



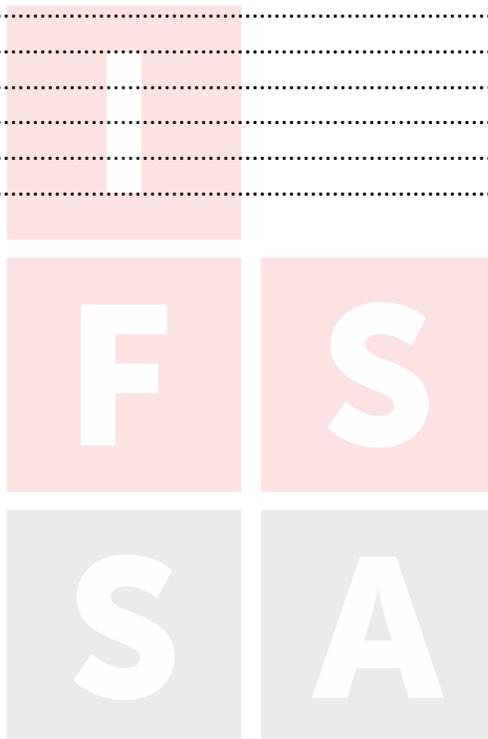
INSTITUTO DE  
FORMACIÓN  
SUPERIOR

# APUNTES DE CATEDRA

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

Contenido

<b>Introducción a la Electrónica</b> .....	1
<b>Transductores</b> .....	15
<b>Medidor de presión</b> .....	32
<b>Medidor de Nivel</b> .....	44
<b>Medición de temperatura</b> .....	57
<b>Medidor de caudal</b> .....	69
<b>Elementos de control</b> .....	78
<b>Procesos de control</b> .....	93



INSTITUTO DE  
FORMACIÓN  
SUPERIOR

**Introducción a la Electrónica**

La construcción de cualquier dispositivo electrónico de estado sólido (estructura de cristal duro) o circuito integrado, se inicial con un material semiconductor.

*“Los semiconductores son una clase especial de elementos cuya conductividad se encuentra entre la de un buen conductor y la de un aislante, (Boylestad, 2009).”*

En general, los materiales semiconductores caen dentro de una de las 2 clases: Un solo cristal semiconductor y un semiconductor compuesto. Los semiconductores de un solo cristal como el germanio (Ge) y el silicio (Si) tienen una estructura cristalina repetitiva, en tanto que los compuestos como el arseniuro de galio (GaAs), el sulfuro de cadmio (CdS), el nitrilo de galio (GaN) y el fosfuro de galio y arsénico (GaAsP) se componen de 2 o más materiales semiconductores de diferente estructura atómica.

*“Los 3 semiconductores más utilizados en la construcción de dispositivos electrónicos son el Ge, Si y GaAs, (Boylestad, 2009).”*

Para entender porque el silicio y el germanio, son los semiconductores más simples, veamos su configuración electrónica.

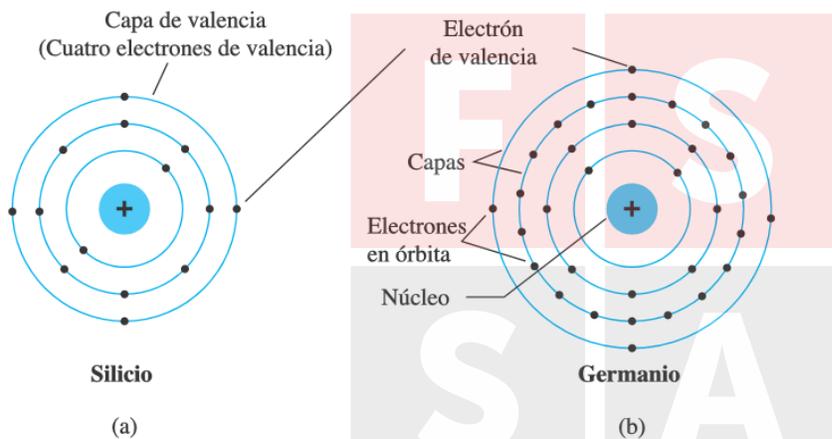


Figura 1: Esquema de la configuración electrónica del silicio y el germanio, (Boylestad, 2009).

Ambos átomos poseen 4 electrones de valencia. El termino valencia se utiliza para indicar el potencial requerido para remover cualquiera de los electrones en esta última capa. Uno de los parámetros importantes a la hora de definir un buen semiconductor es el número de portadores intrínsecos y la movilidad relativa de los portadores libres en el material, es decir, la capacidad de los electrones libres de moverse por todo el material. En la siguiente tabla mostramos los portadores intrínsecos y movilidad relativa.

Semiconductor	Portadores intrínsecos (por centímetro cúbico)
GaAs	$1.7 \times 10^6$
Si	$1.5 \times 10^{10}$
Ge	$2.5 \times 10^{13}$

Figura 2: Portadores intrínsecos de los semiconductores más comunes, (Boylestad, 2009).

Semiconductor	$\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /V·s)
Si	1500
Ge	3900
GaAs	8500

Figura 3: Factor de movilidad relativa, (Boylestad, 2009).

El factor de movilidad es un parámetro importante a la hora de la fabricación de dispositivos electrónicos, básicamente por su rapidez de respuesta (a mayor factor de movilidad mayor rapidez de respuesta). Una característica de los semiconductores es el aumento de la conductividad respecto del aumento de temperatura.

### Dopado

En este caso el término dopado se utiliza cuando al material (por ejemplo el silicio) se le adiciona una impureza tal que mejore las propiedades del semiconductor.

### Material tipo n y p

Dependiendo de la impureza que se adicione al silicio, se crea un material tipo **n** o **p**. Un material tipo **n** se crea introduciendo elementos que contienen 5 electrones de valencia (pentavalente), como el arsénico, el fosforo o el antimonio.

Esto crea un exceso de electrones en el cristal de silicio (4 electrones de valencia). El cual le da mayor propiedad como conductor.

En el caso del material tipo **p**, se le añade una impureza tal que aporta 3 electrones en la capa de valencia (trivalente), como es el átomo de boro o el galio.

En este caso la impureza genera un déficit de electrones, lo cual, hará que el compuesto tenga facilidad de aceptar electrones.

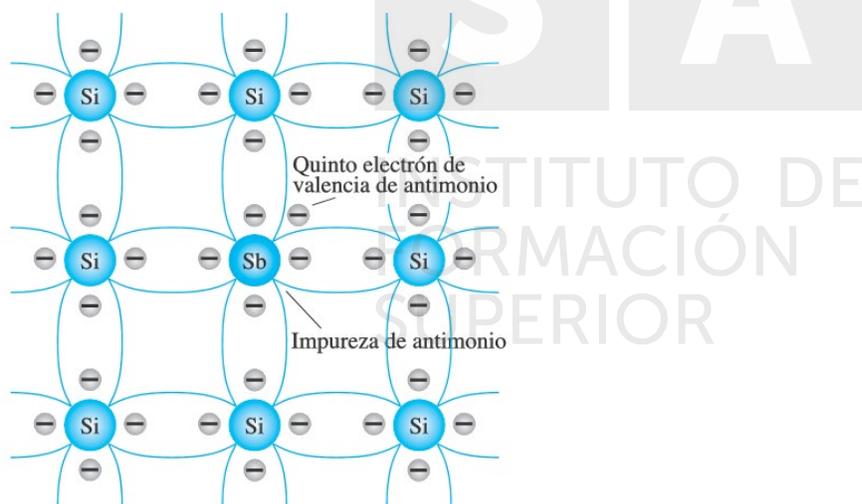


Figura 4: Adición de impurezas (antimonio), al silicio, (Boylestad, 2009).

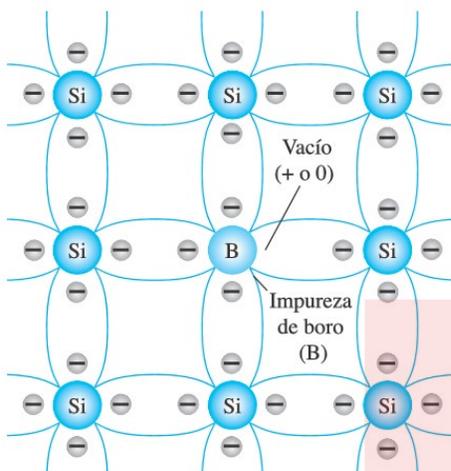


Figura 5: Adición de impurezas (boro), al silicio, (Boylestad, 2009).

### Diodo semiconductor

El diodo semiconductor es el primer dispositivo electrónico de estado sólido. Este se crea uniendo un material tipo n a un material tipo p. Dependiendo de dónde se conecte la terminal al diodo, tendrá diferentes comportamientos.

#### Sin polarización ( $V=0$ )

En el momento en que los 2 materiales se unen (tipo n con el tipo p), los electrones y los huecos en la región de unión se combinan, provocando una carencia de portadores libres en la región próxima a la unión. Es decir que, en el caso del material tipo n, los portadores libres (los electrones) disminuye debido a que se encuentran con "huecos" disponibles (recordar que los huecos son aceptadores de electrones). En el caso del material tipo p, ocurre lo mismo, pero, disminuye los huecos (portadores libres).

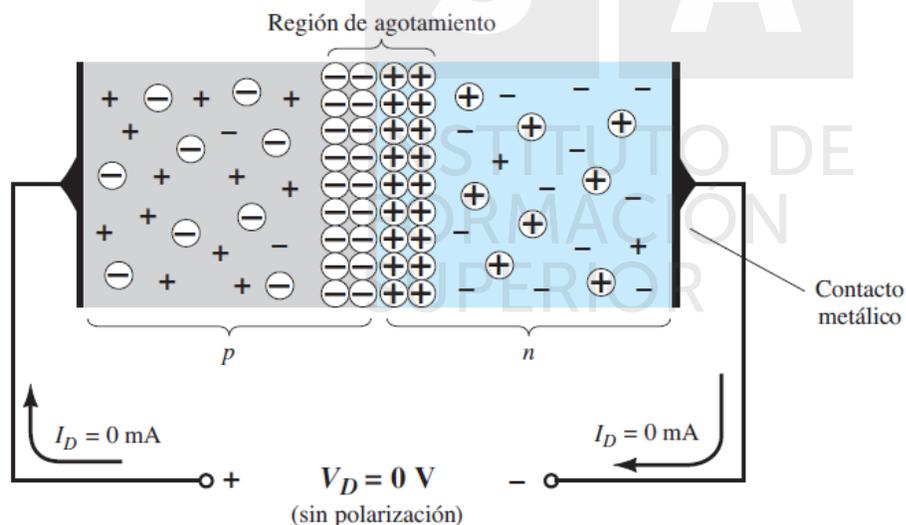


Figura 6: Descripción de la región de agotamiento (empobrecimiento), sin polarización, (Boylestad, 2009).

"Esta región de iones positivos y negativos revelados se llama región de empobrecimiento, debido a la disminución de portadores libres en dicha región, (Boylestad, 2009)"

**Polarización en inversa ( $V_D < 0 V$ )**

Si se aplica un voltaje con la terminal positiva en el material tipo **n** y la terminal negativa conectada al material tipo **p**, el número de iones positivos revelados en la región de empobrecimiento del material tipo **n** se incrementará por la gran cantidad de electrones libres atraídos por el potencial positivo del voltaje aplicado. Por la misma razón, el número de iones negativos no revelados se incrementará en el material tipo **p**. El efecto neto es una mayor apertura en la zona de empobrecimiento.

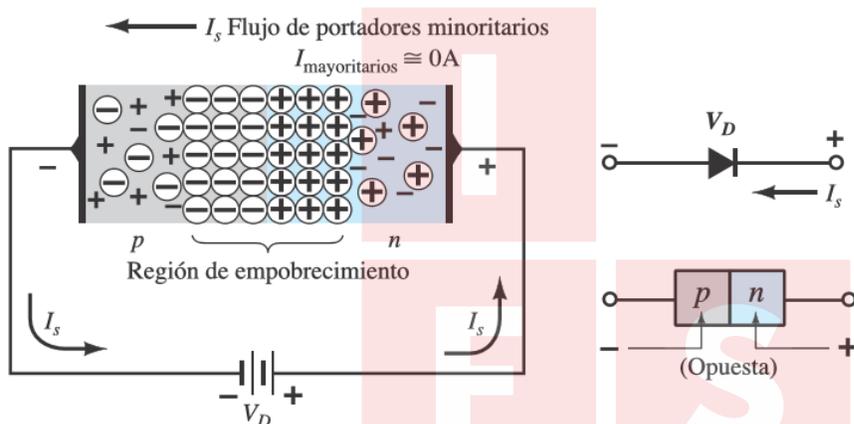


Figura 7: Representación de la unión p-n con polarización inversa, (Boylestad, 2009).

“La corriente en condiciones de polarización inversa, se llama corriente de saturación en inversa y se representa por  $I_s$  (Boylestad, 2009)”

**Polarización directa ( $V_D > 0 V$ )**

La condición de polarización directa o “encendido” se establece aplicando el potencial positivo al material tipo **p** y el potencial negativo al material tipo **n**. La aplicación de un potencial de polarización en directa  $V_D$ , presionará a los electrones en el material tipo **n** y a los huecos en el material tipo **p** para que se recombinen con los iones próximos al límite y reducirá el ancho de la región de empobrecimiento. En cuanto se incremente la magnitud de la polarización aplicada, el ancho de la región de empobrecimiento continuará reduciéndose, hasta que el flujo de electrones pueda atravesar la unión, lo que produce un incremento de la corriente.

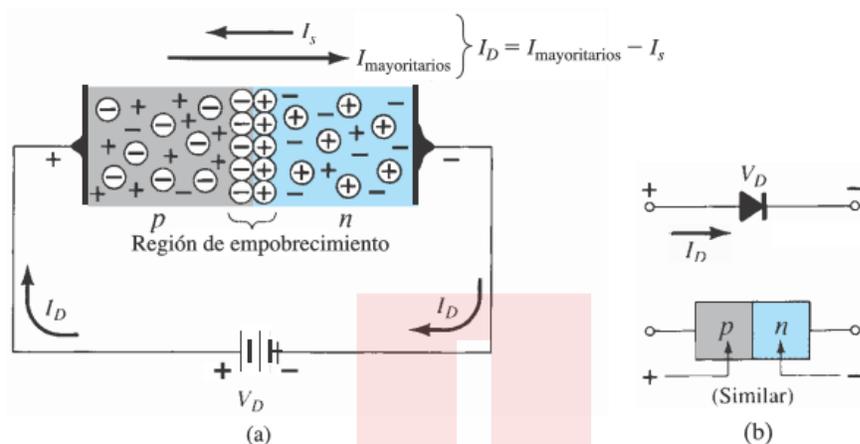


Figura 8: Descripción de la unión p-n en condición de polarización directa, (Boylestad, 2009).

Una analogía utilizada para describir el comportamiento de un diodo semiconductor es un interruptor mecánico. En la siguiente figura 1.21a, el diodo está actuando como un interruptor cerrado que permite el flujo de corriente en la dirección indicada. En la figura 1.21b el nivel de corriente es tan pequeño, que en la mayoría de los casos se puede aproximar a 0 A, como un interruptor abierto.

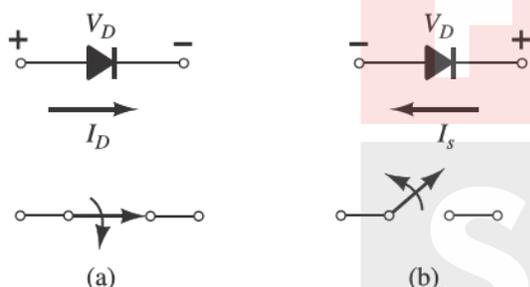


FIG. 1.21

Diodo semiconductor ideal: (a) polarizado en directa; (b) polarizado en inversa.

Figura 9: Semiconductor de diodo ideal; a) polarizado en directa, b) polarizado en inversa. (Boylestad, 2009)

**Aplicaciones prácticas**

Rectificación

Los cargadores de baterías son una pieza fundamental tanto en uso doméstico como industrial. Como la gran mayoría se enchufan a una corriente alterna de 120V, se incluye un transformador para acondicionar el voltaje de CA (corriente alterna) a un nivel apropiado para la CD (corriente directa) que se va a establecer. También utilizan una serie de diodos (rectificadores), para convertir la corriente alterna a corriente directa.

Configuración de protección

Los diodos se utilizan de varias maneras para proteger elementos y sistemas contra voltaje, corriente excesiva, inversión de polaridad, formación de arcos y cortocircuitos.

Respaldo controlado de una batería

En numerosas situaciones un sistema debe contar con una fuente de corriente de respaldo para garantizar que el sistema siga funcionando en caso de una pérdida de corriente. Esto es especialmente importante para sistemas de seguridad, de iluminación que deben encender cuando ocurre un fallo de la corriente eléctrica.

Quizás el uso más común de los diodos sean las luces LED, la cual se utiliza tanto para alumbrado público como para señalización de tránsito y carteles informativos.

### Transistor

Es un dispositivo electrónico fabricado a partir de semiconductores, que cumple la función de permitir o impedir el paso de señales electrónicas a partir de una señal de mando y también funciona como elemento amplificador de señal. Los diodos son construidos a partir de la unión de materiales N y P; por otro lado el transistor se construye a partir de uniones PNP o NPN, también llamados tridiodos.

Para un transistor convencional vamos a encontrar un encapsulado o sustrato, por lo general, de cristales de silicio y 3 segmentos (también denominados terminales) unidos entre sí; Emisor (E), Base (B) y Colector (C), donde cada segmento esta dopado de distintas cantidades. El emisor tiene un dopaje mucho más alto que la base y rodea la región del emisor para que los electrones inyectados en la base no se escapen de ella. La base tiene un dopaje mayor que el colector y esta físicamente localizado entre el colector y el emisor, apenas dopada y posee alta resistividad.

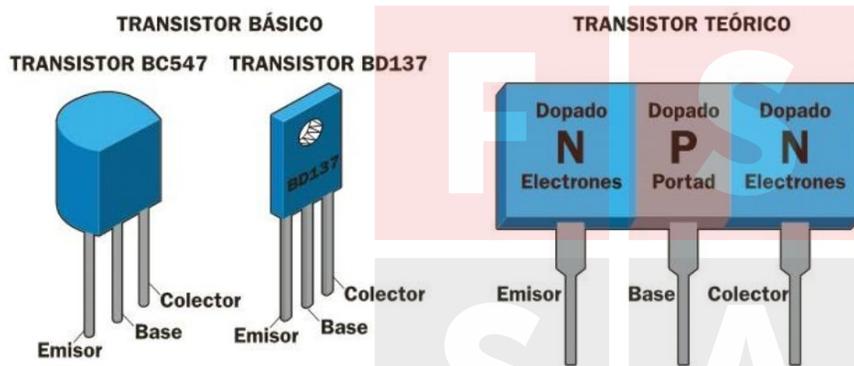


Figura 10: Descripción de un transistor, (Boylestad, 2009).

Para el transistor, el emisor emite portadores (huecos), el colector los recolecta y la base modula el paso de los portadores. Mediante este funcionamiento, obtenemos un dispositivo que controlado por la corriente consigue una nueva corriente amplificada.

Se utiliza corriente continua para que este cumpla su función, se sitúa una fuente de corriente entre PN (base-emisor) polarizada directamente y en la otra unión NP (base-colector) polarizada inversamente. Cuando la tensión de la base del emisor supera los 0,7V (barrera mínima), tendremos el transistor polarizado y por lo tanto funcionará de manera correcta. Con lo cual conducirá corriente desde el colector al emisor.

La ganancia de un transistor se conoce como beta ( $\beta$ ) y funciona como amplificador logrado entre la corriente del colector y la base. El Beta es una constante que depende de cada transistor, el mismo puede valer 50 hasta 1000 y nos da una idea de la capacidad de amplificar la corriente.

### Estados del transistor

**Estado activo:** En este caso circula corriente y la constante  $\beta$ , será distinta de 0. El transistor amplifica la señal por un valor igual al  $\beta$ . En este caso la corriente del colector depende de la corriente de la base, el  $\beta$  y las resistencias conectadas entre el emisor y el colector.

**Estado inverso:** Se invierte las condiciones de polaridad del estado activo. En este caso, las regiones del colector y del emisor invierten su funcionamiento. No maximiza el potencial del transistor.

**Estado de corte:** La corriente de base es cero, por lo que no conduce la corriente y se lo considera al transistor como una llave abierta.

**Estado de saturación:** Cuando la corriente de base alcanza un valor alto (para el transistor), se dice que está saturado. La cual en este caso ya no puede amplificar más la señal. Y toda la corriente aplicada en el emisor circula por el colector como un interruptor cerrado.

En electrónica analógica, se utiliza el estado activo, ya que permite una amplificación de la señal. Mientras que los estados de saturación y de corte, son útiles para la electrónica digital. Permitiendo que se representen los estados de abierto, cerrado (0 y 1).

## Representación de la señal

### **Representación Análoga**

La característica de una señal análoga es su variación continua en el tiempo. Un ejemplo cotidiano es el velocímetro de un auto, el cual varía continuamente ente 0 a 200 kph. El sonido que produce un micrófono también es otro ejemplo de una señal análoga. Prácticamente todas las propiedades físicas se representan analógicamente.

### **Representación Digital**

Contario a la señal analógica, la señal digital se representa por dígitos y no por un rango de ellos. Un ejemplo clásico es el reloj digital, el cual muestra el tiempo en números discretos (segundos, minutos y hora).

### **Circuitos digitales**

El estudio de los circuitos electrónicos donde las entradas y salidas se limitan a valores discretos o niveles lógicos se denomina electrónica digital. En instrumentación existen dispositivos análogos y digitales. Los sensores y los instrumentos funcionan bajo la base análoga (es decir toman una medición continua en el tiempo). Las señales análogas son fácilmente convertidas a señales digitales usando convertidores análogo-digitales (ADC). Algunas de las ventajas de los circuitos digitales frente a los análogos son:

- Bajo requerimiento de energía.
- Mayor costo efectivo.
- Puede transmitir señales a través de largas distancias sin pérdida de exactitud y eliminando el ruido.
- Transmisión de señales a alta velocidades.
- Capacidad de memoria para almacenar datos.
- Compatibles con controladores y display numérico.

### **Señal digital**

Las señales digitales son de alto o bajo niveles lógicos. La mayoría de circuitos digitales usan un suministro de 5V. Los niveles de lógica baja (binario 0) van desde 0 a 1V, la lógica alta (binario 1) va desde 2 a 5V, de 1 a 2V la región es indefinida. Entonces cualquier voltaje por debajo de 1V se considera 0 nivel y cualquier voltaje por arriba de 2V se considera nivel 1.

## Representación numérica

### **Representación decimal**

El sistema decimal se compone de 10 dígitos (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9), con la cual podemos expresar cualquier cantidad. Mostremos un ejemplo de cómo funciona el sistema decimal para representar un número.

Se tiene el 453, en este caso el sistema decimal se considera como un sistema de valor posicional. Es decir, que dependiendo de la posición del dígito será su valor. En este caso 4 representa la centena (es el valor más

significativo de este número), 5 representa la decena y 3 la unidad. Por lo tanto dependiendo de dicha posición se construye el 453 como:

$$4x10^2 + 5x10^1 + 3x10^0 = 453$$

El exponente de la base 10, muestra la posición que ocupa cada dígito del número 453.

**Representación binaria**

En el sistema binario existen solamente 2 posibles valores (0 o 1). De igual manera el sistema binario se puede utilizar para representar cualquier número. En este caso la base es el 2. De manera similar que en el sistema decimal, los exponentes del sistema binario representan la posición de cada dígito, la salvedad en este caso, es que el sistema binario necesita más almacenamiento (mayor cantidad de números, 0 y 1), para representar el mismo número en sistema decimal.

Mostremos un ejemplo para entender su funcionamiento

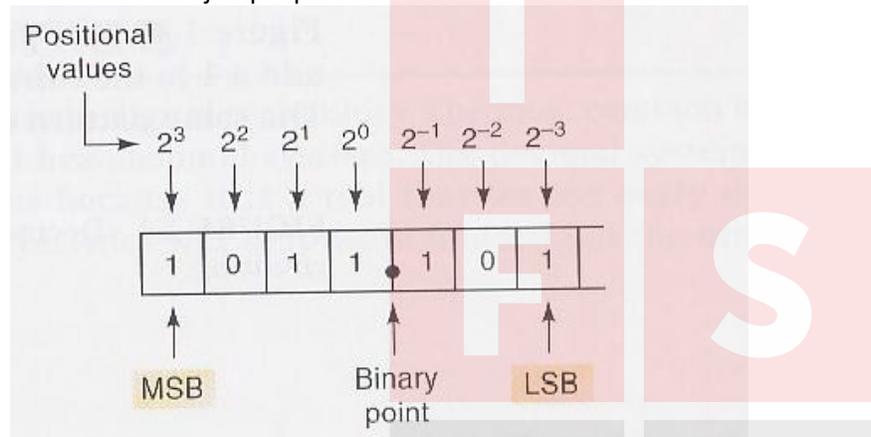


Figura 11: Esquema de la representación binaria.

En la figura de arriba se muestra la representación binaria del número 11,625. MSB y LSB son los dígitos más y menos significativos respectivamente. Para este ejemplo, entonces dicho número se puede determinar como:

$$1x2^3 + 0x2^2 + 1x2^1 + 1x2^0 + 1x2^{-1} + 0x2^{-2} + 1x2^{-3} = 11,625$$

La secuencia de conteo binario tiene una característica importante como se muestra en la siguiente figura.

Weights	$2^3 = 8$	$2^2 = 4$	$2^1 = 2$	$2^0 = 1$	Decimal equivalent
	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	1
	0	0	1	0	2
	0	0	1	1	3
	0	1	0	0	4
	0	1	0	1	5
	0	1	1	0	6
	0	1	1	1	7
	1	0	0	0	8
	1	0	0	1	9
	1	0	1	0	10
	1	0	1	1	11
	1	1	0	0	12
	1	1	0	1	13
	1	1	1	0	14
	1	1	1	1	15

↑  
LSB

Figura 12: Equivalencia al sistema decimal.

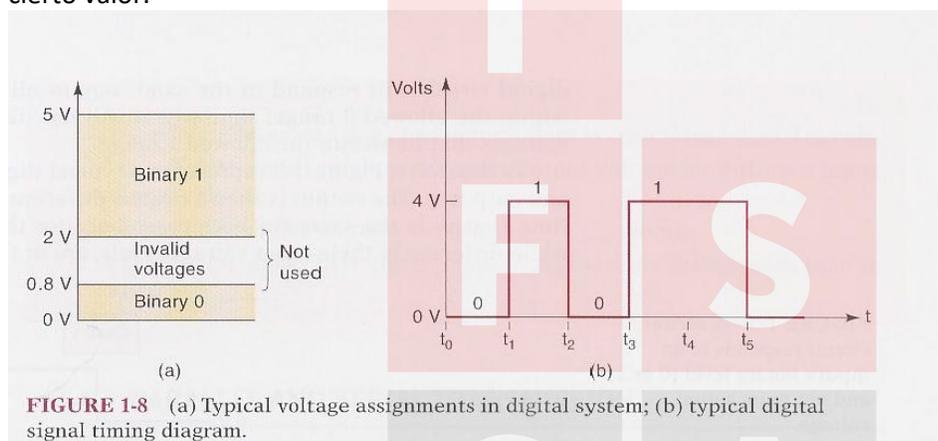
La unidad más pequeña (bit) cambia de 0 a 1 o de 1 a 0 con cada conteo. Entonces 1 bit puede permanecer en estado 0 o 1, es decir puede haber 2 estados posibles. Con 2 bits existen 4 estados posibles (entre 0 o 1), con 3 bits existen 8 estados posibles (entre 0 y 1) y así sucesivamente. La fórmula general para mostrar cual es el valor más grande que se puede representar es:

$$2^N - 1 \quad \text{donde } N \text{ es el número de bits}$$

Por ejemplo el número más grande que se puede representar con 8 bits es:

$$2^8 - 1 = 255 \text{ en base 10}$$

En el sistema electrónico digital, la información binaria se representa por medio de voltajes (o corriente) que se presenta como entrada o salida de un circuito. Típicamente los valores de voltaje son 0V como 0 y 5V como 1. En la realidad estos 0 y 1 se expresan como 0V a 0,8V, se toman como 0 y entre 2 a 5V se expresan como 1. La característica importante es que en el sistema digital no importa el valor exacto, solo si supera cierto valor.



**FIGURE 1-8** (a) Typical voltage assignments in digital system; (b) typical digital signal timing diagram.

*Figura 13: Asignación de voltaje típico en sistema digital*

### Código de datos

Los códigos de datos trasladan información (alfa, numérica o caracteres de control) en un forma que puedan ser trasladables electrónicamente y luego ser convertidos a su forma original. La eficiencia del código es una medida de su capacidad para utilizar la máxima capacidad de bits.

#### Código binario

Es el código más usado en las computadoras, debido a su arreglo sistemático de los dígitos. Además, es fácil de trasportar la información.

#### Código baudot

Este código fue exitosamente usado en la comunicación de datos. El código fue usado inicialmente para la transferencia de textos. El código baudot usa 5 bits consecutivos y un bit adicional de, siga/pare, para representar el dato enviado. En términos de transmisión en general, el código baudot es aún el código más eficiente para textos, debido a que requiere poca operación de la maquina o detección de errores.

#### Código BCD

A medida que mejoraba la tecnología de la comunicación de datos y la computadora, se fueron desarrollando códigos más eficientes. El código BCD fue inicialmente usado para resolver cálculos numéricos internos dentro de los procesadores de datos. El código BCD es comúnmente usado en controladores programables para codificar datos a un diodo de emisión de luz numérica (LED). Su principal desventaja es que no tiene caracteres alfa y no es capaz de chequear algún error.

#### Código ASCII

El código más ampliamente usado es el código ASCII (the American Standard Code for Information Interchange). Fue desarrollado en 1963 y tiene 7 bits para los datos (permitiendo 128 caracteres).

El código ASCII puede operar sincrónica o asincrónicamente con 1 o 2 bits de stop. El formato ASCII tiene 32 caracteres de control. Estos códigos de control son usados para indicar, modificar o detener una función de control en transmisores o receptores.

**Introducción a la instrumentación y control de procesos**

**Proceso de control**

Para producir un producto de calidad, es necesario un proceso de control. Entonces para entenderlo vamos a dar la siguiente definición.

*“Un proceso de control, es el control automático de una variable de salida, midiendo dicha variable y comparándola con un nivel deseado de dicha variable (Willians C. Dumn, 2005)”.*

Vamos a ver un ejemplo de un proceso de control.

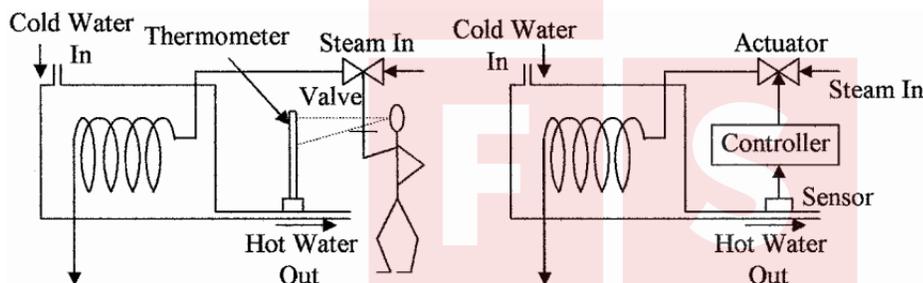


Figura 14: Representación conceptual de sistema de control.

En el esquema de arriba se muestra un proceso para suministrar agua caliente. El agua pasar a través de un intercambiador de calor, por donde fluye vapor para calentar el agua que ingresa. La salida es entonces agua caliente. Para medir la temperatura se utiliza un termómetro, la temperatura se observa a través de un operador quien ajusta el flujo de vapor para mantener la temperatura de salida del agua a los niveles deseados. La figura 1.1b es el mismo proceso, pero con la diferencia que se utiliza un sensor de temperatura, la cual manda una señal eléctrica y la envía a un controlador que evalúa la señal y su vez envía una señal corregida al actuador. El actuador ajusta el flujo de vapor en el intercambiador de calor para mantener la temperatura del agua al nivel prefijado.

En la siguiente figura se ilustra el bucle de control para el sistema de calentamiento del agua, expresado anteriormente.

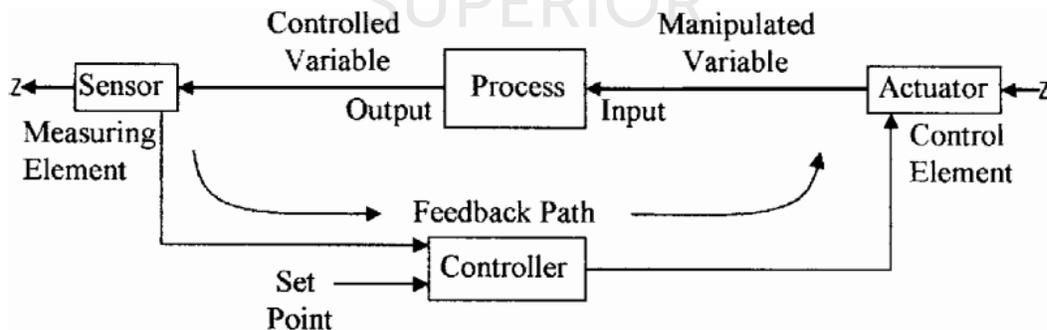


Figura 15: Diagrama de bucle de un proceso de control.

El punto de partida generalmente se realiza a través de la variable que queremos medir (en este caso la temperatura, “*Sensor*”), luego el dispositivo de medición envía una señal al **controlador**, el cual lo compara con la temperatura previamente fijada de la salida del agua (**set point**, es la temperatura prefijada del agua a la salida del proceso). Del **controlador (controller)**, manda otra señal para actuar sobre la válvula de flujo de vapor, la cual es utilizada para controlar la temperatura del agua (el **actuador “actuador”**, es el dispositivo que ejecuta la acción sobre la válvula para abrir o cerrarla dependiendo de la temperatura deseada). Finalmente se cierra el bucle a través del proceso y yendo nuevamente al sensor de temperatura para repetir el bucle de control.

Para seguir con el entendimiento de un proceso de control vamos a dar algunas definiciones técnicas para comprender mejor dichos procesos.

**Transductor:** El transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra forma de energía. Estos se utilizan para convertir el resultado de un sensor, en una señal que el controlador lo pueda utilizar. Por ejemplo, si el controlador funciona digitalmente, con valores determinados de voltajes (como 1 o 0), y la señal del sensor es neumática, lo que hace el transductor es convertir esa señal neumática en señal eléctrica (voltaje), para que pueda ser utilizada por el controlador. Esquemáticamente se puede expresar el transductor dentro del proceso de control como:

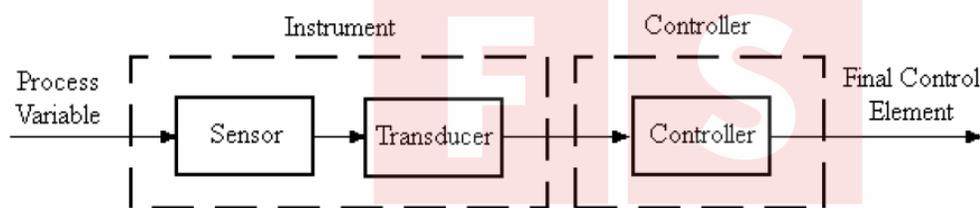


Figura 16: Representación de un transductor dentro del esquema de un proceso de control.

**Feedbackloop:** Es el camino de la señal desde la salida hasta la entrada del proceso para corregir cualquier variación entre la salida y el set point. En otras palabras, la salida del proceso es continuamente monitoreada, se determina el error entre el set point y el parámetro de salida, luego una señal de corrección es enviada a las variables de entrada del proceso para corregir los cambios medidos en el parámetro de salida.

**Variable medida o controlada:** Es la variable de salida monitoreada desde el proceso. El valor del parámetro de salida monitoreado es normalmente mantenido dentro de unos límites dados.

**Variable manipulada:** Es la variable de entrada o parámetro de un proceso, la cual es variada por una señal de control desde procesador al actuador. Al cambiar la variable de entrada el valor de la variable medida puede ser controlado.

**Set point:** Es el valor deseado del parámetro de salida o variable a ser monitoreada por el sensor. Cualquier desviación desde este valor generará una señal de error.

**Instrumento:** Es el nombre de cualquier dispositivo que mida una cantidad física, rendimiento, posición dirección etc.

**Sensor:** Son los dispositivos que pueden detectar las variables físicas, tal como la temperatura, intensidad lumínica etc. Y tiene la capacidad de dar una salida medible que varía en relación a la amplitud de la variable física.

**Convertidor:** Son dispositivos que se usan para cambiar el formato de una señal sin cambiar la forma de energía. Es decir, cambia de un voltaje a señal eléctrica.

**Actuador:** Son dispositivos que se usan para controlar una variable de entrada en respuesta de una señal del controlador. Un actuador típico será una válvula de control de flujo que puede controlar al caudal de fluido

en proporción, a la amplitud de una señal eléctrica desde el controlador. Otro ejemplo es el relay que cambian la energía eléctrica en on/off.

**Controladores:** Son dispositivos que monitorean la señal desde transductores y toman la acción necesaria para mantener el proceso dentro de los límites específicos y actúa sobre el actuador para modificar el valor de la variable medida.

**Controladores lógicos programables (PLC):** Se usan en aplicación de procesos de control y son sistemas basados en microprocesadores. Un pequeño sistema tiene la capacidad de monitorear varias variables y controlar varios actuadores. Los PLC tienen la capacidad de usar información análoga o digital, pueden comunicarse globalmente con otros controladores y son fácilmente programables on line/off line y suministran los datos y la información al operador.

**Error de señal:** Es la diferencia entre el set point y la amplitud de la variable medida.

**Corrección de señal:** Es la señal usada para controlar la energía del actuador para establecer el nivel de la variable de entrada.

**Transmisores:** Son dispositivos usados para amplificar y formatear la señal, de modo que sea adecuado para la transmisión a larga distancia con una pérdida de información baja. La señal transmitida puede ser en varios formatos; neumático, digital, voltaje análogo, corriente análogo o como señal de radio de frecuencia modulada (RF). Se prefiere la transmisión digital en los sistemas nuevos, debido a que los controladores generalmente se fabrican para sistemas digitales.

### Exactitud y precisión

La **exactitud** describe cuán cerca se encuentra la medición respecto al verdadero valor de la variable de proceso. La exactitud comúnmente se expresa como % o un rango en valor absoluto.

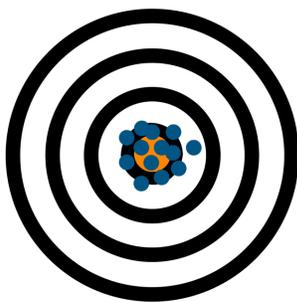


Figura 17: Representación de exactitud.

### Porcentaje de error sobre un rango

Por ejemplo, un fabricante A especifica que su instrumento de presión tiene una exactitud de  $\pm 0,4\%$  de la escala total. Dicha escala total es de 500 psig, por lo tanto, este instrumento tiene una exactitud de 2 psig en su rango de medición.

$$0,4\% \times 500 \text{ psig} = 2 \text{ psig}$$

La **precisión** es la *reproductividad* con el cual las mediciones repetidas puedan ser hechos bajos condiciones idénticas. La precisión puede también ser referida como estabilidad o drift. La precisión es siempre requerida para un buen sistema de control. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente sus diferencias.

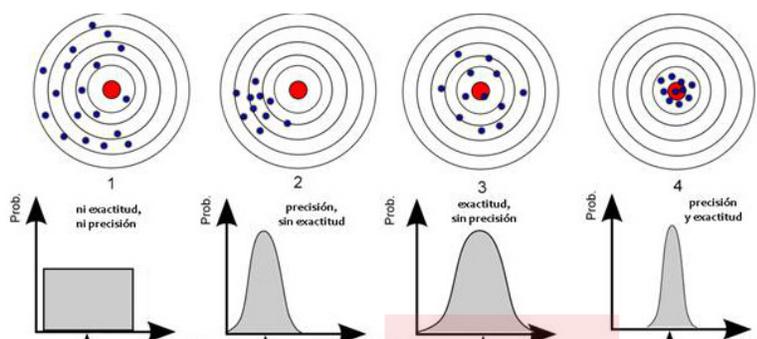


Figura 18: Diferencias entre exactitud y precisión.

En la siguiente grafica se ejemplifica los conceptos de exactitud y precisión, pero respecto a la medición de la temperatura.

Accuracy vs. Precision

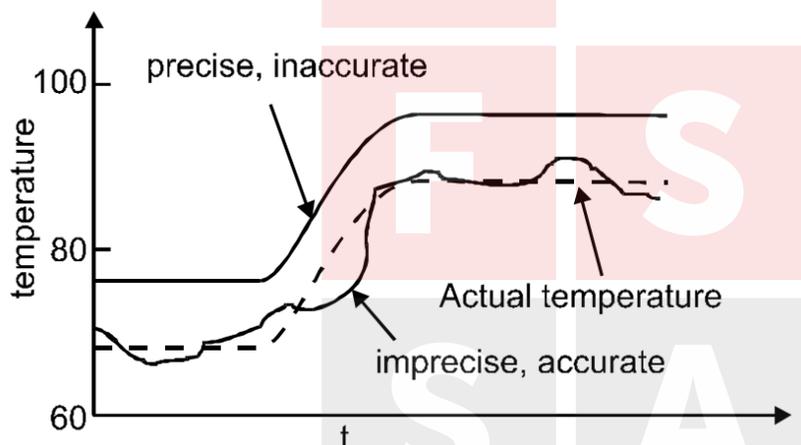


Figura 19: Precisión y exactitud en la medición de temperatura.

A su vez la sensibilidad de un instrumento se denomina a la medición del cambio de la salida del instrumento para un cambio dado en la variable medida. Esta se conoce como función de transferencia. Por ejemplo, cuando la salida del transductor de presión cambia en 3.2mV para un cambio de 1 psi, se dice que tiene una sensibilidad de 3.2mV/psi.

### Consideración para la instalación de un proceso de control

La instalación del proceso tiene un número de requerimientos básicos que incluyen precauciones de seguridad bien regulados, suministro de agua, aire y electricidad.

Se requiere suministro eléctrico para todos los sistemas de control y deben establecer todos los estándares. Muchas instalaciones poseen suministro eléctrico de backup, en caso de falla de electricidad del sistema eléctrico.

Se requiere suministro de aire para accionar actuadores neumáticos. Los instrumentos de aire en equipos neumáticos deben cumplir con estándares de la calidad del aire, ya que si no pueden producir una lectura errónea o directamente bloquear el instrumento debido a las impurezas del aire.

El suministro de agua es requerido para las operaciones de refrigeración y limpieza y para la generación de corriente de vapor. Al igual que el aire, debe cumplir con estándares de calidad para su correcto funcionamiento dentro del proceso.

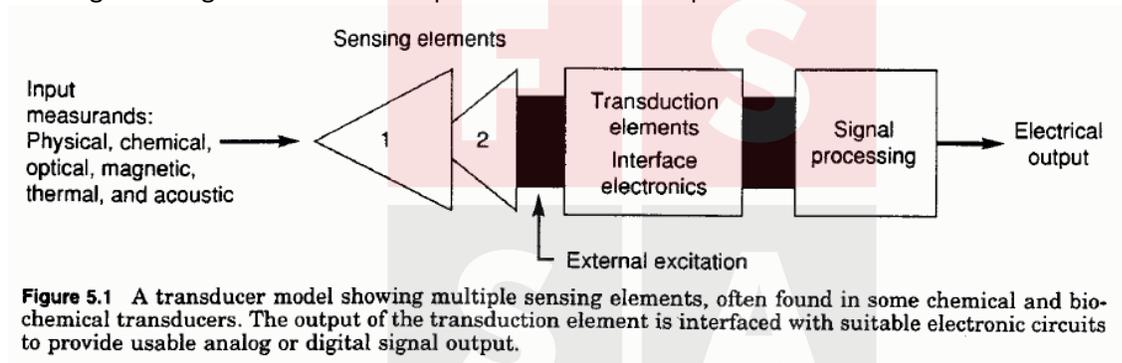
La instalación y el mantenimiento se deben considerar al momento de la ubicación de los instrumentos y equipos en el proceso. Cada dispositivo debe ser de fácil acceso para su mantención e inspección. También puede ser necesario instalar válvulas operadas a mano, de modo que puede ser reemplazado o revisado sin apagar toda la planta.

Hasta este punto se dio una introducción de los conceptos básicos relacionados a los instrumentos electrónicos y definición de palabras claves, para adquirir el vocabulario necesario al momento de seguir profundizando respecto de los dispositivos utilizados en el proceso de control. En la siguiente sección se dará una descripción más detallada de transistores y transmisores.

### Transductores

En términos generales, el proceso de transducción involucra la transformación de una forma de energía en otra forma de energía. Este proceso consiste en medir la variable física deseada, utilizando el elemento de medición y luego transformarla en otra forma de energía por medio de un elemento de transducción, la cual mandará la señal de salida para que pueda interpretarlo el controlador. La combinación de medición-transducción se denomina **Transductor**. Es decir, en la mayoría de los casos el elemento de medición tiene incorporado un transductor.

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente lo explicado arriba.



**Figure 5.1** A transducer model showing multiple sensing elements, often found in some chemical and biochemical transducers. The output of the transduction element is interfaced with suitable electronic circuits to provide usable analog or digital signal output.

*Figura 20: Modelo conceptual de un transductor.*

Los transductores pueden ser clasificados como energizados exteriormente o de generación de propia. Los transductores de generación de energía propia desarrollan su propio voltaje o corriente en el proceso, absorben toda la energía necesaria del elemento de medición. Los externamente energizados poseen un suministro externo de energía.

### MECANISMO DE TRANSDUCCIÓN

Existen diferentes mecanismos de transducción. Si bien aquí los nombraremos, solo describiremos los más importantes para este curso. Los más usuales son:

Capacitivo	Efecto termoeléctrico
Resistencia inductiva y electromagnética	Efecto de ionización
Resistivo y termo resistivo	Efecto fotoeléctrico
Efecto piziorresistivo	Efecto fotorresistivo
Efecto Hall	Efecto fotovoltaico
Efecto acústico-óptico	Efecto por fluorescencia

Los transductores son capaces de medir (entre otras variables):

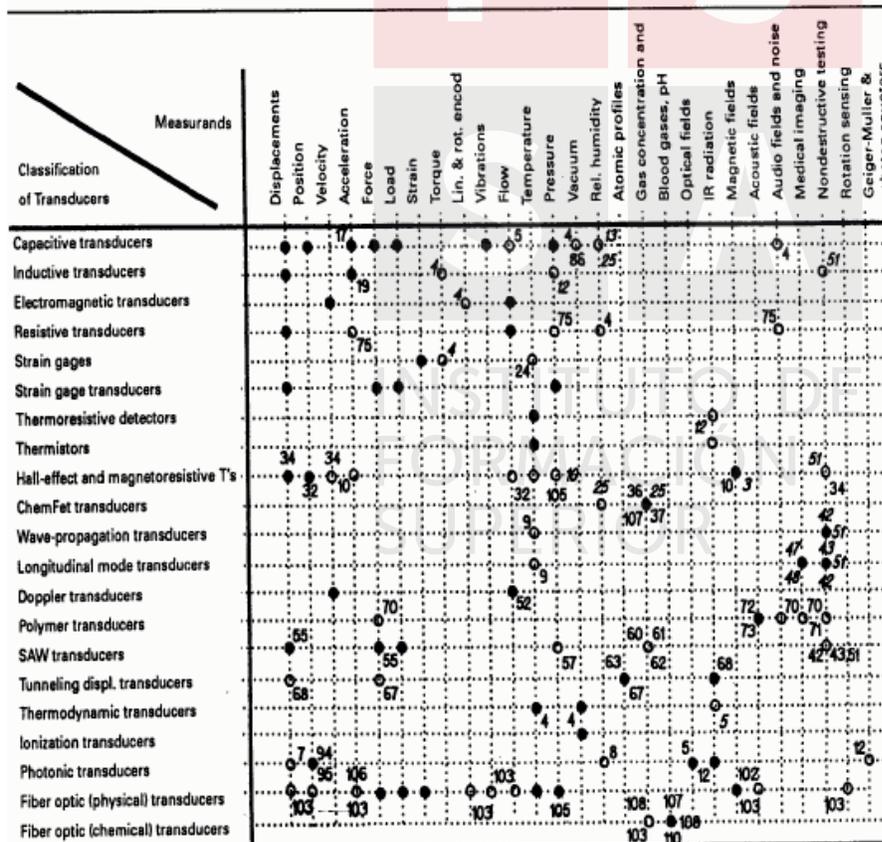
<b>Posición</b>	<b>Velocidad</b>
<b>Concentración</b>	<b>Aceleración</b>
<b>Fuerza</b>	<b>Temperatura</b>
<b>Presión</b>	<b>Caudal</b>
<b>Vibración</b>	<b>Torque</b>
<b>Campo magnético</b>	<b>Deformación</b>

Cuando se selecciona un transductor, además del costo se deben tener en cuenta las siguientes variables:

<b>Rango</b>	<b>Requerimientos de energía</b>
<b>Propiedades físicas</b>	<b>Ruido</b>
<b>Efecto de carga y distorsión</b>	<b>Error o exactitud</b>
<b>Respuesta de la frecuencia</b>	<b>Calibración</b>
<b>Medio ambiente</b>	<b>Formato de señal de salida</b>

Se mostrará una tabla guía para la selección de un transductor, dependiendo que variable física se desee medir.

TABLE 5.1 Classification of Transducers and Some Important Measurands



NOTES: Open circles indicate transducers not covered in this chapter. Numerals indicate reference numbers in Sec. 5.17.

Figura 21: Clasificación de transductores según la variable física medida.

### TRANSDUCTORES MECÁNICO-ELÉCTRICOS

Los transductores de desplazamiento pueden medir desplazamientos lineales o angulares. También se pueden clasificar acorde al principio de transducción sobre lo cual se basan. Podemos distinguir por ejemplo:

- Transductores resistivos.
- Transductores capacitivos.
- Transductores de inducción.
- Transductores ópticos.

### TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO RESISTIVO

Estos frecuentemente se denominan transductores potenciométricos. Para medir la translación se utiliza un potenciómetro deslizable. Usualmente los potenciómetros son boninas para lograr una mejor exactitud y resistencia a la temperatura. Sin embargo, una limitación de este tipo de configuración es su resolución finita. La máxima resolución es igual al número de vueltas del cable, sobre el cuerpo del potenciómetro. Por otro lado, los potenciómetros con un metal delgado no tienen esa limitación. Sin embargo, una desventaja común de los transductores tipo potenciométricos, es el desgaste mecánico y la corrosión, la cual altera la señal de salida del transductor.

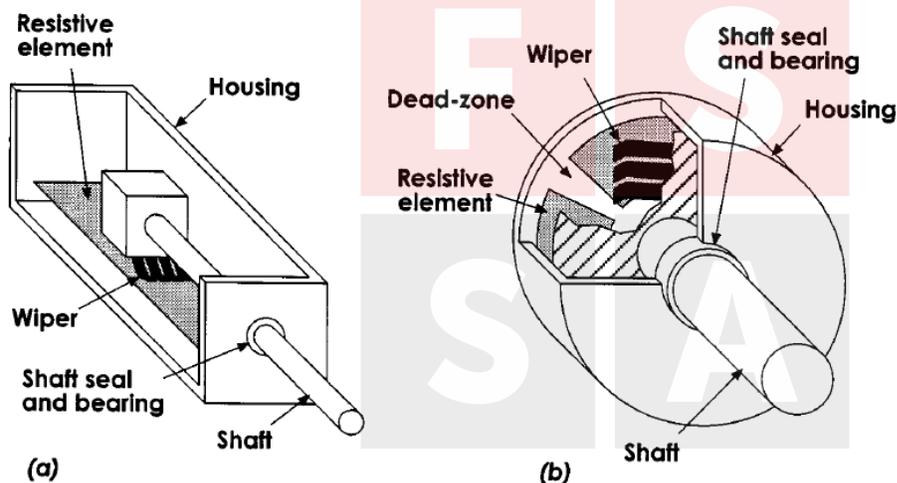


Figura 22: representación de un potenciómetro lineal (a) y rotacional (b).

El principio de funcionamiento se basa en que la resistencia es función del área del conductor, la longitud y su resistividad. El potenciómetro tiene un contacto conductivo (**wiper**) que se desliza sobre un elemento resistivo (**resistiveelement**), acorde a la posición de un eje externo (**shaft**). Al variar la longitud del conductor y el área, cambia su resistencia. La señal de salida es función de la posición del contacto conductivo (**wiper**). En la siguiente tabla se muestra las ventajas y desventajas de los transductores de desplazamiento resistivo.

TABLE 6.1 Fundamental Potentiometer Characteristics

Advantages	Disadvantages
Easy to use	Limited bandwidth
Low cost	Frictional loading
Nonelectronic	Inertial loading
High-amplitude output signal	Wear
Proven technology	

### TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO CAPACITIVO

Los sensores capacitivos son ampliamente usados en aplicaciones científicas. Estos se basan en el cambio de la capacitancia en respuesta de variaciones físicas. Los sensores de desplazamiento capacitivo satisfacen una alta linealidad y rango de amplitud.

La capacitancia es una función de la distancia entre 2 conductores, la superficie de los conductores y la constante dieléctrica entre los 2 conductores. Con lo cual existen 3 métodos para aplicar estos transductores por desplazamiento capacitivo; variando la distancia, el área o la constante dieléctrica.

#### **Sensores de desplazamiento variable**

Este está construido de 2 placas planas coplanarias, con una distancia variable ( $x$ ).

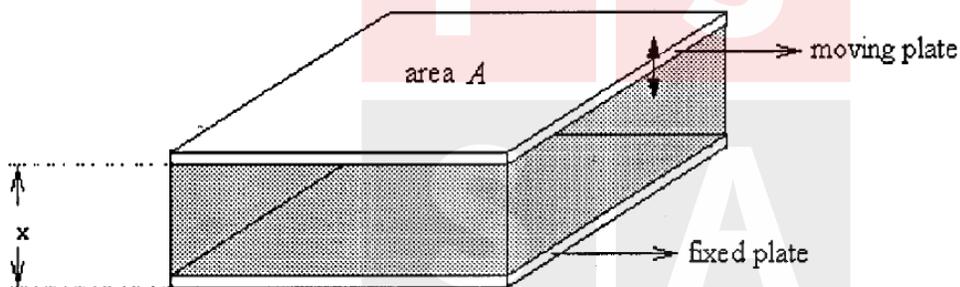


Figura 23: Transductor capacitivo de desplazamiento variable.

El inconveniente de este tipo de transductor es que no posee una salida lineal respecto a la variable independiente ( $x$ ).

#### **Sensores de desplazamiento areal variable**

Alternativamente, los desplazamientos pueden ser medidos al variar la superficie de las placas metálicas.

Este posee una salida lineal con el desplazamiento ( $x$ ). Este tipo de sensor se implementa normalmente como capacitor rotatorio para medir desplazamientos angulares.

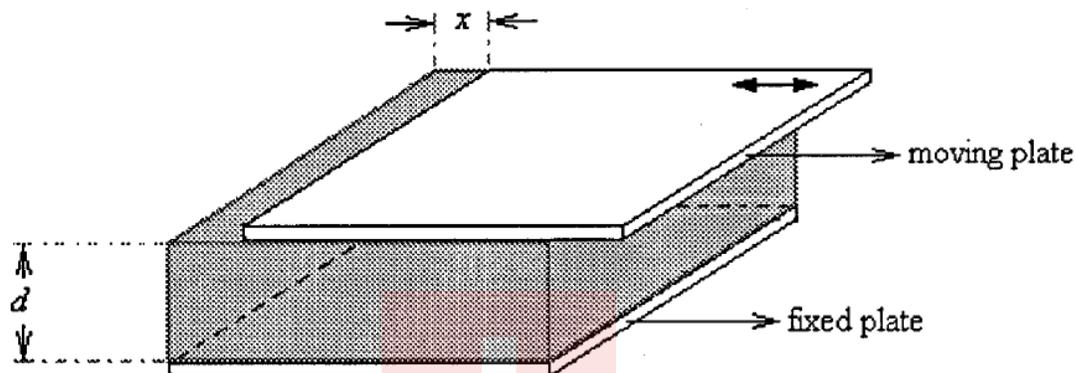


Figura 24: Transductor capacitivo de desplazamiento areal variable.

### Transductor de capacitivo de desplazamiento dieléctrico variable

En algunos casos el desplazamiento se puede medir por el movimiento relativo del material dieléctrico entre las placas metálicas.

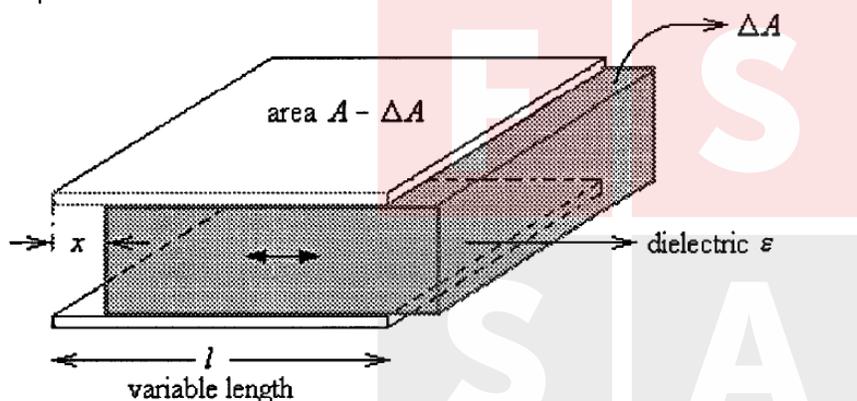


Figura 25: Transductor capacitivo de desplazamiento dieléctrico variable.

La salida del transductor también es lineal respecto del desplazamiento. Este tipo de transductor se utiliza en forma de 2 cilindros concéntricos para medir el nivel de fluido de un tanque.

### TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO INDUCTIVO

Los transductores inductivos poseen amplia aplicación en la industria, debido a que son más robustos, compactos y se ven menos afectados por factores medioambientales (polvo, humedad etc.), en comparación a los transductores capacitivos.

Los transductores inductivos se basan en las leyes de un circuito magnético. Estos se pueden clasificar como **pasivos** o **autogeneración**. Los tipos de **autogeneración** utilizan el principio de generación eléctrica, esto es, cuando existe un movimiento relativo entre un conductor y el campo magnético. El movimiento del conductor, en el campo magnético induce un voltaje en el conductor. En transductores inductivos, el movimiento relativo entre el campo magnético y el conductor es suministrado por la variable que se desea medir, usualmente por medio de un movimiento mecánico.

Por otro lado, los transductores **pasivos** requieren un suministro externo de energía. En este caso, la acción del transductor es simplemente la modulación de la señal de excitación.

Para el explicar el funcionamiento básico de los transductores inductivos, vamos a introducirnos en la teoría de circuitos magnéticos. El circuito magnético consiste en un núcleo (hecho de un material ferromagnético), con una bobina de  $n$  números de espiras envueltos en el núcleo.

La bobina actúa como una fuente de fuerza magneto-motor (emf), el cual conduce el flujo a través del circuito magnético. Si se asume que la brecha de aire es cero, la ecuación del circuito magnético se puede expresar como:

$$\Phi = \frac{n \times i}{R} (\text{weber})$$

Donde **n**: Es el número de vueltas de la bobina; **i**: Es la corriente que circula por la bobina y **R**: Reluctancia magnética.

$$R = \frac{L}{\mu_r \cdot S}$$

Figura 26: formula de reluctancia magnética.

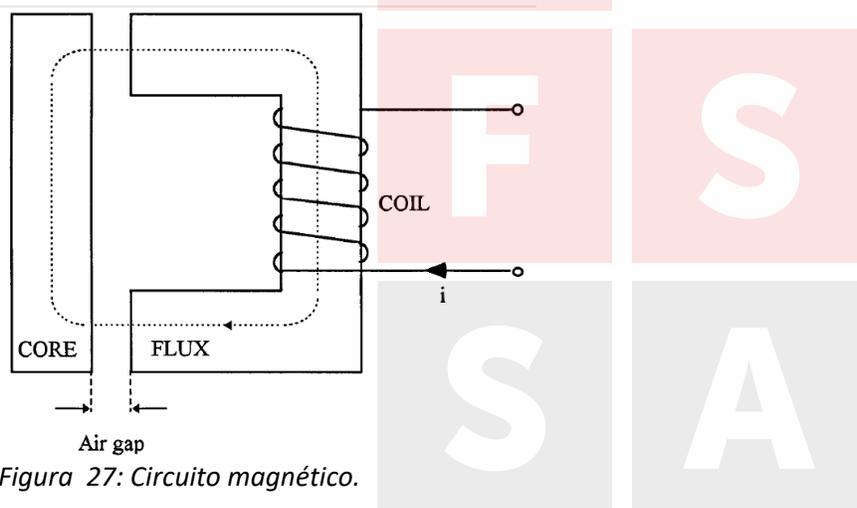


Figura 27: Circuito magnético.

La representación de la figura de arriba muestra el principio básico del transductor inductivo. Si la brecha de aire se deja variar, el núcleo ferromagnético se separa en 2 partes por el aire. Esto provoca que la reluctancia del circuito total sea la reluctancia del núcleo y la del aire. La permeabilidad relativa del aire, es del orden de la unidad, mientras que la del núcleo es del orden de unos pocos de miles. Esto indica que la presencia de aire causa un gran incremento en la reluctancia del circuito disminuyendo el flujo magnético en el circuito. Entonces una pequeña variación de la brecha de aire provocará un cambio medible en la inductancia.

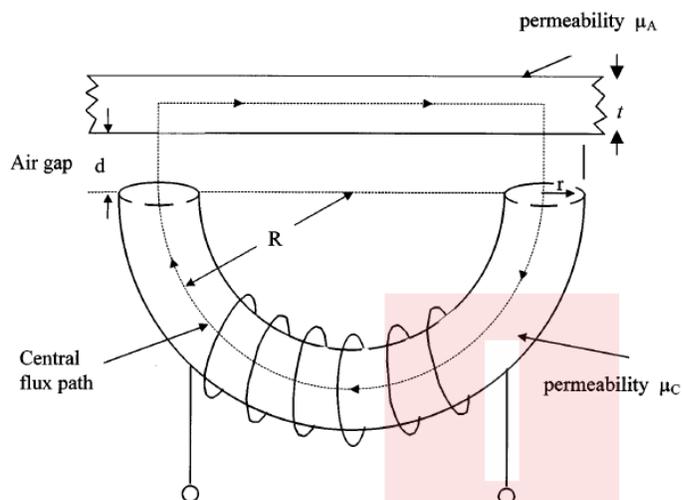


Figura 28: Representación de un transductor de reluctancia variable.

**TRANSDUCTORES TERMO-ELÉCTRICO**  
**TRANSDUCTOR DE TEMPERATURA RESISTIVA**

**Termómetro biomateriales**

El transductor de temperatura bimetálico, utiliza placas de metales de diferentes constantes de dilatación térmica, la variación de la dimensión del metal es proporcional a la variación de temperatura y la resistencia eléctrica del material. Por lo tanto, al variar la resistencia del metal producto de la temperatura, se tendrá una salida determinada por el transductor (en forma de corriente o voltaje).

La construcción básica del transductor térmico bimetálico es la unión de 2 placas metálicas unidas y con diferentes constantes de expansión.

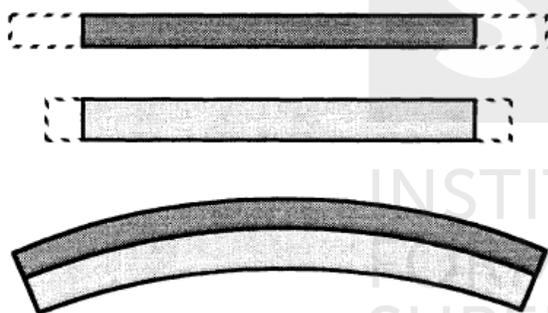


Figura 29: composición del termómetro bimetálico.

Cuando la temperatura cambia, las placas metálicas tenderán a doblarse en una forma de arco. Se seleccionan metales con gran diferencia de expansión térmica. El metal que tiene mayor expansión térmica se conoce como elemento activo, mientras que el otro metal (con menor coeficiente de expansión térmica), es el elemento pasivo. Generalmente el elemento pasivo es una aleación de hierro y níquel que posee un coeficiente muy bajo ( $0.1 \text{ a } 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ).

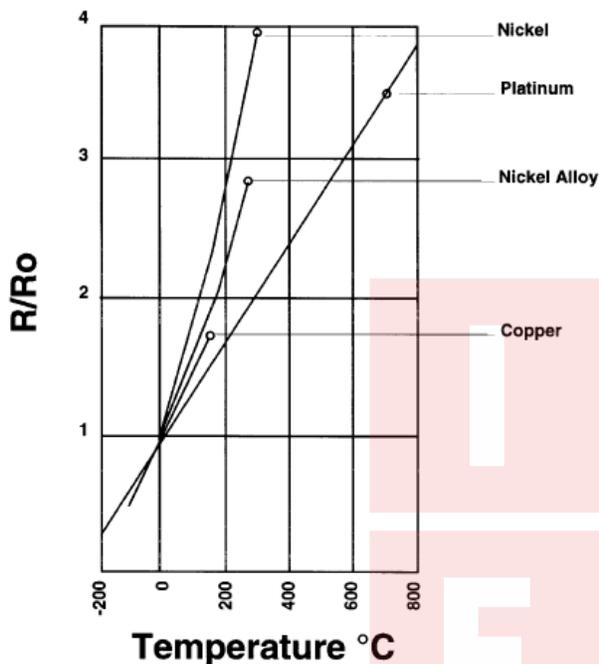


Figura 30: Relación entre la resistividad y la temperatura.

### Semiconductores

Se sabe que la cantidad de portadores de carga (electrones o huecos), incrementa con la temperatura. A mayor temperatura mayor portadores de carga (mayor corriente). La resistencia de un semiconductor disminuirá con el aumento de la temperatura.

La mayoría de las uniones de semiconductores en los transductores de temperatura usan la configuración del transistor bipolar. Una corriente constante que atraviesa la unión base-emisor, produce un voltaje en dicha unión (base-emisor). La cual es una función lineal de la temperatura absoluta. La caída de voltaje en general tiene un coeficiente de aproximadamente  $2\text{mV}^{\circ\text{C}^{-1}}$ . La ventaja de los transductores semiconductores es que tienen una función mucho más linealizada que los transductores termocupla y los resistivos.

En la siguiente figura se muestra un transistor bipolar utilizado para la medición de temperatura. Además, se muestra el voltaje como función de la temperatura.

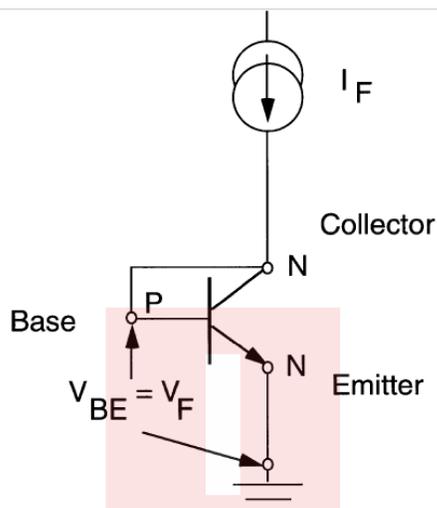


Figura 31: Configuración del transductor bipolar como sensor de temperatura.

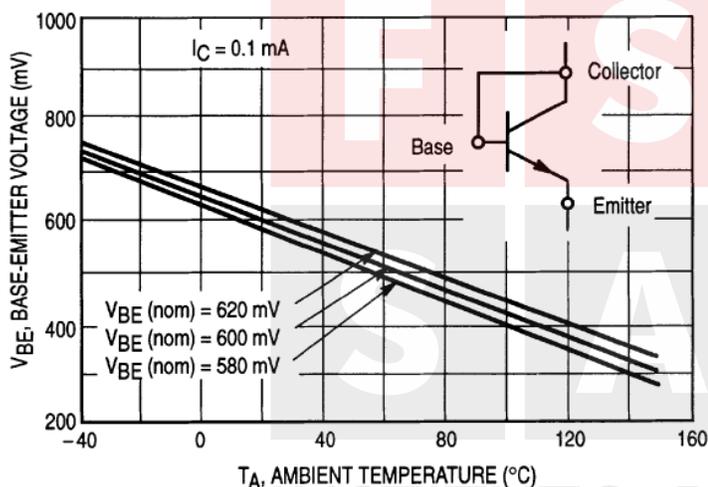


Figura 32: Grafico de voltaje vs temperatura para un sensor de silicio.

### TRANSDUCTOR TERMOCUPLA

Debido al incremento en la variedad de sensores de temperatura, las termocuplas se mantienen como los más usados, debido a su simplicidad, versatilidad y fácil uso.

Cuando se pone en contacto 2 metales diferentes, se genera una diferencia de potencial. Este potencial de unión de los metales depende de la naturaleza de los metales y de la temperatura. El área superficial de la unión no influye en la generación de potencial. Para varias combinaciones de metales el potencial que se genera en la unión de los metales es proporcional a la temperatura.

Por ejemplo, una termocupla "tipo J" está hecha con un alambre de hierro y otro de aleación de níquel y cobre, al conectar la unión a 750°C, deberá aparecer una diferencia de potencial (voltaje) de aproximadamente 42.2 mV.

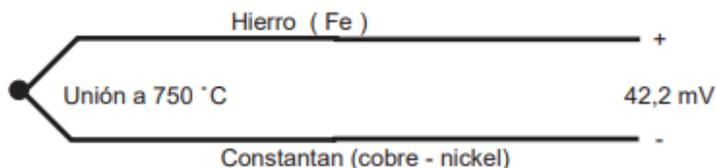


Figura 33: Esquema de un medidor tipo termocopla.

Normalmente las termocoplas industriales están encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable, en un extremo está la unión y en el otro se encuentra el terminal eléctrico de los cables, protegido con un cabezal de aluminio.

Existen una gran variedad de tipos de termocoplas, pero las más comunes son las del tipo “J” y tipo “K”. Las termocoplas tipo J se usan principalmente en la industria del plástico, goma y fundición de materiales a baja temperatura. Por otro lado, la termocopla tipo K se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas de 1300°C.

### **Efecto termoeléctrico**

Para entender mejor el funcionamiento de la termocopla, hay que saber los efectos termo eléctricos que contribuyen al voltaje de salida.

Los efectos son generalmente 3:

- **Efecto Seebeck:** Este efecto surge cuando no circula corriente, es decir, el voltaje generado se produce solo por la diferencia de temperatura de los metales. A mayor temperatura, mayor es el número de electrones, generando un voltaje más alto.
- **Efecto Peltier:** Cuando fluye corriente a través de la unión de 2 metales diferentes, la temperatura de la unión cambiará. Dependiendo de la dirección de la corriente, la unión estará más fría o más caliente que la temperatura ambiente. Este efecto es causado por el hecho que todo conductor de electricidad también transporta calor. El efecto Peltier es un efecto indeseable en las termocopla, ya que da un error en la lectura de temperatura.
- **Efecto Thomson:** Si fluye corriente a través de un conductor uniforme, en dirección de un gradiente de temperatura negativo (hacia temperaturas bajas), se generará un calor termoeléctrico. Si se invierte la dirección de la corriente, el calor será extraído desde el conductor. Este efecto reversible también se origina por el hecho que el proceso de conducción eléctrica en un metal, es acompañado por la transferencia de calor, y de manera inversa la conducción de calor es acompañado por una conducción de electricidad. Este efecto da lugar a errores en la medición de temperatura.

### **TRANSDUCTOR PARA LA PRESIÓN**

Sabemos que la presión se define como la fuerza por unidad de área. La manera más directa de medir presión es aislar un área sobre un elemento mecánico, para que una fuerza actúe sobre esta. La deformación del elemento de medición produce un desplazamiento y deformación que se puede medir para “tomar un lectura” de la presión.

#### **Transductor piezoeléctrico**

Se requiere un medio de detección, para convertir la deformación del instrumento en una lectura de presión. En los sensores piezoeléctricos, la deformación asociada al cristal piezoeléctrico se convierte en un voltaje de salida. Estos dispositivos son útiles para medir eventos transitorios de alta presión. El efecto piezoresistivo se refiere al cambio de la resistencia eléctrica de un material cuando se somete a un esfuerzo o se produce una deformación del material. Es importante resaltar los siguientes casos; (1) la deformación es paralela a la

dirección de la corriente eléctrica y (2) la deformación es perpendicular a la dirección de la corriente. Estos dos casos se denominan factor de calibración longitudinal y transversal. Estos dos factores son generalmente diferentes en magnitud y opuesto en signo.

### **Transductor capacitivo**

Estos tipos de transductores son muy utilizados por su gran precisión (0.1% o menor). Los tipos capacitivos se pueden diseñar para cubrir un amplio rango de presión. En la siguiente figura se muestra el funcionamiento del transductor de presión capacitivo. Un diafragma de silicio sirve como elemento para “medir la presión” y constituye un electrodo del capacitor. El otro electrodo, el cual está fijo, está formado por una capa de metal depositada sobre un sustrato de vidrio o cerámico. Al aplicarse una presión, ésta hace flexionar el diafragma, el cual cambia la distancia entre las placas del capacitor, cambiando así la capacitancia.

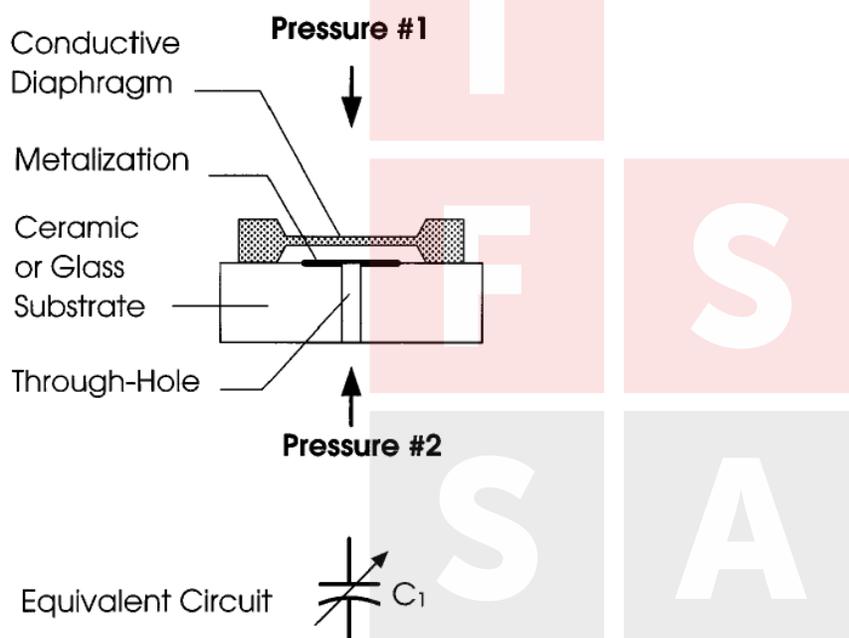


Figura 34: Representación de un transductor de presión capacitivo.

### **TRANSMISIÓN DE SEÑAL**

Las mediciones de las variables físicas se hacen por medio de un sensor, condicionado por el transductor, luego son transferidos a otra posición usando un transmisor. En el caso del proceso de control, la exactitud de la transmisión del valor de la variable es muy importante, cualquier error introducido durante la transmisión actuará sobre el controlador y degradará la exactitud de la señal. Existen varios métodos de transmisión de datos. La solución elegida dependerá del tipo de sensor, la aplicación de la señal, la distancia que necesita la señal ser enviada, requerimientos de exactitud del sistema y los costos involucrados. Desafortunadamente, la exactitud del sistema puede ser degradado por una pobre transmisión.

Las señales de control se pueden ser transmitidas neumática o eléctricamente. Debido a la necesidad de suministro de aire para la transmisión neumática, instalación para la circulación de aire, tiempo de reacción, rango limitado de transmisión, confiabilidad, exactitud y requerimientos del sistema de control, es que se prefiere la transmisión eléctrica. La señal eléctrica puede ser transmitida en formas de voltaje, corriente, digitalmente, ópticamente o de manera inalámbrica.

Los transmisores son dispositivos que aceptan un bajo nivel de señal eléctrica y los formatea, de modo que pueden ser transmitidos a un receptor distante. Los transmisores son capaces de transmitir una señal con

suficiente amplitud y energía, de modo que pueda ser reproducido a un receptor distante, como una representación verdadera de la entrada del transmisor, sin ninguna pérdida de exactitud o información.

### TRANSMISIÓN NEUMÁTICA

La transmisión neumática de la señal fue usada para la transmisión de información y aún se utiliza en instalaciones más viejas o en aplicaciones donde la señal eléctrica pueda provocar la ignición de material combustible. La transmisión de la señal neumática para largas distancias requiere un tiempo de estabilización mucho más largo para las necesidades de procesamiento hoy en día. Las líneas de señal neumática también son poco flexibles, voluminosos y costosos, comparados con las líneas de señal eléctrica. La presión para la transmisión neumática fue estandarizada en 2 rangos: de 3 a 15 psi y 6 a 30 psi.

### TRANSMISIÓN ANALÓGICA

#### Consideraciones de ruidos

Las señales analógicas son difíciles de "cablear" entre el transmisor y el receptor. Comparados a las señales digitales, las señales analógicas son relativamente lentas, debido a que tienen un tiempo constante de la capacitancia, inductancia y resistencia, pero aún son más rápidas que los sistemas mecánicos.

Las señales analógicas pueden perder exactitud si las líneas de señal son largas y con alta resistencia. Estas son susceptibles a una descompensación a puesta a tierra, bucles corrientes parásitas y ruidos. En la siguiente figura se muestra el controlador que suministra DC al transmisor y el camino de la señal desde el transmisor al controlador. La corriente directa de los sensores puede ser obtenida desde el controlador para ahorrar costo de derivar energía al sensor. Sin embargo, la corriente que fluye en la línea de tierra desde el suministro será mucho más grande que la corriente de la señal y producirá una caída de voltaje a través de la resistencia del conductor a tierra, elevando el nivel de tierra del transmisor, esto dará un error de desviación de la señal en el controlador.

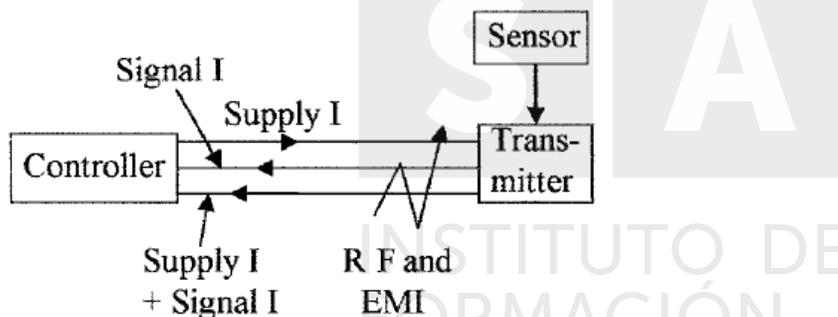


Figura 35: Suministro y conexión entre el controlador y el transmisor usando conductores rectos.

Para reducir el problema de ruido y desviación de la señal, se establece la siguiente instalación.

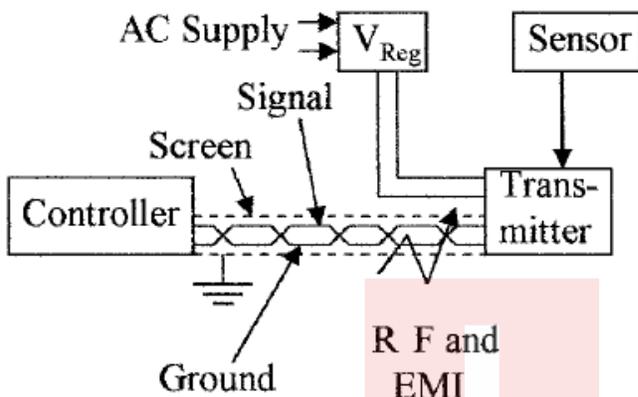


Figura 36: Suministro y conexión de señal entre el controlador y el transmisor usando un par entrelazado.

El suministro de DC al transmisor se genera desde una línea de AC por un transformador aislado y un regulador de voltaje en el transmisor. La conexión a tierra se usa solo como camino de retorno de señal. Los cables de retorno a tierra y de la señal son un par entrelazado apantallado, es decir, el cable de la señal está apantallado (screen) por una vaina a tierra (ground). La interferencia por radio frecuencia (RF) y por inducción electromagnética (EMI) se reducen por la pantalla y el ruido inducido también se reduce.

#### Señal de voltaje

Las señales de voltaje son normalmente estandarizadas en un rango de 0 a 5V o 10V, o de 0V a 12V, siendo el más común de 0 a 5V. Los requerimientos del transmisor son de baja impedancia de salida para permitir al amplificador conducir una amplia variedad de cargas, sin un cambio en el voltaje de salida, baja desviación por temperatura, bajo desvío por offset y bajo ruido.

#### Señal de corriente

Las corrientes de señal son estandarizadas en 2 rangos; (1) de 4 a 20mA y (2) 10 a 50mA, donde 0mA es una condición para la falla. Los requerimientos del transmisor son alta impedancia de salida, de modo que la corriente de salida no varía con la carga, baja temperatura, desvío offset y bajo ruido. La principal desventaja de la señal de corriente es su mayor tiempo de estabilización, debido a su alta impedancia del conductor, el cual limita la capacidad de corriente a cargar la línea de la capacitancia. Después de que la línea de la capacitancia se carga, la señal de corriente en el controlador es la misma que la corriente en el transmisor y se es afectada por los cambios normales de la resistencia del cable.

#### Conversión de señal

Se requiere una conversión de señal entre una señal de bajo nivel y una señal de control de alta energía para el actuador y el control del motor. La señal del control puede ser digital, corriente o voltaje analógico o neumático. Es algunas veces necesario convertir la señal eléctrica a señal neumática para el control del actuador.

Un amplificador neumático lineal o amplificador se puede usar para incrementar la presión de una señal de baja presión a una de alta presión, para operar sobre el actuador. En la siguiente figura se muestra un amplificador de presión. El gas desde un suministro de alta presión se controla por un plug cónico, el cual se controla por un diafragma cuya posición se ajusta por una señal de baja presión.

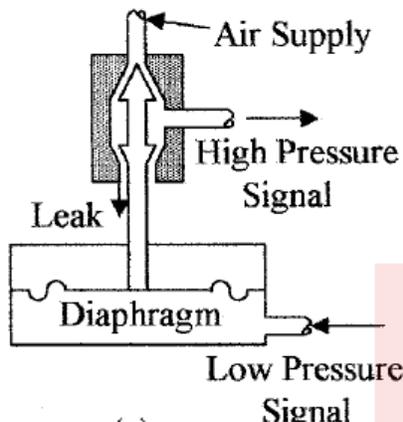


Figura 37: Amplificador de presión.

La ganancia del sistema se ajusta por el área del diafragma dividido por el área de la base del plug cónico. La presión de salida es invertida, pero lineal con respecto a la presión de entrada. Una retroalimentación neumática puede ser usada para mejorar las características del amplificador.

Uno de los distintos diseños para convertir la presión en corriente eléctrica se muestra en la siguiente figura. El resorte tiende a mantener una "aleta" (*flapper*) cerrada, dando una alta presión de salida (15 psi). Cuando la corriente pasa a través de la bobina, la aleta mueve la bobina hacia adelante, abriendo la brecha de aire en la tobera, reduciendo la presión del aire. La salida de presión se establece a un máximo de 15 psi, al ajustar el "cero" cuando la corriente de la bobina es 3mA. La ganancia del sistema y su rango se establecen al mover la tobera a lo largo de la aleta. La presión de salida se invierte con respecto a la amplitud de la corriente. Existe una relación lineal entre la corriente y la presión.

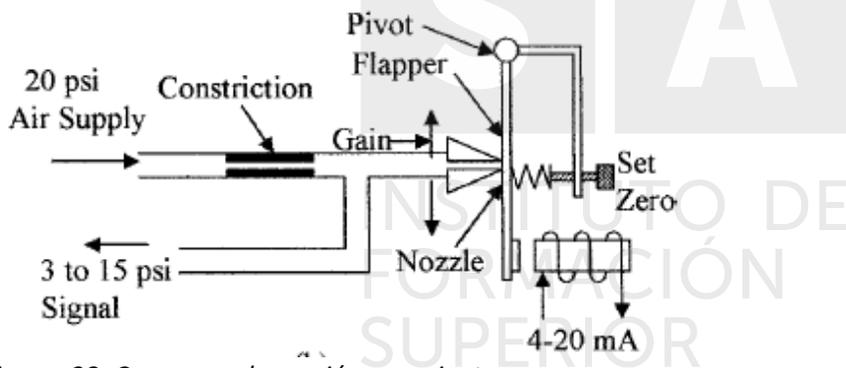


Figura 38: Convertor de presión a corriente.

### TRANSMISIÓN DE SEÑAL DIGITAL

La señal digital puede ser transmitido vía un cableado paralelo, transmisión de radio o fibra óptica sin pérdida de integridad. Los datos digitales pueden ser enviadas más rápidos que los datos análogos debido a su mayor velocidad de transmisión. Otra ventaja es que los transmisores y receptores requieren mucho menos energía que los transmisores analógicos.

Los estándares de comunicación para la transmisión digital entre las computadoras y equipos periféricos se definen por el instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (IEEE). El estándar IEEE-488, establece que el nivel digital "1", será representado por un voltaje de 2V o mayor y el nivel digital "0" se especifica por 0.8V o menor. Por otro lado, el estándar RS-232 especifica que el nivel digital "1" por un voltaje entre +3V y 25V y el

nivel "0" como -3V y -25V. La fibra óptica está siendo extensamente usada para dar mayor velocidad de transmisión a grandes distancias y no son afectados por efectos electromagnéticos. Las señales digitales pueden ser transmitidas sin pérdida de exactitud y pueden contener un código para la corrección de error para una corrección de error automática. Estas redes se conocen como LAN, cuando se usa en un área limitada como una planta o un área más amplia (WAN) cuando se usa como un sistema global. En la siguiente figura se muestra una red LAN, el sector ingeniería, finanza y marketing pueden comunicarse con el controlador de procesos para monitorear las operaciones de costo y de entrega del producto sobre el LAN, directamente desde el sistema de control.

Las computadoras basadas en los sistemas de control de procesos son flexibles con un procesador central y tienen la capacidad de adicionar interfaces sobre una base limitada. La unidad de interfaz puede recibir información análoga o digital desde los sensores de monitoreo o de los transmisores para enviar información, y así controlar el accionar de los actuadores. Una unidad **receptora** tendrá generalmente 8 amplificadores análogos con convertidores análogo-digital (ADCs), dando a la unidad la capacidad de una interfaz de 8 transmisores análogos y cambiar los datos en formato digital, para la interface con el procesador. Una unidad **transmisora** de datos tendrá la capacidad de controlar 8 actuadores y contendrá 8 convertidores digital-análogos (DAC), para cambiar los datos digitales a un formato análogo para cada actuador a ser controlado.

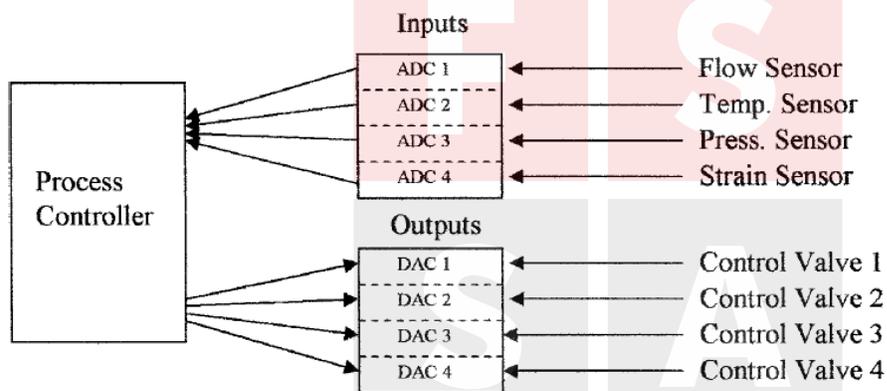


Figura 39: Sistema de proceso con entradas y salidas para cada variable.

### **Sensores inteligentes**

Los sensores inteligentes son un nombre dado a los sensores con un ADC, un procesador y DAC para el control del actuador. El siguiente ejemplo muestra el sensor inteligente en una instalación de un horno para medir su temperatura.

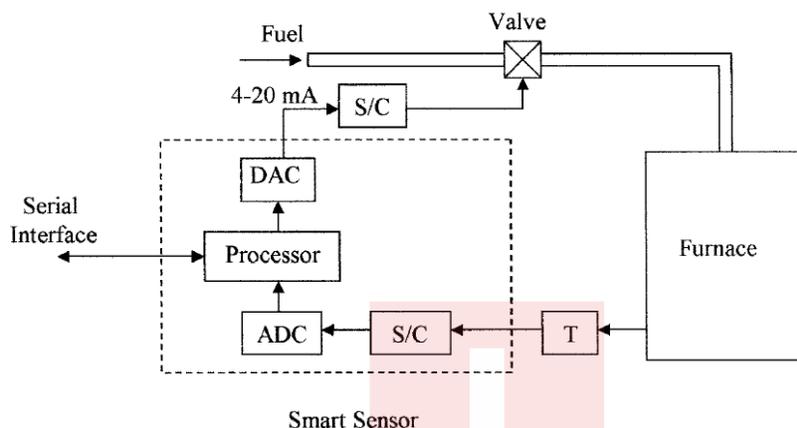


Figura 40: Diagrama de sensor inteligente.

La electrónica del sensor inteligente contiene todos los circuitos necesarios para la interfaz del sensor, amplificar la señal, aplicar un tipo de sistema de control, mide la temperatura y la corrige si es necesario, corrige la no linealidad del sensor, convierte a formato digital los datos (ADC), para la interfaz con el procesador y convierte a formato analógico (DAC) para el control del actuador.

### CONVERSIÓN DIGITAL-ANÁLOGA

Existen 2 métodos de convertir la señal digital a una analógica. Existen convertidores DAC, usados para señales de voltajes de baja potencia y una modulación de ancho de pulso, que se usa en circuitos de alta potencia, por ejemplo en el control de actuadores y motores.

Los convertidores digital-análogos (DAC), cambian la información digital en analógico usando una red de resistor o un método similar. La señal analógica es normalmente usada para aplicaciones de baja energía, pero pueden ser amplificadas y ser usadas para control. En el siguiente ejemplo se muestra la conversión de una señal sinusoidal digital a una analógica. En este ejemplo la señal digital se convierte a un voltaje cada 0.042ms, dando paso a la forma de onda.

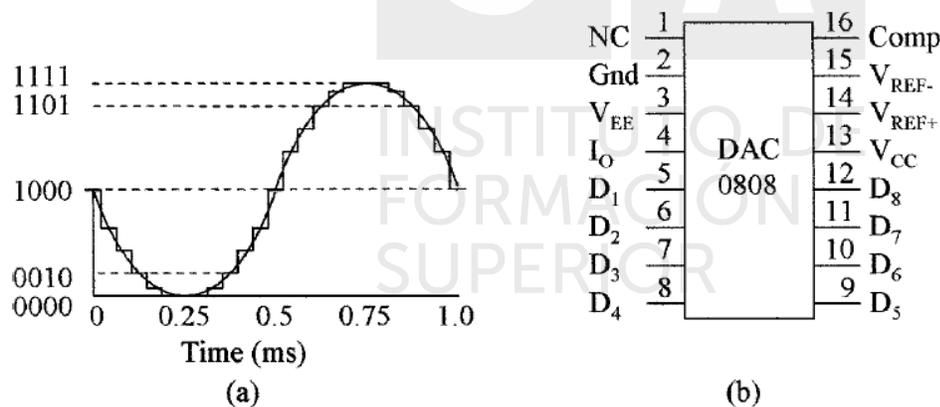


Figure 13.18 (a) 1 kHz sine waveform reproduced from a DAC and (b) commercial 8-bit DAC.

Figura 41: Discretización de una señal continua.

### Modulación de ancho de pulso

La modulación de ancho de pulso cambia la duración para la cual se aplica el voltaje para reproducir una señal analógica. El ancho del pulso de salida mostrada en la figura de arriba son moduladas, yendo el ancho de

la modulación de estrecho a ancho y nuevamente a estrecho. Si los pulsos de los voltajes se promedian, el ancho de modulación mostrado dará la mitad de la onda sinusoidal. La otra mitad de la onda seno se genera usando la misma modulación, pero con un suministro negativo. La corriente se limita por la carga. Este tipo de ancho de modulación es normalmente usado en conductores de potencia para control de motores de AC desde un suministro de DC.

### Telemetría

La telemetría es una transmisión inalámbrica de medición de datos desde una posición remota a una posición central para el procesamiento o almacenamiento. Este tipo de transmisión se usa, por ejemplo, para enviar datos a grandes distancias desde estaciones de clima. También se usa en maquinarias rotatorias donde es cableado no es una posibilidad para el envío de datos. Recientemente la comunicación inalámbrica se está usando para eliminar el cableado o para dar más flexibilidad en mover la posición de equipos de monitoreo temporarios. La información transmitida es una transmisión inalámbrica usando técnicas de módulo de amplitud (AM) o módulos de frecuencia (FM). Pero estos métodos no son lo suficientemente exactos para la transmisión de datos de instrumentación, como varía la calidad de recepción y la señal original puede no ser exactamente reproducida. En telemetría, los transmisores transmiten la señal sobre grandes distancias usando una forma de FM o una señal modulada de amplitud de ancho variable.

Uno de los usos en la industria Oil and Gas, es con el MWD (measurement while drilling), LWD (measurement while logging) y en sistemas de administración de agua. El MWD manda pulso de presión a través del lodo de perforación los cuales en la superficie los codifica para dar la información deseada (ángulo y dirección del trepapo, peso sobre el trepapo, torque, etc.).

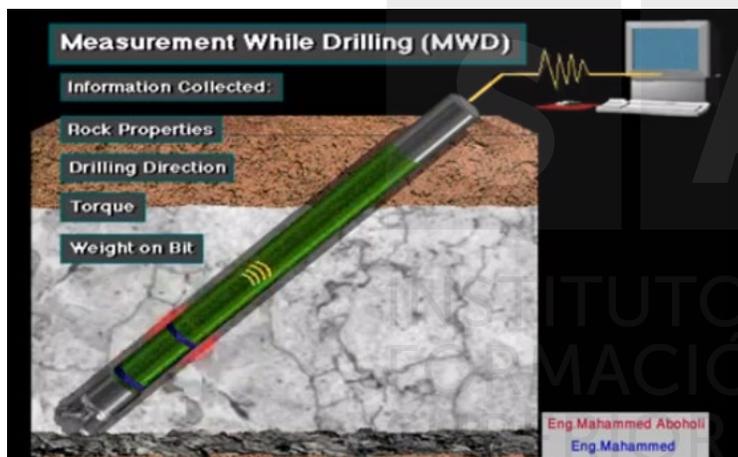


Figura 42: Representación de la herramienta MWD.

### Medidor de presión

La presión se define físicamente como la fuerza ejercida sobre un área determinada. Esta fuerza la puede ejercer un gas o un líquido. Se expresa comúnmente en psi (sistema inglés) o en Pa (sistema internacional).

$$P = \frac{F}{A}$$

### TÉRMINOS BÁSICOS

Vamos a definir ciertos parámetros para su comprensión en los instrumentos de medición de presión.

- **Densidad:** Se define como la masa por unidad de volumen (expresada en  $\text{kg/m}^3$  o en  $\text{lb/ft}^3$ ).
- **Gravedad específica:** Es la relación de densidad de un fluido respecto de otro fluido de referencia (en caso de líquidos es el agua y para gases es el aire). Dicha relación se realiza en condiciones estándar, es decir, a  $60^\circ\text{F}$  y 1 atm. En la siguiente tabla se muestra la gravedad específica de algunos materiales.

TABLE 5.1 Specific Weights and Specific Gravities of Some Common Materials

	Temperature, °F	Specific weight		Specific gravity
		lb/ft <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	
Acetone	60	49.4	7.74	0.79
Alcohol (ethyl)	68	49.4	7.74	0.79
Glycerin	32	78.6	12.4	1.26
Mercury	60	846.3	133	13.55
Steel		490	76.93	7.85
Water	39.2	62.43	9.8	1.0

Conversion factors.  $1 \text{ ft}^3 = 0.028 \text{ m}^3$ ,  $1 \text{ lb} = 4.448 \text{ N}$ , and  $1 \text{ lb/ft}^3 = 0.157 \text{ kN/m}^3$ .

Figura 43: Relación de la gravedad específica con la temperatura.

- **Presión estática:** Es la presión del fluido, el cual se encuentra estacionario (Punto A).
- **Presión dinámica:** Es la presión ejercida por el líquido o gas cuando impacta sobre un objeto debido a su movimiento (Punto B).

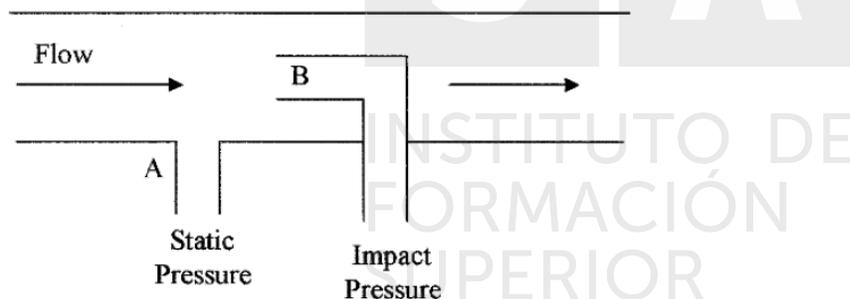


Figura 44: Representación de la presión estática (A) y dinámica (B).

### MEDICIÓN DE PRESIÓN

Existen ciertas definiciones respecto de la presión que se desee medir. Vamos a dar el significado de cada una.

**Vacío:** Es la presión medida por debajo de la presión atmosférica.

**Presión atmosférica:** Es la presión ejercida sobre la superficie de la tierra, expresada a nivel del mar. La misma varía dependiendo la altura respecto del nivel del mar.

**Presión absoluta:** Es la suma de la presión atmosférica y la presión manométrica, normalmente se expresa en psia.

**Presión manométrica:** Es la presión medida con respecto de la presión atmosférica, normalmente se expresa en psig.

### FÓRMULAS DE PRESIÓN

La presión hidrostática es la presión ejercida por un fluido. Esta incrementa a medida que la altura o profundidad del fluido incrementa. La presión hidrostática está dada por:

$$P = P_o + \gamma h$$

Donde  $P_o$  es la presión de referencia;  $\gamma$  Es el peso específico y  $h$  la profundidad.

Cabe resaltar que la medición se debe tomar respecto de un nivel de referencia, como se expresa como en la siguiente figura.

La ecuación de arriba también deja expresado que la presión del líquido depende de profundidad y no de la forma del recipiente que contiene el líquido.

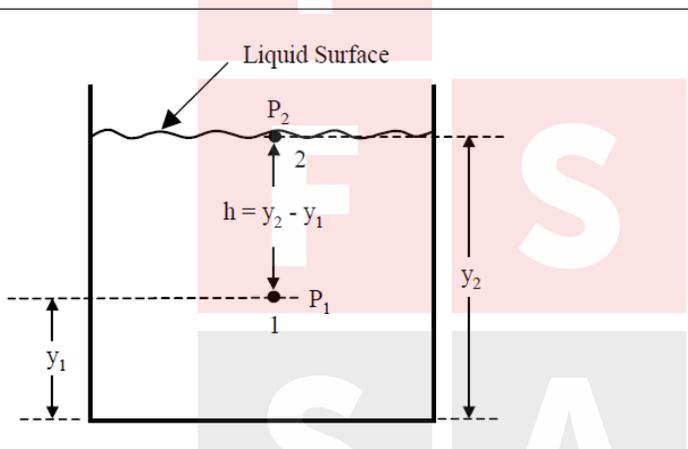


Figura 45: Representación de la presión como función de la profundidad del líquido.

Otra forma de expresar la presión se relaciona con la ley de pascal. Esta establece que en un recipiente cerrado (de poca profundidad) y suponiendo la incompresibilidad del líquido, la presión del líquido se transmite en todas direcciones con la misma magnitud. En otras palabras:

$$P_1 = P_2$$

Una aplicación práctica es el funcionamiento de la prensa hidráulica.

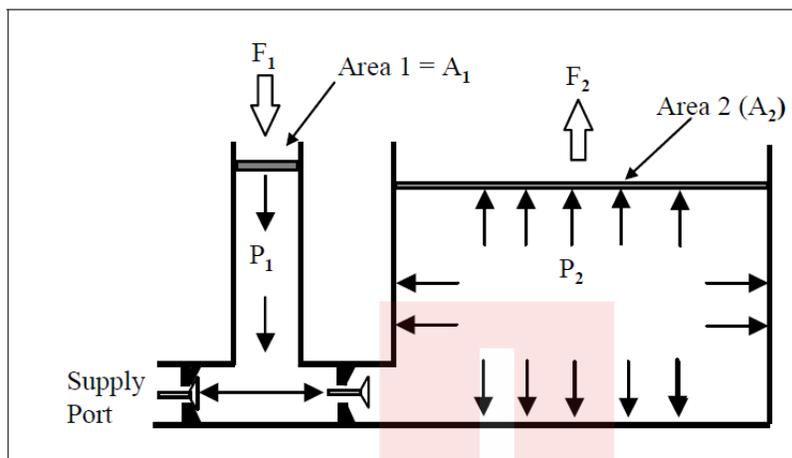


Figura 46: Esquema de la prensa hidráulica.

Como:

$$P_1 = \frac{F_1}{A_1} \quad y \quad P_2 = \frac{F_2}{A_2}$$

Como las presiones es este caso son iguales resulta:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad \rightarrow \quad F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1$$

$F_2$  es una fuerza amplificada de  $F_1$ , el factor de ganancia o de amplificación es  $A_2/A_1$ .

#### INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN

##### MANÓMETROS

Los manómetros son buenos ejemplos de instrumentos de medición de presión, aunque no son muy comunes en la aplicación de instrumentación y control.

Este instrumento consiste en un tubo de vidrio en forma de U llenado parcialmente con un líquido de densidad conocida. La diferencia de altura que existe entre los lados del instrumento da una medida de la presión. En la siguiente figura se muestra un manómetro adjuntado a un tanque.

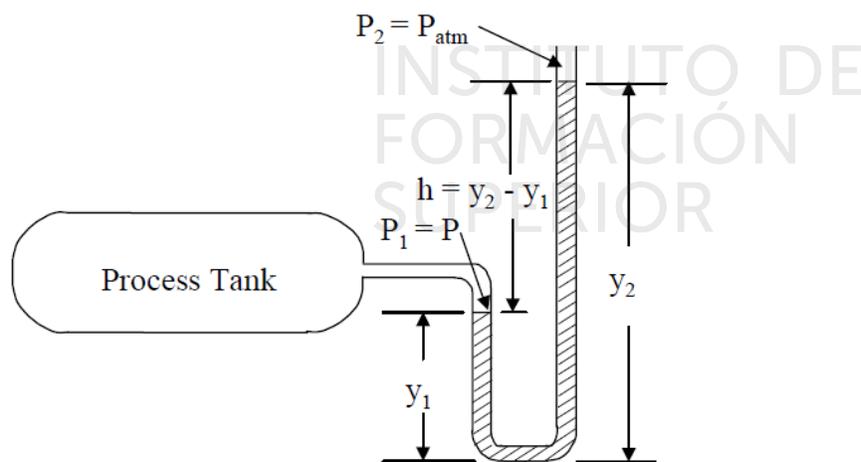


Figura 47: Esquema del manómetro para medir la presión.

##### Fuelles, diafragmas y capsulas

Los manómetros son un grupo de sensor de presión que mide la presión con respecto de la presión atmosférica. Estos incluyen diafragmas, capsulas y fuelles.

### **Diafragma**

Un medidor de presión tipo diafragma consiste en una pequeña capa de material apoyado sobre un marco rígido. La presión puede ser aplicada sobre un lado de la capa del medidor o puede ser aplicada a ambos lados. Diferentes materiales se pueden usar para medir la presión (en forma de deformación del diafragma), desde goma o plástico, para dispositivos de baja presión, silicio para dispositivos de media presión o acero inoxidable para dispositivos de alta presión. Al ejercer presión sobre un lado de la capa, esta se deforma (tomando una forma cóncava o convexa), esta deformación se puede medir, usando un medidor de tensión, piezoelectricidad o cambios en la capacitancia. Esta deformación la capta el transductor para entregar una señal de salida eléctrica

El tipo de diafragma de silicio al ser presionado produce una polarización en su estructura, generando una diferencia de potencial en sus extremos. Estos dispositivos se construyen con un medidor de deformación del elemento piezoeléctrico, compensado por la temperatura y un amplificador que genera una salida de la señal eléctrica más alta. Estos instrumentos son pequeños, precisos, confiable y operan sobre una amplio rango de temperatura. Comercialmente están fabricados para medir presión diferencial o presión absoluta, hasta 200 psi (1.5MPa), aunque se puede extender el rango de medición al usar un diafragma de acero inoxidable hasta los 10,000 psi (700 MPa).

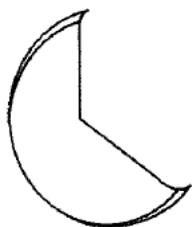


Figura 48: Medidor de presión tipo diafragma.

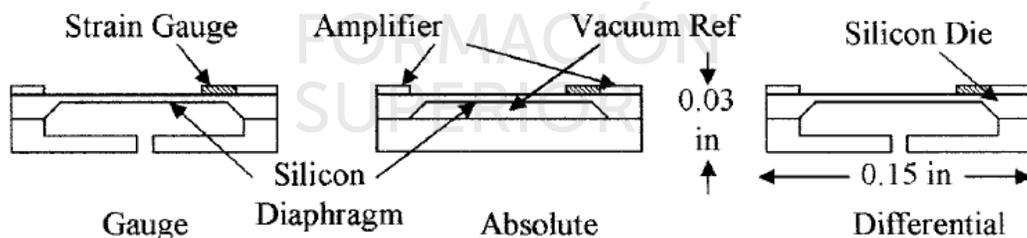


Figura 49: Descripción de un medidor de presión tipo diafragma hecho de silicio.

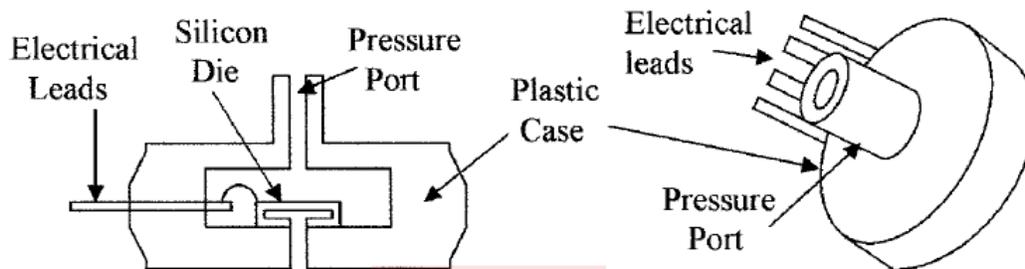


Figura 50: Conexión eléctrica del medidor de presión tipo diafragma.

### Capsulas

Son 2 diafragmas unidos. La presión se puede aplicar al espacio entre el diafragma, forzándolas a separarse. La expansión del diafragma se puede acoplar mecánicamente a un dispositivo indicador. La deflexión de la capsula dependerá de su diámetro, el tipo de material, el espesor y su elasticidad. Los materiales más usados son el fosforo, bronce, acero inoxidable o aleaciones de níquel y hierro. El rango de aplicación de la presión es de hasta 50 psi. Las capsulas se pueden unir para aumentar la sensibilidad de la medición.

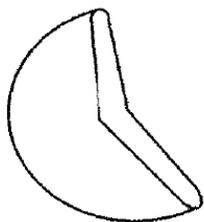


Figura 51: Esquema de la capsula para la medición de presión.

### Fuelle

Son similares a las capsulas, excepto que el diafragma en vez de estar unido directamente está separado por un tubo corrugado. Cuando se aplica presión, este se deforma al estirarse el tubo corrugado. Los materiales usados para los sensores de presión tipo fuelle son similares al tipo capsula, con una rango de presión de hasta 800 psi. La presión diferencial se puede medir al conectar 2 fuelles, de manera opuesta una de la otra. Cuando se aplica presiones a los fuelles ( $P_1$  y  $P_2$ ), se obtiene la lectura diferencial. En la siguiente figura muestra una configuración del sensor tipo fuelle como un transductor de presión diferencial conducido por un transformador diferencial variable lineal (LVDT), para obtener una señal eléctrica.

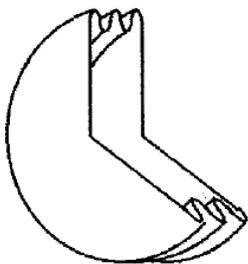


Figura 52: Esquema de un fuelle para la medición de presión.

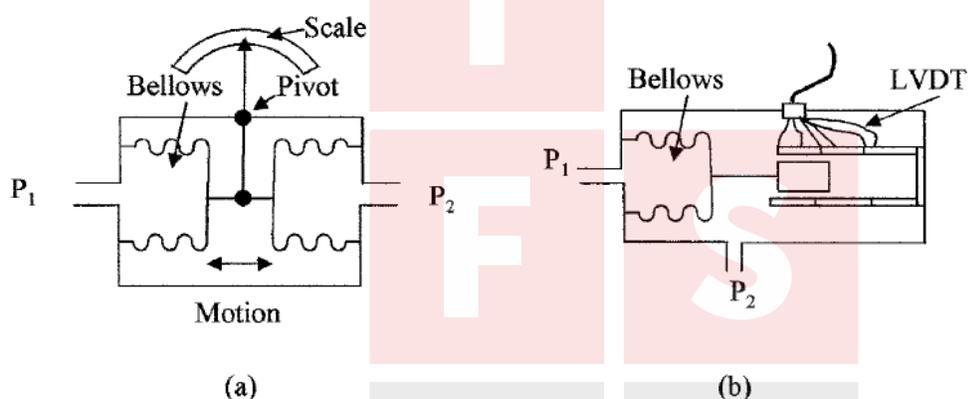


Figure 5.9 Differential bellows pressure gauges for (a) direct scale reading and (b) as a pressure transducer.

Figura 53: Medidor de presión de fuelle diferencial; a) escala de medición directa, b) con un transductor de presión.

## SEÑAL DE SALIDA A PARTIR DE LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN

### Tipo potenciómetro

Este básicamente trabaja bajo un circuito eléctrico de resistencia variable. La variabilidad de la resistencia está basada respecto a la presión aplicada. Un mecanismo tal como el diafragma se utiliza para mover el brazo del contacto deslizante (wiper) de un potenciómetro a medida que cambia la presión. Se aplica un voltaje en corriente directa en la parte superior del potenciómetro (pot), y la caída de voltaje desde el contacto deslizante (en la parte inferior) del pot es enviada a un circuito electrónico. La salida de la señal del circuito electrónico es de 4 a 20 mA.

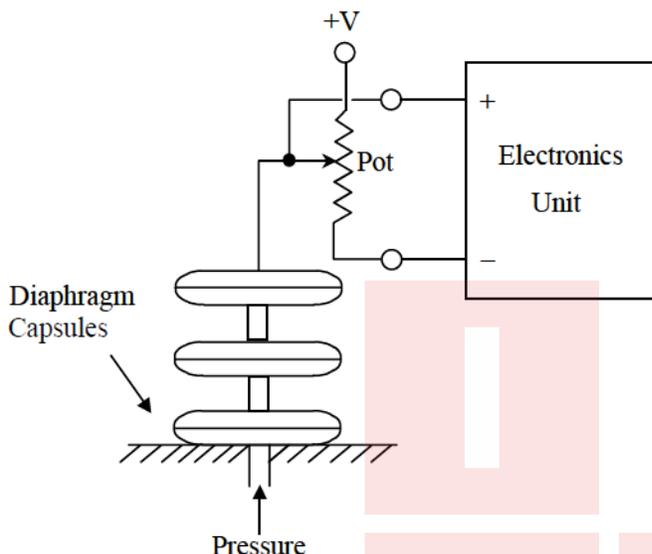


Figura 54: Funcionamiento de un medidor de presión de resistencia variable.

El rango de medición de los potenciómetros vas desde 5 psi a 10,000 psi. Pueden operar en amplio rango de temperatura.

#### TUBO DE BOURDON

El tubo de Bourdon son tubos huecos de acero, cobre o berilio, formado un círculo de  $\frac{3}{4}$  partes de longitud. Estos pueden ser de sección rectangular u ovalo. El principio de operación es que el extremo exterior tiene una superficie mayor que el extremo interior. Cuando se aplica presión, el borde exterior posee una fuerza proporcionalmente más grande, debido a su área más grande y el diámetro del círculo incrementa. Las paredes del tubo tienen un espesor de 0.01 a 0.05 pulgadas. El tubo es anclado a un extremo de modo que cuando se aplica presión al tubo, esta trata de enderezarse, teniendo la capacidad de moverse. Este movimiento puede ser mecánicamente acoplado a un indicador (puntero), el cual, al ser calibrado, indicará la presión como un indicador de línea recta, o puede estar acoplado a un potenciómetro para dar un valor de resistencia proporcional a la presión para la señal eléctrica. El rango de presión llega hasta los 10,000 psi.

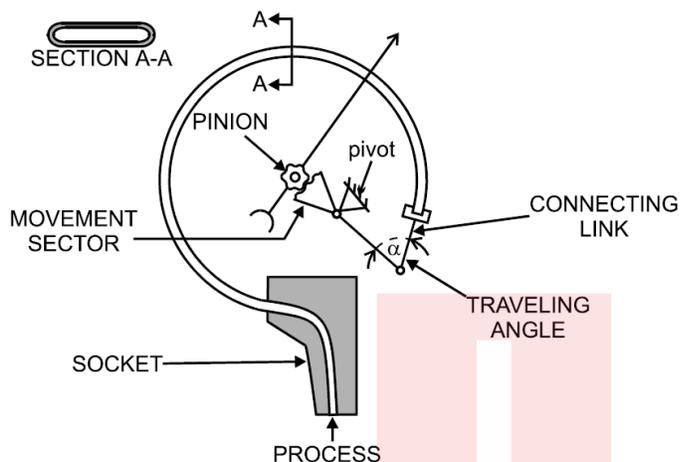


Figura 55: Esquema del tubo de burdon.

#### OTROS DISPOSITIVOS PARA MEDIR PRESIÓN

**Barómetros:** Los barómetros son usados para medir la presión atmosférica. Un barómetro simple es el barómetro de mercurio. Actualmente su uso es poco común debido a su fragilidad y a la toxicidad del mercurio. El barómetro aneroide es usado para una medición directa y se usa un sensor de estado sólido para que entregue una salida en forma de señal eléctrica.

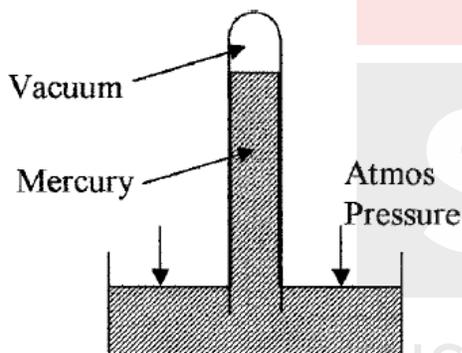


Figura 56: Barómetro de mercurio.



Figura 57: Barómetro aneroide.

**Piezoeléctrico:** Este instrumento produce una señal eléctrica (en forma de voltaje) entre los lados opuestos del cristal al aplicarse una presión sobre las paredes del cristal. El voltaje de salida es proporcional a la presión aplicada.

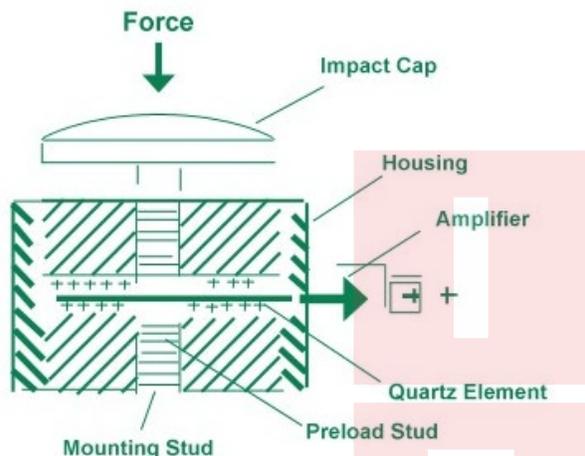


Figura 58: Medidor de presión piezoeléctrico.

**Capacitivo:** Este usa un cambio de la capacitancia entre el diafragma y una placa flexible para medir la presión. El cambio de la distancia de las placas del capacitor es una medida del valor de presión que mide el instrumento.

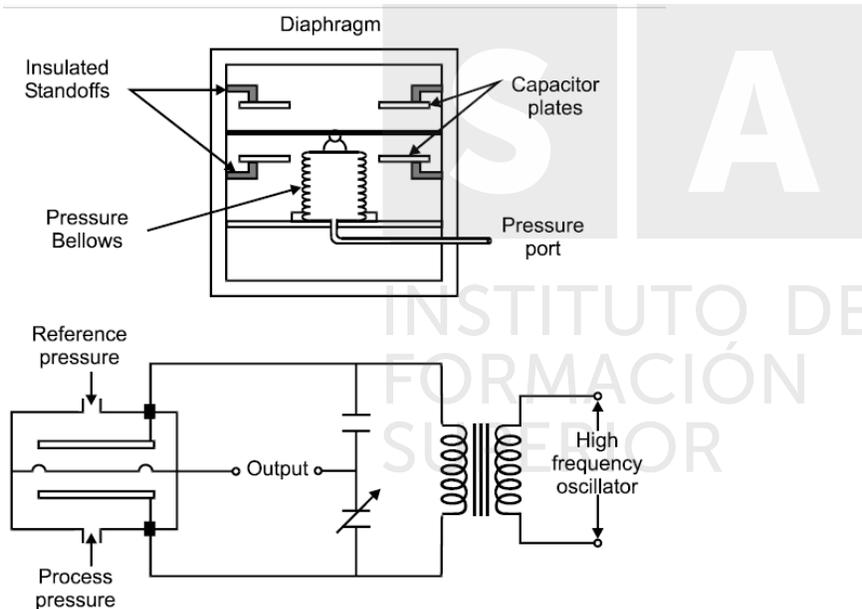


Figura 59: Medidor de presión capacitivo.

**Inductivo:** En este caso usa un diafragma como elemento mecánico para medir la presión. La inductancia es una propiedad de circuitos electromagnéticos. Este produce un voltaje inducido acorde a la variación del flujo magnético.

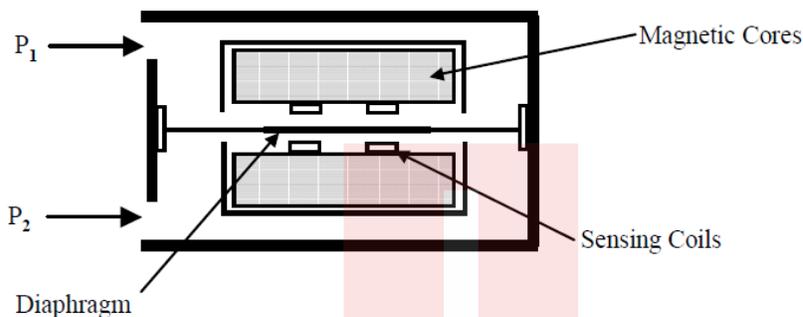


Figura 60: Medidor de presión inductivo.

### Instrumentos de vacío

Los instrumentos de vacío se usan para medir la presión por debajo de la presión atmosférica. Los medidores de presión absoluta de silicio tienen una construcción de una baja presión de referencia, de modo que se calibra para medir la presión absoluta.

El medidor **piraniy** su instalación usan termocuplas que pueden medir la presión por debajo de los 5 torrent. Este método se basa en la relación sobre la conducción de calor y la radiación desde un elemento que se calienta (filamento), llenado de un gas. Este alambre suspendido en el gas perderá calor a media que las moléculas del gas remuevan el calor del filamento. A media que se reduce la presión del gas (por una bomba de vacío), el número de moléculas presentes caerá proporcionalmente. Al medir la perdida de calor, dará una medición indirecta de la presión.

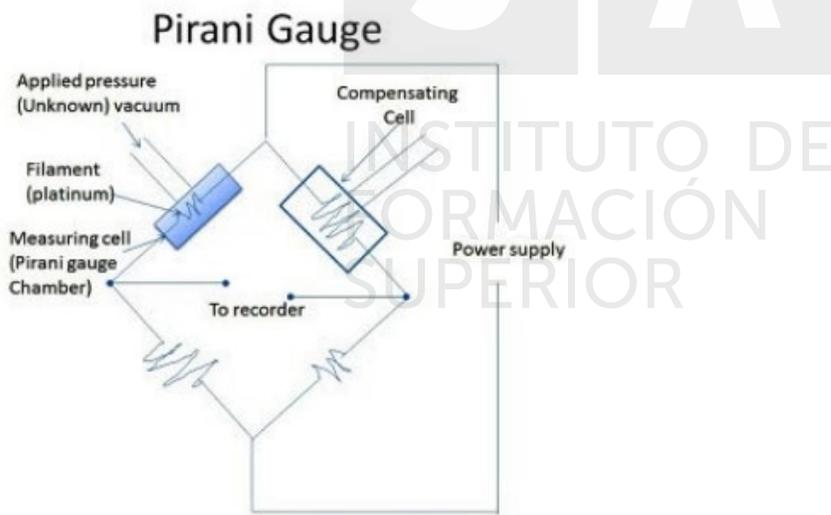


Figura 61: Medidor de presión Pirani.

### CONSIDERACIONES DE APLICACIÓN

Cuando se instalan los sensores de presión, se debería tener en consideración el correcto uso del medidor de presión.

### Selección

Los dispositivos para medir la presión son elegidos para: (1) el rango de presión, (2) requerimientos de sobrecarga, (3) rango de temperatura, (4) señal eléctrica y (5) tiempo de respuesta. En algunas de las aplicaciones existen otros requerimientos. Parámetros tales como histéresis y estabilidad, se deberían también ser considerados.

**TABLE 5.3 Comparison of Bourdon Tube Sensor and Silicon Sensor**

Device	Maximum pressure range, lb/in <sup>2</sup>	Accuracy FSD, %	Response time, s	Overload, %
Bourdon tube	10,000	2	1	40
Silicon sensor	10,000	2	1 × 10 <sup>-3</sup>	400

*Figura 62: Comparación entre el tubo de Bourdon y el de silicio.*

**TABLE 5.4 Approximate Pressure Ranges for Pressure-Sensing Devices**

Device	Maximum range, lb/in <sup>2</sup>	Device	Maximum range, lb/in <sup>2</sup>
U-tube manometer	15	Diaphragm	400
Bellows	800	Capsule	50
Bourdon tube	100,000	Spiral bourdon	40,000
Helical bourdon	80,000	Piezoelectric	100,000
Strain gauge	100,000	Solid state diaphragm	200
Stainless steel diaphragm	100,000		

*Figura 63: Rango aproximado de los dispositivos de medición de presión.*

### Instalación

Se deberían tener las siguientes consideraciones al momento de instalar un medidor de presión.

- 1) La distancia entre los sensores y la fuente debería ser mínimo.
- 2) Los sensores se deberían conectar por válvulas para facilitar el reemplazo.
- 3) Se debería incluir un rango de sobre presión en el medidor.
- 4) Eliminar el error debido al gas entrampado en la medición de líquido (presión), el sensor debería colocado por debajo de la fuente.
- 5) Eliminar el error debido al líquido entrampado en la medición de gas (presión), el sensor debería colocado por arriba de la fuente.
- 6) Cuando se mide la presión en fluidos o gases corrosivos, se necesita un gas inerte entre el sensor y la fuente, o el sensor debería estar construido por material resistente a la corrosión.
- 7) El peso del líquido en la línea de conexión del medidor de presión de un líquido, ubicado por arriba o por debajo de la fuente, causará un error de "ubicación del cero" y se debe hacer una corrección para ajustar el valor cero.
- 8) Elementos capacitivos y resistencias se pueden añadir a los circuitos electrónicos para reducir las fluctuaciones de presión y lecturas inestables.

### Consideraciones de instalación

Existe un número de puntos al tener en cuenta a la hora de instalar un instrumento de medición de presión.

- **Posición del instrumento:** La conexión del instrumento de medición debería estar en la parte superior de la línea, en caso de medir la presión de gas y a los costados en caso de medir la presión de líquidos.
- **Válvulas de aislación:** Los instrumentos generalmente necesitan puntos de conexión, ya sea para su reemplazo o su mantenimiento. Entonces es importante instalar válvulas de aislación en los extremos de la línea donde se ubica el instrumento de medición.
- **Válvulas de drenaje y ensayo:** Es también necesario la utilización de válvulas de ensayo y de drenaje, en caso de que se desee ensayar el instrumento de medición.
- **Construcción del instrumento:** Dependiendo del medio ambiente que se encuentre el instrumento. El instrumento puede que se necesite aislamiento mecánico, electrónico o térmico.
- **Efecto de temperatura:** Altas variaciones de temperaturas pueden modificar las lecturas de presión. La forma más común de compensar el efecto de temperatura es utilizar el puente de Wheatstone. Se utiliza un sensor aparte para la compensación de temperatura.
- **Sellos:** Los sellos se usan para prevenir el contacto del fluido con el transmisor (quien envía la señal eléctrica al controlador). El sistema de sello se debe tener en cuenta cuando:
  - 1) Corrosión puede causar un problema entre el transmisor y el instrumento.
  - 2) El fluido puede contener sólidos en suspensión, taponando las tuberías.
  - 3) El fluido puede congelarse o formar cristales que taponan el instrumento de medición.

### TRASMISIÓN DE PRESIÓN

En la mayoría de los casos la presión debe ser transmitida a una cierta distancia del instrumento de medición (a una sala de control), donde luego se convierte en una lectura de presión. Los transmisores convierten los valores de presión e señales eléctricas o neumáticas.

#### **Transmisor de presión neumática**

Un transmisor de señal neumática se denomina transmisor neumático de fuerza balanceada. En este tipo de instrumento la presión que se mide se aplica a un diafragma de metal, la cual esta soldada a un extremo de la cámara. La fuerza desarrollada es llevada hacia afuera de la cámara por una varilla, el cual se adjunta al diafragma. Se desarrolla una fuerza a través de un fuelle con retroalimentación neumática, que se opone a la fuerza generada en el diafragma. El desbalance entre la fuerza desarrollada por el fuelle y por el diafragma se mide por una tobera neumática, ésta restablece el balance de fuerzas al aplicar una cierta presión. Entonces la presión neumática mantenida es proporcional a la presión aplicada y se utiliza como señal de salida (3 a 15 psig).

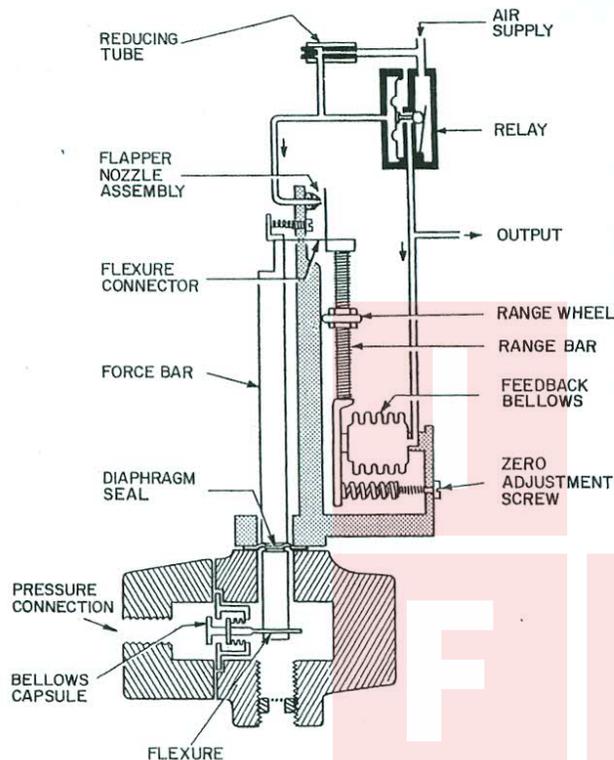


Figura 64: Transmisor de presión.

### Medidor de Nivel

La mayoría de los procesos industriales usan agua, químicos, combustible, así como también partículas sólidas (materiales granulares). Estos materiales se almacenan en contenedores para su posterior uso. Sin embargo, es importante conocer el nivel y mantener el volumen de estos materiales de modo que los contenedores puedan ser reabastecidos según sea necesario para evitar costos por grandes volúmenes de almacenamiento.

El instrumento normalmente mide la interfaz entre un líquido y un gas, un sólido y un gas, un sólido y un líquido o la interface entre dos líquidos. La medición de nivel se divide en 2 grandes grupos:

- **Medición puntual:** En este caso el nivel se detecta cuando alcanza un nivel preestablecido, tomando una acción adecuada para prevenir la sobrecarga del contenedor. Ejemplos de estos son: (1) Medidor capacitivo, (2) Medidor Radioactivo, (3) Medidor microondas, (4) Medidor tipo conductivo.
- **Medición continúa:** El monitoreo del nivel se realiza continuamente en el tiempo, el volumen de puede ser calculado si se conoce la sección transversal del contenedor. Ejemplos e estos son: (1) Medidor ultrasónico, (2) Medidor por presión hidrostática, (3) Medidor capacitivo, (4) Medidor por deformación.

A su vez las mediciones de nivel pueden ser directos o indirectos.

### Fórmulas para medir nivel

En esta sección veremos cómo se relaciona el nivel con las propiedades físicas que miden cada uno de los instrumentos. Cabe recordar que generalmente los medidores miden la característica física (temperatura, nivel, presión, caudal, etc.) de manera indirecta, es decir, miden una propiedad que se relaciona con la variable que queremos medir.

En este caso veremos en el caso del medidor de nivel como es esta relación.

La presión a menudo se utiliza como una medición indirecta del nivel de un fluido. La presión hidrostática está dada por:

$$\Delta P = \gamma \Delta h$$

$\Delta P$ : Es el cambio de presión;  $\Delta h$ : La profundidad y  $\gamma$ : El peso específico.

La fuerza de flotación relaciona con un objeto que esta semisumergido en un líquido. Dicha fuerza se relaciona de la siguiente manera:

$$B = \gamma \times A \times d$$

Donde A: es el área del objeto; d: es la profundidad sumergida del objeto.

Esta fuerza de flotación se iguala al peso del objeto sumergido en el líquido.

$$W_{objeto} = \delta_{obj} g A d$$

Entonces midiendo el peso del flotador puedo inferir el nivel del contenedor.

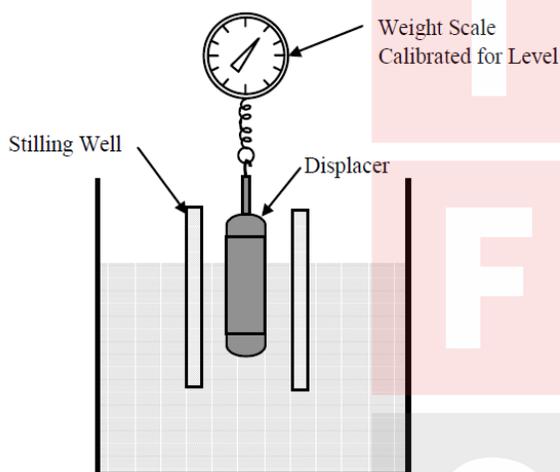


Figura 65: Esquema del medidor de nivel con flotador.

### Probetas capacitivas

Estas se pueden usar en líquidos no conductivos y libres de partículas sólidas, para medir el nivel. Al poner un fluido entre las 2 placas del capacitor, la capacitancia cambia por un factor llamado constante dieléctrica. En la siguiente figura se muestra 2 placas del capacitor inmersos en un líquido no conductivo. La capacitancia está dada por:

$$C_d = C_a \mu \frac{d}{r} + C_a$$

Donde  $C_a$ : La capacitancia sin líquido;  $\mu$ : constante dieléctrica; r: la altura de las placas; d: profundidad del líquido entre la placas.

Sabiendo la constante dieléctrica del líquido, el nivel se puede expresar como:

$$d = \frac{C_d - C_a}{\mu C_a} r$$

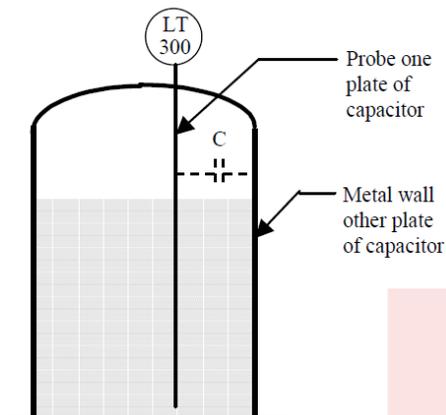


Figura 66: Medidor de nivel capacitivo.

TABLE 6.1 Dielectric Constant of Some Common Liquids

Liquid	Dielectric constant
Water	80 @ 20°C
	88 @ 0°C
Glycerol	42.5 @ 25°C
	47.2 @ 0°C
Acetone	20.7 @ 25°C
Alcohol (Ethyl)	24.7 @ 25°C
Gasoline	2.0 @ 20°C
Kerosene	1.8 @ 20°C

Figura 67: Constantes dieléctricas de líquidos mas comunes.

### MEDIDORES DE NIVEL

Existen 2 categorías de dispositivos que miden nivel. Los de medición directa y los de medición indirecta.

#### MEDIDOR DE CRISTAL (SIGHT GLASS)

Es el método más simple para medir nivel, ya que entrega una lectura visual del nivel. Un tubo de cristal se monta adyacente al contenedor. El nivel del líquido se puede observar directamente del tubo de cristal. El extremo del tubo puede estar abierto o cerrado. Se utiliza el tubo cerrado en caso de contenedores presurizados, el cual el otro extremo del tubo se conecta a la parte superior del contenedor.

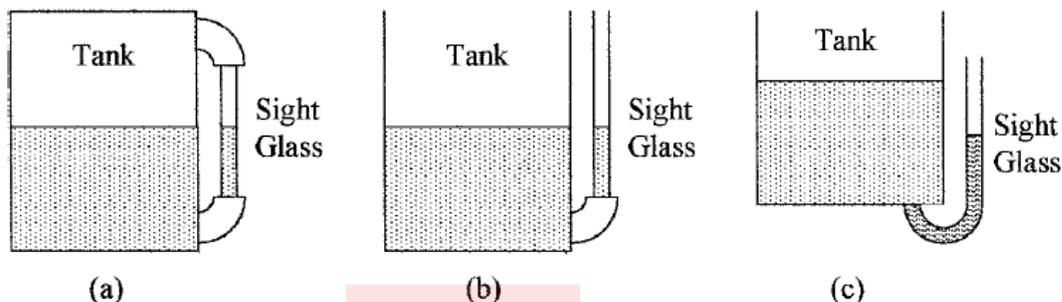


Figure 6.2 Various configurations of a sight glass to observe liquid levels (a) pressurized or closed container, (b) open container, and (c) higher density sight glass liquid.

Figura 68: configuraciones del medidor de cristal.

### MEDIDOR TIPO FLOTANTE

El material flotante es menos denso que el líquido, el flotante subirá o bajará dependiendo del nivel de líquido. En la figura (a) se usa una polea. Una ventaja que tiene este método es que es casi independiente de la densidad del líquido a ser medido. Si la superficie del líquido es turbulenta, causará una medición errática del nivel del líquido. En la figura (b), un flotante tipo circular, ésta es atada a un brazo, el ángulo entre el brazo y la horizontal es una medida del nivel del fluido. Aunque es muy simple y barato, la principal desventaja que posee este método es su no linealidad en la medición.

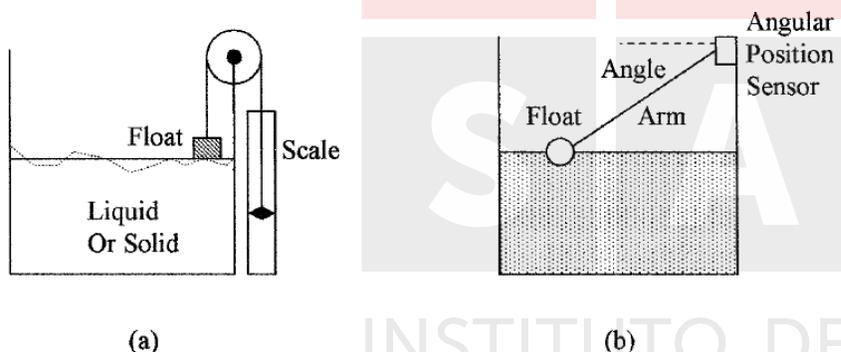


Figura 69: Métodos para la medición de nivel usando un flotante.

### MEDIDOR DE NIVEL TIPO CONDUCTIVO

Este tipo de medidor usa 2 probetas conductivas para medir el nivel del líquido. Operan bajo el principio de la conductividad eléctrica a través de un líquido. En la siguiente figura el principio de funcionamiento

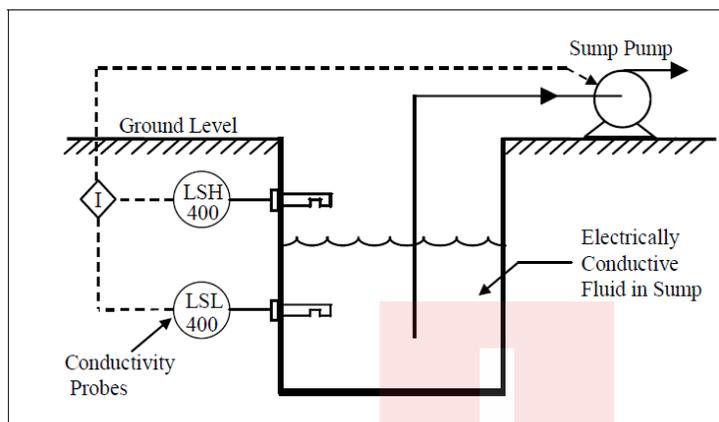


Figure 6-11. Conductivity probe

Figura 70: Medidor de nivel conductivo.

Un electrodo se ubica por arriba del nivel de líquido (LSH). El circuito se encuentra abierto, con lo cual no hay circulación de corriente entre las probetas. Cuando el líquido alcanza el nivel de la probeta superior, el circuito se cierra, produciendo la circulación de la corriente. Este cierre del circuito puede ser usado para operar un relay eléctrico, una bomba, una válvula solenoide u otro dispositivo para bajar el nivel del líquido.

#### **MEDIDOR CAPACITIVO**

Es medidor usa la capacitancia para medir el nivel del líquido. La naturaleza del capacitor es aceptar y almacenar una cierta cantidad de la carga eléctrica. Cuando un capacitor se conecte a una batería, los electrones fluirán desde el terminal negativo al capacitor y los electrones de la placa opuesta del capacitor fluirán al terminal positivo de la batería. Este flujo continuará hasta que el voltaje a través del capacitor se iguale al de la batería.

El capacitor se mide en Faraday. Este depende del área de las placas, la distancia y la constante dieléctrica entre las placas.

$$C = \frac{kA}{d}$$

Las variaciones del nivel de líquido causan cambios en la capacitancia, que puede ser medido usando un circuito electrónico en el medidor. La probeta se aísla del contenedor y forma una placa del capacitor, la otra placa la forma la pared del contenedor (si este es de metal). El material entre las dos placas tiene 2 constantes dieléctrica (líquido y gas). A medida que el nivel del líquido cambia, se produce una variación de la capacitancia debido a que habrá más o menos líquido entre las placas. Entonces lo que hace cambiar la capacitancia no es no la posición de las placas ni el cambio de área, sino el cambio en la constante dieléctrica entre las 2 placas, debido a la mayor o menor proporción de líquido.

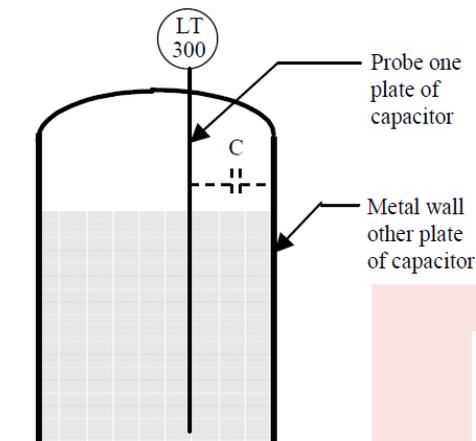


Figura 71: Medidor de nivel capacitivo.

### **MEDIDOR ULTRASÓNICO**

Los medidores ultrasónicos miden en tiempo que toma en viajar a través de un material. Los instrumentos ultrasónicos operan a una frecuencia inaudible al oído humano (20 a 200 kHz) y en niveles de energía extremadamente bajo, normalmente unos pocos miles de watts. La velocidad de la onda de sonido es función de los tipos de onda que se transmite y la densidad del medio en el cual viaja.

Cuando la onda golpea el medio sólido, tal como una pared o una superficie líquida, solamente una pequeña cantidad de energía de la onda penetra esta barrera, el otro porcentaje (mayoritario) re refleja. La onda reflejada se denomina eco.

El sistema del medidor de nivel ultrasónico se compone de un generador de onda, un transmisor y un transductor que envía la onda sónica. Estas ondas sónicas se reflejan por el material o el nivel a ser medido. El transductor mide las ondas reflejadas y las convierte en una señal eléctrica. El instrumento mide el tiempo que transcurre entre la onda enviada y la onda reflejada. El tiempo transcurrido es proporcional entre los transductores y el objeto a ser medido.

Los puntos clave en la aplicación del transductor sónico son:

- La velocidad del sonido varía con la temperatura. Si el transductor no usa una compensación por temperatura y la temperatura del ambiente varia, la medición del nivel no será el correcto.
- Las espumas formadas en la superficie pueden absorber la onda del rebote de la onda del sonido, resultando en una onda sónica débilmente reflejada.
- Una superficie irregular puede causar múltiples ondas reflejadas, produciendo mediciones irregulares.
- El vapor más denso que el aire dentro del contenedor también resulta en una lectura errónea en la medición del nivel.

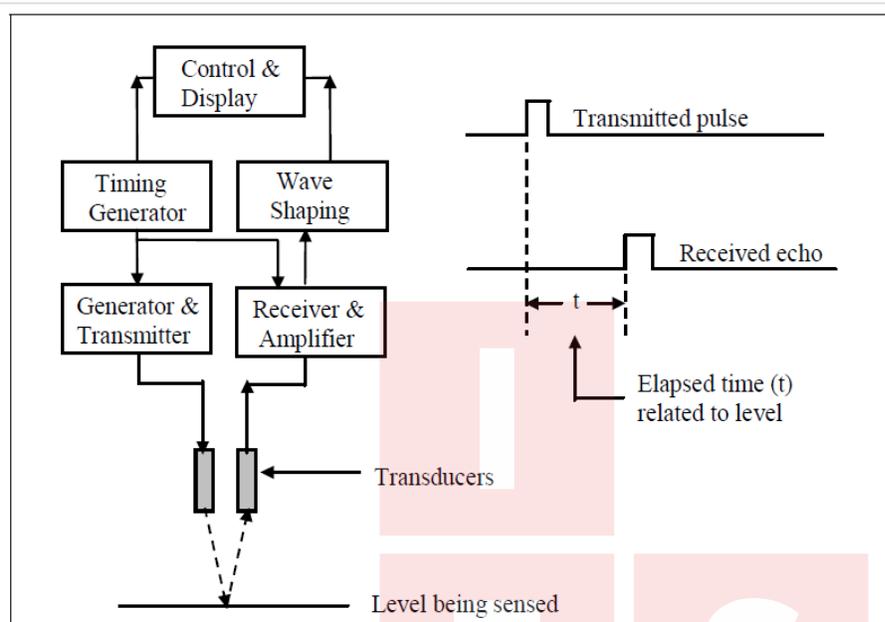


Figura 72: Diagrama del medidor ultrasónico.

**Acoustic Wavelength in Air vs Frequency, Temperature**

Frequency (kHz)	Wavelength (mm) at 0°C	Wavelength (mm) at 100°C
5	66	77
10	33	39
20	17	19
30	11	13
40	8	10

Figura 73: Longitud de onda del aire a diferentes temperaturas.

Gas	Speed of sound (m/sec) at 0°C
Air	331
Ammonia	415
Carbon Dioxide	259
Ethylene	317
Helium	965
Hydrogen Chloride	206
Methane	430
Nitrogen	334
Oxygen	316
Sulphur Dioxide	213

Figura 74: Velocidad de sonido de los gases mas comunes.

**MEDIDORES QUE USAN LA PRESIÓN PARA MEDIR EL NIVEL**

Los tipos de diferentes medidores de nivel que usan el concepto de presión son:

**Presión estática:** La base so la cual se mide el nivel, es que la presión es proporcional a la altura del líquido.

$$P = \delta gh$$

Para una densidad constante, cualquier cambio de presión se deberá al cambio en la altura del líquido. La mayoría de los sensores de presión compensan la presión atmosférica, de modo que la presión sobre la superficie del líquido abierto a la atmosfera es cero.

Los transductores de presión siempre consisten en una membrana, la cual se conecta mecánica o hidráulicamente a un elemento transductor. El elemento transductor puede estar basado en tecnologías como inductancia, capacitancia, medidor de tensión o un semiconductor.

Si el contenedor se abre a la atmosfera, el transmisor de presión diferencial convierte la presión del nivel del liquido en una señal neumatica. La señales neumaticas van desde 3 a 15 psi o una señal electrica de 4 a 20 maDC, se usa para medir el nivel del tanque. El lado superior de la celda de presión diferencial (dP transmitter) se conecta al fondo del tanque y el lado inferior de la celda se abre a la atmósfera. Ya que el tanque se abre a la atmosfera, la presión del liquido del lado alto del transmisor de presión diferencial, esta directamente relacionado con el nivel del tanque.

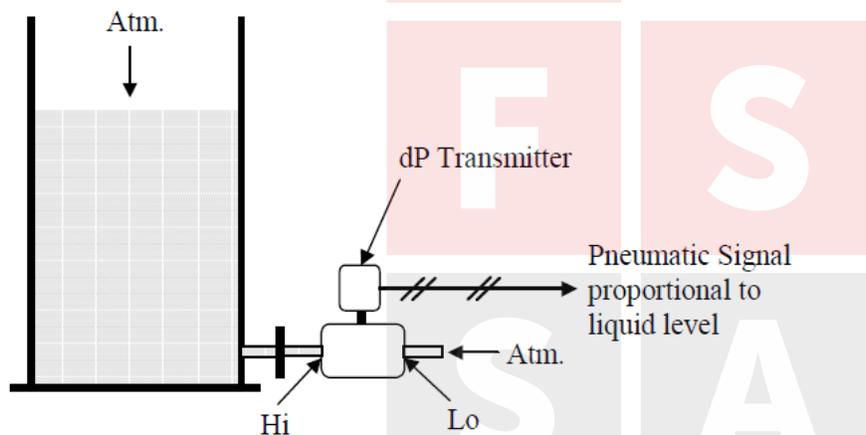


Figura 75: Dispositivo de presión de nivel usando la presión hidrostática, en un tanque abierto.

Por otro lado si el tanque se encuentra cerrado, al cambiar la presión en el tanque, se aplica una fuerza igual a ambos lados del transmisor de presión diferencial (dP transmitter). Ya que la celda de dP, solo cambia ante el cambio de presión diferencial, un cambio en la presión estática en a superficie del liquido no cambiará la salida del transmisor.

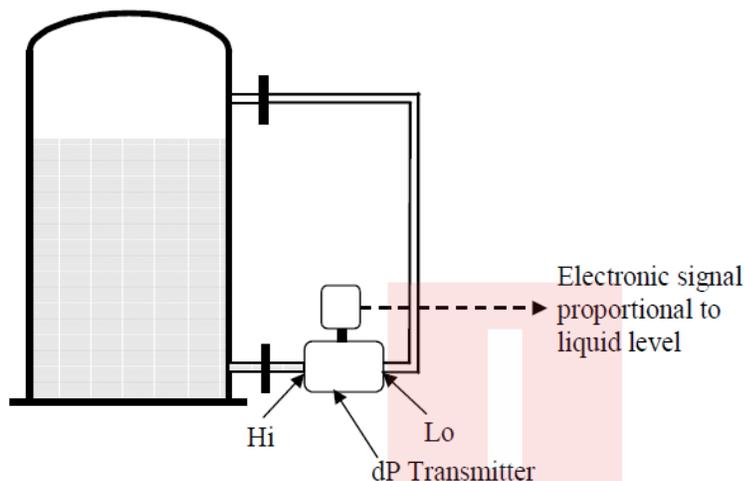


Figura 76: Dispositivo de presión de nivel usando la presión hidrostática, en un tanque cerrado.

**Medidor de nivel tipo burbuja**

En este caso cuando se usa un sistema de burbujeo para medir el nivel de un líquido, se instala un tubo de inmersión, con un extremo abierto y a unas pocas pulgadas del fondo del contenedor. Un tipo de fluido se fuerza a pasar a través del tubo hasta el fondo del tanque. Cuando las burbujas salen del extremo abierto, la presión en el tubo es igual a la presión hidrostática del contenedor. A medida que el nivel varía, la presión en el tubo de inmersión cambia en forma proporcional.

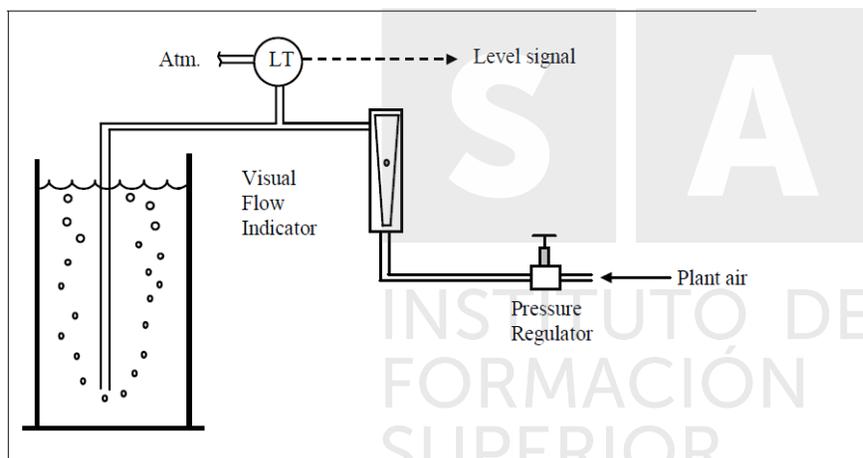


Figure 6-7. Air bubbler system

Figura 77: Sistema de medidor de nivel por burbujeo.

**Medidor de nivel por diafragma**

Los detectores por diafragma operan por el principio de detectar la presión que ejerce un material sobre un diafragma.

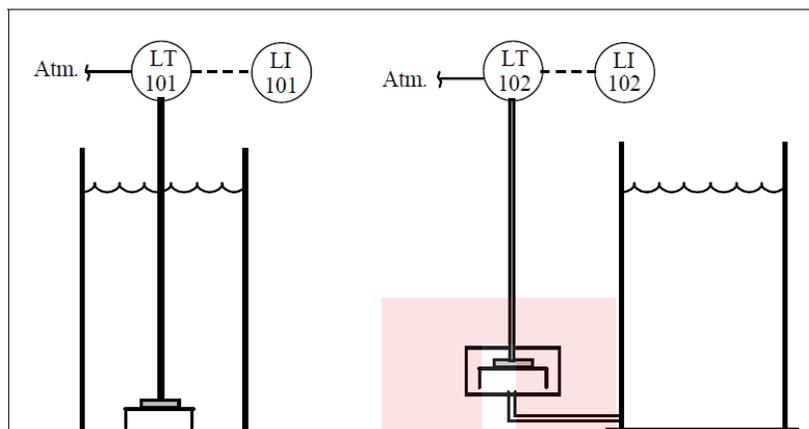


Figura 78: Medidor de nivel tipo diafragma.

La unidad consiste en un diafragma llenado de aire que se conecta a un detector de presión por un tubing de aire. A medida que el nivel aumenta por arriba del diafragma, el líquido comprime el aire en el interior del tubing. Un elemento de presión diferencial mide la presión del aire, la cual se muestra como el nivel dentro del contenedor.

#### **APLICACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE PRESIÓN**

La aplicación más común para una transmisión de presión es medir el nivel de líquido en un tanque. Estos determinan el nivel a través de la presión hidrostática. La cual depende de la altura y la gravedad específica. Tanto la presión manométrica y la presión diferencial pueden ser usados para medir el nivel. Para el caso de tanques abiertos o con venteo a la atmósfera, se pueden usar ambos tipos de transmisores de presión.

En el caso de un tanque abierto, los transmisores de presión miden la presión entre el nivel mínimo del líquido (en la parte superior del tanque) y el nivel máximo del tanque, que usa la presión máxima en la toma de presión. La toma de presión baja mide generalmente la presión atmosférica, ya que esta presión se mide en ambos lados de las tomas de presión, su efecto se cancela para los cálculos de nivel.

La salida del transmisor es de 4 a 20 mA, la cual representa el nivel del tanque. El rango de medición para las celdas de presión diferencial se calcula como:

$$4mA = L_{min} \times SG$$

Si definimos  $L_{min}$  es igual a cero, entonces resulta:

$$4mA = L_{min} \times SG = 0 \times SG = 0$$

Y la señal máxima de salida, se relaciona con el nivel máximo como:

$$20mA = L_{max} \times SG$$

El span del transmisor se define como:

$$span = (L_{max} - L_{min}) \times SG$$

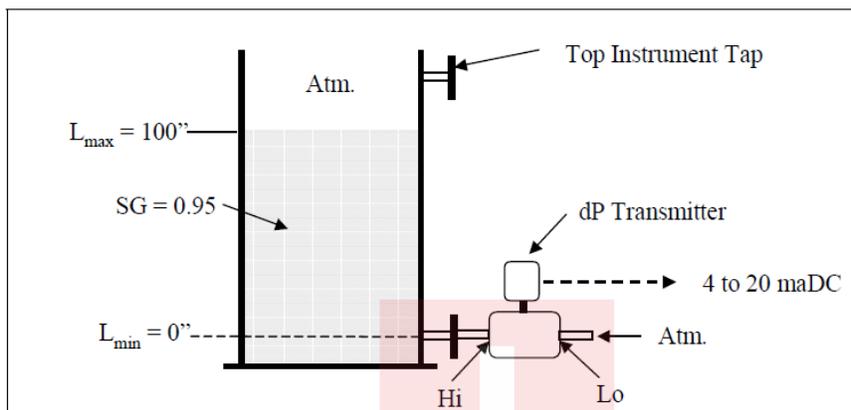


Figura 79: Ejemplo de medición de nivel usando la presión hidrostática.

Para el caso, según la figura de podemos calibrar la salida del instrumento como:

$$20mA = L_{max} \times SG \rightarrow 100 \times 0.95 = 95" \text{ de H2O}$$

El span resulta:

$$span = (L_{max} - L_{min}) \times SG = (95 - 0) \times 0.95 = 90.25" \text{ de H2O}$$

La corriente de salida del transmisor de 4 a 20 mA, corresponde a un nivel de 0 a 90.25" H2O.

#### Medidor de presión por debajo del nivel del tanque

En la siguiente aplicación el transmisor se monta 20" por debajo de la toma de presión en el fondo del tanque. Para calcular el punto de 4mA como salida de señal eléctrica, debemos considerar la presión extra que se desarrolla al considerar la distancia de los 20" de la toma de presión. En este caso el span de la celda de presión diferencial se determina como:

$$4mA = (L_{min} + d) \times SG \rightarrow (0 + 20") \times 0.95 = 19" \text{ de H2O}$$

$$20mA = (L_{max} + d) \times SG \rightarrow (100" + 20") \times 0.95 = 114" \text{ de H2O}$$

Entonces el transmisor de presión diferencial se debe calibrar para que 4mA represente 19" de H2O y 20mA de 114" de H2O.

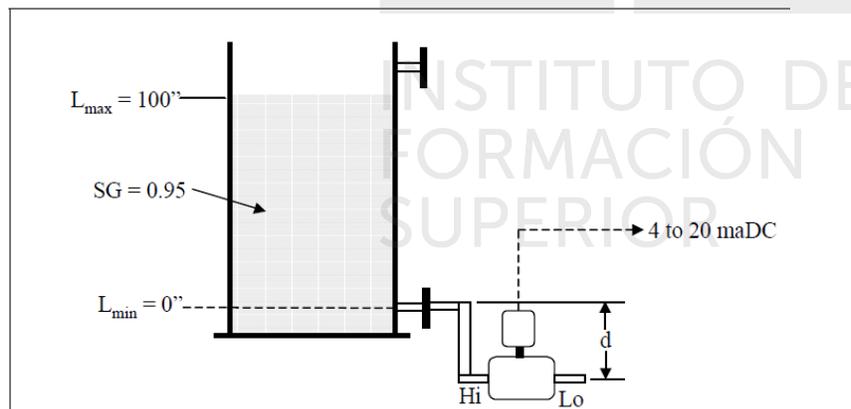


Figura 80: dispositivo de medición por debajo de un tanque abierto.

#### Medidor de presión en un tanque cerrado

En este caso la presión de las tomas superior e inferior del tanque se transmite a través de un conducto que se encuentra lleno con un gas no condensable.

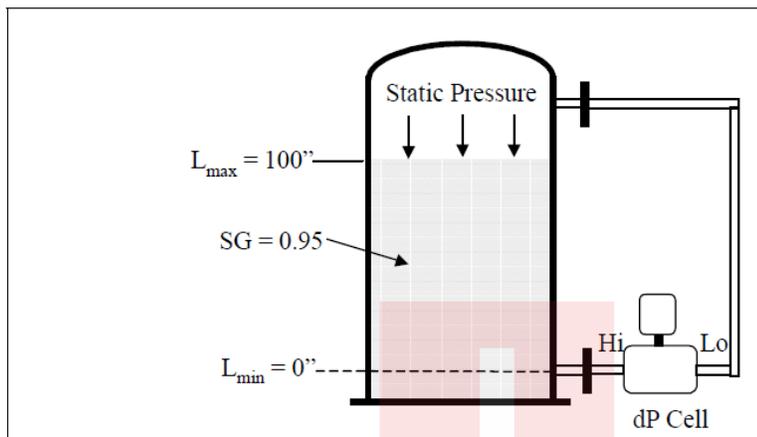


Figura 81: Ejemplo de medición de presión en un tanque cerrado.

La toma de alta presión mide el nivel de líquido y la presión arriba de este. La toma de baja presión mide solamente la presión por arriba del líquido. El impacto de la presión estática en el tanque cerrado se elimina al usar un transmisor de presión diferencial. Para este caso el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$4mA = L_{min} \times SG = 0 \times SG = 0$$

$$20mA = L_{max} \times SG \rightarrow 100 \times 0.95 = 95" \text{ de H}_2\text{O}$$

El span resulta:

$$span = (L_{max} - L_{min}) \times SG = (95 - 0) \times 0.95 = 90.25" \text{ de H}_2\text{O}$$

Por lo tanto al usar un transmisor de presión diferencial, se obtiene la misma respuesta que en el primer caso.

**Medidor de presión en un tanque cerrado utilizando un fluido más pesado**

En este caso el tubo que conecta la parte superior e inferior está lleno de un fluido diferente del aire y se mantiene a una altura constante.

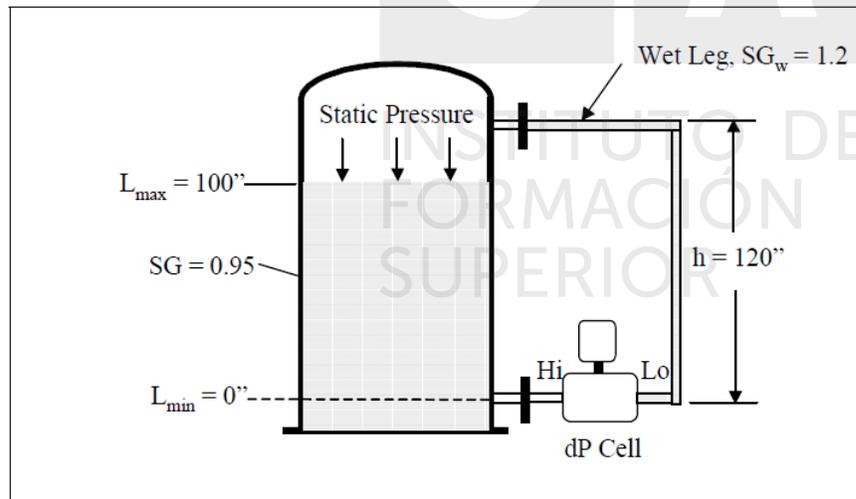


Figure 5-16. Closed tank with wet leg and horizontal dP cell

Figura 82: Utilización de un fluido mas denso para la medición de presión.

Ya que el tubo conector está lleno con otro fluido, se debe realizar una corrección, al considerar el peso de este fluido. La gravedad específica en este caso es de 1.2. El fluido en el tubo debería ser más pesado que el líquido en el contenedor. Además, es importante mantener la altura del fluido constante.

La calibración en este caso resulta:

$$4mA = (L_{min} \times SG) - hxSG_w = (0" \times 0.95) - (120" \times 1.2) = -144" \text{ de H}_2\text{O}$$

$$20mA = (L_{max} \times SG) - hxSG_w = (100" \times 0.95) - (120" \times 1.2) = -49" \text{ de H}_2\text{O}$$

De modo que el span del transmisor de presión diferencial es -144 a -49" de H<sub>2</sub>O.

**Medidor de presión por debajo del nivel del tanque, usando un fluido más pesado**

Este es el último caso que consideraremos aquí, el transmisor se encuentra por debajo de la toma de presión en el fondo del contenedor. Se usa una celda por presión diferencial para compensar el efecto de la presión estática.

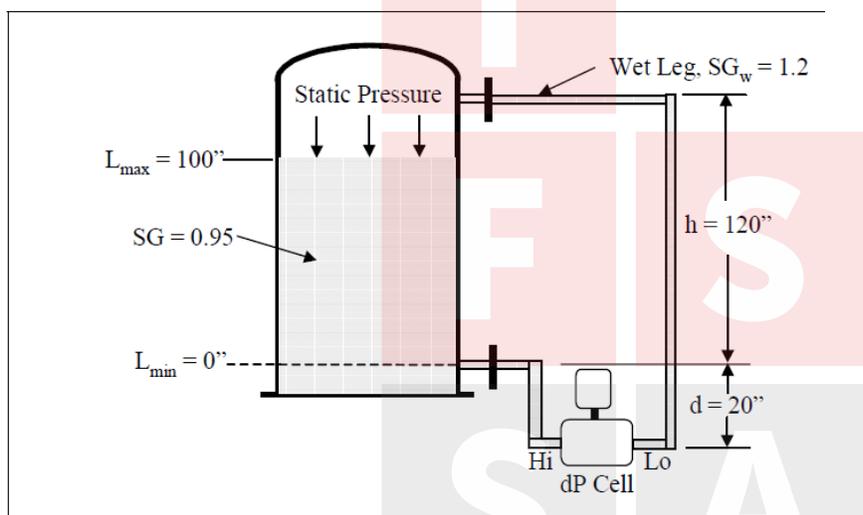


Figure 5-17. Closed tank with wet leg and dP cell below tap

Figura 83: Ejemplo de dispositivo por debajo del tanque, utilizando un fluido más denso para la medición de nivel.

En este caso hay que realizar la corrección tanto por la celda de presión que se encuentra por debajo de la toma de presión como por el fluido más pesado utilizado en el tubo que conecta las tomas de presión.

$$4mA = (L_{min} + d) \times SG - hxSG_w = (0" + 20") \times 0.95 - 120 \times 1.2 = -125 \text{ de H}_2\text{O}$$

$$20mA = (L_{max} + d) \times SG - hxSG_w = (100" + 20") \times 0.95 - 120 \times 1.2 = -30 \text{ de H}_2\text{O}$$

El span resulta de -125 a -30" de H<sub>2</sub>O, para un rango de señal de 4mA a 20mA respectivamente.

### **Medición de temperatura**

De manera similar a las necesidades de controlar la temperatura para nuestra vida cotidiana, la mayoría de los procesos industriales necesitan controlar la temperatura de manera precisa. Parámetros físicos y reacciones químicas son dependientes de la temperatura y por lo tanto controlarla es de vital importancia. En este capítulo vamos a ver las diferentes escalas de temperatura, su relación, los métodos para medir la temperatura y la relación entre calor y la temperatura.

#### **DEFINICIÓN DE TEMPERATURA**

La temperatura es una medida de la energía térmica de un cuerpo, el cual mide el calor o la falta de calor (frio) de un medio, expresados en grados, usando las siguientes escalas:

- Fahrenheit (°F).
- Celsius (°C).
- Rankine (R).
- Kelvin (K).

El cero absoluto es aquella temperatura tal que, cesa el movimiento molecular (no hay movimientos de las moléculas dentro del cuerpo).

La escala de Fahrenheit fue la primera escala que ganó aceptación para medir la temperatura, en los comienzos de 1700. Los 2 puntos de referencia son 0°F y 100°F, fueron el congelamiento de una solución salina (a nivel del mar). Esto eventualmente esto conduce a aceptar que 32°F y 212°F como el punto de congelamiento y ebullición del agua.

Los grados Celsius fueron propuestos a la mitad del 1700 por Celsius (sueco), quien propuso los puntos de referencia de 0°C y 100°C como los puntos de fusión y ebullición del agua a una 1 atm.

La escala de Rankine fue propuesta a mediados del 1800 por Rankine. La escala de temperatura referida al cero absoluto, fue basada en la escala de Fahrenheit. Según la escala Rankine los puntos de ebullición y fusión son 671,6°R y 491,6°R respectivamente a 1 atm.

De manera similar la escala de Kelvin, que también fue propuesto a mediados de 1800, está referenciado al cero absoluto en la escala de Celsius. Siendo los puntos de referencia 273,15 y 373,15 K. En la siguiente figura se muestra las diferentes escalas para medir la temperatura.

#### **DEFINICIÓN DE CALOR**

El calor es una forma de energía, a medida que se suministra energía al sistema, se incrementa la vibración de las moléculas, resultando en un aumento de la temperatura. Una unidad térmica británica se define como la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de 1 lb de agua pura a 1°F, a 68°F y a presión atmosférica.

Una unidad calórica se define como la energía requerida para elevar la temperatura de 1 gramo de agua pura a 1°C, a 4°C y a la presión atmosférica

El Joule también se utiliza para medir la energía en forma de calor, a menudo se usa en preferencia a la caloría, donde; 1 J (joule) = 1 W (Watt) x s. En la siguiente tabla se muestra la relación entre las diferentes unidades para medir el calor.

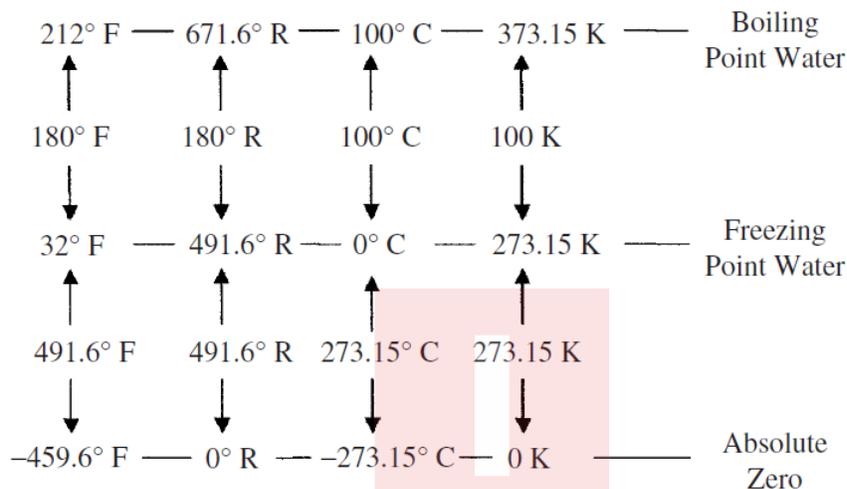


Figura 84: Comparación de escalas de temperatura.

**TABLE 8.1 Conversion Related to Heat Energy**

1 BTU = 252 cal	1 cal = 0.0039 BTU
1 BTU = 1055 J	1 J = 0.000948 BTU
1 BTU = 778 ft-lb	1 ft-lb = 0.001285 BTU
1 cal = 4.19 J	1 J = 0.239 cal
1 ft-lb = 0.324 cal	1 J = 0.738 ft-lb
1 ft-lb = 1.355 J	1 W = 1 J/s

Figura 85: Conversión de unidades para medir el calor.

El calor específico, se define como la cantidad de energía calórica requerida para elevar la temperatura de un material de peso dado a 1°C. Por ejemplo, si el material tiene un calor específico de 0.7 cal/g °C, esto quiere decir que requeriría 0.7 cal para elevar la temperatura de un gramo de esa materia a 1°C.

La conductividad térmica es el flujo o transferencia de calor desde una región de mayor temperatura hacia una región de menor temperatura. Existen 3 métodos para transferir el calor; (1) Conducción, (2) Convección y (3) Radiación.

En la siguiente tabla se muestra el calor específico de diferentes sustancias.

**TABLE 8.2 Specific Heats of Some Common Materials**

Material	Specific heat	Material	Specific heat	Material	Specific heat
Alcohol	0.58–0.6	Aluminum	0.214	Brass	0.089
Glass	0.12–0.16	Cast iron	0.119	Copper	0.092
Gold	0.0316	Lead	0.031	Mercury	0.033
Platinum	0.032	Quartz	0.188	Silver	0.056
Steel	0.107	Tin	0.054	Water	1.0

The units are BTU/lb °F or Calories/g °C.

Figura 86 Calor específico de materiales comunes.

**TABLE 8.3 Thermal Conductivity BTU/h ft °F (W/mK)**

Material	Conductivity	Material	Conductivity
Air	0.016 (room temp.) (0.028)	Aluminum	119 (206)
Concrete	0.8 (1.4)	Copper	220 (381)
Water	0.36 (room temp.) (0.62)	Mercury	4.8 (8.3)
Brick	0.4 (0.7)	Steel	26 (45)
Brass	52 (90)	Silver	242 (419)

*Figura 87: Conductividad térmica de materiales mas comunes.*

La conductividad térmica mide la eficiencia de la transferencia (o flujo) de calor. Es calor se transfiere a través de las moléculas que transmiten su energía a la molécula siguiente, así a través de todo el material. La unidad de la conductividad térmica es W/mK o BTU/ft-h-°F.

La convección por su parte es la transferencia de calor a través de regiones de alta temperatura a regiones de baja temperatura. La diferencia con la primera (conducción), es que en este método de transferencia el medio de transmisión es un líquido o u gas y se debe solo a la diferencia de densidad que crea las regiones con diferentes temperaturas (mayor temperatura menor densidad). Un ejemplo típico es el sistema de calefacción por aire acondicionado.

La radiación es la emisión de energía por ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz a través de la mayoría de los materiales que no conducen la electricidad. Por ejemplo, el calor radiante se puede sentir a cierta distancia de un horno, donde no existe conducción no convección.

### **Expansión térmica**

La expansión térmica es el cambio en l dimensiones del material debido a un cambio en la temperatura. El cambio en la dimensión se debe al coeficiente de expansión térmica del material. Dependiendo del cambio del material, el coeficiente de puede ser lineal (cambio en una dimensión) o volumétrico (cambio en las 3 dimensiones del material). La unidad del coeficiente de expansión térmica es de dimensión (m o m<sup>3</sup>), por unidad de temperatura. En la siguiente tabla se muestra los coeficientes de expansión térmica más comunes.

**TABLE 8.4 Thermal Coefficients of Expansion per Degree Fahrenheit**

Material	Linear (×10 <sup>-6</sup> )	Volume (×10 <sup>-6</sup> )	Material	Linear (×10 <sup>-6</sup> )	Volume (×10 <sup>-6</sup> )
Alcohol	—	61–66	Aluminum	12.8	—
Brass	10	—	Cast iron	5.6	20
Copper	9.4	29	Glass	5	14
Gold	7.8	—	Lead	16	—
Mercury	—	100	Platinum	5	15
Quartz	0.22	—	Silver	11	32
Steel	6.1	—	Tin	15	38

*Figura 88: Coeficientes térmicos de expansión.*

La expansión térmica lineal, se calcula de la siguiente manera:

$$L_2 = L_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

Donde: L<sub>1</sub>: Longitud inicial; L<sub>2</sub>: Longitud final; α: Coeficiente de expansión térmica; T<sub>1</sub>: Temperatura inicial y T<sub>2</sub>: Temperatura final.

La ecuación de arriba representa como varia la dimensión de un material sólido respecto del cambio de temperatura (para el caso de una expansión lineal). Para la expansión volumétrica la ecuación es similar, en

vez de  $L_1$  y  $L_2$  es  $V_1$  y  $V_2$  y  $\alpha$  se reemplaza por  $\beta$ . La expansión volumétrica generalmente se utiliza para líquidos, aunque también es útil para ciertos metales.

En el caso del gas existe una relación entre la presión, temperatura y volumen del gas. La cual está dada por:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \text{suponiendo un comportamiento ideal del gas}$$

### DISPOSITIVOS PARA MEDIR LA TEMPERATURA

Existen varios métodos para medir la temperatura que se pueden reconocer:

- 1) Expansión del material da un cambio de dimensión o un cambio de presión.
- 2) Cambio de la resistencia eléctrica.
- 3) Cambio de las características de un semiconductor.
- 4) Voltaje generado por metales distintos.
- 5) Energía radiada.

#### Termómetros

El termómetro de tubo de mercurio fue uno de los dispositivos más comunes para medir temperatura. El dispositivo consiste de un pequeño tubo de vidrio graduado, donde se almacena el mercurio. El rango de operación del termómetro de mercurio va desde  $-35^{\circ}\text{C}$  a  $450^{\circ}\text{C}$ .



Figura 89. Termómetro de mercurio.

#### Placas bimetalicas

Este dispositivo para medir la temperatura trabaja bajo el principio de la expansión térmica del material. Se unen 2 metales con coeficientes de expansión térmica diferentes. Normalmente no se usa en aplicaciones analógicas para una indicación remota. Además, sufre de histéresis. Este dispositivo se utiliza en aplicaciones de control On/Off, ya que no se requiere de una precisión alta en la medición.

Si dos placas metálicas tales como el latón y el invar (una aleación de cobre y níquel), se unen a lo largo de su longitud, estas se deformarán para formar un arco ante un cambio en la temperatura. La configuración puede ser lineal o en forma de espiral y puede ser usado con un puntero para hacer un termómetro más resistente y barato. El rango de operación va desde los  $-180^{\circ}\text{C}$  a  $430^{\circ}\text{C}$ .

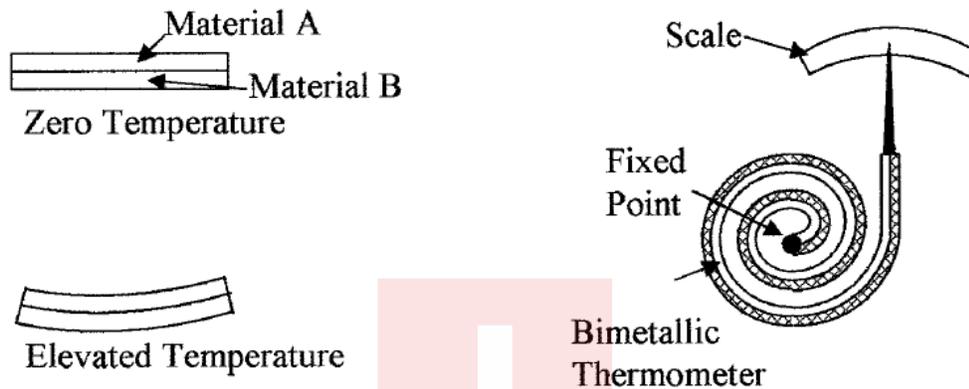


Figura 90: Configuración del termómetro bimetalico.

TABLE 32.1 Properties for Selected Materials Used in Bimaterial Elements

Material	Density ( $\rho$ ) ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Young's Modulus ( $E$ ) (GPa)	Heat capacity ( $C$ ) ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Thermal expansion ( $10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	Thermal conductivity ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
Al	2700 <sup>c</sup>	61-71 <sup>b</sup>	896 <sup>a</sup>	24 <sup>b</sup>	237 <sup>c</sup>
	2707 <sup>a</sup>	70.6 <sup>c</sup>	900 <sup>c</sup>	23.5 <sup>c</sup>	204 <sup>a</sup>
Cu	8954 <sup>a</sup>	129.8 <sup>c</sup>	383.1 <sup>a</sup>	17.0 <sup>c</sup>	386 <sup>a</sup>
	8960 <sup>c</sup>		385 <sup>c</sup>		401 <sup>c</sup>
Cr	7100 <sup>c</sup>	279 <sup>c</sup>	518 <sup>c</sup>	6.5 <sup>c</sup>	94 <sup>c</sup>
Au	19300 <sup>b,c</sup>	78.5 <sup>b,c</sup>	129 <sup>b,c</sup>	14.1 <sup>b,c</sup>	318 <sup>b,c</sup>
Fe	7870 <sup>c</sup>	211.4 <sup>c</sup>	444 <sup>c</sup>	12.1 <sup>c</sup>	80.4 <sup>c</sup>
Ni	8906 <sup>a</sup>	199.5 <sup>c</sup>	446 <sup>a</sup>	13.3 <sup>c</sup>	90 <sup>a</sup>
	8900 <sup>c</sup>		444 <sup>c</sup>		90.9 <sup>c</sup>
Ag	10524 <sup>a</sup>	82.7 <sup>c</sup>	234.0 <sup>a</sup>	19.1 <sup>c</sup>	419 <sup>a</sup>
	10500 <sup>c</sup>		237 <sup>c</sup>		429 <sup>c</sup>
Sn	7304 <sup>a</sup>	49.9 <sup>c</sup>	226.5 <sup>a</sup>	23.5 <sup>c</sup>	64 <sup>a</sup>
	7280 <sup>c</sup>		213 <sup>c</sup>		66.8 <sup>c</sup>
Ti	4500 <sup>c</sup>	120.2 <sup>c</sup>	523 <sup>c</sup>	8.9 <sup>c</sup>	21.9 <sup>c</sup>
W	19350 <sup>a</sup>	411 <sup>c</sup>	134.4 <sup>a</sup>	4.5 <sup>c</sup>	163 <sup>a</sup>
	19300 <sup>c</sup>		133 <sup>c</sup>		173 <sup>c</sup>
Invar (Fe64/Ni36)	8000 <sup>c</sup>	140-150 <sup>c</sup>	—	1.7-2.0 <sup>c</sup>	13 <sup>c</sup>
Si	2340 <sup>c</sup>	113 <sup>c</sup>	703 <sup>c</sup>	4.7-7.6 <sup>c</sup>	80-150 <sup>c</sup>
<i>n</i> -Si	2328 <sup>b</sup>	130-190 <sup>b</sup>	700 <sup>b</sup>	2.6 <sup>b</sup>	150 <sup>b</sup>
<i>p</i> -Si	2300 <sup>b</sup>	150-170 <sup>b</sup>	770 <sup>b</sup>	—	30 <sup>b</sup>
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3100 <sup>a</sup>	304 <sup>b</sup>	600-800 <sup>b</sup>	3.0 <sup>b</sup>	9-30 <sup>b</sup>
SiO <sub>2</sub>	2200 <sup>b</sup>	57-85 <sup>b</sup>	730 <sup>b</sup>	0.50 <sup>b</sup>	1.4 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> From Reference [13], Table A1 at 20°C.

<sup>b</sup> From Reference [13], Table A2 at 300K.

<sup>c</sup> From Goodfellow catalog 1995/1996 [14].

Figura 91: propiedades de materiales mas comunes.

### Termómetro tipo bulbo

Estos termómetros son usados donde se requiere una lectura remota. Este dispositivo tiene un bulbo (bulb) metálico con un coeficiente de expansión térmica baja, con tubo metálico largo que contiene una expansión

térmica alta. El bulbo es el punto de monitoreo. El tubo metálico es adjuntado a un manómetro de Bourdon en forma de espiral. Este sistema de presión se utiliza para producir una salida de señal eléctrica.

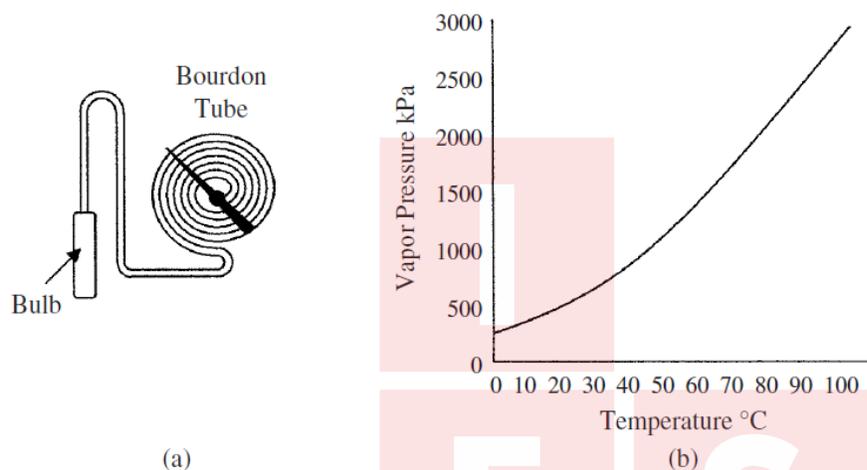


Figura 92: Relación entre la temperatura y la presión en un medidor tipo bulbo.

A medida que la temperatura del bulbo incrementa, la presión en el sistema incrementa, el aumento de presión es proporcional al aumento de temperatura. El cambio de presión se mide por el tubo de Bourdon y se convierte a escala de temperatura. Estos dispositivos pueden tener una precisión de 0.5% y se pueden usar para una indicación remota de hasta 100 metros. Sin embargo, se deben calibrar ya que el fluido y el tubo de Bourdon son sensibles a la temperatura.

Existe 3 clases de los termómetros tipo bulbo:

- **Llenado con líquido:** Trabaja bajo el mismo principio que el líquido en un tubo de vidrio. Posee una señal de salida lineal y mide hasta los 550°C.
- **Llenado con gas:** Se llena con gas, como el nitrógeno, con un rango de presión de 1000 a los 3350 kPa, a temperatura ambiente. Este dispositivo obedece a la ley de gases ideales, siendo constante el volumen del gas.
- **Presión de vapor:** Se llena parcialmente de líquido y gas como el cloruro de metilo, alcohol etílico, tolueno etc. En este sistema la temperatura as baja de operación debe ser superior al punto de ebullición del líquido y la temperatura máxima se imita por la temperatura crítica del líquido. El tiempo de respuesta es bajo, del orden de los 20 s. Las características de presión temperatura son no lineales, lo cual es una desventaja ya que se debe linealizar la señal de salida.

### Termómetro resistivo

Los dispositivos resistivos para medir la temperatura se componen de una película de metal depositada otro metal en el o son cables resistores. El dispositivo se sella en un material de cerámico o de vidrio. La resistencia eléctrica del metal puro es positiva, que incrementa linealmente con la temperatura. Estos dispositivos tienen un rango de medición de -170°C a 780°C. La variación de resistencia en estos dispositivos está dada por:

$$R_{T_2} = R_{T_1}(1 + \alpha[T_2 - T_1])$$

Los dispositivos de resistencia variable son medidos usando el puente de Wheatstone, pero se suministra desde una fuente de corriente directa.

**TABLE 8.5 Temperature Coefficient of Resistance of Some Common Metals**

Material	Coeff. per degree Celsius	Material	Coeff. per degree Celsius
Iron	0.006	Tungsten	0.0045
Nickel	0.005	Platinum	0.00385

Figura 93: Metales usados en termómetros resistivos.

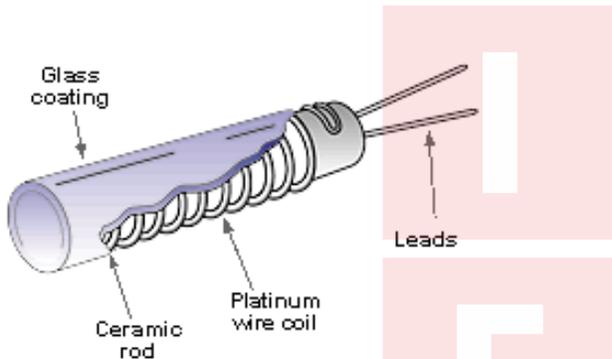


Figura 94: Esquema del termómetro resistivo.

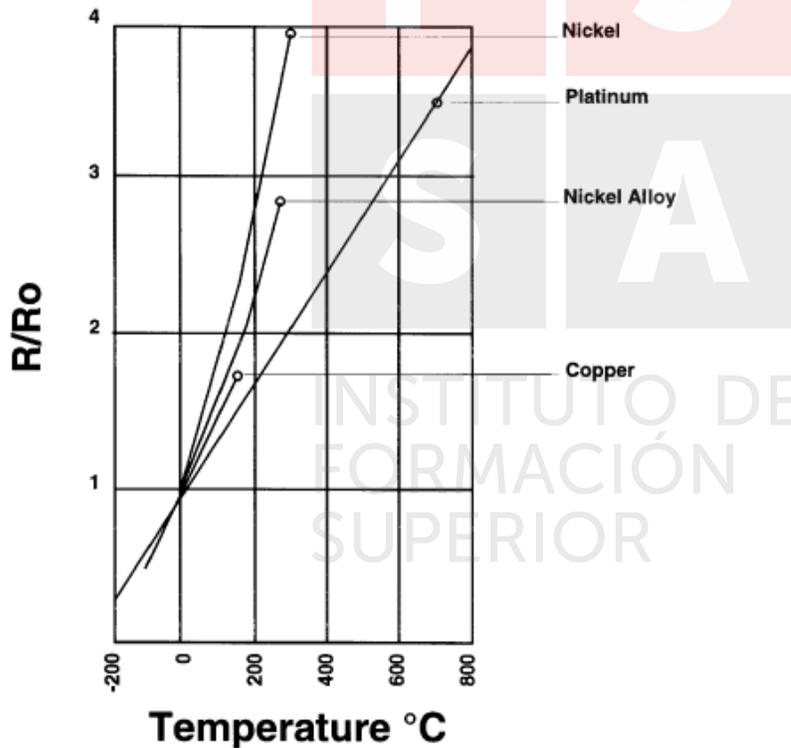


Figura 95: Relación entre la temperatura y la resistividad.

Con el avance de la tecnología, la industria en general busca mejorar las mediciones de temperaturas, a la vez de producir una señal eléctrica, que acompañe al proceso de control. Estos dispositivos al producir una

señal eléctrica de salida, se los utiliza en plantas industriales de control automático, haciendo más fácil la interfaz con el controlador.

### Termistores

Los termistores son una clase de semiconductores, el cual tiene un coeficiente de resistencia a la temperatura muy negativo (NTC), aunque también puede ser positivo (PTC), dependiendo del semiconductor. Estos dispositivos son bastante sensibles a la temperatura (producen grandes cambios por cada cambio de temperatura), pero son no lineales. Los tiempos de respuesta son de 0.5 s a 5 s y tienen un rango de operación de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, se pueden encontrar dispositivos que midan temperatura de hasta  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La característica no lineal del dispositivo se muestra en la siguiente gráfica.

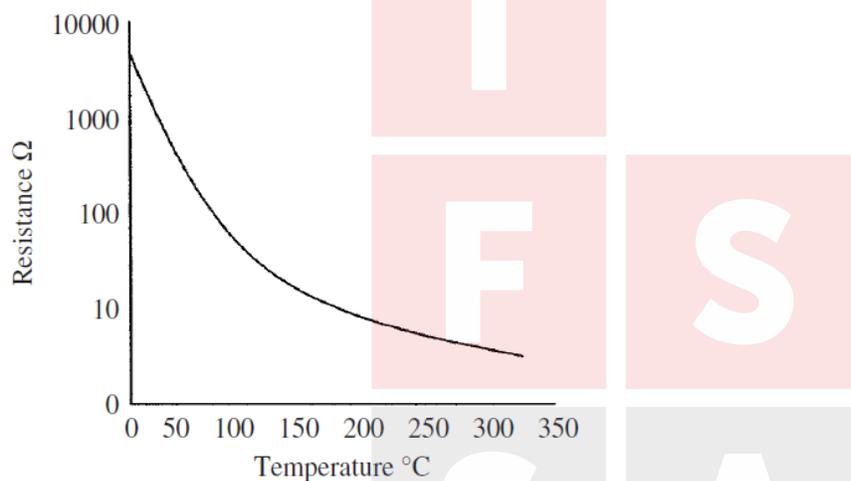


Figura 96: Relación de la resistencia y la temperatura en materiales semiconductores.



Figura 97: Representación de termistor

### Termocupla

La termocupla se compone de 2 metales diferentes que se unen para formar una junta metálica. El circuito eléctrico se completa al unir el otro extremo de los metales, para formar una segunda junta. La corriente fluirá en el circuito si la unión de los metales se encuentra a diferentes temperaturas, como se muestra en la siguiente figura.

El flujo de corriente es el resultado de la diferencia electromotriz desarrollada en las dos uniones debido a la diferencia de temperatura. En la práctica se mide la diferencia de voltaje entre las 2 uniones. Si una unión se mantiene a una temperatura de referencia, el voltaje entre la termocupla da la temperatura de la otra unión.

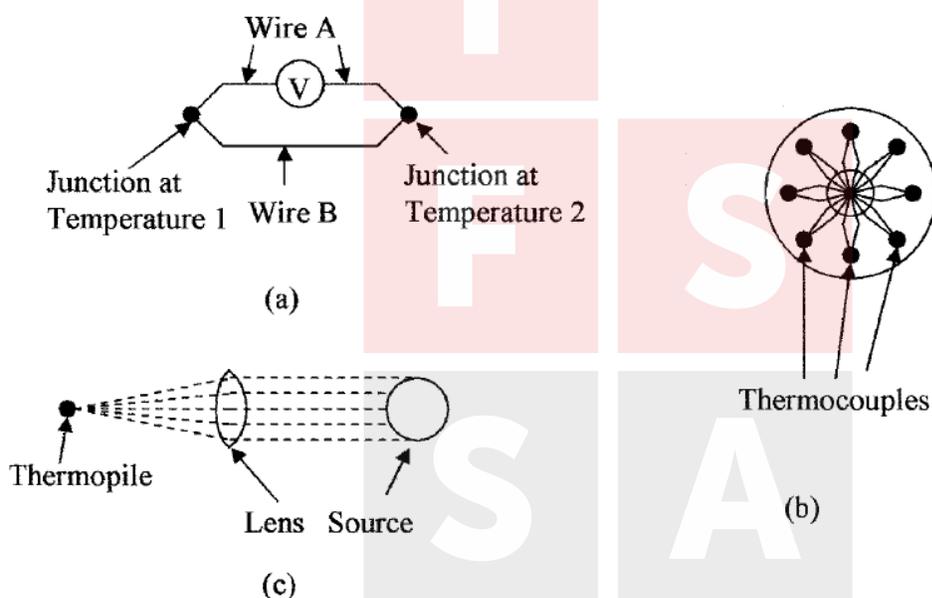


Figura 98: Circuito del medidor por termocupla.

Los efectos asociados a la termocupla son:

- **Efecto Seebeck:** Establece que el voltaje generado en la termocupla es proporcional a la temperatura entre las uniones.
- **Efecto Peltier:** Establece que, si fluye una determinada corriente a través de la termocupla, una unión se calienta y la otra se enfría.
- **Efecto Thomson:** Este establece que cuando fluye una corriente eléctrica en un conductor, en el cual hay una diferencia de temperatura, el calor producido o absorbido depende de la corriente y la temperatura.

En la práctica, el voltaje de Seebeck es la suma de la fuerza electromotriz generada por los efectos Peltier y Thomson. Existe un número de leyes que se observan en el circuito termocupla. Primero, la ley de temperatura intermedia establece que el efecto termoeléctrico depende solamente de la temperatura de la junta y no se ve afectada por la temperatura a lo largo de los conductores. Segundo, la ley de metales intermedios establece que los metales, los cuales están hechos las termocuplas (diferentes), no generarán corriente si están a la misma temperatura.

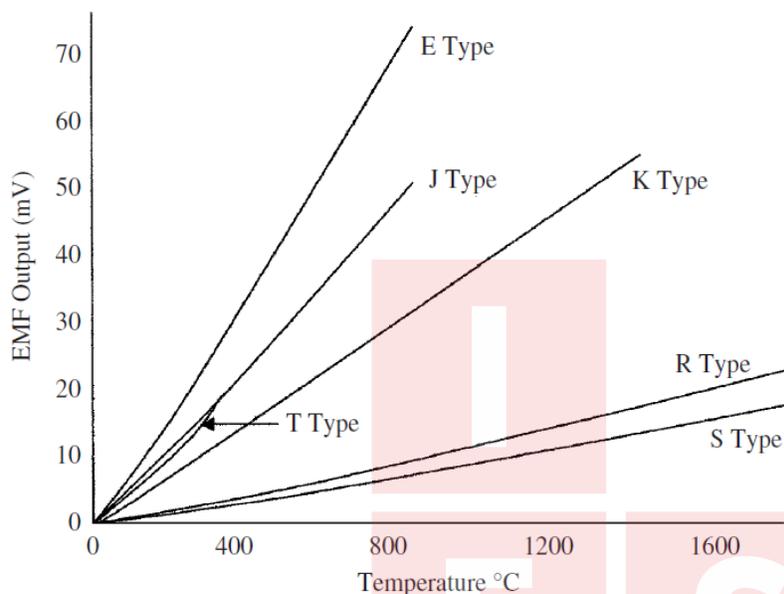


Figura 99: Relación entre la temperatura y diferentes tipos de termocupla.

T/C Type	Metals	Color Code	Application Limits	Accuracy
<b>J</b>	Iron (+)	White	32 to 1382°F TC Grade	Greater of:
	Constantan (-)	Red	32 to 392°F Ex Grade	3.962°F or 0.75%
<b>K</b>	Chromel (+)	Yellow	-328 to 2282°F TC Grade	Greater of:
	Nickel (-)	Red	32 to 392°F Ex Grade	3.962°F or 0.75%
<b>T</b>	Copper (+)	Blue	-328 to 662°F TC Grade	Greater of:
	Constantan (-)	Red	-76 to 212°F Ex Grade	1.8°F or 0.75%
<b>E</b>	Chromel (+)	Purple	-328 to 1652°F TC Grade	Greater of:
	Constantan (-)	Red	32 to 392°F Ex Grade	3.06°F or 0.5%
<b>R</b>	Pt -13% RH (+)	None	32 to 2642°F TC Grade	Greater of:
	Platinum (-)	Established	32 to 300°F Ex Grade	2.7°F or 0.25%
<b>S</b>	Pt - 10% Rh (+)	None	0 to 2642°F TC Grade	Greater of:
	Platinum (-)	Established	32 to 300°F Ex Grade	2.7°F or 0.25%

Figura 100: Parámetros de diferentes tipos de termocupla.

### Semiconductores

Los semiconductores tienen un número de parámetros que varían linealmente con la temperatura. Normalmente el voltaje de referencia de un diodo zener, se utiliza para medir la temperatura. El rango de medición de temperatura va desde -50°C a 150°C y varían linealmente con precisiones de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Una ventaja de estos dispositivos es que su electrónica puede ser integrada a la interface del sistema de control y con posibilidad de una salida digital.

### CONSIDERACIONES Y APLICACIÓN

#### Selección

En el control de procesos están disponibles una amplia gama de termómetros. Sin embargo, el rango requerido, la linealidad y la precisión limitación la medición del dispositivo. La elección final del termómetro puede incluir requerimientos tale como, medición remota, longevidad, requerimientos de mantención y costo.

**Rango y precisión**

La siguiente tabla muestra los rangos de temperatura de los medidores más comunes.

**Tiempo de reacción**

Un detector de temperatura no reacciona inmediatamente ante un cambio de temperatura. El tiempo de reacción, es una medida del tiempo que toma el sensor para estabilizar internamente el cambio de temperatura y se determina con una resistencia de conducción térmica en el interior del instrumento. El tiempo térmico se relaciona con los parámetros térmicos se expresan según la siguiente ecuación.

$$t_c = \frac{mc}{kA}$$

Donde m: Masa; c: calor específico; k: coeficiente de transferencia de calor y A: área de contacto térmico.

**TABLE 8.7 Temperature Range and Accuracy of Temperature Sensors**

Sensor type		Range (degree Celsius)	Accuracy (FSD)
Expansion	Mercury in glass	-35 to 430	±1%
	Liquid in glass	-180 to 500	±1%
	Bimetallic	-180 to 600	±20%
Pressure-spring	Liquid filled	-180 to 550	±0.5%
	Vapor pressure	-180 to 550	±2.0%
	Gas filled	-180 to 550	±0.5%
Resistance	Metal resistors	-200 to 800	±5%
	Platinum	-180 to 650	±0.5%
	Nickel	-180 to 320	±1%
	Copper	-180 to 320	±0.2%
Thermistor		0 to 500	±25%
Thermocouple		-60 to 540	±1%
		-180 to 2500	±10%
Semiconductor IC		-40 to 150	±1%

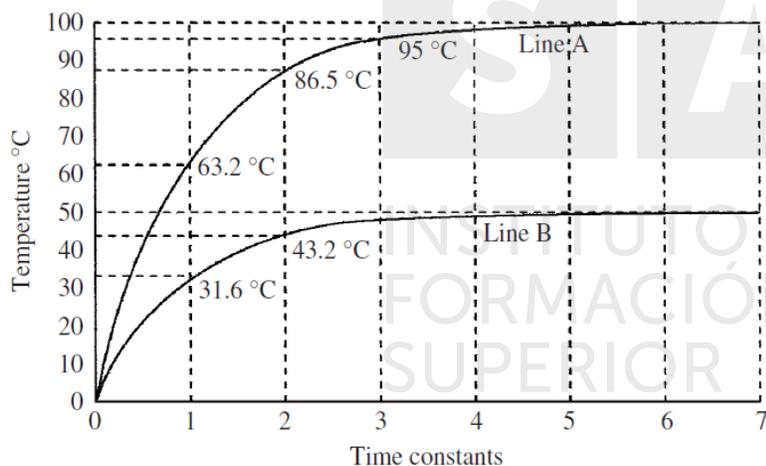
Figura 101: Rango de temperatura y exactitud de diferentes sensores de temperatura.

**TABLE 8.8 Summary of Sensor Characteristics**

Type	Linearity	Advantages	Disadvantages
Bimetalic	Good	Low cost, rugged, and wide range	Local measurement or for ON/OFF switching only
Pressure	Medium	Accurate and wide range	Needs temperature compensation and vapor is nonlinear
Resistance	Very good	Stable, wide range, and accurate	Slow response, low sensitivity, expensive, self heating, and limited range
Thermistor	Poor	Low cost, small, high sensitivity, and fast response	Nonlinear, range, and self heating
Thermocouple	Good	Low cost, rugged, and very wide range	Low sensitivity and reference needed
Semiconductor	Excellent	Low cost, sensitive and easy to interface	Self heating, Slow response, range, and power source

*Figura 102: Resumen de características de los sensores mas comunes para medir temperatura.*

El tiempo de reacción de un sistema  $t_c$  se considera aquel tiempo que toma el sistema para alcanzar el 63,2% de su temperatura final, después que se ha producido el cambio de temperatura. Por ejemplo si un bloque de cobre se mantiene a 0°C y luego se remueve para poner a 100°C, la temperatura del bloque de cobre se elevará exponencialmente hasta que después de algún periodo de tiempo alcance 63,2°C, tendiendo posteriormente a alcanzar los 100°C. La siguiente figura muestra la variación del tiempo respecto al cambio de temperatura.



*Figura 103: tiempo de reacción antes cambios de temperatura.*

**Instalación**

Se debe tener cuidado en la posición del dispositivo, este debería estar completamente abarcado al medio cuya temperatura se desee medir y no en contacto con las paredes del contenedor, que no representan la temperatura del medio. El sensor debería estar “apantallado” del calor radiante si fue necesario. También el sensor debería ser colocado corriente abajo de una mezcla de fluidos, para asegurar que se establezca la temperatura de la mezcla.

### Calibración

La calibración de la temperatura se puede realizar sobre la mayoría de los sensores de temperaturas, al sumergirlos en temperaturas conocidas, los cuales son los puntos de equilibrios de mezclas de líquidos/sólidos o liquido/gas. Si bien la mayoría de los sensores son confiables, estos pueden descalibrarse debido a la filtración durante su uso o a la contaminación del medio en el cual se mide la temperatura.

TABLE 8.9 Temperature Scale Calibration Points

Calibration material	Temperature			
	K	°R	°F	°C
Zero thermal energy	0	0	-459.6	-273.15
Oxygen: liquid-gas	90.18	162.3	-297.3	-182.97
Water: solid-liquid	273.15	491.6	32	0
Water: liquid-gas	373.15	671.6	212	100
Gold: solid-liquid	1336.15	2405	1945.5	1063

Figura 104: Puntos de calibración para la escala de temperatura.

### Medidor de caudal

Antes de describir el funcionamiento de los sensores (o medidores) de caudal, vamos a introducir conceptos básicos que son necesarios para una mayor comprensión.

- **Velocidad:** Es una medición de la rapidez y la dirección de un objeto o una partícula de fluido. Sin embargo, al hablar de fluidos es más común referirnos a caudal que a velocidad. Al trabajar con el caudal no hay que olvidar que la misma es una medida escalar, mientras que la velocidad es una medida vectorial.
- **Flujo laminar:** Es un régimen de flujo en el cual la velocidad promedio del fluido es menor a un valor crítico. En este régimen las capas del fluido se mueven paralelamente, sin cruzarse unas con otras. Este concepto será importante a la hora medir el caudal ya que su lectura será diferente si el fluido se encuentra en otro régimen.
- **Flujo turbulento:** Ocurre cuando se supera un valor crítico (número de Reynolds), en este caso las partículas de fluido se mueven en un sentido, pero lo hacen con movimientos erráticos.
- **Viscosidad:** Mide la resistencia de un fluido a fluir. Generalmente se mide en centipose (cp), y se utiliza para determinar el caudal y la pérdida de presión por fricción.
- **Numero de Reynolds:** Expresa la relación que existe entre la geometría del flujo (tubería, canaleta etc.), la rugosidad del material por donde fluye el fluido, la viscosidad del fluido y la densidad de este. Este numero define el valor crítico que diferencia el régimen laminar del turbulento.
- **Fricción:** es una medida de la energía que pierde el fluido cuando fluye entre un punto de alta presión hacia uno de baja presión.

### MEDIDORES DE CAUDAL

Existen diferentes tipos de dispositivos de medición de caudal en los procesos industriales. Los tipos de dispositivos de medición de caudal se caracterizan según el tipo de fluido a medir, su precisión, exactitud y costo.

Los medidores que se analizarán en este capítulo son:

- Rotámetro.
- Placa orificio.
- Tubo Venturi.

- Turbina.
- Medidor ultrasónico.
- Medidor magnético.
- Medidor tipo coriolis.

### **Rotámetro**

Estos medidores son conocidos como de área variable. Estos proveen una lectura visual directa del caudal.



Figura 105: Rotámetro.

A medida que el fluido fluye hacia arriba, se desarrolla una presión diferencial a través del flotador, esta fuerza debido a la diferencia de presión excede el peso del flotador, moviéndolo hacia arriba. La posición del flotador estará definida por el caudal que pasa a través del flotador. Debido al área variable la caída de presión a través del rotámetro permanece constante.

#### **Ventajas**

- Son fáciles de usar.
- Tienen una pérdida de presión constante.
- Son económicos.
- Visualización directa.

#### **Desventajas**

- Solo pueden usarse en posición vertical.
- La medición visual dificulta su automatización ante un cambio del caudal.

### **Placa orificio**

Es uno de los métodos para medir caudal mas usados. Este posee una restricción que provoca una caída presión a través de la placa.

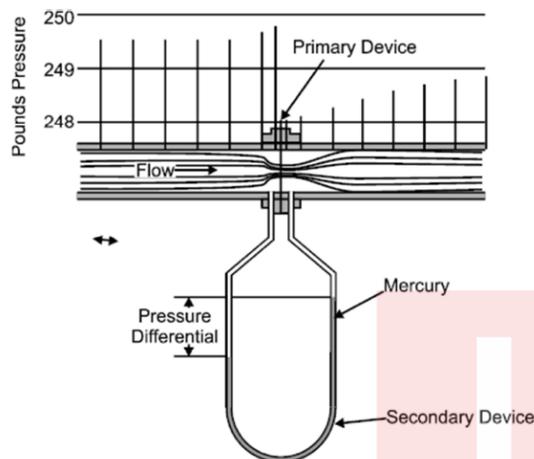


Figura 106: Representación de una placa orificio.

En caso de que el líquido posea fracciones de gas, la placa posee un orificio en la parte superior para que pase el gas y no afecte la medición. En general existen 2 tipos de orificios.

- Concéntricos con bordes cuadrados.
- Concéntricos con borde circular.

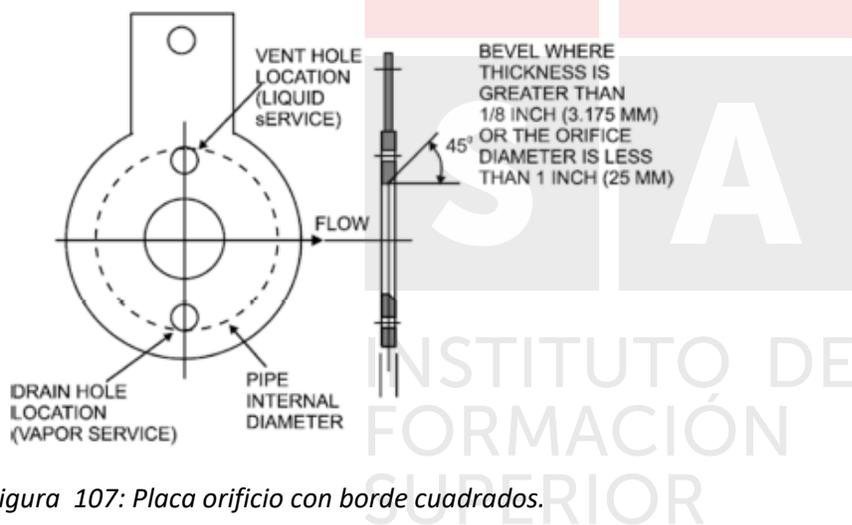


Figura 107: Placa orificio con borde cuadrados.

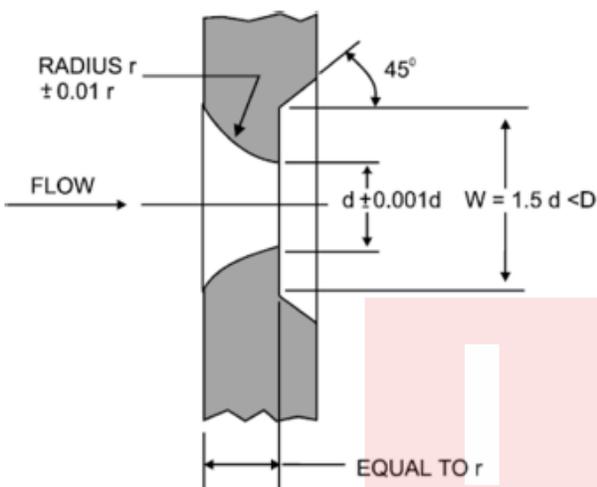


Figura 108: Placa orificio con bordes circulares.

La posición de las tomas de presión dependerá del diámetro de la tubería. Así como de la placa orificio, dependerá de la relación de diámetros de la placa y la tubería.

La formula para determinar el caudal en una placa orificio es:

$$Q_m = \frac{C\varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P}$$

Donde  $Q_m$ : Es el caudal másico;  $C$ : Coeficiente de descarga;  $\varepsilon$ : Coeficiente de expansión;  $\beta$ : Relación de diámetros ( $d/D$ ) y  $\Delta P$ : Caída de presión.

#### **Ventajas**

- Construcción simple.
- Bajo costo.
- Ajustable a diferentes diámetros de tuberías.
- Adecuado para líquidos y gas.

#### **Desventajas**

- Baja exactitud.
- Erosión de la placa por partículas sólidas.
- Rango de viscosidad limitada.
- Difícil de medir para flujos multifásicos.

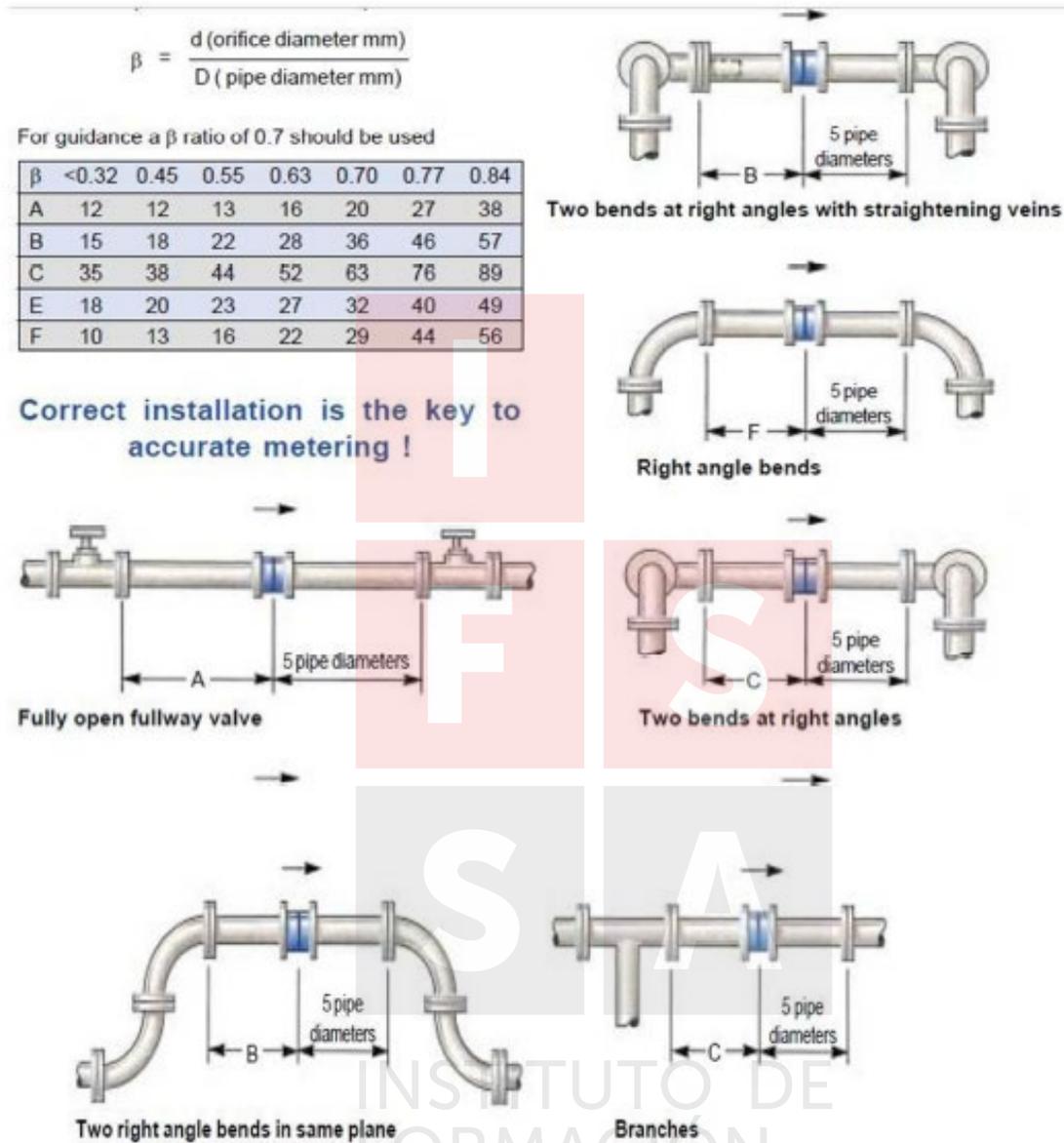


Figura 109: Configuración de las tomas de presión en función del diámetro de la tubería y la placa, y la disposición espacial de las tuberías.

### Turbina

Los medidores de turbina consisten en un rotor que gira a medida que el fluido pasa a través de este con una velocidad que es proporcional al caudal. El fluido choca con el borde frontal de las aspas de la turbina, produciendo la rotación de las aspas, creando a su vez una caída de presión.

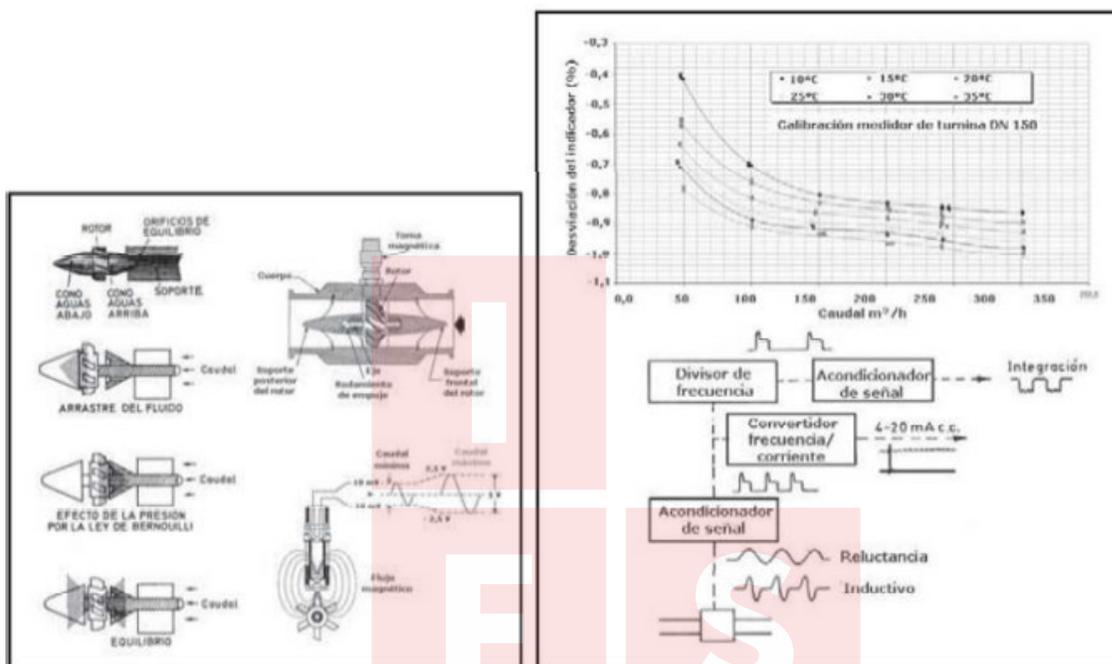


Figura 110: Esquema de la turbina y descripción de parámetros para medir el caudal.

Existen 2 tipos de convertidores para captar la velocidad de la turbina y transformarlo a un valor de caudal. El de reluctancia utiliza un campo magnético en la zona de las aspas. Este campo magnético se modifica a medida que las aspas giran. Esta variación es transformada en una corriente, la cual es proporcional a la velocidad de las aspas.

El tipo inductivo utiliza piezas magnéticas en el rotor, creando un campo magnético giratorio que induce una corriente eléctrica. La corriente es proporcional al giro de las aspas.

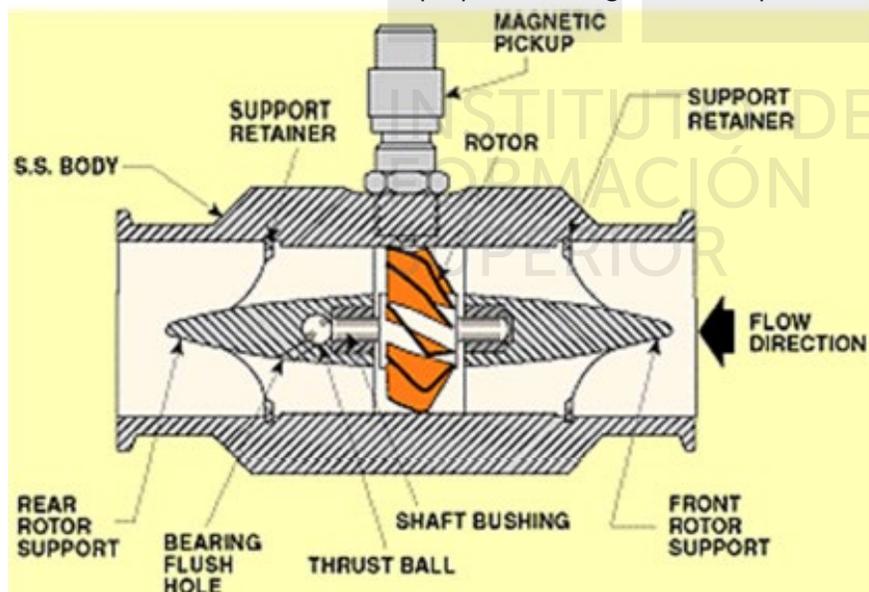


Figura 111: Configuración del medidor de turbina.

Para una medición exacta el flujo de estar en régimen laminar. Por ello se sugiere 10 veces el diámetro de la tubería como longitud aguas arriba de la turbina y no menos de 5 aguas debajo de la turbina.

El principal que afecta la lectura del caudal en la turbina, es la viscosidad del fluido. Es por ello por lo que para fluidos viscosos la medición es desvirtuada por otros efectos.

El caudal para un medidor de turbina es el siguiente:

$$Q = \frac{f * t}{k}$$

Donde f: frecuencia, t: tiempo y k: coeficiente medidor de los pulsos generados por el campo magnético.

#### Ventajas

- Alta exactitud.
- Apto para altas presiones (9300 psi).
- Amplio rango de temperaturas (-220 a 350°C).
- Amplio rango de caudales.

#### Desventajas

- No es apto para fluido de alta viscosidad.
- Flujo debe ser la laminar.
- Fluido limpio.

#### Medidor magnético

Cuando un conductor eléctrico se mueve perpendicular a un campo magnético, se induce un voltaje en aquel conductor. Este fenómeno se conoce como inducción electromagnética, el cual es el principio básico de este tipo de medidor.

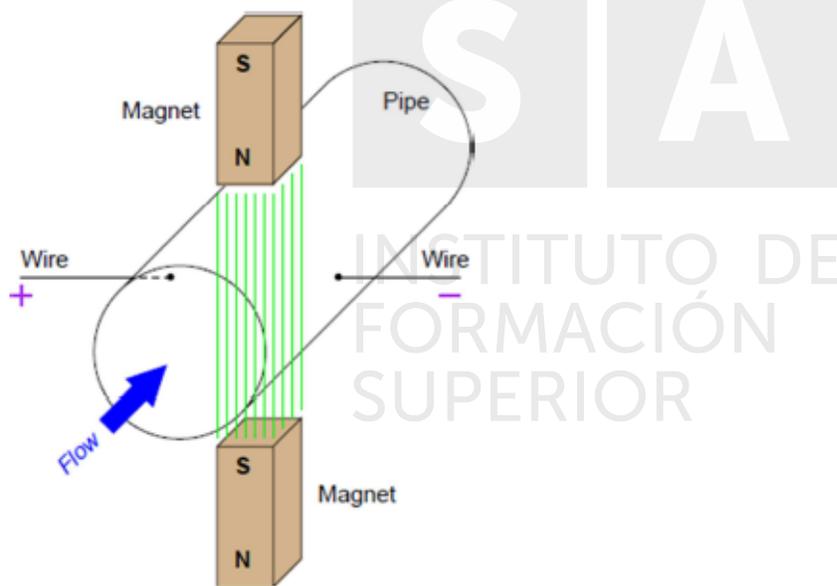


Figura 112: principio de inducción magnética.

La dirección del flujo de líquido es perpendicular a las líneas del campo magnético, generando un voltaje en el conductor. Se colocan electrodos a un lado y al otro para medir este voltaje, el cual es proporcional al caudal de líquido.

Asumiendo que el campo magnético es fijo y que la longitud del conductor es igual al diámetro de la tubería, la única variable que influye en la velocidad es el voltaje generado. La relación entre el caudal y dicho voltaje es:

$$Q = \frac{\pi d \varepsilon}{4B}$$

Donde B: Es el capo magnético, d: Diámetro de la tubería y  $\varepsilon$ : La constante dieléctrica del líquido.

Se debe cumplir los siguientes requisitos para medir el voltaje de manera adecuada.

- El liquido debe ser buen conductor de electricidad.
- La tubería debe estar llena de líquido.
- Los electrodos deben estar en contacto con el líquido.
- Debe haber una puesta a tierra para evitar corrientes estáticas.

#### **Ventajas**

- No restringe el flujo.
- No existe perdida de presión.
- Buena exactitud.
- Apto para flujo en ambas direcciones.
- Independiente de la viscosidad del fluido.

#### **Desventajas**

- Costo alto.
- No apto para líquidos con presencia de gas.
- El fluido debe ser conductor.

#### **Medidor ultrasónico**

Los medidores ultrasónicos se basan en el fenómeno ultrasónico caracterizado por las pequeñas perturbaciones de presión en el fluido cuando se propagan a la velocidad del sonido.

Se utiliza un par de sensores opuestos que mide el tiempo que tarda una onda sónica en viajar de un sensor al otro y en dirección opuesta.

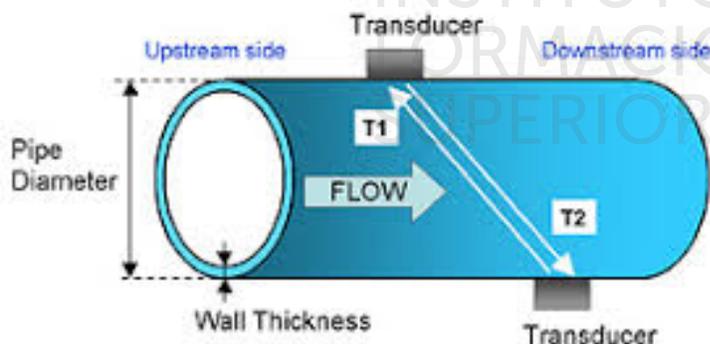


Figura 113: representación del medidor ultrasónico.

A relación entre el tiempo de viaje y la velocidad del fluido es:

$$V = \frac{D}{\text{sen}(2\alpha)} \frac{\Delta t}{t_{up}t_{down}}$$

Donde D: Es el diámetro de la tubería;  $\Delta t$ : Es el tiempo transcurrido entre un sensor y el otro;  $t_{up}$ : Tiempo aguas arriba del sensor;  $t_{down}$ : Tiempo aguas abajo y  $\alpha$ : Ángulo de los sensores.

**Ventajas**

- Adecuado para grandes diámetros.
- Sin pérdida de presión.
- No se ve afectado por las propiedades del fluido.

**Desventajas**

- El régimen debe ser laminar.
- Alto costo.
- El líquido debe llenar completamente la tubería.

**Medidor tipo coriolis**

Este medidor opera bajo el efecto de coriolis. El cual expresa que cuando el fluido fluye a través de una sección circular se genera una fuerza. Dicha fuerza a su vez produce vibraciones en la tubería, que se puede medir y de esa manera calcular el caudal.

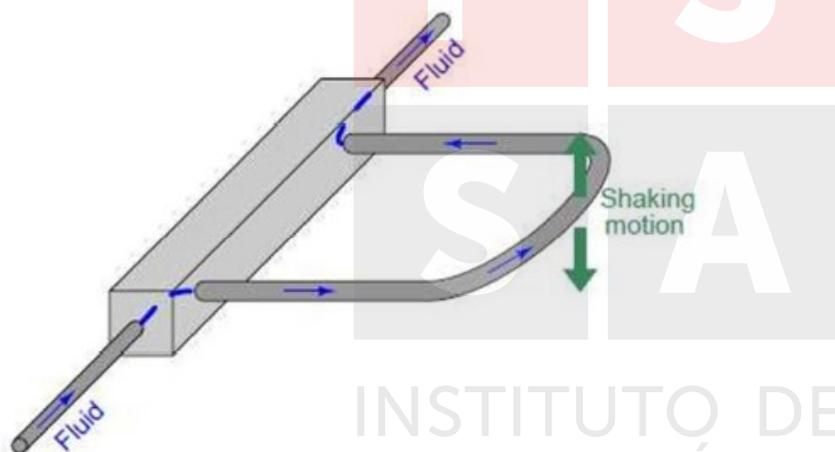


Figura 114: Esquema del medidor de coriolis.

Para reducir la vibración que provoca el fluido al pasar por la tubería, se colocan 2 tubos en forma de U.

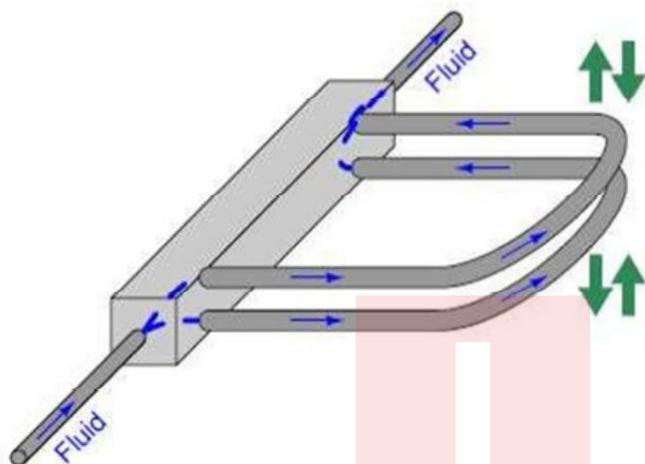


Figura 115: Utilización de 2 tubos en U para disminuir las vibraciones.

#### **Ventajas**

- Independiente de la temperatura.
- Sensores capaces de medir densidad y temperatura.
- Adecuado para medir hidrocarburos.
- Independiente de la conductividad del fluido.

#### **Desventajas**

- Alto costo.
- Los materiales se pueden ver afectados por la vibración.
- Restringido a bajos caudales.

#### **Elementos de control**

Los elementos de control más comunes en la industria son las válvulas de control. Una válvula básicamente tiene como función restringir el flujo de fluido a través de una cañería. Entonces las válvulas de control manipulan el flujo de las instalaciones (corriente de aire, agua, petróleo, glicol, etc.), para cambiar el valor de la variable de proceso, manteniéndolo a un valor pre definido.

#### **CONTROLADOR DE PRESIÓN**

##### **REGULADORES**

Los gases usados en procesos industriales, tal como, el oxígeno, el nitrógeno, hidrogeno y el propano, se almacenan en recipientes bajo presión, en forma de líquido. Los gases en dichos recipientes usan reguladores de gas para bajar la presión y así poder distribuir el gas a través de las instalaciones.

**Regulador controlado por resorte:** Son reguladores de presión controlados internamente, como se muestran en la siguiente figura.

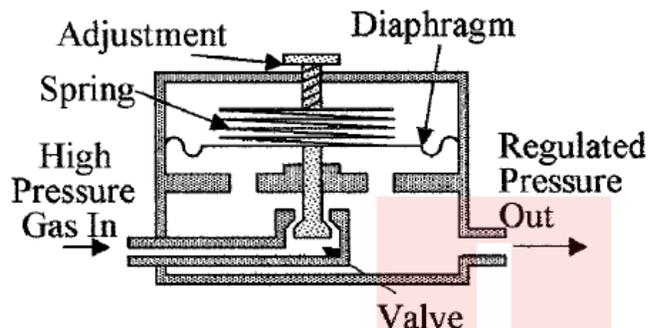


Figura 116: Regulador de presión controlado por resorte.

Inicialmente, el resorte mantiene la válvula de entrada abierta y el gas bajo presión fluye en el cilindro principal a una velocidad mayor que la que puede salir del cilindro. A medida que la presión se incrementa, se alcanza un valor predeterminado, donde el resorte hace subir un diafragma, causando que la válvula se cierre parcialmente. Es decir, la presión sobre el diafragma controla el flujo de gas en el cilindro para mantener la presión constante. La presión de salida se ajusta, al ajustar el resorte.

**Regulador controlado por pesos:** La operación es similar a la del resorte, solo que en este caso se utiliza un peso, que hace mover el diafragma. La presión puede ser ajustada por la posición de un brazo deslizable (cantiléver arm).

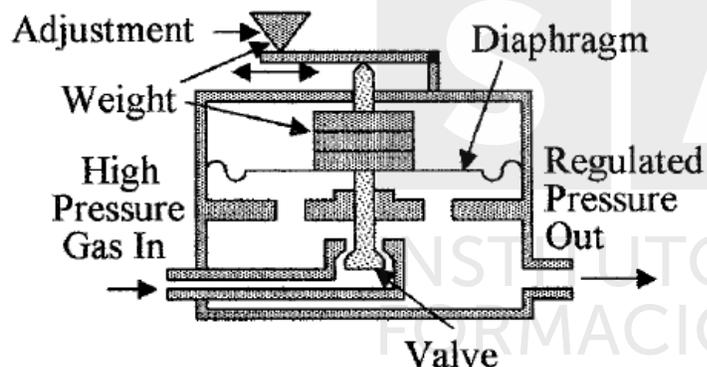


Figura 117: Regulador de presión controlado por pesos.

**Regulador de diafragma controlado por presión:** En estos tipos de reguladores el diafragma está presurizado. Se usa un suministro de aire externo para cargar el diafragma, a través de una restricción. La presión del regulador puede ser regulada por medio de una válvula de purga (bleedvalve), el cual a su vez se utiliza para definir la presión de salida.

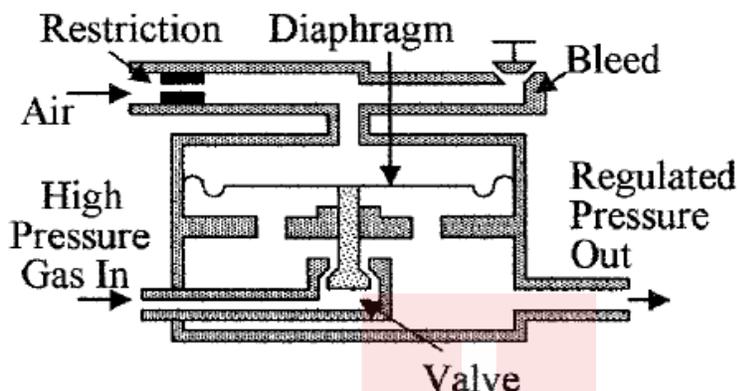


Figura 118: Regulador de presión controlado por presión.

### CONTROLADORES DE NIVEL

Son comúnmente usados en la industria para mantener una presión de fluido constante o un suministro de fluido constante en un proceso o en un tanque. Los controladores de nivel pueden ser consistir en un arreglo de válvulas y flotador, usando sensores capacitivos, para controlar el encendido de una bomba.

El arreglo de la siguiente figura se utiliza para controlar el nivel de agua en varias aplicaciones. Cuando el nivel baja (debido al uso), el flotante se mueve hacia abajo, abriendo la válvula de entrada, permitiendo la entrada de fluido al tanque. A medida que el tanque se llena, el flotador se mueve hacia arriba, causando que se cierre la válvula, para prevenir de sobre flujos.

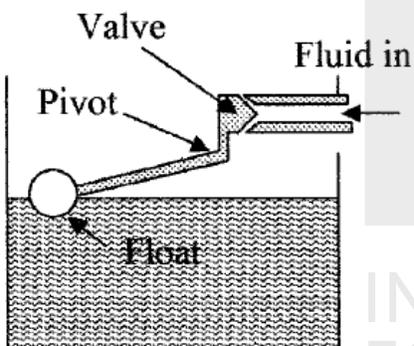


Figura 119: controlador de nivel automático.

Otra configuración para controlar el nivel es a través de un mecanismo de auto vaciado. Este consiste en un flotador se une a la válvula. A medida que el flotador se eleva, tensando la unión entre el flotador y la válvula. Al subir más el nivel del fluido, la válvula se abrirá, vaciando el tanque. Una vez vaciado el tanque, el fluido llenará nuevamente el tanque.

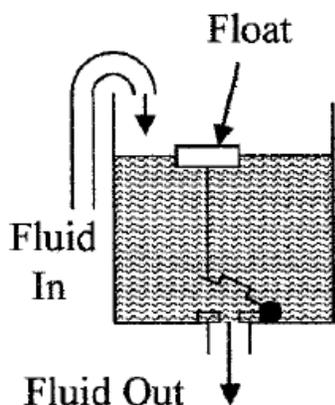


Figura 120: Dispositivo de vacío automático

Las válvulas de control se componen de dos partes principales:

- **El cuerpo de la válvula:** Que incluye todos los componentes metálicos necesarios para influenciar en el flujo.
- **El actuador:** El cual provee la energía mecánica necesaria para mover los componentes dentro del cuerpo de la válvula.

A su vez las válvulas pueden tener un movimiento lineal o de rotación.

### **ACTUADORES PARA EL CONTROL DE FLUJO (VÁLVULAS DE CONTROL)**

Antes de explicar las funciones de los actuadores aplicado a las válvulas de control, vamos a dar la definición del actuador.

*“Los actuadores son dispositivos eléctricos, neumáticos o hidráulicos, que proveen la fuerza necesaria para abrir o cerrar una válvula”, (Control Station, pag. 99).*

En la mayoría de los casos, cualquier cambio en las variables, es decir, presión, temperatura, caudal, mezcla, humedad etc. Se puede controlar al controlar válvulas de flujo. En este caso los actuadores son usados para controlar el caudal de la válvula, la cual se puede controlar de manera eléctrica neumática o hidráulica.

### **COMPONENTES DE UNA VÁLVULA DE CONTROL**

Cuando hablamos de una válvula de control, realmente estamos refiriéndonos a un conjunto de ensamblados. Básicamente una válvula de control consiste en:

- Un actuador.
- Cuerpo de la válvula.
- Parte interna de la válvula.

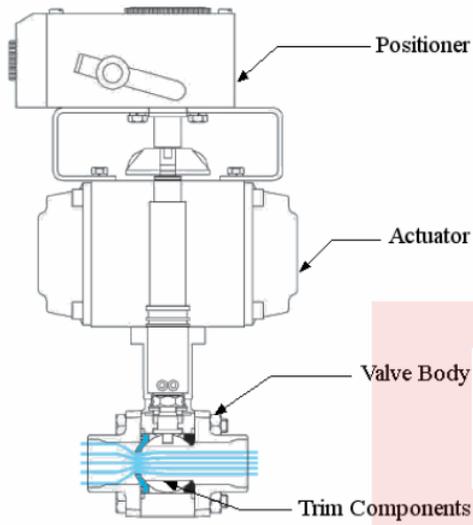


Figura 121: Componentes de la válvula de control.

Un posicionador lo definimos como:

*“Es un accesorio de la válvula de control, que provee al actuador la posición de la válvula” (Control Station, pag. 100).*

#### **VÁLVULA DE VÁSTAGO DESLIZANTE**

Esta válvula actúa con un movimiento lineal, que restringe o permite el flujo de fluido. Algunas configuraciones se muestran a continuación

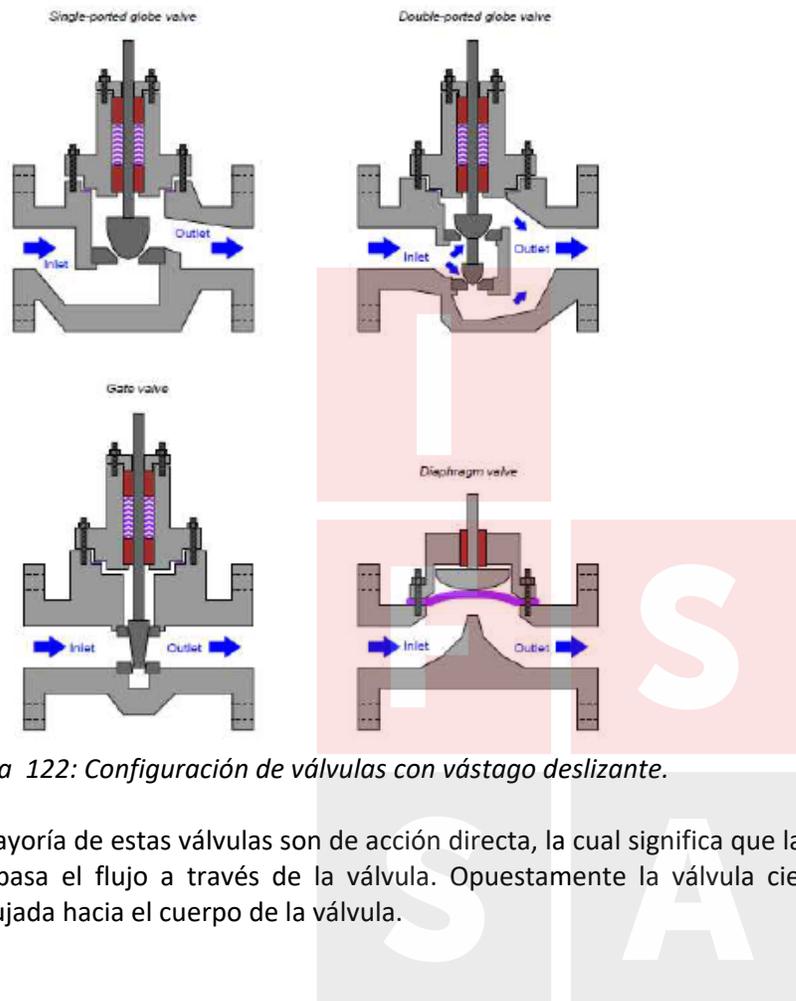


Figura 122: Configuración de válvulas con vástago deslizante.

La mayoría de estas válvulas son de acción directa, la cual significa que la válvula abre cada vez más a medida que pasa el flujo a través de la válvula. Opuestamente la válvula cierra cuando la corriente de flujo es empujada hacia el cuerpo de la válvula.

### VÁLVULA GLOBO

Esta válvula restringe el flujo al alterar la distancia entre un tapón móvil (actuador) y un asiento estacionario. El actuador determina la velocidad de viaje y la distancia entre el tapón y el asiento.

Este tipo de válvula puede ser diseñada para una operación de apertura rápida, lineal o de igual porcentaje.

En operaciones de igual porcentaje, el flujo es proporcional a la apertura de la válvula o existe una relación logarítmica entre el flujo y la distancia de la válvula. La forma del tapó determina las características del flujo del actuador y es normalmente descrito en porcentajes de flujo versus el porcentaje de apertura. La selección del tipo de válvula dependerá de las características del proceso.

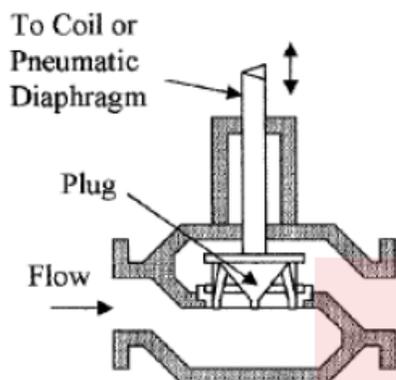


Figura 123: Válvula globo.

La válvula globo puede ser de funcionamiento recto con un solo asiento, como se muestra en la figura de arriba, o puede estar configurado con un doble asiento, el cual se usa para reducir la fuerza de operación del actuador. La siguiente figura muestra otras configuraciones de la válvula globo.

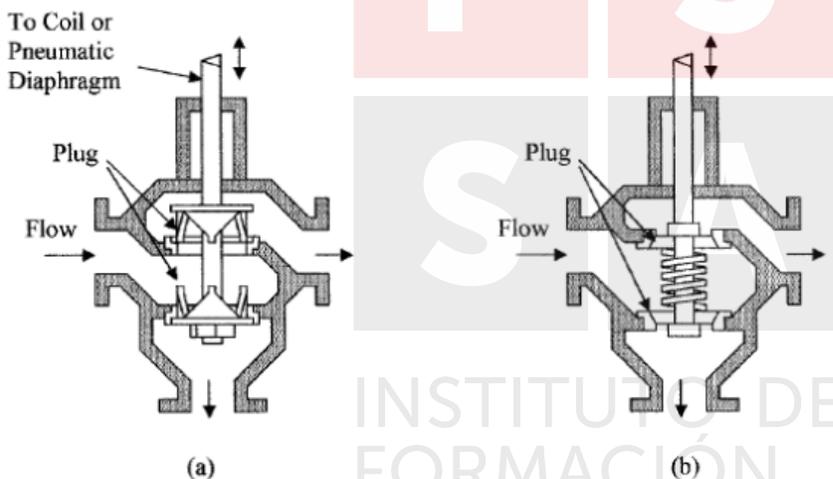


Figura 124: Válvula globo de doble apertura a) y 3 posiciones b).

Estas son válvulas de dos salidas, la cual se usa para intercambiar el flujo entrante de una salida a la otra. Otro tipo de válvula globo son las válvulas agujas, las cuales se utilizan para diámetros menores a 1".

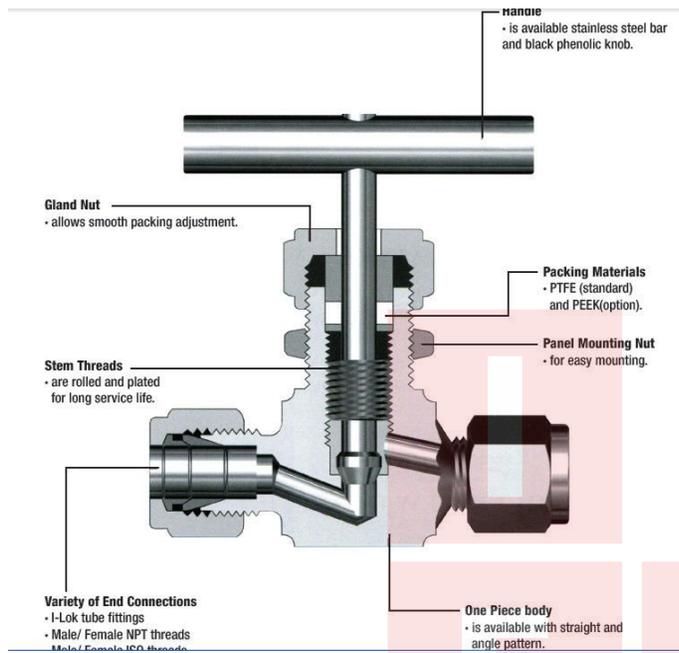


Figura 125: Válvula aguja.

### VÁLVULA TIPO COMPUERTA

Esta válvula trabaja al insertar una compuerta en el flujo, es similar a la acción de la de una puerta corrediza. La válvula tipo compuerta son muy usadas para control de on/off.



Figura 126: Funcionamiento de la válvula compuerta.

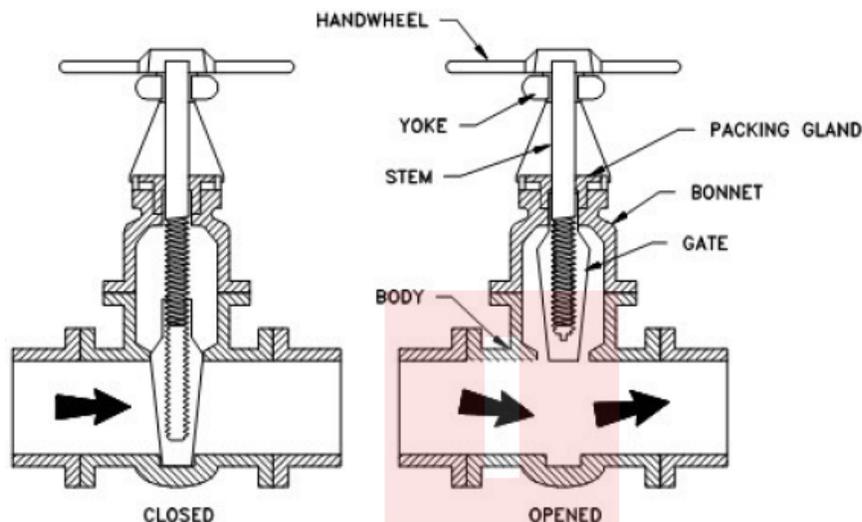


Figura 127: Descripción de la válvula compuerta.

### VÁLVULA DIAFRAGMA

Las válvulas diafragma usan una lámina flexible presionada cerca del borde superior de la válvula. Estas válvulas son adecuadas para el manejo de lechadas o fluidos con acarreo de sólidos, aunque el estrangulamiento preciso puede ser difícil de lograr debido a la elasticidad del diafragma.

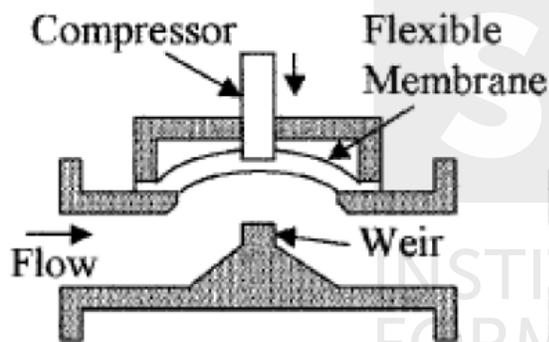


Figura 128: Válvula diafragma.

### VÁLVULAS DE VÁSTAGO GIRATORIO

Una estrategia diferente de controlar el flujo es insertar un elemento rotatorio en el camino de flujo. La válvula de vástago rotatorio depende del movimiento de un eje para la obstrucción del flujo. Una ventaja importante respecto de las válvulas de vástago deslizantes, tales como las válvulas globo, de diafragma o aguja es un camino sin obstrucción cuando la válvula se encuentra totalmente abierta.

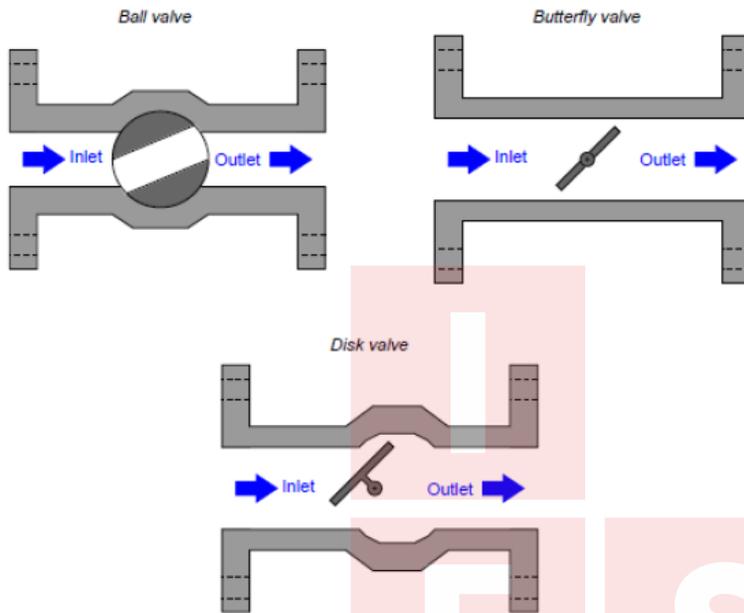


Figura 129: Válvula de vástago giratorio.

### VÁLVULA MARIPOSA

La relación entre el flujo y la apertura es aproximadamente de igual porcentaje por arriba del 50% de apertura. El elemento que obstruye el flujo es un disco que rota dentro del camino del fluido. Cuando disco este paralelo al flujo, presenta la mínima obstrucción al flujo, cuando esta perpendicular al flujo es disco bloquea totalmente al flujo. Este tipo de válvula ofrece gran capacidad a bajo costo, son de simple diseño y fácil de instalar.

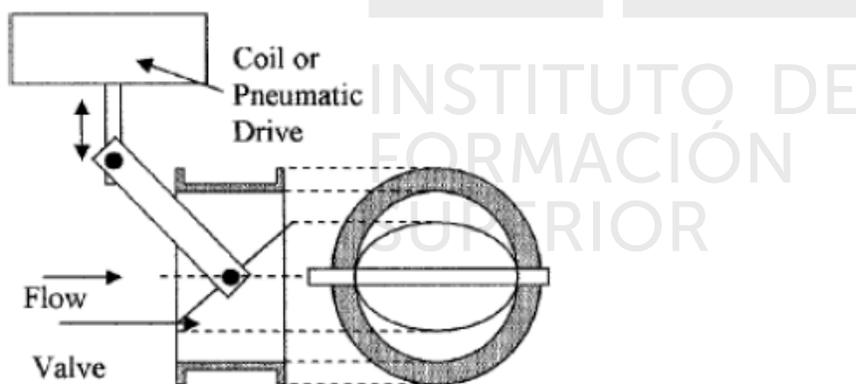


Figura 130: Configuración de la válvula mariposa.

### VÁLVULA ESFÉRICA

En el diseño, una bola esférica, tiene una apertura en el centro de la esfera. Dependiendo del ángulo de giro, permitirá o restringirá el flujo a través de la válvula. Cuando está paralelo a la dirección de flujo, la válvula está totalmente abierta. A su vez cuando esta perpendicular al flujo la válvula está totalmente cerrada.

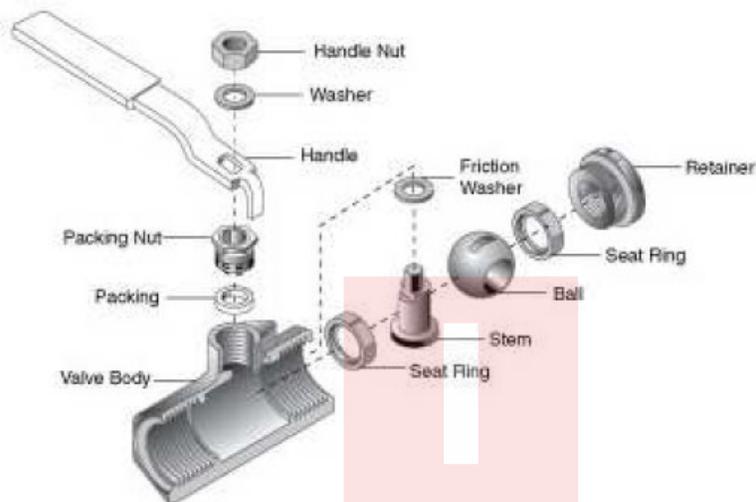


Figura 131: Válvula esférica.

### VÁLVULA DE DISCO

Esta válvula es una variación de la válvula mariposa, diseñada para mejorar el cierre. El centro del disco está desfasado del eje longitudinal, causando que se aproxime al asiento con la acción de una leva, resultando en una alta presión de colocación. Esto permite cerrar en condiciones difíciles de flujo.



Figura 132: Válvula disco.

### CARACTERÍSTICAS DE LAS VÁLVULAS

Uno de los factores que determina la elección de la válvula son:

- La resistencia a la corrosión.
- El rango de temperatura.
- Las presiones de operación.
- Contenido de sólidos.
- El rango del caudal.
- El tamaño.

Un aspecto importante en la elección de la válvula es el grado de apertura de la válvula.

“La apertura de la válvula es la relación del cambio en la apertura de la válvula, respecto al cambio de caudal que pasa a través de la válvula” (Hughes, 2002, pag. 277).

Las aperturas se clasifican en:

- Rápidas.
- Lineal.
- Igual porcentaje.

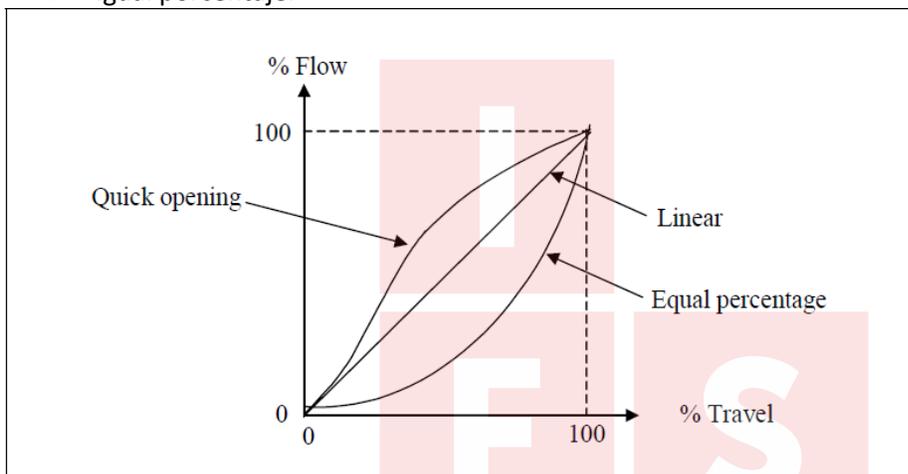


Figura 133: Característica de apertura de las válvulas.

Una apertura rápida de la válvula se utiliza generalmente en aplicaciones de control On/Off. Un movimiento relativamente pequeño del vástago de la válvula causa el máximo caudal posible a través de la válvula. Por ejemplo, con un 25% del viaje del vástago, permite que a través de la válvula pase el 85% del caudal máximo. Las válvulas de igual porcentaje se fabrican de modo que a un porcentaje dado en la posición del vástago, el caudal cambie en el mismo porcentaje. Generalmente este tipo de válvulas no cierra completamente en la posición de cierre. Entonces un caudal mínimo existe cuando la válvula se encuentra cerrada. Su rango de variación se define como:

$$R = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$$

Por último, la válvula de variación lineal, posee un caudal que varía linealmente con la posición del vástago. Dicha relación se expresa como:

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{X}{X_{max}} \rightarrow Q = \frac{X}{X_{max}} Q_{max}$$

Donde:

Q: Es el caudal;  $Q_{max}$ : Es el caudal máximo; X: La posición del vástago y  $X_{max}$ : La posición máxima del vástago.

En la siguiente tabla mostramos las características más comunes de las válvulas.

TABLE 11.1 Valve Characteristics

Parameter	Globe	Diaphragm	Ball	Butterfly	Rotary plug
Size	1 to 36 in	1 to 20 in	1 to 24 in	2 to 36 in	1 to 12 in
Slurries	No	Yes	Yes	No	Yes
Temperature range (°C)	-200 to 540	-40 to 150	-200 to 400	-50 to 250	-200 to 400
Quick-opening	Yes	Yes	No	No	No
Linear	Yes	No	Yes	No	Yes
Equal %	Yes	No	Yes	Yes	Yes
Control range	20:1 to 100:1	3:1 to 15:1	50:1 to 350:1	15:1 to 50:1	30:1 to 100:1
Capacity ( $C_v$ ) ( $d = \text{Dia.}$ )	10 to $12 \times d^2$	14 to $22 \times d^2$	14 to $24 \times d^2$	12 to $35 \times d^2$	12 to $14 \times d^2$

Figura 134: Ficha técnica de las válvulas más comunes.

### VÁLVULAS DE SEGURIDAD

Una consideración importante en cualquier sistema es la posición de los actuadores cuando existe una pérdida de energía. En la siguiente muestra un ejemplo de una válvula globo operada hidráulica y neumáticamente, que puede estar configurada para ir a una posición abierta o cerrada durante la falla del sistema. La posición del vástago en estos casos se determinará por la posición del resorte y la toma de presión (air pressure).

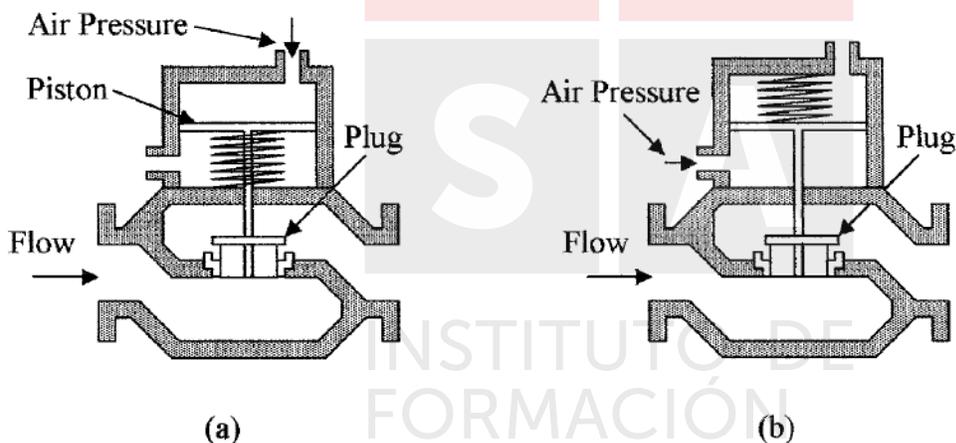


Figure 11.9 Fail-safe pneumatic or hydraulic operated valves: with the loss of operating pressure on the valve, the valve in (a) will open and the valve in (b) will close.

Figura 135: Configuración de válvulas de seguridad.

### TIPOS DE ACTUADORES

El propósito de una válvula de control del actuador es proveer la fuerza para operar la válvula. Estos se pueden clasificar en:

- **Actuadores neumáticos:** Son ampliamente usados, debido a que pueden efectivamente traducir una pequeña señal de control en una gran fuerza. La fuerza generada por el actuador neumático se basa en la definición de la presión.

$$F = \Delta P * A$$

Si necesitamos duplicar la fuerza para una presión dada, tendríamos que solamente duplicar el área de aplicación. Se pueden desarrollar grandes valores de fuerza, al aplicar señales neumáticas entre 3 a 15 psi. El actuador neumático más común es el tipo diafragma. En la siguiente figura se muestran 2 tipos de actuadores neumáticos.

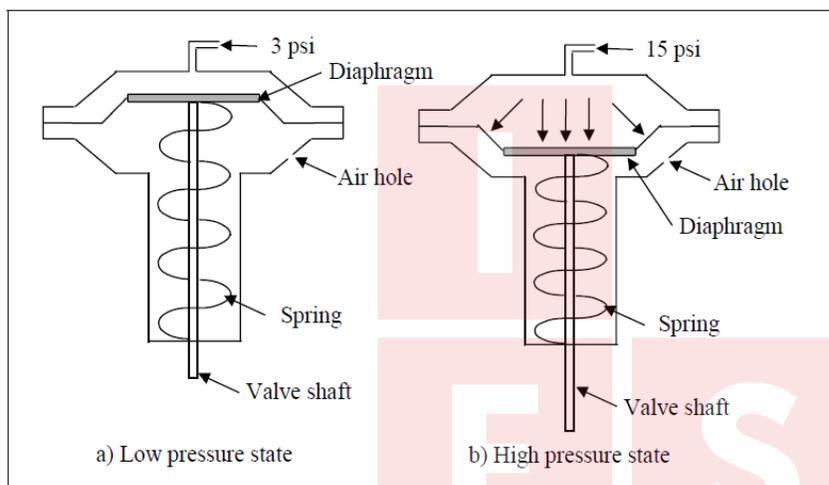


Figura 136: Actuador neumático de acción directa.

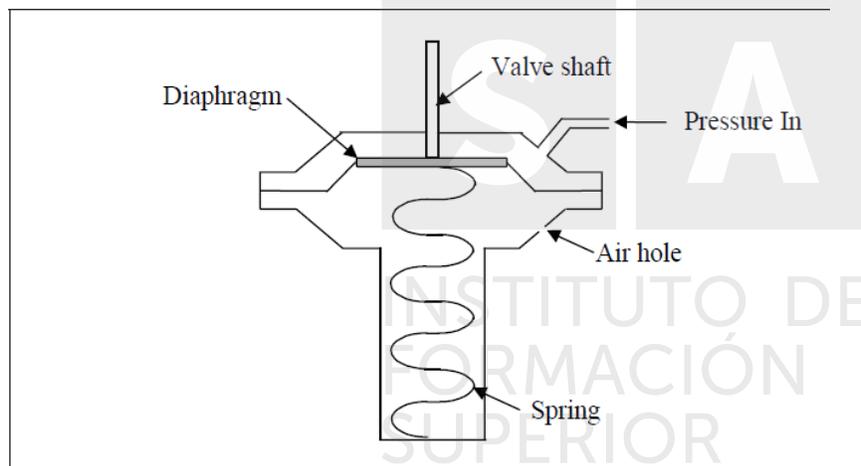


Figura 137: Actuador neumático de acción inversa.

En la figura del actuador de acción directa, se aplica una señal de baja presión (3 psi), para asegurar que el resorte mantiene el diafragma y al eje en la posición mostrada. La presión del lado opuesto (lado del resorte) del diafragma se mantiene a la presión atmosférica, al estar conectado a la atmosfera a través de un agujero. Al aumentar la señal de presión (15 psi), el diafragma y el eje de la válvula, se mueven hacia abajo producto de la mayor presión aplicada.

Como la fuerza aplicada está dado por  $F = \Delta P \cdot A$ , a su vez la fuerza del resorte es:

$$F = k \Delta d$$

Entonces se puede relacionar la presión aplicada con el movimiento del eje de la válvula y la fuerza del resorte.

$$F = k * \Delta d = \Delta P * A \rightarrow \Delta d = \frac{A}{k} \Delta P$$

Dónde: F: Fuerza (N); k: constante del resorte (N/m); A: Área del diafragma (m<sup>2</sup>) y Δd: La posición de la eje de la válvula (m), (hacia arriba o hacia abajo).

- **Actuador hidráulico:** Usa líquido en vez de gas para mover el mecanismo de la válvula. La alta presión de calibración del pistón del actuador da un buen funcionamiento del sistema hidráulico. Algunos actuadores hidráulicos tienen su propia bomba controlada eléctricamente que provee el suministro de fluido.

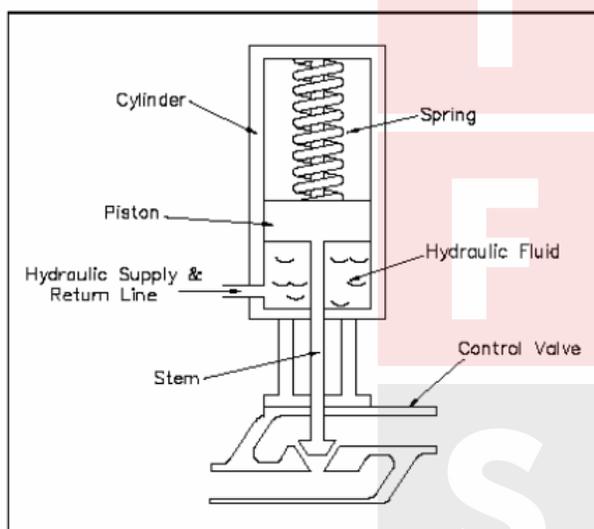


Figura 138: Actuador hidráulico.

- **Actuador eléctrico:** Tiene un motor que actúa sobre las válvulas, o en un modo on/off en servicios de estrangulación. Los avances en los diseños de los motores y el circuito de control del motor han llevado a la mayor utilización de estos tipos de actuadores.



*Figura 139: Actuador eléctrico.*



INSTITUTO DE  
 FORMACIÓN  
 SUPERIOR

**Procesos de control**

En los inicios de la industria los procesos de control fueron llevados a cabo mediante métodos cualitativos y basados en la intuición. Hoy en día el concepto de control de proceso ha sido ampliamente desarrollado tanto desde el punto de vista teórico como práctico.

**Características del proceso de control**

El control se realiza según el lazo de control típico formado por el proceso, es decir, el tipo de control depende del proceso que se esté tratando. Además, hay que considerar el transmisor, el controlador y la válvula de control.

El proceso consiste en un sistema que ha sido implementado para llevar a cabo un objetivo determinado. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de proceso.

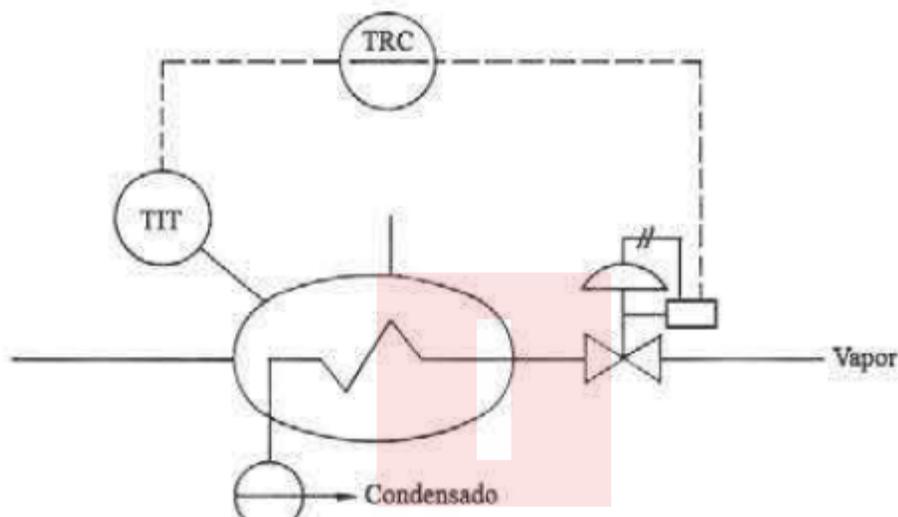


Figura 140: Ejemplo de un intercambiador de calor como proceso de control.

El transmisor capta la señal del proceso (la temperatura) y lo transforma a una señal neumática, eléctrica o digital para enviarla al controlador, luego el controlador decide si el valor de la variable se encuentra cercano al valor establecido (set point), en caso que no sea así, el controlador envía una señal a la válvula de control para modificar el valor de la variable de proceso.

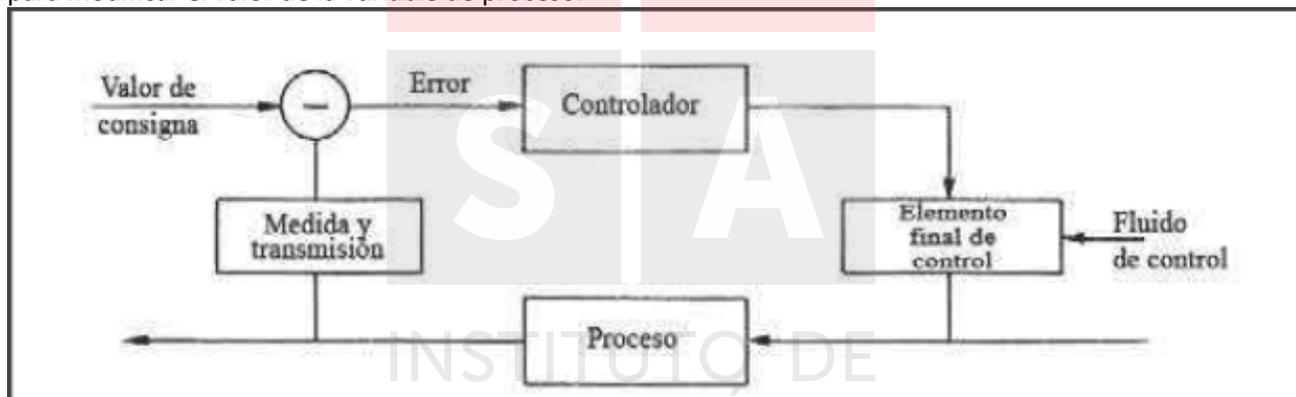


Figura 141: Diagrama de proceso de control. La temperatura es la variable de proceso, el caudal es la variable controlada y el set point (valor de consigna), es el valor predefinido.

Analicemos mas en detalle el ejemplo del intercambiador de calor.

Supongamos que la temperatura esta estabilizada y que, en un momento dado se presenta un aumento en el caudal de agua por aumento de la demanda. Como la válvula de vapor sigue estando en la misma posición, el intercambiador de calor o llegará a calentar el mayor caudal de agua fría de entrada. Por lo tanto, la temperatura disminuirá.

Debido a la inercia del proceso, pasará cierto tiempo hasta que el agua más fría alcance la mano del operador. Cuando esta nota la disminución de temperatura, debe compararla con la temperatura deseada y calcular mentalmente cuantas vueltas debe dar a la válvula de vapor y en qué sentido hasta que la temperatura sea va deseada.

Los procesos presentan 2 características principales que deben considerarse al automatizarlos.

- Los cambios en la variable controlada debido a alteraciones en las condiciones del proceso. La carga del proceso se refiere a la cantidad del agente de control que el proceso requiere para mantener condiciones de trabajo equilibradas. Los cambios de carga se deben (generalmente) a las siguientes causas:
  1. Mayor o menor demanda de fluido de control por medio controlado. En el ejemplo del intercambiador de calor, un aumento del caudal de agua o disminución de temperatura da lugar a un cambio de carga.
  2. Variaciones en la calidad del fluido de control. Si el vapor de agua se utiliza para calentar el agua, una disminución de la presión de vapor del agua da lugar a un aumento del volumen de vapor de agua para mantener la misma temperatura controlada.
  3. Cambios en las condiciones ambientales
  4. Procesos exotérmicos o endotérmicos.
- El tiempo necesario para que la variable del proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este tiempo de retardo se debe a una o varias propiedades del proceso; capacitancia, resistencia y tiempo de transporte.

La capacitancia es una medida de las características propias del proceso para mantener o transferir una cantidad de energía o de material, con relación a una cantidad unitaria de alguna variable de referencia. En un proceso una capacitancia grande es favorable para mantener constante la variable controlada, pero la misma característica hace difícil poder cambiar la variable.

La resistencia es la oposición a la transferencia de energía o de materia entre dos puntos dados.

El tiempo de transporte es el tiempo necesario para transferir las variaciones de la temperatura u otra variable al elemento de control o al controlador.

#### ***Tipos de control***

Existen varios tipos de control, pero en este caso solo veremos los más comunes.

- Control todo o nada (On/Off).
- Proporcional.
- Proporcional más integral.
- Proporcional más derivado.
- PID

#### ***Control On/Off***

En la regulación On/Off, la válvula de control adopta solo 2 posiciones; abiertas o cerradas, para un único valor de la variable controlada. Este tipo de control se caracteriza por un clico continuo de variación de la variable controlada.

Este tipo de control se emplea usualmente con una banda diferencial o zona neutra, dentro de la cual el elemento de control permanece en su última posición. El control On/Off funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee tiempo de tardío mínimo.

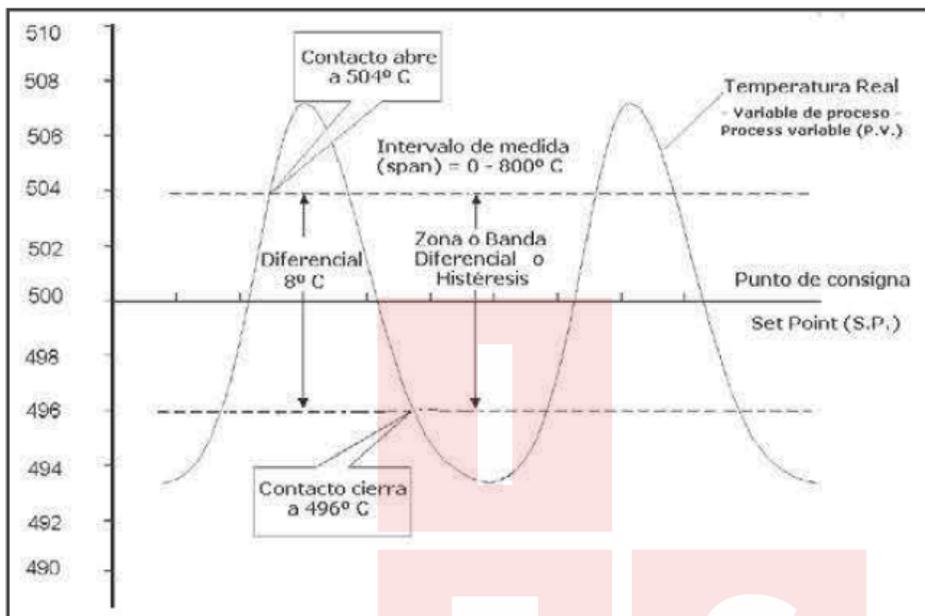


Figura 142: Controlador On/Off. La zona punteada corresponde a la zona neutra. Si la variable real atraviesa esa zona se activa el elemento de control para mantener a la variable dentro de la banda neutra.

**Controlador proporcional**

En este tipo de controladores existe una relación lineal entre la variable controlada y la posición del elemento de control. Es decir, la válvula se mueve proporcionalmente a la desviación de la variable.

Por ejemplo, si el set point es de 50°C y el intervalo de trabajo es de 0 a 100°C. Cuando la variable controlada está en 0°C o menos, la válvula está totalmente abierta; a 100°C está totalmente cerrada y entre 0 a 100°C la posición de la válvula será proporcional al valor de la variable controlada.

La acción proporcional tiene un inconveniente, que es la desviación permanente de la variable una vez estabilizada con relación al set point (es esto se le denomina offset).

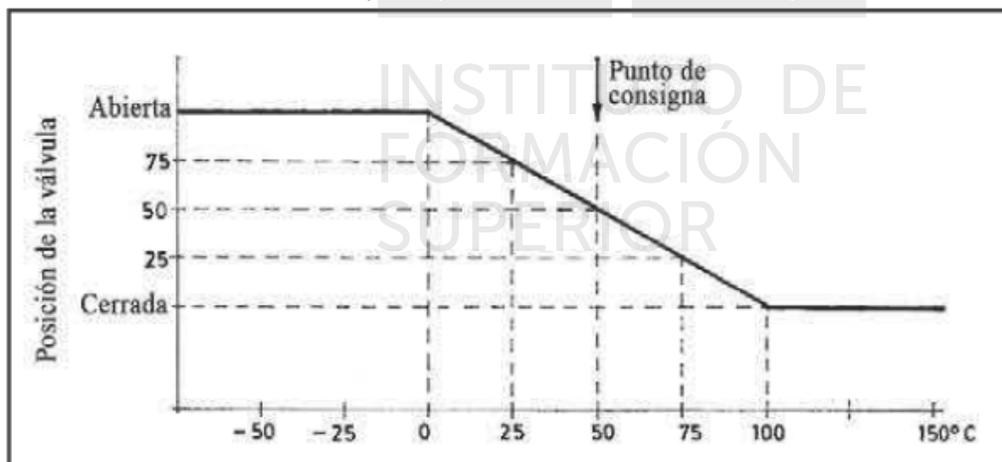


Figura 143: Representación del control proporcional.

**Controlador proporcional integral**

Este actúa cuando existe una desviación de la variable y el set point, integrando dicha desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. Este controlador se caracteriza por el llamado tiempo de acción integral en minutos por repetición, que es el tiempo que, ante una señal de escalón, la válvula repite el mismo movimiento correspondiente a la acción proporcional. Como esta acción de control se emplea para obviar el inconveniente de offset (desviación permanente de la variable con respecto al set point), de la acción proporcional. Solo se debe utilizar cuando es preciso mantener un valor de la variable que iguale al set point.

#### **Control proporcional mas derivado**

En la regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento de control. El control derivativo actúa cuando existen cambios en la variable. Esta actuación es proporcional a la pendiente de la variable, es decir, su derivada.

La acción derivada se caracteriza por el llamado tiempo de acción derivada en minutos de anticipo, que es el intervalo durante el cual la variación de la señal de salida del controlado, debido a la acción proporcional, iguala a la parte de variación de la señal debida a la acción derivativa.

Por ejemplo, si la acción derivada es de 1 minuto, la posición de la válvula se anticipa 1 minuto a la que tendría normalmente por la acción proporcional.

La acción derivativa es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión en la variable controlada. No obstante un tiempo de acción derivada demasiado grande, da lugar a que la variable cambie demasiado rápido y sobre pase el set point, creando una oscilación que puede o no ser amortiguada.

#### **Control proporcional – derivado – integral (PID)**

La unión del controlador proporcional – derivado e integral forma un instrumento controlador que presenta las siguientes características:

- La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al set point. Esta señal mueve la válvula siguiendo los cambios de la variable.
- La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al set point. La señal va sumando las áreas de diferencia entre la variable y el set point, repitiendo la señal proporcional por un determinado tiempo.
- La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada. La señal es la pendiente de la curva descrita por la variable, con lo que anticipa la posición de la válvula en un tiempo determinado.