura fría a una temperatura de 0°C.

Por razones prácticas, el instrumento de medición (por ejemplo milivoltímetro) suele localizarse tan lejos como cientos de metros de la juntura caliente. Ya que el dispositivo de compensación se localiza más convenientemente en el mismo circuito que el instrumento de medición, es también necesario localizar la juntura fría en el instrumento. El circuito del termopar debe extenderse desde la juntura caliente a la fuente de medición de temperatura hasta la juntura fría en el instrumento. En lugar de utilizar un sólo par de alambres de termopar, los

CUADRO 4-2 TERMOPAR — COMBINACIONES DE ALAMBRES DE EXTENSION

Termo par	Alambre de Extensión		
	Combinación	Alambre Positivo	Alambre Negativo
Hierro-Constantan, Tipo J	Hierro-Constantan	Hierro	Constantan
Chromel-Alumel, Tipo K	Chromel-Alumel	Chromel	Alumel
Chromel-Alumel	Aleación de hierro	Hierro	Aleación
Chromel-Alumel	Cobre-Constantan	Cobre	Constantan
Platino, 10 ó 13% rodio-platino, Tipo S ó R	Aleación de cobre	Cobre	Aleación
Cobre-Constantan, Tipo T	Cobre-Constantan	Cobre	Constantan

alambres de extensión se usan para conectar el termopar al bloque terminal que permite el cambio de los alambres del termopar periódicamente a un costo mínimo. Ya que los alambres de éstos son parte del circuito del termopar, deben ser de materiales idénticos a los del termopar o de un material que presente las mismas relaciones de temperatura - FME como los metales asociados al termopar.

4.3.3 Opciones de equipo

Cuando se seleccionan termopares, la principal consideración es el tipo de alambre. La mayoría de los tipos de alambre de termopar se identifican por una letra asignada por el Instituto Americano de Normas Nacionales (ANSI). Los tipos más comunes de termopares se resumen en el cuadro 4-3 y se describen en detalle en las secciones siguientes. Muchos tipos de ensambles de termopares se encuentran disponibles, y una punta de prueba típica de 30 centímetros de longitud costará entre US $ 25 y $ 50. Puntas de prueba de alta temperatura utilizan termopares de platino-rodio o tungsteno-renio, los cuales son considerablemente más caros. Un dispositivo de lectura (indicador) constituye un gasto adicional.

El tipo de termopar es una opción primaria en la selección de éstos, y todos los tipos comunes de termopar serán discutidos aquí. Sin embargo, otras varias opciones también deben considerarse cuando se selecciona una punta de prueba de termopar. Estas incluyen tamaño del alambre, meterial del forro, y tipos de juntura.

Tamaño del alambre.- Este afecta el comportamiento del termopar en diferentes maneras. Un diámetro más pequeño de alambre rinde un tiempo más corto de respuesta, y también incrementa la exactitud del termopar en dos formas: 1) permitiendo la medición precisa de temperatura en un punto, y 2) minimizando las pérdidas de conducción a lo largo del alambre del termopar, el

CUADRO 4-3 RESUMEN DE CARACTERISTICAS DE TERMOPARES

SIMBOLO ANSI	MATERIALES DE TERMOPAR	GAMA DE TEMPERATURA	APLICACION RECOMENDADA	DESIGNACION DE COLOR DE ANSI
K	Chromel-Alumel	-200°C - +1260°C	Ambientes oxidantes	Amarillo
J	Hierro-Constantan	0°C - +700°C	Ambientes reductores	Negro
T	Cobre-Constantan	-250°C - +370°C	Muy baja temperatura	Azul
E	Chromel-Constantan	-200°C - +870°C	Ambientes oxidantes	Morado
S	Platino-Platino/ 10% Rodio	0°C +1450°C	Alta temperatura	--
R	Platino-Platino/ 13% Rodio	0°C - +1450°C	Alta temperatura	--
B	Platino/30% Rodio-Platino/ 6% Rodio	0°C - +1700°C	Alta temperatura	--
-	Tungsteno-Tungsteno/ 26% Rodio	0°C - +2320°C	Muy alta temperatura	--
-	Tungsteno 5% Renio Tungsteno /26% Renio	0°C - +2320°C	Muy alta temperatura	--
-	Tungsteno 3% Renio Tungsteno /25% Renio	0°C - +2320°C	Muy alta temperatura	--

cual crea depresiones locales de temperatura en el punto de medición. Por otra parte, diámetros mayores de alambre son adecuados para mediciones de temperaturas más altas y generalmente rinden mayores vidas de servicio. Verifíquese siempre con el fabricante para determinar la mayor temperatura permisible para un tamaño específico de alambre.

Material del forro.- Aunque los termopares desnudos, sin protección, ofrecen la mayor sensibilidad y el tiempo de respuesta más rápido, la mayoría de los termopares están dotados de un forro metálico o cerámico para protegerlos de ambientes severos y para alargar su vida de servicio. El cuadro 4-4 es una lista de los materiales del forro más utilizados, las temperaturas correspondientes, y los ambientes en los cuales cada uno puede usarse efectivamente. Los dos materiales usados con mayor frecuencia son el acero inoxidable 304 y el inconel 600 (aleación con 14% de cromo y 80% de níquel). Para temperaturas superiores a los 1 150°C, se emplea cerámica y otros metales tales como el tántalo, molibdeno, o platino, para el forro.

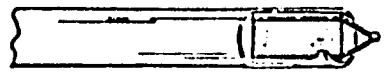
Junturas de termopares.- Normalmente se dispone de 3 tipos de junturas calientes en termopares forrados, cada una se aplica para una aplicación particular. La figura 4-5 ilustra cada una de estas junturas, las que se discuten seguidamente.

- La juntura expuesta - se recomienda para uso en atmósferas gaseosas no corrosivas donde se quiere un rápido tiempo de respuesta. La juntura se extiende un poco más allá del extremo del forro protector, debiendo ser el aislamiento de éste sellado para prevenir la penetración de humedad y gas dentro del tubo del termopar.

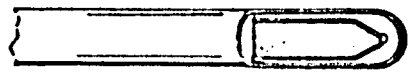
- Juntura sin tierra - se recomienda para medición de temperaturas en ambientes donde la juntura del termopar

CUADRO 4-4 MATERIALES DE FORROS PARA TERMOPARES

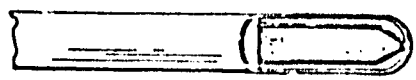
METALES	TEMPERATURA MAXIMA RECOMENDADA PARA OPERACION
Cobre	150°C
Aluminio	370
Monel	540
Acero dulce	650
Cupro-Níquel 30%	760
Acero inoxidable 430	840
Acero inoxidable 347	900
Acero inoxidable 316	900
Acero inoxidable 304	900
Acero inoxidable 446	1 090
Acero inoxidable 310	1 090
Acero inoxidable 309	1 090
Inconel	1 150
Inconel 702	1 200
Hastelloy X	1 260
Níquel	1 260
Platino	1 680
Niobio (Columbio)	1 980
Molibdeno	2 200
Tántalo	2 480
CERAMICOS	
Vycor	980
Ladrillo refractario	1 450
Sílice	1 590
Mullita	1 650
Alúmina	1 930



JUNTURA EXPUESTA



JUNTURA NO A TIERRA



JUNTURA A TIERRA

FIGURA 4-5 JUNTURA DE MEDICION DE TERMOPAR

no debe estar en contacto con el forro protector. El tiempo de respuesta es relativamente lento. El aislamiento entre la juntura de referencia y el forro exterior proteje el termopar de una FME inducida que puede resultar del contacto con una solución electrolítica.

- Juntura conectada a tierra - se recomienda para uso en ambientes de líquidos y gases corrosivos o para aplicaciones de alta temperatura. La juntura del termopar se solda al extremo del tubo protector, resultando en tiempos de respuesta más rápidos que en las junturas sin tierra.

4.3.3.1 Tipo K: Chromel - Alumel

Descripción

Los termopares de este material se identifican por la ANSI con el símbolo K; el código de color de la ANSI es el amarillo. Chromel es una aleación de 90% de níquel y 10% de cromo; alumel es una aleación de 95% de níquel con aluminio, sílice, y magnesio en el 5% restante. Ambas aleaciones presentan baja conductividad térmica y son fuertes y resistentes cuando nuevos. La contaminación durante el servicio puede, sin embargo, resultar en fragilidad, especialmente en el miembro alumel. La fuerza termoeléctrica (por ejemplo, cambio en la FME por cambio de grado de temperatura) es realtivamente alta (12.4 uV/°C) y casi lineal sobre la gama de temperatura típica. Cuando se instalan o construyen termopares tipo K, es útil recordar que sólo el alumel es magnético.

Aplicaciones recomendadas

Estos termopares presentan una gama de operación de -200°C a 1 260°C.

Son especialmente adecuadas para mediciones en atmósferas oxidantes limpias.

Limitaciones

Los termopares tipo K sin protección no deben se usados en atmósferas reductoras o que tengan azufre. Solamente pueden utilizarse en el vacío por muy corto tiempo antes de que ocurra un cambio en su calibración.

Exactitud y confiabilidad

La mayoría de estos termopares se construyen para llenar los límites de error establecidos por la ANSI, estos límites se muestran en el cuadro 4-5. Puede utilizarse termopares especiales para llenar requerimientos de exactitud más estrictos.

La confiabilidad depende altamente de la instalación y uso adecuados. Si las técnicas de istalación descritas previamente y si se selecciona el termopar correcto a la aplicación, las lecturas de temperatura serán altamente confiables.

4.3.3.2 Tipo J: Hierro - Constantan

Descripción

Estos termopares se identifican por la ANSI con el símbolo J, el índice asociado de color es el negro. El Constantan es una aleación de 60% de cobre y 40% de níquel. La combinación hierro-constantan presenta una conductividad térmica relativamente baja y es mecánicamente fuerte y resistente. La fuerza termoeléctrica es alta (17.9 uV/°C) y aproxima-

damente lineal sobre una amplia gama de temperaturas. Cuando se construye o instala un termopar de este tipo, es útil recordar que solamente el hierro es magnético.

Aplicaciones recomendadas

Los termopares tijo J presentan una gama recomendada de temperatura entre los 0°C y los 760°C. Cuando están adecuadamente protegidos, termopares de alambres gruesos pueden ser empleados hasta para 860°C, habiendo sido medidas temperaturas tan bajas como -256°C bajo condiciones ideales. Los termopares tipo J sin protección están recomendados para emplearse en atmósferas reductoras y también bajo condiciones inertes de vacío, o medianamente oxidantes.

Limitaciones

Para temperaturas por encima de los 540°C, la vida de servicio es significativamente más baja para los termopares tipo J que para los de tipo K. Por encima de los 566°C ocurre un rápido deterioro en termopares expuestos.

Exactitud y confiabilidad

La mayoría de estos termopares están construidos para llenar los límites de error establecidos por la ANSI, los cuales se muestran para operación normal en el cuadro 4-5. Es posible la construcción de termopares especiales para llenar estándares más estrictos de exactitud.

La confiabilidad de estos termopares depende mucho de la instalación y el uso adecuados. Si se selecciona el tipo correcto y se siguen cuidadosamente las técnicas de instalación delineadas anteriormente, las lecturas de temperaturas serán altamente confiables.

CUADRO 4-5

LIMITES DE ERROR POR ANSI PARA TERMOPARES
JUNTURA DE REFERENCIA A 0°C

Tipo de Termopar	Intervalo de Temperatura °C	Límites de error	
		Estándar*	Especial*
K	0 a 1250	±2.2°C o ±0.75%	±1.1°C o ±0.4%
J	0 a 750	±2.2°C o ±0.75%	±1.1°C o ±0.4%
T	0 a 350	±1.0°C o ±0.75%	±0.5°C o ±0.4%
E	0 a 900	±1.7°C o ±0.5%	±1.0°C o ±0.4%
R o S	0 a 1450	±1.5°C o ±.025%	±0.6°C o ±0.1%
B	800 a 1700	±0.5%	No establecido
Aleaciones de tungsteno	0 a 425	±4.5°C	No establecido
	797 a 2320	±1.0%	No establecido
	INTERVALO BAJO CERO		
K	-200 a 0	±2.0°C o ±2.0%	No establecido
T	-200 a 0	±1.0°C o ±1.5%	No establecido
E	-200 a 0	±1.7°C o ±1.0%	No establecido

* °C ó %, el que sea mayor.

4.3.3.3 Tipo T: Cobre - Constantan

Descripción

Se identifican por la ANSI con el símbolo T, siendo el color asociado el azul. El cobre tiene la desventaja de presentar una alta conductividad térmica, y la ventaja de que puede ser fácilmente fabricado en forma pura y homogénea. La fuerza termoeléctrica es una función no lineal de la temperatura que baja de un valor de 13.2 uV/°C entre los 0 y los 100°C, hasta los 5.4 uV/°C. Cuando se construye o instala un termopar de este tipo, los alambres pueden diferenciarse por el color: el cobre es un metal amarillento y el constantan es plateado.

Aplicaciones recomendadas

Estos termopares se aplican mucho mejor para medición de temperaturas muy bajas; se emplean ampliamente entre los 0° y los -253°C. El límite superior recomendado es de 370°C. Termopares tipo T sin protección pueden utilizarse en atmósferas medianamente oxidantes o reductoras tanto como bajo condiciones de vacío o inertes. También son adecuados para utilizarse en ambientes húmedos.

Limitaciones

Los termopares tipo T, como se indicó no se usan para aplicaciones de alta temperatura. Aunque la temperatura máxima de operación es de 370°C, los termopares de pequeño diámetro y sin protección se limitan a usos bajo los 205°C si la vida de servicio es un factor importante.

Exactitud y confiabilidad

La mayoría de estos termopares se construyen para llenar los límites de

error establecidos por la ANSI. Estos límites se muestran para operaciones a temperaturas normales y bajas en el cuadro 4-5. Pueden construirse tipos especiales de termopares para llenar estándares más estrictos de exactitud.

La confiabilidad del termopar es altamente dependiente de la adecuada instalación y uso. Si se selecciona el tipo correcto de termopares y si las técnicas de instalación delineadas anteriormente se observan cuidadosamente, las lecturas de temperatura serán altamente confiables.

4.3.3.4 Tipo E: Chromel - Constantan

Descripción

Estos termopares se identifican por el símbolo ANSI E; el código de color asociado es morado. El reemplazo de la parte de alumel con constantan elimina la fragilidad inherente al tipo K (Chromel-alumel). Con un promedio de 19.4 uV/°C los termopares tipo E proveen la fuerza termoeléctrica más alta de cualquiera de los estándar.

Aplicaciones recomendadas

El tipo E tiene una gama de operación recomendada entre los -200 y los 870 °C. Están muy adecuados para la operación en atmósferas oxidantes o inertes y no están sujetos a la corrosión a bajas temperaturas.

Limitaciones

El tipo E no está recomendado en atmósferas reductoras o bajo condiciones de vacío.

Exactitud y confiabilidad

La mayoría de estos termopares se construyen para llenar los límites de error establecidos por la ANSI. Estos límites se indican en el cuadro 4-5. Se pueden construir termopares especiales para llenar estándares de exactitud más estrictos.

La confiabilidad de los termopares depende mucho de la instalación y uso adecuado, como ya se indicó. La técnica cuidadosa de instalación permitirá lecturas de temperatura altamente confiables.

4.3.3.5 Tipos S, R, B: Platino - rodio

Descripción

Tres de estos termopares han recibido designaciones ANSI; el tipo S es de platino-rodio con 10% de este último. El tipo R contiene 13% de rodio. El tipo B representa una aleación de 70% de platino y 30% de rodio unidas a 94% de platino con 6% de rodio. Los códigos de color ANSI para estos termopares no se han asignado aún. Los tres tipos presentan una fuerza termoeléctrica muy baja.

Aplicaciones recomendadas

Estos termopares están muy adecuados para la medición de altas temperaturas. El tipo S es el especificado en la escala internacional de temperatura como un estándar de calibración de 630.5 a 1 063°C. La gama de operación recomendada para los tipos S y R es desde los 0° hasta los 1 454°C, aunque es factible la operación hasta los 1 650°C. El tipo B es recomendado para usarse en la gama de los 0°C a los 1 705°C.

Limitaciones

Debido a la fuerza termoeléctrica que es inherentemente baja (menos de 1.7 uV/°C) y el relativo alto costo (cuando se compara a los tipo K, J, T, y E), el termopar de platino-rodio raramente se usa industrialmente. La fuerza termoeléctrica es especialmente pequeña a bajas temperaturas y no es posible obtener lecturas exactas por debajo de los 0°C. La exposición prolongada a altas temperaturas debe evitarse debido a que la volatilización del rodio resulta en la pérdida de calibración del termopar.

Estos termopares deben usarse siempre con un forro protector. La exposición a compuestos de silicio, hidrógeno, y gases carbonatados, así como muchos vapores metálicos causa severa contaminación, que conduce a errores en la calibración y, eventualmente, a la falla en el termopar. Los tubos protectores también proveen un soporte a los alambres del termopar, los cuales llegan a estar suaves y débiles a elevadas temperaturas.

Exactitud y confiabilidad

La mayoría de estos termopares se construyen para llenar los límites de error especificados por la ANSI. Estos límites se muestran en el cuadro 4-5. Los límites ANSI no han sido establecidos para termopares especiales de alta exactitud.

De nuevo, la confiabilidad y exactitud de los termopares depende de la instalación y uso adecuado. Si se selecciona el tipo correcto de termopar y se siguen las técnicas apropiadas de instalación, las lecturas de temperatura serán altamente confiables.

4.3.3.6 Aleaciones de tungsteno - renio

Descripción

Se emplean tres tipos de termopares de aleación tungsteno-renio para mediciones de temperatura hasta de 2 760°C. Estas tres, que aún no tienen designación ANSI, son: tungsteno-tungsteno con 26% de renio, tungsteno con 5% de renio unido a tungsteno con 26% de renio, y tungsteno con 3% de renio unido a tungsteno con 25% de renio. La fuerza termoeléctrica de los tres termopares es muy pequeña

Aplicaciones recomendadas

La gama operante de temperaturas recomendadas para este tipo es desde los 0° hasta los 2 315°C, pero son posibles aplicaciones hasta en 2 760°C. Las termocuplas sin protección pueden usarse en vacío, hidrógeno, o atmósferas inertes.

Limitaciones

Debido a la comparativamente baja fuerza termoeléctrica y al relativamente alto costo, los termopares de aleación tungsteno-renio son poco usados en aplicaciones industriales. La fuerza termoeléctrica es especialmente pequeña a bajas temperaturas y no es posible obtener lecturas exactas por debajo de los 0°C.

Estas aleaciones tienden a ser quebradizas, de modo que debe evitarse la flexión. Presentan muy baja resistencia a la oxidación por lo cual no pueden exponerse a atmósferas oxidantes.

Exactitud y confiabilidad

La mayoría de los termopares tungsteno-renio se fabrican para llenar los límites de error establecidos por la ANSI. Estos límites se muestran en el cuadro 4-5. La ANSI aún no ha establecido límites para termopares especiales de alta exactitud.

4.4 TERMOMETROS DE RESISTENCIA

Los termómetros de resistencia incluyen tanto los detectores de temperatura por resistencia (RTD) y los termistores. El RTD es un resistor metálico, mientras que el termistor es un resistor compuesto de un material semiconductor. Ambos tipos pueden emplearse en el campo de los termopares. Los termómetros de resistencia pueden construirse para ser extremadamente exactos; de hecho, los de platino se emplean frecuentemente como un estándar de calibración. Los RTD de platino son más caros que los termopares estándares, pero son seleccionados con frecuencia cuando la exactitud sobre una amplia gama de temperatura es crítica.

4.4.1 Operación básica e instalación

El RTD consiste de una pequeña bobina de alambre u otro resistor metálico. La resistencia es una función de la temperatura del resistor: a medida que se inclina la temperatura, también lo hace la resistencia. La resistencia de un termistor también depende de la temperatura; sin embargo, para la mayoría de estos un incremento en la temperatura resulta en una disminución en la resistencia. La figura 4-6 muestra un esquema de un termómetro de resistencia. Un circuito básico para medición de la temperatura incluye un RTD o un termistor, una batería, un reóstato, uno o más resistores fijos, y un medidor. La mayoría de las unidades RTD o termistor también incluyen alambres terminales, un forro protector, y algún tipo de terminación como la cabeza de un conector o un bloque terminal. Alambre ordinario de cobre puede usarse para las conexiones.

Para obtener la máxima precisión y confiabilidad, los termómetros de resistencia deben instalarse, operarse, y mantenerse adecuadamente. La mayoría de las recomendaciones dadas para los termopares también son aplicables para este tipo de medidores. Sin embargo, los termistores no se usan en ambientes de alta temperatura, de modo que los

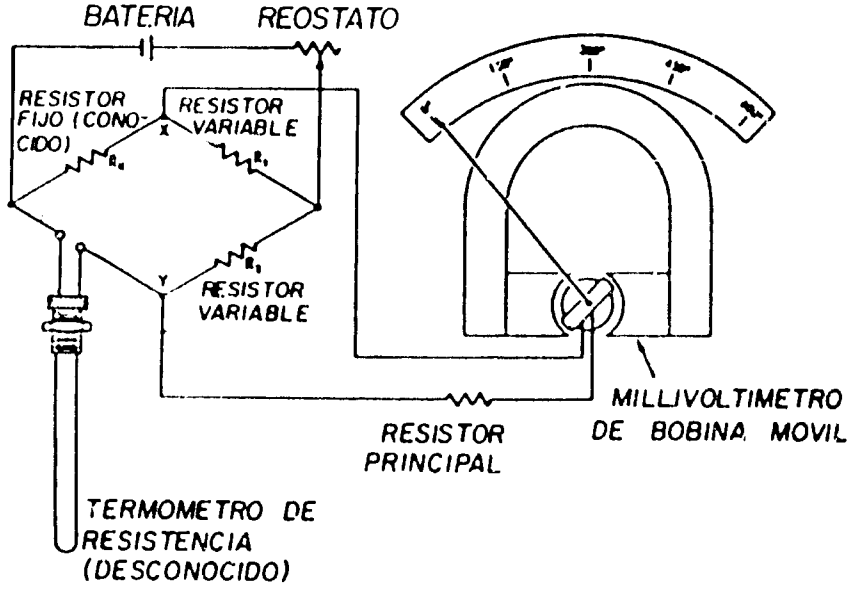


FIGURA 4-6 CIRCUITO TIPICO DE TERMOMETRO DE RESISTENCIA

Aunque la resistencia eléctrica de todos los metales depende de la temperatura, solamente se usan con amplitud en aplicaciones de RTD, el platino, el níquel y el cobre. El cuadro 4-6 muestra las características de resistencia de cada uno de estos 3 metales.

TABLA 4-6

COEFICIENTE DE TEMPERATURA POR RESISTENCIA PARA METALES COMUNMENTE USADOS PARA RTDS

Metal	Coeficiente de Temperatura por Resistencia Ohmio /Ohmio °C a 0°C	Límite de intervalo
Platino	0.0040	-260°C a + 545°C
Niquel	0.0065	-190°C a + 310°C
Cobre	0.0043	- 40°C a + 125°C

errores de radiación no constituyen un problema. Las instrucciones de los fabricantes incluyen información adicional, si ésta es necesaria.

4.4.2 Principos de operación

La operación de los RTD está gobernada por la tendencia de los metales a incrementar su resistencia a la corriente eléctrica con una elevación de su temperatura. Mientras que los termistores, aún operando en forma similar, presentan una disminución en su resistencia con el incremento en la temperatura. Se dice que los RTD tienen un coeficiente de temperatura de la resistencia positivo, mientras que los termistores lo tienen negativo. (Existen también termistores comerciales que exhiben un coeficiente de resistencia positivo). La temperatura se mide haciendo pasar una corriente a través del circuito del termómetro, y comparando la resistencia del RTD o del termistor a la de un resistor fijo en el mismo circuito eléctrico. La temperatura puede leerse por un medidor analógico (elemento móvil d'Arsonval) o con una pantalla digital.

4.4.3 Opciones de equipo

4.4.3.1 RTD

Descripción

El resistor RTD estándar consiste de un aislante de cerámica o vidrio, con alambre (bobina) enrollado. Las bobinas comerciales disponibles incluyen una tela de alambre, tiras delgadas de metal, y bobinas helicoidales de alambre montadas en un tubo aislado de pared delgada de metal o vidrio. Elementos de película delgados, formados por la deposición de una película delgada de metal sobre un substrato, también están disponibles.

Aplicaciones recomendadas

Los RTD y los termopares se usan en casi las mismas aplicaciones. A un costo entre US $ 70 y $ 100 para los RTD, son generalmente más caros que los termopares pero ofrecen mayor precisión y exactitud. La señal de un RTD - el cambio de resistencia por grados Celsius - es mucho más grande y mucho más fácilmente medida que el pequeño cambio de voltaje por grados centígrados que ocurre en un termopar.

El RTD de platino ha sido establecido por la Escala Internacional de Temperatura como el instrumento más preciso y confiable que se encuentra disponible para la medición de temperaturas en la gama de -185°C a 650°C. El alcance de este grado de precisión requiere extremo cuidado en la construcción y en la operación. Los RTD también están disponibles en versiones más toscas y baratas de níquel, cobre , o platino menos refinado, aunque con la correspondiente pérdida de precisión. El níquel es ampliamente usado en aplicaciones industriales para mediciones de temperatura hasta los 120°C.

Limitaciones

La contaminación de los RTD sin protección puede ocurrir en soluciones electrolíticas, y en gases y líquidos corrosivos o químicamente reactivos. La reacción química o la absorción por la superficie de un elemento del RTD causan considerable desviación de la calibración. Sin embargo, la contaminación raramente constituye un problema, porque la mayoría de los RTD disponibles comercialmente encierran el elemento sensible en una cápsula de cerámica, vidrio o metal. El elemento recibe mayor protección por un forro exterior. El material seleccionado para este forro debe ser adecuado para el ambiente en que se va a utilizar, debido a que los RTD son muy suceptibles a la difusión de gas o vapor dentro de los tubos protectores.

Exactitud y confiabilidad

Los RTD pueden fabricarse para varios niveles de exactitud y su costo sube junto con su exactitud. Los RTD de platino se fabrican para dar una exactitud dentro de la diezmilésima de grados centígrados (0.0001°C). En general estos instrumentos son altamente exactos y los límites de exactitud son normalmente provistos por el fabricante.

Cuando se usan correctamente los RTD son muy confiables. Una vida de servicio confiable depende de muchos factores tales como la temperatura promedio y la protección contra la contaminación. Las técnicas de fabricación estandarizadas permiten el intercambio de los elementos con una derivación despreciable.

4.4.3.2 Termistores

Descripción

Estos se construyen con óxidos de níquel, magnesio, hierro, cobalto, cobre, y otros metales. El termistor se fabrica comprimiendo el óxido metálico en la forma deseada y posteriormente sometiendo el material a tratamiento térmico hasta que recristaliza en un cuerpo cerámico denso. El elemento termistor normalmente se encapsula en un material protector y a menudo el elemento termistor y sus alambres terminales se encierran en un forro metálico.

La mayoría de los termistores para medición de la temperatura tienen la forma de perlas que pueden fabricarse con diámetros tan pequeños como 0.4 milímetros. Otras consideraciones incluyen discos que van desde los 5 hasta los 25 milímetros de diámetro, varillas desde 0.7 hasta 6.4 milímetros en longitud y hojuelas de varios micrones de espesor.

Aplicaciones recomendadas

Los termistores dan tiempos de respuesta cortos y medición de la temperatura precisa, y son comparables en precio al RTD. Están disponibles para la gama de temperaturas de los 60°C a los 400°C, pero muchos termistores disponibles comercialmente no se recomiendan para usos por encima de los 150°C. Cada fabricante proporciona la gama recomendada de operación.

Los termistores presentan una amplia gama de aplicaciones específicas. Incluyen medición superficial de la temperatura, medición por inmersión en líquidos, y mediciones en áreas donde la vibración y el choque deben tomarse en consideración.

Limitaciones

Los termistores no son indicados para la exposición extensa a temperaturas por encima de los 100°C; bajo estas circunstancias pueden ocurrir desviaciones considerables en la calibración. Los termistores que no han sido adecuadamente sellados en un material protector también están sujetos a desviaciones significativas de calibración, independientemente de la temperatura circundante.

Exactitud y confiabilidad

Los termistores tienen un gran coeficiente de resistencia que les da una mayor sensibilidad y exactitud que los RTD corrientes y los termopares. Los termistores disponibles comercialmente, después del ajuste adecuado, pueden conformarse a las curvas estándares de calibración dentro del 0,6°C sobre la gama de operación.

Cuando se instalan y mantienen adecuadamente, los termistores son altamente confiables. Las perlas de termistores pueden retener la calibración durante varios meses con menos del 0.01°C de variación. Existen termistores intercambiables dentro de los 0.02°C, que están disponibles comercialmente.

4.5 PIROMETROS DE RADIACION

A diferencia de los termómetros convencionales, el elemento sensible a la temperatura de un pirómetro no llega a estar en contacto directo con la fuente de temperatura. Los pirómetros de radiación miden la temperatura mediante la energía radiante emitida por la fuente. Se usan tanto en forma portátil como permanentemente instalados, para medir la temperatura de objetos a distancias de pocos metros hasta cientos de metros. Con costo hasta de US $ 2 500, los pirómetros de radiación son muy caros, pero a menudo la única alternativa para ciertas aplicaciones. Se discuten tres tipos de pirómetros de radiación: el pirómetro de radiación total, el de radiación parcial, y el pirómetro óptico. Debido a muchas similitudes los dos primeros se discuten en la misma sección.

4.5.1 Operación básica e instalación

El pirómetro de radiación total no es selectivo y mide la energía radiante de todas las longitudes de ondas. Un pirómetro óptico por el contrario, es selectivo y utiliza sólo la banda angosta en el espectro visible. El tercer tipo, pirómetro de radiación parcial, que analiza selectivamente una porción del espectro, pero opera sobre una gama de longitudes de onda mucho más amplia que el pirómetro óptico.

La operación básica de los tres tipos es similar. Como se ilustra en la figura 4-7, el pirómetro se apunta hacia el objeto caliente cuya temperatura se desea medir. La energía radiante de la fuente entra a través de una abertura y es enfocada por medio de lentes en el elemento sensible. El tipo del elemento sensible usado es una distinción primaria entre los tres pirómetros y cada uno se discute más adelante.

Con frecuencia debe hacerse una corrección para la emisividad relativa del objeto caliente, a modo de obtener lecturas exactas de temperatura. Debe tenerse cuidado al asignar factores de emisividad. La emisividad de diferentes formas (por ejemplo pulido y no pulido, oxidado

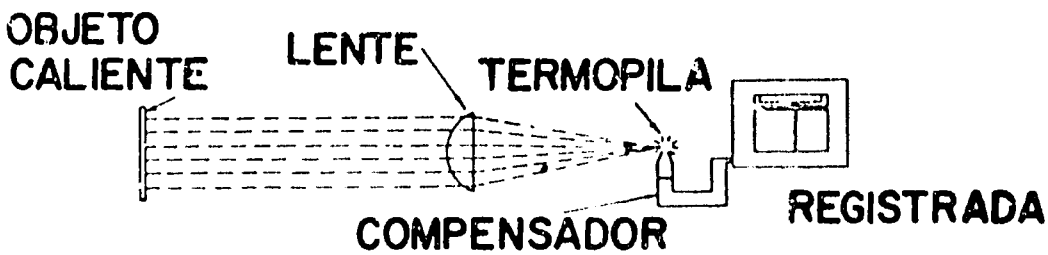


FIGURA 4-7 PIROMETRO DE RADIACION

y no) y de diferentes aleaciones del mismo material, pueden ser muy diferentes. La emisividad también es una función débil de la temperatura. Se encuentran disponibles cuadros extensivos de emisividad, pero si se requiere una medición precisa de temperatura, debe determinarse la emisividad exacta por comparación contra un estándar de referencia.

4.5.2 Principios de operación

Todos los cuerpos emiten y absorben energía radiante. En un fenómeno descrito por la ley de Stefan-Boltzmann, la intensidad de la energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo se aumenta en proporción directa a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo.

La tendencia a emitir energía radiante no es la misma para todos los cuerpos. La emisividad de un cuerpo se determina por comparación a un estándar de referencia conocido como cuerpo negro. A cualquier temperatura, un cuerpo negro absorbe toda la radiación que cae sobre él sin transmitir o reflejar ninguna, y un cuerpo negro irradia más energía en un tiempo dado que cualquier otro cuerpo a la misma temperatura. La emisividad, E, de un cuerpo se determina por la siguiente relación:

$$E = \frac{\text{radiación total de un cuerpo no negro}}{\text{radiación total del cuerpo negro}}$$

donde ambos cuerpos comparten la misma forma y están a la misma temperatura.

La cantidad de energía radiada de un cuerpo por unidad de área es por consiguiente calculada por la siguiente ecuación:

$$Q = \sigma \quad ET^4$$

Donde:	Q:	Energía radiada por unidad de área
	σ:	Constante de Stefan-Boltzmann
	E:	Emisividad
	T:	Temperatura absoluta del cuerpo

Un pirómetro de radiación mide la intensidad de la energía radiante emitida por un cuerpo y determina su temperatura basado en la relación anterior.

4.5.3 Opciones de equipo

4.5.3.1 Pirómetros de radiación total o parcial

Descripción

En un pirómetro estándar de radiación total, la energía radiante de la fuente se enfoca en una termopila que actúa como el elemento sensible. Una termopila agrupa termopares muy pequeños unidos a un disco ennegrecido de platino y conectadas en serie para producir una FME aditiva. Esta fuerza electromotriz es una función conocida de la temperatura de la fuente. El pirómetro de radiación parcial incorpora una fotocelda, en lugar de una termopila, como el elemento sensible. Se utiliza un filtro para apartar las longitudes de onda no deseadas.

Cuando se utiliza cerca de un horno donde la temperatura ambiente es alta, los pirómetros están disponibles con accesorios enfriados por agua o por aire para prevenir la conducción de calor de las paredes del horno. También están disponibles accesorios protectores para prevenir el impacto directo de las llamas.

Aplicaciones recomendadas

Debido a que los pirómetros de radiación miden la temperatura sin llegar a estar en contacto físico con la fuente, son singularmente adecuados para varias aplicaciones.

Los pirómetros son usados para:

- Medir temperaturas superficiales muy altas que están más allá de la gama práctica de los termopares.

- En atmósferas de hornos, donde el uso de termopares u otros dispositivos convencionales resultarían en mediciones erráticas y en vidas de servicio muy cortos.

- Cuando la fuente de temperatura es inaccesible para otros medios de medición.

Hay a disposición pirómetros de radiación para mediciones de temperaturas hasta de 3 000°C. Se han desarrollado pirómetros de radiación parcial que permiten la medición de temperaturas tan bajas como -30 °C, aunque no se recomienda el uso de pirómetros para mediciones de temperaturas menores de 10°C.

Limitaciones

Los pirómetros de radiación son aparatos sumamente caros y se usan generalmente cuando no existen otros medios aceptables de medición de temperatura. Los resultados de las mediciones con pirómetros deben ser revisados cautelosamente. Debido a la naturaleza de la energía radiante, las lecturas de temperatura pueden ser engañosas. Por ejemplo, un manto de nieve blanca y fresca expuesto a la luz directa del sol podría parecer tan caliente como algunos miles de grados centígrados cuando se mide con un pirómetro de radiación.

El pirómetro de radiación total tiene una desventaja innata debido a su carácter no selectivo. Es sensible a la absorción radiante por vapor de agua, CO_2, y humo; y la presencia de ellos en el campo de visión introducirá un error en las lecturas de pirómetro. El pirómetro de radiación parcial descarta las longitudes de onda en que estas substancias absorben y pueden usarse en ambientes en que tales substancias están presentes. Esto permite que los dispositivos puedan usarse en chimeneas de escape de calderas y hornos.

Exactitud y confiabilidad

La exactitud máxima se logra cuando el objeto es un cuerpo negro relativamente grande ubicado a suficiente distancia del pirómetro, y cuando el pirómetro es manejado por un técnico con experiencia. En estas condiciones, los fabricantes aseguran precisiones de ± 1%. Bajo condiciones de operación menores que las ideales, las precisiones serán mucho menores.

4.5.3.2 Pirómetros ópticos

Descripción

En la figura 4-8 se muestra un esquema sencillo de un pirómetro óptico. El ojo humano actúa como el elemento sensible, y un filtro óptico es interpuesto entre la parte ocular y la lámpara. Cuando se ve a través de la parte ocular, la fuente aparece como un círculo brillante o un cuadrado con la imagen del filamento de la lámpara en el centro. La corriente a través de la lámpara y, por consiguiente, su brillantez es cambiada por ajuste del reóstato. La resistencia es ajustada hasta que la brillantez de la lámpara es exactamente igual a la de la fuente de radiación y las dos se funden en una sola imagen. El miliamperímetro es calibrado para dar directamente grados Farenheit o Celsius (Centígrados).

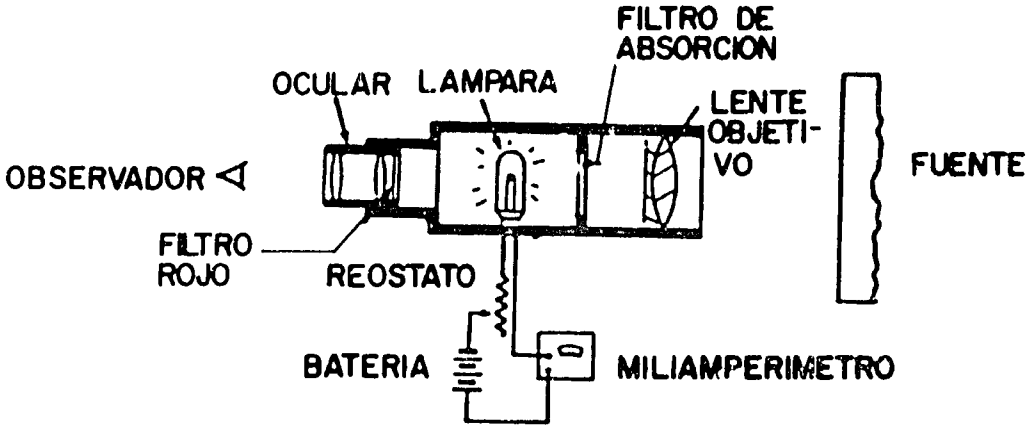


FIGURA 4-8 PIROMETRO OPTICO

Aplicaciones recomendadas

Los pirómetros ópticos se utilizan para mediciones de temperaturas sumamente altas. Un intervalo típico de operación es entre 769°C y 1 430°C, aunque hay instrumentos para medir temperaturas más altas. Los pirómetros ópticos se emplean corrientemente en la industria siderúrgica, especialmente para mediciones de temperatura de metal derretido. Los pirómetros ópticos pueden ser portátiles, pero frecuentemente están instalados en forma permanente.

Limitaciones

Los pirómetros ópticos pueden usarse solamente para fuentes de alta temperatura que irradian en la banda de onda visible. Estos instrumentos dependen de ajustes sutiles para igualar el color del filamento con el objetivo, por lo cual se requiere un operador capacitado para obtener mejores resultados.

Exactitud y confiabilidad

La exactitud del pirómetro óptico está sujeta a las mismas restricciones que los pirómetros de radiación total o parcial.

4.6 INDICADORES SENSIBLES A LA TEMPERATURA

Los indicadores sensibles a la temperatura comprenden una amplia variedad de productos que indican la temperatura por derretimiento o cambio de color. Estos indicadores no se emplean para mediciones exactas de temperatura, sino que se emplean más bién para indicar si la temperatura medida está sobre o bajo un cierto valor especificado o dentro de un intervalo. Hay a disposición indicadores reversibles e irreversibles. Los costos son bajos, pero la mayoría de los indicadores son irreversibles y no pueden volver a usarse.

4.6.1 Operación básica e instalación

Los indicadores de temperatura se ofrecen en una amplia variedad de formas, incluso crayones, lacas, granos y etiquetas. La operación e instalación depende del material específico y se describen, para cada tipo de indicador, en las opciones de equipos que se presentan más adelante.

4.6.2 Principios de operación

Muchos compuestos químicos sufren rearreglos moleculares o descomposición a altas temperaturas. Cuando estas reacciones químicas van acompañadas de un cambio de color, el compuesto puede emplearse para indicar que se ha alcanzado cierta temperatura. Mientras que algunos compuestos sensibles a la temperatura muestran un sólo cambio de color a una temperatura dada, otros muestran una serie de cambios de color al aumentar la temperatura. Si la reacción es reversible, el compuesto volverá a su color original cuando disminuye la temperatura.

La propiedad física de fusion es otro mecanismo que se usa en los indicadores sensibles a la temperatura. Los materiales con pun-

tos de fusión conocidos se emplean como indicadores de temperatura. Aunque el indicador cobrará solidez nuevamente al enfriarse debajo de su punto de fusión, su forma deformada será suficiente evidencia de que alcanzó el punto de fusión.

4.6.3 Opciones de equipo

4.6.3.1 Crayones y lacas

Descripción

Los crayones indicadores son materiales en forma de lápiz que se derriten. Los crayones se ofrecen para más de 150 puntos de fusión en el intervalo de temperatura entre 40 °C y 1 370 °C. El objeto cuya temperatura se va a medir es marcado con el crayón y luego es calentado. Antes de alcanzar la temperatura de fusión la marca es seca y clara; deja una mancha líquida cuando se alcanza la temperatura de fusión.

Las lacas consisten en el mismo material de fusión en forma de suspensión. A la temperatura ambiente la laca se seca al ser aplicada, pero se licúa rápidamente al alcanzar la temperatura de fusión. Una sola aplicación de un crayón o laca cuesta aproximadamente $ 0.25.

Aplicaciones recomendadas

Los crayones pueden emplearse en piezas que van a ser forjadas, tratadas al calor, o moldeadas. Las lacas se usan en superficies en las que los crayones no dejan marcas, tales como textiles, vidrios, metales pulidos. Las lacas se usan ampliamente para vigilar temperaturas en la industria electrónica.

Limitaciones

Los crayones y las lacas no se pueden usar para mediciones exactas de temperatura o para vigilancia continua.

Exactitud y confiabilidad

El punto de fusión real de los crayones y las lacas disponibles comercialmente se sitúa generalmente dentro del 1% de la temperatura nominal.

4.6.3.2 Granos

Descripción

Los granos se fabrican de los mismso materiales fundibles que se usan en los crayones y en las lacas y sirven para los mismos intervalos de temperatura. El grano se coloca en el espacio o en la pieza de trabajo cuya temperatura se va a medir. Cuando se observa el primer indicio de fusión, se ha alcanzado el punto de fusión del grano. El precio de cada grano es aproximadamente de $ 0.25.

Aplicaciones recomendadas

A menudo se utilizan los granos para verificar temperaturas de hornos o piezas de trabajo grandes que están sujetas a tratamientos térmicos. Se puede usar una serie de granos con diferentes puntos de fusión para vigilar un horno durante su calentamiento.

Limitaciones

Los granos no pueden usarse para mediciones precisas de temperatura o para vigilancia continua de temperatura.

Exactitud y confiabilidad

El punto de fusión real de los granos disponibles comercialmente se sitúa generalmente dentro del 1% de la temperatura nominal.

4.6.3.3 Etiquetas

Descripción

Las estiquetas sensibles a la temperatura cambian color a medida que cambia la temperatura. Hay a disposición etiquetas reversibles e irreversibles. Las etiquetas se ofrecen en diversas configuraciones y pueden indicar una sola temperatura o una secuencia de temperaturas. Se pueden emplear para intervalos de temperatura entre 40 °C y 315 °C. Las etiquetas son adhesivas y se colocan en la superficie cuya temperatura se va a medir. Los precios varían aproximadamente entre $ 0.10 para una etiqueta irreversible y $ 3.00 para una etiqueta reversible.

Aplicaciones recomendadas

Las etiquetas sensibles a la temperatura se emplean para efectuar una rápida verificación de las temperaturas de operación de equipo y procesos. Las etiquetas irreversibles se usan para salvaguardar

los materiales sensibles a la temperatura que están en almacenamiento o para obtener datos aproximados de temperaturas de operación de componentes y zonas que no son fácilmente accesibles por otros métodos. Las etiquetas reversibles se emplean frecuentemente para vigilar visualmente la operación de trampas de vapor para detectar fugas continuas de vapor.

Limitaciones

Las etiquetas sensibles a la temperatura no pueden usarse para mediciones exactas de temperatura o para usos en que el control de la temperatura es un factor crítico. En las etiquetas que sufren una serie gradual de cambios a medida que la temperatura aumenta, la interpretación del cambio de color es subjetiva y, por lo tanto, no confiable.

Exactitud y confiabilidad

Los fabricantes generalmente aseguran que los cambios de temperatura se determinan dentro de 2 °C ó menos de la temperatura nominal.

REFERENCIAS

(2) Basic Instrumentation: Industrial Measurement, Patrick J. O'Higgins, 1966.

(10) Handbook of Instrumentation and Controls, Howard P. Kallen, 1961.

(11) Heat Transfer, Alan J. Chapman, 1974

(14) Instrumentation, F. W. Kirk and N. R. Rimbo, 1975

(21) Temperature Measurement Handbook, Omega Engineering, 1982

(22) Temperature Measurement in Engineering, Vol. I, H. Dean Baker, E. A. Ryder, and N. H. Baker, 1953

(23) Temperature Measurement in Engineering, Vol. II, H. Dean baker., E. A. Ryder, and N. H. Baker, 1961.

5. OTROS MEDIDORES PARA MEDICIONES INDUSTRIALES DE ENERGIA

5.1 ANALIZADORES DE GASES DE CHIMENEA

Una parte importante de cualquier programa de conservación de energía es la maximización de la eficiencia de sistemas de combustión tales como calderas, hornos, secadores, y otros equipos que utilizan combustibles fósiles. En esta sección se presenta una revisión del equipo disponible para verificar la eficiencia de combustión mediante el análisis de los gases de chimenea. Esta información se refiere específica y solamente a los instrumentos; las técnicas y los ajustes requeridos para la eficiencia de combustión se discuten en otro trabajo, "Mejoramiento de la Eficiencia de Operación de Calderas de Vapor".

5.1.1 Operación básica e instalación

Todos los analizadores de gases de chimenea, independientemente del tipo o de los principios de operación, deben tener un tubo para toma de muestras o sensor colocado en la corriente de los gases de chimenea. El sensor o tubo deberá ser insertado en el centro de la sección de la chimenea de modo que pueda obtenerse una muestra representativa. Evítese el muestreo en curvas o reducidores donde puedan haber recirculación o estancamiento de gases.

Ya que las infiltraciones de aire exterior afectan el análisis de los gases, el sensor o tomamuestra deberá insertarse dentro de la corriente tan cerca de la salida de la caldera como sea posible. No se obtienen análisis confiables de sistemas de combustión con entradas secundarias de aire, ya que el aire secundario es llevado a la cámara de combustión y diluye los gases que se producen.

El dióxido de azufre y otros compuestos de azufre que contienen los gases de chimenea, pueden dañar los analizadores; consúltese la literatura del fabricante acerca de la contaminación por azufre, antes de usar cualquier analizador en una corriente que se sepa contiene estos compuestos.

En los analizadores de absorción química, el fluido se desgasta con el uso. Síganse las instrucciones del fabricante para determinar la condición del fluido y su reemplazo. Tanto los analizadores catalíticos como de celda combustible, tienen sensores que se gastan con el uso. Si ocurren lecturas poco usuales o inesperadas, deben consultarse las instrucciones del fabricante para evaluar las condiciones del sensor.

5.1.2 Principios de operación

Analizadores de absorción química

Estos equipos están disponibles para medición del contenido de oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2) en los gases de chimenea. Estos analizadores emplean una columna de solución líquida que absorbe la muestra de gas (O_2, ó, CO_2) de una corriente que ha sido bombeada al analizador. Debido a que el líquido absorbe una porción de la muestra de gas, la presión dentro del analizador con respecto a la atmosférica, se reduce. Un diafragma de hule en el fondo de la columna de la solución permite que la diferencia de presión entre la muestra de gas y la atmósfera se iguale, y la columna de líquido se eleve para indicar el contenido de oxígeno o dióxido de carbono.

Analizadores de presión parcial

El sensor en este tipo de analizadores, detecta la diferencia en el contenido de oxígeno entre la atmósfera y la muestra de gas: un disco

poroso de cerámica u óxido de circonio con una delgada cubierta de platino, forman el elemento sensor. La muestra de gas de chimenea se introduce en un lado del disco, mientras que el otro lado está expuesto a la atmósfera. La diferencia en la concentración de oxígeno (presión parcial) genera un pequeño voltaje a través del disco; este voltaje es proporcional a la tasa de contenidos de oxígeno entre la muestra y la atmósfera. Un circuito electrónico especial conectado a la cubierta de platino detecta el voltaje y lo convierte en porcentaje de oxígeno.

Analizadores de celda de combustible

Estos equipos detectan el oxígeno por la reacción de la muestra de gas con un combustible dentro del sensor. La reacción entre el oxígeno en la muestra y el combustible en la celda genera una corriente eléctrica que es proporcional al porcentaje de oxígeno. Esta corriente es medida por el circuito electrónico del instrumento y convertida a porcentaje de O_2 en la pantalla.

Analizadores catalíticos

El principio catalítico para medición de combustibles únicamente es aplicable con muestras de gas que contienen algo de oxígeno. El sensor consiste en una base de cerámica recubierta de un catalizador de platino, que provoca la combustión del monóxido de carbono y los hidrocarburos a baja temperatura sobre la superficie del sensor. El incremento de temperatura debido a la combustión es acompañado por un cambio en la resistencia eléctrica del sensor, el cual se compara al de un elemento pasivo no expuesto a los gases de chimenea. Esta diferencia de resistencia es leída y calibrada para combustibles en los gases de chimenea.

Analizadores infrarrojos

Este tipo de equipo compara dos rayos de luz infrarrojos: uno pasa a través de los gases de chimenea, mientras que el otro no lo hace. Una fuente de luz infrarroja produce los dos rayos, que luego son detectados por un sensor; éste compara el rayo de control con el que ha pasado a través de los gases, y la diferencia en intensidad es convertida a porcentaje de monóxido de carbono CO.

5.1.3 Opciones de equipo

El equipo que se discute en seguida representa solamente una revisión de los equipos disponibles para el análisis de combustión industrial. La industria de analizadores de combustión es muy progresista y competitiva por lo cual será posible encontrar muchas variaciones del equipo a discutir.

5.1.3.1 Analizadores portátiles

Descripción

Estos equipos están disponibles virtualmente en cualquier forma excepto infrarrojos. Equipos de prueba consistentes en analizadores de absorción química para CO_2 y O_2 están ampliamente disponibles, costando alrededor de US $ 500. Analizadores de presión parcial y de celda combustible para O_2 se encuentran por, aproximadamente, US $ 1 000. Medidores catalíticos portátiles para CO también están disponibles y cuestan entre los US $ 1 500 a US $ 3 000.

Aplicaciones recomendadas

los analizadores portátiles se usan para mediciones localizadas en sistemas de combustión. Estos equipos, usualmente muestrean una porción de los gases de chimenea y exponen en la pantalla el porcentaje de gases (CO, O_2, CO_2) o porcentaje de eficiencia. Los portátiles de presión parcial pueden ser adaptados en circuito cerrado con el sistema de control de la caldera.

Limitaciones

La mayoría de los portátiles se usan para mediciones indicativas únicamente. Los analizadores químicos no tienen salida para conexión a los sistemas de control y los sensores perecederos en las celdas de combustión y analizadores catalíticos, hacen muy cara su instalación para control.

La mayoría de los analizadores (incluyendo los tipos de absorción química) son sensibles al azufre y sus compuestos en la corriente de los gases. Debe consultarse la literatura del fabricante para precauciones y remedios cuando estos compuestos estén presentes en los gases de chimenea.

Exactitud y confiabilidad

La exactitud de los analizadores portátiles depende, en un alto grado, de las técnicas de muestreo. La mayoría de los analizadores, incluyendo los de absorción química, son exactos a $\pm$ 0.5 % del constituyente muestreado. Muchos medidores electrónicos son más exactos, siendo los analizadores catalíticos de CO exactos en el orden del 0.01 %. En general, los analizadores de absorción química son bastante confiables, tanto como la mayoría de los tipos electrónicos. La confiabilidad se reduce a medida que aumentan los requerimientos de exactitud.

5.1.3.2 Analizadores permanentes

Descripción

Los analizadores de combustión montados permanentemente están disponibles en los estilos infrarrojo y de presión parcial. Estos últimos consisten en un sensor remoto en la chimenea y una unidad de análisis. El sistema infrarrojo consiste en una fuente dual de rayos, un detector de chimenea, un detector de referencia, y la unidad electrónica de conversión. Ambos tipos son caros y se usan para el control de calderas grandes; el precio mínimo de un analizador de O_2 es de US $ 5 000; cuando tienen incorporados controles electrónicos, el costo puede alcanzar los US $ 20 000. El costo promedio para un analizador infrarrojo de CO, sin incluir la instalación es de US $ 15 000.

Aplicaciones recomendadas

Los analizadores de presión parcial para O_2 son usados para el control de calderas en la "primera modulación"; el sensor de oxígeno detecta el exceso de éste en la chimenea; el analizador controla el aire de combustión para minimizar el O_2. Los analizadores infrarrojos para CO se instalan generalmente en conjunto con analizadores de presión parcial para O_2 para proveer una "segunda modulación" de control de la caldera. Los analizadores infrarrojos son extremadamente caros y encuentran utilización solamente en grandes calderas (23 000 kg/hr de vapor, o mayores).

Limitaciones

Los analizadores infrarrojos están limitados a instalaciones permanentes debido al diseño del rayo dual. Los sensores de presión parcial pueden dañarse debido a las concentraciones excesivas de azufre en los gases de chimenea.

Exactitud y confiabilidad

Debido a que son utilizados para control de la caldera, los analizadores infrarrojos y de presión parcial están diseñados para ser exactos y confiables. Los analizadores infrarrojos típicos pueden detectar concentraciones de CO tan bajas como 10 partes por millón (ppm). Mientras que los sensores de presión parcial fallan ocasionalmente, la confiabilidad en general de ambos tipos de analizadores es extremadamente alta.

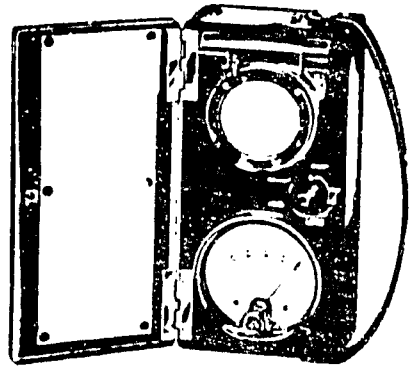
5.2 MEDIDORES DE LUZ

Mientras que la mayoría de las decisiones relativas a la iluminación de la planta se efectúan durante el diseño de la instalación, un cambio en la distribución o en los edificios suele requerir un cambio en los niveles de iluminación. La Sociedad de Ingeniería en Iluminación (IES) de Norteamérica, publica un manual sobre iluminación que incluye una lista de los niveles de iluminación recomendados para casi todas las operaciones industriales. Los niveles de iluminación por debajo de los recomendados son indeseables debido a que incrementan la fatiga de la vista de los empleados y reducen la productividad; por encima de los niveles recomendados, se consume energía para generar luz adicional innecesaria.

Los niveles de iluminación se expresan normalmente en piecandela (candela por pie cuadrado) o en luz (lumen por metro cuadrado), y se miden con un medidor de luz. Estos medidores, que son encontrados corrientemente para uso industrial, se discuten en seguida. Mientras que hay disponibles equipo de medición de luz más complejos y exactos, estos son más bien "patrones" de laboratorio y normalmente no se usan para mediciones en la planta.

5.2.1 Operación básica e instalación

Los medidores de luz para uso industrial son pequeños, íntegros, y generalmente con energía propia. El medidor debe ponerse o colocarse en la vecindad del sitio donde se desea medir el nivel de luz, con el sensor orientado hacia arriba. Luego se efectúa la lectura en la escala apropiada; generalmente un promedio de varias lecturas efectuadas en el área de interés, da una indicación más exacta del nivel de iluminación.



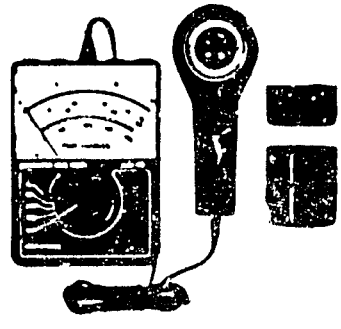


FIGURA 5-1 MEDIDORES INDUSTRIALES DE LUZ

5.2.2 Principios de operación

El elemento primario de un medidor de luz es una fotocelda. Esta genera una corriente que es proporcional al nivel de luz incidente. Esta corriente mueve una pequeña bobina de un imán permanente en un medidor (d'Arsonval) cuya escala está calibrada en pie-candela. Medidores de luz portátiles más exactos utilizan un amplificador operado a baterías para multiplicar la corriente de la fotocelda. La corriente amplificada mueve entonces el medidor o una pantalla electrónica.

5.2.3 Opciones de equipo

5.2.3.1 Medidores industriales de luz

Descripción

La mayoría de los medidores industriales de luz consisten de un sensor de fotocelda, un medidor indicativo o pantalla digital, y si es necesario, los circuitos electrónicos de amplificación asociados. La mayoría de los medidores también tiene un interruptor para varios niveles de iluminación. El elemento sensor puede ser parte del medidor mismo o bien estar en un estuche separado que está conectado al medidor por un alambrado. La Figura 5.1 anterior, muestra varios medidores de luz típicos. Un medidor manual simple cuesta cerca de los US $ 20, pero modelos complicados pueden costar tanto como los US $ 1 000.

Aplicaciones recomendadas

Los medidores de luz portátiles se usan para determinar los niveles de iluminación en áreas de producción, pasillos, bodegas, y oficinas. Los valores medidos se comparan con las recomendaciones del IES y se ajustan convenientemente.

Limitaciones

Los medidores de luz se usan solamente para medir la intensidad de ésta; no dan ninguna indicación acerca del color, pureza, temperatura de la fuente, o cualquier otra característica que pueda influir en el efecto global de la iluminación. Perciben solamente la luz en el espectro visible y no pueden ser usados para medición de la energía radiante fuera de esta gama.

Exactitud y confiabilidad

Los medidores de luz se construyen con muy pocas partes en movimiento y son muy confiables con un cuidado y uso adecuados. La exactitud del instrumento, generalmente está muy relacionada con su costo. La exactitud global depende tanto de la naturaleza del instrumento como de su uso adecuado.

REFERENCIAS

(2) "CO Measurement for Boilers", IEES Conserver, Mike Brown, March, 1984.

(12) Illuminating Engineering Society Lighting Handbook: Reference Volumen, 1981.

(13) Improving Steam Boiler Operating Efficiency, Georgia Tech/IEES, 1981.

(24) "Testing Equipment Options for Maintaining Boiler Efficiency", IEES Conserver, Lamar Griffing, September 1983.

GLOSARIO

ANSI. Instituto Americano de Normas Nacionales (American National Standards Institute).

Absorción química. La penetración de una sustancia en el cuerpo de otra por la formación de uniones químicas débiles.

Alumel. Es una aleación de aluminio y níquel usada en el alambre negativo de una termocupla tipo K. Alumel es una marca registrada de Hoskins Manufacturing Company.

Amortiguamiento (damping). La disminución de la amplitud de una oscilación o movimiento ondulatorio, con el tiempo.

Amperímetro de derivación. Un instrumento para la medición de corriente que determina el flujo por la caída de voltaje a través de un resistor de precisión.

Amperio. Unidad de medición de corriente eléctrica. Una corriente de un amperio fluye a través de una resistencia de un ohmio bajo un potencial de un voltio.

Analógico. Término utilizado para describir un instrumento con una escala graduada y una aguja indicativa.

Anillo Portador. Un conjunto que sostiene tanto una placa de orificio como sus conexiones de modo que puede ajustarse entre dos bridas (flanges).

Atmósfera oxidante. Un ambiente fluido con un exceso de oxígeno o de iones formadores de ácidos.

Atmósfera reductora. Ambiente con un exceso de hidrógeno o iones formadores de bases.

Arrastre viscoso. Fuerza aerodinámica ejercida por la viscosidad del fluido en una dirección paralela pero opuesta a la dirección de la corriente.

Banda de onda. Sección o división conocida del espectro electromagnético.

Bloque terminal. Un bloque sólido, a menudo permanentemente adherido al extremo de un probador de temperatura, en el cual hay unos tornillos para conectar el termopar o el termómetro de resistencia a los alambres de extensión que conducen al indicador o registro de temperatura.

Bridas de orificio. Bridas especialmente (flanges) para el montaje de planchas de orificios. Los agujeros de la placa son perforados en las bridas mismas.

Cable blindado y retorcido. Un grupo de alambres retorcidos utilizados para conducir señales de salida de un instrumento de medición. Está provisto de un blindaje que forma un escudo protector para bloquear interferencias eléctricas externas.

Cable sin blindaje. Un par de alambres retorcidos que se usan para conducir una señal analógica de un medidor.

Caída de presión. Ver Presión diferencial.

Calibración. El proceso de ajustar un instrumento demodo que su lectura indique el valor real del parámetro que se está midiendo.

Carátula. Un disco o placa adecuadamente marcado que sirve para indicar la posición angular de una aguja o indicador.

Capa laminar. La región cerca de un cuerpo en un campo de flujo viscoso, donde la velocidad está definida por los efectos viscosos y no por la capa circundante que corre libremente.

Catalizador. Una sustancia que puede alterar la velocidad de una reacción química sin tomar parte de ella o experimentar un cambio químico.

Celda de combustible. Sistema en el cual la energía química almacenada es convertida a energía eléctrica. En un analizador de gas es combustión que utiliza este principio: el oxígeno del gas quemado con combustible dentro de la celda, para producir energía eléctrica.

Celda de presión diferencial. Un dispositivo electrónico que genera una señal eléctrica proporcional a la diferencia de presión que detecta.

Celsius. La escala de temperatura basada en el 0° como el punto de congelación del agua y los 100° como el punto de ebullición de la misma. También se denominaba Centígrada.

Cero absoluto. Temperatura en la cual al energía térmica está a su mínimo. Se define como 0 grados Kelvin o Rankine, y se calcula que es de -273.16°C, ó 459.69°F.

Chromel. Una aleación de cromo y níquel utilizada en el alambre positivo de las termocuplas tipo K y E. Chromel es una marca registrada de Hoskins Manufacturing Company.

Coeficiente de Pitot, Cp. La relación del flujo real al teórico, cuando se mide por un tubo pitot.

Coeficiente de la temperatura de la resistencia. Es el cambio en la resistencia de un conductor eléctrico con el cambio unitario en su temperatura.

Conexión para medir presión. Un agujero perforado en una tubería o una brida para permitir la medición de presión diferencial producida por una placa de orifico o un tubo Venturi.

Constantan. Una aleación de níquel y cobre usada en el alambre negativo de los termopares tipo J, E y T.

Corriente alterna (ca). Una corriente eléctrica que invierte su dirección en intervalos regulares de tiempo.

Corriente directa(cd). El flujo de electrones a través de un conductor en una sola dirección.

Cruce cero. El punto en una onda de voltaje o corriente alterna en el que su valor cambia de positivo a negativo o al contrario.

Cuerpo negro. Una referencia teórica que 1) absorbe toda la radiación que cae sobre él sin transmitirla o reflejarla, y 2) irradia más energía en un tiempo dado que cualquier otro cuerpo de forma similar, a la misma temperatura.

Deflexión de escala completa (dec). La lectura máxima en un aparato de medición o registrador. El porcentaje de exactitud se refiere generalmente a ésta.

Demanda de kilovatios. Promedio del consumo máximo de energía sobre un período de 15 a 30 minutos. También conocido como demanda pico. Unidad comúnmente incluida en la facturación eléctrica industrial.

Densidad. Característica física de un material tal como un fluido, que indica la masa por unidad de volumen, kg/m^3 (lb/pie^3).

Deriva. Un cambio gradual del valor medido con respecto al valor calibrado.

Diferencia de ángulo de fase. En electricidad, la diferencia entre las relaciones de fase entre la corriente y el voltaje que se expresa como el ángulo entre los vectores de los mismos.

Digital. Representación de información cuantitativa directamente por números dígitos, más bien que por una aguja indicadora y una escala (ver Analógico).

Dispositivo de estado sólido. En electricidad, un dispositivo que contiene elementos semiconductores como diodos y transistores.

Disco mecedor. Medidor de desplazamiento positivo que usa un disco plano que se mece, sellando las cantidades sucesivas de fluido en movimiento, para medirlas.

emf. Fuerza electromotriz o tensión eléctrica. Energía potencial eléctrica medida en voltios.

Efecto termoeléctrico. Relación entre las propiedades eléctricas y los cambios en temperatura.

Elemento móvil d'Arsonval. El más común de todos los indicadores sensibles al paso de la corriente. También conocido como el medidor de imán permanente y bobina móvil. Es utilizado en una gran variedad de instrumentos eléctricos y otros.

Elemento móvil de aleta de hierro. El segundo más común de los indicadores sensibles a la corriente. En donde dos aletas de hierro, una fija y una móvil, se magnetizan y repelen cuando la corriente pasa a través de las bobinas que las rodean. Usado en medidores eléctricos simples.

Electrodinamómetro. El elemento móvil del medidor de bobina fija y bobina móvil. Comúnmente utilizado para los instrumentos de medición de demanda kW, kW/AR y PF.

Emisividad (E). La relación de energía emitida por un objeto a la energía emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura.

Energía radiante. Ver Radiación.

Erosividad. Propiead de un fluido que causa desgaste, de particular interés en medición de flujos debido a que el desgaste conduce a error en las mediciones.

Error. La diferencia entre el valor correcto o real y la lectura o valor registrado.

Error de remolino. Error inducido en los medidores axiales de turbina, debido a que el fluido presenta un componente de velocidad en forma de remolino. Provoca que se registren flujos más altos que los reales.

Escala absoluta de temperatura. Escala de temperatura basada en 0° en el cero absoluto.

Escala internacional de temperatura. Una escala de temperatura reconocida internacionalmente y que está basada: 1) en un número de temperatura en equilibrio y que son reproducibles y fijas a las cuales se les asigna valores numéricos de temperatura y 2) en fórmulas específicas para la relación entre la temperatura y las indicaciones de instrumentos calibrados a estos puntos fijos.

Estabilidad. La cualidad de un instrumento o sensor que mantiene salida constante cuando se le aplica una entrada constante.

Exactitud. La aproximación con la cual la lectura de un instrumento se acerca al verdadero valor de la variable en medición.

Expansividad de un fluido. Un factor de corrección sin unidad de medida para mediciones con placas de orificios y tubos Venturi cuando un fluido compresible se expande debido a la caída de presión a través del dispositivo.

Factor de corrección gravitacional. Empleado para corregir el valor de la masa de un cuerpo cuando se obtiene a partir de pesos tomados en distintos campos gravitacionales. En el sistema internacional este es igual a 9.8 $kg.m/N.s^2$, y en el sistema inglés de 32.17 $pie.lb_m/lbf.s^2$.

Factor de potencia. La relacion de la potencia real a la potencia aparente.

Farenheit. Escala de temperatura basada en 32° como el punto de congelación del agua y 212° como su punto de ebullición.

Flujo desarrollado. El flujo de un fluido al número de Reynolds mayor o igual que 30 000, y sin remolinos o pulsaciones producidas por los accesorios y pulsaciones de la bomba.

Flujo estrangulado. Cuando la velocidad del fluido iguala la del sonido. Al elevarse la presión de la corriente hacia arriba de un fluido no aumentará la velocidad de éste.

Fluido compresible. Un fluido tal como un gas o vapor que experimenta un cambio relativamente grande en su densidad con los cambios de presión.

Flujo laminar. Flujo en el que las partículas de un fluido se mueven en líneas paralelas y en una sola dirección. Caracterizado por una velocidad relativamente baja.

Flujo turbulento. El que se presenta en un fluido que se mueve en una dirección como una masa de remolinos de tamaño variable. Estos flujos tienen un número de Reynolds superior a 2 100.

Flujo viscoso. Flujo en el cual las capas contiguas de fluidos se deslizan una sobre otra en líneas paralelas, sin mezclarse ni formar remolinos; caracterizado por bajos números de Reynolds. También conocido como flujo laminar.

Formavórtice. Medidores de flujo que operan bajo el principio de que los cuerpos romos colocados en una corriente de flujo, generan alternativamente remolinos a los lados de sí mismos. Existe una relación directa entre el flujo y la frecuencia en la formación de los vórtices.

Forro protector. Un tubo de metal o cerámica, cerrado en uno de sus extremos, dentro del cual se inserta un sensor de temperatura. El tubo proteje al sensor del medio en el cual se mide.

Fotocelda. Un depósito cuyas propiedades eléctricas experimentan cambios medibles cuando es expuesto a la luz.

Fuerza termoeléctrica. Cambio en el voltaje en una termopar al cambio de un grado en la temperatura. Generalmente expresado en mV/°F ó mV/°C.

Gama (Escala). Es el intervalo de medida dentro del cual funciona un instrumento.

Impulsor de lóbulos. Medidor de desplazamiento positivo consistente en 2 rotores de lóbulos que giran en direcciones opuestas dentro de un espacio muy ajustado. Cada rotación corresponde a un volumen determinado de fluido.

Indicador. Un aparato que da una lectura cuantitativa o relativa, tal como una carátula.

Indicador de temperatura de resistencia. Un sensor metálico cuidadosamente fabricado cuya resistencia varía en proporción a la temperatura. También conocido como RTD.

Indicador sensible a la temperatura. Una sustancia que experimenta un cambio marcado (por ejemplo en color o fase) y una temperatura específica y, por consiguiente, es usado para indicar temperatura.

Indice base de volumen. Una norma a la que se refiere el volumen de un gas. El índice base de volumen que se usa para corregir, tanto para temperatura como para presión.

Inductivo. Que tiene propiedades eléctricas de un inductor (elemento magnético) tal como una bobina, un motor eléctrico, o un transformador.

Infrarrojo. La banda de ondas en el espectro electromagnético que se extiende más allá del espectro visible de 760 a un millón de nanómetros (nanómetro = 10^{-9}m).

Inmersión. En mediciones de temperatura, la inserción del elemento sensible dentro del fluido o sustancia que se está midiendo.

Instrumento indicador. El que mide un valor instantáneo del parámetro de interés.

Instrumento integrador. Aquél cuya lectura representa un valor promediado con el tiempo de la cantidad en medición.

Integrador continuo. Un aparato que mide el flujo total sumando continuamente al contador los cambios de la relación del flujo al total previo.

Interruptor de protección (circuit breaker). Un dispositivo protector diseñado para interrumpir un circuito eléctrico cuando la corriente excede un valor predeterminado.

Juntura caliente. Ver Juntura de medición.

Juntura fría. Ver Juntura de referencia.

Juntura de medición. La juntura de un termopar que se usa para medir una temperatura desconocida. También se conoce como juntura caliente.

Juntura de referencia. La juntura fría en un circuito de termopar en la cual se mantiene una temperatura conocida y constante. La temperatura estándar de referencia es 0°C (32°F), aunque también pueden usarse otras temperaturas.

Kilovatio hora. La unidad básica de consumo de energía eléctrica, es igual a 1 joule por segundo (1 J/s).

Linearidad. La forma en la cual una curva se asemeja a una línea recta. Generalmente se expresa como la desviación máxima entre una curva promedio y una línea recta.

Longitud de inmersión. La porción de un termómetro sumergida en el fluido.

Longitud de vástago. En un termómetro bimetálico, la longitud del protector que cubre el elemento sensitivo bimetálico y determina la profundidad a la que puede insertarse el termómetro.

Manómetro. Dispositivo que mide presiones diferenciales por la diferencia en niveles entre columnas de un líquido.

Medidor de aletas de chorros múltiples. Dispositivo inferencial en el cual el fluido entra a un rotor de aletas a través de entradas tangenciales.

Medidor de aletas de chorro simple. Medidor inferencial en el cual el fluido entra al rotor a través de una sola entrada tangencial.

Medidor de aletas rotatorias. Un medidor de desplazamiento positivo en el cual la cavidad de medición se forma por una aleta deslizante, el rotor en el que está montado, y la pared estacionaria del medidor.

Medidor cuantitativo. Otro término que se refiere a los medidores de desplazamiento positivo.

Medidores de desplazamiento positivo. Equipos que miden directamente el flujo de fluidos mediante el llenado y vaciado alternativo de cavidades de volumen fijo.

Medidores de diafragma. Aparato de desplazamiento positivo que mide el flujo mediante el vaciado y llenado alternativo en un diafragma flexible.

Medidor electromagnético rotativo. Un dispositivo que mide la velocidad rotativa de un elemento de medición inferencial tipo de turbina, sin contacto físico. El medidor consiste en un imán permanente en el rotor, polarizado en ángulo recto al eje de rotación. La rotación del imán establece una corriente alterna en una bobina situada en el exterior del cuerpo del medidor. La frecuencia de la corriente es proporcional a la velocidad del rotor.

Medidor de engranajes ovalados. Medidor que utiliza un par de engranajes móviles en la forma de óvalo. Un volumen conocido de flujo pasa entre el rotor y la pared de la cámara de trabajo en cada rotación.

Medidor de hélice. Un medidor de desplazamiento positivo en el cual el elemento móvil consiste de 2 rotores en forma de flauta de diferentes diámetros. La rotación de estos elementos pueden relacionarse a la cantidad de flujo de fluido.

Motor de inducción. Un motor de corriente alterna que induce un flujo de corriente a los embobinados del rotor debido a la inducción del campo magnético del estator.

Medidor inferencial. Medidor de flujo que no cuantifica directamente el flujo, sino que lo infiere de alguna otra variable en medición (ej: rpm) que lo convierte a la unidad de medida del flujo (ej: litros/min).

Medidor de precisión. Un medidor analógico con una excepcional alta exactitud y resolución.

Medidores de pistón. Instrumento de desplazamiento positivo que emplea un móvil dentro de un cilindro como cavidad de medición.

Medidor de pistón oscilante. Medidor de desplazamiento positivo que utiliza un pistón, el cual hace girar un eje para medir el flujo.

Medidor de presión diferencial. Un indicador mecánico que mide la presión diferencial de una placa de orificio, un tubo Venturi, o un tubo Pitot.

Medidores de tablero (panel). Instrumentos diseñados para montarse en superficies o en tableros de control. La exactitud típica de estos es del 3-5 por ciento de la escala completa.

Medidor de paletas. Un aparato de desplazamiento positivo que consiste en un rotor en una cámara cilíndrica; el rotor está provisto de aletas móviles que forman una cámara "sellada" entre el rotor y la pared de la cámara. Con cada rotación pasa un volumen determinado de fluido.

Medidor de turbina. Aparato inferencial consistente en una turbina axial que infiere el flujo a partir de la velocidad rotacional de la turbina.

Medidor de turbina de calibre completo. En este aparato el rotor es casi igual en diámetro al tubo en el que se está efectuando la medición de flujo.

Medidor de turbina de inserción. Un medidor de turbina que tiene un diámetro de rotor mucho más pequeño que el del tubo en el que se está midiendo el flujo. El flujo es determinado mediante la inserción del medidor en el punto donde ocurre la velocidad promedio.

Microprocesador. Una computadora pequeña con capacidad limitada, típicamente dedicada a la medición de un parámetro de proceso, convirtiendo la señal electrónica a la representación deseada de medición (kg por hora, grados C, amperios, etc.).

Miliamperios. La milésima de un amperio.

Número de Reynolds Re_D. Una expresión sin dimensión para comparar condiciones de flujo, y que se utiliza en el análisis de los fluidos. Se define como la relación de la densidad por la velocidad por el diámetro del tubo dividido por la viscosidad absoluta del fluido.

Pantalla digital. Un tipo de lectura que representa información numérica directamente con dígitos.

Pérdida permanente de presión. Esta ocurre debido a la fricción a través de un oriricio o un Venturi. Y no se recupera en la corriente descendente.

Peso específico. La relación de la densidad de una sustancia dada a la densidad de una sustancia estándar, por ejemplo, el agua.

Pie-candela. Unidad estándar de iluminación en el sistema Inglés; un pie-candela es igual a una unidad de flujo de luz distribuida sobre un pie cuadrado de superfice. La unidad estándar de iluminación en el sistema internacional de medidas (SI), expresada en lumen/metro cuadrado.

Pirómetro óptico. Instrumento para la medición de temperaturas que consiste de un patrón de comparación óptico y un medio para comparar la radiación de la fuente de interés con respecto al patrón, utilizando el ojo humano.

Pirómetro de radiación. Un instrumento en el cual se mide la temperatura de un objeto o fuente por medio de su energía radiante.

Placa de orificio. Un dispositivo primario para la medición de flujos dentro de tubos. La placa obliga a que el flujo se restrinja a través del orificio, situado en el centro, causando una caída de presión proporcional al flujo.

Portátil. La cualidad de instrumento que no está permanentemente instalado y que puede transportarse o moverse con relativa facilidad.

Posición crítica. Aquel punto en la sección transversal de un tubo donde la velocidad local iguala a la velocidad promedio. Se utiliza para ubicar los medidores de turbina de tipo de inserción.

Potencia aparente. Volt-amperios totales en circuitos de corriente alterna. $P_A = V \times A$ para CA monofásica, y $P_A = V \times \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}$ para sistema de trifásicos.

Potencia eléctrica. La unidad básica de trabajo, medido en vatios, o kilovatios. Cuando la conversión es perfecta, un caballo de fuerza = 746 vatios. En circuitos de corriente directa, P = voltios x amperios; para circuitos de corriente alterna, P = voltios x amperios x factor de potencia; monostáticos, $P = V \times \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2} \times FP$, para circuitos de 3 fases, A_1, A_2 y A_3 son las corrientes de fases individuales y FP es el factor de potencia.

Potencia reactiva. La tasa de la energía devuelta al sistema a la energía recibida o almacenada por el sistema, siendo este normalmente un capacitor o un inductor.

Potencial real. Corriente alterna en kilovatios. Puede distinguirse de la potencia aparente como la porción de la potencia en corriente alterna que realmente efectúa trabajo útil. Potencial real = potencia aparente x factor de potencia.

Precisión. La reproducibilidad de una medida; qué tanto difieren lecturas sucesivas, una de la otra.

Presión base. Una norma a la que se refieren las mediciones de volumen de un gas. El valor estándar en los Estados Unidos es de 1.013×10^5 Pascales (14.696 psia) para gas natural.

Presión diferencial (dp). Para placas de orificio y tubos venturi, es la diferencia entre las presiones de las corrientes anterior y posterior. Para tubos Pitot es la diferencia entre las presiones dinámica y estática, medidas en términos de una columna de agua (centímetros de agua; pulgadas de agua).

Presión dinámica. La diferencia entre la presión de impacto y la presión estática. Presión debida a la velocidad de un fluido en movimiento.

Presión estática. La fuerza, por unidad de superficie, medida sobre la pared de un tubo que conduce un fluido.

Presión de impacto. La presión se genera cuando un fluido en movimiento deja de moverse repentinamente. Está relacionado únicamente a la velocidad del fluido en movimiento.

Presión parcial. La presión de un componente individual en una mezcla gaseosa; $pi = xi\ p$, donde pi = presión parcial del componente i; xi = fracción molar del componente i, p = presión total.

Presión de vapor. Fuerza por unidad de superficie, ejercida por el vapor en coexistencia con la fase líquida correspondiente.

Puntas de prueba. Son puntas aisladas para conectar los medidores portátiles al ejecutar mediciones.

RTD. Detector de temperatura por resistencia (ver termómetro de resistencia).

Radiación. La emisión y propagación de energía desde la superficie de un cuerpo a través de un medio tal como el aire, en la forma de ondas electromagnéticas. La cantidad de energía radiante es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo.

Rankine. Escala de temperatura absoluta en la cual el punto de congelación y de ebullición del agua están separados por 180°. 0°R es igual a -459.67°F. Corresponde a la escala Kelvin en SI.

Rectificador. Un circuito de uno, dos o cuatro al menos diodos usado para convertir corriente alterna en corriente directa.

Referencia. Un estándar o norma contra el cual se compara una cantidad que está siendo medida.

Registrador gráfico. El que provee un registro permanente y contínuo de los valores instantáneos del parámetro que está siendo medido.

Relación Beta. La relación del diámetro del orificio al diámetro de un tubo. La relación de la garganta del Venturi al diámetro de un tubo.

Relación de capacidad de medición. Para un medidor de flujo, el flujo mínimo que puede medirse dividido entre el flujo máximo que puede medirse. La relación de "capacidad" es indicativa de la amplitud que puede atender el medidor.

Reóstato. Un dispositivo utilizado para variar la resistencia al flujo de corriente eléctrica a través de un circuito. Con frecuencia utilizado para disminuir o aumentar la intensidad de iluminación eléctrica u otros.

Reproducibilidad. La aproximación entre un número de mediciones consecutivas que dan determinadas lecturas para el mismo parámetro siendo medido bajo las mismas condiciones de operación.

Resistencia. La oposición intrínseca de un material al flujo de la corriente eléctrica; se mide en ohmios. La resistencia es una función de la temperatura.

Resistor. Un dispositivo que cuando conduce electricidad convierte parte de la energía eléctrica en calor.

Resistor derivador (shunt). Un resistor de precisión con una muy baja resistencia. Utilizado para medir corriente directa. La caída de voltaje a través de éste es proporcional a la corriente que pasa por el mismo ($E = IxR$).

Resolución. El más pequeño cambio en el valor en medición al cual un instrumento responde.

Rugosidad de tubería. Un índice numérico sin dimensión, del grado de rugosidad de la superficie interna de una tubería; éste se basa en la distancia entre los picos y los valles de la superficie misma.

Segundos Saybolt Universal (ssu). Medición de la viscosidad, en segundos, determinada por una prueba estándar bajo condiciones específicas.

Semiconductor. Un sólido, tal como el silicio, cuya conductividad eléctrica se aproxima a la de un conductor metálico a altas temperaturas, y a la de un aislante a bajas temperaturas.

Sensibilidad. El cambio que un instrumento registra con respecto al cambio unitario en la variable bajo medición.

Sensor. Un dispositivo que responde a un estímulo físico, tal como el calor, la luz, o la presión, y que transmite un impulso resultante para que sea registrado y procesado en forma conveniente.

Sensor de efecto Hall. Un dispositivo semiconductor sensible a la corriente. Son transistores que son conmutados por el campo magnético que rodea a un conductor que conduce corriente.

Sistema Internacional de Unidades (SI). El sistema SI es un sistema de unidades coherente que ha sido desarrollado en base al sistema métrico decimal, y que se está utilizando a nivel mundial. Consta de siete unidades fundamentales: metro, kilogramo, segundo, amperio, grado kelvin, candela, y mol.

Sobrevelocidad. Un problema que presentan los medidores de turbina, y que ocurre cuando la capacidad nominal de flujo de éstos se excede. La sobrevelocidad puede resultar en daño a los engranajes de la turbina y el rotor.

Super enfriado. Líquido cuya temperatura se ha bajado por debajo del punto de congelación, pero que aún no ha alcanzado la solidificación o la cristalización.

Sub estación. Un punto de distribución de potencia eléctrica, que generalmente incluye transformadores para reducir el alto voltaje a los niveles normales de servicio.

Substrato. El material que provee una superficie para adherir o depositar otro material.

Tablero de control. Un panel ubicado en un lugar principal que contiene interruptores, relevadores, indicadores, y otro equipo similar.

Termistor. Un elemento sensible a la temperatura compuesto de un material semiconductor cuya resistencia varía con la temperatura, generalmente en relación inversa.

Termómetro. Un instrumento utilizado para la medición de temperatura.

Termómetro bimetálico. Un aparato para la medición de la temperatura, consistente en dos aleaciones metálicas unidas mecánicamente, de modo que, debido a la expansión diferencial, esta unión de aleaciones se dobla en una dirección particular, cuando es calentada.

Termómetro de líquido. Un dispositivo para la medición de temperatura en el cual un líquido, como el elemento sensible, se expande y contrae en un tubo capilar de vidrio, respondiendo a los cambios de temperatura.

Termómetro de resistencia. Una categoría general de instrumento eléctrico que mide la resistencia eléctrica utilizando como punto de prueba un material especial que cambia su resistencia con temperatura. (ej: RTD Termistor).

Termómetro del sistema hermético. Un grupo de dispositivos para la medición de la temperatura con sensores remotos, basado en los cambios de volumen o presión de un fluido con cambios en la temperatura. Incluye tipos de líquido, de presión de vapor (o de vapor) y de gas, llenos y herméticamente sellados.

Termopar. Un dispositivo para medir temperatura que consiste en dos alambres disímiles unidos por el extremo. Un milivoltaje se produce en proporción a la diferencia de temperatura en la juntura.

Termopila. Un grupo de termopares conectadas en serie para producir una fuerza electromotriz aditiva. A menudo utilizada como detector en pirómetros de radiación.

Temperatura. El grado de calor de un cuerpo, que se manifiesta por su habilidad de transmitirlo o recibirlo.

Temperatura ambiente. La temperatura del medio que rodea el objeto bajo consideración.

Temperatura base. Una norma a la que se refieren las mediciones de volumen de un gas. El valor estándar en los Estados Unidos de América es de 15.5°C (60°F), para gas natural.

Tiempo de respuesta. El tiempo requerido por un sensor para alcanzar el 63.2 de un cambio en la variable bajo medición; también conocido como constante de tiempo. Se requieren 5 constantes de tiempo para que el sensor se estabilice al 100 del valor del cambio que ocurra.

Tierra. Un punto de conexión directamente hecho a la tierra o a otro cuerpo conductor de potencia o con respecto a la misma tierra.

Torque. Una fuerza que produce o tiende a producir rotación.

Totalización. La suma contínua de una variable, tal como potencia o flujo, a través del tiempo.

Totalizador. Un aparato mecánico o eléctrico que contínuamente suma una variable, tal como potencia de un punto en tiempo a otro o al tiempo real.

Transductor. Dispositivo electrónico utilizado para convertir una o más señales de entrada en una señal controlada de salida.

Transferencia bajo custodia. El proceso de transferir bienes de un proveedor a un comprador. Ejemplos típicos incluyen el agua municipal y el petróleo. La medición del flujo para transferencia bajo custodia generalmente requiere una alta exactitud.

Transformador de anillo. Un transformador de corriente autocontenido que se coloca alrededor de un cable grande. El nombre se deriva de la forma física del transformador.

Transformador de corriente. Un dispositivo eléctrico usado para reducir la corriente que se está midiendo cuando se aplica a un amperímetro. Los transformadores de corriente comunes reducen la corriente bajo medición a no más de 5 amperios.

Transformador de potencial. Un dispositivo eléctrico usado para reducir el voltaje aplicado a un voltímetro. Los transformadores de potencial comunes reducen el alto voltaje medido a 120 V o menos, durante la medición.

Trifásico. Distribución típica de fuerza eléctrica comercial, de corriente alterna, que consiste de 3 conductores cuyas ondas de voltaje difieren en 120°.

Tubo Bourdon. Un elemento sensitivo a la presión que consiste en un tubo en espiral que tiene una sección transversal de una elipse aplanada y que está sellada en uno de los extremos. Cuando se aplica presión en el interior del tubo, esta espiral tiende a enderezarse.

Tubo de medición. La sección de un tubo recto prefabricado que contiene una placa orificio, un tubo Venturi, o un tubo Pitot.

Tubo pitot. Un instrumento primario para la medición de flujos en tubos y ductos. Por medio de una conección que conduce al punto de impacto, se mide la presión dinámica y una en la pared del tubo mide la presión estática; la diferencia entre ambas se correlaciona con el flujo.

Tubo venturi. Dispositivo para medir flujos en tuberías. Compuesto de dos secciones cónicas unidas en una garganta, de modo que cuando el flujo converge a ésta causa una caída de presión, que se correlaciona de manera inversa con el flujo.

Vapor. La fase gaseosa de agua. También se refiere a la fase gaseosa de cualquier líquido cuando se encuentran las fases de líquido y gas en equilibrio.

Veletas directrices. Usadas para eliminar el componente de remolino de un flujo en la corriente ascendente de los medidores inferenciales, de modo que el flujo medido por la rotación del eje del medidor sea el correcto.

Velómetro. Un aparato que mide la velocidad de un gas basado generalmente en un tubo pitot.

Viscosidad. Propiedad de un fluido que se relaciona con su resistencia al flujo.

Voltaje. Referido a la unidad de potencial eléctrico, que es el voltio.

Vórtice. Masa de fluido con movimiento circular.

BIBLIOGRAFIA

(1) Basic Instrumentation: Industrial Measurement, Patrick J. O'Higgins, (New York: McGraw-Hill Book Company, 1966), pp. 240-288.
Fundamental theory and application of industrial process instrumentation. Includes measurement of temperature, fluid flow, electricity, viscosity, and pressure.

(2) "CO Measurement for Boilers," Mike Brown, IEES Conserver, Vol.5, No. 3, March 1984.
Concise article that discusses the importance of CO as a control variable in boiler efficiency and describes equipment that is currently available for CO measurement.

(3) Electric Power Metering, A. E. Knowlton (New York: McGraw-Hill, Inc., 1934), pp. 1-20; 77-104; 280-324.
Advanced text on a wide variety of electric metering principles and techniques.

(4) Electrical and Electronic Measuring Instruments, Larry D. Jones, Ed. (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1983), pp. 1-60; 71-117; 175-178.
Training manual for electrical and electronics technicians.

(5) Electronic Instrumentation, Third Edition, Sol D. Prensky and R. L. Castellucis (Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Inc., 1982), pp. 11-44.
College text that covers the fundamental operating principles, specific functions, and practical applications of the principal types of electrical instrumentation.

(6) Flow Measurement and Meters, Second Edition, A. Linford (London: . & F. N. Spon, Ltd., 1961).
Practical text on metering fluid flow through both open and closed conduits.

(7) Fluid Meters: Their Theory and Application, Fifth Edition, ASME Research Committee on Fluid Meters (New York: The American Society of Mechanical Engineers, 1959), pp. 43-85.
Reference book on fluid meters of all kinds that includes the physical principles of design and operation.

(8) Gas Engineer's Handbook, First Edition, George Segeler, Ed. (New York: Industrial Press, Inc., 1977).
Handbook dealing with the distribution and metering of natural gas.

(9) "Guide to Gas Meters," Gile Crabtree, Industrial Gas Conservation and Utilization, February, March, April, 1974.
Three part article on gas metering methods. Parts 1 and 2 deal with in-plant applications of displacement meters and rate-of-flow meters, respectively. Part 3 discusses meter selection.

(10) Handbook of Instrumentation and Controls, Howard P. Kallen (New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961), pp. 4-1 - 4-74, 5-1 - 5-56.
Practical design and applications manual for mechanical services covering steam and power plants, heating, ventilating and air conditioning systems, refrigeration, and water treatment.

(11) Heat Transfer, Third Edition, Alan J. Chapman (New York: Macmillan Publishing Co., Inc., 1974), pp. 552-561.
Rigorous treatment of heat transfer fundamentals. Includes correction of error due to conduction losses and radiation effects.

(12) Illuminating Engineering Society Lighting Handbook: Reference Volume (New York: IES, 1981), pp. 4-1 - 4-39.
General reference guide to the physics, sources, and measurement of light.

(13) Improving Steam Boiler Operating Efficiency (Atlanta: Georgia Tech IES/Industrial Energy Extension Service, 1981).
Handbook that covers the effects of maintenance and testing, boiler controls, heat recovery, and water treatment on boiler operating efficiency.

(14) Instrumentation, Third Edition, F. W. Kirk and N. R. Rimbo (Chicago: American Technical Society, 1975), pp. 17-30, 143-174.
Introductory college text that discusses operating principles and industrial application of instruments for measurement, transmission, and control. Topics include electricity, temperature, pressure, flow, and chemical and physical analysis.

(15) Kent Liquid Measurement Meter Catalog AP-4, Kent Meter Sales, Ocala, Florida, 1983.
Includes description and specifications for flow meters to measure water and oil flow.

(16) "On the Application and Performance of Insertion Turbine Meters for Steam Flow Measurement," C. E. Miller, International District Heating Association Annual Conference, 1978.
Discussion of the fundamentals of insertion flow metering. Also provides guidelines on application and performance of insertion turbine meters.

(17) Principles and Practice of Flow Meter Engineering, Ninth Edition, Leland Spink (Norwood, MA: Plimpton Press, Inc., 1967), pp. 59-61, 114-115.
Practical text on the installation and operation of a variety of flow meters, including orifice plates and turbine meters.

(18) Shell Flow Meter Engineering Handbook, T. S. Preston, Ed. (Delft, The Netherlands: Waltman Publishing Company, 1968), pp. 9-277.
Compilation of basic rules for design calculations for differential flow meters.

(19) "Special-Purpose Flow Meters Offer Better Accuracy, Range, Linearity," John Reason, Power, March 1983, pp. 29-35.
Brief summary of the operation of special-purpose flow meters, including vortex shedding, Doppler-effect, time-of-transit, positive-displacement, and turbine meters.

(20) Steam Metering Guidebook, Engineering Measurements Company.
Short guide describing the characteristics of steam flow, the flow meters available for steam metering, and installation considerations for turbine insertion meters.

(21) Temperature Measurement Handbook, 1983 Edition (Stamford, CN: Omega Engineering, Inc., 1982).
Catalog of temperature measurement products that also includes technical sections on various temperature measurement devices.

(22) Temperature Measurement in Engineering, Vol. I, H. Dean Baker, E. A. Ryder, and N. H. Baker (New York: John Wiley and Sons, Inc., 1953).
Detailed text that primarily deals with thermocouple techniques for measuring temperature.

(23) Temperature Measurement in Engineering, Vol. II, H. Dean Baker, E. A. Ryder and N. H. Baker (New York: John Wiley and Sons, Inc., 1961).
Detailed treatment of methods of measuring low and very high temperatures in liquids, gases, flames, and solid bodies.

(24) "Testing Equipment Options for Maintaining Boiler Efficiency," Lamar Griffin, IEES Conserver, Vol. 5, No. 1, Setpember 1983.
Concise article that discusses the relationship between O_2 and CO_2 levels and boiler efficiency. Describes equipment that is available for O_2 and CO_2 measurement in boiler stack gases.

(25) Vortex Flowmeters - Technical Information, Publication II 27-65b, Foxboro Corporation, 1982.
Technical information on the characteristics and selection of vortex shedders. Includes a comparison with other flowmeter types.