

1. Generalidades

1.1. Automatización

El concepto “autómata” proviene del griego y quiere decir: “que se mueve por sí mismo”. Una secuencia automática es una secuencia autocontrolada.

De ésta manera se entiende la **automatización** como la realización de tareas y funciones mediante máquinas que actúan sin la intervención directa del hombre. Sin embargo, el hombre es quien sigue mandando la máquina. El ama de casa, por ejemplo, ajusta un determinado programa en su lavadora automática y la pone en marcha. Todo el proceso de lavado, hasta el momento de sacar la ropa limpia y seca, es controlado por la máquina.

La automatización puede dividirse en cuatro fases:

- 1. Trabajo manual:** Es la fase inferior de un proceso de manufactura, en el cual, se elaboran piezas sin recurrir a las máquinas. En éste caso, el hombre tiene que aplicar la energía necesaria para la mecanización de la pieza, por ejemplo, utilizando una lima.
- 2. Mecanización:** En ésta fase la máquina se encarga del trabajo manual, aportando la energía de accionamiento. Sin embargo, en cada momento del proceso de elaboración, es el hombre quien determina qué operación tiene que realizar la máquina; hasta cierto punto es él quien imparte la orden para el más mínimo paso de mecanización parcial. Un ejemplo es la mecanización de una pieza por medio de un torno convencional.
- 3. Automatización parcial:** En la tercera fase, la máquina realiza automáticamente varios pasos parciales en la mecanización de una pieza que se repiten constantemente. En un torno automático, por ejemplo, el operario tiene que ajustar un ciclo de desbaste o un ciclo de roscado sólo una vez y la máquina lo realiza luego automáticamente.
- 4. Automatización total:** En la última fase, el autómata se encarga de la secuencia completa de mecanización. Por ejemplo, para una pieza difícil de torneear, se introduce el programa de mecanización en un torno automático gobernado por control numérico; donde la mecanización se realiza en forma completamente automática desde la pieza en bruto hasta el producto final. En éste caso, el hombre tiene la tarea de elaborar el programa una sola vez y la máquina de ejecutarlo tantas veces como se desee.

1.2 Ventajas de la Automatización

La necesidad de automatizar se hace evidente en todos los casos en los que tiene que realizarse trabajos rutinarios que para el hombre son aburridos, pesados, molestos o nocivos para la salud. Con la automatización el hombre se reserva para sí la actividad creadora y el empleo de la inteligencia.

Las ventajas más significativas de la automatización son:

1. La máquina asume la tarea más dura del trabajo y la menos inteligente
2. Aumento de la calidad de los productos y la homogeneidad de los mismos.
3. Disminución de tiempos ociosos y de costos de producción
4. Racionalización de recursos, materias primas y ejecución de tareas.
5. Aumento del volumen de producción.
6. Posibilita la operación de secuencias y sincronismos a alta velocidad

El resultado de todo esto, es una industria más productiva y competitiva.

1.4 Tipos de procesos

Un proceso es un procedimiento o sistema para la conversión y/o transporte de materiales, energía y/o información.

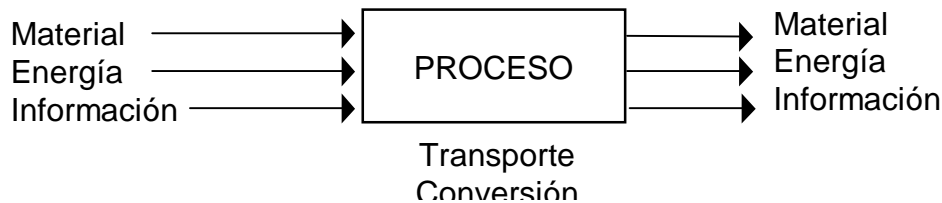


FIGURA 1.1. Proceso técnico.

La principal aplicación de la automatización se encuentra en el sector de la producción, y de acuerdo con esto pueden distinguirse, de forma general, entre cuatro clases de procesos:

- **Procesos de Transformación**
- **Procesos de fabricación**
- **Procesos de distribución**
- **Procesos de medición y verificación**

En los procesos de **transformación** se producen materiales o energía partiendo de materias primas; teniendo lugar, las transformaciones químicas o físicas. Los campos típicos de aplicación son la Industria química (p. ej. la producción de fibra sintética), la industria siderúrgica (p. ej. la producción de acero), fábricas de cemento, refinerías de petróleo, centrales eléctricas y otras.

En los procesos de **fabricación** se modifica la forma del material por medio de una elaboración mecánica. En éste sector se destacan las máquinas herramientas de control numérico, ensambladoras de vehículos, entre otras.

En los procesos de **distribución**, el material, la energía o la información, se distribuyen con respecto al espacio o al tiempo. Por ejemplo, existen sistemas de almacenamiento que clasifican, agrupan y entregan el material almacenado de forma completamente automática (p. ej. en las embotelladoras) En centrales eléctricas y telefónicas se controlan los distribuidores de carga.

En los procesos de **medición y verificación** se analizan las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los materiales. Estos procesos son típicos de los bancos de pruebas, p. ej. bancos de pruebas para motores.

Además de la anterior clasificación, los procesos se pueden clasificar de acuerdo a su evolución en:

- **Procesos continuos**
- **Procesos discontinuos**

Los procesos **continuos** (lineales o no) son aquellos donde se trabaja en forma continua o “por coladas”. Generalmente las variables son del tipo físico-químicas, y se miden y regulan en forma continua. Los equipos, por tanto, se diseñan para responder a variaciones del tipo analógico.

En los procesos continuos se busca que el valor de las variables del proceso se mantengan en un valor deseado fijo o variable en forma predeterminada. Los materiales que se manipulan son generalmente gases o líquidos, y se opera sobre el flujo de un producto.

Las variables a controlar son por lo general: presión, temperatura, humedad, nivel, caudal o velocidad. Ejemplos: Control de la presión en una línea de vapor, control de la temperatura de un reactor, etc.

En la tabla 1.1 se indican las características y diferencias más sobresalientes entre procesos continuos y discontinuos

| CARACTERISTICAS | PROCESOS CONTINUOS | PROCESOS DISCONTINUOS |
|---------------------------------------|--|---|
| Fuente primaria de información | Sensores analógicos automáticos. Las entradas manuales, como el punto de referencia son fuente secundaria de información | Sensores digitales automáticos y manuales (órdenes directas). |
| Tipo de variables | Fijas o en función del tiempo | Variables booleanas |
| Técnica de control | Realimentación negativa | Manipulación |
| Equipo de control | Reguladores (PID, etc..) | Controladores lógicos (PLC, PLA, microcontroladores,..) |
| Modelización | Ecuaciones diferenciales, diagramas de bloques, etc.. | Diagramas funcionales de etapas y transiciones, de escalera, y ecuaciones booleanas. |
| Cálculos | Orientados hacia el diseño de la estructura del sistema y del regulador | Orientados hacia el diseño de sistemas secuenciales y combinacionales, incluida la solución de automatismos lógicos |
| Naturaleza de los equipos | Sistemas electromecánicos, neumáticos, hidráulicos y electrónicos | Sistemas electromecánicos, neumáticos, hidráulicos y electrónicos |
| Elementos finales de control | Válvulas reguladores de presión, motoválvulas, servomotores, dispositivos de estado sólido | Electroválvulas, contactores, relés, lámparas, etc.. |
| Epoca de desarrollo formal | Electrónica analógica de semiconductores discretos, desde 1960 hasta 1975 | Electrónica digital de microprocesadores, desde 1972 hasta la fecha |
| Impacto socioeconómico | Moderado | Muy grande ya que en las actividades de manufactura se invierten muchas horas-hombre |

TABLA 1.1. Comparación entre control de procesos continuos y discontinuos

En los procesos **discontinuos** se trabaja sobre piezas o pasos discretos e independientes pero que interactúan entre sí para la obtención de un producto terminado. Se les conoce también como “ procesos de fabricación o manufactura”.

Las variables a controlar son de tipo digital y responden a una secuencia, combinación o temporización determinada. Se trabaja individualmente sobre cada pieza o unidad del sistema, realizando tareas discretas basadas fundamentalmente en el control de posición o movimientos.

1.5. Mando y regulación

Casi nunca puede denominarse un proceso como mando puro o regulación pura, puesto que a menudo existen combinaciones de ambos.

El **mando** de un proceso consiste en la influencia que tienen unas magnitudes o variables de entrada , sobre otras que actúan como variables de salida, de acuerdo a las características propias del sistema.

La principal característica del mando es el control en **lazo abierto** o cadena de mando.

En la figura 1.2. se muestra un ejemplo de un sistema de mando manual para el control de la temperatura de un intercambiador

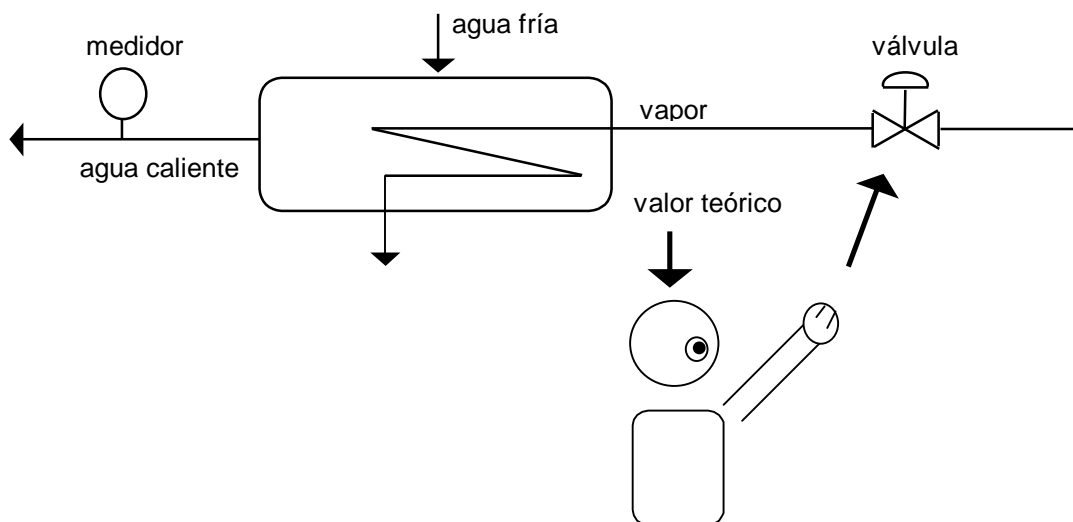


FIGURA 1.2. Sistema de mando manual

La temperatura del agua que sale del intercambiador, puede ser modificada. La temperatura actual se comprueba por medio del instrumento de medición. Si el operario ajusta determinada temperatura por medio de la válvula y después abandona el sistema, la temperatura se modificará posiblemente debido a

perturbaciones (p. ej. aumento en el caudal de entrada de agua fría) y no se dará cuenta de ello.

En éste ejemplo, la temperatura instantánea es el valor efectivo. El valor deseado para ésta magnitud se denomina valor teórico. Si el valor teórico y el valor efectivo difieren, el sistema no lo corrige automáticamente. Se habla entonces, de un **sistema de lazo abierto**, en el cual las perturbaciones no pueden ser eliminadas.

La **regulación** es un proceso en el cual se mide continuamente la magnitud a regular y se le compara con otra denominada magnitud de referencia. El resultado de la comparación (error) influye sobre la magnitud de la variable de salida para que ésta siga a la variable de entrada (referencia).

El sistema resultante es denominado circuito de regulación, sistema de control de **lazo cerrado** o "loop de control".

La Figura 1.3 muestra un ejemplo de regulación.

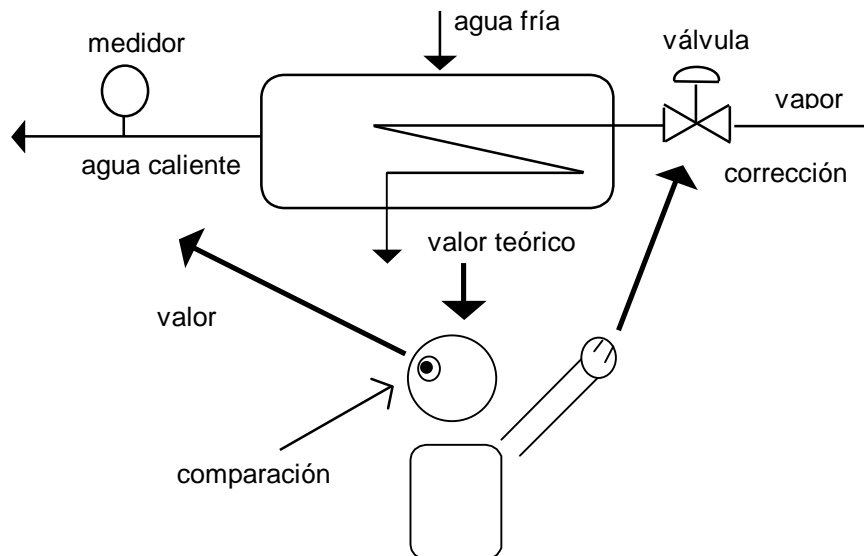


FIGURA 1.3. Regulación manual de temperatura en un intercambiador

En éste sistema las perturbaciones que producen fluctuaciones en la salida pueden ser controladas a determinados intervalos, o incluso ser eliminadas por medio del reajuste de la válvula.

Las operaciones de medida, comparación, cálculo y corrección son realizadas una y otra vez por el operador, hasta que transcurre cierto tiempo y la temperatura del agua se equilibra finalmente al valor deseado.

Si es el hombre quien se encarga de las actividades de medición, comparación y ajuste, se trata de una regulación manual. Si las asume una máquina, se habla de regulación automática.

En la figura 1.4 se muestra en forma esquemática un sistema automático de control

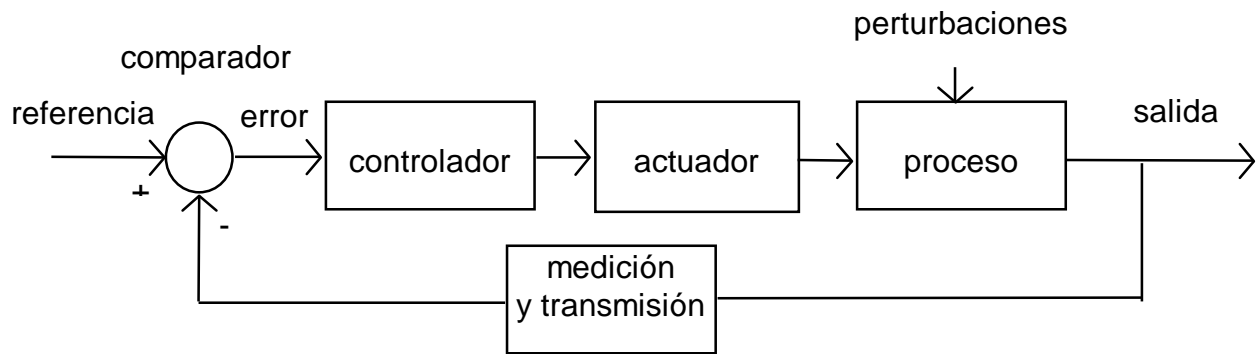


FIGURA 1.4. Diagrama de bloques de un sistema automático de control

2. Instrumentación Industrial

Para poder automatizar un proceso, es necesario disponer de información sobre su estado en forma precisa y confiable. Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de las magnitudes del proceso, p. ej. presión, temperatura, caudal, nivel, pH en condiciones superiores a las que un operario podría efectuar.

El sistema de control, exige pues, para la comparación y subsiguiente corrección, incluir determinados instrumentos: unidad de medición, unidad de control, elemento final de control y elemento de transmisión. La Figura 2.1. se muestran los instrumentos comúnmente utilizados en un lazo de control industrial.

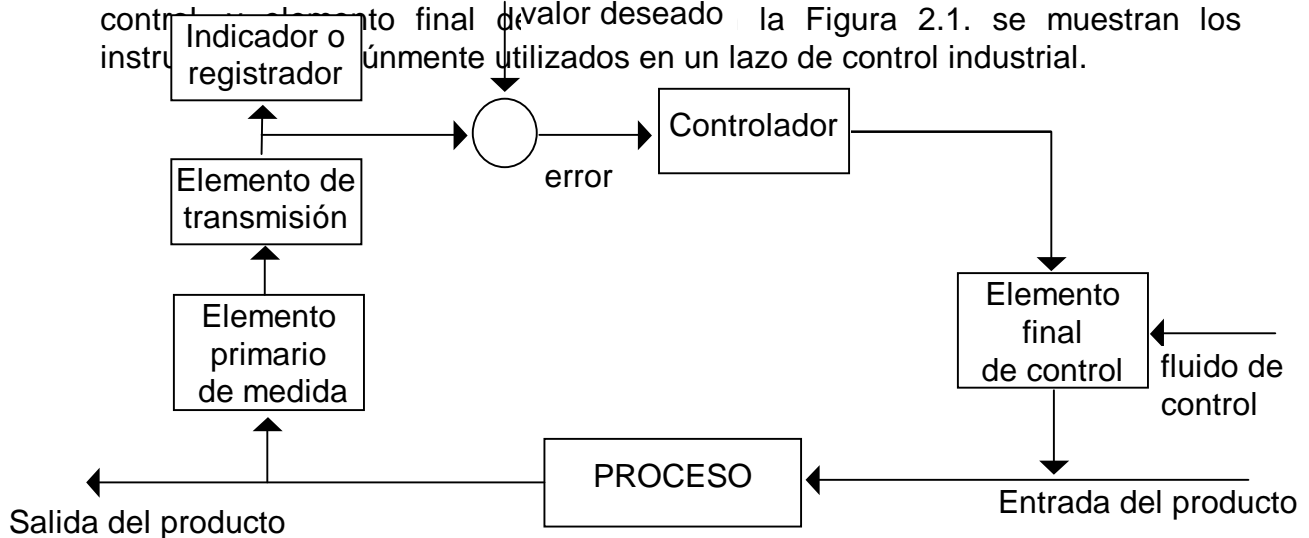


FIGURA 2.1. Instrumentación utilizado en un lazo de control

2.1. Clases de instrumentos

Los instrumentos de medición y control son relativamente complejos y su función puede estudiarse de acuerdo a la siguiente clasificación:

- **Instrumentos ciegos**
- **Instrumentos indicadores**
- **Instrumentos registradores**
- **Elementos primarios**
- **Transmisores**

- **Transductores**
- **Acondicionadores de señales**
- **Procesadores de señales**
- **Convertidores**
- **Controladores**
- **Elementos finales de control**

Los **instrumentos ciegos** no tienen indicación visible de la variable. Ejemplo: Presóstatos o termóstatos, transmisores de caudal, presión, nivel y temperatura sin indicación.

Los **instrumentos indicadores** disponen de un índice y escala graduada o de un despliegue digital en los que puede leerse el valor de la variable.

Los **instrumentos registradores** registran con trazo continuo o punto a punto la variable, y pueden ser circulares o rectangulares.

Los **elementos primarios** o sensores están en contacto con la variable de proceso y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada.

La salida generada depende de alguna manera de la variable a medir. Ejemplos: El termopar, donde la fem en milivoltios depende de la temperatura; la placa orificio, donde la disminución de presión depende de la tasa de flujo.

Los **transmisores** toman la salida del elemento primario y la convierten a una forma más adecuada para la transmisión a distancia y procesamiento adicional. Las señales que se usan para transmitir la información entre los instrumentos del lazo de control son generalmente de dos tipos: neumáticas y eléctricas. La señal neumática (presión de aire), normalmente está entre 3 y 15 psi equivalentes a 0,206 y 1,033 bar. Las señales eléctricas pueden ser de 4 a 20 mA, 10 a 50 mA, 1 a 5 Volts o 0 a 10 voltios. La señal digital utilizada en algunos transmisores inteligentes es apta directamente para ordenador.

El elemento primario puede formar parte integral del transmisor en un sólo paquete manufacturado en cuyo caso se denomina **transductor**. Por tanto, el transductor produce un voltaje de salida correspondiente a una variable de entrada.

Los **convertidores** son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3 a 15 psi) o electrónica (4 a 20 mA) procedente de un instrumento y después de modificarla envían la señal en forma de una salida estándar. Por ejemplo un convertidor I/P transforma de señal de corriente a señal neumática.

Los **controladores** comparan la variable controlada (presión, nivel ,temperatura) con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación. La variable controlada la pueden recibir directamente, como controladores locales o bien indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital proveniente de un transmisor.

El **elemento final de control** o **actuador** recibe la señal del controlador y modifica directamente la variable manipulada o agente de control. En el control neumático, el elemento suele ser una válvula neumática o un servomotor neumático que efectúan su carrera completa de 3 a 5 psi (0,2 a 1 bar). En el control electrónico la válvula o el servomotor anterior son accionados a través de un convertidor de intensidad a presión o señal digital a presión. En el control eléctrico el elemento suele ser una válvula motorizada que efectúa la carrera completa accionada por un servomotor eléctrico.

En el control electrónico y en particular en regulación de temperaturas de hornos se utilizan SCRs o Triacs.

El elemento **acondicionador de señales** toma la salida del elemento sensor y la convierte en una forma más adecuada para un procesamiento adicional, por lo general en un señal de frecuencia, de corriente directa o de voltaje de c.d.. Ejemplos: un amplificador de instrumentación que convierte milivolts en volts o un oscilador; que convierte un cambio de impedancia en un voltaje de frecuencia variable.

El elemento **procesador de señales** toma la salida del elemento acondicionador y la convierte en una forma más adecuada para la presentación. Son ejemplos: el convertidor de analógico a digital, que transforma un voltaje en impulsos digitales para entrada en una computadora o microprocesador.

2.2 Características estáticas de los instrumentos de medición

Las características estáticas de los instrumentos indican las relaciones que ocurren entre la salida y la entrada de un elemento cuando la entrada permanece estable o cambia lentamente.

Campo de medida (range) : Conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión de un instrumento. Ejemplo : un transmisor de presión puede tener un campo de medida de 3 a 15 psi.

Alcance (Span): Es la variación máxima o diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento: En el ejemplo anterior, el span o alcance del transmisor de presión es de 12 psi

error: Es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida.

precisión: Es la tolerancia de la medida o límite del error.

sensibilidad: es la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona. Por ejemplo, para un transmisor de presión con entrada de 0 a 10^4 Pa y salida de 4 a 20 mA, la sensibilidad es:
 $(20-4)\text{mA}/10^4 \text{ Pa} = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ mA/Pa}$

resolución: Es el mayor cambio en la entrada o variable medida sin cambio correspondiente en la salida o valor leído. Ejemplo: en un convertidor análogo-digital, la señal digital de salida responde en pasos discretos a un aumento continuo del voltaje de entrada; la resolución es el cambio de voltaje que se requiere para hacer que el código de salida cambie en el bit menos significativo.

histéresis: Diferencia máxima entre los valores indicados por la salida o lectura del instrumento para el mismo valor de entrada cuando la variable recorre toda la escala en los sentidos ascendente y descendente

linealidad: Es la aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada.

2.3 Medición de la temperatura:

La medición de temperatura es una de las mediciones más comunes e importantes que se efectúan en los procesos industriales. Los transductores de temperatura más comunes son:

- la termocupla
- Los detectores de resistencia -temperatura (RTD's)
- Los termistores
- Los sensores de circuito integrado

2.3.1 La Termocupla

Cuando dos alambres compuestos de metales diferentes son unidos en ambos extremos y uno de los extremos es calentado, entonces circulará una corriente continua a través del circuito termoelectrico. Este descubrimiento fue realizado por Thomas Seebeck en 1821.

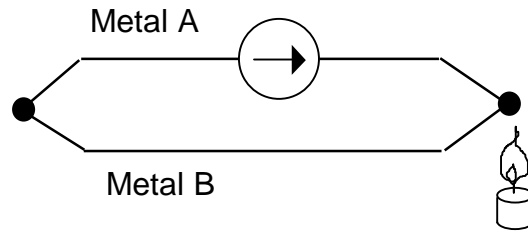


FIGURA 2.2. El efecto Seebeck

Si el circuito se abre en el centro, el voltaje de circuito abierto (Voltaje de Seebeck). es función de la temperatura de la unión y de la composición de los dos metales.

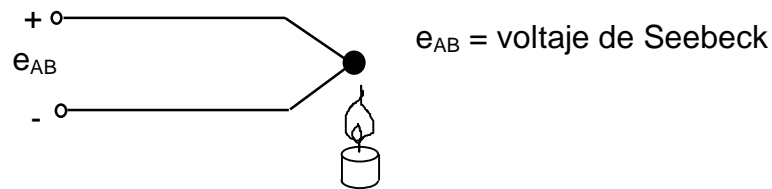


FIGURA 2.3. Voltaje de Seebeck

Todos los metales disímiles exhiben este efecto. Las combinaciones más comunes se muestran en la Tabla 2.1, así como sus características más importantes.

| TIPO | METAL | | CODIGO DE COLOR | | COEFIC. DE SEEBECK | | °C ERROR | RANGO NBS TEMP. |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|------|--------------------|-----|-----------|-----------------|
| | + | - | + | - | | | | |
| B | Platino- 6% Rodio | Platino- 30% Rodio | - | | 6 | 600 | 4.4 - 8.6 | 0 a 1820 °C |
| E | Níquel- 10% Cromo | Constantán | Violeta | Rojo | 58.5 | 0 | 1.7 - 4.4 | -270 a 1000°C |
| J | Hierro | Constantán | Blanco | Rojo | 50.2 | 0 | 1.1 - 2.9 | -210 a 760°C |
| K | Níquel- 16% Cromo | Níquel | Amarillo | Rojo | 39.4 | 0 | 1.1 - 2.9 | -270 a 1372°C |
| N (AWG 14) | Nicrosil | Nisil | - | | 39 | 600 | - | 0 a 1300°C |
| N (AWG 28) | Nicrosil | Nisil | - | | 26.2 | 0 | - | -270 a 400°C |
| R | Platino- 10% Rodio | Platino | - | | 11.5 | 600 | 1.4 - 3.8 | -50 a 1768°C |
| S | Platino- 13% Rodio | Platino | - | | 10.3 | 600 | 1.4 - 3.8 | -50 a 1768°C |
| T | Cobre | Constantán | Azul | Rojo | 38 | 0 | 0.8 - 2.9 | -270 a 400°C |
| W-Re | Tugsteno- 5% Renio | Tugsteno 26% Renio | - | | 19.5 | 600 | - | 0 a 2320°C |

TABLA 2.1. Tipos de termocuplas y sus características más importantes

Para pequeños cambios en la temperatura, el voltaje Seebeck es linealmente proporcional a la temperatura:

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

Donde α , el coeficiente de Seebeck, es la constante de proporcionalidad.

Medición de voltajes con la termocupla: El voltaje de Seebeck no se puede medir directamente, porque al conectar un voltímetro a la termocupla, los cables del mismo crean un nuevo circuito termoeléctrico.

Si se conecta un voltímetro a través de una termocupla de cobre-constantán (Tipo T) y miramos el voltaje de salida:

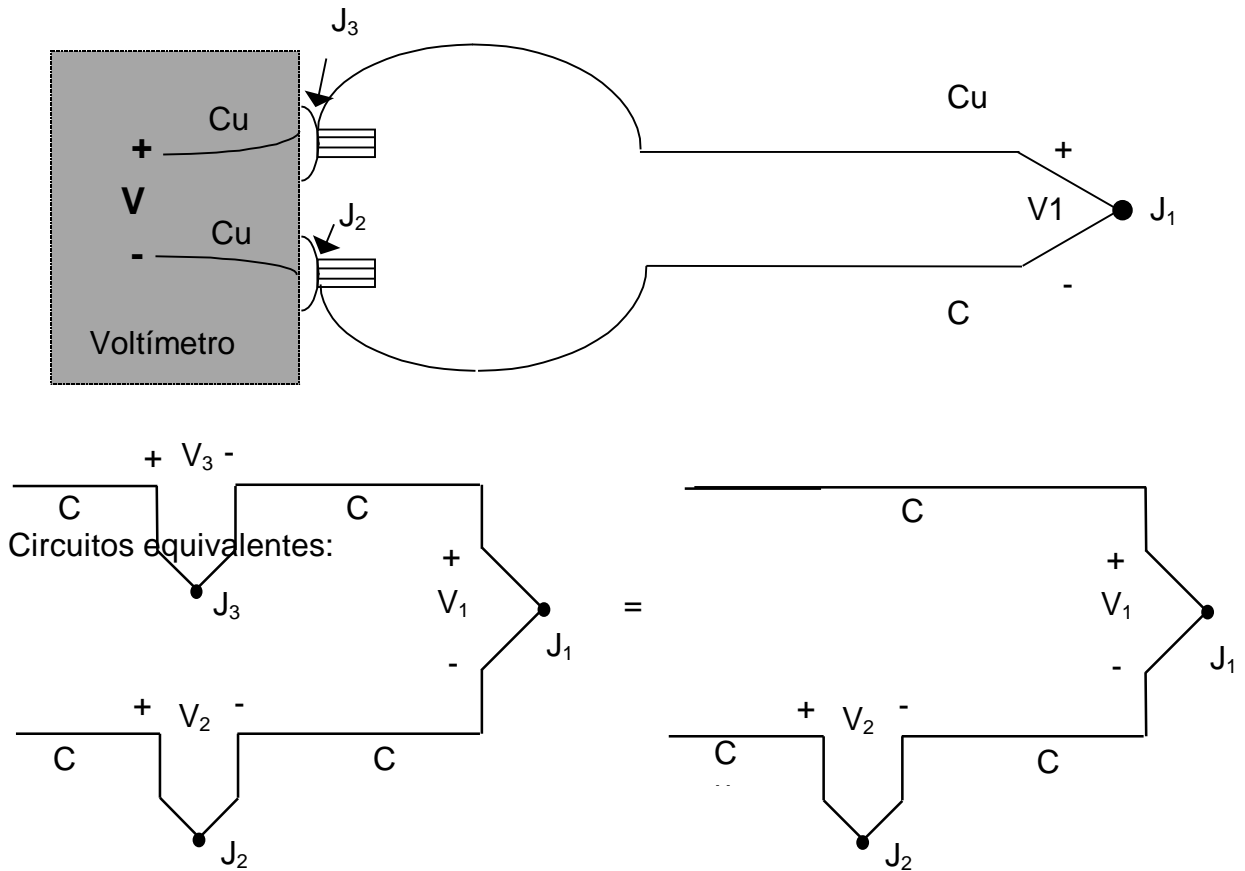


FIGURA 2.4. Medición de una unión con un voltímetro digital

Al tratar de leer V_1 solamente, la conexión del voltímetro ha creado dos nuevas uniones metálicas: J_2 y J_3 . Sin embargo J_3 es una unión Cu-Cu y no crea fem térmica ($V_3 = 0$), pero J_2 puede adicionar una fem (V_2) en oposición a V_1 . La lectura resultante del voltímetro V será proporcional a la diferencia de temperatura entre J_1 y J_2 . esto nos indica que la temperatura de J_1 no se puede conocer hasta que no se halle la temperatura en J_2 .

Una forma de determinar la temperatura de J_2 , es colocando físicamente la unión en un recipiente con hielo, forzando la temperatura a ser 0°C y estabilizando J_2 como la **unión de referencia**.

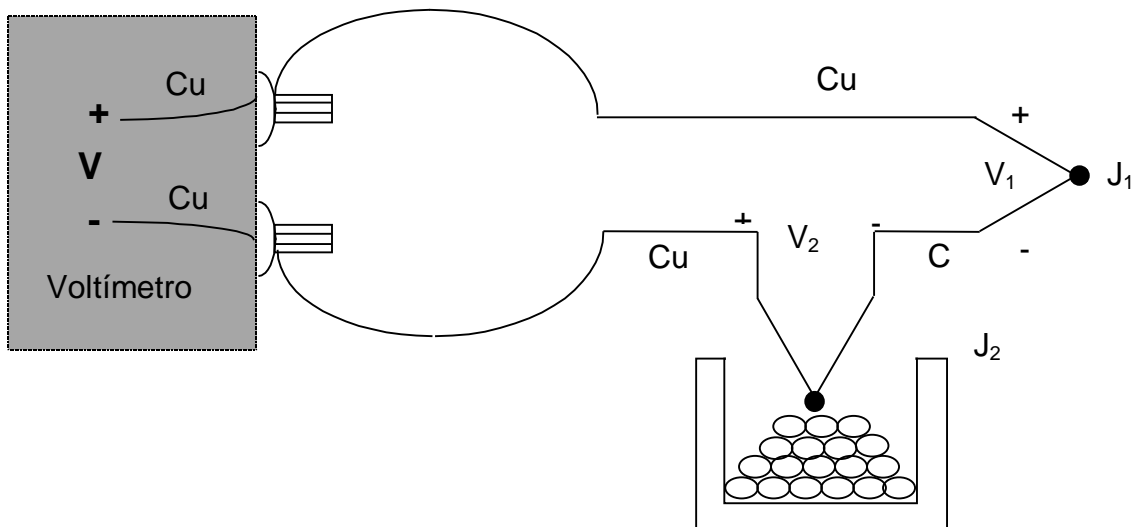


FIGURA 2.5. Unión de referencia externa

Ahora, ambas terminales del voltímetro son Cu-Cu, éstas no crean fem térmica y la lectura del voltímetro es proporcional a la diferencia de temperatura entre J_1 y J_2

$$V = V_1 - V_2$$

$$T_{J_1} (^{\circ}\text{C}) + 273.15 = t_{J_1}$$

$$T_{J_2} (^{\circ}\text{C}) + 273.15 = t_{J_2}$$

$$V = \alpha \cdot (T_{J_1} (^{\circ}\text{C}) + 273.15 - T_{J_2} (^{\circ}\text{C}) - 273.15)$$

$$V = \alpha \cdot (T_{J_1} (^{\circ}\text{C}) - T_{J_2} (^{\circ}\text{C}))$$

Se ha enfatizado con esta demostración, el hecho de que la unión de referencia de hielo V_2 no tiene cero voltios. Este es función de la temperatura absoluta.

Adicionando el voltaje de la unión de referencia fría se pueden referenciar ahora las lecturas en V a 0°C . Este método es muy exacto porque la temperatura del punto de hielo puede ser controlado en forma muy precisa.

El punto de hielo es usado por la NBS (National Bureau of Standards) como el punto de referencia fundamental para sus tablas de termocuplas. Con éstas tablas se pueden convertir directamente de voltaje a temperatura T_{J_1} .

La termocupla de cobre - constantán mostrada en la figura anterior es un ejemplo único, ya que el alambre de cobre es del mismo metal que los terminales del voltímetro. Si se usa una termocupla hierro-constantán (Tipo J) en lugar de la termocupla de Cu-constantán.

El alambre de hierro incrementa el número de uniones de metal diferentes en el circuito, ya que ambos terminales del voltímetro tienen uniones Cu-Fe.

Si ambos terminales del panel frontal no están a la misma temperatura, existirá un error.

Para una medida más precisa los terminales de cobre del voltímetro pueden ser conectados como termocuplas Cu-Fe en un bloque isotérmico:

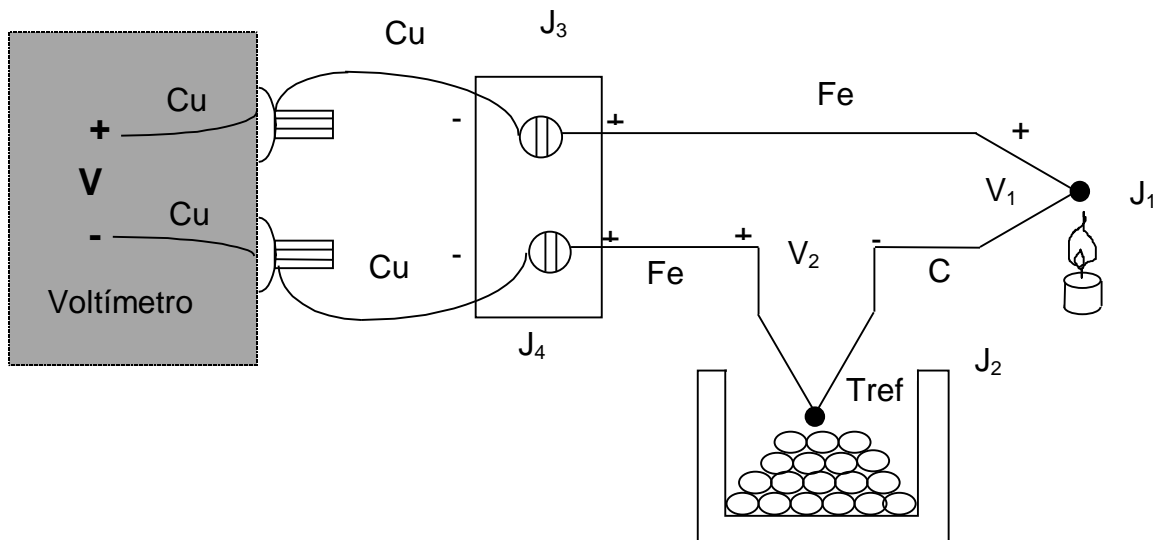


FIGURA 2.6. Eliminación de las uniones de los terminales del voltímetro

El bloque isotérmico es un aislador eléctrico pero un buen conductor del calor y sirve para mantener J₃ y J₄ a la misma temperatura. La temperatura absoluta del bloque no es importante porque las dos uniones actúan en oposición. Entonces se tiene que:

$$V = \alpha \cdot (T_1 - T_{REF})$$

Si se reemplaza el baño de hielo con otro bloque isotérmico:

La salida de voltaje no ha cambiado:

$$V = \alpha \cdot (T_{J1} - T_{JREF})$$

Ahora, se puede aplicar la ley de los metales intermedios para eliminar la unión extra. esta es una ley empírica que establece que, un tercer metal insertado entre dos metales diferentes de una unión de termocupla no tendrá efecto sobre el voltaje de salida, siempre que las dos uniones formadas por el alambre adicional estén a la misma temperatura:

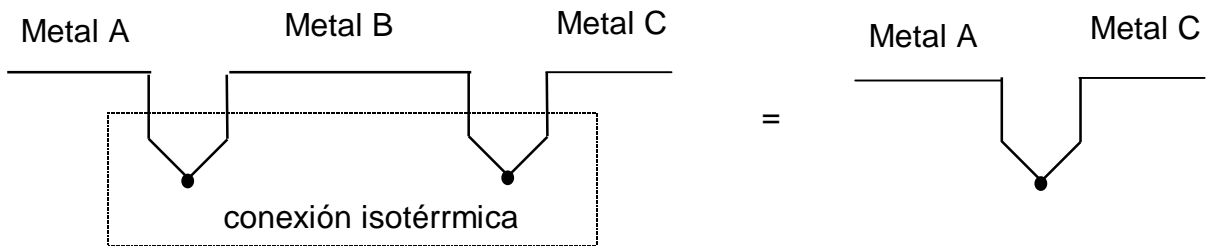


FIGURA 2.9. Ley de los metales intermedios

Esta es una conclusión muy útil, ya que se ha eliminado completamente la necesidad del alambre de Hierro en el terminal negativo del voltímetro:

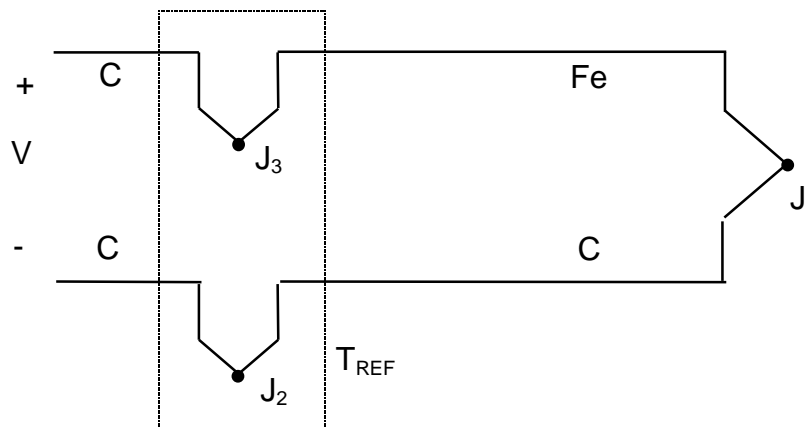


FIGURA 2.10. Circuito equivalente

Entonces, $V = \alpha \cdot (T_{J1} - T_{JREF})$, donde α es el coeficiente de Seebeck para una termocupla Fe-Constantán.

Las uniones J_3 y J_4 toman el lugar del baño de hielo. Estas dos uniones ahora serán la **unión de referencia**.

Ahora se procede con el siguiente paso lógico: Medir directamente la temperatura del bloque isotérmico (la unión de referencia) y utilizar esta información para calcular la temperatura desconocida T_{J_1} .

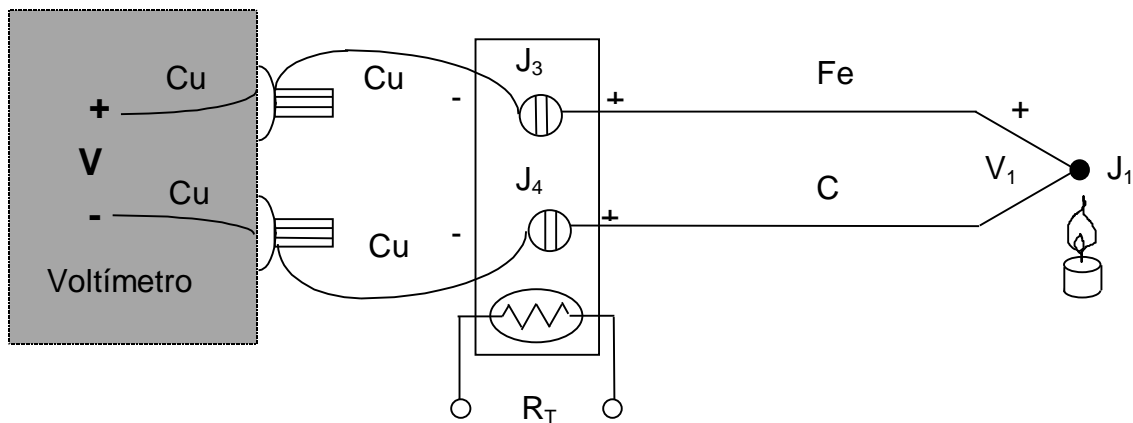


FIGURA 2.11. Unión de referencia externa sin baño de hielo.

Un termistor cuya resistencia R_T es función de la temperatura, provee un medio para medir la temperatura absoluta de la unión de referencia. Las uniones J_3 y J_4 , y el termistor se asumen a la misma temperatura, debido al diseño del bloque isotérmico. Usando un voltímetro digital bajo el control de un computador, es muy sencillo:

1. Se mide R_T , se halla T_{REF} y se convierte T_{REF} en su equivalente de voltaje de referencia V_{REF} .
2. Se mide V y se resta V_{REF} para hallar V_1 y convertirlo luego a T_{J_1} .

Este procedimiento es conocido como **compensación por Software**, porque por medio de un software de computador, se realiza la compensación de la unión de referencia.

El sensor de temperatura del bloque isotérmico puede ser cualquier dispositivo que tenga su característica proporcional a la temperatura absoluta: un RTD, un termistor o un sensor IC.

Un pregunta lógica sería: Si se puede tener un dispositivo que puede medir temperatura absoluta (como un RTD o termistor), porqué no los utilizamos en lugar de la termocupla que requiere una compensación de la unión de referencia?

La respuesta, es que el termistor, el RTD y los sensores IC sólo son útiles en ciertos rangos de temperatura.

Las termocuplas por otro lado pueden ser utilizadas en un amplio rango de temperaturas y optimizadas para ciertas atmósferas.

Una de las desventajas de la compensación por Software es que se pueden monitorear varias termocuplas de diferentes tipos al mismo tiempo, ya que la compensación para cada una se hace por software.

En la **compensación por Hardware**, se puede insertar una batería para cancelar el voltaje de la unión de referencia. La combinación de éste voltaje de compensación por hardware y el voltaje de la unión de referencia es lo mismo que una unión a 0°C.

El voltaje de compensación e , es función de la temperatura del resistor R_T . El voltaje V se referencia ahora a 0°C y puede ser leído directamente y convertido a temperatura usando las tablas de la NBS.

Otro nombre para este circuito es el de **punto de referencia electrónico de hielo**. Estos circuitos están comercialmente disponibles para uso con cualquier voltímetro y una amplia variedad de termocuplas.

La mayor desventaja es que el punto de hielo es único para cada termocupla.

La ventaja de la compensación por Hardware es que elimina la necesidad de computar la temperatura de referencia.

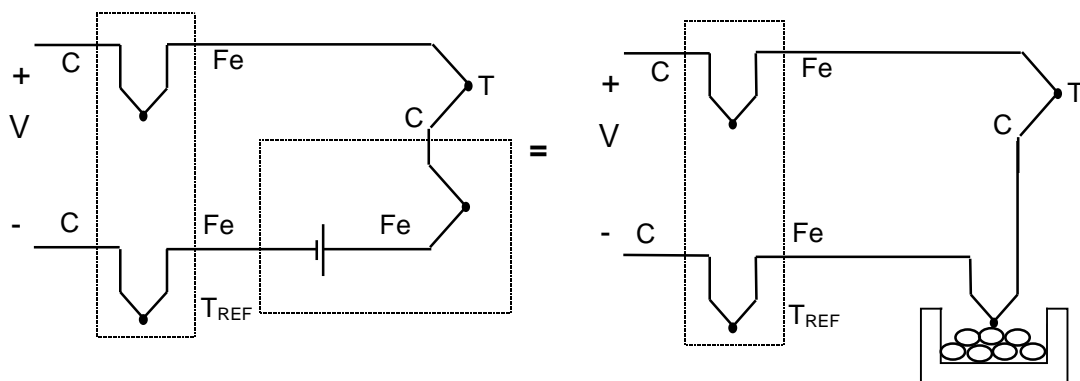


FIGURA 2.12. Compensación por Hardware.

Conversión de voltaje a temperatura: La compensación por hardware y software se utilizan para sintetizar el punto de hielo. Ahora se debe convertir la lectura del voltímetro digital en temperatura. Desafortunadamente, la relación voltaje versus temperatura de una termocupla no es lineal. Los voltajes de salida para las termocuplas más comunes se muestran en la figura 2.13.

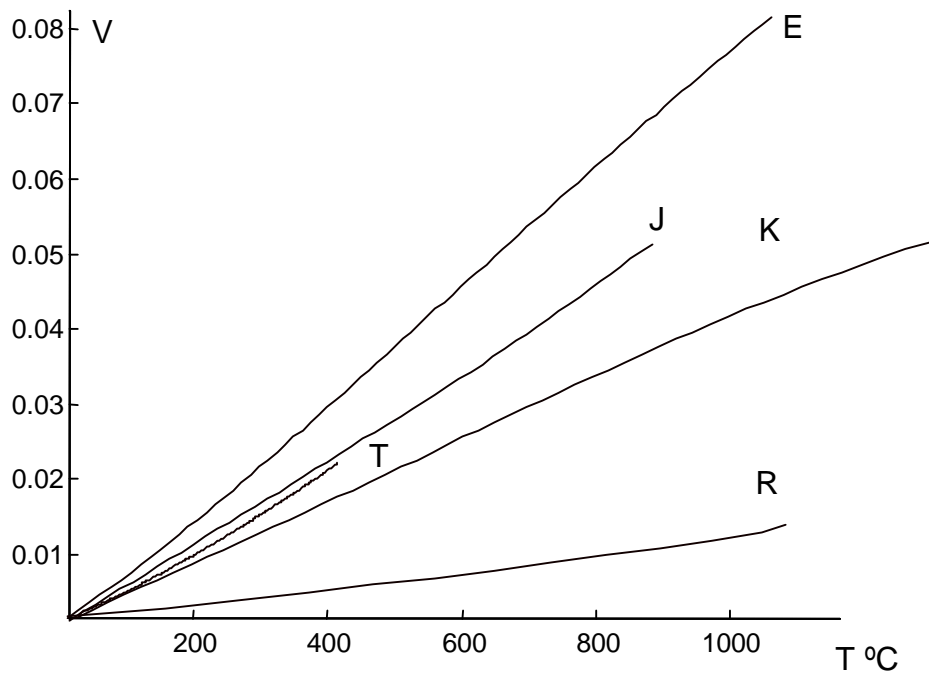


FIGURA 2.13. Temperatura de termocuplas vs voltaje

Sólo la termocupla tipo K es aproximadamente constante en el rango de 0 a 1000°C. En consecuencia, la tipo K puede ser usada con un voltímetro + amplificador y una referencia de punto de hielo externa y así obtener una moderada exactitud leyendo directamente la temperatura.

La mayor exactitud en la conversión puede ser obtenida por la lectura del voltímetro y consultando las tablas de la NBS (National Bureau of Standarts) o aplicando la ecuación de conversión de temperatura: $T = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n$

donde:

- T : temperatura en °C
- x : voltaje de termocupla
- a : Coeficientes polinomiales, únicos para cada termocupla
- n : máximo orden del polinomio

Al incrementar n, se incrementa la exactitud. Un número representativo es n = 9 para ±1°C de exactitud. En la tabla 2.2 se muestran los coeficientes polinomiales de la NBS

Este espacio ha sido dejado
en blanco intencionalmente

TABLA 2.2 Coeficientes polinomiales NBS

Todos los procedimientos anteriores asumen que el voltaje de la termocupla puede ser medido fácil y precisamente; sin embargo, una rápida mirada a la gráfica de la figura 2.13 muestra que los voltajes de salida son muy pequeños. Examine los requerimientos del sistema de voltímetro:

| TIPO DE TERMOCUPLA | COEFICIENTE DE SEEBECK (μ v/ $^{\circ}$ C) A 20 $^{\circ}$ C | SENSIBILIDAD DEL VOLTÍMETRO PARA 0.1 $^{\circ}$ C (μ v) |
|--------------------|---|--|
| E | 62 | 6.2 |
| J | 51 | 5.1 |
| K | 40 | 4.0 |
| R | 7 | 0.7 |
| S | 7 | 0.7 |
| T | 40 | 4.0 |

TABLA 2.3. Sensibilidad requerida para el voltímetro

Para la termocupla tipo K comúnmente utilizada, el voltímetro debe tener una resolución de 4 μ V para detectar un cambio de 0.1 $^{\circ}$ C. La magnitud de ésta señal es una abierta invitación para que el ruido haga estragos en cualquier sistema. Por ésta razón los diseñadores de instrumentos utilizan algunas técnicas fundamentales de rechazo al ruido, incluyendo filtración, integración y guardas.

Rechazo al ruido:

Filtros análogos: Un filtro análogo puede ser usado directamente en la entrada de un voltímetro para reducir el ruido. Esto reduce las interferencias dramáticamente, pero causa que el voltímetro responda más lentamente ante las entradas paso.

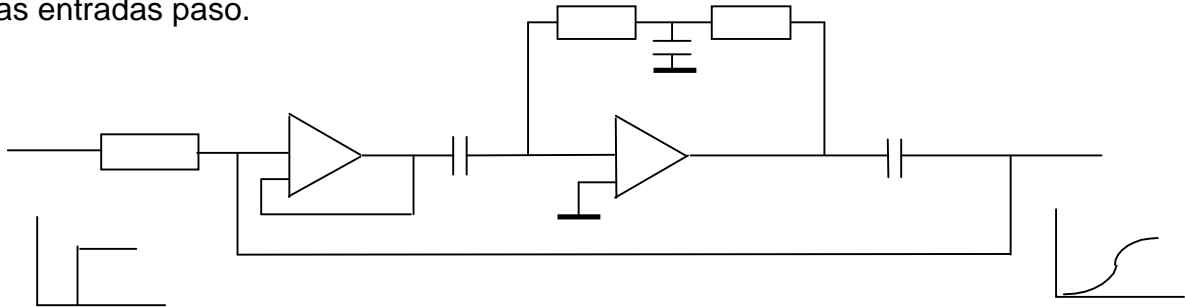


FIGURA 2.14. Filtro análogo

Guarda: La guarda es una técnica usada para reducir la interferencia desde cualquier fuente de ruido que es común a ambos cables terminales del voltímetro, es decir, desde fuentes de ruido en *modo común*.

Asuma que el cable de una termocupla ha sido enviado a través del mismo conducto que una línea de 220V AC. La capacitancia entre las líneas de potencia

y las líneas de la termocupla pueden crear una señal AC de una magnitud aproximadamente igual en ambos alambres de la termocupla.

Esta señal en *modo común* no es problema en un circuito ideal, pero el voltímetro no es ideal. Este tiene alguna capacitancia entre el terminal común y la conexión a tierra (chasis). La corriente fluye a través de esta capacitancia y a través de la resistencia del cable de la termocupla, creando una señal de ruido en modo normal.

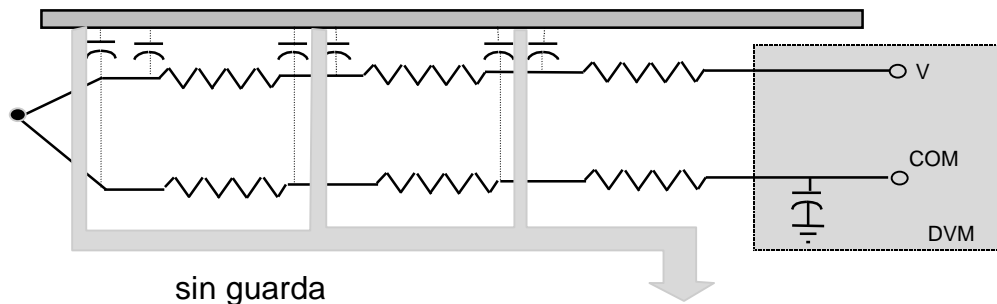


FIGURA 2.15 Señal de ruido normal en una termocupla sin guarda

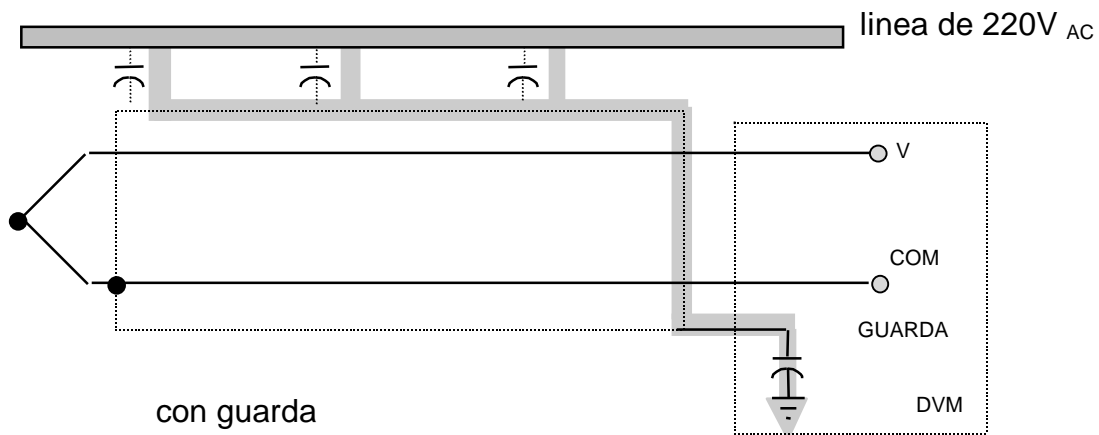


FIGURA 2.16. Eliminación de la corriente de interferencia mediante guardas

La guarda, físicamente es una caja metálica flotante que rodea completamente el circuito del voltímetro, está conectada a una cubierta que rodea el cable de la termocupla, y sirve para puentear la corriente de interferencia.

Este método de conectar la cubierta a la guarda sirve para eliminar *lazos de tierra* creados cuando las cubiertas son conectadas a tierra.

La guarda de DVM (voltímetro) es especialmente útil en la eliminación de voltajes de ruido, creados cuando la termocupla está en contacto directo con una fuente de ruido de modo común.

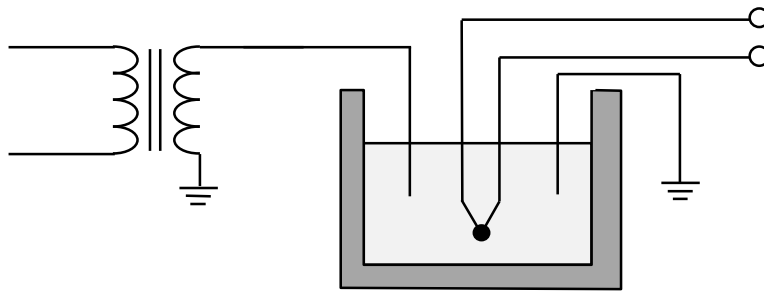


FIGURA 2.17. Termocupla en contacto directo con la fuente de ruido

En la Figura 2.17 se busca medir la temperatura en el centro de un baño de metal fundido que está siendo calentado por una corriente eléctrica. el potencial en el centro del baño es 120 Vrms. El circuito equivalente es:

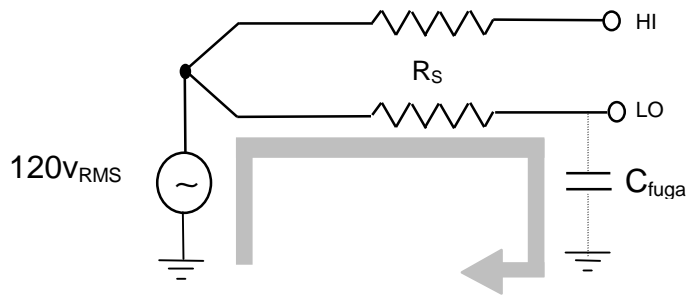


FIGURA 2.18. Corriente de ruido

La capacitancia de fuga del voltímetro digital entre el terminal LO y el chasis ocasiona un corriente que fluye en el cable inferior, la cual produce un voltaje de ruido a través de la resistencia de la termocupla R_s . Este voltaje aparece directamente a través de los terminales HI y LO del voltímetro causando una medida de ruido. Si se utiliza una guarda conectada directamente a la termocupla, se reduce drásticamente la corriente que fluye a través del terminal LO. La corriente de ruido ahora fluye en el terminal de guarda no afecta la lectura.

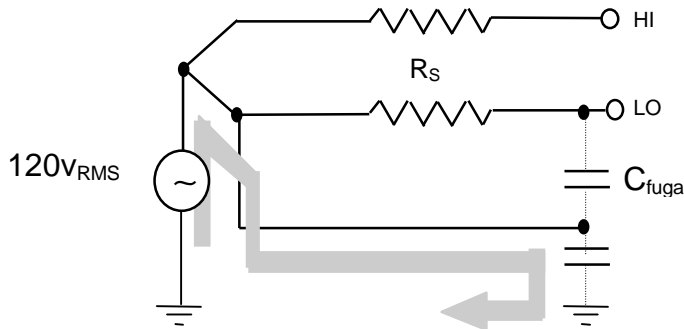


FIGURA 2.19. Corriente de ruido fluyendo a través de la guarda.

Para reducir la posibilidad de ruido inducido magnéticamente, la termocupla puede ser torcido de una manera uniforme.

Precauciones prácticas:

Se han discutido los conceptos de la unión de referencia, como usar un polinomio para extraer el dato de temperatura absoluta, y se ha mirado el sistema de adquisición de datos para minimizar los efectos del ruido. Ahora se mirará el cable mismo de la termocupla. La curva polinomial es fiable si el cable de la termocupla está perfecto, esto es, si no ha sido descalibrado durante la medición de temperatura. Muchos errores de medición pueden ser originados por una de éstas fuentes primarias:

- Conexión de la unión pobre

- Descalibración del alambre de la termocupla
- Puenteado térmico
- Ruido y corrientes de fuga
- Especificaciones de la termocupla
- Documentación

Conexión pobre de la unión: existen muchas formas aceptables de unir los dos alambres de una termocupla: soldadura, soldadura de plata, remachado, etc.. Cuando los alambres de la termocupla son soldados, se introduce un tercer metal en el circuito de la termocupla, pero como la temperatura en ambos lados de la termocupla es la misma, la soldadura no introduce error. La soldadura limita la máxima temperatura de la unión. Para alcanzar una temperatura mayor, la unión puede ser remachada. Pero la remachada no es un proceso suave. El sobrecalentamiento puede degradar la termocupla, y el gas utilizado para remachar y la atmósfera en la cual es remachado pueden ambos difundir en el metal de la termocupla, cambiando sus características.

Una pobre soldadura, puede resultar es una conexión abierta, pero esta puede ser detectada fácilmente en una medición.

Descalibración: La descalibración puede hacer que la termocupla registre una temperatura incorrecta. La descalibración puede resultar de la difusión de partículas atmosféricas en el metal, causadas por temperaturas extremas o por gradientes de temperatura.

Impedancia en paralelo: Las altas temperaturas pueden afectar los aisladores de los alambres de la termocupla. La resistencia de aislamiento decrece con el aumento de temperatura y puede crear un unión virtual.

Acción galvánica: El recubrimiento utilizado en el aislamiento de algunas termocuplas puede formar un electrolito en presencia de agua. Esto crea una acción galvánica, la cual puede dar una salida cientos de veces mayor que la del efecto Seebeck.

Puenteado térmico: Ninguna termocupla puede ser hecha sin masa. Desde luego se utiliza energía para calentar cualquier masa, la termocupla alterará ligeramente la temperatura a medir. Si la masa a ser medida es pequeña, la termocupla naturalmente debe ser pequeña. Pero una termocupla hecha con alambres pequeños es más susceptible a problemas de contaminación, esfuerzos e impedancia en paralelo. Para minimizar éstos efectos, se utiliza un cable de extensión a la termocupla, el cual, está fabricado con metales que tiene coeficientes Seebeck muy similares a los del tipo particular de termocupla.

2.3.2 Las RTD

El mismo año que Seebeck hizo su descubrimiento de la termoelectricidad, Sir H. Davy anunció que la resistividad de los materiales variaba con la temperatura. Cinco años más tarde W. Siemens probó el uso del platino como elemento en un termómetro de resistencia. El platino sigue siendo usado hoy en día como elemento primario de alta precisión.

Los RTDS se fabrican de alambre doble bobinado y rodeados de vidrio o cerámica.

Otros se fabrican en película metálica depositada sobre un sustrato cerámico.

Todos los metales producen un cambio positivo en la resistencia para un cambio positivo en la temperatura. Como se observa, el error es minimizado cuando el valor de la RTD es grande. Esto implica una alta resistividad.

Aunque relativamente costoso, el platino es la elección común para la producción de termómetros industriales de resistencia; se utilizan metales más económicos como el cobre y el níquel para aplicaciones más exigentes. El platino es el metal perfecto porque es químicamente inerte, tiene características lineales de resistencias y temperatura y la gama de temperatura va de -200° a 800° C.

El cobre se utiliza hasta 120° c, el níquel tiene un rango limitado y varía en el tiempo(deriva).

Medición de resistencia.

Los valores típicos de RTD son de 10Ω hasta 100Ω a 0° C. El coeficiente estándar del platino es $\alpha(\text{platino}) = 0.00385$ para 100Ω $0.385\Omega/^{\circ}$ C. Para un alambre de 100Ω esto corresponde a $0.385\Omega/^{\circ}$ C a 0° C.

Una impedancia en los cables que conectan al sensor, por pequeña que sea, contribuye significativamente al error en la medición de la temperatura.

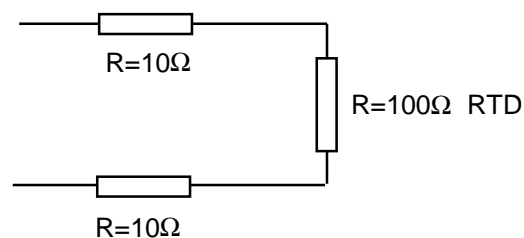


FIGURA 2.20. Efecto de la resistencia de los cables

Una impedancia de 10Ω en los cables implica $10/0.385 = 26^\circ\text{C}$ de error en la medición. Además el coeficiente de temperatura del cable puede contribuir a un error medible.

El método clásico de solución de este problema es el uso de un puente.

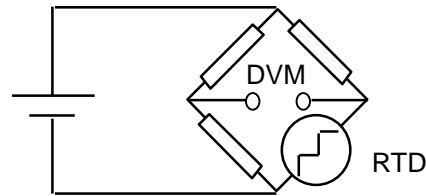


FIGURA 2.21. Puente de Wheastone

LA salida de voltaje del puente es una indicación indirecta de la resistencia del RTD. El puente requiere cuatro cables de conexión, una fuente externa y tres resistores que tengan coeficiente de temperatura cero. Para evitar que los tres resistores estén a la misma temperatura que la RTD, la RTD es separada por medio de dos cables de extensión:

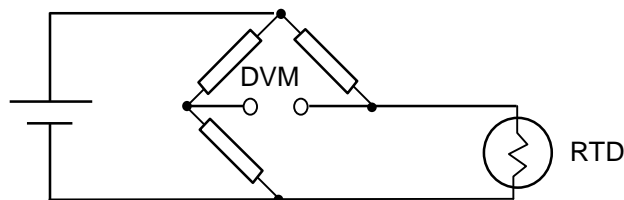


FIGURA 2.22. Extensión de la RTD

Esta extensión recrea el problema que se tenía inicialmente: La impedancia de los cables de extensión afectan la lectura de temperatura. Este efecto ser minimizado usando una configuración de puente con tres cables:

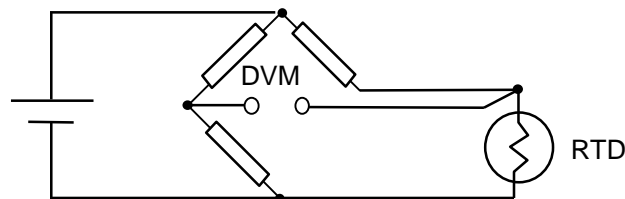


FIGURA 2.23. Puente de tres cables.

Si A y B tienen la misma longitud sus efectos resistivos se cancelan. El tercer alambre no sensa corriente.

El puente de Wheastone crea una relación no lineal entre el cambio de resistencia y la salida de voltaje:

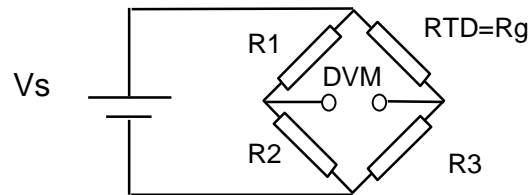


FIGURA 2.24. Puente de Wheastone

Si se conoce V_s y V_o , se puede hallar R_g y resolver para la temperatura. El voltaje de desbalance V_o del puente con $R_1 = R_2$ es:

$$V_o = V_s \left(\frac{R_3}{R_3 + R_g} \right) - V_s \left(\frac{1}{2} \right)$$

Requiriendo una ecuación adicional para convertir la salida de voltaje es una impedancia equivalente RTD.

4 Cables: La técnica de usar una fuente de corriente con un voltímetro digital remoto alivia muchos de los problemas asociados con el puente. La salida de voltaje leída por el DVM es directamente proporcional a la resistencia RTD, y sólo una ecuación de conversión es necesaria.

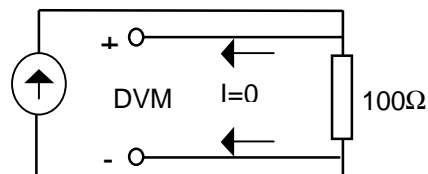


FIGURA 2.25. Medida de resistencia con cuatro cables.

Precauciones prácticas:

Construcción: Debido a su construcción, la RTD es más frágil que la termocupla.

Autocalentamiento: A diferencia de la termocupla, la RTD no es autoalimentada. Una corriente debe pasar a través del dispositivo para producir un voltaje que debe ser medido. La corriente causa un calentamiento de la RTD por efecto Joule ($I^2 R$), cambiando su temperatura y produciendo error en la medición.

Thermal Shunting: El puente térmico la alteración medición de resistencia por la inserción de un transductor. Esto es más problemático con las RTDs que con las termocuplas, ya que el tamaño de las RTDs es mucho mayor. Es más problemático es un RTD que es una termocupla.

Fem térmica: Las conexiones de platino - cobre que se hacen en la RTD pueden causar un voltaje de offset térmico.

2.3.3 El termistor

Al igual que la RTD, el termistor es otro resistor sensitivo de temperatura. Donde la termocupla es el más versátil transductor de temperatura y el PRTD es el más estable, la palabra que mejor describe el termistor es sensitivo. De las tres categorías de sensores, el termistor exhibe pero lejos el mas extenso parámetro de cambio con la temperatura.

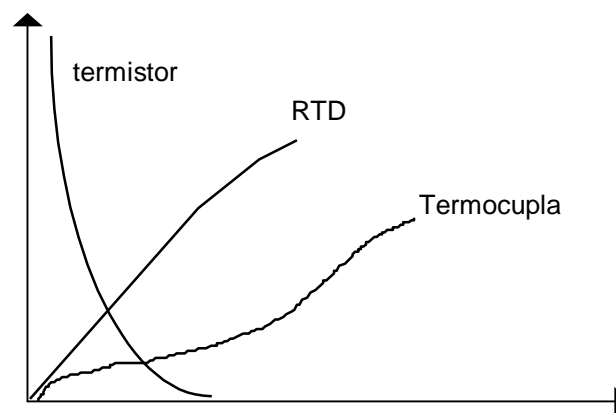


FIGURA 2.26. Comparación de la sensibilidad de los sensores de temperatura

Los termistores generalmente están compuestos de materiales semiconductores. Aunque termistores con coeficientes positivos de temperatura están disponibles (TC), muchos termistores tiene un coeficiente negativo, esto es su resistencia decrece con el aumento de temperatura.

Con una NTC es posible detectar pequeños cambios que no son posibles detectar con una termocupla o RTD.

El precio a pagar por la sensibilidad es la no linealidad. El termistor es extremadamente no lineal y depende de los procesos de fabricación, razón por la cual los fabricantes no han estandarizado las curvas de calibración.

Una curva individual puede tener la ecuación:

$$1/T = A + B \ln R + C (\ln R)^3$$

Medición.

La medición con puente no se requiere.

Ejemplo: un valor común de termistor es 5 k Ω a 25 $^{\circ}$ C con T.C de 4%/ $^{\circ}$ C

Una resistencia de los cables de 10 Ω sólo producen un error de a 0.05 $^{\circ}$ C error.

Desventajas.

-Descalibración

-Limitado a algunos cientos de grados $^{\circ}$ C

-Muy pequeños- responde rápidamente pero tiene autocalentamiento

-Más frágiles que RTD y termocuplas

2.3.5. Sensor de temperatura lineal monolítico:

Actualmente existen transductores de temperatura integrados. Estos se encuentran disponibles en dos configuraciones: con salida de voltaje o de corriente. Ambos proporcionan una salida que es linealmente proporcional a la temperatura absoluta. Valores típicos son de 1 μ A/ $^{\circ}$ K y 10 mV/ $^{\circ}$ K. Excepto por el hecho de que la salida es lineal con la temperatura, estos dispositivos presentan un rango muy limitado de temperatura. Tienen los mismos problemas de fragilidad, autocalentamiento y requieren una fuente externa.

Estos dispositivos proveen un forma muy conveniente de suministrar un voltaje análogo proporcional a la temperatura, tal como se necesita en el circuito de compensación de la unión de referencia de la termocupla.

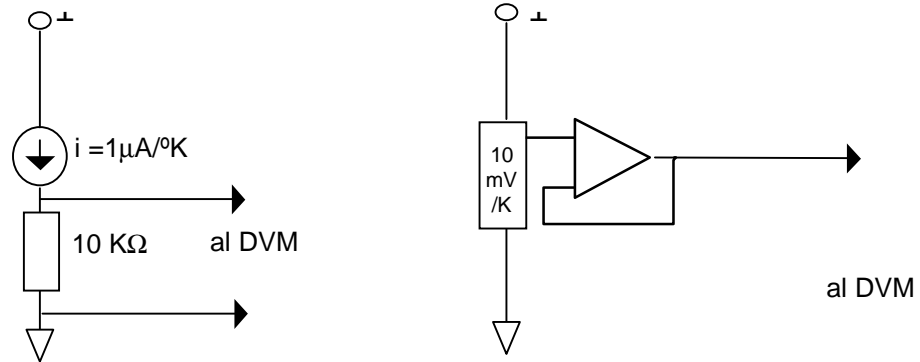


FIGURA 2.27. a. Sensor de corriente b. Sensor de voltaje

En la siguiente Tabla se comparan los diferentes tipos de sensores de temperatura:

| | TERMOCUPLA | RTD | TERMISTOR | SENSOR C.I. |
|-------------|--|--|---|--|
| CURVA | | | | |
| VENTAJAS | <ul style="list-style-type: none"> • Autoalimentado • Simple • Robusto • Económico • Amplia variedad • Amplio rango de temperatura | <ul style="list-style-type: none"> • Más estable • Más preciso • Más lineal que la termocoupla | <ul style="list-style-type: none"> • Alta salida • Rápido • Medida de resistencia con dos alambres | <ul style="list-style-type: none"> • Más lineal • Salida bastante alta • Económico |
| DESVENTAJAS | <ul style="list-style-type: none"> • No lineal • Bajo voltaje • Requiere referencia • Poca estabilidad • Baja sensibilidad | <ul style="list-style-type: none"> • Costoso • Requiere fuente de corriente • Pequeño cambio de resistencia • Resistencia absoluta baja • Autocalentamiento | <ul style="list-style-type: none"> • No-lineal • Rango de temperatura limitado • Frágil • Requiere fuente de corriente • Autocalentamiento | <ul style="list-style-type: none"> • $T < 200^{\circ}\text{C}$ • Requiere fuente de potencia • Autocalentamiento • Configuración limitada • Lento |

TABLA 2.4. Comparación de los diferentes sensores de temperatura

2.4 Medición de flujo:

El flujo es otra de las variables de proceso que se miden con mucha frecuencia en la industria, siendo muy importante desde el punto de vista económico. En algunas operaciones, la capacidad para obtener mediciones de flujo precisas es tan importante que pueden hacer la diferencia entre obtener beneficios económicos o pérdidas. En otros casos, las mediciones imprecisas de flujo (o fallas en la toma de mediciones) pueden causar serios problemas.

En la mayor parte de medidores de flujo, la rata de flujo es determinada inferencialmente mediante la medición de la velocidad del líquido o los cambios en la energía cinética. La velocidad depende de la presión diferencial que está forzando al líquido a través de la tubería o el ducto. Debido a que el área transversal de la tubería es conocida y permanece constante, la velocidad promedio es una buena indicación de la rata de flujo. La relación básica para determinar la rata de flujo de un líquido en tal caso es:

$$Q = V \times A$$

Donde:

Q = flujo de líquido a través de la tubería

V = velocidad promedio del flujo

A = área transversal de la tubería

Otros factores que afectan la rata de flujo de líquido incluyen:

- Viscosidad del líquido
- Densidad
- Fricción del líquido en contacto con la tubería

La medición directa de fluidos puede hacerse con flujómetros de desplazamiento positivo. Estas unidades se mueven debido a incrementos específicos del líquido y el flujo total es la acumulación de los incrementos medidos, los cuales pueden ser contados por medios mecánicos o electrónicos.

2.4.1 Número de Reynolds:

El desempeño de un flujómetro está también influenciado por una unidad adimensional llamada el número de Reynolds. Este se define como la relación entre las fuerzas inerciales del líquido y las fuerzas de arrastre.

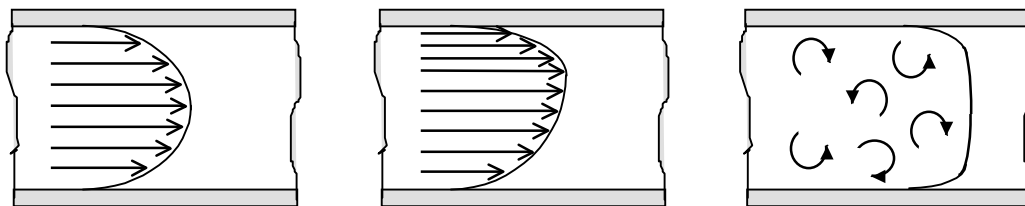
La ecuación es:

$$R = \frac{3160 \times Q \times G_t}{D \times \mu}$$

Donde:

R = Número de Reynolds
 Q = rata de flujo del líquido en gpm (galones por minuto)
 G_t = Gravedad específica del líquido
 D = Diametro interno de la tubería en pulgadas
 μ = Viscosidad del líquido en cp (centipoises)

La rata de flujo y la gravedad específica son fuerzas inerciales, y el diámetro del tubo y la viscosidad son fuerzas de arrastre. El diámetro del tubo y la gravedad específica permanecen constantes para la mayoría de aplicaciones en líquidos. A muy bajas velocidades o altas viscosidades, R es bajo, y el líquido fluye en capas lisas con la velocidad más alta en el centro de la tubería y bajas velocidades en la pared de la tubería donde las fuerzas viscosas lo restringen. Este tipo de flujo es llamado **flujo laminar**. Los valores de R están por debajo de 2000, para flujo laminar. La característica de éste tipo de flujo, es un perfil parabólico de velocidades. (Ver figura 2.28).



a. Flujo laminar simétrico b. Flujo laminar asimétrico c. Flujo turbulento

FIGURA 2.28. Flujos laminar y turbulentos.

Sin embargo, muchas aplicaciones envuelven flujo turbulento, con valores de R por encima de 3000. El flujo turbulento ocurre a altas velocidades o bajas viscosidades. El flujo rompe arriba en remolinos turbulentos que fluyen a través de la tubería a la misma velocidad promedio. La velocidad del fluido es menos significativa, y el perfil de velocidad es mucho más uniforme. Una zona de transición existe entre el flujo turbulento y el flujo laminar. Dependiendo de la configuración de la tubería y otras condiciones de la instalación, el flujo puede ser o laminar o turbulento en esta zona.

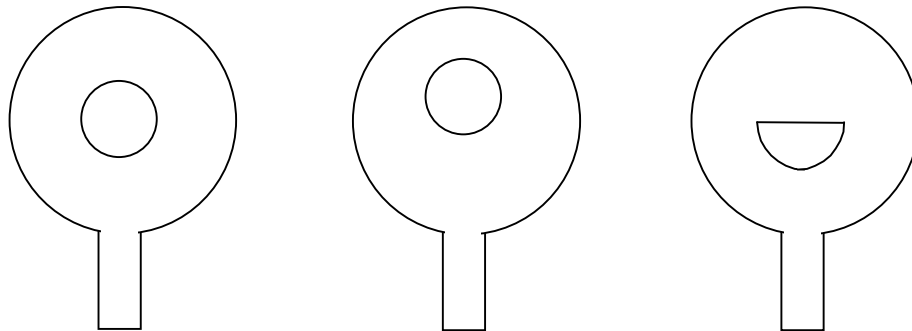
2.4.2 TIPOS DE MEDIDORES DE FLUJO:

Medidores de presión diferencial: El uso de la presión diferencial para inferir la rata de flujo de un fluido es bastante conocida en la industria. Los flujómetros de presión diferencial son, por muchas razones, las unidades más comunes usadas hoy en día. Se estima que cerca del 50 % de las aplicaciones de medición de flujo de fluidos utilizan éste tipo de unidad.

El principio básico de operación de los medidores de flujo de presión diferencial consiste en que la caída de presión a través del medidor es proporcional a la raíz cuadrada de la tasa de flujo. La tasa de flujo se obtiene a partir de la medición de la presión diferencial y posterior extracción de la raíz cuadrada..

Los flujómetros de presión diferencial, al igual que muchos flujómetros, tienen un elemento primario y uno secundario. El elemento primario ocasiona un cambio en la energía cinética, lo cual provoca un cambio en la presión diferencial en el tubo. El elemento secundario se encarga de medir el cambio en la presión diferencial, convirtiéndolo en una señal o lectura que representa el valor real de flujo.

Placa orificio: es uno de los flujómetros de líquidos más populares en uso hoy en día. La placa orificio es simplemente una placa de metal perforada, que se instala en la tubería. El orificio de la placa puede ser del tipo concéntrico, excéntrico, cónico o segmental. (Ver Fig. 2.29)



a. Concéntrico

b. Excéntrico

c. Segmental

FIGURA 2.29. Tipos de placa orificio

En la práctica, la placa orificio se instala entre las bridas o *flanges*. Actuando como el elemento primario, el orificio constriñe el flujo de líquido para producir una presión diferencial a través de la placa. Se usan tomas de presión a cada lado de la placa para detectar la diferencia, las cuales pueden tener diferentes disposiciones (ver figura 2.30).

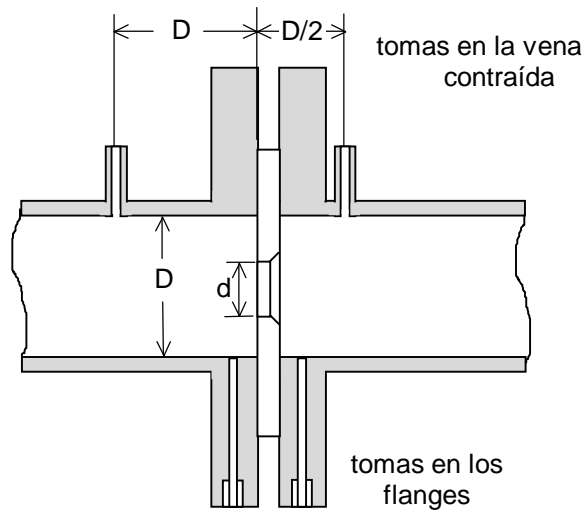


FIGURA 2.30. Placa orificio con tomas en la vena contraída o en los flanges

La mayor ventaja de la placa orificio es que no tiene partes móviles y su costo no se incrementa significativamente con el tamaño de la tubería, además de que no necesita adaptaciones especiales para colocarlas en la tubería.

La exactitud de los flujómetros de orificio depende de las condiciones de instalación, el área del orificio y de las propiedades físicas del líquido que está siendo medido. La precisión obtenida con la placa está del orden del 1 al 2%.

Tubo Venturi: permite la medición de caudales 60% superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo 10 a 20% de la presión diferencial. Su precisión es alta y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos.

(Ver Fig. 2.31)

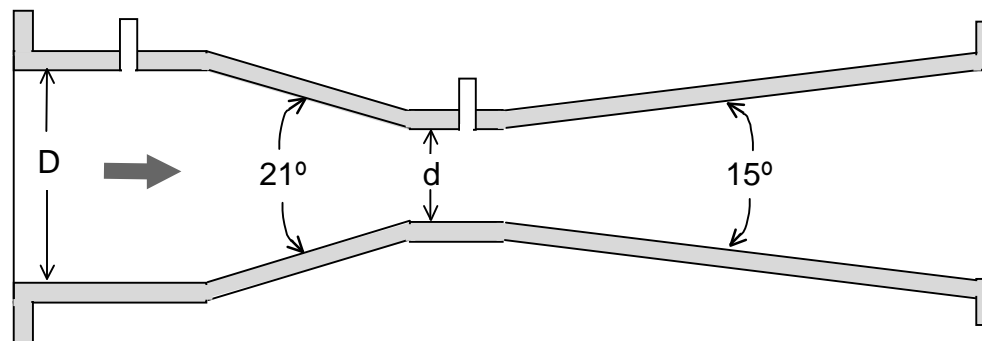


FIGURA 2.31. Tubo Venturi

Un tubo Venturi es esencialmente una sección de tubería con una entrada estrecha y una garganta recta. Como el líquido pasa a través de la garganta, su velocidad se incrementa, ocasionando una presión diferencial entre la región de entrada y la de salida.

Este medidor de flujo no tiene partes móviles y puede ser utilizado con muchos líquidos incluso aquellos con gran contenido de sólidos. El tubo Venturi permite la medición de caudales 60% superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo 10 a 20% de la presión diferencial. El coste del mismo es elevado y su precisión es del orden de $\pm 1\%$.

Toberas: se sitúa en la tubería con dos tomas, una anterior y la otra en el centro de la sección más pequeña. (ver Figura 2.32) . La tobera permite caudales 60% superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio. Los líquidos con sólidos suspendidos pueden ser medidos también, sin embargo no es recomendable su uso en líquidos altamente viscosos o éstos conteniendo grandes cantidades de sólidos viscosos.

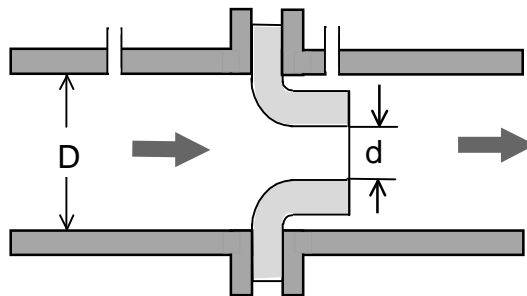


FIGURA 2.32. Medidor de flujo tipo Tobera

Tubo Pitot: mide la diferencia entre la presión total y la estática, o sea, la presión dinámica, la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad (Ver figura 2.33)

El tubo Pitot es sensible a las variaciones en la distribución de velocidades en la sección de la tubería, de aquí que se emplee en flujos laminares. La máxima exactitud en la medida se consigue efectuando varias medidas en puntos determinados y promediando las velocidades medidas. Su precisión es del orden del 3 al 5%, y se emplea normalmente en grandes caudales de fluidos limpios con baja pérdida de carga.

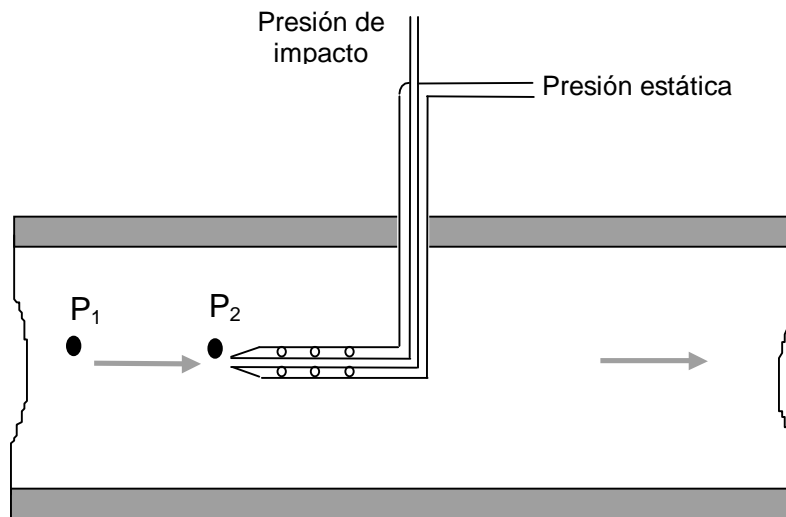


FIGURA 2.33. Tubo Pitot

La ecuación correspondiente es:

$$\frac{P_2}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2}$$

donde:

P_2 = presión de impacto en el punto donde el líquido anula su velocidad

P_1 = presión estática absoluta del fluido

ρ = densidad

V_1 = velocidad del fluido en el eje del impacto

Entonces:

$$V_1 = \sqrt{\frac{(P_2 - P_1) \cdot 2}{\rho}}$$

Medidores de área variable (rotámetros): los rotámetros consisten esencialmente de un tubo estrecho y un flotador que cambia su posición proporcionalmente al flujo de fluido (Ver Fig. 2.34).

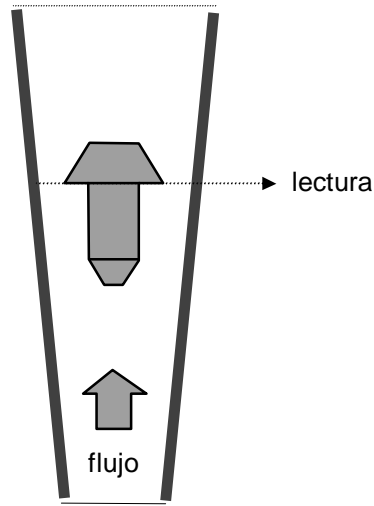


FIGURA 2.34. Medidor de flujo de área variable (rotámetro)

Su operación se basa en el principio de área variable, mediante el cual, el fluido levanta un flotador en un tubo estrecho, aumentando el área para el paso del fluido. A mayor flujo, mayor es la elevación del flotador. La altura del flotador es directamente proporcional al valor del flujo. Su posición exacta es en el punto donde la presión diferencial entre las superficies superior e inferior se balancea con el peso del flotador.

Debido a que la rata de flujo puede ser leída directamente sobre una escala montada cerca del tubo, no es necesario un dispositivo secundario de lectura de flujo. Sin embargo, si se desea, un dispositivo sensor automático puede ser utilizado para medir el nivel del flotador y transmitir una señal de flujo..

Es importante anotar que el rotámetro debe orientarse y montarse verticalmente porque la posición del flotador es dependiente de la gravedad.

Los tubos de los rotámetros se fabrican en vidrio, metal o plástico; y los diámetros varían desde 1/4 hasta 6 pulgadas.

Medidores de desplazamiento positivo: los medidores de desplazamiento positivo miden el caudal en volumen contando o integrando volúmenes separados del líquido. Las partes mecánicas del instrumento se mueven aprovechando la energía del fluido y dan lugar a una pérdida de presión. La precisión depende de la tolerancia con que se fabrican las piezas mecánicas y del tamaño del instrumento. Existen cuatro tipos básicos de medidores:

Medidor de disco oscilante: dispone de un disco plano móvil montado sobre una esfera concéntrica localizada en la cara plana de una cámara

circular. Cuando el fluido pasa, el disco toma un movimiento de balanceo que hace rotar un eje conectado a un contador. Cada vuelta es proporcional a la cantidad específica de flujo. (Ver Fig. 2.35)

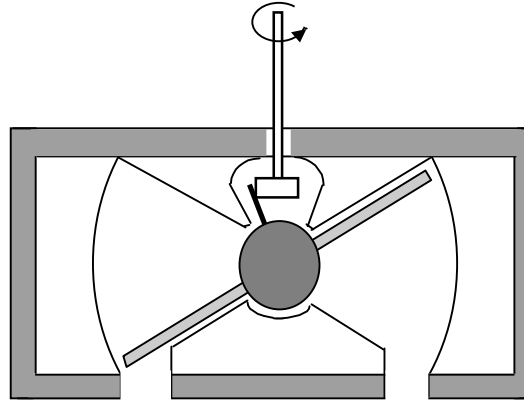


FIGURA 2.35. Medidor de disco oscilante

Medidor de pistón oscilante: se compone de una cámara de medida cilíndrica con una placa divisoria que separa los orificios de entrada y de salida. La única parte móvil es un pistón cilíndrico que oscila suavemente en un movimiento circular entre las dos caras planas de la cámara, y que está provisto de una ranura que desliza en la placa divisoria fija que hace de guía del movimiento oscilante. El movimiento del pistón oscilante es transmitido magnéticamente al exterior de la pared de la cámara siendo sensado por una sonda de efecto Hall o un magneto seguidor.

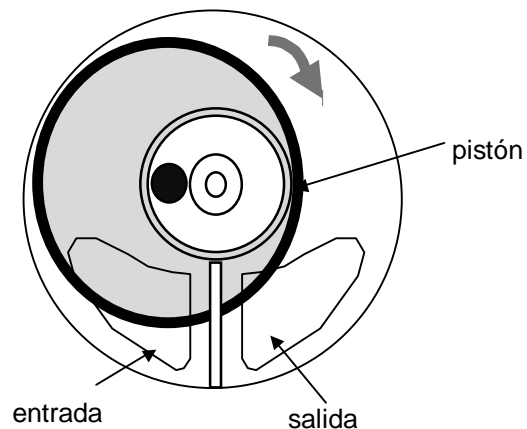


FIGURA 2.36. Medidor de pistón oscilante

Medidores de engranajes ovals: disponen de dos engranajes ovals que giran debido a la presión diferencial creada por el líquido. La acción del líquido

produce un giro suave de par casi constante, que es transmitido al exterior a un sensor de efecto Hall o a un contador mecánico. (Ver Figura 2.37).

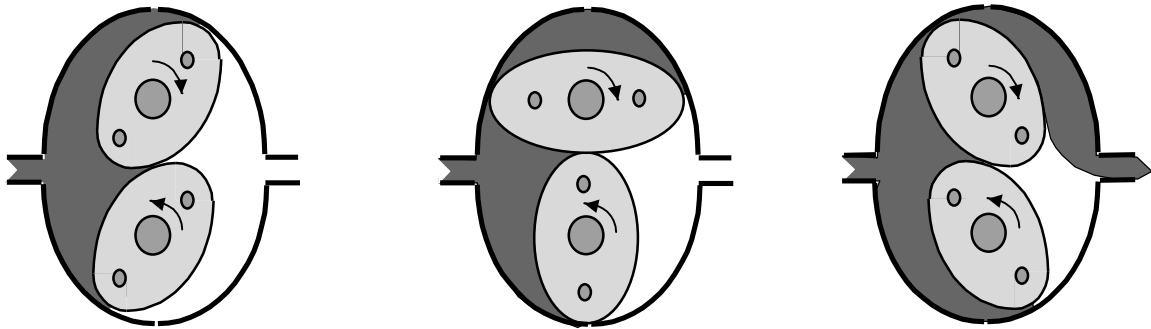


FIGURA 2.37. Medidor de engranajes ovales.

Medidores de velocidad: éstos instrumentos operan linealmente con respecto al volumen de la rata de flujo. Debido a que su relación no es cuadrática, los rangos disponibles son mayores. Los medidores de velocidad tienen una muy baja sensibilidad a los cambios de viscosidad cuando son usados con números de Reynolds mayores de 10.000. Muchos medidores del tipo de velocidad están equipados con bridas (flanges) que permiten su conexión directa a las tuberías.

Medidores de turbina: Consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. la velocidad del fluido ejerce una fuerza de arrastre en el rotor; la diferencia de presiones debida al cambio de área entre el rotor y el cono posterior ejerce una fuerza igual y opuesta. De éste modo el rotor queda equilibrado hidrodinámicamente y gira entre los conos anterior y posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales evitando así un rozamiento adicional.

La velocidad de rotación es directamente proporcional al flujo y puede ser medida por un detector inductivo, una celda fotoeléctrica o por engranajes. Los pulsos eléctricos pueden ser contados y totalizados. (Ver Fig. 2.38)

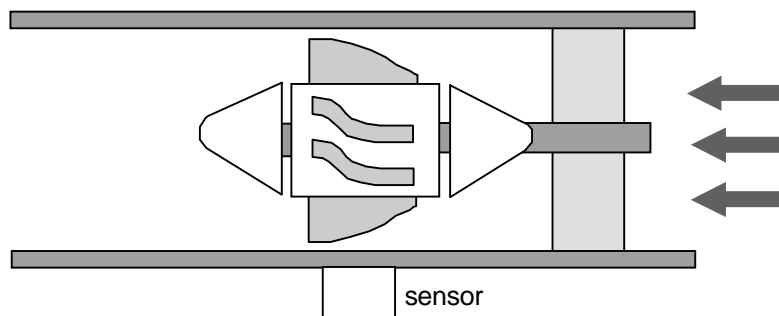


FIGURA 2.38. Medidor de turbina

El número de pulsos contados por un período de tiempo dado es directamente proporcional al flujo de volumen. Un tacómetro se puede añadir al medidor de flujo de turbina para medir la velocidad rotacional y determinar la tasa de flujo. Los medidores de turbina tienen buena exactitud, particularmente con líquidos de baja viscosidad.

Medidor de torbellino (vortex) : El medidor de torbellino o Vortex se basa en un fenómeno natural, llamado esparramiento de vórtice, que ocurre cuando un líquido fluye a través de un cuerpo escarpado. Los torbellinos o vórtices se forman alternativamente entre las superficies inferior y superior, moviéndose corriente abajo. La frecuencia del esparramiento entre vórtices es proporcional a la velocidad del fluido. (Ver Figura 2.39)

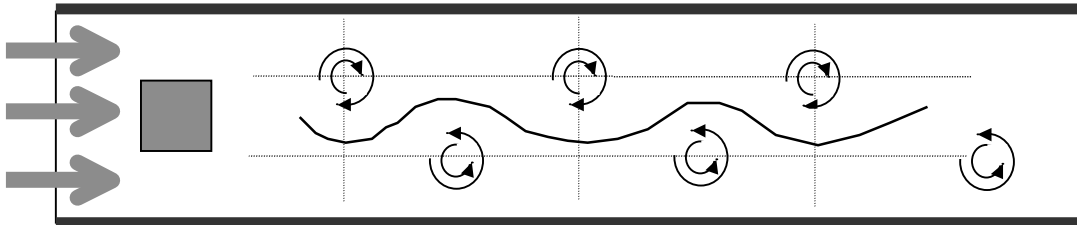


FIGURA 2.39. Medidor de torbellino (Vortex)

La detección de la frecuencia de los vórtices se puede realizar por sensores piezoeléctricos o térmicos colocados en el cuerpo escarpado o en sus proximidades o también por sensores ultrasónicos colocados en la superficie exterior de la tubería.

Medidores electromagnéticos: Los medidores de flujo electromagnéticos tienen baja pérdida de presión, no tienen partes móviles, son de alta precisión, tienen salida lineal, son insensibles a la gravedad específica, viscosidad, presión y temperatura y están en capacidad de medir un amplio rango de fluidos difíciles de medir por otros medidores (tales como líquidos corrosivos, pastas aguadas o fangos).

La operación del medidor de flujo electromagnético se basa en la Ley de Faraday, la cual establece que el voltaje inducido a través de cualquier conductor que se mueve en un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor.

La fórmula de la ley de Faraday:

$$E = K \cdot B \cdot V \cdot D$$

donde:

E : tensión inducida

B : Campo magnético

D : Longitud del conductor (Distancia entre electrodos o diámetro de la tubería)
V : Velocidad del conductor (velocidad del fluido conductor)

Para aplicar este principio a la medición de flujo, es necesario establecer que el líquido que está siendo medido debe ser conductor (con conductividad mayor que $10 (\mu\Omega\text{cm})^{-1}$).

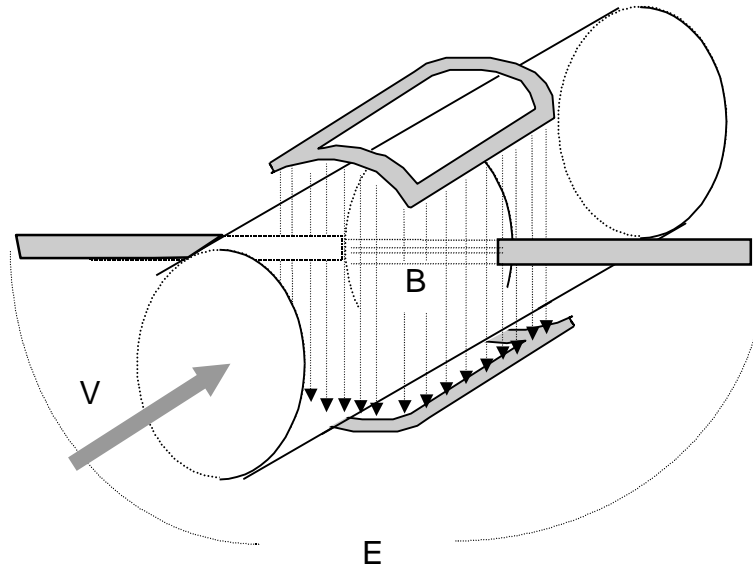


FIGURA 2.40. Medidor electromagnético de flujo

Medidores ultrasónicos de flujo: Los medidores ultrasónicos de flujo utilizan sensores que se fijan al exterior de la tubería, es decir, no se introducen en ella, lo cual los hace particularmente útiles para medir flujos multifásicos. Se dividen en dos tipos: los medidores de efecto Doppler y los medidores de tiempo de tránsito.

Medidor de flujo de efecto Doppler: Este medidor es completamente externo a la tubería y utiliza un cristal piezoeléctrico para emitir una onda ultrasónica, a un ángulo con respecto a la velocidad del fluido. Las burbujas, las partículas sólidas o los remolinos en la corriente de flujo dispersan la onda sonora incidente en todas direcciones, pero una pequeña porción se dispersa hacia atrás en la dirección del cristal receptor. La frecuencia de la señal de retorno está desfasada con respecto a la frecuencia emitida, y este desfase es proporcional a la velocidad del fluido (Ver Figura 2.41)

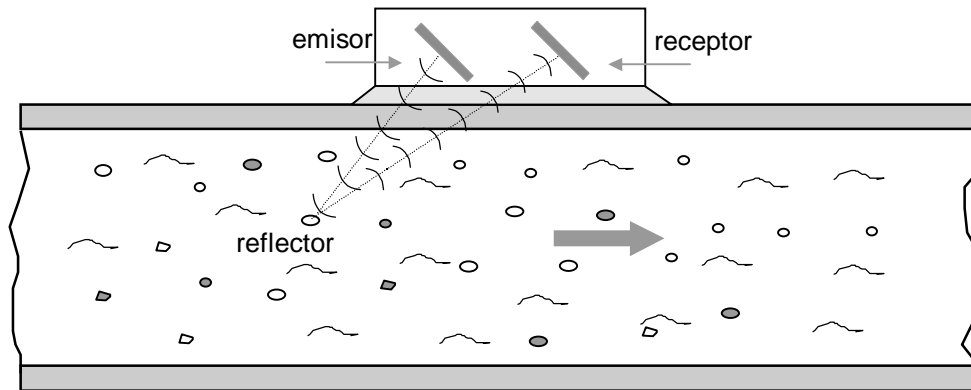


FIGURA 2.41. Medidor ultrasónico de efecto Doppler .

Medidor de flujo ultrasónico de tiempo de tránsito: El medidor de tiempo de tránsito tiene transductores montados en cada lado de la tubería. La configuración es tal que la onda sonora viaja entre los dispositivos que están a 45° de la dirección del flujo de fluido. La velocidad de la señal viajera entre los transductores aumenta o disminuye con la dirección de transmisión y la velocidad del líquido que está siendo medido. El tiempo diferencial que es proporcional al flujo, se obtiene transmitiendo la señal alternativamente en ambas direcciones. Una limitación de los medidores de tiempo de viaje es que los líquidos que están siendo medidos deben estar relativamente libres de burbujas de gas o sólidos en suspensión que minimizan la señal o la absorben. (Ver Fig. 2.42)

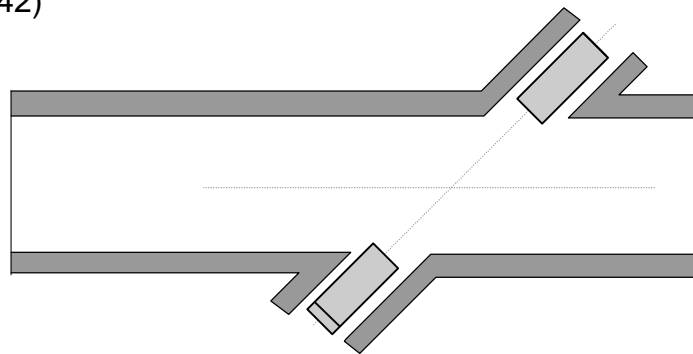


FIGURA 2.42. Medidor de flujo ultrasónico de tiempo de tránsito.

Medidores de flujo másico: Los líquidos tales como el petróleo crudo, el gas natural y los productos hidrocarburos se transfieren a menudo de una empresa a otra a través de tuberías. Puesto que los productos se compran y se venden en unidades de masa, es fundamental conocer con precisión la masa del fluido que se ha transferido en un tiempo determinado. Varios diseños están disponibles, pero uno de los más comúnmente utilizados es el medidor de Coriolis.

Medidor de Coriolis: Los medidores de Coriolis son medidores de masa verdadera que miden la tasa de flujo de masa directamente, a diferencia de los medidores de flujo volumétricos. Debido que la masa no cambia, el medidor es lineal sin necesidad de ajustes por variación en las propiedades del líquido. Esto elimina la necesidad de compensación por cambios en las condiciones de temperatura o presión. El medidor es especialmente útil para medir líquidos en los cuales varía la velocidad con la viscosidad a temperaturas y presiones dadas.

Los medidores de Coriolis están disponibles en varios diseños. (Ver Fig. 2.43)

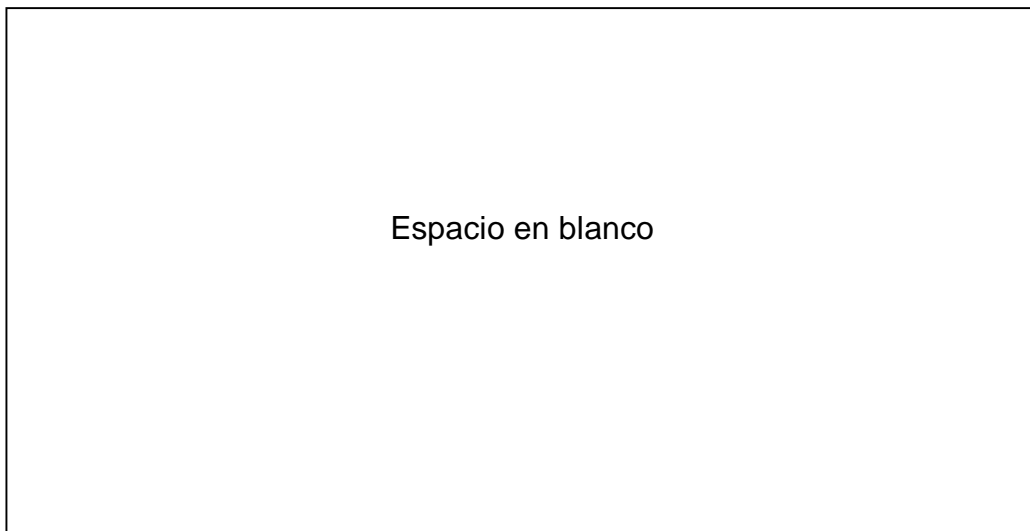


FIGURA 2.43. Diseños de los medidores de coriolis.

Un unidad muy popular consiste en un tubo en forma de U encerrado en una caja sensora y conectado a una unidad electrónica.

El medidor se basa en el efecto de aceleración de Coriolis, que consiste en que si un cuerpo de masa m se desplaza con velocidad lineal V sobre una barra giratoria que gira con velocidad angular ω , experimenta una fuerza de Coriolis de magnitud:

$$F = 2 m \omega v$$

La dirección de ésta fuerza es perpendicular a los vectores de velocidad lineal v y velocidad angular ω (Ver Fig. 2.44)

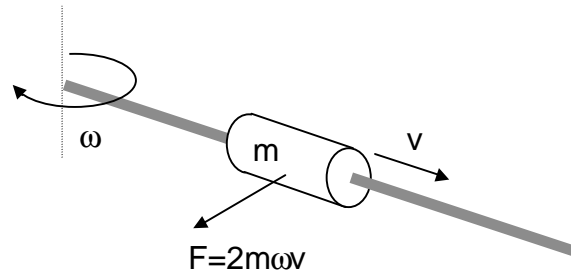


FIGURA 2.44. Efecto de Coriolis

La fuerza de Coriolis se puede producir invirtiendo las velocidades lineales del fluido mediante la desviación de un bucle en forma de U en estado de vibración controlada a la frecuencia de resonancia. (Ver figura 2.45)

La vibración del tubo perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido, crea una fuerza de aceleración en la tubería de entrada del fluido y una desaceleración en la de salida, con lo que se genera un par cuyo sentido va variando de acuerdo con la vibración y con la velocidad del fluido circulante. El par de fuerzas origina un ángulo de torsión en el tubo, el cual es directamente proporcional a la masa instantáneamente de fluido circulante.

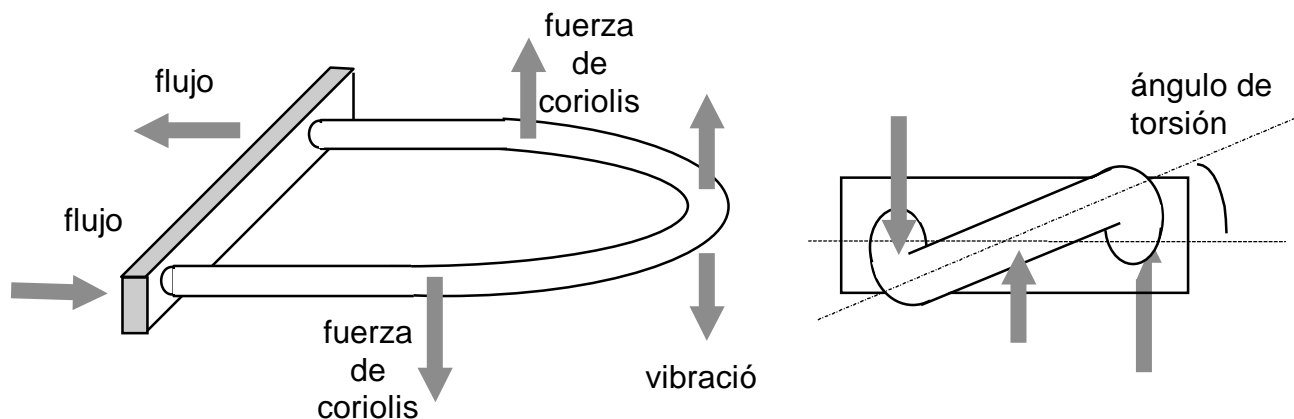


FIGURA 2.45. Deflexión del tubo sometido a la vibración y a la fuerza del fluido

2.5 Medición de nivel:

La medición del nivel puede ser dividida en dos categorías: medición de nivel puntual y medición de nivel continuo. Los sensores de nivel puntual simplemente registran una altura de líquido discreta. Generalmente se utilizan para generar alarmas por sobrellenado o bajo nivel. Un sensor continuo, por su parte monitorea continuamente el nivel dentro de un amplio margen, entregando una salida análoga que está directamente correlacionada con el nivel de la sustancia contenida en el tanque.

Interruptor flotante: Este consiste en un imán equipado con flotador, el cual se mueve directamente con la superficie del líquido y acciona un “**reed switch**”. Tanto el imán como el reed switch se encuentran herméticamente sellados para garantizar su funcionamiento óptimo en una variedad de medios. (Fig. 2.46)

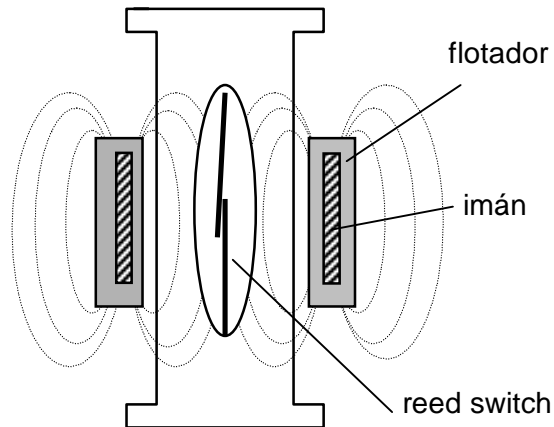


FIGURA 2.46. Interruptor flotante.

Sensores ultrasónicos sin contacto:

Los sensores ultrasónicos sin contacto consisten de los siguientes elementos: sensor, procesador de señales análogas, microprocesador, interruptor de rango BCD y circuito de salida. El microprocesador genera una serie de impulsos, que son transmitidos en forma de sonidos por el sensor hacia la superficie de nivel. El eco que retorna de la superficie es detectado por el sensor y regresado hacia el microprocesador, el cual procesa la señal en forma digital como una representación de la distancia entre el sensor y la superficie de nivel. El microprocesador almacena el valor de la distancia por medio de una técnica de promedio móvil, que en conjunto con un filtro digital permiten rechazar señales espúreas y de ruido. (Ver Figura 2.47)

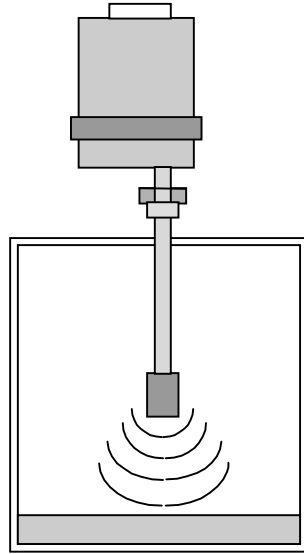


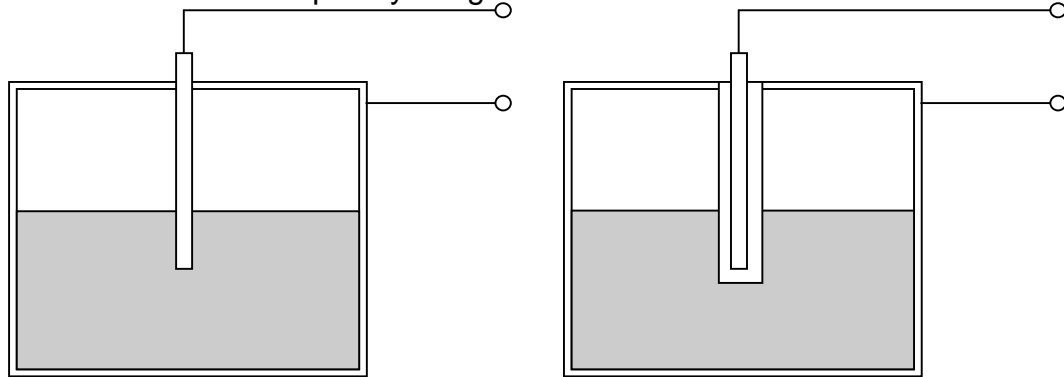
FIGURA 2.47. Sensor ultrasónico sin contacto

Sensores capacitivos:

Se basan en las características eléctricas del fluido; estos miden la capacidad del condensador formado por el electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque. La capacitancia del conjunto depende linealmente del nivel del líquido.

En fluidos no conductores se emplea un electrodo normal (Fig. 2.48 a) y la capacitancia total del sistema incluye la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones.

En fluido conductores (Fig. 2.48 b), el electrodo está aislado usualmente con teflón, e intervienen las capacitancias adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas.



a. líquido dieléctrico

b. líquido conductor

FIGURA 2.48. Sensores de nivel capacitivos.

Sensor de presión diferencial:

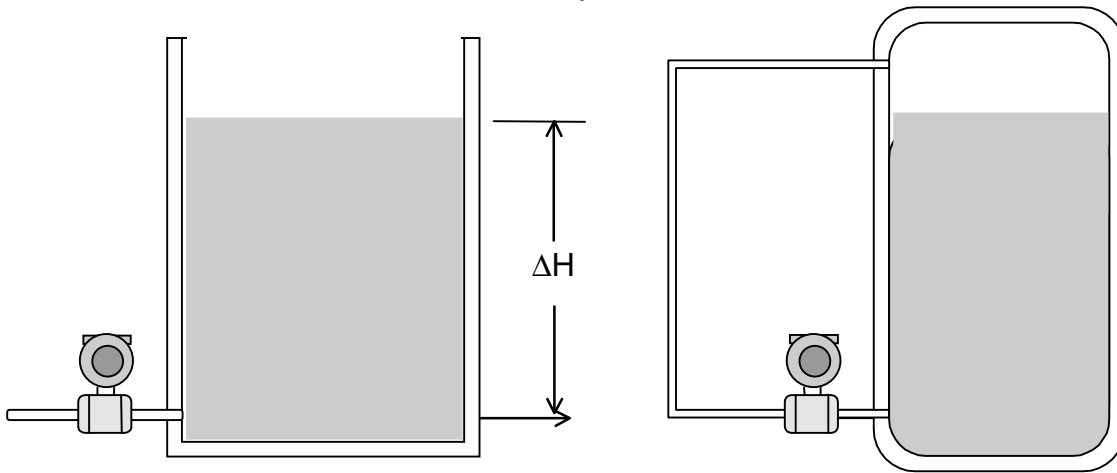
El sensor de presión diferencial detecta la diferencia de presión entre el fondo y la parte superior del líquido, la cual es ocasionada por el peso de la columna de líquido. (Ver Fig. 50)

$$\Delta P = G \cdot \Delta H$$

donde:

G : gravedad específica del líquido

ΔH : altura de la columna de líquido



a. Tanque abierto

b. Tanque presurizado

FIGURA 2.49. Sensor de nivel de presión diferencial

El extremo con que se detecta la presión en el fondo del líquido se conoce como externo

o de alta presión, y el que se utiliza para detectar la presión en la parte superior del líquido, como extremo de baja presión. Una vez conocido el diferencial de presión y la densidad del líquido, se puede obtener el nivel.