



CURSO PARA ASPIRANTES A OPERADOR DE REFINERÍA DE PETRÓLEO

MÓDULO 11

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS

Parte 1

ING. JORGE NOZICA – jorge.nozica@ingenieria.uncuyo.edu.ar

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS

1 - CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS

Disciplina de la ingeniería que se enfoca en diseñar sistemas y algoritmos para controlar automáticamente las variables de un proceso industrial o sistema en tiempo real. El objetivo principal del control automático de procesos es mantener las variables del proceso dentro de límites deseados o setpoints, logrando así un funcionamiento óptimo, seguro y eficiente del sistema.

En un sistema de control automático de procesos, se utilizan sensores para medir las variables del proceso, como temperatura, presión, caudal, nivel, entre otras. Estos sensores envían la información a un controlador automático, que procesa los datos y toma decisiones en función del error entre el valor medido y el valor deseado (setpoint). El controlador calcula una señal de control y envía esta señal a actuadores, como válvulas, bombas, motores, entre otros, que actúan sobre el proceso para ajustar las variables y mantenerlas cerca del setpoint.

Existen diferentes tipos de control automático de procesos, y algunos de los más comunes son:

Control en lazo cerrado (feedback control): Como se explicó en la respuesta anterior, este tipo de control utiliza una retroalimentación constante para ajustar la variable del proceso y mantenerla cerca del setpoint.

Control en lazo abierto (feedforward control): Este tipo de control anticipa las perturbaciones y actúa sobre el proceso antes de que ocurran. No utiliza retroalimentación para ajustar la variable, sino que toma decisiones en función de las condiciones previas del proceso.

Control PID (Proporcional-Integral-Derivativo): Es uno de los algoritmos de control más utilizados en el control automático de procesos. Combina tres términos (proporcional, integral y derivativo) para calcular la señal de control y corregir el error de manera rápida y precisa.

2 – LAZO DE CONTROL

Un lazo de control de variables de procesos, también conocido como control de bucle cerrado, es un sistema de control utilizado en la automatización industrial para mantener una variable del proceso en un valor deseado o en un punto de referencia. Consiste en un conjunto de componentes interconectados que trabajan juntos para medir, comparar y ajustar la variable del proceso para mantenerla dentro de los límites deseados.

Los elementos principales de un lazo de control son los siguientes:

- **Sensor:** El sensor mide la variable de proceso que se desea controlar, como la temperatura, presión, nivel, caudal, entre otros. Proporciona una señal de retroalimentación al controlador.
- **Controlador:** El controlador es el cerebro del sistema. Recibe la señal de retroalimentación del sensor y la compara con el valor deseado o punto de referencia (setpoint). Con base en esta comparación, el controlador calcula una señal de control para ajustar la variable del proceso.
- **Actuador:** El actuador es responsable de tomar la señal de control del controlador y actuar sobre el proceso para ajustar la variable. Puede ser una válvula, una bomba, un motor, o cualquier dispositivo que tenga la capacidad de modificar la variable controlada.

CURSO PARA ASPIRANTES A OPERADOR DE REFINERÍA DE PETRÓLEO

- Proceso: El proceso es el sistema físico que se está controlando, como una caldera, una máquina, un reactor químico o cualquier otro equipo industrial.

Desarrollo:

El sensor mide la variable de proceso y envía esta información al controlador.

El controlador compara el valor medido con el valor deseado (setpoint) y determina la diferencia entre ambos, conocida como error.

El controlador utiliza algoritmos y lógica de control para calcular la señal de control necesaria para corregir el error y acercar la variable del proceso al setpoint.

La señal de control se envía al actuador, que actúa sobre el proceso para ajustar la variable y reducir el error.

El proceso responde a la acción del actuador, y la variable de proceso se modifica.

Este ciclo de medición, comparación, cálculo y ajuste se repite continuamente en tiempo real para mantener la variable del proceso lo más cerca posible del valor deseado.

Este bucle cerrado permite un control más preciso y estable del proceso, ya que cualquier desviación de la variable del proceso respecto al setpoint se corrige automáticamente mediante el ajuste continuo proporcionado por el controlador.

3 – MEDIDORES o SENSORES

Se llama sensor o medidor al instrumento que produce una señal, usualmente eléctrica, ya que anteriormente se utilizaban señales hidráulicas, que refleja el valor de una propiedad (caudal, temperatura, presión, nivel, etc.), mediante alguna correlación definida (ganancia), que es la relación proporcional entre el valor real de una magnitud o variable y el valor medido o registrado por un dispositivo o instrumento de medición.

La medición de variables de procesos es el proceso realizado para la obtención de datos cuantitativos de magnitudes o parámetros, en un proceso industrial. Implica identificar y cuantificar estos factores relevantes para el proceso con el objetivo de:

Controlar el proceso: permite obtener información en tiempo real sobre el estado y el comportamiento del sistema, utilizada para regular y ajustar las condiciones de operación del proceso.

Supervisar el comportamiento: permite monitorear el rendimiento del sistema a lo largo del tiempo. Esto ayuda a identificar tendencias, patrones anormales o desviaciones que puedan indicar problemas potenciales, como fallas en equipos, fugas, ineficiencias o desgaste de componentes.

Optimizar la eficiencia: Al medir y analizar las variables de procesos, es posible identificar oportunidades para mejorar la eficiencia y la productividad

3.1 – Medidores de nivel

3.1.1 – Medidor de nivel capacitivo:

Dispositivo utilizado para medir el nivel de un líquido en un tanque o contenedor. Funciona en base al principio de la capacitancia, el que **consiste en la capacidad que tienen dos conductores eléctricos para almacenar una carga eléctrica cuando están separados por un dieléctrico (material no conductor)**.

El medidor capacitivo generalmente consta de dos placas o electrodos metálicos, uno colocado en la parte superior y otro en la parte inferior del tanque. El espacio entre estos electrodos es el área de medición y está ocupado por el líquido cuyo nivel se desea medir. Cuando el líquido entra en contacto con los electrodos, actúa como un dieléctrico entre ellos.

Cuando se aplica una señal eléctrica de frecuencia constante a uno de los electrodos, el sistema forma un capacitor con el líquido como dieléctrico. La capacitancia del capacitor varía en función de la constante dieléctrica del líquido, que a su vez depende del nivel del líquido que ocupa el área entre los electrodos. Cuanto más líquido hay en el área de medición, mayor es la capacitancia, y viceversa.

El medidor capacitivo utiliza circuitos electrónicos para medir la capacitancia entre los electrodos. Esta información se convierte en una señal eléctrica proporcional al nivel y puede ser mostrada en una pantalla o transmitida a un sistema de control para realizar acciones, como activar alarmas o controlar el flujo del líquido.

Una de las ventajas de los medidores capacitivos es su capacidad para medir líquidos conductores y no conductores, lo que los hace adecuados para una amplia variedad de aplicaciones industriales y domésticas. Sin embargo, también pueden estar sujetos a errores debido a la formación de espuma, adherencia de líquidos a las placas o interferencias electromagnéticas.

3.1.2 – Medidor de nivel inductivo:

Dispositivo utilizado para medir el nivel de un líquido en un tanque o contenedor. Su funcionamiento se basa en el principio de la inductancia, que es la **propiedad que tienen los conductores eléctricos para generar un campo magnético cuando se hace pasar una corriente eléctrica por ellos**.

El medidor inductivo generalmente consiste en una sonda o sensor montado en la parte exterior del tanque y un elemento de referencia en el interior del tanque. La sonda suele ser un tubo o varilla metálica, mientras que el elemento de referencia puede ser una placa metálica o una varilla de longitud conocida.

Cuando el medidor se activa, se aplica una corriente eléctrica de frecuencia constante a la sonda, lo que genera un campo magnético alrededor de ella. El líquido en el tanque actúa como un conductor y, al moverse en el área de medición, también atraviesa el campo magnético.

El movimiento del líquido induce una corriente eléctrica en el líquido, de acuerdo con las leyes de la inducción electromagnética. La inductancia del sistema cambia en función de la cantidad de líquido presente en el área de medición. Cuanto más líquido hay en el área de medición, mayor es la inductancia, y viceversa.

CURSO PARA ASPIRANTES A OPERADOR DE REFINERÍA DE PETRÓLEO

El medidor inductivo utiliza circuitos electrónicos para medir la inductancia de la sonda y esta información se convierte en una señal eléctrica proporcional al nivel y puede ser mostrada en una pantalla o transmitida a un sistema de control para realizar acciones, como activar alarmas o controlar el flujo del líquido.

Una ventaja de los medidores inductivos es que no requieren contacto directo con el líquido, lo que los hace adecuados para medir líquidos corrosivos o peligrosos. Sin embargo, también pueden estar sujetos a interferencias electromagnéticas y errores debido a la acumulación de suciedad o materiales en la sonda.

3.1.3 – Medidor de nivel resistivo:

Dispositivo utilizado para medir el nivel de un líquido en un tanque o contenedor. Funciona en base al principio de la resistencia eléctrica, que es la **oposición al flujo de corriente eléctrica que presenta un material conductor**.

El medidor resistivo consta de dos o más electrodos o sondas metálicas que se instalan en diferentes niveles a lo largo de la altura del tanque. Estos electrodos están en contacto con el líquido en el interior del tanque. Cuando se aplica una corriente eléctrica a través de los electrodos, se crea un circuito eléctrico entre ellos a través del líquido.

La resistividad eléctrica del líquido es una propiedad que depende de su nivel. Cuanto más líquido esté en contacto con los electrodos, menor será la resistencia eléctrica entre ellos. Por otro lado, si el nivel del líquido es bajo y los electrodos están más expuestos al aire o a un espacio vacío, la resistencia eléctrica será mayor.

El medidor resistivo utiliza un circuito de medición que mide la resistencia entre los electrodos. Esta resistencia se convierte en una señal eléctrica proporcional al nivel de líquido en el tanque. Esta información puede mostrarse en una pantalla, transmitirse a un sistema de control para acciones específicas, como activar alarmas o regular el flujo del líquido.

Son simples y económicos, lo que los hace adecuados para diversas aplicaciones industriales y domésticas. Sin embargo, pueden estar sujetos a ciertas limitaciones, como la influencia de la conductividad del líquido y la formación de depósitos o sedimentos en los electrodos, lo que puede afectar la precisión de las mediciones.

Para mantener mediciones precisas y confiables, es esencial calibrar y mantener regularmente los medidores resistivos, así como tener en cuenta las propiedades del líquido que se está midiendo. Además, en algunos casos, puede ser necesario emplear técnicas de compensación para corregir las variaciones causadas por la conductividad del líquido o la acumulación de impurezas.

3.1.4 Medidor por Radar

Dispositivo utilizado para medir la altura o nivel de un líquido contenido en un tanque, recipiente o cualquier otro contenedor. La tecnología de radar se basa en el **principio de la reflexión de ondas electromagnéticas para determinar la distancia entre el transmisor y el objeto reflejante que para esta aplicación es la superficie del líquido**.

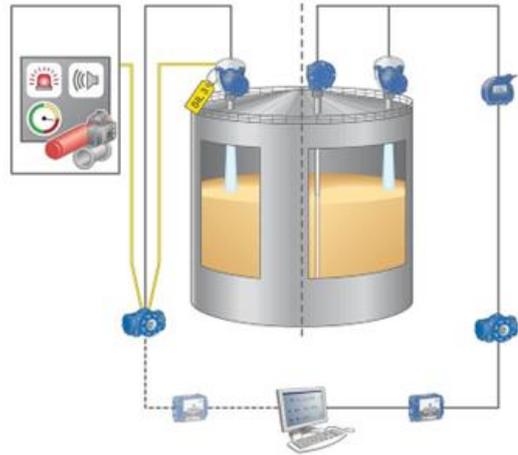
Funcionamiento:

CURSO PARA ASPIRANTES A OPERADOR DE REFINERÍA DE PETRÓLEO

Generación de la señal de radar: El medidor de nivel cuenta con un transmisor que emite pulsos de ondas electromagnéticas de alta frecuencia, generalmente en la banda de microondas. Estos pulsos viajan a través del aire y se dirigen hacia la superficie del líquido contenido en el tanque.

Tiempo de vuelo: Una vez que los pulsos de radar alcanzan la superficie del líquido, parte de la energía se refleja hacia el medidor debido al cambio en el medio (aire-líquido). El medidor registra el tiempo que tarda el pulso reflejado en regresar al transmisor. Este tiempo de vuelo se basa en la velocidad de la luz y en el tiempo que toma el pulso para ir y volver desde el transmisor hasta la superficie del líquido y viceversa.

Cálculo de la distancia: El medidor de nivel utiliza el tiempo de vuelo del pulso y la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas (que es conocida) para calcular la distancia entre el transmisor y la superficie del líquido. Al medir la distancia desde el transmisor hasta la superficie del líquido, el medidor puede inferir el nivel del líquido en el tanque, ya que la altura del líquido está directamente relacionada con la distancia medida.



Visualización y/o transmisión de datos: La distancia medida se muestra en una pantalla o se transmite a un sistema de control o una computadora para su visualización y análisis. También puede haber funciones adicionales, como la compensación de la temperatura y la corrección de factores ambientales que puedan afectar la precisión de la medición.

Pueden funcionar en condiciones adversas, como altas temperaturas, presiones y entornos con productos químicos agresivos, lo que los hace muy versátiles y confiables. No necesita ningún contacto con el líquido, no incorporan ningún elemento que se mueva, por lo que su aplicación es ideal en productos muy viscosos (incluidos asfaltos), o en sistemas en movimiento (como barcos). El sistema de radar **de microondas emplea la propagación de una onda electromagnética** que no es influida por la temperatura ni por las variaciones de densidad que puedan existir sobre el líquido. De este modo, la espuma, que es transparente a la señal de radar, deja de ser un problema como ocurre en el medidor de ultrasonidos. Un oscilador de estado sólido genera una frecuencia de barrido de 10 a 11 GHz y enfoca la señal sobre el líquido por medio de una antena. La diferencia de frecuencias entre las señales de transmisión y de retorno es proporcional al tiempo empleado por las mimas.

3.1.5 Medidor de nivel por ultrasonido

Dispositivo que utiliza ondas sonoras de alta frecuencia (ultrasonido) para medir la altura o nivel de un líquido en un tanque o contenedor. El principio de funcionamiento de este tipo de medidor se puede describir en los siguientes pasos:

Generación de ondas ultrasónicas: El medidor de nivel de líquido por ultrasonido cuenta con un transmisor que **genera pulsos de ondas ultrasónicas de alta frecuencia** (generalmente por encima del rango audible humano, es decir, frecuencias superiores a 20 kHz). Estos pulsos son transmitidos hacia la superficie del líquido dentro del tanque.

CURSO PARA ASPIRANTES A OPERADOR DE REFINERÍA DE PETRÓLEO

Reflexión de las ondas ultrasónicas: **Al llegar a la superficie del líquido, los pulsos de ultrasonido se reflejan en la interfaz aire-líquido** debido a la diferencia de impedancia acústica entre el aire y el líquido. La impedancia acústica es una propiedad del material que describe cómo las ondas sonoras se propagan a través de él.

Recepción de las ondas reflejadas: **El medidor de nivel tiene un receptor que detecta los ecos de las ondas ultrasónicas reflejadas** desde la superficie del líquido. Estos ecos son recibidos por el medidor y se mide el tiempo que toma para que los ecos vuelvan al receptor.

Cálculo de la distancia: Conociendo la velocidad del sonido en el aire (que es constante) y midiendo el tiempo que tomó para que las ondas ultrasónicas reflejadas regresen al receptor, el medidor de nivel puede calcular la distancia entre el transmisor y la superficie del líquido.

Conversión a nivel de líquido: Al conocer la distancia desde el transmisor hasta la superficie del líquido, el medidor puede determinar el nivel del líquido en el tanque, ya que la altura del líquido está directamente relacionada con la distancia medida.

Visualización y/o transmisión de datos: El nivel de líquido calculado se muestra en una pantalla o se transmite a un sistema de control o computadora para su visualización y análisis. Dependiendo del modelo y las capacidades del medidor, también puede haber funciones adicionales, como la compensación de la temperatura, la corrección de factores ambientales y la integración con sistemas de control y monitoreo.

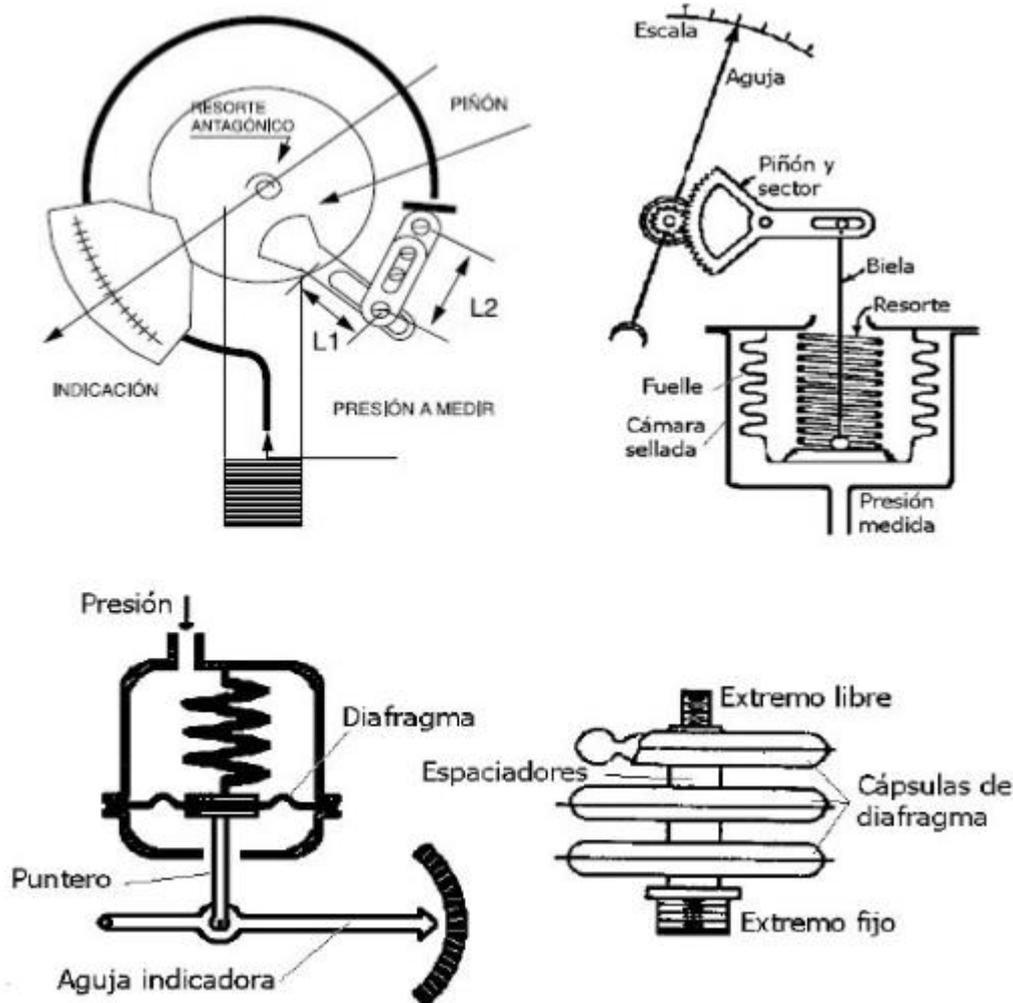
Son especialmente útiles en aplicaciones donde no es práctico utilizar sensores de contacto o donde se requiere una medición sin contacto para evitar la contaminación o el riesgo de dañar el sensor.



3.2 Medidores de presión

3.2.1 Sensores mecánicos elásticos

Los constituyen elementos primarios elásticos que se deforman por la presión interna del fluido que contienen. Ejemplos de ellos son: tubo de Bourdon, el elemento en espiral, el helicoidal, el diafragma y el fuelle.



El tubo Bourdon es el método más utilizado para medir presiones. Tubo aplanado de bronce o acero curvado en arco. Al aplicar presión al interior del tubo, tiende a enderezarse, transmitiendo este movimiento a una aguja por medio de un mecanismo amplificador adecuado. Muy preciso hasta 200 atm. con precisión del 2 – 3 %. Escala máx. 7000 Kg/cm². Esta deformación puede trasladarse a una aguja o a un sistema de resistencia variable o a un campo electromagnético.

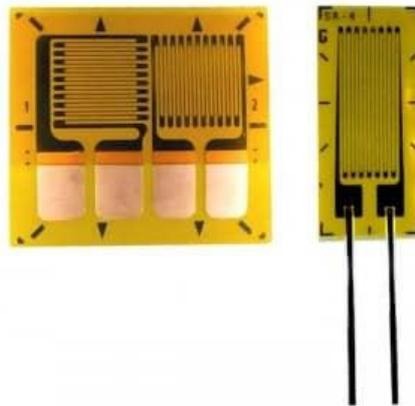
3.2.2 Galgas extensiométricas

Son sensores cuya resistencia varía con la fuerza aplicada. Estos sensores convierten la fuerza, presión, tensión, peso, etc., en un cambio de la resistencia eléctrica el cual puede ser medido. Se basa en el efecto piezorresistivo, que es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar

CURSO PARA ASPIRANTES A OPERADOR DE REFINERÍA DE PETRÓLEO

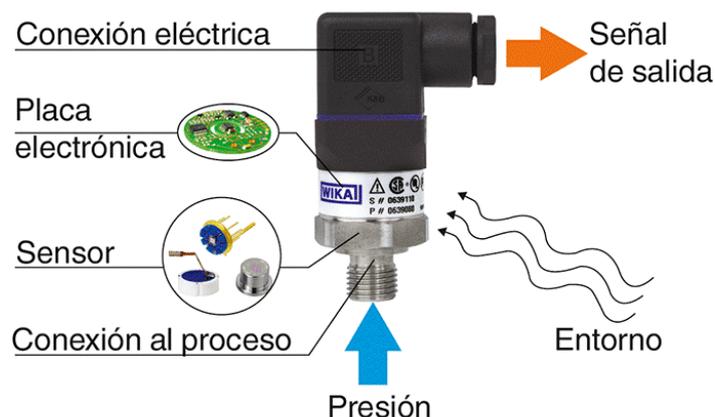
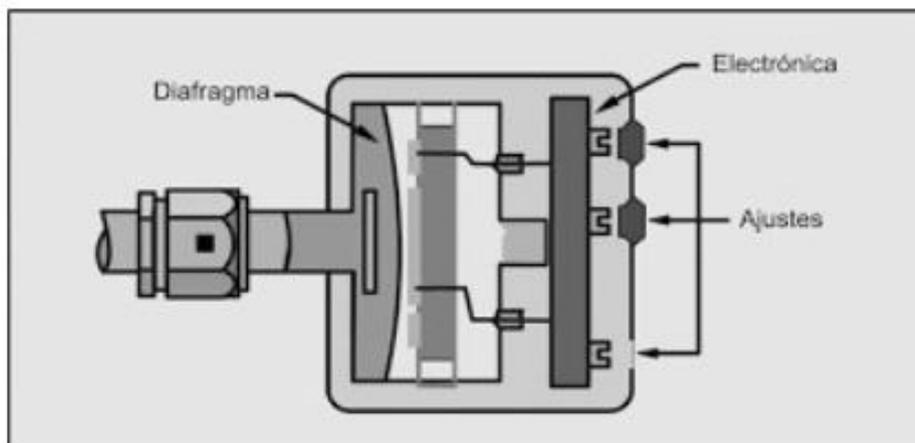
el valor nominal de su resistencia eléctrica cuando se les somete a ciertos esfuerzos mecánicos que causan deformación.

GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS



3.2.3 Sensor capacitivo

Los sensores de presión capacitivos utilizan una cavidad de presión y una membrana para formar un condensador variable. La membrana se deforma cuando se aplica presión y la capacidad se reduce de manera proporcional. Este cambio en la capacidad se puede medir eléctricamente y correlacionarse con la presión aplicada.



3.3 Medidores de TEMPERATURA

3.3.1 Termocuplas

Un termopar, llamado también Termocupla, es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de los milivoltios) que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado “punto caliente” o “unión caliente” o de “medida” y el otro llamado “punto frío” o “unión fría” o de “referencia”.

Normalmente los termopares industriales están compuestos por un tubo de acero inoxidable u otro material. En un extremo del tubo está la unión, y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido dentro de una caja redonda de aluminio.

En instrumentación industrial, los termopares son usados como sensores de temperatura. Son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas, pero su principal limitación es su baja exactitud.



3.4.2 Termorresistencias

Las termorresistencias (o también llamadas RTD) trabajan según el principio de que en la medida que varía la temperatura, su resistencia se modifica, y la magnitud de esta modificación puede relacionarse con la variación de temperatura.

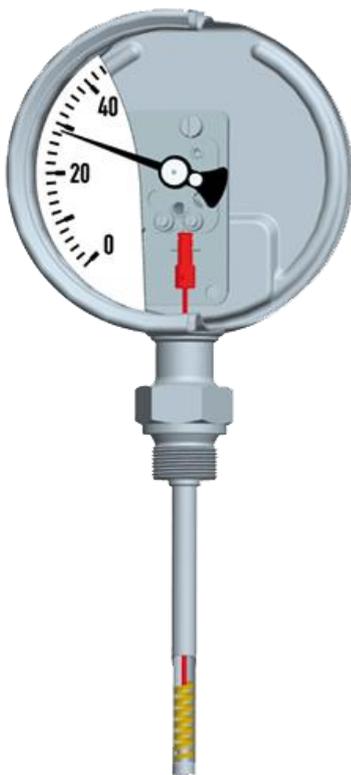
Las termorresistencias de uso más común se fabrican de alambres finos soportados por un material aislante y luego encapsulados. El elemento encapsulado se inserta luego dentro de una vaina o tubo metálico (de acero inoxidable, Inconel, Incoloy o Hastelloy) cerrado en un extremo que se llena con un polvo aislante y se sella con cemento para impedir que absorba humedad. Las de platino son más precisas, habiendo también de níquel o cobre. El aspecto exterior de las termorresistencias industriales es similar al de las termocuplas.

3.4.3 Medidores de temperatura analógicos

Termómetro bi metálico

Una cinta compuesta por dos láminas de metal de diferentes coeficientes de dilatación (bimetal), unidas entre sí en forma inseparable, se deforma a consecuencia de un cambio de temperatura. La curvatura resultante de las diferentes expansiones de las láminas es casi proporcional al cambio de temperatura. A partir de las láminas bimetálicas se desarrollaron dos diferentes formas de sistemas de medición: muelle helicoidal y muelle espiral

Mediante deformación mecánica de las cintas bimetálicas en las formas de muelle, frente a un cambio de temperatura se produce un movimiento de rotación. Si un extremo del sistema de banda bimetálica está sujetado en forma firme, el otro extremo hace girar el árbol portaíndice. Los rangos de visualización van de $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$



bimetalico



dilatación de gas

Termómetro de dilatación de gas

El sistema de medición está compuesto de bulbo, capilar y tubo elástico en la caja. Estos componentes forman una unidad. El sistema de medida se encuentra completamente lleno de gas inerte a presión. Al modificarse la temperatura, cambia también la presión interior del bulbo.

La presión deforma el muelle de medición, cuyo movimiento se transmite al indicador a través de un mecanismo de indicación.

Las variaciones de la temperatura ambiente son despreciables porque hay un elemento bimetalico entre el mecanismo de indicación y el muelle que sirve de compensador. El rango de visualización va de -200 a $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$ con