



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Sensores de Presión.

EL53A

Taller de Proyecto en Control I

Curso : EL53A
Profesor : Jorge López
Alumna : Marcela Vizcay
Fecha : 3 de Octubre, 2005



ÍNDICE

Índice	.....	1
1. Introducción.	.....	2
2. Objetivos.	.....	3
3. Conceptos Previos.		
Especificación de un Sensor	.....	4
¿Como escoger un sensor?	.....	4
4. Conceptos Generales.		
Presión	.....	7
Unidades de medida	.....	8
Principios Físicos	.....	10
5. Instrumentos de Medición		
Mecánicos	.....	13
Columna de Líquido	.....	13
Cisterna	.....	13
Barómetro	.....	14
Inclinada	.....	14
Tubo de Bourdon	.....	15
Diafragma	.....	17
Fuelle	.....	17
Electromecánicos	.....
Resistivo	.....	19
Inductancia Variable	.....	19
Reluctancia Variable	.....	20
Capacitivo	.....	20
Galgas Extensométricas	.....	21
Electrónicos	.....	24
Capacitivo	.....	24
Efecto Hall	.....	24
Piezorresistivo	.....	25
Monolítico	.....	25
Sensor Diferencial	.....	26
8. Bibliografía y Referencias	.....	29



INTRODUCCIÓN

La presión, junto con la temperatura, constituyen las variables que más frecuentemente se miden y controlan en los procesos químicos industriales. Los elementos primarios que se emplean en estos ambientes son fundamentalmente de dos tipos:

- Elementos Mecánicos
- Elementos Neumáticos
- Elementos Electromecánicos
- Elementos Electrónicos

La magnitud de presión es una de las pocas con un intervalo de medición que rebasa las 19 décadas, desde $1 \cdot 10^{-10}$ [Pa] hasta $2 \cdot 10^9$ [Pa].

Las mediciones de presión son las más importantes que se hacen en la industria sobre todo en industrias de procesos continuos, como el procesamiento y elaboración de compuestos químicos. La cantidad de instrumentos que miden la presión puede ser mucho mayor que la que se utiliza en cualquier otro tipo de instrumento.

En la técnica de procesos, por ejemplo, entre un 30 y un 40 % de todas las mediciones son mediciones de presiones. La presión que se acumula hasta que empieza el flujo y la presión de retención son magnitudes importantes en la neumática. Las unidades de mantenimiento utilizadas en sistemas neumáticos tienen que estar equipadas con un manómetro y una unidad de ajuste de la presión. Además de los cojinetes deslizantes y rodamientos utilizados en el sector de la construcción de máquinas y equipos, también existen cojinetes neumáticos en los que una película de aire consigue que los movimientos se ejecuten sin fricción y desgaste.

El cuerpo de estos cojinetes neumáticos tiene una gran cantidad de taladros obtenidos mediante rayos láser y por los que sale el aire comprimido. A modo de alternativa también se recurre a cuerpos de metales porosos. Estos cojinetes funcionan con aire comprimido, por lo que es necesario controlar ininterrumpidamente la presión y el flujo del aire. Si los parámetros de funcionamiento no son correctos, es posible que se dañen los cojinetes.

La presión es una fuerza que ejerce sobre un área determinada, y se mide en unidades de fuerzas por unidades de área. Esta fuerza se puede aplicar a un punto en una superficie o distribuirse sobre esta. Cada vez que se ejerce se produce una deflexión, una distorsión o un cambio de volumen o dimensión.

Las mediciones de presión pueden ser desde valores muy bajos que se consideran un vacío, hasta miles de toneladas de por unidad de área.

Los principios que se aplican a la medición de presión se utilizan también en la determinación de temperaturas, flujos y niveles de líquidos. Por lo tanto, es muy importante conocer los principios generales de operación, los tipos de instrumentos, los principios de instalación, la forma en que se deben mantener los instrumentos, para obtener el mejor funcionamiento posible, cómo se debe usar para controlar un sistema o una operación y la manera como se calibran.

Para medir la presión se utilizan sensores que están dotados de un elemento sensible a la presión y que emiten una señal eléctrica al variar la presión o que provocan operaciones de conmutación si esta supera un determinado valor límite. Es importante tener en cuenta la presión que se mide, ya que pueden distinguirse los siguientes tipos:

- **Presión absoluta**
- **Presión diferencial**
- **Sobrepresión**



OBJETIVOS

Estudiar los sensores de presión, utilizados en áreas húmedas. En particular:

- Conocer distintas definiciones de presión.
- Repasar conceptos generales acerca de instrumentación.
- Conocer tipos de sensores de presión.
- Revisar los principios de funcionamiento utilizados para medir presión.
- Tópicos en relación al montaje, fabricación y especificación.

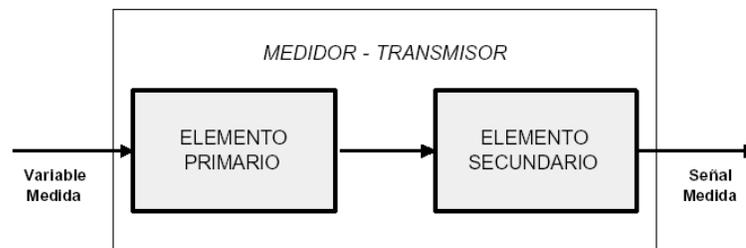


CONCEPTOS PREVIOS

Se llama **sensor** al instrumento que produce una señal, usualmente eléctrica (antaoño se utilizaban señales hidráulicas), que refleja el valor de una propiedad, mediante alguna correlación definida (su *ganancia*).

En términos estrictos, un **sensor** es un instrumento que no altera la propiedad sensada. Por ejemplo, un sensor de temperatura sería un instrumento tal que no agrega ni cede calor a la masa sensada, es decir, en concreto, sería un instrumento de masa cero o que no contacta la masa a la que se debe medir la temperatura (un termómetro de radiación infrarroja, p.e.) .

Existe, además, el concepto estricto de **transductor**: un instrumento que convierte una forma de energía en otra (o una propiedad en otra). Por ejemplo, un generador eléctrico en una caída de agua es un conocido transductor de energía cinética de un fluido en energía eléctrica; sobre esta base se podría pensar, por ejemplo, en un transductor de flujo a señal eléctrica consistente de un pequeño generador a paletas movilizado por el caudal a medir.



Especificación de un sensorⁱ

Todos los instrumentos deben ser especificados a un punto tal que aseguren la operación del proceso y que permita la estimación de sus costos. Estas especificaciones se pueden sistematizar, aplicándolas tanto a sistemas sensores como a sistemas actuadores, sin que todas y cada una de las definiciones que siguen a continuación sean aplicables a todo sensor o actuador. Sin embargo, las definiciones conforman parte del léxico básico del proyecto de instrumentación.

- Precisión (o exactitud)
- Error
- Error de No-Linealidad
- Repetibilidad
- Reproducibilidad.
- Sensibilidad
- Resolución
- Rango
- Rango de Trabajo u Operación
- Banda Muerta
- Corrimiento del Cero
- Tiempo de Respuesta
- Histéresis
- Función de Transferencia

¿Cómo proceder al seleccionar los sensores más apropiados?ⁱⁱ

- 1 Elegir el principio físico mas apropiado.
- 2 Determinar el margen de medición necesario.
- 3 Comprobar el posible cambio de las magnitudes medidas.
- 4 Definir el grado de resolución de la señal medida.
- 5 Determinar el valor mínimo que deberá medirse.

- 6 Definir el margen de error admisible, causado por el comportamiento estático y dinámico.
- 7 Determinar las medidas de apantallamiento (compatibilidad electromagnética).



8 Determinar los medios necesarios para la amplificación y evaluación de la señal de medición.

9 Evaluar la seguridad del funcionamiento, la fiabilidad, la duración y el costo de mantenimiento.

10 Considerar el coste del sensor

Aspectos a tener en cuenta al decidir si los sensores son apropiados para una aplicación determinada:	
<ul style="list-style-type: none"> • Tiempos de respuesta, tiempos de reacción, velocidad de conmutación • Sistema de conexiones (sistema de 2, 3 ó 4 hilos, conexión serie o paralela, etc.) • Seguridad del funcionamiento, frecuencia de fallos, fiabilidad • Posibilidad de control automático) • Margen de la temperatura de funcionamiento • Posibilidad de ajustar los puntos de detección, la sensibilidad y el umbral de respuesta • Resolución, precisión de la medición • Resistencia a la corrosión • Duración, vida útil • Límites del rendimiento, margen de rendimiento • Propiedades del objeto (material, grado de remisión, estructura de la superficie, etc.) • Montaje (dimensiones, masa, condiciones para el montaje, adaptación al lugar de la detección) • Redundancia de la unidad de evaluación de datos • Ausencia de reacciones secundarias 	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia de detección • Variación del punto de detección, histéresis del punto de detección • Clase de protección • Alimentación de tensión (tensión de funcionamiento, fluctuación de la tensión, picos de tensión, • Supresión de interferencias (insensibilidad frente a interferencias externas, tales como vibraciones, golpes, luz externa, etc.) • Disponibilidad • Resistencia a temperaturas • Protección ante sobrecargas (anticortocircuitaje, polos inconfundibles, resistencia a sobrecargas) • Economía (relación entre costo y rendimiento, incluyendo los costos de montaje y puesta en funcionamiento) • Homologación para aplicaciones especiales (sala limpia, resistencia a explosiones, protección de operarios, etc.) • Precisión de repetición del punto de detección

Tabla1: Aspectos a considerar al momento de elegir un sensor apropiado a una aplicación específica.



CONCEPTOS GENERALES.

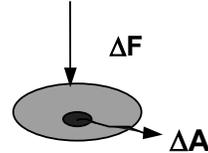
Presión

La presión es una fuerza que ejerce sobre un área determinada, y se mide en unidades de fuerzas por unidades de área. Esta fuerza se puede aplicar a un punto en una superficie o distribuirse sobre esta. Cada vez que se ejerce se produce una deflexión, una distorsión o un cambio de volumen o dimensión.

Las mediciones de presión pueden ser desde valores muy bajos que se consideran un vacío, hasta miles de toneladas de por unidad de área.

Se define **presión media** como la razón entre la fuerza normal que actúa sobre un área plana y dicha área:

$$p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$



La fuerza que ejerce un fluido en equilibrio sobre un cuerpo sumergido en cualquier punto es perpendicular a la superficie del cuerpo. La presión es una magnitud escalar y es una característica del punto del fluido en equilibrio, que dependerá únicamente de sus coordenadas.

Es importante tener en cuenta la presión que se mide, ya que pueden distinguirse los siguientes tipos:

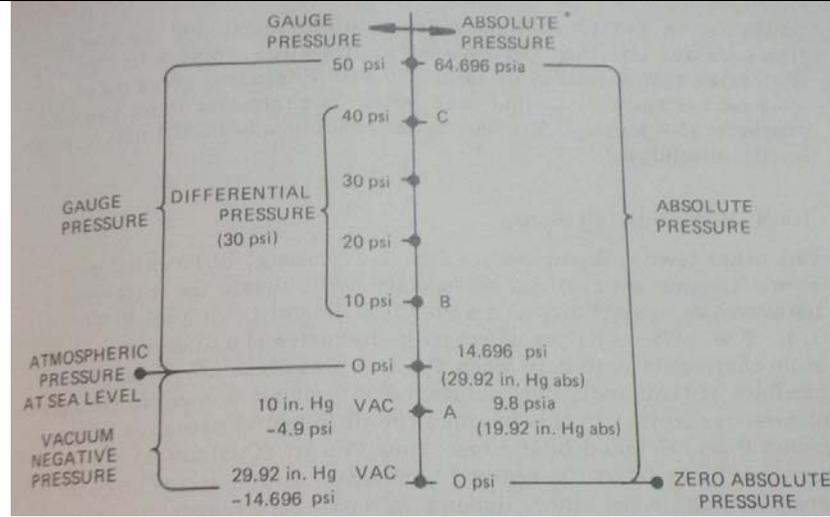
- **Presión absoluta:** Presión comparada con el valor cero del vacío absoluto ($p_{abs} = 0$).
- **Presión Atmosférica (Presión Barométrica):** Es la Presión ejercida por la atmósfera terrestre. Varía ligeramente con las condiciones meteorológicas y decrece con la altitud. Al nivel del mar la presión atmosférica es de 1.033 [kp/cm²], 101.3[kPa], 760 [mm de Hg] o 1 [atmósfera]. Estos valores se conocen como los de presión atmosférica normal.
- **Presión diferencial:** Presión que representa la diferencia entre dos presiones absolutas ($p_1 - p_2$)
- **Sobrepresión (Presión Relativa, Positiva):** Presión en función de la presión atmosférica, considerándose esta como valor cero. Los detectores que miden esta presión se llaman sensores de presión relativa.
- **Vacío (Presión Negativa Relativa):** El vacío es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica y la presión absoluta, cuando esta es menor a la atmosférica.

Así se puede concluir:

$$P_{Absoluta} = P_{Manométrica} + P_{Atmosférica}$$

Evidentemente es imposible una presión absoluta negativa. Por lo común los manómetros se diseñan para medir intensidades de presión por encima o por debajo de la presión atmosférica, que se emplea como base.

Las presiones medidas en este modo se denominan presiones relativas o manométricas. Las presiones manométricas negativas indican la cantidad de vacío y en condiciones normales; al nivel del mar; son posible presiones de hasta -14,7 litros por pulgadas cuadradas (pero no más bajos) (-1 atmósfera).



Unidades de Medida

En el sistema internacional de medidas, está estandarizada en Pascales

$$1[\text{Pascal}] = 1 \left[\frac{\text{Newton}}{\text{m}^2} \right]$$

En los países de habla inglesa se utiliza

$$1[\text{PSI}] = 1 \left[\frac{\text{Pound}}{\text{inch}^2} \right]$$

La equivalencia entre la unidad de medida inglesa y la del sistema internacional de medidas resulta

$$1[\text{PSI}] = 6.985[\text{KPascal}]$$

	Pascal	bar	N/mm ²	kp/m ²	kp/cm ²	atm	Torr
1Pa (N/m²)	1	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	0.102	0.102×10 ⁻⁴	0.987×10 ⁻⁵	0.0075
1bar (daN/cm²)	100.000	1	0.1	10200	1.02	0.987	750
1 N/mm²	10 ⁶	10	1	1.02×10 ⁵	10.2	9.87	7500
1 kp/m²	9.81	9.81×10 ⁻⁵	9.81×10 ⁻⁶	1	10 ⁻⁴	0.968×10 ⁻⁴	0.0736
1 kp/cm² (1 at)	98100	0.981	0.0981	10000	1	0.968	736
1 atm (760 Torr)	101325	1.103	0.1013	10330	1.033	1	760
1 Torr (mmHg)	133	0.00133	1.33×10 ⁻⁴	13.6	0.00132	0.00132	1

Tabla 2: Conversión de Unidades de Medidas

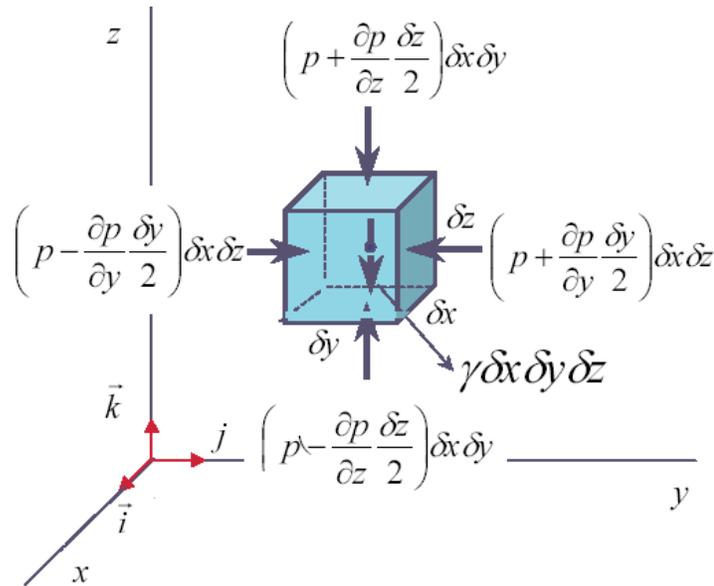


Unidades columna de líquido	Pa
1 mmH ₂ O (~4 °C) (~1 000 kg/m ³)	9,806 65
1 mmH ₂ O (4 °C) (999,972 kg/m ³)	9,806 380
1 mmH ₂ O (60 °F)	9,797 0
1 mmH ₂ O (20 °C)	9,789 1
1 mmH ₂ O (25 °C)	9,777 7
1 inH ₂ O (~4 °C) (~1 000 kg/m ³)	249,088 91
1 inH ₂ O (39,2 °F)	249,082 0
1 inH ₂ O (60 °F)	248,840 0
1 inH ₂ O (20 °C)	248,64
1 inH ₂ O (25 °C)	248,35
1 ftH ₂ O (39,2 °F)	2 988,980
1 mmHg (0 °C)	133,322 368
1 Torr	133,322 368
1 inHg (0 °C) (ITS-90)	3 386,388
1 inHg (32 °F)	3 386,380
1 inHg (60 °F)	3 376,850
760 mmHg (0 °C) (exacto)	101 325
29,921 26 inHg (32 °F) (exacto)	101 325

Tabla 3: Conversión de Unidades de Medidas



Principios Físicos



Según la figura la variación de presión entre dos puntos resulta:

$$-\nabla p - \gamma \vec{k} = \rho \vec{a}$$

Si se considera un fluido en reposo (aceleración nula), además si la presión no depende ni de x ni de y tendremos la siguiente colección de relaciones:

$$\nabla p + \gamma \vec{k} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \wedge \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

Con lo cual se llega a:

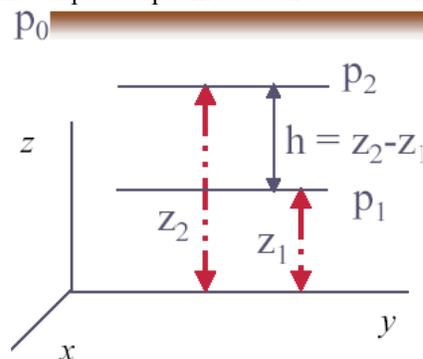
$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\gamma$$

Donde γ es el peso específico. Si el fluido es incompresible

$$\gamma = \rho g$$

En la mayoría de las aplicaciones las variaciones en g se desprecian, el peso específico variará como consecuencia de variaciones en la densidad del fluido.

En líquidos también se desprecian las variaciones de densidad incluso para grandes distancias verticales, así que se considera constante al peso específico. Con todo esto resulta





$$\int_{p_1}^{p_2} dp = - \int_{z_1}^{z_2} \gamma dz$$

$$(p_2 - p_1) = -\rho g(z_2 - z_1)$$

$$p_1 - p_2 = \rho g h$$

Si el fluido no es incompresible (como un gas por ejemplo) se tendrá:

$$p = \rho RT$$

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{gp}{RT}$$

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = -\frac{g}{R} \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{T}$$

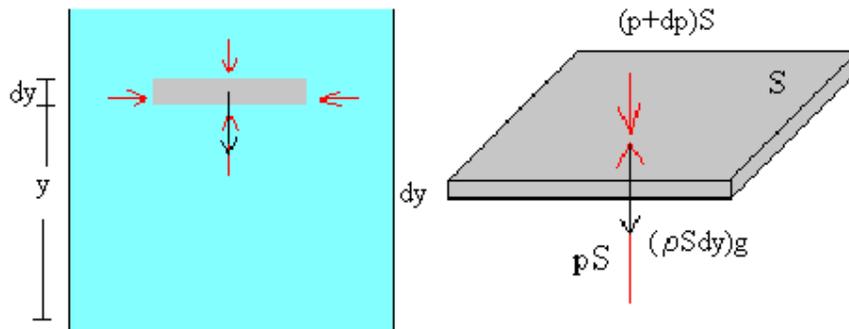
En condiciones isotermas de temperatura se concluye:

$$p_2 = p_1 \exp\left(-g \frac{h}{R}\right)$$

Variación de la presión con la profundidad

Consideremos una porción de fluido en equilibrio de altura dy sección S , situada a una distancia y del fondo del recipiente que se como origen. Las fuerzas que mantienen en equilibrio a dicha porción fluido son las siguientes:

- El peso, que es igual al producto de la densidad del fluido, por su volumen y por la intensidad de la gravedad, $(r S \cdot dy)g$.
- La fuerza que ejerce el fluido sobre su cara inferior, pS
- La fuerza que ejerce el fluido sobre su cara superior, $(p+dp)S$



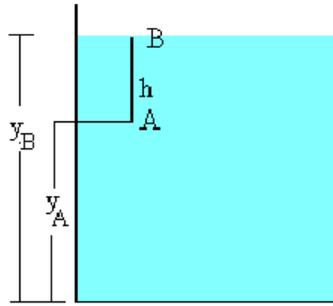
La condición de equilibrio establece

$$(rSdy)g + pS = (p + dp)S$$

$$dp = -rgdy$$

Integrando entre los límites que se muestran en el esquema siguiente se tiene:

$$p_B - p_A = \rho g y_A - \rho g y_B$$



Si el punto B está en la superficie y el punto A está a una profundidad h . La ecuación anterior se escribe de forma más cómoda.

Ahora, p_0 es la presión en la superficie del fluido (la presión atmosférica) y p presión a la profundidad h .

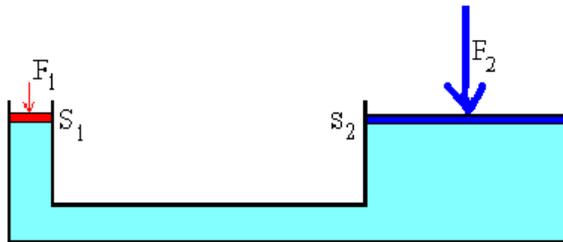
$$p = p_0 + \rho gh$$

La ecuación fundamental de la estática de fluidos afirma que la presión depende únicamente de la profundidad. El principio de Pascal afirma que cualquier aumento de presión en la superficie de un fluido se transmite a cualquier punto del fluido. Una aplicación de este principio es la prensa hidráulica.

Émbolos a la misma altura

Se aplica una fuerza F_1 a un pequeño émbolo de área S_1 . El resultado es una fuerza F_2 mucho más grande en el émbolo de área S_2 . Debido a que la presión es la misma a la misma altura por ambos lados, se verifica que

$$p = \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$



$$\frac{n_1 mg}{\pi r_1^2} = \frac{n_2 mg}{\pi r_2^2}$$

$$\frac{n_1}{r_1^2} = \frac{n_2}{r_2^2}$$

Para mantener a la misma altura los dos émbolos, tenemos que poner un número de pesas sobre cada émbolo de modo que se cumpla la relación dada en el apartado anterior.

Donde n_1 y n_2 es el número de pesas que se ponen en el émbolo izquierdo o derecho respectivamente, r_1 y r_2 son sus radios respectivos, m es la masa de cada pesa.



INTRUMENTOS DE MEDICION

1. Elementos Mecánicos

Podemos clasificarlos en dos tipos .

- Elementos primarios que miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocida.
 - Barómetro de Cubeta
 - Manómetro de tubo U
 - Manómetro de Tubo inclinado
 - Manómetro de toro pendular
 - Manómetro de Campana.

- Elementos primarios elásticos que se deforman por la presión interna del fluido que contienen.
 - Tubo Bourdon
 - Elemento en Espiral
 - Elemento Helicoidal
 - Diafragma Fuelle

a) Columna de Líquido

Es el instrumento de medición de presión mas antiguo, y de los mas exactos en el rango de alcance 500[Pa] a 200[kPa]. La selección de la configuración de la columna y de l fluido manométrico permite la medición de todos los tipos de presión. La ventajas de éste instrumento es su versatilidad.

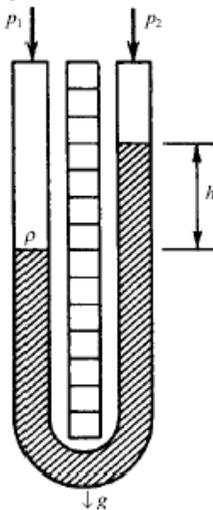


Figura 1: Columna de Liquido tipo U.

La ecuación que rige la medición de presión con este tipo de columnas es:

$$p_1 = \rho gh + p_2$$

Si la columna de fluido en el nivel superior está abierta a la atmósfera ($p_2 =$ presión barométrica) tendremos que p_1 es una presión relativa. Si la columna es sometida a vacío (p_2 es cero absoluto), entonces p_1 es la presión absoluta (teniéndose un barómetro).

El manómetro en forma de "U" conforma, según se especificó, un sistema de medición más bien absoluto y no depende, por lo tanto, de calibración. Esta ventaja lo hace un artefacto muy común. Su desventaja principal es la longitud de tubos necesarios para una medición de presiones altas y, desde el punto de vista de la instrumentación de procesos, no es trivial transformarlo en un sistema de transmisión remota de información sobre presión.

b) Cisterna

Fluido manométrico normalmente de mercurio y agua con alcances de 150 a 3000 [mm] de altura utilizando reglas con división mínima de 1[mm] a 0,1[mm]. Se utiliza para la medición de presión relativa y negativa.

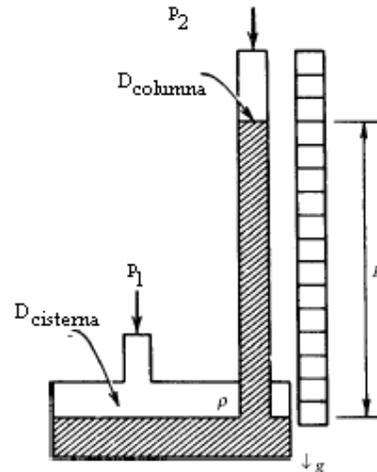


Figura 2: Columna de Líquido tipo Cisterna.

Las columnas de tipo cisterna requieren que la regla esté compensada para corregir la fracción de altura que se mueve con respecto a la posición inicial y que no es posible reajustar cuando la cisterna es opaca. La corrección resulta:

$$p_1 - p_2 = \rho g L \left(1 + \left(\frac{D_{columna}}{D_{cisterna}} \right)^2 \right)$$

c) Barómetro.

El barómetro de mercurio consiste de un tubo largo de vidrio cerrado en un extremos , evacuado y lleno de mercurio. Existen básicamente dos tipos de barómetros de mercurio , el tipo Kew y el tipo Fortín. En el tipo Kew se requiere de llenar el tubo con una cantidad exacta de mercurio dado que es posible observar solamente el menisco en la columna de medición, mientras que el menisco en la cisterna queda oculto, lo cual inhabilita el ajuste por diferencias de cantidad de Mercurio. En el barómetro tipo Fortín es posible ajustar el nivel en el menisco inferior a través de la cisterna que es transparente, el barómetro de mercurio tipo Fortín es el mas exacto y difundido.

El barómetro es un altímetro, a medida que se va ascendiendo en altitud , la presión atmosférica va disminuyendo. Los barómetros de mercurio miden la presión atmosférica local, no la informada a nivel del mar (que oscila alrededor de los 1013,25[Pa] ó 760[mmHg]) y que es la utilizada en la calibración de altímetros y en las estaciones metereológicas. Para conocer la corrección barométrica se requiere aplicar una corrección por altura

$$P_{BAROMETRICA} = P_{ATMOSFERICA} + C_{ALTITUD}$$

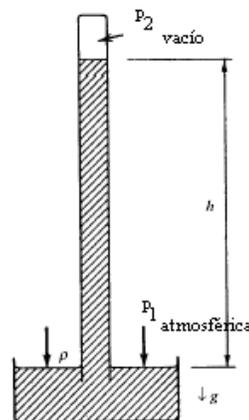


Figura 3: Barómetro de Mercurio.

d) Inclinadas.

Se utilizan con aceite (con densidad relativa menor al agua (<1)) para aumentar la sensibilidad de la dedición en alcances de 25 a 100 [mm] y división mínima hasta de 1[mm]. En el ámbito industrial se les



conoce como manómetros de tiro, dado que son utilizados para medir la presión de combustión a las calderas que arrastra gases quemados hacia el exterior a través de la chimenea. Cuentan con un nivel, con el propósito e ajustar el ángulo de inclinación α , para el cual fue diseñada la columna.

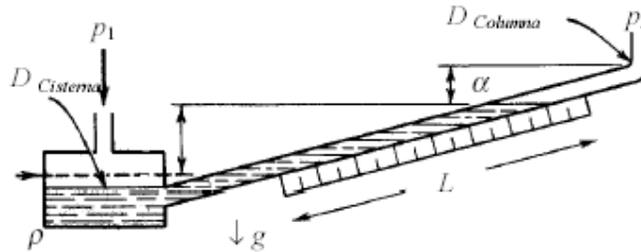


Figura 4: Columna Inclinada.

La ecuación que rige la correlación que se aplica en la columna inclinada es

$$p_1 - p_2 = \rho g L \left(1 + \left(\frac{D_{columna}}{D_{cisterna}} \right)^2 \right) \sin(\alpha)$$

e) Tubo de Bourdon

El método más usual para medir presiones es por medio del barómetro de Bourdon, que consiste en un tubo aplanado de bronce o acero curvado en arco. A medida que se aplica presión al interior del tubo, éste tiende a enderezarse, y éste movimiento se transmite a un cuadrante por intermedio de un mecanismo amplificador adecuado. Los tubos Bourdon para altas presiones se hace de acero. Puesto que la exactitud del aparato depende en gran parte del tubo, sólo deben emplearse tubos fabricados de acuerdo con las normas más rigurosas y envejecidos cuidadosamente por el fabricante. Es costumbre utilizar los manómetros para la mitad de la presión máxima de su escala, cuando se trata de presión fluctuante, y para los dos tercios de ella, cuando la presión es constante. Si un tubo Bourdon se somete a presión superior a la de su límite y a presiones mayores que las que actuó sobre él en el proceso de envejecimiento, puede producirse una deformación permanente que haga necesaria su calibración.

Los manómetros en uso continuo, y especialmente los sometidos a fluctuaciones rápidas y frecuentes de presión, deben verificarse repetidas veces. Un procedimiento cómodo para hacerlo consiste en tener un manómetro patrón exacto que pueda conectarse en cualquier punto de la tubería en la que está unido el manómetro regular y efectuar comparaciones. A intervalos regulares debe confrontarse el manómetro patrón con el manómetro de peso directo o contrapesos. El manómetro de Bourdon es completamente satisfactorio para presiones hasta de unas 2000 atm, siempre que sea suficiente una exactitud de 2 a 3 por ciento. Estos manómetros se encuentran en el comercio con lecturas máximas en sus escalas de unos 7000 Kg / cm².

Para cualquier tipo de carga, la relación entre la carga y la deformación es una constante del material, conocida como el módulo de Young: $E = \text{Carga} / e$. Por ende, si la constante de deformación es conocida, se puede obtener la carga según:

$$\text{Carga} = E * e$$

De modo que frente a deformaciones pequeñas de materiales elásticos, será posible obtener una cuantificación reproducible de las cargas (fuerzas) solicitantes.

El manómetro de Bourdon depende, precisamente, de la elasticidad de los materiales utilizados en su construcción. Este manómetro, tal vez el más común en plantas de procesos que requieran medición de presiones, consiste de un tubo metálico achatado y curvado en forma de "C", abierto sólo en un extremo (ver figura).

Al aplicar una presión al interior del tubo (se le infla, por ejemplo) la fuerza generada en la superficie (área) exterior de la "C" es mayor que la fuerza generada en la superficie interior, de modo que se genera una fuerza neta que deforma la "C" hacia una "C" más abierta. Esta deformación es una medición de la presión aplicada y puede trasladarse a una aguja indicadora tanto como a un sistema de variación de resistencia o campos eléctricos o magnéticos.

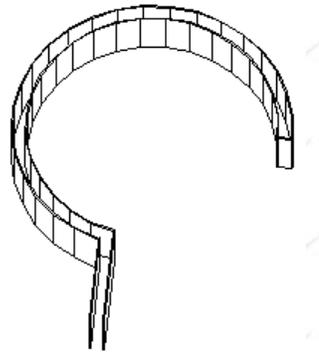


Figura 6: Manómetro de Bourdon.

El tubo Bourdon es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo y el tubo se encuentra cerrado en un extremo.

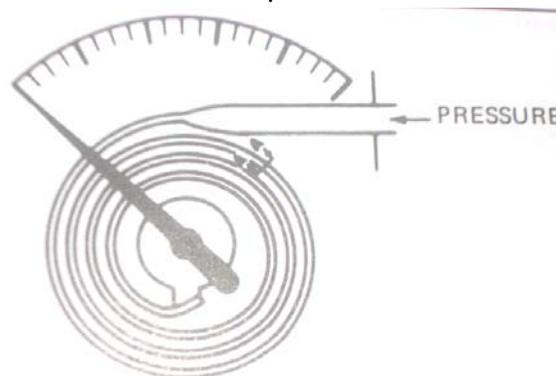
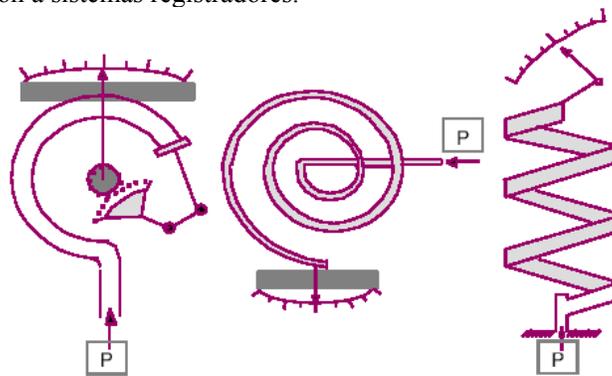
Al aumentar la presión dentro del tubo, este se deforma, y el movimiento se transmite a la aguja indicadora.

Empíricamente se halla el tubo adecuado al rango de presión deseado.

El elemento en espiral se forma arrollando el tubo Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común.

En el helicoidal se aplica el mismo concepto, pero sólo que en forma de hélice.

Con estas características se obtiene una mayor longitud de desplazamiento de la aguja indicadora, favoreciendo su aplicación a sistemas registradores.



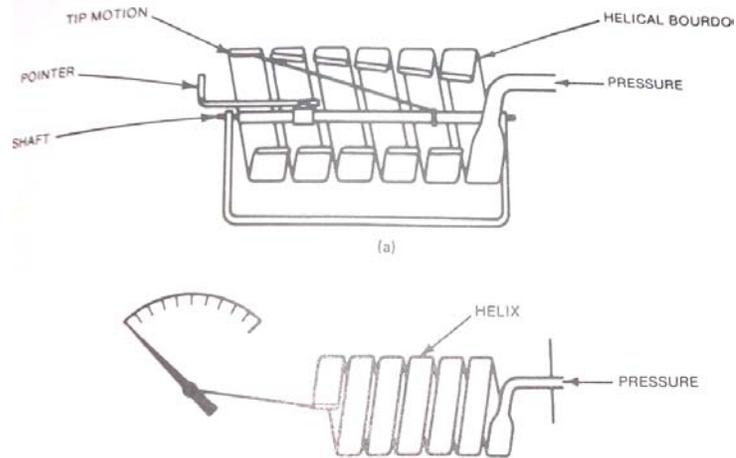


Figura 7: Distintas Configuraciones para el tubo de Bourdon

f) Diafragma

El manómetro diafragma consiste en una o varias cápsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, de forma que al aplicar la presión, cada cápsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. El material del diafragma es normalmente aleación de níquel o inconel. Se utiliza en pequeñas presiones.

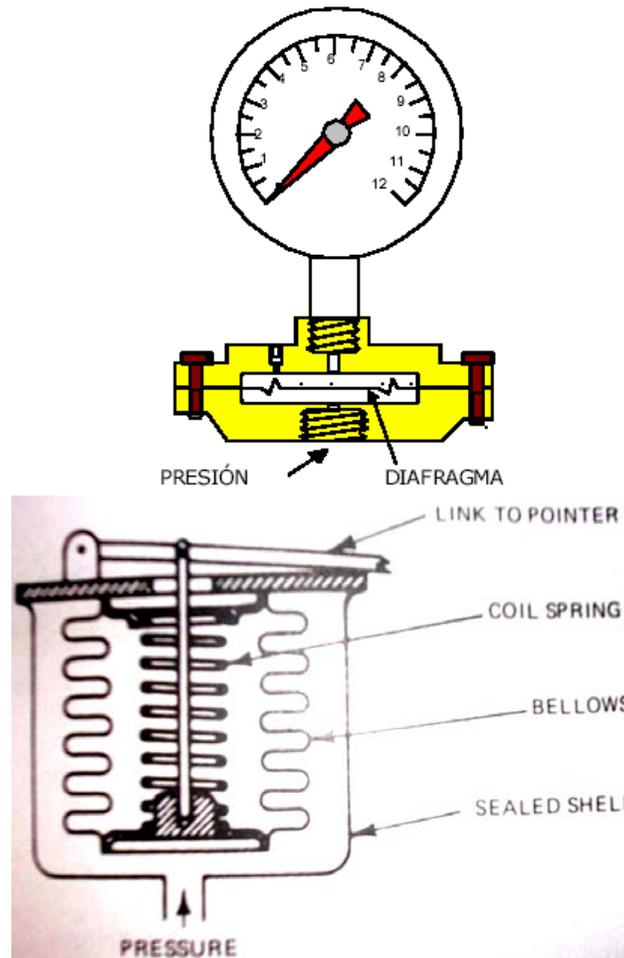


Figura 8: Diafragma.

g) Fuelle

El fuelle es parecido al diafragma compuesto, pero de una sola pieza flexible axialmente y puede dilatarse o contraerse con un desplazamiento considerable.



Los elementos de fuelle se caracterizan por su larga duración. El material empleado es bronce ferroso. Se emplean para bajas presiones.

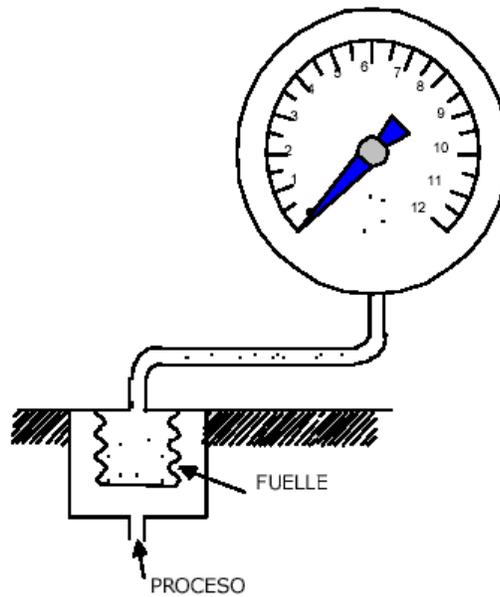


Figura 9: Fuelle

Instrumento	Rango	Error de Span[%]	Precisión Estática Máxima
Bourdon	0.5 – 6000 bar	0.5-1	6000 bar
Espiral	0.5 –2500 bar	0.5-1	2500 bar
Helicoidal	0.5 – 5000 bar	0.5-1	5000 bar
Diagrama	50mmcda-2 bar	0.5-1	2 bar
Fuelle	500mmcda-2 bar	0.5-1	2 bar

Notas:

Presión Absoluta

Los medidores de presión absoluta consisten en un conjunto fuelle y muelle opuesto ce a un fuelle cerrado al vacío El movimiento resultante de la unión de los dos fueles equivale a la presión absoluta.

Sellos

En la medición de fluidos Corrosivos se utilizan elementos primarios elásticos con materiales especiales en contacto directo con el fluido. Sin embargo resulta mas económico cuando el fluido es altamente viscoso y obtura el elemento, utilizar un fluido de sello , o bien cuando las temperaturas son demasiado altas.

Se emplean entonces sellos volumétricos de diafragma y de fuelle con líquidos incompresibles para la transmisión de la presión.

Es necesario utilizar sellos entre el instrumento y el fluido cuando:

El fluido de proceso es corrosivo para el dispositivo de medición.

El fluido es un gas o vapor con posibilidad de condensación por disminución de la temperatura durante la medición, por ejemplo: vapor de agua.

El fluido es un líquido con sólidos en suspensión.

El fluido es un líquido pastoso.



El fluido tiende a cristalizarse con la variación de temperatura al ser aplicado al medidor, por ejemplo: petróleo, asfalto.

El fluido no puede depositarse sobre el dispositivo de medición, por ejemplo: medicamentos, alimentos.

El fluido es peligroso.

2. Elementos Electromecánicos

Los elementos electromecánicos utilizan un elemento mecánico elástico combinado con un elemento transductor eléctrico que genera la señal correspondiente.

Por el principio de transducción se pueden agrupar en:

- Equilibrio de Fuerzas.
- Resistivos
- Magnéticos
- Capacitivos
- Extensométricos
- Piezoeléctricos

a) Resistivos

La variación de movimiento del elemento mecánico (normalmente un tubo Bourdon) se combina con un sistema de variación de resistencia por potenciómetro.

Este puede ser una barra continua o un arrollamiento en bobina. El material utilizado como resistencia puede ser el grafito. Generalmente esta resistencia forma parte de un puente de Wheatstone.

Estos transductores son simples y permiten el manejo de potencias de señal suficientes para no usar amplificadores. Sin embargo no poseen una alta resolución y son sensibles a vibraciones y a las condiciones ambientales.

El rango de trabajo está definido por el transductor mecánico

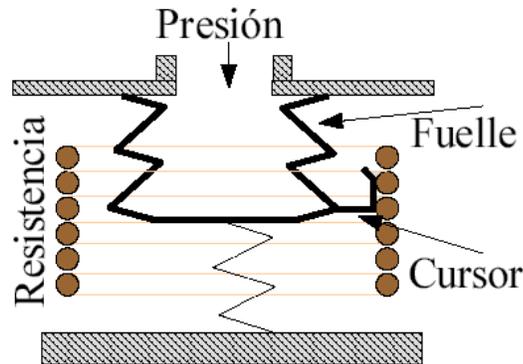


Figura10: Transducción Resistiva

Las ecuaciones que rigen este comportamiento resulta

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

$$R(x) = rx$$

k = Constante del fuelle.

A= Sección del fuelle

x= Elongación del fuelle.

r= Variación de resistencia [Ω /mm]

Valores usuales de error: 1- 2% span

Rango: 0 a 300 Kg/cm²

b) Inductancia Variable

Una aplicación usual es la de un LVDT, en el cuál el núcleo está vinculado a un diafragma.



Cuando este se deforma por efecto de la presión, mueve el núcleo y varía el nivel de acoplamiento entre el primario y los secundarios. Con esto se aprovecha todas las ventajas de los LVDT: pequeños, robustos y buena resolución

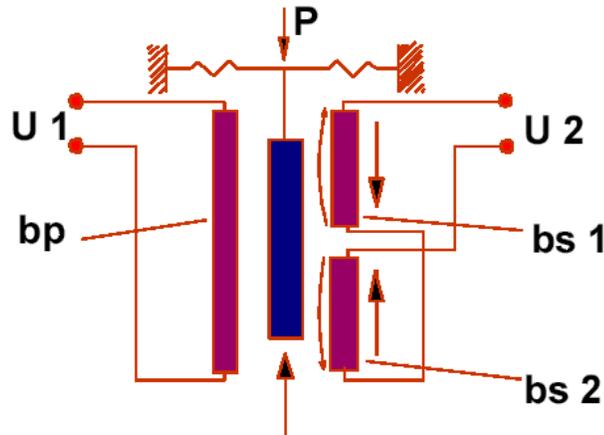


Figura 11: Transducción Inductiva

Error usual 1[%] span.

c) Reluctancia Variable

Se componen de un electroimán o de un imán permanente y un núcleo ferromagnético móvil.

Este núcleo puede ser desplazado por medio del tubo Bourdon o un diafragma, variando la reluctancia del circuito magnético y por ende la inductancia de una bobina presente en el circuito.

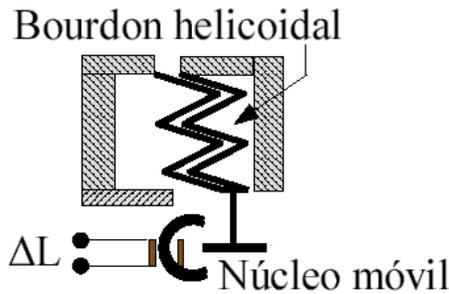


Figura 12: Transducción Magnética.

Las ecuaciones que rigen este comportamiento son:

$$P = \frac{k\alpha}{A}$$

$$L(\alpha) = \frac{N^2}{R} = \frac{N^2 A \mu_0 \mu_r}{l_b}$$

$$\mu_r = m\alpha$$

$$P = \frac{kL(\alpha)I_b}{N^2 A^2 \mu_0 m}$$

α = Angulo de giro del núcleo

m = es la variación de permeabilidad relativa por cada grado de giro.

Error usual 0.5 [%] span.

d) Capacitivos

Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión.



La placa móvil tiene forma de diafragma y está entre dos placas fijas. De este modo se tienen dos condensadores, uno de capacidad fija y otro variable.

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

Los transductores capacitivos se caracterizan por su pequeño tamaño y construcción robusta. Su señal de salida es débil por lo que precisan de amplificadores con el riesgo de introducir ruidos.

Así también son sensibles a las variaciones de temperatura y oscilaciones mecánicas.

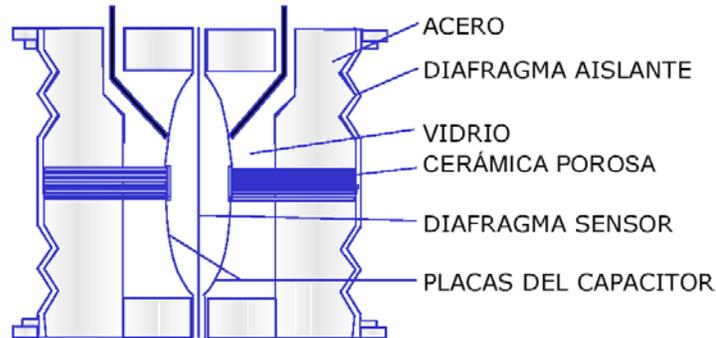


Figura 13: Estructura Capacitivo

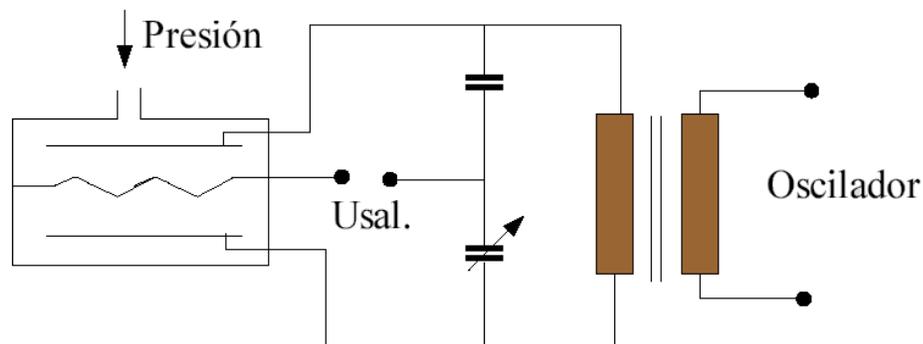


Figura 14: Transducción Capacitiva.

e) Galgas Extensométricas

Una galga de extensión se construye sobre un metal de coeficiente de elasticidad dado, adosándole un alambre, una tira semiconductor o pistas conductoras. Al deformarse el soporte de la galga, se "estira" o se "comprime" el sensor, variando así su resistencia. El cambio de resistencia será, precisamente, el reflejo de la deformación sufrida. En términos de su caracterización, dada la resistencia R sin deformación, la aplicación de una fuerza F deformante producirá un cambio de resistencia, ΔR , cuya medición permite calcular la fuerza mediante:

$$F = AE\varepsilon = \frac{AE}{G} \frac{\Delta R}{R}$$

donde se ha definido una constante "G", conocido como la constante de la galga y que suele variar entre 2 y 2,2 para galgas de soporte metálico.

Naturalmente, la posibilidad de medir fuerza permite construir, con estas galgas, balanzas electrónicas tanto como sistemas de medición de presión.

Habitualmente se utilizan circuitos en puentes, diseñados para los valores típicos de estas galgas (resistencias nominales de 120W , 350W , 600W y 1000W) utilizando corrientes que no excedan los 10 mA.

Las tecnologías modernas permiten una fabricación económica de los sensores de presión con cinta extensométrica. Disponiendo de una membrana circular (membrana de medición, por lo general de acero fino) que hace las veces de cuerpo deformable, es posible utilizar una cinta extensométrica en forma de rosetón .

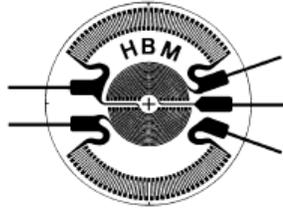


Figura 19: Cinta extensométrica en forma de Rosetón.

Estos sensores son pequeños (diámetro de, por ejemplo, 7 mm) y disponen de una rejilla de medición circular con 4 segmentos. Las conexiones forman un puente de medición de Wheatstone. Al definir las dimensiones del cuerpo deformable, se supone una dilatación de $100 \mu\text{m}/\text{m} = 1 \%$ aplicando una carga nominal.

Los sensores de presión de silicio se utilizan para presiones entre 0 hasta 10 bar.

Los sensores de presión con técnica de películas delgadas y gruesas son apropiados para cualquier presión. Además, combinándolos con elementos electrónicos es posible conseguir sensores capaces de memorizar valores de medición. Asimismo, también es posible incluir resistencias térmicas en la estructura, de tal modo que los sensores también registran la temperatura del medio con el fin de compensar posibles errores.

En la figura 20 se muestran las conexiones de un sensor de película gruesa. Las cintas extensométricas forman un puente de medición de la presión. Además, se conecta un circuito sencillo de compensación de temperatura (R1, R2).

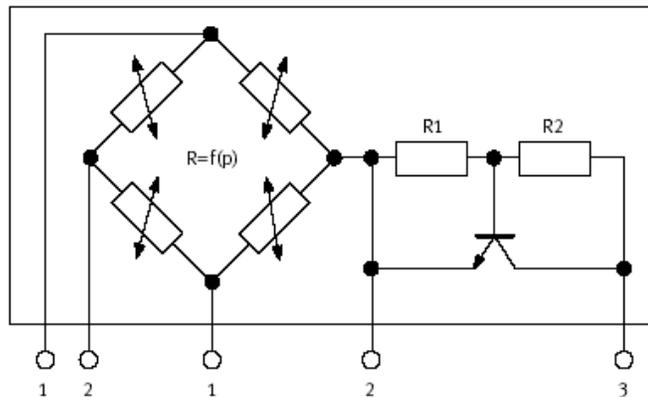


Figura 20: esquemas de conexión interna de Sensor de presión, con compensación de temperatura.



TABLA 3.3 Transductores electromecánicos

	Margen en bar	Precisión en % de toda la escala	Estabilidad en el tiempo	Sobrecarga	Temp. máx. de servicio °C	Nivel señal salida	Impedancia salida	Error de cero por influencia temperat. ambiente	Resolución	Sensibilidad a vibraciones	
Equilibrio de fuerzas	2-6000	0,5	Media a mala	150 %	65	10 V	600 Ω	0,9-2,3 %	Continua	Alta	
Resistivos	0-0,1 a 0-300	1	Mala	150 %	80	Variac. res.	0-Res. total	0,7-3 %	0,25 %	↓	
Magnéticos	↓	Inductancia variable	0,5	Media	150 %	↓	0-5 V	2 kΩ	0,9-2,3 %		Continua
		Reluctancia variable	1	Media	150 %	↓	0-5 V	2 kΩ	0,6-2,4 %	↓	
Capacitivos	0,05-5 a 0,05-600	1	Media a buena	150 %	150	↓	5 kΩ	0,5-1,9 %	↓	Media	
Galgas extensométricas	↓	Cementadas	0-0,5 a 0-3000	0,5	Mala	↓	120	35 mV	350 Ω	0,5-2,4 %	Alta
		Sin cementar	0-0,01 a 0-600	1	Mala	200 %	↓	↓	350 Ω	↓	↓
		Silicio difundido	0-2 a 0-600	0,3	Muy buena	200 %	107	2-10 V	600 Ω	0,4-1 %	↓	Despreciable
Piezoelectrónicos	0,1-600	1	Mala	↓	90	600 mV/bar	1000 MΩ	1-4,8 %	1/5000	Baja	

No obstante, en la mayoría de los casos es suficiente contar con un presostato o vacuos tato o con un convertidor neumático-eléctrico (NE). Este se encarga de convertir una señal neumática en una señal eléctrica y por lo general se trata de un contacto conmutador. Mediante la utilización de una membrana de mayor superficie puede aumentarse la fuerza de accionamiento por presión. Si el convertidor permite ajustar la presión de conmutación, se trata de un presostato.

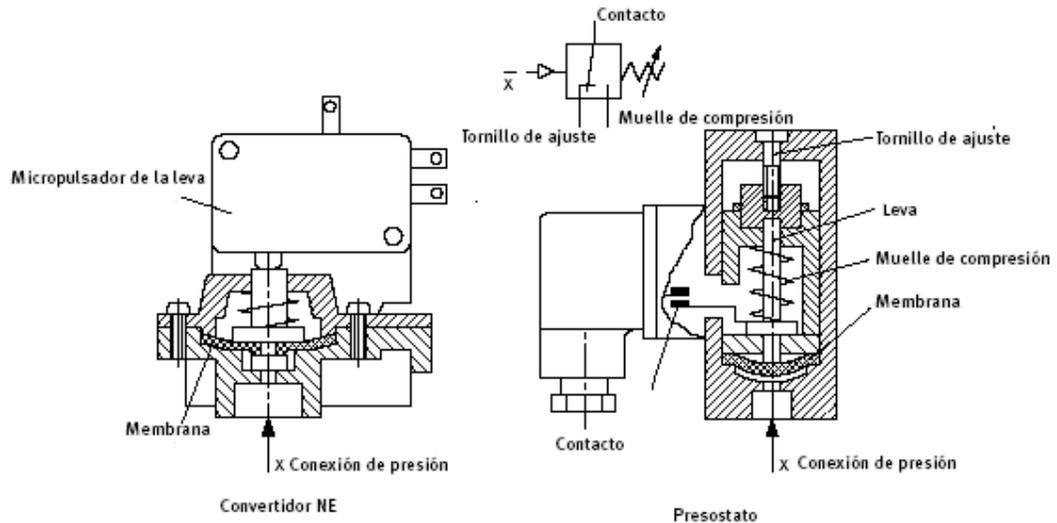


Figura 0: elementos de conmutación Electro Mecánica

El elemento mecánico puede ser un tubo de Bourdon, espiral, hélice, diafragma o fuelle o combinaciones de todos estos.



3. Elementos electrónicos.

Por ejemplo, equipos con membranas de silicio, de acero fino o con materiales dilatables de otras formas.

También existen elementos electrónicos de vacío. Clasificados como sigue

- Mecánicos
- McLeod
- Térmicos
- Ionización.

a) Sensor capacitivo basado en tecnología del silicio, se evalúa el cambio capacitivo de una membrana de cerámica, ocasionado por la flexión en relación con un contra electrodo paralelo.

Ello significa que la membrana hace las veces de placa de condensador.

El elemento de detección no debe estar cubierto por el fluido.

En los sensores de presión capacitivos con membrana cerámica y procesamiento de señales se utilizan las siguientes microtecnologías:

- Técnica de películas delgadas para los electrodos
- Técnica de películas gruesas para el híbrido de procesamiento de señales
- Técnica de micromontaje para la membrana de cerámica
- ASIC para el procesamiento de señales

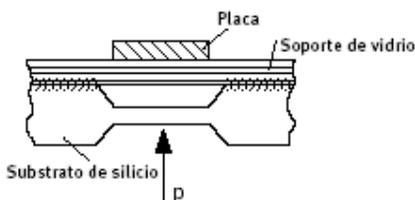


Figura 15: Sensor Capacitivo con tecnología de silicio.

b) Sensor Hall

En los sensores de presión con elemento Hall, un imán permanente pequeño (que está unido a una membrana) provoca un cambio de la tensión Hall.

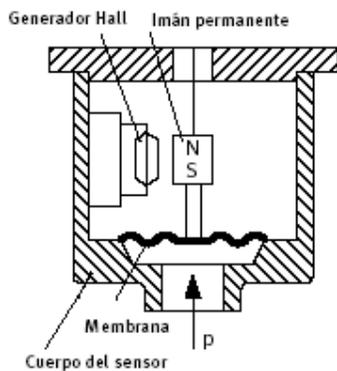


Figura 16: Sensor Hall

c) Sensor Piezorresistivo.

El sensor de presión piezorresistivo tiene un elemento de medición en forma de placa con resistencias obtenidas por difusión o implantación de iones. Si estas placas se someten a una carga, cambia su resistencia eléctrica.

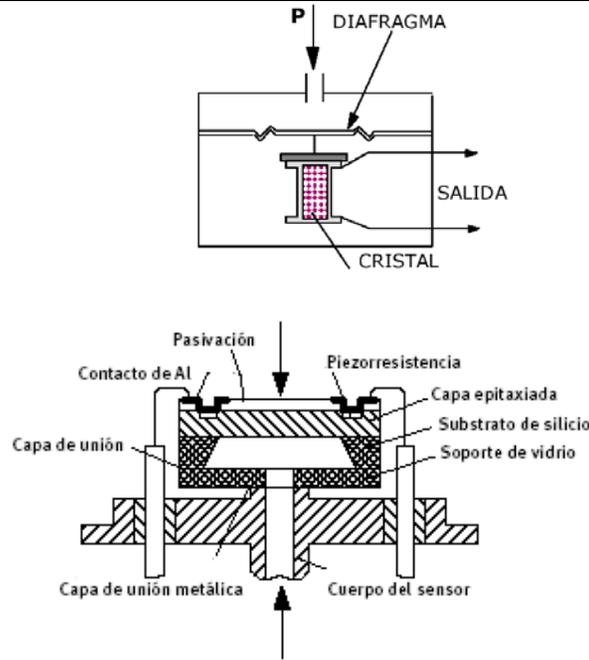


Figura 17: Sensor Piezorresistivo.

d) Sensor Monolítico

Lo mismo se aplica en el caso de los sensores de presión monolíticos, obtenidos mediante la cauterización gradual de silicio. En la figura se muestra un ejemplo de este tipo de sensor (en este caso, un sensor de presión absoluta).

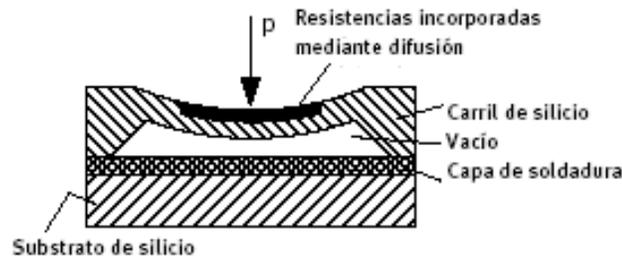


Figura 18: Sensor Monolítico.

e) Térmicos

Se basan en el principio de la proporcionalidad entre la energía disipada desde la superficie caliente de un filamento calentado por una corriente constante y la presión del gas ambiente cuando el gas está bajo presiones absolutas.

El transductor térmico de termopar contiene un filamento en V que lleva incorporado un pequeño termopar. La F.E.M., del termopar indica la temperatura del filamento y por lo tanto señala el vacío del ambiente.

f) Bimetálico

Utiliza espiral bimetálica calentada por una fuente de tensión estabilizada. Cualquier cambio en la presión produce una deflexión de la espiral, que a su vez está acoplada a un índice que señala en la escala el vacío. Su intervalo de medida es de $1 - 10^{-3}$ [mmHg].

Transductores de Ionización:

Se basan en la formación de los iones que se producen en las colisiones que existen entre moléculas y electrones (o bien partículas alfa en el tipo de radiación). La velocidad de formación de estos iones, es decir la corriente iónica, varía directamente con la presión.

g) Filamento Caliente



Consiste en tubo electrónico con un filamento de tungsteno rodeado por una rejilla en forma de bobina, la cual a su vez está envuelta por una placa colectora. Los electrones emitidos por el filamento caliente se aceleran hacia la rejilla positiva, pasan a su través y, en su camino hacia la placa colectora de carga negativa, algunas colisionan con moléculas de gas.

h) Cátodo Frío

Se basa en el principio de la medida de una corriente iónica producida por una descarga de alta tensión. Los electrones desprendido del cátodo toman un movimiento en espiral al irse moviendo al través de un campo magnético en su camino hacia el ánodo. El movimiento en espiral da lugar a que en el camino libre medido entre electrones sea mayor que la distancia entre electrodos.

i) Radiación

En el transductor de radiación, una fuente de radio sellada, producen partículas alfa que ionizan las moléculas del gas en la cámara de vacío y que por lo tanto, es proporcionada la presión total del sistema.

4. Sensor Diferencial

Los sistemas discutidos antes, para medición de Presión (Bourdon, Tubos en "U" de líquidos de alta densidad, Galgas extensiométrica [strain gauges], etc.) miden, en general, la presión relativa a la presión atmosférica (si bien tanto P_1 como P_2 en el manómetro en "U" podrían ser parte de un proceso). A menudo es necesario conocer la presión relativa entre dos puntos; tales sistemas se conocen como sensores (o manómetros) de presión diferencial.

La figura describe un sensor de presión diferencial, basado en una galga de extensión.

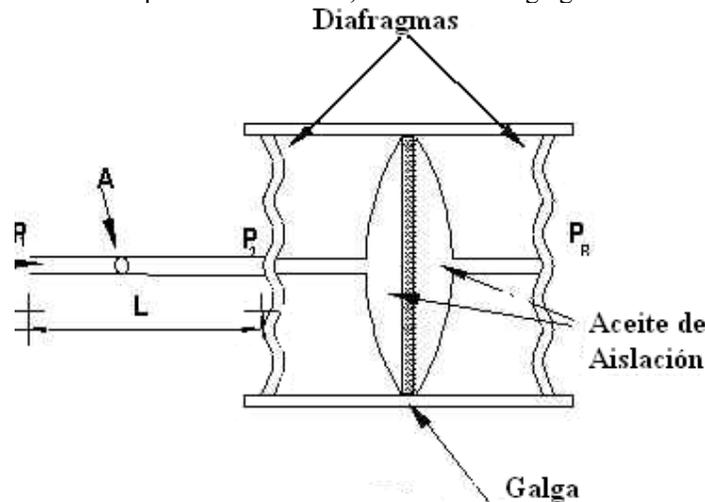


Figura 21: Sensor Diferencial

Las señales de presión, P_1 y P_R , se entregan a dos diafragmas aislantes, que impiden que el fluido ingrese a la cámara sensible. La presión es transmitida a la sección sensible (la galga propiamente tal) mediante capilares, que están llenos de un fluido adecuado (usualmente aceite de silicona). Existen dos cámaras separadas por la galga en el centro, conocida como el diafragma sensor, cuyo único requisito es que impida el paso del fluido interno de un lado hacia el otro.

Uno de los diafragmas de aislación puede ser sujeto a una presión constante de referencia, de modo que la posición del diafragma de referencia será una función de la presión aplicada en un sólo lado. Similarmente, se pueden aplicar dos presiones y la posición del diafragma sensor será una función de la presión diferencial. Para introducir el análisis del comportamiento dinámico de este sensor, se considerará que un lado está a presión constante, de referencia, denotado P_R .

De acuerdo a la nomenclatura de la figura, un cambio en la presión P_1 (en algún punto del proceso) producirá un cambio en la presión P_2 , al final del tubo capilar (serán idénticos en estado estacionario). El balance de fuerzas en el capilar resulta en:



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerza de la presión de proceso,} \\ P_1 \text{ sobre la punta de entrada} \\ \text{del capilar de conexión al sensor} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerza de la presión} \\ P_2 \text{ sobre el final} \\ \text{del capilar} \end{array} \right\} = \text{Masa} \times \text{Aceleración}$$

es decir,

$$p_1 \times A - p_2 \times A = \frac{A \times L \times \rho}{g_c} \times \frac{d^2 x}{dt^2}$$

A = área de corte del capilar de conexión

L = longitud del capilar de conexión

r = densidad del líquido en el tubo capilar

x = desplazamiento del fluido o desplazamiento del diafragma de aislación.

La fuerza sobre el diafragma de aislación, $p_2 \cdot A$ establece un segundo equilibrio de fuerzas

$$P_2 \times A = \left\{ \begin{array}{l} \text{Efecto resorte de} \\ \text{la Galga} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Fuerza viscosa} \\ \text{del fluido} \end{array} \right\}$$

es decir:

$$P_2 \cdot A = K \cdot x + C \frac{dx}{dt}$$

donde K es la constante de Hooke de la galga y C el coeficiente de amortiguamiento del líquido viscoso en frente del diafragma.

Por reemplazos y despejes:

$$\left(\frac{A \cdot L \cdot \rho}{K \cdot g_c} \right) \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{C}{K} \cdot \frac{dx}{dt} + x = \frac{A}{K} \cdot p_1$$

ecuación que, finalmente, indica que la respuesta del sensor (es decir, el desplazamiento, x, del diafragma) sigue una dinámica de segundo orden, para cualquier cambio en la presión de proceso P_1 .

Si se define un tiempo de respuesta

$$t = A \cdot L \cdot r / (K \cdot g_c),$$

un grupo de amortiguación

$$2\zeta t = C/K$$

una ganancia

$$K_p = A/K,$$

Se puede obtener la función de transferencia en el campo complejo:

$$\frac{\bar{X}(s)}{\bar{P}_1(s)} = \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1}$$



Disco de Ruptura

Es un dispositivo de alivio de presión para sistemas cerrados que provee apertura instantánea a una presión predeterminada. Su función es proteger frente a sobrepresiones a un sistema que pueda estar sujeto a presiones excesivas causadas por el mal funcionamiento del equipo mecánico, reacciones fuera de control, y fuegos internos o externos.

Normativas para el Uso de Discos:

La división 1 de la sección VII de la ASME informan sobre la normas para el uso de discos de rupturas en la protección de sobrepresiones. Fike dispone de una serie de Boletines Técnicos como referencia rápida a estas normas (en inglés).

- TB8100 – ASME Code and Rupture Disc
- TB8102 – Rupture Disc Sizing
- TB8103 – Certified Combination Capacity Factoris (Rupture Disc/SRV Combination)
- TB8104 – Certified Kg Flow Values (for Fike Rupture Disc)

Tipos de Discos

Los discos de ruptura de Fike se dividen en tres tipos:

1. Discos de elevado rendimiento:

Este tipo de disco pueden cumplir cualquier de las siguientes características:

- Ratio operativo del 90[%]
- No - fragmentable , (Excelente para el aislamiento de válvulas de seguridad)
- Servicios para líquidos o vapores
- Resistencia al vacío
- Servicio pulsante o cíclico
- Servicio higiénico

2. Discos de rendimiento estándar

Estos discos económicos cumplen con las siguientes características:

- Ratio operativo del 70[%]
- Fragmentación aceptable (no válido para aplicaciones con válvula de seguridad)
- Servicios para líquidos o vapores

3. Discos de Rupturas de Ingerencia

Los discos de rupturas de ingerencias se utilizan en aplicaciones en la que los discos de rupturas convencionales no son suficiente. Por ejemplo en el caso de unidades muy pequeñas y/o frágiles, al igual que los dispositivos con tolerancias extremadamente justas. Estos dispositivos comprenden una o mas de las siguientes características:

- Diseño de cabezales no estándar
- Discos de rupturas de elevado rendimiento
- Materiales poco comunes
- Maquinaria especial y técnica de soldado
- Amplia documentación y procedimiento para tests.



REFERENCIAS

<http://www.informacion-util.com.ar/trabajos.php?load=15/manometros/manometros.shtml>

http://www.pc-education.mcmaster.ca/Instrumentation/go_inst.htm

http://tamarugo.cec.uchile.cl/~cabierta/libros/l_herrera/iq54a/instru.htm#Instrumentos%20de%20medición%20de%20presión

<http://www.monografias.com/trabajos11/presi/presi.shtml>

<http://catalog.sensing.honeywell.com/printfriendly.asp?FAM=Pressure&PN=143PC03D>

http://tamarugo.cec.uchile.cl/~cabierta/libros/l_herrera/iq54a/instru.htm#Instrumentos%20de%20medición%20de%20presión

[http://a1989.g.akamai.net/f/1989/7101/1d/www3.festo.com/_C1256D56002E7B89.nsf/html/BD_Sensoren_Fertiles_150.pdf/\\$FILE/BD_Sensoren_Fertiles_150.pdf](http://a1989.g.akamai.net/f/1989/7101/1d/www3.festo.com/_C1256D56002E7B89.nsf/html/BD_Sensoren_Fertiles_150.pdf/$FILE/BD_Sensoren_Fertiles_150.pdf)

<http://fisica.usach.cl/~ctoledo/medicina/exp3enfer.doc>

http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/Tema_3/614g_1sg.pdf

http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/Tema_3/3a.pdf

http://200.10.229.164/archivos/TSElectronik/Sensores/Cap6_1_Presion.pdf

ⁱ Una Buena Documentación de la especificación de un instrumento podrá encontrarse en http://tamarugo.cec.uchile.cl/~cabierta/libros/l_herrera/iq54a/especif.htm

ⁱⁱ Extraído del Documento “Sensores en la técnica de Fabricación”, Stefan Hesse. **Blue Digeston Automation**