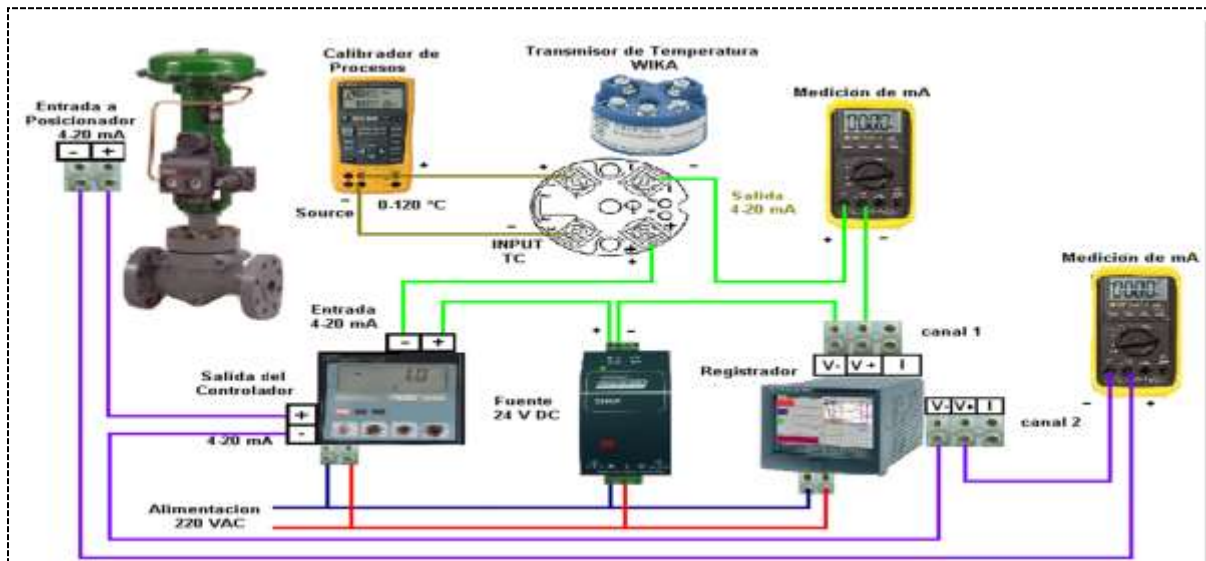


## Prefacio

El presente documento forma parte del programa de estudios de la materia CONTROL E INSTRUMENTACIÓN ofrecida a sus estudiantes en el Instituto Universitario de Tecnología para la informática – Iutepi en el área de Electrónica del quinto semestre. Sirve de apoyo complementario bajo la modalidad de autoaprendizaje publicado en su campus virtual, a todos los alumnos que cursan la materia.

### INSTRUMENTACION CONVENCIONAL Y VIRTUAL



La instrumentación y control de procesos es una especialidad de la ingeniería que combina, a su vez, distintas ramas, entre las que destacan: sistemas de control, automatización, electrónica e informática. Su principal aplicación y propósito es el análisis, diseño y automatización de procesos de manufactura de la mayor parte de las áreas industriales: petróleo y gas, generación de energía eléctrica, textil, alimentaria, automovilística, . La instrumentación y control de procesos es una especialidad de la ingeniería que combina, a su vez, distintas ramas, entre las que destacan: sistemas de control, automatización, electrónica e informática. Su principal aplicación y propósito es el análisis, diseño y automatización de procesos de manufactura de la mayor parte de las áreas industriales: petróleo y gas, generación de energía eléctrica, textil, alimentaria, automovilística, .

## Contenido del programa de estudios

- QUE ES LA INSTRUMENTACION
- CLASIFICACION DE LOS INSTRUMENTOS Y LAZOS DE CONTROL
- MEDIDORES DE VARIABLES FISICAS COMO PRESION NIVEL Y FLUJO
- SISTEMAS COMBINADOS DE CONTROL
- CALIBRACION DE PRESION FLUJO NIVEL Y TEMPERATURA

## Generalidades sobre la instrumentación y control

La medición y el control de procesos son fundamentales para generar, en definitiva, los mejores resultados posibles en lo que toca a la utilización de recursos, máquinas, performance, rentabilidad, protección medioambiental y seguridad, entre otros, en una unidad productiva.

Para hacer una comparación, un médico mide las principales características del cuerpo humano para atestar que todo va bien o, si hay alguna alteración, empezar a investigar las causas para que la “máquina” siga con salud y buen funcionamiento.

Si el cuerpo pertenece a un atleta de alto desempeño (como debe ser una industria en un mercado competitivo), eso es todavía más importante para que pueda mantener la performance, las ganancias y sin riesgos a la seguridad.

La instrumentación industrial es el grupo de equipamientos y dispositivos que sirven a los ingenieros o técnicos, justamente, para medir, convertir y registrar variables de un proceso (o “cuerpo industrial”) y, luego, transmitirlos, evaluarlos y controlarlos con tales fines.

Los aparatos de medición y control de procesos industriales suelen mensurar características físicas (tensión, presión & fuerza, temperatura, flujo y nivel, velocidad, peso, humedad y punto de rocío) o químicas (pH y conductividad eléctrica).

Además, hay productos complementares dedicados a la adquisición de datos y automatización para dejar los procesos de medición y control cada vez más rápidos y eficientes, a costes reducidos.

La instrumentación puede formar estructuras complejas para medir, controlar y monitorear todos los elementos de un sistema industrial con profundidad y gran exactitud, además de automatizar tales procesos y, a la vez, garantizar la repetibilidad de las medidas y resultados.



Registrador de datos de alta precisión  
HH506A y HH506RA

Sus aparatos son aplicados a máquinas como calentadores, reactores, bombas, hornos, prensas, refrigeradores, acondicionadores, compresores y una variedad amplia de máquinas o instalaciones a partir de la supervisión de un ingeniero de instrumentación. O sea, los aparatos de medición son las herramientas para cuantificar los hechos físicos o químicos en unidades de medida (amperes, volts, m/s, grados centígrados, m<sup>3</sup>, litros, newton o kilogramo-fuerza, pascal-segundo, etcétera) de forma apropiada para detectarlas, visualizarlas, registrarlas y, así, utilizar estas informaciones.

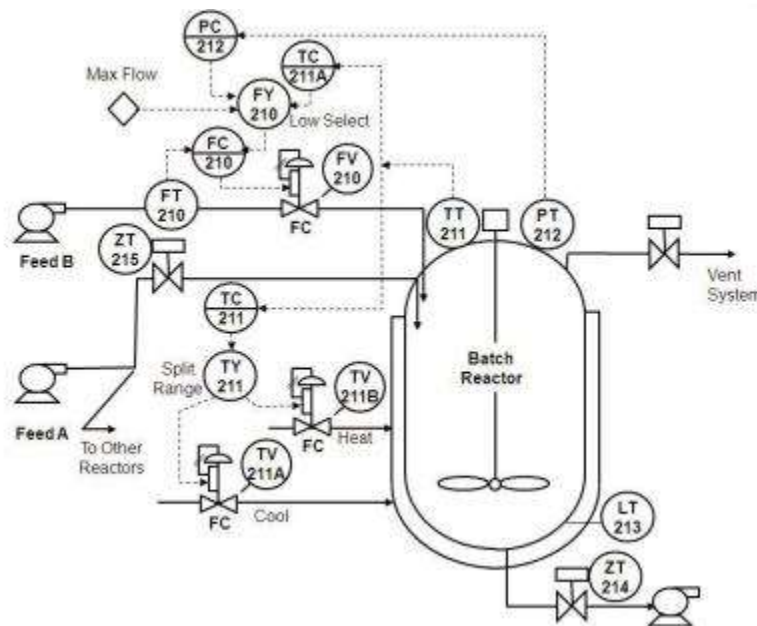
Las distintas mediciones siguen definiciones y especificaciones standard sea por el Sistema Internacional (SI) o del sistema inglés en lo que se refiere a rango, alcance, exactitud, precisión, reproducibilidad, resolución, linealidad, ruido, tiempo de respuesta, masa y peso, calibración, entre otras, para que tengan validez técnica

De eso viene la importancia de la calidad de los dispositivos así como de las pruebas periódicas de exactitud y la [calibración](#) para que los datos obtenidos en las mediciones puedan seguir fiables. Es decir, de acuerdo con los estándares (patrones) reconocidos por la ciencia. México tiene sus principales industrias en el sector automotriz, petroquímico, cemento y construcción, textil, bebidas, alimentos, minería y turismo en los cuales, por cierto, la instrumentación es largamente utilizada. Sin embargo, en los últimos años, el mundo de la instrumentación y del control de procesos ha entrado en una era de cambio total, en la cual los aparatos de medición, transmisión y automatización se hacen cada vez más rápidos, exactos y durables.

Así, la inteligencia industrial disfruta, además, de la transmisión inalámbrica en tiempo real y puede utilizar las informaciones comparadas con grandes bancos de datos y estándares internacionales para tomar las mejores decisiones en la búsqueda por los mejores resultados. Es más, los avances tecnológicos

de los dispositivos, equipamientos y sistemas de medición y control de procesos industriales exigen a los ejecutivos del sector productivo la actualización de sus ambientes de manufacturas.

### ¿Qué son lazos de control?



#### Control Loop.

El **lazo de control** consta de todos los elementos necesarios para actuar sobre los elementos finales de control.

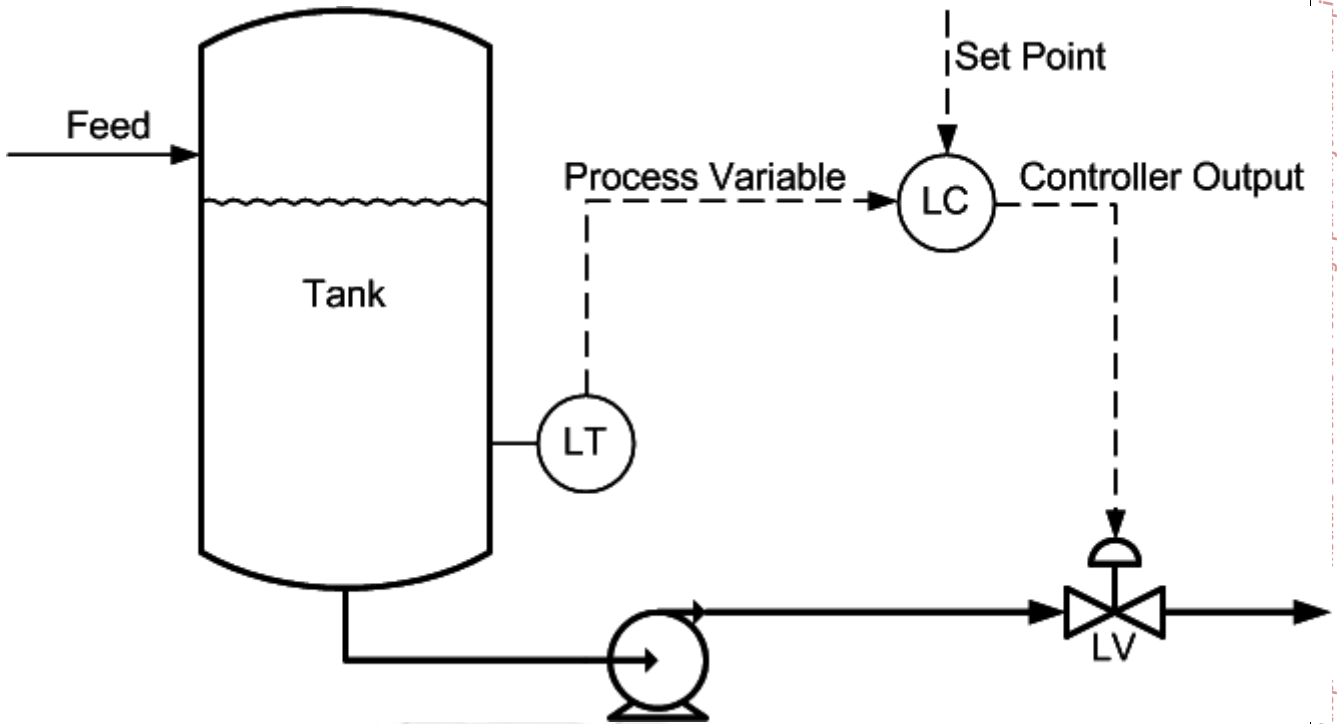
Existen diferentes tipos de **elementos finales de control**, siendo los más usuales las válvulas, motores, ventiladores, etc. Los elementos finales de control permiten mantener la variable controlada en el objetivo.

#### Principio de funcionamiento de un Lazo de Control.

Los **elementos de medición del proceso** envían una señal al controlador. Al mismo tiempo, el punto de ajuste ( **Set Point** ) fijado, se compara con la señal procedente del dispositivo de medición.

El **controlador** hace una comparación entre la señal del proceso y el valor fijado en el Set Point, si hay una diferencia entre estos, el controlador actúa sobre el elemento final de control con el fin de realizar un cambio en el proceso y alcanzar el valor deseado.

Este proceso continuará hasta que se mantenga el punto de fijado en el Set Point.



### Elementos del Lazo de Control.

**Dispositivo de medición:** Este dispositivo es el instrumento que mide la cantidad física. Puede ser la temperatura, el nivel, la velocidad de flujo, la presión, etc. Este dispositivo incorpora un transductor el cual convierte la señal física medida a una señal que el controlador puede recibir fácilmente.

**Controlador:** El controlador es el elemento en un ciclo de control de proceso que evalúa cualquier error de la variable medida e inicia una acción correctiva al cambiar la variable manipulada.

**Elemento final de control:** Un elemento final de control es aquel dispositivo que realiza una acción en una de las variables de entrada de un proceso de acuerdo con una señal recibida desde el controlador.

### Términos de un Lazo de Control.

**Variable del proceso:** Conocemos como el valor del proceso o el parámetro del proceso, a el valor medido actual de una parte particular de un proceso que se está supervisando o controlando. El nivel actual es la variable de proceso, mientras que el nivel deseado se conoce como el Set Point.

**Variable manipulada:** La variable manipulada es la variable controlada por un actuador para corregir los cambios en la variable medida.

**Error del controlador:** La diferencia en el valor entre una señal medida y un punto establecido.

**Set point:** Corresponde al valor de referencia para una variable controlada en un lazo de control de proceso.

## ¿CLASIFICACION DE LOS INSTRUMENTOS?

### EN FUNCION AL INSTRUMENTO

- A) Instrumentos Ciegos.
- B) Instrumentos Indicadores.
- C) Instrumentos Registradores.
- D) Elementos Primarios De Medición.
- E) Transmisores.
- F) Transductores.
- G) Convertidores
- H) Controladores.
- I) Elemento Final de Control.

### EN FUNCION A LA VARIABLE DEL PROCESO

- A) Instrumento de Caudal.
- B) Instrumento de Nivel.
- C) Instrumento de Presión.
- D) Instrumento de Temperatura.
- E) Instrumento de Densidad y Peso específico.
- F) Instrumento de Humedad.
- G) Instrumento de Viscosidad.
- H) Instrumento de Posición.
- I) Instrumento de Velocidad.
- J) Instrumento de pH.
- K) Instrumento de Frecuencia.

A) Instrumentos de campo

- Elemento primario
- Transmisor
- Elemento final de control

B) Instrumentos de panel o campo

- Convertidor
- Registrador
- Indicador
- Controlador

C) Instrumentos complementarios.

- \* Sumador
- \* Multiplicador
- \* Integrador

INSTRUMENTOS CIEGOS

Son aquellos que no tienen indicación visible de la variable, tales como presostatos, termostatos y toda clase de transmisores sin indicación.

PRESOSTATO



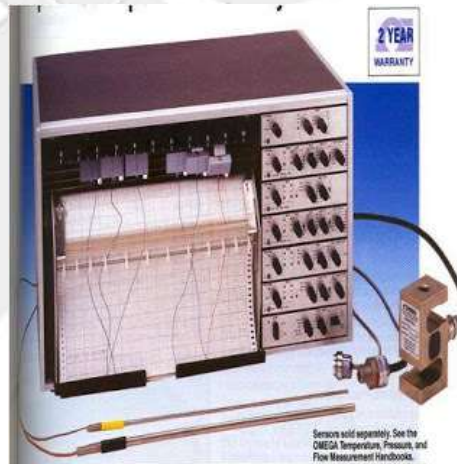
INSTRUMENTOS INDICADORES

Son aquellos que disponen de un índice y escala graduada en la que puede leerse el valor de las variables. También existen indicadores digitales.



INSTRUMENTOS REGISTRADORES

Son aquellos que muestran el comportamiento de la variable a través del tiempo. Registran con trazo continuo o a puntos la variable y pueden ser circulares, de gráfico (carta), o display.



### ELEMENTOS PRIMARIOS DE CONTROL

Son aquellos que están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al medio controlador una indicación de la variable controlada.

PT-100



### TRANSMISORES

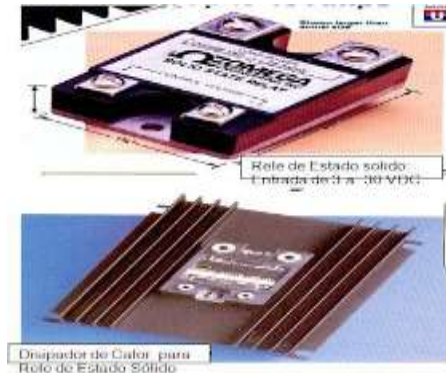
Captan la variable del proceso a través del E.P.M. y la transmiten en forma de señal neumática o eléctrica (3 a 15 PSI o 4 a 20mA), el E.P.M puede formar parte del transmisor.

### TRANSMISOR DE PRESIÓN



### TRANSDUCTOR

Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente de salida.



### CONVERTIDOR

Son aparatos que reciben una señal de entrada (3 a 15 Psi ó 4 a 20 mA) procedente de un instrumento y después de modificarlo envían la resultante en forma de señal de salida eléctrica o neumática.



## CONTROLADORES

Son dispositivos que comparan la variable medida o controlada (presión, temperatura, nivel), con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación y el modo de acción del controlador



## ELEMENTO FINAL DE CONTROL

Recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. En el control neumático el elemento final de control suele ser una V.A.C. o un servomotor, que efectúa su carrera completa de 3 a 15 PSI, en el control eléctrico la válvula o servomotor son accionados a través de un convertidor I/P (4 – 20 mA a 3 – 15 PSI).



## CONTROL COMBINADO

### Definición

Se define como la configuración donde la salida de un controlador de retroalimentación es el punto de ajuste para otro controlador de retroalimentación, por lo menos. El control de cascada involucra sistemas de control de retroalimentación o circuitos que estén ordenados uno dentro del otro.

### Cuando utilizarlo

- Cuando el control realimentado simple no provee un desempeño satisfactorio a lazo cerrado.
- Cuando se tiene una variable manipulable y más de una variable medida.
- Cuando las perturbaciones afectan directamente a la variable de proceso manipulada.

### Estructura

El control en cascada tiene dos lazos un lazo primario con un controlador primario también llamado "maestro" y un lazo secundario con un controlador secundario también denominado "esclavo", siendo la salida del primario el punto de consigna del secundario. La salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso.

### Funciones

- Reduce los efectos de una perturbación en la variable secundaria sobre la variable primaria.
- Reduce los efectos de los retardos de tiempo.
- El controlador primario recibe ayuda del controlador secundario para lograr una gran reducción en la variación de la variable primaria.

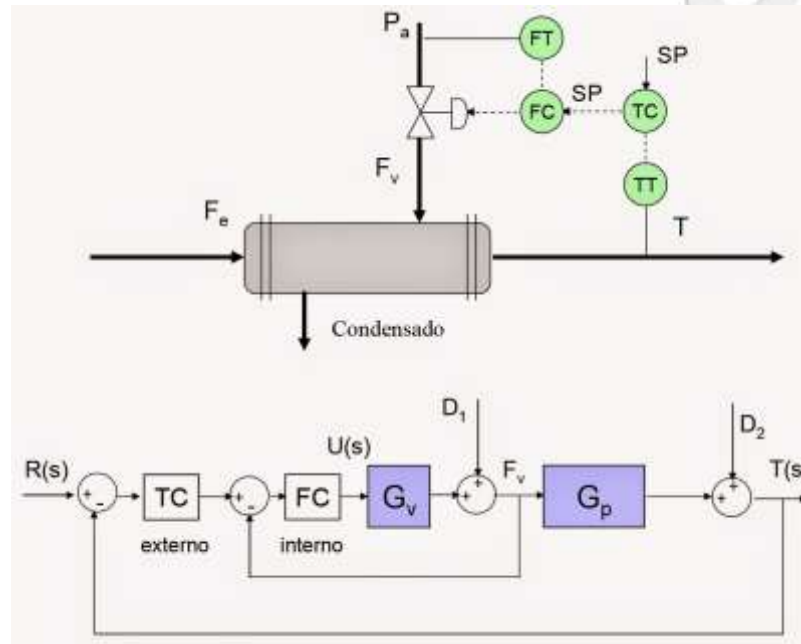
### Requisitos

- El lazo interno (secundario) debe ser más rápido que el lazo externo (primario).
- La frecuencia de oscilación en el lazo secundario debe ser al menos tres veces la frecuencia en el lazo primario, si estos están bien sintonizados.

Ejemplo

Control de temperatura: intercambio de calor

El objetivo es calentar una corriente de proceso,  $F_e$ , manipulando el caudal de combustible,  $F_v$ , que entra al intercambiador.



El regulador externo (TC-temperatura) fija la consigna del regulador interno (FC-caudal) cuyo objetivo es corregir el efecto sobre el caudal de combustible ( $F_v$ ) del cambio en  $P_a$  antes de que afecte de forma significativa a la temperatura  $T$ .

Autoevaluación 1

- 1) Qué es la instrumentación y para qué sirve
- 2) Cómo se clasifican los instrumentos
- 3) Qué son instrumentos ciegos y registradores
- 4) Cómo funciona una valvula de control

## Medidores de nivel

### Introducción

En las actividades industriales, los insumos y las cargas de trabajo no son infinitas, constantemente se deben estar proveyendo materiales para mantener las operaciones. Ahora, en qué momentos se deben hacer recargas de materiales u otros insumos. Deben existir mecanismos para determinar con precisión los estatus generales de los elementos necesarios para el funcionamiento industrial, más allá de la planificación económica y los cronogramas de actividades que prevén los momentos en los que se requerirán implementos. Frecuentemente ocurren situaciones inesperadas quedo desvían un poco las planificaciones. Entonces, los procesos industriales deben tener algún tipo de dispositivo que controle los niveles de insumos que se disponen y que se van consumiendo. Estos son los medidores de niveles.

En este trabajo investigativo, se estudiarán en detalle, los medidores de nivel más usados en líquido y sólidos. Se estudiarán desde los que usan principios mecánicos hasta los electromagnéticos. Señalando su importancia en el momento de establecer el balance entre los productos consumidos y los finales, lo cual da una visión del rendimiento de los procesos.

### Medidores de nivel de líquidos

Los medidores de líquidos trabajan midiendo, bien directamente la altura del líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido por un flotador por el propio líquido contenido en el tanque, o bien aprovechando las características eléctrica del líquido.

Los primeros, instrumentos de medida directa se dividen en: sonda, cinta y plomada, nivel de cristal e instrumentos de flotador. Estos usan el principio mecánico de transmisión de movimiento entrando en contacto directo con el líquido mediante algún brazo de extensión, además operan a presión atmosférica generalmente y se puede decir que son los más simples y menos costosos. Por ello, son de gran utilidad y frecuentemente son los candidatos escogidos en la industria siempre y cuando las características del líquido y del proceso lo permitan.

Los aparatos que miden el nivel aprovechando la presión hidrostática se dividen en:

Medidor manométrico.

Medidor de membrana

Medidor tipo burbujeo

Medidor de presión diferencial de diafragma.

Estos aparatos son un poco más complejos en tanto usan el principio de que la presión en la base de un tanque contenedor de un líquido es directamente proporcional a la altura y densidad de la columna de fluido.

El empuje producido por el propio líquido lo aprovecha el medidor de desplazamiento a barra de torsión. Que consiste en un flotador parcialmente sumergido en el líquido y conectado mediante un tubo de torsión unido rígidamente al tanque.

Los instrumentos que utilizan las características eléctricas del líquido se clasifican en:

Medidor resistivo

Medidor conductivo

Medidor capacitivo

Medidor Ultrasónico

Medidor de radiación

Medidor de láser.

Todos los fluidos tienen propiedades eléctricas que los hacen distintivos, mediante dispositivos o electrodos que permiten el paso de cierta forma de onda electromagnética o flujo de partículas que al ser recogidas muestran alteraciones que permiten calcular el nivel del líquido.

Cada medidor tiene sus propios rangos de precisión y de operación, así como ventajas y desventajas, los cuales se resumen en la siguiente tabla:

### **Medidores de sólidos**

En los procesos continuos la industria ha ido exigiendo el desarrollo de instrumentos capaces de medir el nivel de sólidos en puntos fijos o de forma continua, en particular en los tanques o silos destinados a contener materias primas o productos finales.

Los detectores de nivel de punto fijo proporcionan una medida en uno o varios puntos fijos determinados. Los sistemas más empleados son el diafragma, el cono suspendido, el medidor conductivo, las paletas rotativas y los ultrasonidos.

Los medidores de nivel continuo proporcionan una medida continua del nivel desde el punto más bajo al nivel más alto. Entre los instrumentos empleados se encuentran el de peso móvil, el de báscula, el capacitivo, el de presión diferencial, el de ultrasonidos y el de radiación.





En el sistema de radar por antenas los pulsos de microondas extremadamente cortos son enviados por el sistema de antenas sobre el producto a medir, siendo reflejados por la superficie del producto y captados nuevamente por la antena. Se propagan a la velocidad de la luz y el tiempo desde la emisión hasta la recepción de las señales es proporcional al nivel en el depósito. Un proceso especial de prolongación del tiempo posibilita la medición precisa y segura de los tiempos extremadamente cortos.



En el sistema de radar guiado Los pulsos de microondas de nanosegundos de baja potencia son guiados hacia abajo en una sonda sumergida en el fluido del proceso. Cuando un pulso de radar alcanza el fluido con una constante dieléctrica diferente, parte de la energía es reflejada de regreso al transmisor. La diferencia de tiempo entre el transmisor (referencia) y el pulso reflejado es convertida en una distancia a partir de la cual se calcula el nivel total o el nivel de interfase.



- Medición en continuo por ultrasonidos:

El sistema ultrasónico se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco depende del nivel del tanque.

- Medición en continuo por bypass:

En el medidor de nivel por bypass el tubo tipo bypass se asocia a la pared lateral del recipiente, según la norma de tubos de comunicación, el nivel en el tubo bypass se iguala al nivel existente en el depósito, un flotador con los imanes incrustados en el tubo tipo bypass sigue el nivel del líquido y lo transfiere de una manera no constante a un indicador acondicionado fuera del tubo a un dispositivo de



monitoreo.

- Medición en continuo o puntual por boya flotador:

El flotador se debe construir de tal forma que flote dentro del líquido a medir, esto significa que la densidad del flotador debe ser menor a la del líquido que lo sostiene.

- Medición puntual por el método conductivo:

El medidor de nivel conductivo consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico, dispositivo que abre y cierra un circuito, que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor para excitar el circuito electrónico, y de este modo el aparato puede discriminar la separación entre el líquido y su vapor.



- Medición puntual por vibración: se basa en el principio del diapasón en aire a frecuencia de resonancia. Un cristal piezoeléctrico se utiliza para la excitación de oscilaciones y para monitorear la frecuencia de oscilación real. Cuando el diapasón se sumerge en líquido, la frecuencia cambia, este cambio se detecta electrónicamente y se cambia la salida

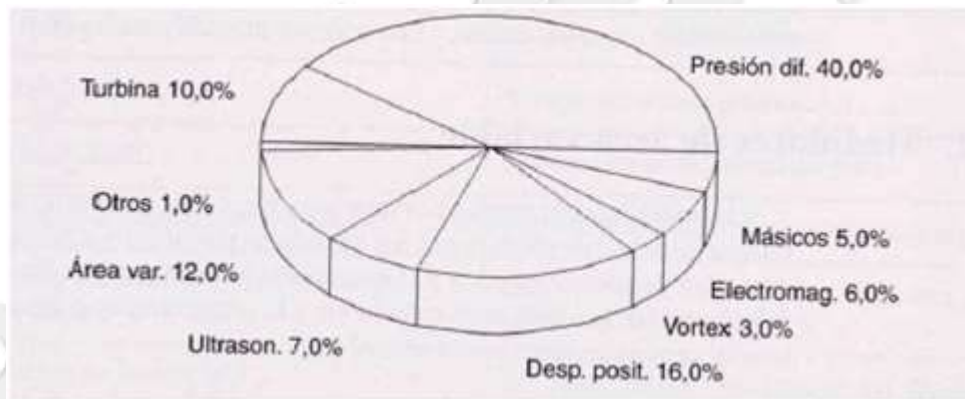
## Medidores flujo o caudal

### Introducción

Las medidas de caudal tienen una gran importancia dentro de los procesos ya que se utilizan habitualmente para control del proceso y para medidas de contabilidad (facturación, importación/exportación de productos, etc.), por lo que la selección de la mejor tecnología tiene una gran implicación.

Así por ejemplo, los caudalímetros se utilizan para contabilizar productos dentro de la propia planta, con el exterior, etc. En cuanto al control de procesos, la medición de caudal es imprescindible para poder realizar control automático, así como para optimizar rendimientos en las unidades de producción aplicando balances de materia.

A continuación se incluye una gráfica representativa de las diferentes tecnologías y su porcentaje de utilización.



Hay muchas formas de diferenciar los diferentes tipos de mediciones de caudal, siendo una de ellas la siguiente:

- • **Medidores Deprimógenos**
- • **Medidores de Área Variable.**
- • **Medidores de Desplazamiento Positivo.**
- • **Medidores Másicos.**
- • **Medidores magnéticos**
- • **Medidores ultrasónico y vortex**

### Medidores Deprimógenos

El método más ampliamente utilizado para la medida de caudal en las plantas de proceso es el utilizado por presión diferencial. Para esto se utilizan elementos primarios del tipo:

- Tubos Venturi.
- Toberas.
- Tubos Pitot.
- Placas de orificio.
- Tubos Annubar.

Dentro de los anteriores, el sistema más barato y utilizado son las placas de orificio.

Los elementos Deprimógenos están basados en crear una restricción en la tubería al paso de un fluido, lo que hace aumentar la velocidad disminuyendo al mismo tiempo la presión, permaneciendo la energía total (cinética, potencial e interna) constante.

Hay una serie de conceptos hidráulicos que influyen notablemente en los cálculos de los elementos primarios de caudal, como son el  $n^{\circ}$  de Reynolds, Relación Beta (relación de diámetros), Coeficiente de descarga, recuperación de presión, factor de expansión, etc.

En definitiva, el cálculo del orificio es un cálculo hidráulico basado en el teorema de Bernoulli, que dice como resumen, que el caudal es proporcional a la raíz cuadrada de la presión diferencial. Como se puede entender perfectamente, estos elementos requieren de un transmisor de presión diferencial para medir la presión antes y después del elemento, y así poder sacar el caudal, ya que una presión diferencial es función del caudal.

Las principales ventajas de estos elementos se pueden enumerar en:

- Sencillez de construcción, no hay partes móviles.
- Tecnología sencilla.
- Baratos para grandes dimensiones de tuberías.
- Válidos para casi todas las aplicaciones.
- Las principales desventajas de estos elementos se pueden enumerar en:
- No válidos para condiciones de proceso (presión, temperatura, densidad, etc.) cambiantes.
- Producen caídas de presión no recuperables.
- Señal de salida no es lineal (hay que extraer su raíz cuadrada).
- Se necesita un flujo laminar, es decir, tramos rectos de tuberías antes y después del elemento.

### Medidores de Área Variable

Los medidores de caudal por área variable utilizan el mismo principio de medida que los medidores por presión diferencial, es decir, la relación entre la energía cinética y la energía debida a la

presión.

En estos instrumentos el área de la restricción cambia al mismo tiempo que el caudal, permaneciendo constante la presión diferencial. El instrumento de área variable por excelencia es el rotámetro, el cuál consta básicamente de un tubo vertical troncocónico, de cristal o con armadura metálica, en cuyo interior se encuentra un flotador. El fluido entra por la parte inferior del tubo, arrastrando el flotador en dirección ascendente. Al ascender el flotador va dejando libre un área en forma anular hasta que la fuerza producida por la presión diferencial en las caras superior e inferior del flotador se equilibra. Es por lo tanto un sistema basado en equilibrio de fuerzas. La posición de equilibrio alcanzada por el flotador dentro del tubo es una indicación directa del caudal de paso, marcado sobre el propio tubo o armadura. Esta técnica de medición se utiliza para bajos caudales y fluidos limpios.

Las precisiones para este tipo de instrumentos vienen a ser del +/- 2%, por lo que no son aconsejables cuando se requieren altas precisiones, tiene alguna limitación en cuanto a instalación (montaje vertical), y habitualmente son utilizados para medidas locales. Por otra parte, son instrumentos baratos, simples, aptos para caudales pequeños y la lectura de caudal es lineal.



### Medidores de Desplazamiento Positivo

Los medidores de desplazamiento positivo operan atrapando un volumen unitario y conocido de líquido, desplazándolo desde la entrada hasta la salida, y contando el número de volúmenes desplazados en un tiempo determinado. También se suelen conocer con el nombre de contadores por que cuentan el volumen de líquido independientemente del tiempo transcurrido.

En cada medidor se pueden destacar tres componentes:

- – Cámara.
- – Desplazador.
- – Mecanismo que cuenta en número de veces que el desplazador se mueve.

Un punto importante a tener en cuenta en este tipo de instrumentos, es el conseguir una buena estanqueidad de las partes móviles, evitando un par de rozamiento inaceptable y que la cantidad de

líquido de escape a través del medidor sea moderada. Por esto es necesario calibrar el medidor para varios caudales, dentro del margen de utilización y con un fluido de viscosidad conocida.

Con este tipo de instrumentos la medida es directa, sin tener que recurrir a ningún tipo de cálculo. Existen varios tipos de medidores del tipo desplazamiento positivo, siendo los más utilizados los de ruedas ovales, helicoidales, tipo pistón, paletas deslizantes y tipo turbina.

Este último es el sistema más utilizado en la industria, y consta de un carrete de tubería en el centro del cual hay un rotor de paletas múltiples, montado sobre cojinetes para que pueda girar con facilidad, y soportado aguas arriba y aguas abajo por un dispositivo de centrado. También suelen incorporar un enderezador de vena fluida. La energía cinética del fluido circulando hace girar el rotor con una velocidad angular que es proporcional a la velocidad media axial del fluido, y por lo tanto al caudal volumétrico. La salida, mediante impulsos eléctricos, se produce cuando se detecta el paso de cada paleta alrededor de uno o más sensores situados en el campo del medidor.

Las principales ventajas de estos tipos de instrumentos son:

- Buena exactitud y amplio rango de medida.
- Buena repetitibilidad.
- Buen comportamiento para fluidos muy viscosos, y para aquellos fluidos con condiciones cambiantes.
- Medida directa de caudal volumétrico.
- Los principales inconvenientes son:
  - Alto costo para grandes tamaños (>6").
  - Alta pérdida de carga (limitación de caudal).
  - Mal funcionamiento para fluidos sucios (posibles bloqueos de las partes móviles).
- Pueden dañarse por sobre velocidad

Al presentar resistencia a la fricción, para bajos caudales su funcionamiento no es correcto, siendo su margen idóneo de funcionamiento entre el 20 y el 65%.



### Medidores Másicos

Los medidores de caudal másicos están diseñados para medir directamente el caudal del fluido en unidades de masa, como por ejemplo Kg/h, en lugar de medir el caudal en volumen, como m<sup>3</sup>/h.

Se suelen utilizar dos tecnologías:

- Instrumentos volumétricos compensados por Presión y Temperatura.
- Medidores másicos directos.

El primer tipo más sencillo puede ser una placa de orificio, con transmisor de presión diferencial compensado por presión y temperatura incorporados en el mismo conjunto.

Del segundo tipo, el más utilizado es el medidor por efecto coriolis. Según este efecto, un objeto que se mueve en un sistema de coordenadas que rota con una velocidad angular experimenta una fuerza coriolis proporcional a la masa y velocidad del fluido, así como a la velocidad del sistema. Los medidores del tipo coriolis pueden ser de tubo en “U” o tubo recto.

Las principales ventajas de estos tipos de instrumentos son:

- Muy buena exactitud.
- Amplia rangeabilidad.
- Lectura directa en caudal de masa.
- Reducidos costes de mantenimiento.
- Salida Lineal.

Los principales inconvenientes son:

- Alto costo.
- Alta pérdida de carga (respecto a otras tecnologías).
- Límite de utilización en altas temperaturas.
- Da problemas en tuberías de gran tamaño.

Otro tipo de medidor de caudal másico es el “másico térmico”, que están basados en los principios de elevación de la temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente y en la pérdida de calor experimentada por un cuerpo caliente inmerso en el fluido. El más utilizado es el primero, se utiliza para medir bajos caudales de gases y la precisión típica es del +/- 1%.



### Medidores magnéticos

Como su nombre indica, este tipo de instrumento se basa en las leyes de los campos magnéticos. A grandes rasgos, el instrumento lleva unos electrodos, siendo la f.e.m... Generada a través de los electrodos directamente proporcional a la velocidad media del fluido. El material de los electrodos tiene que ser compatible con el fluido.

Las principales ventajas de estos tipos de instrumentos son:

- • Buen comportamiento con fluidos sucios, viscosos, pasta de papel, etc.
- • Poca pérdida de carga.
- • Buen comportamiento con tuberías grandes.
- • Buen comportamiento ante cambios de densidad, viscosidad, etc.
- • Suelen ser bidireccionales.
- • Salida Lineal.

Los principales inconvenientes son:

- • El fluido debe tener una conductividad eléctrica razonable (no válido para gases y líquidos orgánicos).
- • Puede llegar a calentarse el instrumento por el efecto de las bobinas.
- • Se pueden ver afectados por el ruido.
- • La precisión típica es del +/- 0,5%.



### Medidores Ultrasónicos

Como su nombre indica, este tipo de instrumento mide el caudal por diferencia de velocidades del sonido al propagarse este en el sentido del fluido y en el sentido contrario. Existen dos tipos: por desviación del haz de sonido emitido por un transmisor perpendicularmente a la tubería y por efecto Doppler. Al igual que los magnéticos, no presentan obstrucciones al flujo, no tienen pérdida de carga y no son intrusivos. Son adecuados para casi todos los líquidos y la precisión puede llegar al +/- 0,5%.



### Medidores Vortex

Utilizados principalmente para medir gases, aunque a veces también se utilizan para líquidos y vapores. Tiene una baja pérdida de carga, larga estabilidad y amplios rangos de medida.



## Autoevaluación 2

- 1) Qué es nivel y es que consiste su medición
- 2) Cuáles son los medidores de nivel directos
- 3) Cómo se clasifican los medidores de nivel y cuál es su funcionamiento básico.
- 4) Describa detalladamente 3 medidores de flujo.

## Medidores de presión

### Introducción

La medición y el control de presión son las variables de proceso más usadas en los más distintos sectores de la industria de control de procesos. Además, a través de la presión se puede inferir fácilmente una serie de otras variables, tales como, nivel, volumen, flujo y densidad. En este artículo comentaremos las principales características de las tecnologías más importantes utilizadas en sensores de presión, y también algunos detalles sobre instalaciones, mercado y tendencias de los transmisores de presión.

### La Medición de Presión y un Poco de Historia

La medición de presión atrae el interés de la ciencia hace mucho tiempo. En fines del siglo XVI, el italiano Galileo Galilei (1564-1642) obtuvo patente por un sistema de bomba de agua utilizada en la irrigación. En 1592, usando solamente un tubo de ensayo y una cuenca con agua, Galileo montó el primer termómetro. El volcó un tubo con la boca hacia abajo, semisumergido en el líquido. Así, cuando el aire en el interior del tubo enfriaba, el volumen aumentaba y el agua era empujada hacia afuera. El nivel del agua, por lo tanto, medía la temperatura del aire. El núcleo de su bomba era un sistema de succión que él descubrió tener la capacidad de elevar el agua en el máximo 10 metros. Él no descubrió la causa de este límite, lo que llevó a otros científicos a estudiar el fenómeno.

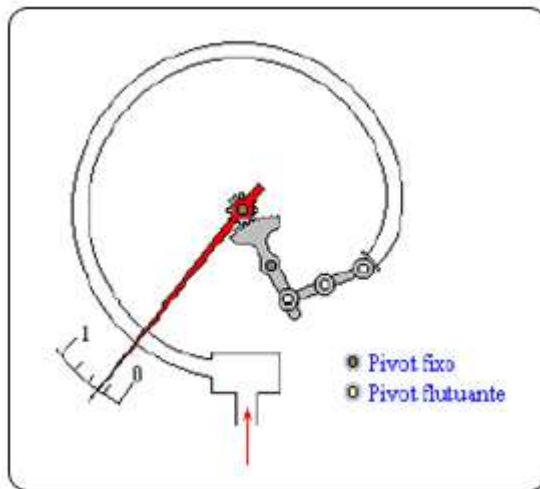
En 1643, el físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647) desarrolló el barómetro. Este aparato calculaba la presión atmosférica, o sea, la fuerza del aire sobre la superficie de la tierra. Él hizo una experiencia llenando un tubo de 1 metro con mercurio, sellado en uno de las extremidades y sumergido en una tina con mercurio en la otra. La columna de mercurio invariablemente bajaba hasta alrededor de 760 mm en el tubo. Sin saber la razón del fenómeno, él lo atribuyó a una fuerza existente en la superficie terrestre. Torricelli concluyó también que el espacio dejado por el mercurio en el inicio de la experiencia

no contenía nada y lo llamó de “vacuum” (vacío).

Cinco años más tarde, el francés Blaise Pascal usó el barómetro para mostrar que en el alto de las montañas la presión de aire era más pequeña.

En 1650, el físico alemán Otto Von Guericke creó la primera bomba de aire eficiente, con la cual Robert Boyle realizó experimentos sobre compresión y descompresión y después de 200 años, el físico y químico francés, Joseph Louis Gay-Lussac, comprobó que la presión de un aire confinado a un volumen constante es proporcional a su temperatura.

En 1849, Eugène Bourdon recibió la patente por el Tubo de Bourdon, utilizado hasta hoy en mediciones de presiones relativas. En 1893, E.H. Amagat utilizó el pistón de peso muerto en mediciones de presión.



**Tubo de Bourdon**



Galileo



Torricelli



Pascal



Von Guericke



Boyle



Gay-Lussac

**Los hombres que hicieron la historia de la medición de presión.**

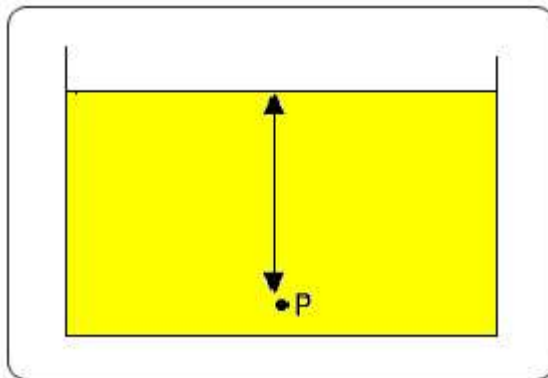
En las últimas décadas, con el advenimiento de la tecnología digital, una enorme variedad de equipos se esparció por el mercado en diversas aplicaciones. La caracterización de presión solo tuvo su real valor reconocido a partir del momento en que logramos traducirla en valores mensurables.

Todo sistema de medición de presión es constituido por un elemento primario, lo cual estará en contacto directo o indirecto con el proceso donde ocurren los cambios de presión y por un elemento secundario (el transmisor de presión) que tendrá la tarea de traducir este cambio en valores mensurables para uso en indicación, monitoreo y control.

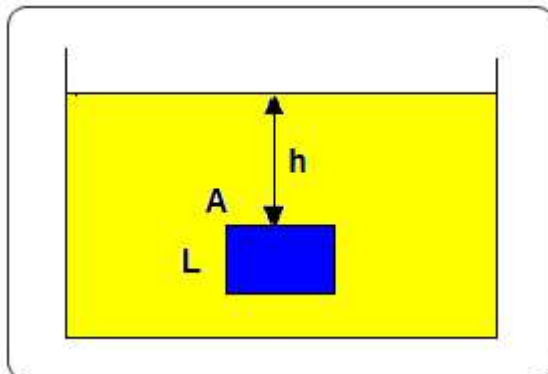
### Principios Básicos de la Medición de Presión

Veamos el concepto de Presión Estática., donde hay un recipiente con un líquido que ejerce una presión en determinado punto proporcional al peso del líquido y a distancia desde el punto a la superficie. El principio de Arquímedes dice: un cuerpo sumergido en un líquido queda sujeto a una fuerza, conocida por empuje, igual al peso del líquido desplazado. Por ejemplo, con base en este principio, se puede determinar el nivel, con el uso de un flotador sometido al empuje de un líquido, transmitiendo este movimiento a un indicador, a través de un tubo de torque. El medidor debe tener un dispositivo de ajuste de densidad del líquido, cuyo nivel está siendo medido, pues el empuje varía según la densidad.

La presión estática  $P$  se define como la razón entre la fuerza  $F$ , aplicada perpendicularmente a una superficie de área  $A$ :  $P = F/A$  [N/ ,2].



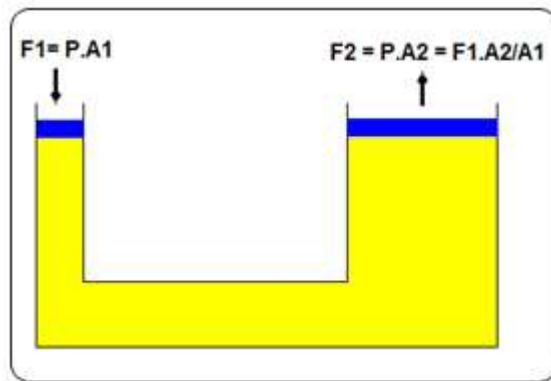
**Presión en un punto  $P$  sumergido**



### Presión en un cuerpo sumergido

Dado un paralelepípedo, donde se tiene el área del lado A y largura L, la presión en su cara superior y su cara inferior es dada respectivamente por  $P_D = h\rho g$  e  $P_U = (h + L)\rho g$ . La presión resultante sobre el mismo es igual a  $P_U - P_D = L\rho g$ . La presión que ejerce una fuerza perpendicular a la superficie del fluido se llama presión estática. El principio de Pascal dice que cualquier aumento de presión en el líquido se transmitirá igualmente a todos los puntos del líquido. Se usa ese principio en los sistemas hidráulicos (por ejemplo, los frenos de los autos) y se ilustra por la figura 5. En otras palabras: las fuerzas aplicadas tienen intensidad proporcional a las áreas respectivas.

Téngase aún en cuenta la Ley de Stevin (1548 - 1620): en un fluido homogéneo e incompresible equilibrado bajo la acción de la gravedad, la presión crece linealmente con la profundidad; la diferencia de presión entre dos puntos es igual al producto del peso específico del fluido por la diferencia de nivel entre los puntos considerados.



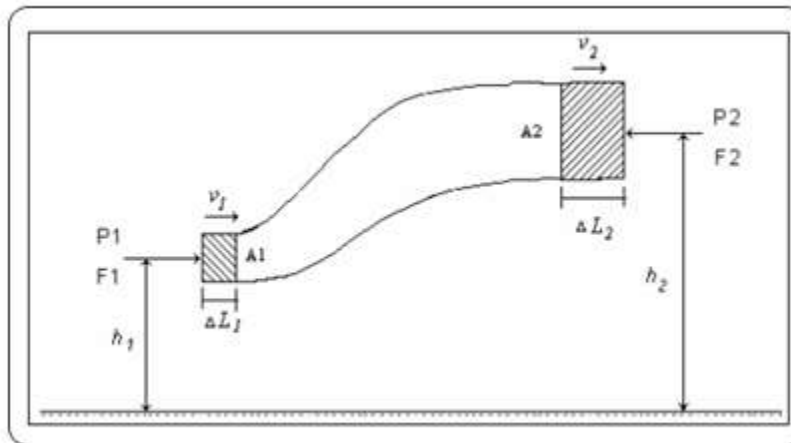
**La presión es perpendicular a la superficie y las fuerzas aplicadas tienen intensidad proporcional a las respectivas áreas.**

Veamos ahora la presión ejercida por fluidos en movimiento en la sección transversal de un tubo. donde:

$F_1$  = fuerza aplicada a la superficie  $A_1$   
 $P_1$  = razón entre  $F_1$  y  $A_1$ ;  
 $\Delta L_1$  = distancia desplazada por el fluido;  
 $v_1$  = velocidad de desplazamiento;  
 $h_1$  = altura relativa a la referencia gravitacional

y

$F_2$  = fuerza aplicada a la superficie  $A_2$   
 $P_2$  = razón entre  $F_2$  y  $A_2$ ;  
 $\Delta L_2$  = distancia desplazada por el fluido;  
 $V_2$  = velocidad de desplazamiento;  
 $h_2$  = altura relativa a la referencia gravitacional



**Ecuación de Bernoulli – Presión ejercida por los fluidos en movimiento en la sección transversal de un tubo.**

Suponiéndose un fluido ideal, sin viscosidad, se sabe que el se desplaza sin atritos y por lo tanto sin pérdida de energía. El trabajo resultante de las fuerzas que actúan en un sistema es igual a la variación de la energía cinética, teorema trabajo-energía. Con esto, tenemos:

$$P_1 + (1/2) \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + (1/2) \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

Esta es la ecuación de Bernoulli que comprueba que la suma de las presiones a lo largo de un tubo es siempre constante para un sistema ideal. Lo interesante es que aquí se pueden reconocer las siguientes presiones:

- $P_1$  = Presión Aplicada
- $(1/2) \rho \cdot v_1^2$  = Presión Dinámica
- $\rho \cdot g \cdot h_1$  = Presión Estática

Reorganizando esa relación llegamos a la ecuación:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Esa relación es muy útil para el cálculo de la velocidad del fluido, dadas la presión de impacto y la presión estática. A partir de esa relación, se puede calcular, por ejemplo, el flujo del fluido:

$$Q_{Real} = A_1 \cdot C \cdot B^2 \cdot E \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (P_1 - P_2)}{\gamma}}$$

Donde C = flujo real/flujo teórico

Los valores de C son resultados experimentales y para cada tipo de elemento deprimógeno y sistema de toma de impulso, C varía según el diámetro (D) de la pipería, del número de Reynolds (Rd) y

de la relación de diámetros referentes a la sección A1 y A2 ( $\beta = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$ )

**C = f (D,Rd,β)**

**Unidades de Presión en el Sistema Internacional (SI)**

El Pascal [Pa] es la unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades (SI).

Un Pa es la presión generada por la fuerza de 1 Newton actuando sobre una superficie de 1 metro cuadrado a Pa = N/m2.

Principales unidades y la conversión de las mismas.

	nH2O oC	atm	bar	kPa	gf/cm2	nmH2O oC	nmHg oC	inHg oF	psi
<b>in</b>									
<b>H2O @20oC</b>	1	,0025	,00249	,24864	,00254	25,4000	,86497	,07342	,03606
<b>Atm</b>	07,513	1	,01325	01,325	,03323	10350,8	59,999	9,9213	4,6959
<b>Bar</b>	02,185	,98692	1	00,000	,01972	10215,5	50,062	9,5300	4,5038
<b>kPa</b>	,02185	,00987	,01000	1	,01020	102,155	,50062	,29530	,14504
<b>kgf/cm2</b>	94,407	,96784	,98066	8,0662	1	10017,9	35,558	8,9590	4,2233
<b>m</b>									
<b>mH2O @20oC</b>	,03937	,00010	,00010	,00979	,00010	1	,07342	,00289	,00142
<b>m</b>									
<b>mHg</b>	,53620	,00132	,00133	,13332	,00136	13,6195	1	,03937	,01934

@0oC

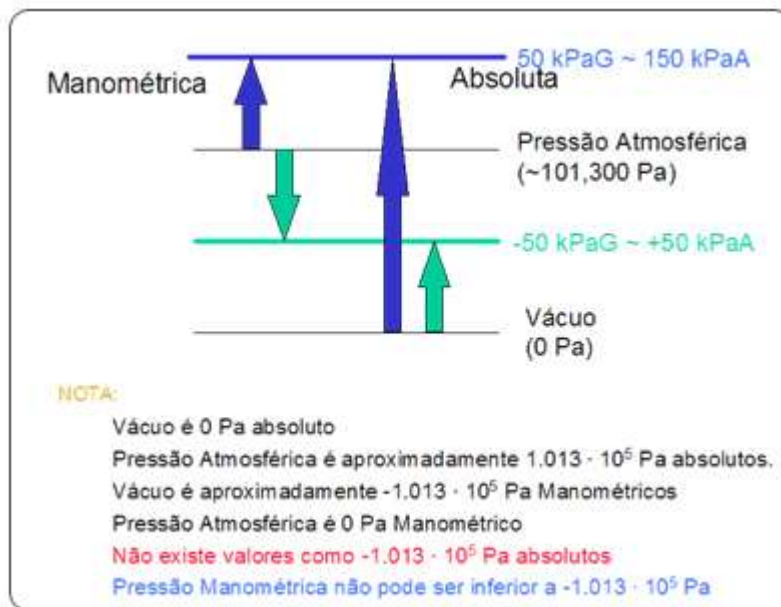
in

Hg @ 3,6195 ,03342 ,03386 ,38638 ,03453 345,935 5,4000 1 ,49115  
32oF

i <sup>ps</sup> 7,7296 ,06805 ,06895 ,89475 ,07031 704,333 1,7149 ,03602 1

### Tipos más usuales de medición de presión

En función de la referencia se puede clasificar la medición de presión como: manométrica, absoluta y diferencial o relativa. Tomemos la figura 7 como referencia:



### Referencias de Presión y tipos más usuales.

- **Presión absoluta:** se mide con relación al vacío perfecto, o sea, es la diferencia de la presión en un cierto punto de medición por la presión del vacío (cero absoluto). Normalmente cuando se indica esta grandezza se usa la notación ABS. Ex.: La presión absoluta que la atmósfera ejerce a nivel del mar es de 760mmHg.
- **Presión diferencial:** es la diferencia de presión medida entre dos puntos. Cuando se toma cualquier punto distinto del vacío o atmósfera como referencia se dice medir la presión diferencial. Por ejemplo, la presión diferencial ubicada en una placa de orificio.
- **Presión manométrica (gauge):** es medida en relación a la presión del ambiente en relación a la atmósfera. Osea, es la diferencia entre la presión absoluta medida en un punto

cualquier y la presión atmosférica. Es siempre importante anotar que la medición es relativa. Ejemplo: 10Kgf/cm<sup>2</sup> Presión Relativa.

Note que la presión manométrica es dada por la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica.

### Sensores utilizados en la medición de presión

Por lo general los sensores se clasifican según la técnica utilizada en la conversión mecánica de la presión en una señal electrónica proporcional. Todas las tecnologías tienen un solo objetivo, que es transformar la presión aplicada en un sensor en señal electrónica proporcional a la misma:

- Capacitancia Variable (Capacitivos)
- Piezo-resistivo (Strain Gauge)
- Potenciométrico
- Piezo-eléctrico
- Reluctancia Variable
- Resonante
- Óptico
- Otros

#### 1) Piezo-resistivo o Strain Gage

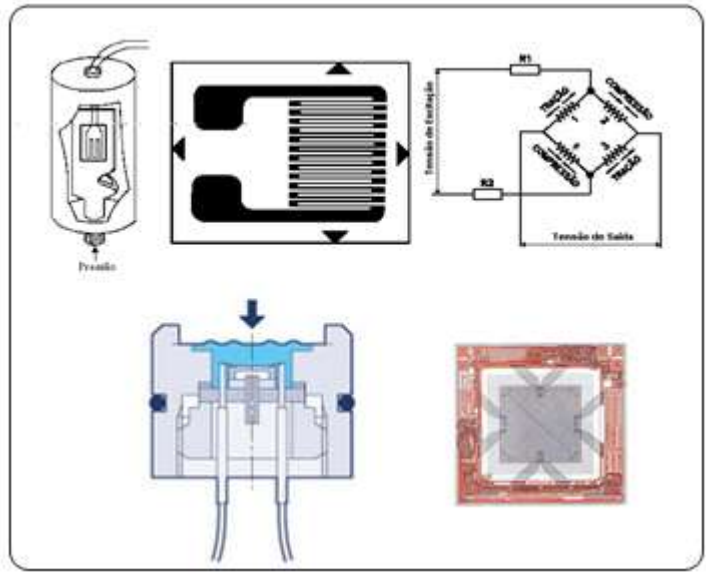
La piezo-resistividad se refiere al cambio de la resistencia eléctrica con la deformidad/contracción como resultado de la presión aplicada. En su gran mayoría son formados por elementos cristalinos (strain gage) interconectados en puente (wheatstone) con otros resistores que suministran el ajuste de cero, la sensibilidad y la compensación de temperatura. El material de construcción varía según el fabricante y actualmente son comunes los sensores de estado sólido.

Desventajas: banda limitante de temperatura operativa, aplicable en bandas de presión baja por generaren una señal muy baja de excitación, muy inestable.

Actualmente existe el llamado "Film Transducer", lo cual es construido con la deposición de vapor o la inyección de elementos strain gage directamente en un diafragma, lo que minimiza la inestabilidad debida al uso de adhesivos en las ligas de los modelos "Bonded Wire". La gran ventaja es que produce una señal electrónica de nivel más alto, pero que en altas temperaturas son totalmente vulnerables, pues la temperatura afecta el material adhesivo utilizado al pegar el silicio al diafragma.

Diversas técnicas basadas en la fabricación de sensores de silicio piezo-resistivo (*silicon substrate*) vienen surgiendo, pero sus señales son susceptibles a degradación debido a la temperatura y exigen circuitos complicados para compensación, minimización del error y sensibilidad del cero. Son totalmente inviablés en aplicaciones sujetas a altas temperaturas por largos períodos, pues la difusión degrada los

substratos en temperaturas muy altas.



### Sensor Piezo-Resistivo

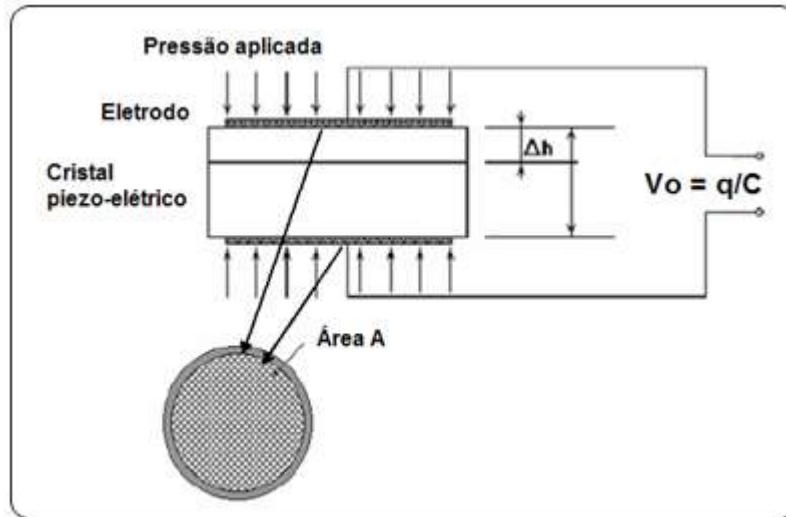
## 2) Piezo-eléctrico

El material piezo-eléctrico es un cristal que produce una tensión diferencial proporcional a la presión aplicada a él en sus caras: cuarzo, sal de Rochelle, titanio de bario, turmalina etc. Este material acumula cargas eléctricas en ciertas áreas de su estructura cristalina, cuando sufren una deformidad física, por acción de una presión. La piezo-electricidad fue descubierta por Pierre y Jacques Curie en 1880.

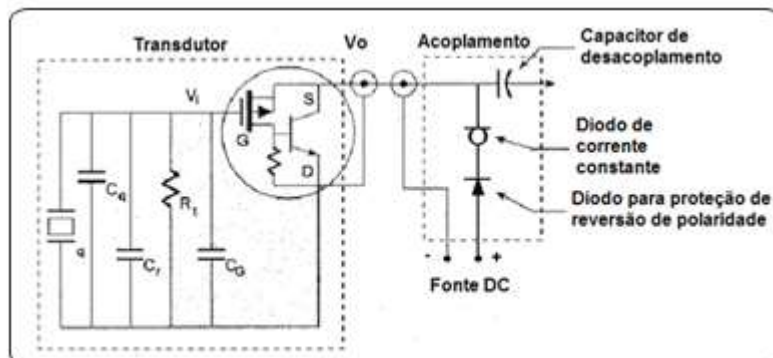
La relación entre la carga eléctrica y la presión aplicada al cristal es prácticamente lineal:

$$q = Sq \times Ap$$

$p$  - presión aplicada,  $A$  - área del electrodo,  $Sq$  - sensibilidad,  
 $q$  - carga eléctrica,  $C$  - capacidad del cristal,  $V_o$  - tensión de salida



**Sensor Piezo-Eléctrico**



**Sensor Piezo-Eléctrico**

### 3) Resonantes

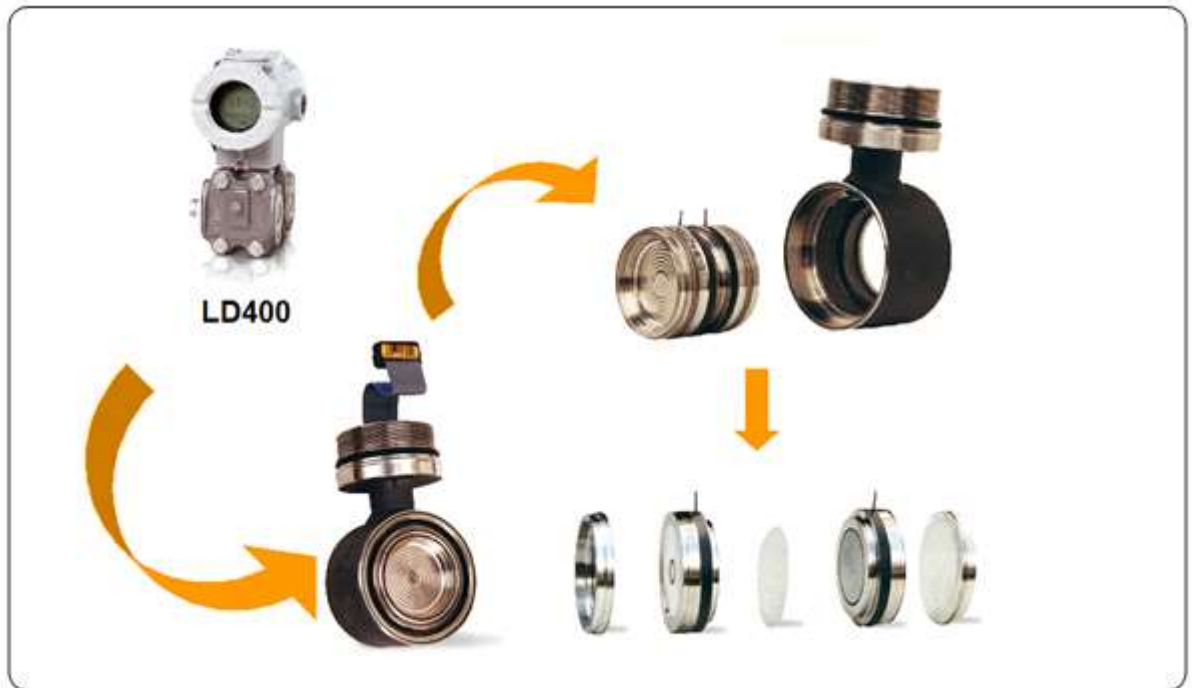
Poseen en general el principio de la tecnología conocida como “vibrating wire”. Un resorte de hilo magnético es anejada al diafragma que, al ser sometido a un campo magnético y ser recorrido empieza a oscilar. La frecuencia de oscilación es proporcional al cuadrado de la tensión (expansión/compresión) del hilo. En el sensor de Silicio Resonante no se usa hilo pero el silicio para resonar con diferentes frecuencias que son funciones del tipo  $1/f^2$  de la expansión/compresión. El sensor es formado por una cápsula de silicio ubicada en un diafragma que vibra al se aplicar un diferencial de presión y la frecuencia de vibración depende de la presión aplicada. Algunos sensores resonantes

necesitan técnicas de compensación de temperatura vía hardware/software complicadas, aumentando el número de componentes, lo que significa más placas electrónicas en algunos equipos..

#### 4) Capacitivos

Estos son los sensores más confiables y que fueran usados en millones de aplicaciones. Se basan en transductores donde la presión aplicada a diafragmas sensores produce una variación de la capacitancia entre ellos y un diafragma central, por ejemplo. Esta variación es usada principalmente para variar la frecuencia de un oscilador o usada como elemento de un puente de capacitares. Esta variación de capacitancia es usada para variar la frecuencia de un oscilador. La frecuencia puede medirse directamente por la CPU y convertida en presión. En este caso no existe conversión A/D, lo que contribuye a la exactitud y a la eliminación de drifts embutidos en las conversiones analógicas y digitales. Téngase en cuenta que este principio de lectura totalmente digital es utilizado por Smar desde la década de 80, como la única compañía brasileña y una de las pocas en el mundo a fabricar este tipo de sensor. Poseen respuestas lineales prácticamente insensibles a variaciones de temperatura, siendo los más indicados a instrumentación y control de procesos por su excelente performance en estabilidad, temperatura y presión estática. Algunas de sus ventajas son:

- Ideales para aplicaciones de baja y alta presión.
- Minimizan el Error Total Probable y consecuentemente la variabilidad del proceso.
- Ideales para aplicaciones de flujo.
- Por su respuesta lineal, permite alta flexibilidad y exactitud.



**Ejemplo de construcción de sensor capacitivo.**

**5) Ópticos**– Son todavía poco divulgados pero la evolución de la fibra óptica posee marcos expresivos:

- Fue inventada en 1952 por el físico indiano Narinder Singh Kanpany.
- 1970: Corning Glass produjo algunos metros de fibra óptica con pérdidas de 20 db/km.
- 1973: Un enlace telefónico de fibras ópticas fue producido en los EE.UU./
- 1976: Bell Laboratories instaló un enlace telefónico en Atlanta, GA, de 1 km y probó ser la fibra óptica prácticamente posible para telefonía.
- 1978: La fabricación de fibras ópticas comienza en varios puntos del mundo con pérdidas inferiores a 1,5 dB/km.
- 1988: Primer cable submarino de fibras ópticas sumergió en el océano e inició la supercarretera de la información.
- 2004: La fibra óptica mueve alrededor de 40 mil millones de dólares anuales.
- 2007: La fibra óptica brasilera cumple 30 años y el mercado de sensores de fibra óptica de las Américas movió 237 millones de dólares.
- 2014: La estimativa de facturación de sensores de fibra óptica para este año es de 1,6 mil millones de dólares en el mercado americano.

La sensibilidad de los sensores de fibra, o sea, el disturbio menos intenso que se puede medir

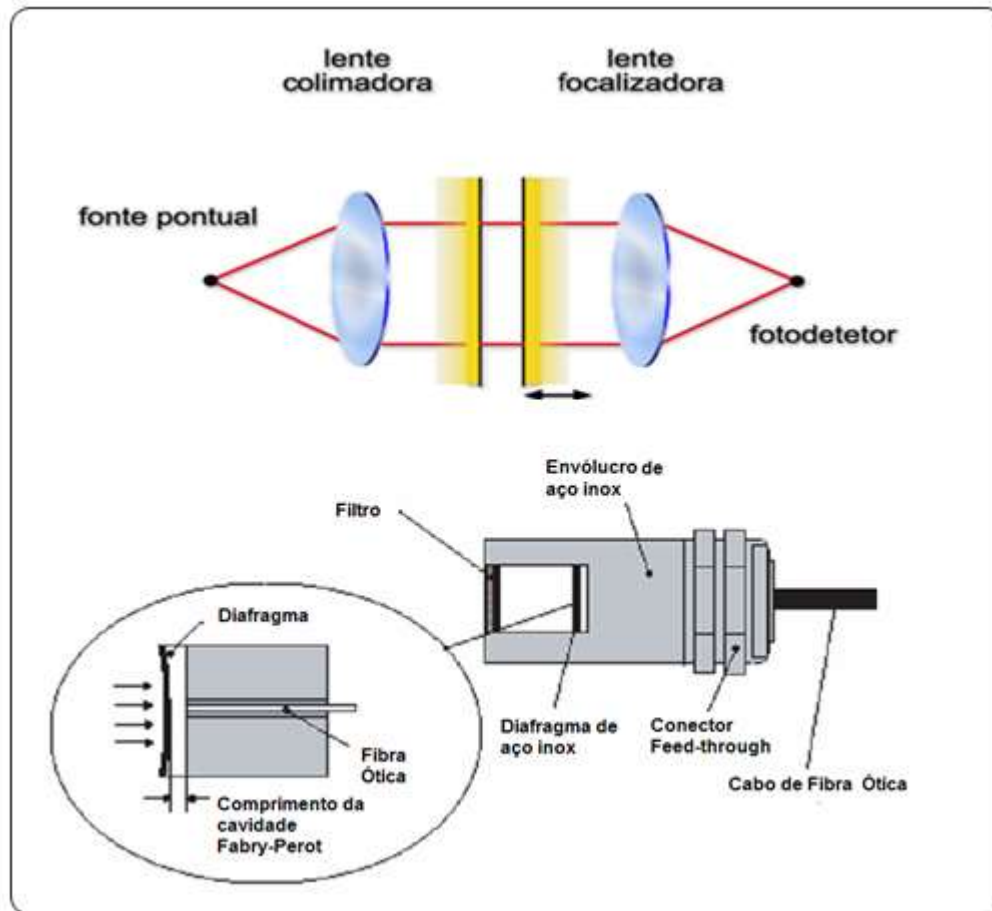
puede depender de:

- Variaciones infinitesimales en algún parámetro de caracterización de la fibra óptica usada cuando la fibra es el propio elemento sensor;
- Cambios en las propiedades de la luz usada, cuando la fibra es el canal a través del cual la luz va y vuelve desde el sitio bajo prueba.

Los sensores a fibras ópticas son compactos y presentan sensibilidad comparable a los similares convencionales. Los sensores de presión son construidos con una membrana móvil en una de las extremidades de la fibra. Algunas ventajas de estos sensores son: alta sensibilidad, tamaño reducido, flexibilidad y resistencia, poco peso, larga vida útil, larga distancia de transmisión, baja reactividad química del material, son ideales para funcionar en ambientes de alta tensión, inmunidad electromagnética, señales multiplexados, o sea, una única fibra puede producir docenas de instrumentos, y puede medir vibración, presión, temperatura, flujo multifásico, deformación, etc.

Una técnica utilizada en la construcción de sensores ópticos es el Interferómetro Fabry-Perot, un dispositivo usado por lo general en mediciones de longitudes de ondas con alta precisión, donde esencialmente dos espejos parcialmente reflectores de vidrio o cuarzo se alinean y se obtiene el contraste máximo y mínimo de franjas entre ellos por variación mecánica. Esta variación de distancia también podría generarse por presión y, con eso, tendríamos un sensor de presión.





**Sensor de Presión con el Principio de Fabry-Perot.**

**Equipos Industriales para Medición de Presión**

Entre los distintos equipos utilizados en la industria para medir presión se subrayan dos: el manómetro y el transmisor de presión.

El manómetro es usado para lectura de presión y tienen normalmente una conexión al proceso y un display (cuando electrónico) o puntero (cuando mecánico) para que se pueda leer la presión localmente. Por lo general son dispositivos de bajo costo y se usan cuando la presión no necesita transmitirse a un sistema de control y también no se necesita de exactitud. Por ejemplo, presión estática, presión de bomba, etc. Existen también modelos diferenciales, vacuómetros, sanitarios, etc.



### Ejemplos de manómetros.

Un transmisor de presión inteligente reúne la tecnología de sensor a su propia electrónica.

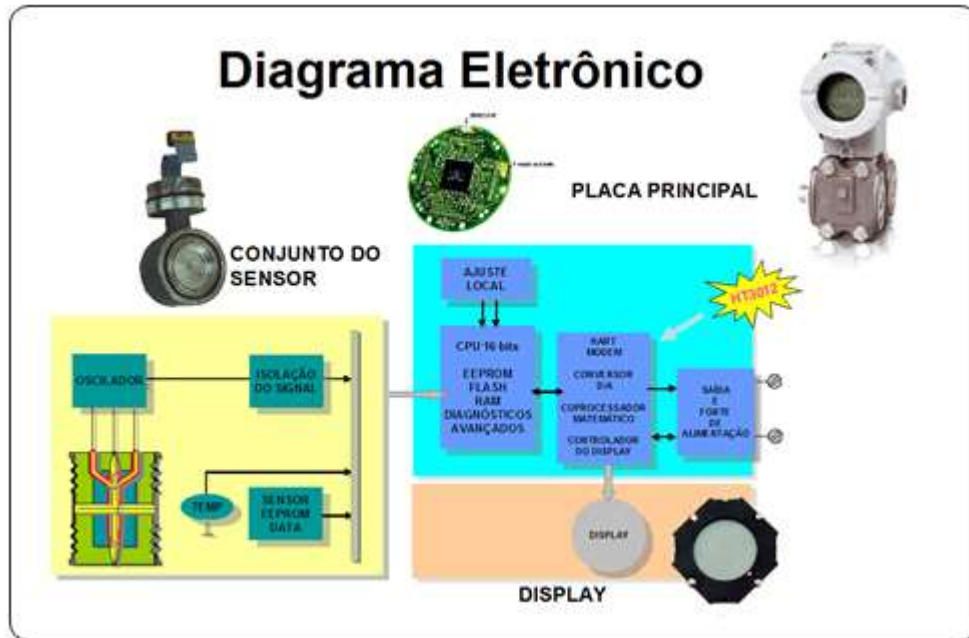
Típicamente debe proveer las siguientes características:

- Señal digital de salida;
- Interfaz de comunicación digital (HART/4-20mA, Foundation Fieldbus, Profibus-PA);
- Compensación de presión y temperatura;
- Estabilidad;
- Debe permitir calibración fácil;
- *Re-range* con y sin referencia;
- Autodiagnósticos;
- Fácil instalación y calibración;
- Alta confiabilidad;
- Bajos costos y tiempos cortos de instalación y mantenimiento;
- Reducción de intrusión/penetración (proceso);
- Ahorro de espacio en la instalación;
- Permitir actualización para la tecnología Foundation Fieldbus y Profibus PA;
- Recursos de interfaz EDDL y FDT/DTM;
- Protector de transientes, sin polaridad de alimentación;
- Traba física para transferencia de custodia, etc.

Algunos puntos que necesitan la atención de los usuarios para no pagar más por algo que no van a usar o que su aplicación no necesita:

- **Exactitud & Rangeabilidad:** si hay necesidad de equipos con tales requisitos, examinen las fórmulas de exactitud y vean que la exactitud no es divulgada en toda la banda. Veán también otras características, tales como el tiempo de respuesta, totalización, bloque de PID, etc, que pueden ser más útiles en sus aplicaciones.
- **Protección a la inversión:** verifiquen el precio de los repuestos, la intercambialidad entre modelos, la simplicidad de especificación, actualización para otras

tecnologías (Fieldbus Foundation, Profibus PA), suministro de servicios, soporte técnico, plazo de reposición, etc. Estos son factores que pueden perjudicar la disponibilidad de la fábrica.



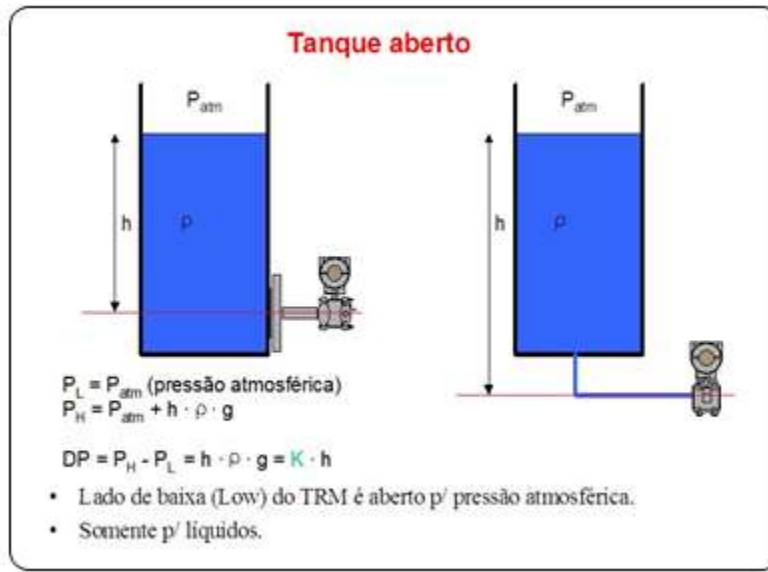
**LD400 – Transmisor de Presión HART/4-20mA con sensor capacitivo, placa electrónica única, alta performance (el transmisor con el mejor tiempo de respuesta del mercado).**

Los transmisores de presión microprocesados tienen la gran ventaja de posibilitar mejor interacción con el usuario, con interfaces de fácil utilización. Además, sus características de autodiagnos facilitan la identificación de problemas. Con el advenimiento de las redes fieldbus, es posible extraer los beneficios de la tecnología digital al máximo. Estos transmisores tienen mejor exactitud, estabilidad electrónica superior a los modelos analógicos, además de facilitar ajustes y calibraciones. La tecnología digital también permite que se implementen poderosos algoritmos a favor de performance y exactitud de medición y de monitoreo en línea de toda la vida del equipo.

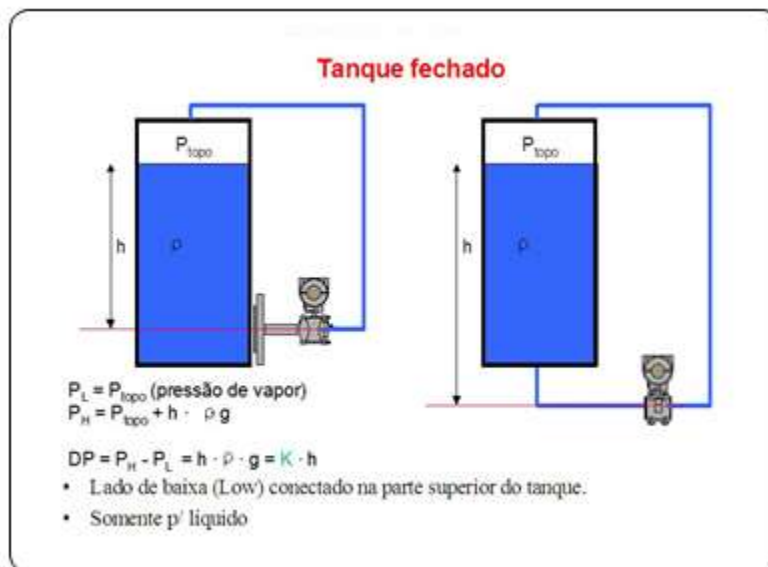
### Ejemplos de Aplicaciones Típicas con el Transmisor de Presión

En seguida vienen ejemplos típicos de aplicaciones con el transmisor de presión. Para más detalles sobre cada aplicación consulte las publicaciones disponibles en las referencias del artículo. Téngase en cuenta que la instalación correcta garantiza el mejor aprovechamiento y desempeño de los equipos.

## Medición de niveles de líquidos

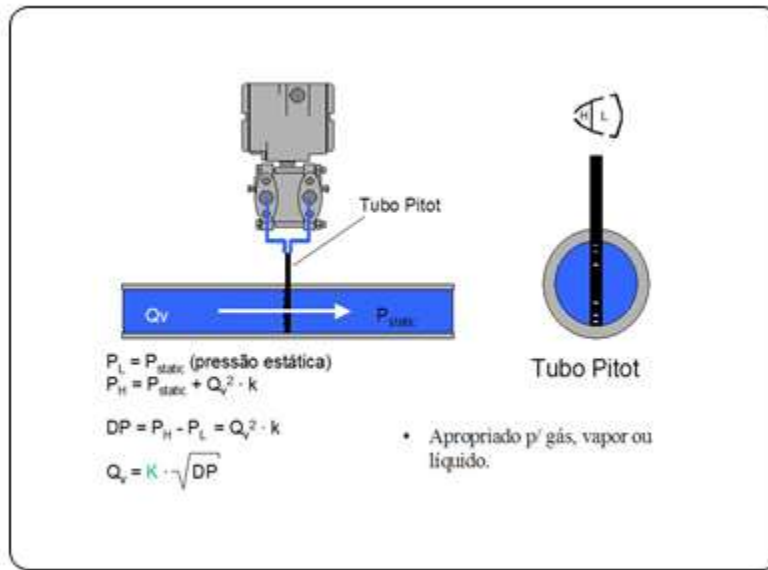


## Medición de nivel en tanque abierto.



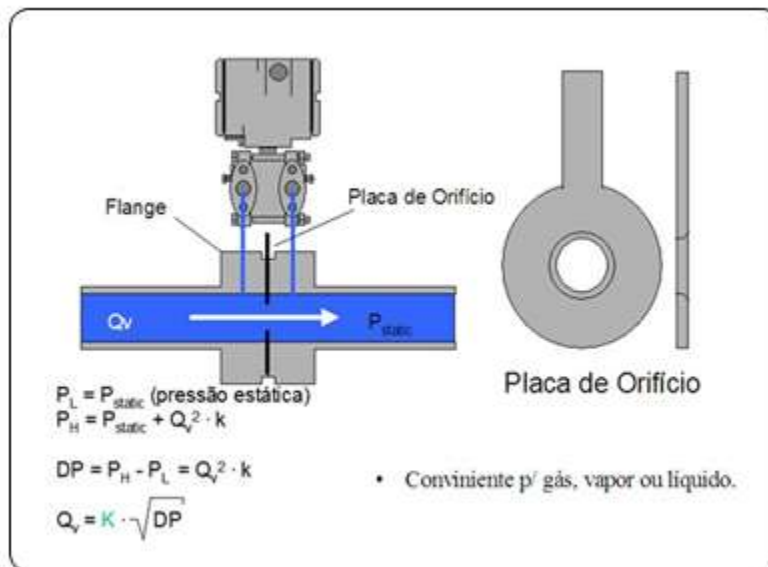
## Medición de nivel en tanque cerrado.

**Medición de flujo**



**Medición de flujo usando el tubo de Pitot**

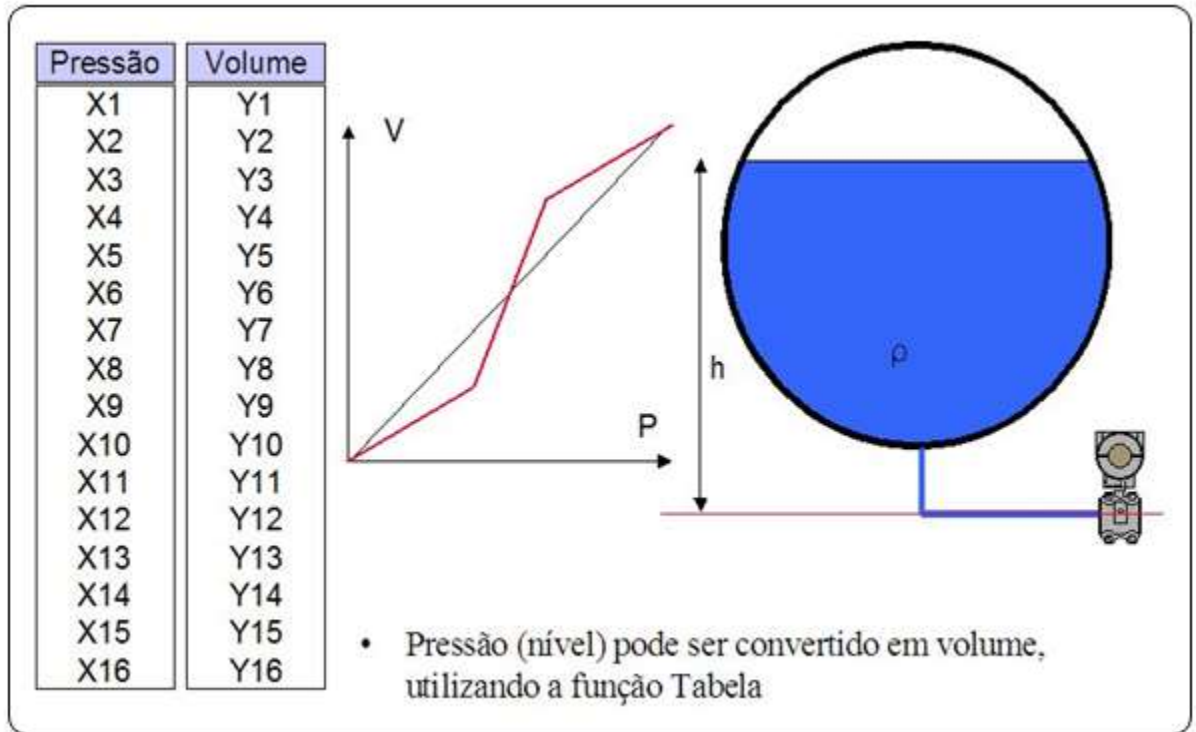
**Placa de Orificio**



**Medición de flujo usando placa de orificio.**

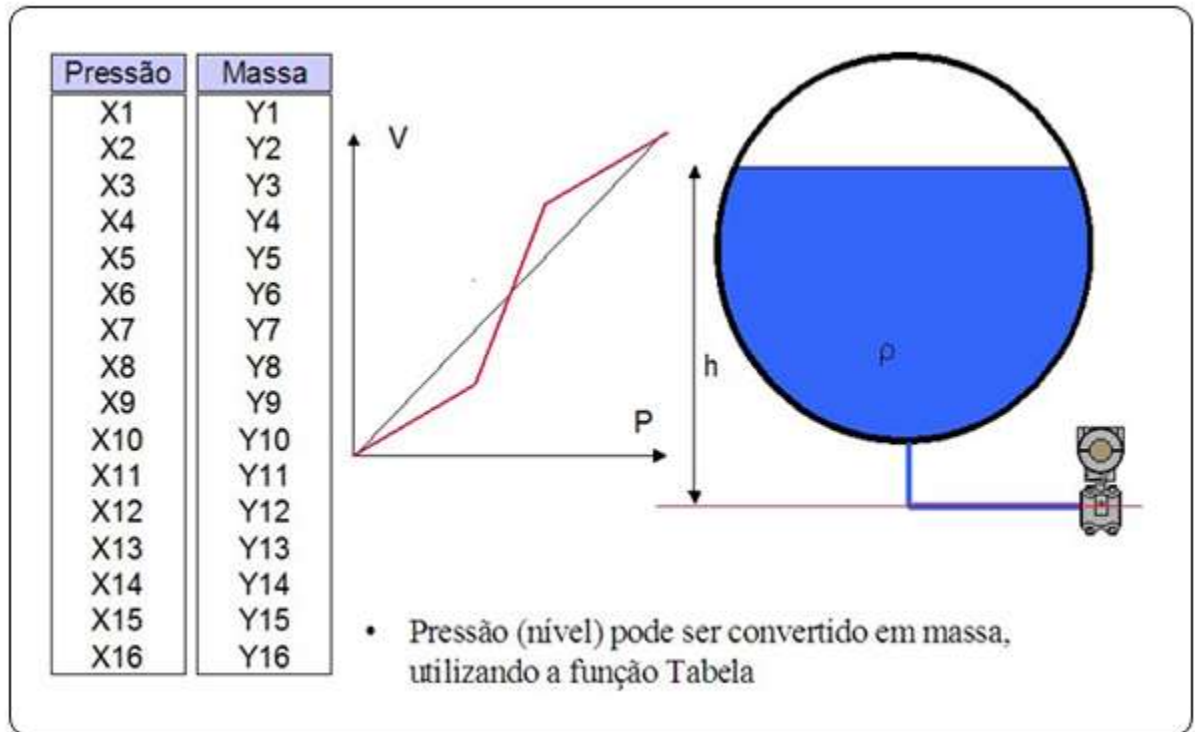
**Medición de volume y masa**

- La presión (nivel) puede convertirse en volume, utilizando la función Tabla



**Medición de volume.**

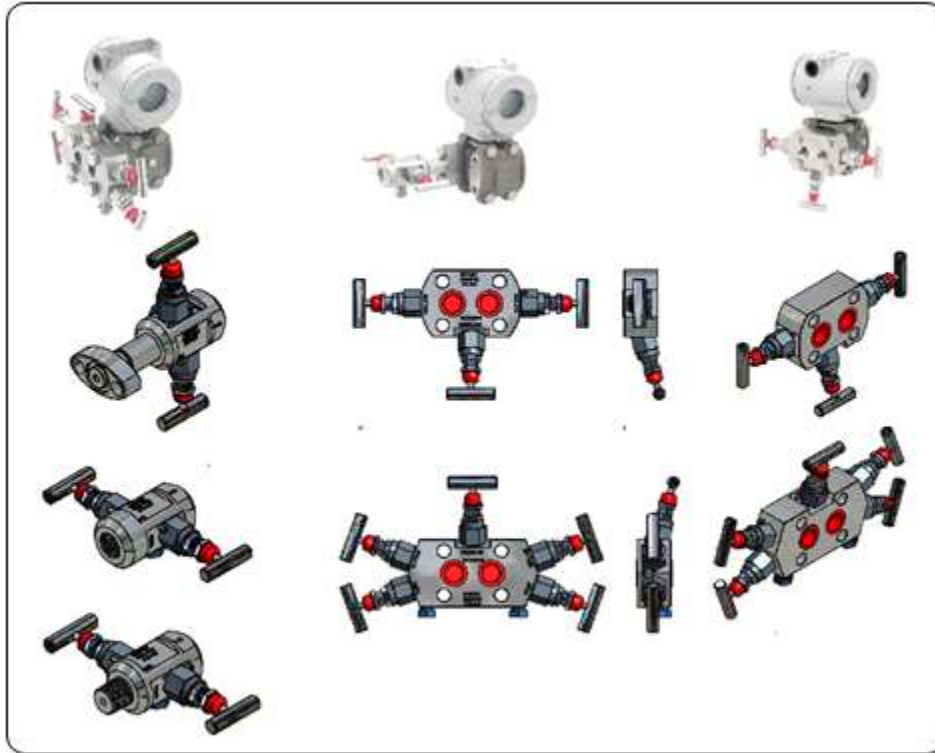
- La presión (nivel) puede convertirse en masa, utilizando la función Tabla



**Medición de masa.**

**Accesorios Importantes en Medición de Presión y sus Variantes**

Debido a la amplia gama de aplicaciones posibles, hay la necesidad de disponerse de algunos accesorios en la utilización de los transmisores de presión. Los más comunes son los *manifolds* y los sellos remotos, Los sellos remotos tienen la función de transmitir la presión de un punto distante del sensor o mismo garantizar condiciones adecuadas a la medición relativamente a la temperatura del proceso. Los *manifolds* son pequeñas válvulas usadas para facilitar el manejo de los equipos, la calibración y el mantenimiento en general.



***Accesorios para varias aplicaciones con transmisores.***

### **Como Especificar Transmisores de Presión**

Especificaciones incompletas o aún con datos inconsistentes son muy comunes en la documentación para compra de transmisores de presión. En la primera mirada parecen artículos simples de un proyecto, pero los detalles son numerosos y, si especificados incorrectamente, podrán generar perjuicio durante el montaje o la operación, que podrá ser mayor que los valores de los equipos en cuestión.

Este tópico busca clarificar algunas cuestiones fundamentales del proceso de especificación de transmisores de presión.

#### **¿Qué se pretende medir?**

Presión manométrica, presión absoluta, presión diferencial; otras grandezas inferidas a partir de mediciones de presión (flujo, nivel, volumen, fuerza, densidad, etc.).

Vale subrayar que las mediciones de presión abajo de la atmosférica no necesitan forzosamente transmisores de presión absoluta. Los transmisores de presión absoluta son recomendados solamente para evitar las influencias de la presión atmosférica. Esa influencia solo será crítica cuando se medir presiones muy cercanas (arriba o abajo) de la presión atmosférica. En los demás casos pueden emplearse sin problemas los transmisores de presión manométrica.

### ¿Para qué medir la presión?

Por lo general se mide la presión para control o monitoreo de procesos, por protección (seguridad), control de calidad, transacciones comerciales de fluidos (transferencias de custodia, medición fiscal, estudio e investigación, balances de masa y energía).

Esos objetivos deben ser tenidos en cuenta en la elección de los equipos. Quesitos más rigurosos de desempeño tales como exactitud, límites de sobrepresión y presión estática, estabilidad y otros, pueden cargar sin necesidad el proyecto. Todos los fabricantes suministran al mercado más de una versión de transmisores con características técnicas distintas y, obviamente, precios también distintos.

### ¿Cual es el fluido del proceso?

El proveedor deberá ser informado de las características del fluido. Por lo general el fabricante podrá recomendar materiales o conexiones especiales. Téngase en cuenta que la decisión final tocará al usuario o a la compañía de ingeniería encargada. Algunos datos del fluido del proceso son fundamentales al elegirse el transmisor:

- Estado (líquido, gas, vapor): define la posición de la válvula de escape;
- Presión máxima del proceso: es importante para evaluación de los límites de sobrepresión y presión estática del transmisor;
- Temperatura máxima del proceso: se podrá determinar para uso de sellos remotos o solo para mantener una distancia mínima en la línea de impulse (*tubing*).

### ¿Opcionales?

Algunos opcionales se pueden agregar a los transmisores suministrados:

- Indicador local: no es muy dispendioso y es muy útil, pues no solo permite la lectura de la variable en unidades de ingeniería (kgf/cm<sup>2</sup>, bar, mmH<sub>2</sub>O, Pa, psi, etc.), pero también facilita la configuración del transmisor en la ausencia de un configurador.
- *Manifold*: la compra combinada (transmisor + *manifold*) es ventajosa comercialmente y evita cualquier incompatibilidad técnica en el montaje.
- Soporte para tubo de 2": este es un artículo casi obligatorio. Algunos soportes

posibilitan también montaje en superficies planas. Se recomienda especificar el soporte al menos con los tornillos y tuercas en acero inoxidable para mejor resistencia en atmósferas corrosivas.

Sujetacables (cable clamps): se los puede encargar junto con el transmisor. Se recomienda, todavía, incluirlo en la compra del material de montaje, garantizando la compatibilidad con el calibre del cable a utilizar.

### Protocolos de comunicación

Los más comunes son 4-20 mA + HART, Foundation Fieldbus y Profibus PA.

Algunos fabricantes proveen transmisores que cambia su versión de protocolo a través de la simple sustitución de la placa de circuito electrónico o solo del *firmware* y se pueden usar en distintos sistemas.

Los fabricantes también suministran, junto con los transmisores, CDs con todos los archivos (DDs y DTMs) de sus productos, garantizando la comunicación e interoperabilidad entre los diversos sistemas de control de mercado.

### ¿Herramientas especiales?

Para los transmisores con protocolo Foundation Fieldbus o Profibus PA no se necesitarán configuradores portátiles, pues la propia herramienta de configuración de redes, por lo general instalada en los computadores de supervisión o en alguna estación de ingeniería, puede también acceder a los dispositivos y configurarlos. Para los proyectos convencionales (4-20mA + HART), se recomienda la adquisición de configurador portátil (hand held). En algunos transmisores la configuración podrá hacerse directamente en los aparatos, con recursos tales como la llave magnética o botoneras locales.

### ¿Preconfiguraciones?

Los transmisores convencionales (4-20mA + HART) proveen, por lo general, sin costos adicionales, algunas preconfiguraciones: extracción de raíz cuadrada, banda calibrada, indicación del display en unidades de ingeniería (presión), indicación del display en unidades especiales, por ejemplo:  $m^3/h$ ,  $l/h$ ,  $m^3$ . En ese caso se debe informar previamente la unidad y la escala.

### ¿Certificaciones?

Es común el usuario solicitar al fabricante certificados de calibración emitidos por laboratorio rastreado por la RBC. Los fabricantes siempre proveen certificados estándares generados y emitidos durante la etapa de fabricación de los instrumentos. Otros certificados de calibración, cuando emitidos por laboratorio de metrología rastreado por la RBC pueden necesitar plazos más largos de entrega y generalmente resultan en costos adicionales.

Otra certificación importante debe observarse cuando se usan transmisores en áreas explosivas. Los proyectos de instrumentación para esos casos adoptan normas que observan prueba de explosión, seguridad aumentada o seguridad intrínseca. Los certificados son distintos y el usuario es responsable por su correcta utilización. Lo mismo se aplica a los SIS, Sistemas Integrados de Seguridad.

### ¿Opcionales?

Algunos opcionales se pueden agregar a los transmisores suministrados:

- Indicador local: no es muy dispendioso y es muy útil, pues no solo permite la lectura de la variable en unidades de ingeniería (kgf/cm<sup>2</sup>, bar, mmH<sub>2</sub>O, Pa, psi, etc.), pero también facilita la configuración del transmisor en la ausencia de un configurador.
- *Manifold*: la compra combinada (transmisor + *manifold*) es ventajosa comercialmente y evita cualquier incompatibilidad técnica en el montaje.
- Soporte para tubo de 2": este es un artículo casi obligatorio. Algunos soportes posibilitan también montaje en superficies planas. Se recomienda especificar el soporte al menos con los tornillos y tuercas en acero inoxidable para mejor resistencia en atmósferas corrosivas.

Sujetacables (cable clamps): se los puede encargar junto con el transmisor. Se recomienda, todavía, incluirlo en la compra del material de montaje, garantizando la compatibilidad con el calibre del cable a se utilizar.

### ¿Conexiones especiales?

En aplicaciones con fluidos agresivos, temperatura o viscosidad alta, sólidos en suspensión, se recomienda el uso de transmisores con sellos remotos o integrales (que son llamados de transmisores de nivel). Se debe, siempre lo posible, evitar el uso de sellos, pues estos degradan la exactitud de la medición, aumentan el tiempo de respuesta del transmisor y sufren grande influencia de la temperatura ambiente. Los sellos con conexiones de brida deberán ser compatibles con las bridas de proceso y respetar las clases de presión establecidas en las tablas de presión y temperatura de los respectivos estándares.

### ¿Banda de presión / rangeabilidad?

Los fabricantes adoptan una terminología estandarizada que se necesita conocer:

- URL: Límite superior de la banda de calibración;
- LRL: límite inferior de la banda de calibración (en general  $LRL = -URL$ );
- URV: valor superior de la banda calibrada (deberá ser inferior o igual a la URL);
- LRV: valor inferior de la banda calibrada (deberá ser superior o igual a la LRL);
- SPAN:  $URV - LRV$  (deberá ser superior al SPAN mínimo del instrumento).

La relación URL /SPAN mínimo define la rangeabilidad del instrumento.

Los catálogos de los fabricantes en general muestran los valores de URL, LRL y SPAN mínimo para las varias bandas de los transmisores. Se puede observar que el SPAN mínimo de una determinada banda será siempre más grande que el URV de la banda inmediatamente inferior. Ejemplo:

- Banda 4 es URL : 25 kgf/cm<sup>2</sup> ; Span mínimo : 0,21 kgf/cm<sup>2</sup>; límites de sobrepresión o presión estática: 160 kgf/cm<sup>2</sup>
- Banda 5 es URL : 250 kgf/cm<sup>2</sup> ; Span mínimo : 2,1 kgf/cm<sup>2</sup>; límites de sobrepresión o presión estática: 320 kgf/cm<sup>2</sup>

En una aplicación con banda equilibrada 0 a 20 kgf/cm<sup>2</sup> es posible usar la banda 4 o mismo la banda 5. Sin embargo, débese elegir siempre el de banda inferior. Todas las especificaciones de estabilidad, efecto de temperatura, efecto de la presión estática se determinan con valores porcentuales de URL. La excepción a esa elección se da cuando los límites de sobrepresión o de presión estática pueden ser alcanzados. En el ejemplo por encima de ese límite es de 160 kgf/cm<sup>2</sup> para la banda 4 y 320 kgf/cm<sup>2</sup> para la banda 5.

### Recursos funcionales

Algunos transmisores tienen recursos funcionales muy interesantes. Para los transmisores con protocolo Foundation Fieldbus es importante conocer la biblioteca de bloques funcionales existente. El usuario debe informarse no solo sobre los diversos bloques, como también sobre la política de comercialización de esos recursos. Algunos fabricantes suministran el dispositivo con algunos bloques básicos y cobran adicionales por los bloques avanzados. Es importante, también, informarse sobre la cantidad de bloques que se pueden procesar en un único transmisor. Este límite puede ser crítico en proyectos con lazos de control más complejos.

Para los transmisores convencionales (4-20mA + HART) es posible también el uso de funcionalidades adicionales:

### Control de PID

En esta configuración el transmisor ejecuta el algoritmo PID, comparando la variable del proceso con un *set-point* preajustado y genera la señal de salida de corriente para conexión directa con el posicionador de la válvula de control. Ese recurso es válido para circuitos simples de control que no necesiten intervenciones del operador (siempre en automático con *set-point* constante).

### Totalización de flujo

El transmisor de presión diferencial cuando usado en mediciones de flujo puede configurarse para indicación local del flujo totalizado, además del instantáneo.

### Referencias

- Intech Edição 74 , Transmissores de Pressão: sensores, tendências, mercado e aplicações, César Cassiolato, 2005
- Controle&Instrumentação - Edição nº 106, O Brasil quebrando as barreiras tecnológicas com a inovação – Transmissores de Pressão César Cassiolato, 2005
- Controle&Instrumentação - Edição nº 113, Especificando Transmissores de Pressão, César Cassiolato, Francisco Julião, 2006.
- Intech Edição 93 , Medições de Pressão: características e tecnologias, César Cassiolato, 2007
- Controle&Instrumentação - Edição nº 135, Medições de Pressão: Tudo o que você precisa saber, César Cassiolato, 2008
- Controle&Instrumentação - Edição nº 137, Medição de Vazão, César Cassiolato, Evaristo O. Alves, 2008
- Manuais de Operação e Treinamento dos transmissores de pressão Smar: LD301, LD302 , LD303 e LD400
- [www.smar.com.br](http://www.smar.com.br)

## Autoevaluación 3

- 1) Qué son las stream gage
- 2) Qué es la presión y como se clasifica
- 3) Qué tipos de medidores de presión se utilizan en Novel y Flujo. Explique
- 4) Qué es un tubo de Bourdon.

## Controles combinados

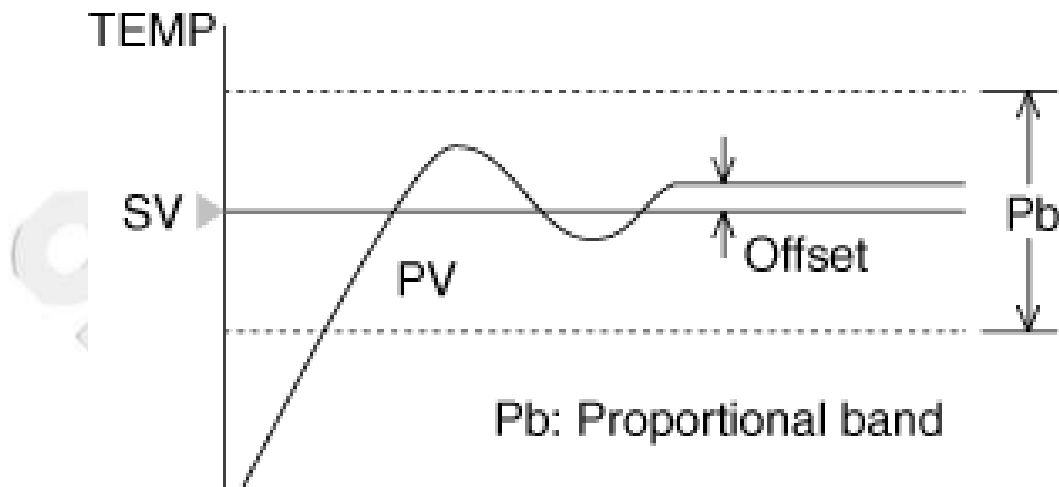
### Controladores proporcionales

La principal limitación del control proporcional se muestra cuando se realizan cambios de setpoint o hay cambios de carga en el proceso. Una “carga” en un proceso controlado es cualquier variable sujeta a cambios que tiene impacto o influencia en la variable que está siendo controlada (la variable de proceso), pero no está siendo “corregida” o controlada (por el controlador :D). En otras palabras, un “cambio de carga” es cualquier variable en el proceso que no podemos o no estamos controlando, y que tiene un efecto en la variable que sí estamos intentando controlar.

En nuestro hipotético del intercambiador de calor, la temperatura del fluido de proceso de entrada es un ejemplo de “carga”:

### El control proporcional: definiciones

Imaginemos un sistema de control de nivel para un recipiente cerrado, donde la posición del flotador que sensa el nivel directamente fija la posición del vástago de una válvula de control



Por tanto si el líquido se incrementa la válvula abre proporcionalmente

A pesar de que el accionamiento es totalmente mecánico, esto es un sistema de control proporcional que ayudará a regular el nivel del líquido dentro del proceso o recipiente. Si un operador deseara cambiar el setpoint de este sistema de control de nivel, tendría que ajustar el acople entre el flotador y el vástago de la válvula para tener más o menos distancia entre los dos. Por tanto, incrementando la distancia tendríamos un mayor setpoint, y si disminuimos la distancia tendríamos un menor setpoint.

Por tanto, nosotros podríamos generalizar la acción proporcional de este mecanismo para describir cualquier forma de controlador donde la salida es una función directa de la variable proceso (PV) y el setpoint (SP):

$$m = K_p \cdot e + b$$

Donde:

$m$  = Salida del controlador

$e$  = Error (diferencia entre PV y SP)

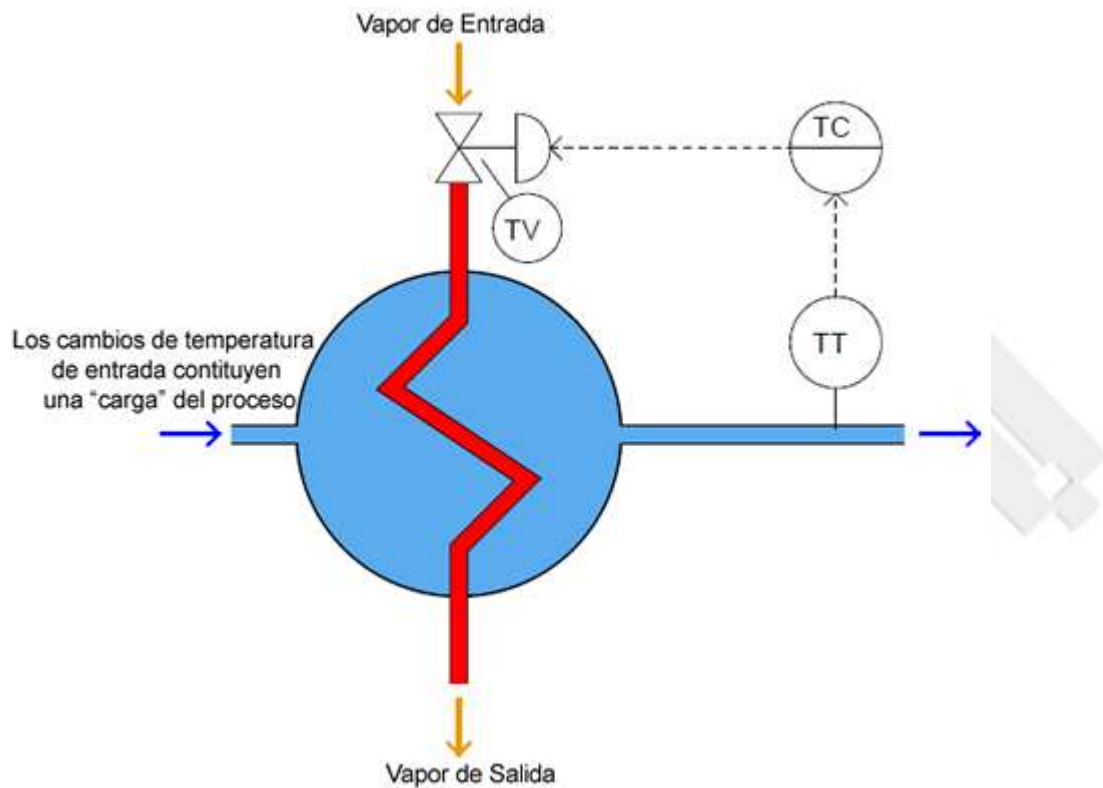
$K_p$  = ganancia proporcional

$B$  = bias

Un nuevo término se presenta en la ecuación anterior “ $e$ ”, el error o la diferencia entre la variable proceso y el setpoint. El error puede ser calculado como  $SP - PV$  o  $PV - SP$ , dependiendo si el controlador debe producir una acción de incremento en la señal de salida en respuesta a un incremento en la variable de proceso (acción “directa”), o disminuir la señal de la salida en respuesta a un incremento en la variable de proceso (acción “inversa”):

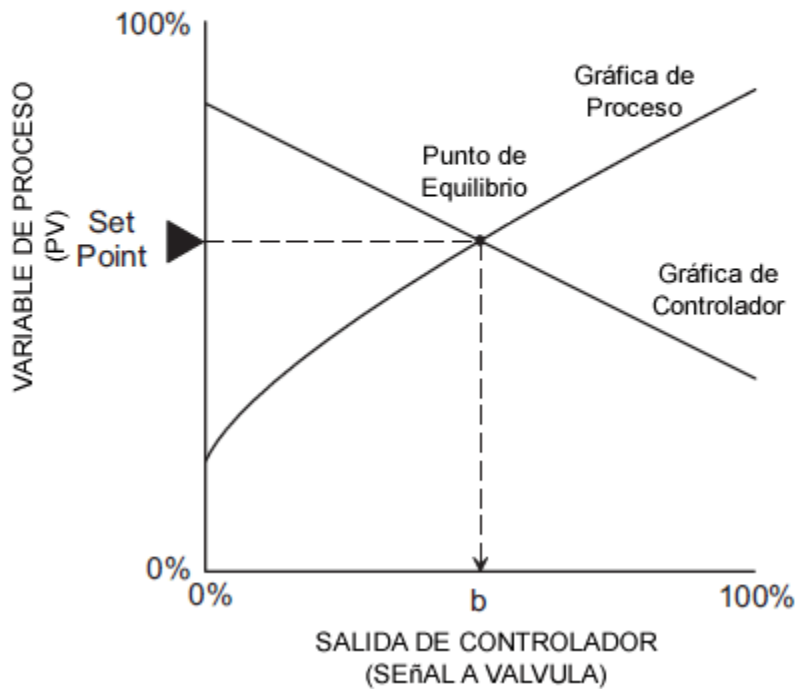
$$m = K_p \cdot (PV - SP) + b \text{ (controlador proporcional de acción directa)}$$

$$m = K_p \cdot (SP - PV) + b \text{ (controlador proporcional de acción inversa)}$$



Cuando nosotros decimos que un controlador es de **acción directa** o **acción inversa** nos estamos refiriendo a la reacción que va a tener la variable de proceso (PV), por lo tanto la señal de salida de un controlador de acción directa van en la misma dirección que la señal de PV y la salida de un controlador de acción inversa van en dirección contraria a la dirección de la señal PV.

La dirección de la acción requerida de un controlador está determinada por la naturaleza del proceso, del transmisor y del elemento final de control. En el caso del controlador de nivel mecánico que vimos anteriormente, la acción necesita ser directa dado que si se incrementa el nivel del líquido necesitaremos abrir más la válvula de control justamente para drenar más rápido el recipiente. En el caso del intercambiador de calor que vimos en los capítulos anteriores, podemos decir que un incremento en la señal de salida hacia la válvula de control resulta en un incremento de flujo de vapor, y consecuentemente una temperatura más alta del fluido de proceso, entonces nuestro controlador necesita ser de acción inversa. Por ejemplo, un incremento en la temperatura debe resultar en un decremento en la señal de salida (menos vapor) para controlarla, el error se calcula como  $SP - PV$ .



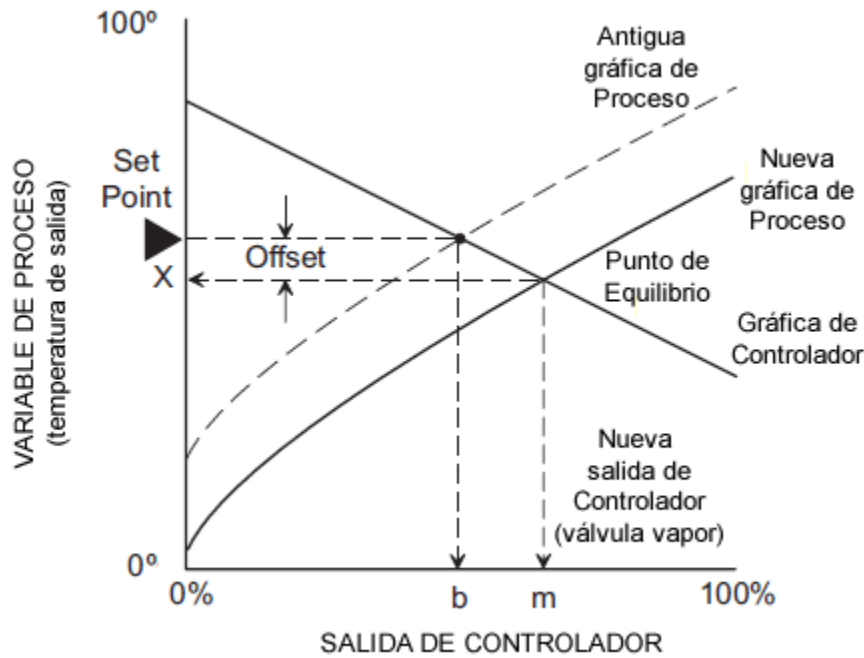
Después que el error ha sido calculado, el controlador entonces multiplica la señal del error ( $e$ ) por una constante llamada ganancia ( $K_p$ ), la cual es programada dentro del controlador. El resultado, más una señal llamada “bias”, viene a ser la señal de salida del controlador que se envía a la válvula en proporción. En este caso, la ganancia de un controlador proporcional es el ratio del cambio de la **señal de salida** sobre el **cambio en la señal de entrada** o en términos prácticos la ganancia nos dice que tan **agresivo** reacciona el controlador a los cambios en la entrada (PV o SP).

Para dar un ejemplo numérico, un controlador que tiene configurada una ganancia de 4 cambiará su señal de salida hasta en un 40% si mira un cambio en la señal entrada un cambio de 10%: el ratio de cambio de la salida sobre la señal de la entrada será de 4 a 1. Sin importar si el cambio proviene en la forma de un ajuste de setpoint o un cambio en la variable proceso o alguna combinación de ambos esto no influye en la magnitud del cambio en la salida.

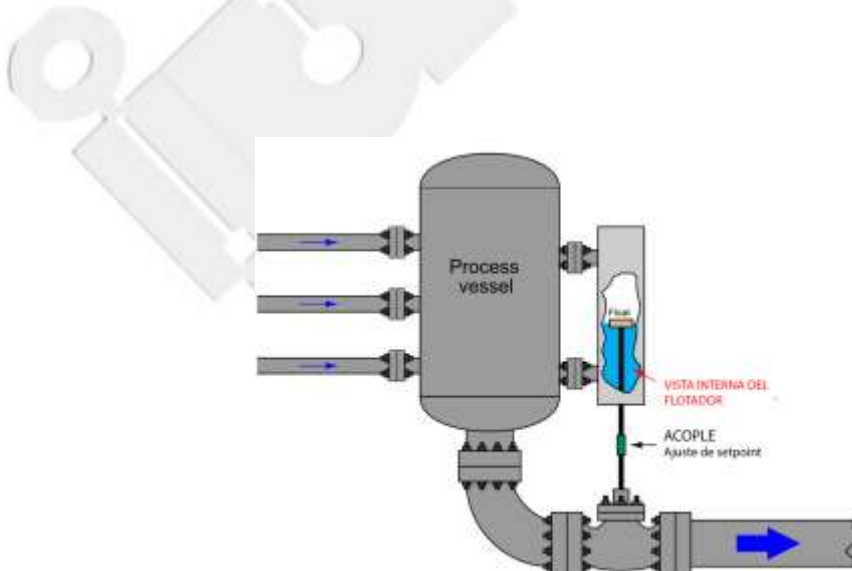
El valor bias de un controlador proporcional, es la salida del controlador cuando la variable proceso es igual al setpoint, es decir una condición de error 0 o comúnmente un estado de equilibrio. Sin el término **bias** en la ecuación de control proporcional la válvula siempre regresaría a una condición de cerrada completamente si la variable de proceso alcanza el valor del setpoint. El término bias permite al elemento final de control alcanzar un estado diferente a cero cuando llega al setpoint. Suena confuso? lo aclararemos mejor en adelante.

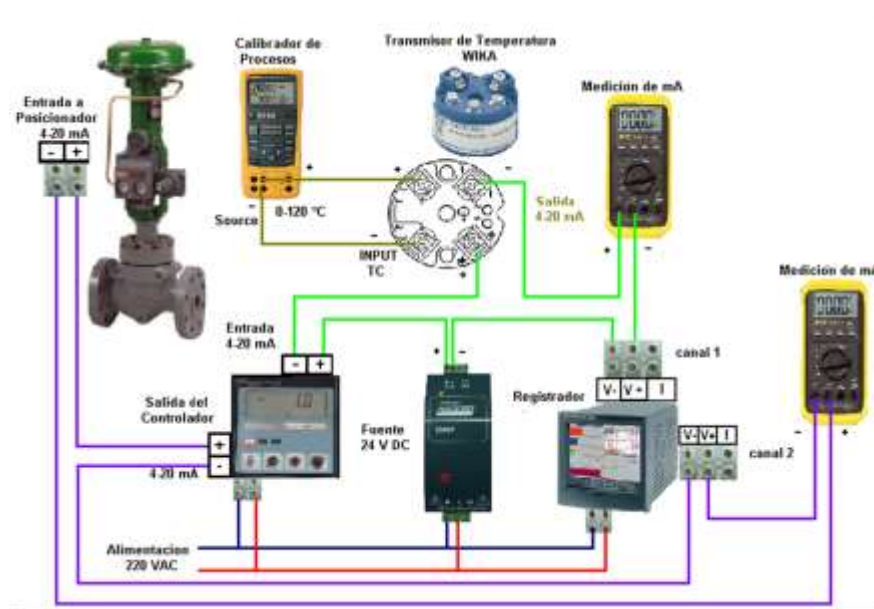
Normalmente el valor de la ganancia deberá ser fijada entre un valor infinito y cero (para valores de ganancia infinito y cero estaríamos hablando de un control on/off simple prácticamente). Cuanta ganancia necesita un controlador depende del proceso y todos los otros instrumentos del lazo de control.

Si la ganancia es fijada demasiado alta, habrá oscilaciones de PV ante un nuevo valor de setpoint.



Si la ganancia es fijada demasiado baja, la respuesta del proceso será muy estable bajo condiciones de estado estacionario, pero "lenta" ante cambios de setpoint porque el controlador no tiene la suficiente acción agresiva para realizar cambios rápidos en el proceso (PV).





Una característica deficiente de la acción de control proporcional es el fenómeno conocido como offset donde la PV nunca alcanza completamente al setpoint, y esto lo explicaremos a detalle mas adelante dado que un poco extenso, no te preocupes.

Con control proporcional, la única manera de obtener una respuesta de acción rápida ante cambios de setpoint o “perturbaciones” en el proceso es fijar una ganancia constante lo suficientemente alta hasta la aparición del algún “overshoot” o sobre impulso

Un aspecto innecesariamente confuso del control proporcional es la existencia de dos maneras completamente diferentes de expresar la “agresividad” de la acción proporcional. En la ecuación mostrada anteriormente, el grado de acción proporcional fue especificado por la constante  $K_p$  llamada ganancia. Sin embargo, hay otra manera de expresar la “sensibilidad” de la acción proporcional, y que es la inversa de la ganancia llamada Banda Proporcional (BP):

$$K_p = 1/PB; PB = 1/K_p$$

La ganancia es un valor especificado sin unidades, por el contrario la banda proporcional es siempre especificada como porcentaje. Por ejemplos, un valor ganancia de 2.5 es equivalente a una banda proporcional de 40%, porque el error de entrada en este controlador debe cambiar en 40% para hacer un cambio en la salida en 100%.

Dado que existen estas dos maneras completamente diferentes para expresar una acción proporcional, podríamos ver el término proporcional en la ecuación de control escrita de manera distinta dependiendo si es que el autor asume usar ganancia o asume usar banda proporcional.

$$K_p = \text{ganancia} = (K_p * e) ; PB = \text{banda proporcional} = (1/PB * e)$$

En los controladores digitales modernos usualmente permiten al usuario seleccionar

convenientemente la unidad que se desea usar para la acción integral. Sin embargo, incluso con esta característica, cualquier tarea de sintonización de controladores podría requerir la conversión entre ganancia y banda proporcional, especialmente si ciertos valores son documentados de una manera que no coincide con la unidad configurada en el controlador.

Siempre cuando hablemos del valor de la acción proporcional de un controlador de proceso, deberíamos tener cuidado en especificar si nos referimos a la “ganancia” o a la “banda proporcional” para evitar confusiones. Nunca simplemente decir algo como “el proporcional esta seteado en 20”, esto podría significar:

- Ganancia = 20; Banda Proporcional = 5% ó
- Banda Proporcional = 20% ; Ganancia = 5

Como como se puede ver en las gráficas abajo, la respuesta en la vida real de un controlador con banda proporcional de 20% y uno con valor de ganancia de 20 es dramático

Si la temperatura de fluido de entrada disminuyera repentinamente, el efecto inmediato en el proceso sería la disminución de la temperatura del flujo de salida (la cual estamos tratando de mantener en un valor estable). Entonces tiene mucho sentido decir (con mayor detalle) que la entrada de fluido frío requiere más entrada de vapor en casco del intercambiador para mantener a la misma temperatura la salida como antes. Si la entrada de vapor en el casco se mantiene (al menos en el futuro inmediato), el flujo frío en la entrada debe hacer que el flujo de salida también resulte más frío que antes. Por tanto, la temperatura de alimentación entrante tiene un impacto en la temperatura de salida los queramos o no, y el sistema de control no tiene la manera de regular cuan caliente o frío esta el fluido de proceso antes de ingresar al intercambiador de calor. Esto es precisamente la definición de un “carga” (load).

Por supuesto, el trabajo del controlador es contrarrestar cualquier tendencia en la temperatura de salida y mantenerla en el setpoint indicado, pero como veremos pronto esto no puede ser logrado a perfección solo con un control proporcional.

Analicemos con cuidado el escenario cuando la temperatura disminuye repentinamente para ver como un controlador proporcional respondería. Imaginemos que antes de esta repentina caída de temperatura en la entrada, el controlador estaba controlando la temperatura de salida exactamente en el setpoint configurado ( $SP = PV$ ) y que todo estaba estable. Recordemos que la ecuación de un controlador proporcional es:

$$m = K_p * e + b$$

Donde:

$m$  = Salida de controlador

$e$  = Error (diferencia entre PV y SP)

$K_p$  = Ganancia proporcional

b = Bias

Sabemos que una disminución de la temperatura del flujo de entrada resultará una disminución de la temperatura del flujo de salida (PV). De la ecuación podemos ver que cuando existe una disminución de la variable de proceso (PV), el controlador calcula un error positivo (SP-PV). Este error positivo, se multiplica por la ganancia (Kp) y causará que el valor salida en la ecuación del controlador proporcional sea mayor o se incremente. Esto significa que la válvula de control de vapor se abrirá ampliamente, dejando pasar más vapor caliente dentro del intercambiador de calor.

Dado que se agrega mas vapor, la caída de temperatura cae mas lentamente. Mientras mas cae la PV (temperatura), la válvula de vapor se abre mas, hasta que se agregue suficiente calor al intercambiador de calor para mantener una salida de temperatura constante. Sin embargo, este nuevo estable valor de la PV sera menor que cuando estaba antes (anterior punto de equilibrio), es decir menos del SP requerido. De hecho, la acción automática del controlador **nunca** retornará la PV a su valor de SP original dado que la temperatura de alimentación es ahora mas fría que antes. La razón es que ahora se necesita un flujo de vapor mayor para balancear o compensar un flujo de alimentación mas frío, y la única manera que tiene el controlador proporcional para automáticamente conducir a a esta nueva posición de válvula de vapor para brindar mayor flujo es si desarrollo un error entre la PV y el SP.

Por tanto, un offset inevitablemente estará presente entre la PV y SP debido al cambio de carga (alimentación mas fría).

Podemos probar que este offset es inevitable de la siguiente manera: imaginemos que de «alguna forma» la PV retorna a su valor de SP a pesar que la temperatura de entrada es mas fría. Si esto ocurre, la válvula de vapor debería también retornar a su antigua posición (antes que la temperatura de ingreso se torne mas fría). Sin embargo, sabemos que al antigua posición de la válvula de vapor no es suficiente para compensar esta caída de temperatura en la entrada, y si lo hiciera entonces PV nunca debería haber disminuido como al inicio!! La valvula de vapor tiene que abrir mas para compensar esto!! y estabilizar la PV dada esta perturbacion, y con solo un controlador proporcional solo se puede lograr teniendo un offset entre la PV y el SP.

En resumen, la unica manera que un controlador proporcional automaticamente genere un nuevo valor de salida (m) es si la PV se desvia del SP. Por tanto, ante cambios de carga (dado que requiere nuevo valor de salida para compensar) fuerza a la PV que se desvia del SP.

Ok, un poco confundido? Veamos otro ejemplo un poco mas numérico. Imagina que vamos a construir nuestro propio sistema de control crucero para tu automóvil (referencia [Aqui](#)) basado en un controlador proporcional: la posicion del acelerador es funcion de la diferencia entre la PV (velocidad) y el SP (velocidad requerida). Vamos a suponer que tu cuidadosamente ajusta el valor del bias (b) de tu sistema de control crucero para lograr que  $PV = SP$  a un nivel de velocidad de 70Kph (70% de una escala de 0 a 100Kph en el velocimetro), con el acelerador en una posicion de 40%, y una ganancia (Kp) de 2:

$$m = Kp (SP-PV) + b$$

$$40\% = 2*(70 - 70) + 40\%$$

Imaginemos ahora que después de estar precisamente en el setpoint (70% = 70 Kph), la carretera empieza empinarse y se inicia una subida por varios kilómetros. Esto, obviamente, es un «cambio de carga» en el sistema de control. Con el control de cruce desactivado, el automóvil irá más lento porque con la misma aceleración (40%) con el mismo setpoint (70Kph) no será suficiente para mantener ahora esta carrera inclinada o empinada.

Con el control de cruce activado, la posición del acelerador automáticamente se incrementará dado que la velocidad cae con esta nueva carretera. A una velocidad de 69Kph, el acelerador se incrementa hasta 42%. A una velocidad de 68Kph, el acelerador se incrementa hasta 44%. En cada caída de velocidad de 1Kph resulta en un incremento del acelerador de 2% para enviar más potencia a las ruedas.

Supongamos que para esta particular carretera inclinada se requiere un 50% de aceleración para mantener una velocidad constante. Para que nuestro sistema de control solo proporcional entregue una posición del acelerador de 50%, la velocidad deberá «caer» en 5Kph debajo del setpoint.

$$m = K_p (SP - PV) + b$$

$$50\% = 2 \cdot (70 - 65) + 40\%$$

Simplemente no hay otra manera que nuestro controlador proporcional logre automáticamente el 50% de posición del acelerador sin estar con la velocidad debajo del setpoint en 5% (5Kph). De hecho la única manera que el sistema de control de cruce llegue al setpoint (70Kph) es si las condiciones de la carretera permiten una posición del acelerador menor del 40%. Por tanto, siempre que la carga (condiciones de la carretera) demandan diferentes posiciones del acelerador para un valor de bias, la velocidad debe estar diferente del setpoint (70Kph).

Mencionemos también que este efecto de offset también ocurre como resultado de cambios en el setpoint. Así mismo mientras más alto configuremos la ganancia menor será el offset, pero más inestable será el controlador.

Por último, expliquemos una vez más este efecto de offset. La entrada de uno es la salida del otro. El único punto en el cual ambas gráficas se relacionan y se satisfacen es la intersección de ambas. Por tanto, este es el punto de **equilibrio** del lazo de control para una **PARTICULAR** condición de carga (a un setpoint determinado).

Ahora supongamos que ocurrió un cambio de carga, esto causa un desplazamiento de la gráfica del proceso (una variable de las tantas del proceso ha variado) pero la gráfica del controlador no ha tenido cambios (el set point, bias y ganancia permanecen iguales). Entonces el controlador buscará el equilibrio en la nueva intersección de las gráficas de proceso y controlador (abrirá más la válvula de vapor), pero debido al cambio de carga, este nuevo punto de equilibrio ya no estará más en el **setpoint** configurado.

Lo que pasará es que la salida del controlador (apertura de válvula) se incrementará (de **b** hasta **m**) con la caída de temperatura en la entrada (cambio de carga que provoca desplazamiento en la gráfica de proceso), hasta que haya suficiente flujo de vapor en el intercambiador de calor para prevenir

cualquier forma que produzca que la temperatura de salida siga bajando (se establecerá en X de acuerdo a la gráfica). Pero para mantener este exceso de flujo de vapor o nuevo equilibrio, un error debe desarrollarse entre PV y SP. En otras palabras y nuevamente, la variable de proceso (temperatura) **DEBE** desviarse del setpoint para que el controlador pueda enviar más vapor, para que la variable de proceso no caiga más que esta.

La cantidad de OFFSET depende de cuan severa sea el cambio de carga, y cuan agresivo es la respuesta del controlador (ej., cuanta ganancia tiene).

Ahora que hemos establecido o “desnudado” o descrito varios ejemplos del problema de un controlador proporcional, en el siguiente artículo exploraremos las formas posibles de resolverlo.

## Calibración de instrumentos

### Calibración simple de manómetros, por método validado y con cálculo de incertidumbre



La presión es una de las magnitudes más habituales en los procesos industriales. Existen diferentes instrumentos de medición de la presión. Cuando sólo precisamos indicación local generalmente utilizamos manómetros. Los manómetros pueden ser analógicos o digitales, dependiendo del tipo de indicación. En los manómetros del tipo analógico la indicación consiste en una aguja indicadora sobre una escalada graduada. En los digitales, la indicación aparece en un display electrónico. Existen manómetros para la medición de presiones relativas, absolutas y diferenciales. Hoy nos vamos a centrar en la calibración de manómetros analógicos de presión relativa.

Tal como lo exige la Norma ISO-IEC 17025:2005, todos los métodos de calibración utilizados deben estar validados. Aquí tenemos dos alternativas: tomar métodos ya desarrollados por algún ente reconocido (algún organismo nacional de metrología, por ejemplo) o diseñar nuestro propio método. Este último punto implica la tarea adicional de que algún ente externo avale nuestro método.

En estos casos, donde existen infinidad de laboratorios que realizan este servicio, desarrollar un nuevo método parecería no tener mucho sentido. Lo que se hace generalmente es tomar un método estándar y hacerle pequeñas modificaciones para adaptarlo a nuestra necesidad puntual. Existen dos documentos que recomiendo para el armado de nuestro procedimiento de calibración de manómetros:

- El primero es el **Procedimiento ME-003 para la Calibración de Manómetros, Vacuómetros y Manovacúómetros**, redactado por el Centro Español de Metrología (CEM). Aquí tenemos dos grandes ventajas: la primera es que está en idioma español y la segunda es que su versión digital es gratuita. Pueden descargarlo de

### ¿Qué precisamos?

- **Patrones de trabajo:** puede tratarse de un manómetro analógico o digital de precisión o un calibrador digital. Deben seleccionarse patrones que tengan una incertidumbre de 4 a 10 veces mejor que la que esperamos del manómetro a calibrar. Por supuesto, todo con su certificado de calibración trazable y vigente.
- **Generador de presión:** También debemos contar con un sistema de generación de presión. Los hay neumáticos e hidráulicos, bombas manuales o electrónicas. Muchos calibradores electrónicos hoy poseen generación de presión incorporada con una pequeña bomba neumática interna. Para presiones bajas (menores a 2MPa) es quizás la mejor alternativa.
- **Conectores, tubos y adaptadores:** para poder cubrir las conexiones habituales de los manómetros a ensayar.
- **Medidor de condiciones ambientales:** en general se utilizan termohigrobarómetros. El mismo también debe poseer calibración vigente y trazable en temperatura ambiente, humedad relativa ambiente y presión atmosférica.
- **Otros:** solución jabonosa para detectar fugas en las uniones.

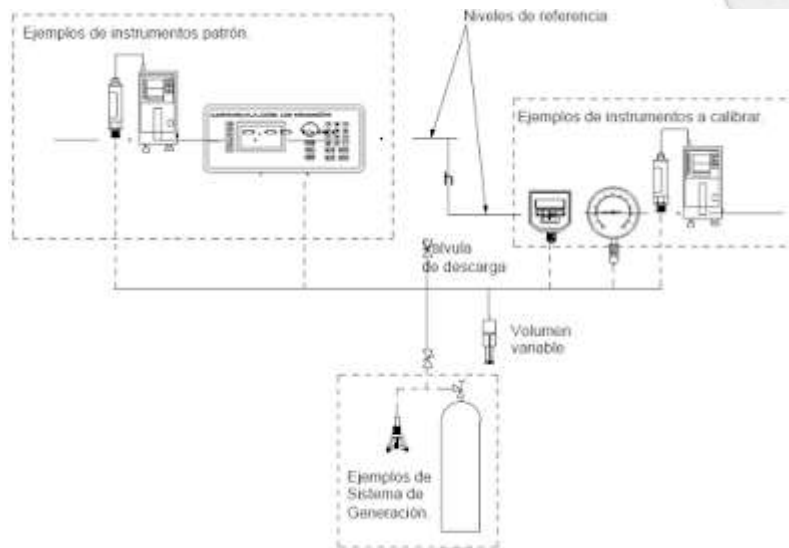
### ¿Cuáles son los pasos a seguir?

En esta y otras calibraciones estándar existen una serie de pasos ordenados a seguir:

1. Preparación del instrumento y los patrones
2. Prueba de conformidad de clase y desperezado (no siempre se realiza, yo aquí lo recomiendo)
3. Definición de los puntos de medida.
4. Calibración.
5. Toma y tratamiento de datos
6. Análisis de resultados y cálculo de incertidumbre.

### 1. Preparación del instrumento y los patrones:

- El primer paso es identificar el manómetro a calibrar con todos los datos necesarios (marca, modelo, número de serie, clase).
- Luego se debe realizar el conexionado, incluyendo el manómetro a calibrar, los patrones y el sistema de generación.



#### **la Calibración de Manómetros, Vacuómetros y Manovacúómetros (CEM)**

- Se recomienda en este punto realizar una prueba de fugas. Se debe presurizar todo el sistema. Si el fluido es gaseoso (aire, nitrógeno, etc) podemos utilizar una solución jabonosa para detectar fugas, especialmente en las uniones. Si el fluido es líquido (agua, aceite) detectaremos inmediatamente las fugas como pérdidas. En todos los casos se deben solucionar antes de proseguir.

### 2. Prueba de conformidad de clase y desperezado

Si bien no es un requisito excluyente, se recomienda la realización de esta breve prueba. Tiene como primer objetivo *desperezar* al instrumento, es decir, eliminar cualquier inercia mecánica por falta de movimiento habitual o por suciedad. Una buena forma es realizar una carrera ascendente y otra descendente rápidas. Aquí detectaremos también alguna posible traba mecánica por suciedad o rotura del instrumento. En este último caso no podemos continuar con la calibración. La prueba de conformidad de clase es una breve calibración en puntos claves que nos permite detectar

desvíos muy notorios. En general se generan las presiones correspondientes al de menor valor, al de mitad y al de mayor valor de la escala. Si observamos desvíos importantes queda a consideración del operario seguir adelante, ya que con seguridad el instrumento está fuera de clase.

### 3. Definición de los puntos de medida

Para definir los puntos en los que se realizarán las mediciones y el número de carreras, se toma como referencia la guía **DKD-R 6-1** mencionada anteriormente:

Secuencia	Clase (% de Span)	Puntos de Calibración (sin incluir el cero)	Carreras	
			Asc.	Desc.
A	< 0,1	9	2	2
B	0,1 ... 0,6	9	2	1
C	> 0,6	5	1	1

#### **Secuencias de calibración**

Recuerden que la clase de este tipo de instrumentos está expresada generalmente en el error máximo en porcentaje sobre fondo de escala. Es decir, si nuestro manómetro es de 10 bar, el error máximo es de 0,25% de 10 bar = 0,025 bar = 25 mbar.

En la industria es común encontrarnos con manómetros clase 0.5, clase 1 y hasta 2.5.

En general los puntos de medida se toman equiespaciados del 10% al 100% del intervalo de medición, a menos que se seleccionen puntos específicos representativos que el usuario desee por algún motivo. También es habitual llevar a valores enteros, o que coincidan con marcas graduadas, para minimizar la incertidumbre por apreciación.

Por ejemplo, si tenemos que calibrar un manómetro de 10 bar clase 1, debemos seleccionar 5 puntos más el cero. Si los seleccionamos equiespaciados, los puntos de calibración serán: 0, 2, 4, 6, 8, 10 para los que se realizarán 2 series (una ascendente y otra descendente)



#### 4. Calibración

Una vez despresado el manómetro y definidos los puntos de calibración, se procederá a calibrar el instrumento. Con el generador se irá entregando presión hasta alcanzar un valor cercano al primer punto definido de presión, A continuación, con el ajuste fino se modificará la presión hasta que la lectura del patrón o instrumento sea la deseada. Se recomienda fijar la indicación de la aguja del manómetro a los trazos de la escala cuando el manómetro a calibrar sea analógico, y por el contrario, fijar la indicación del patrón cuando el manómetro a calibrar sea digital.

En el caso de que el manómetro a calibrar sea analógico, la lectura del mismo se realizará después de haberle hecho vibrar ligeramente para evitar errores producidos por fricciones mecánicas. La medida será válida siempre que el sistema sea estable y no se observen saltos o variaciones en las indicaciones del Patrón e Instrumento. Se repetirá este paso con los siguientes puntos de calibración, siempre aumentando la presión hasta llegar al valor máximo definido. El mismo proceso se realizará, pero ahora en sentido de presiones descendentes hasta llegar al cero del manómetro. Se realizará la lectura del cero, siempre que sea posible, y se volverá a iniciar el ciclo.

Una vez finalizada la calibración y antes de quitar el montaje conviene analizar los datos obtenidos por si fuese necesario repetir algún punto de valor dudoso.

## 5. Toma y tratamiento de datos

Los datos mínimos que deberían figurar en la correspondiente hoja de calibración son:

- Identificación inequívoca de la calibración.
- Identificación del patrón y del instrumento.
- Lecturas del patrón e instrumento indicando el sentido en que se ha generado la presión.
- División de escala y resolución del manómetro.
- Anomalías detectadas antes o durante la calibración como pueden ser atascos de la aguja indicadora, saltos bruscos, etc.
- Fluido utilizado durante la calibración.
- Condiciones ambientales durante la calibración.
- Nivel de referencia, cuando sea significativo sobre los resultados finales.
- Posición del instrumento durante la calibración, cuando sea significativo sobre los resultados finales.
- Fechas de realización.
- Identificación del personal que realizó la calibración.
- Correcciones realizadas, como puede ser la de calibración del Patrón o la corrección por diferencia de alturas entre niveles de referencia.
- Deberán rechazarse de la calibración de los manómetros todas aquellas medidas que no cumplan las exigencias siguientes:
  1. Cualquier duda sobre la bondad de la medida por parte del operador.
  2. Todas aquellas medidas que se hagan fuera de las condiciones ambientales establecidas por el Laboratorio.
  3. Aquellas en que no se consiga una buena estabilidad.

## 6. Interpretación de los datos

Los valores se darán tabulados indicando:

- Presión de referencia.
- Valor medio de la indicación del instrumento.
- Correcciones o errores de calibración en cada punto.
- La incertidumbre para un factor de cobertura  $k = 2$  También se puede dar una incertidumbre máxima para todo el intervalo de calibración en lugar de dar una para cada punto.
- En el certificado de calibración, se deberá indicar dar la incertidumbre expandida y especificarse el valor de cobertura utilizado.

## Referências

- Intech Edição 74 , Transmissores de Pressão: sensores, tendências, mercado e aplicações, César Cassiolato, 2005
- Controle&Instrumentação - Edição nº 106, O Brasil quebrando as barreiras tecnológicas com a inovação – Transmissores de Pressão César Cassiolato, 2005
- Controle&Instrumentação - Edição nº 113, Especificando Transmissores de Pressão, César Cassiolato, Francisco Julião, 2006.
- Intech Edição 93 , Medições de Pressão: características e tecnologias, César Cassiolato, 2007
- Controle&Instrumentação - Edição nº 135, Medições de Pressão: Tudo o que você precisa saber, César Cassiolato, 2008
- Controle&Instrumentação - Edição nº 137, Medição de Vazão, César Cassiolato, Evaristo O. Alves, 2008
- Manuais de Operação e Treinamento dos transmissores de pressão Smar: LD301, LD302 , LD303 e LD400
- [www.smar.com.br](http://www.smar.com.br)

## Autoevaluación 4

1. En qué consiste un lazo de control proporcional
2. Cuáles son los errores en un control proporcional
3. Cómo se ajusta un controlador
4. Qué es un control combinado
5. Qué es un manómetro y un transmisor
6. Cómo se calibra un manómetro
7. Cómo se calibra un transmisor y qué debo tomar en cuenta

## Recomendaciones y conclusiones

Es imprescindible que los lectores apoyen este documento con vídeos y textos un poco más complejos como el de Instrumentación Industrial de Antonio Creus Sole, en su última versión, que habla sobre hmi y autómatas. Así de esta manera reforzar los conocimientos actuales y ajustar los conocimientos con las bibliografías recomendadas y clases presenciales.

Ahora bien para concluir, al iniciar el curso de esta materia la mayoría desconocíamos que es el Control y la Instrumentación, sus aplicaciones y la importancia que puede tener dentro de la industria. Al ser estudiantes de la carrera de Electrónica y futuros egresados, se nos presentarán casos o situaciones en el sector industrial donde vamos a hacer uso de los conocimientos sobre la Instrumentación y Control, por lo que es de suma importancia comprender sus conceptos fundamentales.

A lo largo de esta materia conocimos las propiedades que tiene un instrumento de medición y por lo tanto, saber seleccionar un instrumento con las propiedades requeridas o necesarias para el tipo de proceso donde se realizará la medición, así como también identificar y conocer los diferentes tipos de variables que existen en un proceso. Al realizar una medición de una variable se pueden presentar diversos errores al tomar las lecturas, por lo que tenemos que saber identificarlos y las técnicas para eliminarlos.

Unos de los temas importantes de esta unidad es la norma ISO, ya que la mayoría de las empresas en todo el mundo hacen uso esta norma, por lo que hay que tener conocimiento de ella, de sus normas, requisitos y estructura, ya que es fundamental al momento de controlar un proceso, al interpretar un diagrama o diseñarlo, para que no existan fallas o errores, pérdidas o inclusive accidentes dentro del área laboral y que puedan afectar a los ingresos de la empresa y a la integridad física de los trabajadores.