

## INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

La implementación física de los sistemas de control pasa en la práctica por seleccionar el equipamiento adecuado, particularmente sensores para medir las condiciones del proceso y válvulas para actuar sobre ellas, junto con otros elementos de transmisión y actuación. La idea de esta sección es echar una mirada a vuelo de pájaro sobre el vasto campo de la instrumentación industrial que permita una primera aproximación a los aspectos principales de la correcta selección del equipamiento.

Como primer comentario podemos decir que nunca tendremos un instrumento cien por ciento exacto. Dependiendo del instrumento y de las condiciones de aplicación los errores que introduzca serán despreciables o harán peligrar el sistema de control. Por eso se deberá evaluar cada caso para seleccionar el instrumento adecuado.

Además, el avance en materia de instrumentación es muy acelerado. Todos los días están apareciendo sensores y actuadores nuevos, así como sistemas de transmisión, que superan o complementan los existentes, o son más apropiados para alguna aplicación concreta en la industria.

### SENSORES

Los sensores se usan para monitorear un proceso y para el control de un proceso. Son elementos esenciales para la seguridad y para la operación de una planta con beneficios económicos, siempre y cuando hayan sido correctamente seleccionados e instalados. Los principios de funcionamiento que utilizan pueden ser muy diversos. Sin embargo hay aspectos que son definidos en forma general para todo tipo de sensores:

ASPECTO	COMENTARIOS
EXACTITUD (“Accuracy”) – Es el grado de conformidad entre el valor medido y el valor aceptado o ideal de una variable. Normalmente la exactitud de un sensor es reportada como el rango máximo de no exactitud (“inaccuracy”), incluyendo el nivel de significación (por ej. 95%).	La exactitud se expresa normalmente en unidades ingenieriles o como porcentaje del rango del sensor, p.ej., “termocupla con una exactitud de $\pm 1.5 K$ ”, u “orificio con exactitud de $\pm 3\%$ del máximo del rango”.
REPETIBILIDAD (“Repeatability”) – El grado de concordancia entre una serie de mediciones consecutivas de la misma variable (valor) en las mismas condiciones de funcionamiento acercándose en la misma dirección.	Los términos "acercándose en la misma dirección" significan que la variable va en aumento (o disminución) en el valor de todas las repeticiones del experimento.
REPRODUCIBILIDAD (“Reproducibility”) – El grado de concordancia entre una serie de mediciones consecutivas de la misma variable (valor) en las mismas condiciones de funcionamiento	A menudo se persigue un equilibrio entre precisión y reproducibilidad. El período de tiempo es suficientemente "largo" de modo que los cambios que ocurren durante largos tiempos de operación de la planta estén

## DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS

durante un período de tiempo, acercándose en ambas direcciones. Se expresa generalmente como no-reproducibilidad como un porcentaje del rango (intervalo).	incluidos. Incluye histéresis, banda muerta, deriva y repetitibilidad.
RANGO (“Range/Span”) - La mayoría de los sensores tienen un rango limitado dentro del cual puede ser medida una variable de proceso, definida por los valores de rango inferior y superior.	Por lo general, cuanto mayor sea el rango, más pobre es la precisión y reproducibilidad. Por lo tanto, los ingenieros deben seleccionar la gama más pequeña que satisface los requisitos del proceso. Seleccionamos los rangos que son fáciles de interpretar por parte del personal operativo, como 100-200 ° C, pero no 100 a 183 ° C. Si un reactor químico normalmente opera a 300 ° C, el ingeniero puede seleccionar un rango de 250-350°C. Si el reactor se puso en marcha desde la temperatura ambiente debería contarse con un sensor adicional con un rango de -50 a 400 ° C.
FIABILIDAD (“Reliability”) – La fiabilidad o confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo funcionará adecuadamente (según se especificó) durante un período de tiempo y bajo las condiciones de funcionamiento especificadas. Algunos sensores son necesarios por razones de seguridad o para asegurar la calidad del producto, y por lo tanto, deben ser muy fiables. La confiabilidad es afectada por el mantenimiento y la consistencia con el entorno del proceso.	Si la fiabilidad del sensor es muy importante, debe preverse la duplicación del mismo, de modo que una falla no implique la caída del sistema.
LINEALIDAD (“linearity”) – Es la cercanía a una línea recta en la relación entre la variable del proceso y la medida. La falta de linealidad no implica un sensor malo; si la no linealidad puede compensarse con una relación apropiada el efecto de la no linealidad puede eliminarse. Ejemplos típicos de cálculos compensatorios son la raíz cuadrada aplicada a un sensor de orificio para flujo o compensaciones.	Normalmente se reporta como no linealidad, esto es el máximo de desviación entre la curva de calibración y una recta posicionada de modo que esta desviación máxima se minimice.
MANTENIMIENTO (“maintenance”) – Los sensores requieren comprobación periódica de su funcionamiento y eventual reemplazo. Naturalmente, los costos de mantenimiento deben considerarse en la selección del equipamiento.	Particularmente importante para los analizadores “on-stream”.
Consistencia con el ambiente en que se lleva a cabo el proceso – La mayoría de los sensores son diseñados para trabajar en	Ejemplos para tomar precauciones: flotadores con líquidos con grasa o sólidos en suspensión; medidor de flujo de turbina

## DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS

---

condiciones específicas. Por ejemplo pueden estar diseñados para trabajar en una sola fase y no funcionan bien cuando se tienen sistemas multifásicos. En algunos casos hay que considerar medidas especiales de protección.	cuando hay un cambio abrupto en el flujo o queda líquido atrapado; sensores que son degradados por el material de proceso, etc.
DINÁMICA – Hay que considerar que siempre puede haber un cierto retardo en la respuesta del sensor, que debe ser minimizado, particularmente en aquellos sensores usados para control.	Cuando se requiere la extracción de una muestra para el análisis se introduce un gran retardo.
SEGURIDAD – Normalmente el sensor y el transmisor requieren potencia eléctrica. Por lo tanto hay que evitar ambientes que puedan tener gases inflamables que puedan explotar con una chispa.	Tener en cuenta las normas de seguridad.
COSTO– El ingeniero debe considerar siempre los costos en la toma de sus decisiones. En ocasiones la selección adecuada del sensor afecta los costos del proceso.	Recordar que los costos totales incluyen los costos de transmisión (cableado en planta), instalación, documentación, operaciones en planta y mantenimiento durante la vida útil del sensor.

### LOCALIZACIÓN DE LOS DISPLAYS DE MEDIDA

Las medidas deben estar disponibles para el personal de planta. Típicamente, los displays usan principios analógicos, representando una medida como posición en una barra gráfica o como línea de tendencia desde cierto tiempo atrás. Adicionalmente también puede mostrarse como número digital. Las medidas que son transmitidas a un sistema de control pueden ser almacenadas en una base de datos para su posterior uso o para calcular parámetros de monitoreo, por ejemplo rendimientos o coeficientes.

Display local – Se ubica en el emplazamiento donde está colocado el sensor. Esta información puede ser usada por el personal que monitorea el trabajo o los equipos. En general involucran costos bajos, porque no se requiere transmisión ni interfaces a sistemas digitales. Por el contrario la historia de medidas solo puede obtenerse con un registro manual.

Panel local – Algunos equipos son operados desde un panel local y los sensores están asociados a la unidad. Permiten al personal los arranques, paradas y mantenimiento del equipo. Deben contar con dispositivos que permitan acciones manuales.

Sala de control centralizada – Se operan muchos procesos desde una sala centralizada de control localizada a distancia significativa de los mismos. La medida debe convertirse a una señal (normalmente eléctrica) para la transmisión y debe reconvertirse a un número digital para la interfaz del sistema de control. Implica sistemas de cableado importantes.

Monitoreo remoto – En algunos casos los procesos pueden operarse sin la presencia humana en el lugar, transmitiendo la señal por radiofrecuencia.

Con el agregado de microprocesadores, los nuevos sensores pueden realizar tareas extras a las de los sensores tradicionales: conversión y transmisión digital de la señal; realización de diagnósticos sobre el funcionamiento del propio sensores; alertas; acondicionamiento de la señal para eliminar ruidos o picos no deseados; reconfiguración para adaptarse a nuevas condiciones operativas.

### MEDIDA DE TEMPERATURA

La temperatura puede medirse por muchos métodos y es necesario conocer las fortalezas y limitaciones de cada sensor para una correcta selección. En casi todos los casos el sensor de temperatura está protegido del material de proceso para prevenir interferencias y eliminar daños. Suele utilizarse entonces una termobarrera, mecánica y químicamente resistente, que eventualmente permite remover el sensor sin tener que parar la operativa del proceso.

*Termocuplas* – Cuando las uniones entre dos metales distintos están a diferentes temperaturas se crea un potencial o fem entre ellas. La unión fría, considerada como el punto de referencia, se mantiene a una temperatura conocida, y la otra unión se localiza en el punto donde debe determinarse la temperatura. La diferencia de temperaturas puede determinarse a partir del potencial medido utilizando tablas o relaciones polinómicas. Las termocuplas presentan un buen balance entre precisión, fiabilidad y costo y son uno de los dispositivos de medida de temperatura más ampliamente utilizados en la industria de procesos.

*Detectores de Resistencia (“Resistance Temperature Detectors”) RTD* – La Resistencia de muchos metales aumenta con la temperatura y este efecto es utilizado en los RTD. El efecto está dado por

$$R_T = R_{T_0}(1 + \alpha T)$$

donde  $R_T$  es la resistencia a la temperatura  $T$ ,  $R_{T_0}$  la resistencia a  $0^\circ\text{C}$  y  $\alpha$  el coeficiente de temperatura del metal. En ocasiones deben usarse relaciones no lineales. Los RTD son usados comúnmente para aplicaciones en que se necesita una exactitud mayor que la que dan las termocuplas.

*Termistores* – Este tipo de sensores es similar a los RTD pero en los casos en que la resistencia disminuye con un aumento de temperatura. Las relaciones suelen altamente no lineales pero los termistores pueden proporcionar medidas muy precisas en pequeños rangos y a bajas temperaturas.

*Bimetálicos* – Los metales se expanden con la temperatura y la tasa de expansión difiere según los metales. Se construye una espiral con dos tiras de metales diferentes y a medida que aumenta la temperatura la espiral se estira; el cambio de posición puede usarse para medir la temperatura. Son sensores robustos y de bajo costo que pueden usarse para medidas locales y para sistemas de control on-off, por ejemplo termostatos.

*Sistemas rellenos con un fluido* – El fluido se expande al aumentar la temperatura y ejerce presión que puede utilizarse para determinar la temperatura.

## Sumario de sensores de temperatura

Tipo de Sensor	Límites de Aplicación (°C)	Exactitud <sup>1,2</sup>	Dinámica t (s)	Ventajas	Desventajas
<i>Termocuplas</i>					
<b>tipo E: chromel-constantan</b>	-100 a 1000	±1.5 or 0.5% para 0 a 900 °C	ver nota 3	-buena reproducibilidad -amplio rango	-rango mínimo de 40 °C - temperatura vs. fem no exacta lineal -deriva en el tiempo -baja fem corrompida por ruido
<b>tipo J: iron-constantan</b>	0 a 750	±2.2 o 0.75%			
<b>tipo K: chromel-nickel</b>	0 a 1250	±2.2 o 0.75%			
<b>tipo T: copper-constantan</b>	-160 a 400	±1.0 o 1.5% para -160 a 0 °C			
<b>RTD</b>	-200 a 650	0.15 + 0.2 T	Ver nota 3	-gran exactitud -es posible pequeño rango -linealidad	-autocalentamiento -poco resistente -error de autocalentamiento
<b>Termistor</b>	-40 a 150	± 0.10 °C	ver nota 3	-gran exactitud -pequeña deriva	-altamente no lineal -solo pequeño rango -poco resistente -deriva
<b>Bimetálico</b>		± 2%		-bajo costo -resistente	display local
<b>Sistema relleno</b>	-200 a 800	± 1%	1 a 10	-simple y bajo costo -sin riesgos	-no altas temperaturas -sensible a presión externa

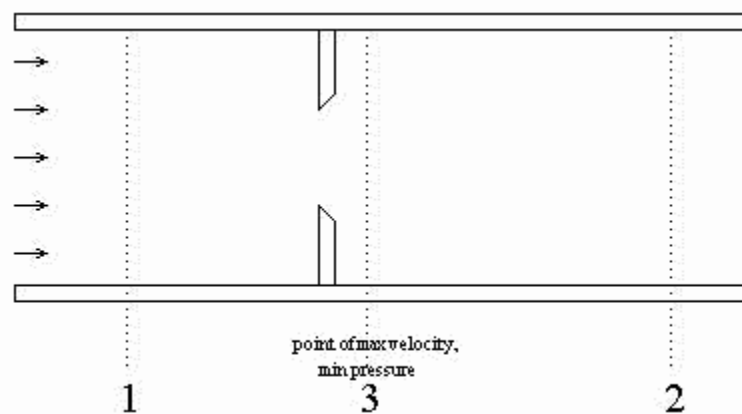
### Notas:

1. La exactitud se mide en °C o % del rango, el más grande de los dos.
2. Con los RTDs, la inexactitud aumenta en forma aproximadamente lineal con la desviación de la temperatura respecto a 0 °C.
3. La dinámica depende fuertemente de la protección o termobarrera (material, diámetro y espesor de pared), la localización del elemento en la protección (rodeado de aire, en un fluido, etc). Valores típicos están entre 2 y 5 segundos para altas velocidades de fluido.

## MEDIDA DE FLUJO

La medida de flujo es crítica en la industria de proceso. Los sistemas de flujo requieren energía y los sensores de flujo pueden introducir una pequeña pérdida de carga. La mayoría de los sensores requieren un mínimo de sección recta para funcionar correctamente. En lo que sigue se considera que los fluidos son límpidos; para slurries y para flujos en canales abiertos hay que introducir otras consideraciones.

Muchos sensores tienen su base en la caída de presión o pérdida de carga de un fluido a través de una resistencia. La relación viene dada por la ecuación de Bernoulli, asumiendo que son despreciables los cambios de energía potencial, el trabajo sobre el sistema y las pérdidas de calor.



**Figura 1.** Medidor de Orificio

Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{1}{2g} v_1^2 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{1}{2g} v_3^2 + \Sigma f$$

donde  $\Sigma f$  representa la pérdida por fricción, que normalmente se desprecia. Esta ecuación puede simplificarse y reorganizarse para dar

Ecuación general de los medidores de carga:

$$F_1 = A_1 V_1 = C_{meter} Y A_3 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_3)}{\rho(1 - A_3^2 / A_1^2)}}$$

El coeficiente del medidor  $C_{meter}$  tiene en cuenta las no idealidades, incluyendo las pérdidas por fricción y depende del tipo de medidor, la relación entre las áreas transversales y el número de Reynolds. El factor de compresibilidad  $Y$  toma en cuenta la expansión de los gases, es 1.0 para fluidos incompresibles. Estos dos factores pueden estimarse por correlaciones o determinarse mediante una calibración.

Relación para un medidor de carga instalado:

$$F = C_0 \sqrt{\frac{(P_1 - P_3)}{\rho_0}}$$

Relación para un medidor de carga instalado si la densidad es constante:

$$F = C_0 \sqrt{P_1 - P_3}$$

Relación para un medidor de carga instalado, para gases con peso molecular constante:

$$F = C_0 \sqrt{\frac{(P_1 - P_3)}{\rho_0}} \sqrt{\frac{P_0 T}{P T_0}}$$

El flujo determinado tomando la raíz cuadrada de la diferencia de presiones puede medirse de muchas maneras. En el laboratorio pueden usarse tubos en U; en la industria sensores de diafragma a cada lado. La baja presión en el punto de alta velocidad genera la posibilidad de que el líquido vaporice parcialmente (“flashing”), pudiendo retornar como líquido si aumenta la presión (cavitación).

Algunos medidores de carga típicos son: Orificio, Venturi, Tobera, Codo, Pitot.

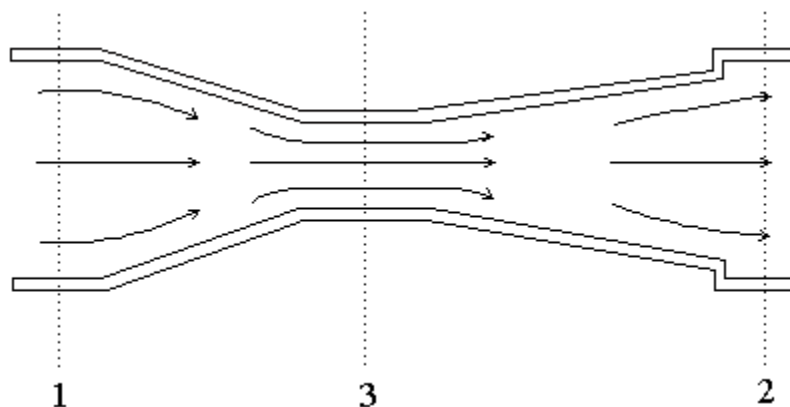


Figura 2 Venturi

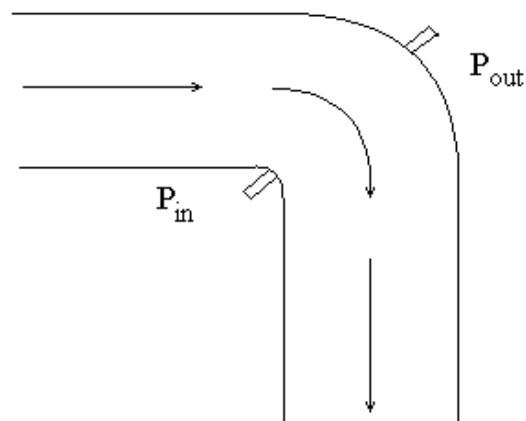
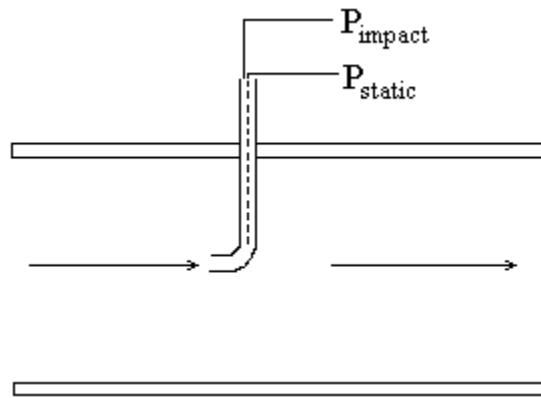
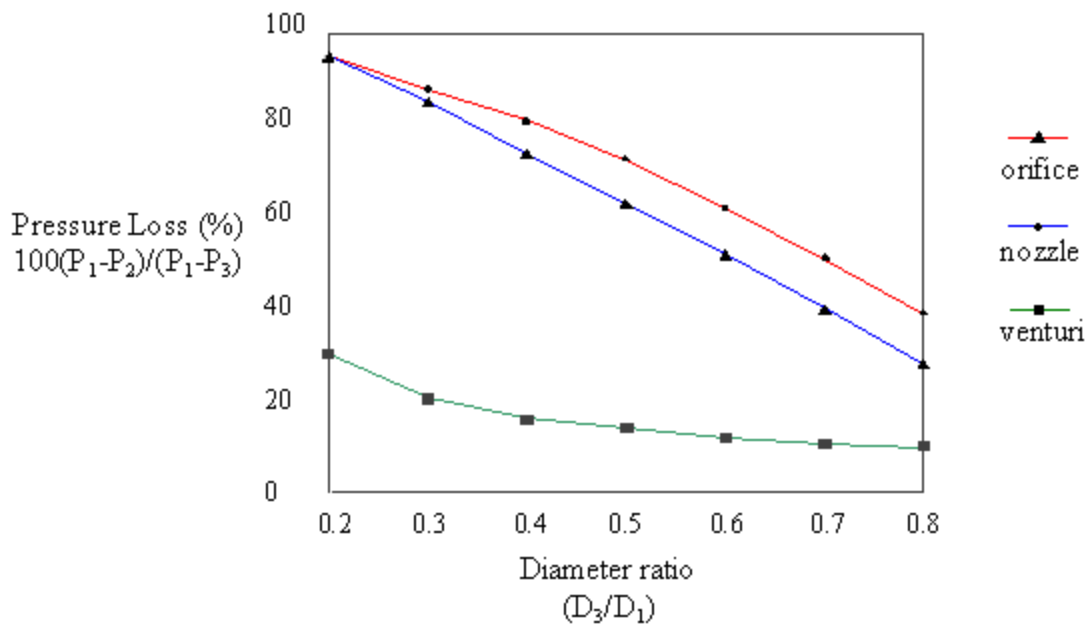


Figura 3 Codo



**Figura 4** Pitot



**Figura 5** Pérdidas de carga

Otros sensores de flujo basados en distintos principios que la pérdida de carga son:

- Turbina: la frecuencia de rotación de la turbina se usa para determinar el flujo, no debe usarse para slurries o sistemas que experimenten grandes y rápidas variaciones de presión o flujo.
- Generador de vórtices: Se forman al introducir un cuerpo en el tubo de manera oscilante. La frecuencia de generación es proporcional al flujo volumétrico.
- de desplazamiento positivo: se mide el número de elementos por unidad de tiempo desplazados (ejemplo: “wet test meter”).