

Tema 3. Medición de Presión

Generalidades

Definición de presión

Es la fuerza por unidad de superficie, cuando la fuerza es perpendicular a dicha superficie. Esto es lo que ocurre comúnmente en fluidos confinados.

Referencias de presión

La presión siempre se mide respecto a una referencia o valor patrón, la cual puede ser el vacío absoluto u otra presión como en el caso más común en que se trata de la presión atmosférica. Según la referencia de presión utilizada se le dan nombres distintos a las medidas de presión.

Presión absoluta

Es la presión referida al vacío absoluto.

Presión manométrica

Es la presión referida a la 'presión atmosférica'.

Presión de vacío

Es la presión referida a la presión atmosférica pero por debajo de ella.

Presión diferencial

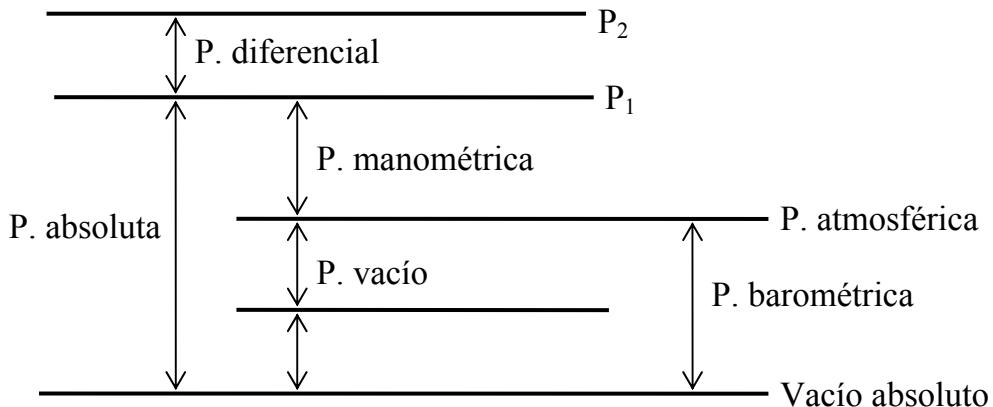
Es la diferencia entre dos presiones cualesquiera

Presión atmosférica

Es la presión ejercida por el peso de la atmósfera sobre la tierra. AS nivel del mar esta es de aproximadamente 760 mm de Hg , 14.7 psia o 100 KPa. En Merida que se encuentra a aproximadamente 1600 metros de altitud esta es de aproximadamente 85 KPa.

Presión barométrica

Es la medida de la presión atmosférica la cual varía levemente con las condiciones climáticas.



Unidades de presión

Las unidades de presión expresan una unidad de fuerza sobre unidad de área. Las más usadas son Kg/cm², psi (lbf/pulg²), Pascal (N/m²), bar, atmósfera, Torr (mm de columna de Hg).

La siguiente tabla resume los factores de conversión de las unidades de presión más comunes.

	psi	Pa	Kg/cm ²	Bar	Atmósfera	Torr	Cm H ₂ O	Pulg H ₂ O	Pulg Hg
psi	1	6896.5	0.0703	0.0689	0.0680	51.715	70.31	27.68	2.036
Pa	0.000145	1	0.00001019	0.00001	0.00000987	0.0075	0.01	0.0039	0.00029
Kg/cm ²	14.22	98067	1	0.9807	0.9678	735.58	1000	393.7	28.96
Bar	14.50	100000	1.019	1	0.9869	750.062	1024	401.46	29.53
Atmósfera	14.70	101325	1.0332	1.01325	1	760	1033	406.78	29.92
Torr	0.01934	133.32	0.001359	0.00133	0.001316	1	1.359	0.5352	0.0394
Cm H ₂ O	0.0142	100	0.0010	0.0009	0.00096	0.7356	1	0.3937	0.0289
Pulg H ₂ O	0.0361	254.6	0.00254	0.00249	0.00246	1.8683	2.540	1	0.07355
Pulg Hg	0.4912	3386	0.0345	0.0333	0.0334	25.40	34.53	13.6	1

Presión en fluidos

Fluidos estáticos

En un fluido estático la presión en un punto dado es igual al peso de la columna de líquido por unidad de área. Dicho de otra forma en un líquido la presión será igual a la altura de la columna de líquido (*h*) por el peso específico (γ):

$$P = \gamma h$$

Vemos entonces que la presión en un líquido será directamente proporcional a la altura de líquido sobre el. Algunas de las unidades de presión provienen de hecho de esta propiedad de la presión en los fluidos, por ejemplo Pulg Hg, Pulg H₂O, Cm H₂O.

Fluidos en movimiento

En un fluido en movimiento se presentan diversos tipos de presiones a saber.

Presión estática

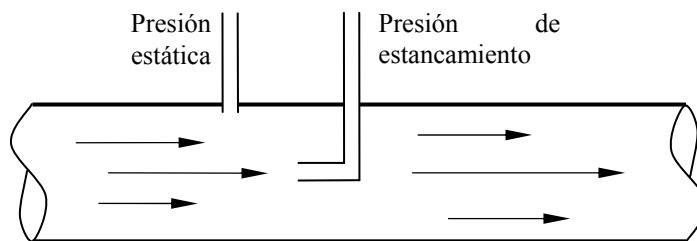
Es la presión ejercida por el fluido en todas sus direcciones. Esta corresponde a la presión que se mediría con un instrumento que se mueve con el fluido. Para medirla se puede usar una toma perpendicular a la dirección del flujo.

Presión dinámica

Es la presión que se produce por el efecto de la velocidad del fluido. Esta se ejerce solamente en la dirección del fluido. En un fluido estático la presión dinámica es cero. Para medirla se debe hacer la diferencia entre la presión de estancamiento y la presión dinámica.

Presión de estancamiento

Es la presión resultante de la presión estática más la presión dinámica. Su valor será el de la presión cuando el fluido se desacelera hasta obtener una velocidad cero en un proceso sin rozamiento.



Medidores de presión de columna de líquido

Es el más simple, directo y exacto de todos los métodos utilizados en la medición de presión.

Trabajan aprovechando el principio de los vasos comunicantes, y utilizan el efecto de la presión de una columna de líquido para la indicación del valor de la presión medida.

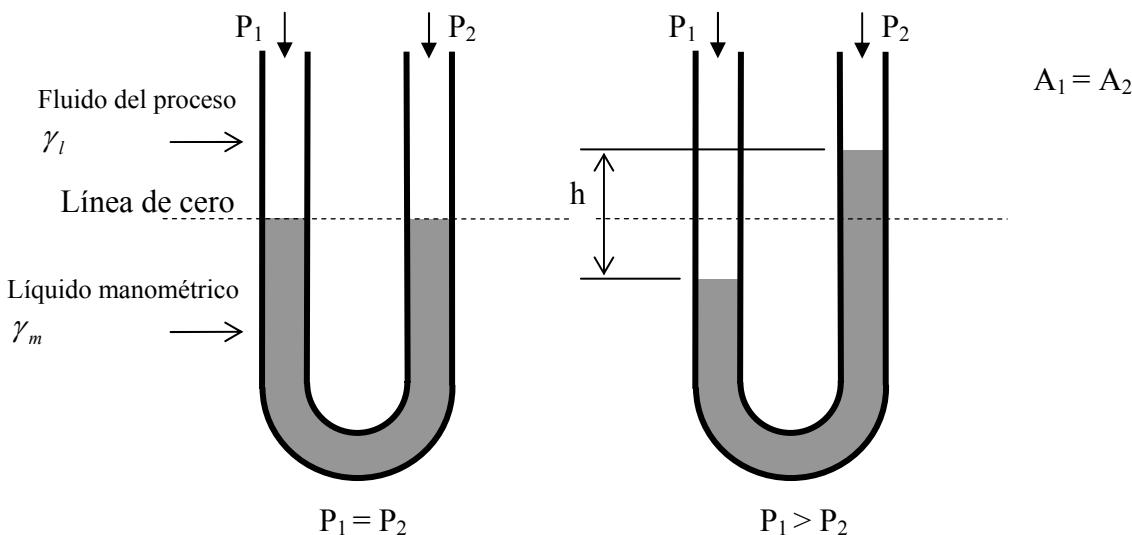
Por lo general están limitados a la medición de presiones diferenciales por debajo de los 200 KPa (≈ 30 psi). Esto debido a la resistencia del material del tubo (vidrio generalmente) y a la longitud que deberían tener estos para presiones mayores.

El más conocido de estos instrumentos es el manómetro de tubo en U, pero existen otras variantes que utilizan el mismo principio.

Tipos de medidores de presión de columna de líquido

Manómetro de tubo en U

Este medidor consta de dos tubos transparentes de misma sección transversal que están conectados por su parte inferior, ya sea por un tubo del mismo material o por un material distinto. Dentro del tubo se coloca un líquido de mayor densidad que el fluido del proceso a medir y que nos sea miscible en él, agua para aire o mercurio para agua por ejemplo.



Luego se conecta uno de los tubos al proceso (P_1) y el otro se deja a la presión de referencia con respecto a la cual se quiere hacer la medición (P_2),

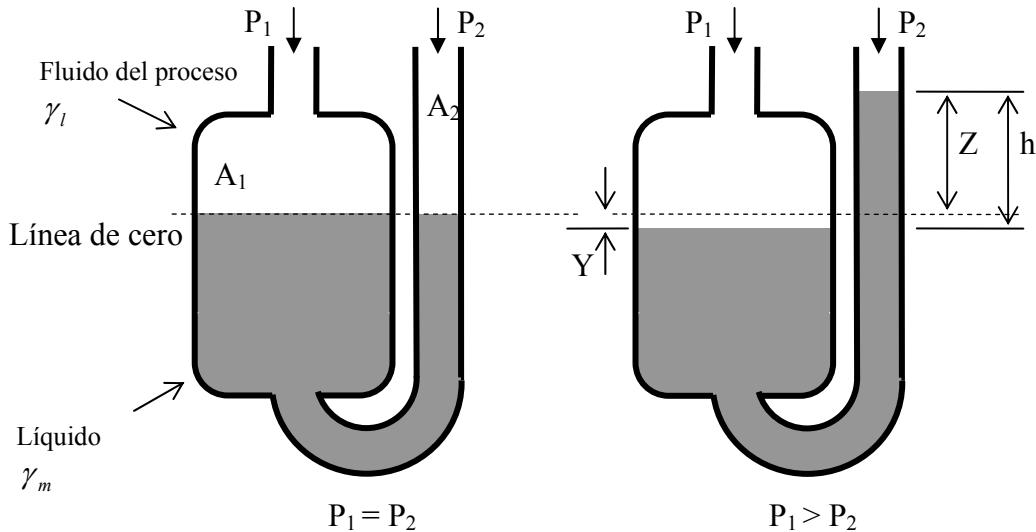
- La atmósfera para presiones manométricas
 - Si $P_1 > P_2$ se trata de un manómetro de tubo en U
 - Si $P_1 < P_2$ se trata de un vacuómetro de tubo en U.
- El vacío absoluto para presiones absolutas, se trata de un barómetro
- Otra presión del proceso para presiones diferenciales.

La medida de presión será directamente proporcional a la diferencia de nivel en los líquidos de los tubos (h), según las relaciones:

- Para medida de presión de gases (peso despreciable respecto del líquido manométrico)
$$P_1 - P_2 = \gamma_m h$$
- Para medida de presión en líquidos (peso no despreciable)
$$P_1 - P_2 = (\gamma_m - \gamma_l)h$$

Manómetro de pozo y vaso alargado

Este es una modificación del manómetro de tubo en U en donde uno de los tubos tiene una sección transversal de mayor área que la otra. Esto permite realizar la lectura de la presión directamente con la posición de la superficie del líquido en el tubo de área menor, con una mayor precisión y permite medir presiones mayores.



Manómetro de vaso alargado

En este manómetro la presión medida se rige por la siguiente expresión:

$$P_1 - P_2 = (\gamma_m - \gamma_l)h$$

$$P_1 - P_2 = (\gamma_m - \gamma_l)(Z + Y)$$

En este caso se debe además tomar en cuenta los volúmenes desplazados en cada uno de los vasos de manómetro:

$$V_1 = V_2$$

$$A_1 Y = A_2 Z$$

$$Y = \frac{A_2}{A_1} Z = \frac{D_2^2}{D_1^2} Z$$

Esto nos permite obtener una relación entre Y y Z con lo cual se puede realizar la medida observando la posición del nivel del líquido en el vaso alargado solamente:

$$P_1 - P_2 = (\gamma_m - \gamma_l) \left(1 + \frac{D_2^2}{D_1^2} \right) Z$$

Si el proceso es un gas, entonces se puede despreciar el peso específico de fluido del proceso quedando la ecuación:

$$P_1 - P_2 = \gamma_m \left(1 + \frac{D_2^2}{D_1^2} \right) Z$$

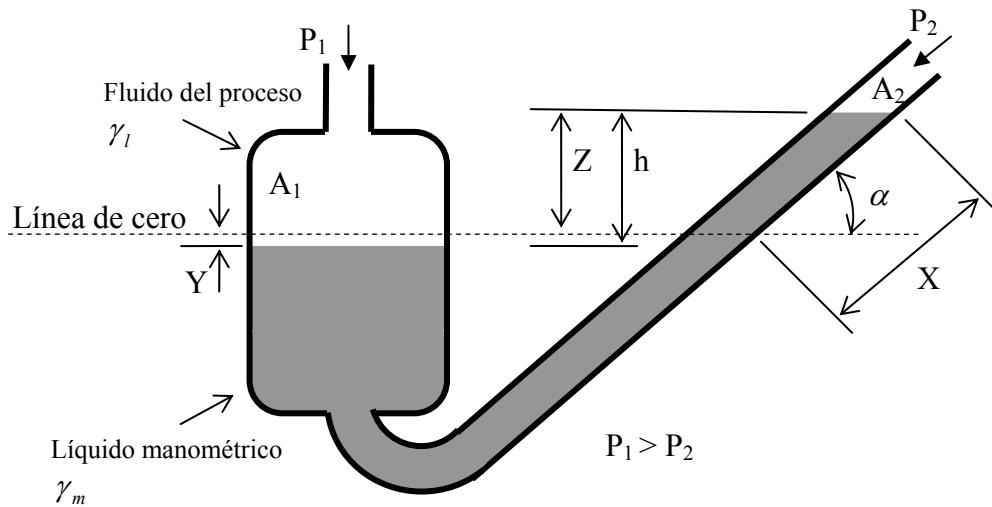
Manómetro de pozo

Cuando el área 1 es muy superior al área 2, el desplazamiento del líquido en el pozo se hace muy pequeño y este puede ser despreciado. En este caso la ecuación será:

$$P_1 - P_2 = (\gamma_m - \gamma_l) \left(1 + \frac{D_2^2}{D_1^2} \right) Z \quad \text{o} \quad P_1 - P_2 = \gamma_m Z \quad \text{según el fluido a medir}$$

Manómetro de pozo y vaso inclinado

Este es una variación del manómetro de pozo y vaso alargado en donde el vaso alargado se inclina con el fin de darle mayor precisión al instrumento. Esto ya que para un mismo desplazamiento vertical del fluido, el desplazamiento de este sobre el tubo será mayor.



En este manómetro la presión medida se rige por la siguiente expresión:

$$P_1 - P_2 = (\gamma_m - \gamma_l)h$$

$$P_1 - P_2 = (\gamma_m - \gamma_l)(Z + Y)$$

Y los volúmenes desplazados en cada uno de los vasos de manómetro serán:

$$V_1 = V_2$$

$$A_1 Y = A_2 X$$

$$Y = \frac{A_2}{A_1} X = \frac{D_2^2}{D_1^2} X$$

Donde:

$$Z = X \operatorname{sen} \alpha$$

Esto nos permite obtener una relación entre X y Z con lo cual se puede realizar la medida observando la posición del nivel del líquido en el vaso alargado solamente:

$$P_1 - P_2 = (\gamma_m - \gamma_l) \left(\operatorname{sen} \alpha + \frac{D_2^2}{D_1^2} \right) X$$

Donde $90^\circ < \alpha < 0$, mientras más pequeño sea el ángulo mayor será el desplazamiento X .

Igual que en el caso anterior se puede en ciertos casos despreciar el peso del fluido del proceso y/o el desplazamiento del líquido manométrico en el pozo.

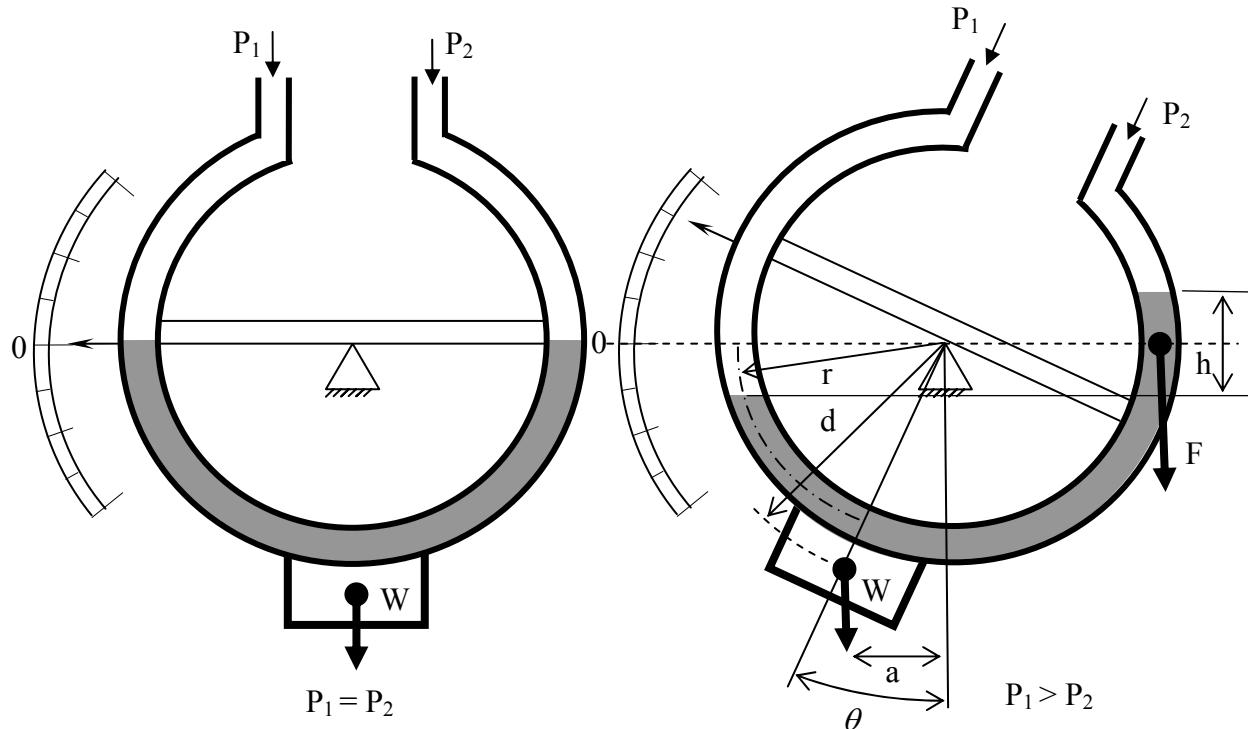
Manómetro de anillo de balanceo

Este medidor utiliza el efecto del cambio de nivel del fluido manométrico por efecto de la presión junto con un balance de fuerzas ejercidas por el peso del líquido y un contrapeso.

Se compone de un anillo tubular en el cual está un líquido manométrico y que posee un contrapeso en la parte inferior. Este anillo puede rotar sobre su centro y posee una aguja que indicará directamente la presión en función del ángulo de rotación del instrumento.

En este caso al producirse una diferencia de presión entre los dos lados del manómetro el líquido manométrico se desplaza produciendo una fuerza (F) debido al peso del lado de mayor altura de líquido manométrico. Esta fuerza hace

rotar el anillo. El contrapeso (W) contrarresta esta fuerza hasta alcanzar una posición de equilibrio como en el caso de una balanza. En ese momento la posición de la aguja indicará directamente en una escala el valor de la presión.



Las ecuaciones que rigen el funcionamiento de este sistema son:

Peso del líquido = peso del contrapeso:

$$\gamma h Ar = Wa$$

$$\gamma h Ar = Wd \sin \theta$$

Por otro lado:

$$P_1 - P_2 = \gamma_m h$$

Por lo tanto:

$$(P_1 - P_2)Ar = Wd \sin \theta$$

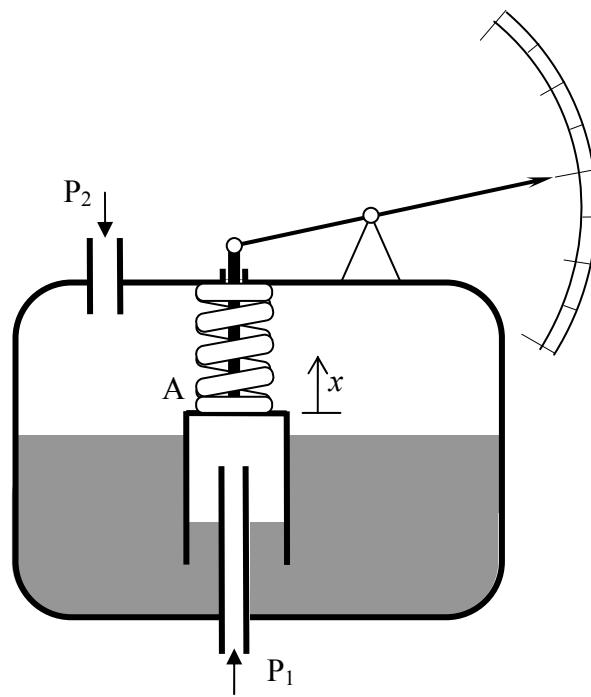
$$P_1 - P_2 = \frac{Wd}{Ar} \sin \theta$$

Obsérvese que en este instrumento la presión es directamente proporcional a $K \sin \theta$, donde K es una constante del medidor que depende de sus parámetros geométricos. En este instrumento la densidad del líquido manométrico no tiene ninguna influencia sobre la medida.

Manómetro de campana invertida

Este instrumento utiliza el líquido solamente como elemento de sellado, mientras que la medida de presión se realiza por un balance de fuerzas entre la presión ejercida por el proceso por el área sobre la cual actúa, la presión de referencia por la misma área y un otra fuerza que limita el movimiento como por ejemplo un resorte u otra campana.

Este instrumento consta de un tanque en donde se coloca un fluido de sellado en el cual se sumerge un vaso o campana en forma invertida dentro del cual actuará la presión del proceso. Al aumentar la presión dentro del vaso este tratará de elevarse por efecto de la fuerza que esta ejerce. Un resorte ubicado en la parte exterior del vaso producirá una fuerza opuesta proporcional al desplazamiento producido en el vaso. Una vez que las dos fuerzas en contraposición se encuentren en equilibrio, la posición de una aguja conectada físicamente al vaso indicará el valor de la presión.

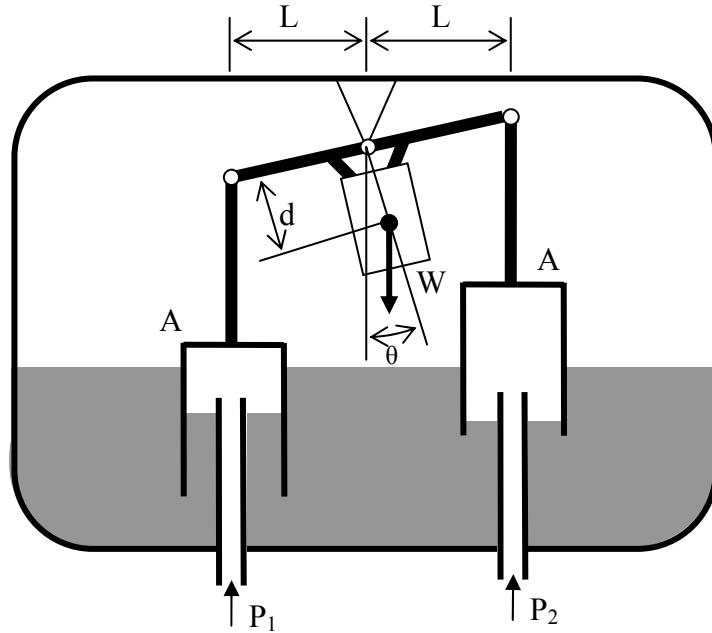


La ecuación que rige el funcionamiento de este sistema es:

$$\sum F = 0 \Leftrightarrow P_1 A + P_2 A - Kx = 0$$

$$P_1 - P_2 = \frac{Kx}{A}$$

Se pueden adicionalmente hacer otros arreglos con este tipo de medidor, por ejemplo un medidor de dos campanas para presión diferencial



En este caso la ecuación que rige el sistema es: $P_1 - P_2 = \frac{Wd}{AL} \sin \theta$

Líquidos manométricos

El líquido manométrico debe seleccionarse función de sus características y del proceso a medir.

El primer parámetro en esta selección es el rango de presiones que se quiere medir, en función de esto:

- Para bajas presiones (0 a 7 KPa \approx 1 psi) se deben usar líquidos inorgánicos de baja densidad.
 - Aceites
 - Glicerina
- Para presiones medianas (0 a 17 KPa \approx 2.5 psi) se puede usar agua.
- Para presiones altas (0 a 70 KPa \approx 10 psi) se debe usar mercurio

Los líquidos manométricos más usados son el agua y el mercurio.

Ventajas y desventajas del agua y del mercurio

	Ventajas	Desventajas
Agua	<ul style="list-style-type: none"> • Económica • No tóxica • Insoluble en algunos líquidos (aceites) • Densidad menor al mercurio lo que permite mayor sensibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Punto de fusión 0 °C • Punto de ebullición 100°C • Moja las paredes del recipiente • Tiene una presión de vapor alta • Densidad menor al mercurio permite solo un rango menor
Mercurio	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo punto de fusión -39 °C • Alto punto de ebullición 357 °C • Baja presión de vapor a temperatura ambiente • No moja las paredes del recipiente • Insoluble en muchos líquidos comunes 	<ul style="list-style-type: none"> • Se amalgama con muchos metales • Es costoso • Es tóxico

Al agua se le puede agregar colorante para mejorar su lectura y algun agente para disminuir la tensión superficial.

Líquidos selladores

En algunos casos en los que el fluido del proceso puede ser corrosivo o miscible para el líquido manométrico se puede usar un líquido sellador, que permite aislar el proceso del manómetro. En este caso se deberá tomar también en cuenta el peso específico de este líquido.

Por ejemplo:

En el sistema mostrado obtener la expresión para $P_2 - P_1$, se supone que inicialmente los líquidos están en equilibrio en la línea cero

Haciendo un balance estático

$$P_2 + (X + h - d)\gamma_1 = P_2 + h\gamma_2 + (X + Y)\gamma_1$$

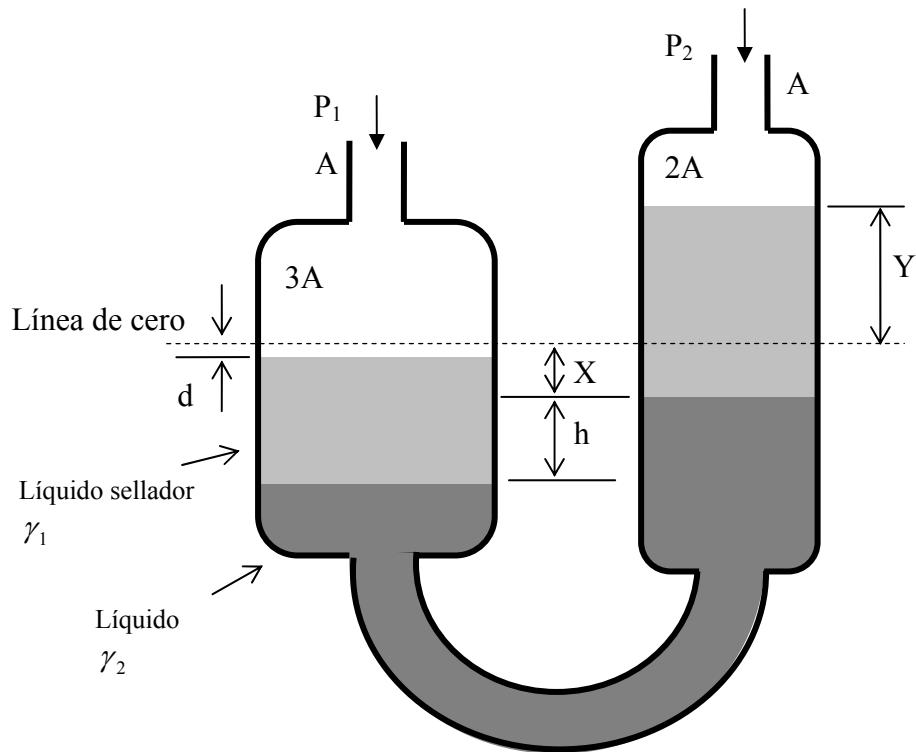
Igualando los volúmenes desplazados

$$3Ad = 2AY \Leftrightarrow Y = \frac{3}{2}d$$

Sustituyendo en la expresión se obtiene:

$$P_2 + (X + h - d)\gamma_1 = P_1 + h\gamma_2 + \left(X + \frac{3}{2}d\right)\gamma_1$$

$$P_2 - P_1 = h(\gamma_2 - \gamma_1) + \frac{5}{2}d\gamma_1$$

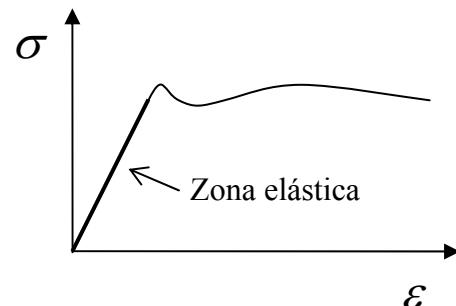


Sensores de presión

Estos elementos transforman la variable presión en un desplazamiento. Para ello utilizan la propiedad de los materiales de deformarse dentro del rango elástico cuando se someten a un esfuerzo y regresar a su posición cuando cesa el esfuerzo aplicado. Sabiendo que en este rango la relación esfuerzo deformación es lineal.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

Donde E define el módulo de elasticidad, que es una constante que relaciona el esfuerzo con la deformación en la zona elástica.



Los sensores de presión consisten en elementos de sección delgada que al someterse a una presión se deforman en su rango elástico, deformación que es proporcional a la presión.

Existen principalmente tres tipos de sensores de presión:

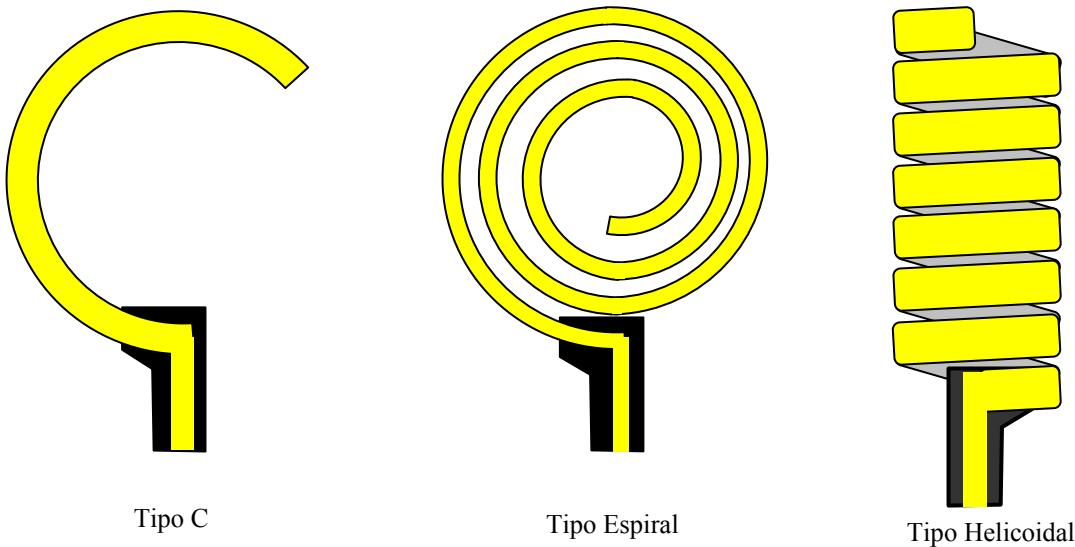
- El tubo Bourdon
- El fuelle
- El diafragma

El tubo de Bourdon

Este consiste en un tubo de sección transversal aplanaada con un extremo abierto y empotrado y el otro extremo cerrado y libre de moverse. Este tubo se le da una forma curvada específica, que varía según el rango de la presión a medir y las características del tubo. De acuerdo a la forma del tubo se tienen los siguientes tipos de tubo Bourdon:



Secciones transversales típicas



En el tubo Bourdon el tubo forma un arco de algo más de 180 grados, en el tipo espiral el tubo da más de una vuelta alrededor del eje reduciendo el diámetro en cada vuelta para formar una espiral y en el helicoidal el tubo también da más de una vuelta alrededor de su eje pero en vez de reducir el diámetro este se deforma también en la otra dirección para formar un helicoide.

Al aumentar la presión en el interior del tubo éste tiende a enderezarse y producir un desplazamiento en el extremo libre, el cual es proporcional a la presión aplicada.

La ley que relaciona este desplazamiento con la presión es compleja debido a la forma compleja de estos instrumentos, por ello se han determinado ecuaciones empíricas experimentales para éstas relaciones.

La linealidad del tubo suele ser de aproximadamente 0.5% de la deflexión máxima y en muchos casos una desviación máxima de 1% es permisible. La sensibilidad de estos instrumentos es excelente obteniéndose respuestas hasta de 0.01% en algunos de ellos.

Materiales de construcción de tubos Bourdon

Grupo 1: aleaciones endurecidas por deformación

- Latón (Cobre + zinc + estaño ó Cobre + zinc)
- Bronce fosforoso (Fósforo + bronce)
- Bronce silicio
- Acero inoxidable austenítico
- Monel

Son materiales fáciles de trabajar, resisten corrosión.

Sirven para medir medianas y bajas presiones:

- Bajas: 0 a 700 KPa (\approx 100 psi)
- Media: 700 a 3500 KPa (\approx 100 a 500 psi)
- Alta: 3500 a 70000 KPa (\approx 500 a 10000 psi)

Grupo 2: Aleaciones endurecidas por precipitación

- Cobre + berilio
- Monel K
- Iconel X

Son más difíciles de trabajar pero permiten la construcción de tubos de gran precisión y resisten muy bien a la corrosión:
Se utilizan para medir medias y altas presiones.

Grupo 3: Aleaciones con tratamiento térmico

- Acero ANSI 4130
- Acero ANSI 8630
- Acero ANSI 403
- Acero inoxidable martensítico

La facilidad de trabajo del material es intermedia entre los dos grupos anteriores y así como la resistencia a la corrosión. Se utilizan para medir altas presiones.

Rangos de presión:

El rango de presión depende principalmente del material con el cual está fabricado el tubo y puede abarcar valores

- Manómetro: desde 0 a 35 KPa (≈ 5 psi) hasta 0 a 70000 KPa ($\approx 10\,000$ psi).

Vacuómetro: de -100 a 0 KPa (≈ -30 a 0 "Hg)

Diseño de Tubos Bourdon

La expresión que relaciona la deflexión angular con la presión es:

$$\Delta\alpha = K \frac{\alpha P}{E} \left(\frac{R}{t} \right)^x \left(\frac{A}{B} \right)^y \left(\frac{A}{t} \right)^z$$

Donde:

$\Delta\alpha$: deflexión angular del extremo libre

K : constante determinada experimentalmente.

α : ángulo total suspendido por el tubo

P : diferencia entre la presión exterior e interior del tubo

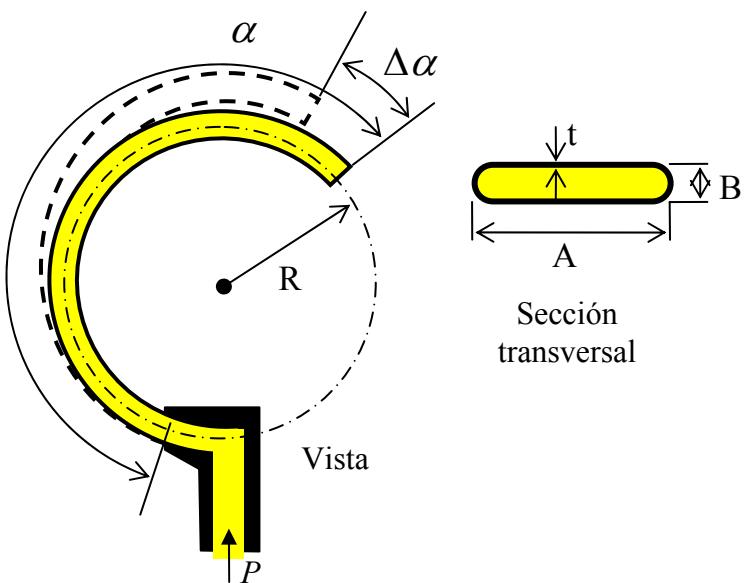
E : módulo de elasticidad del material

A y B : largo y ancho de la sección del tubo

t : espesor del tubo

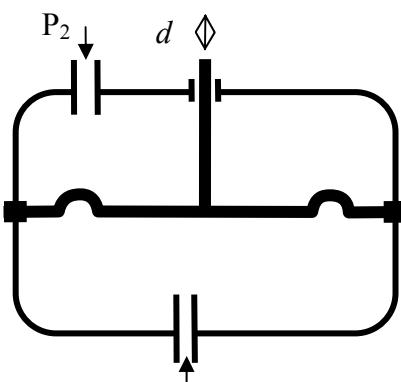
R : radio de curvatura del tubo

x, y y z : constantes determinadas experimentalmente.

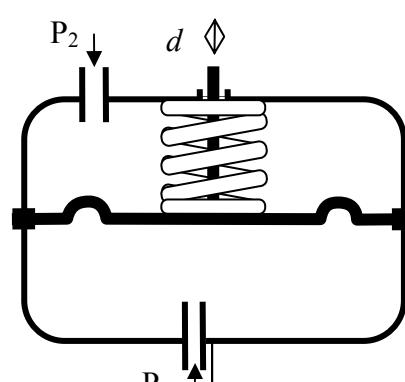


El Diafragma

El diafragma es un disco metálico (o no metálico) al cual se le han hecho corrugaciones circulares concéntricas. Ese se acopla a una caja por la cual se introduce la presión a medir, midiendo este la diferencia de presión existente entre las dos caras del diafragma.



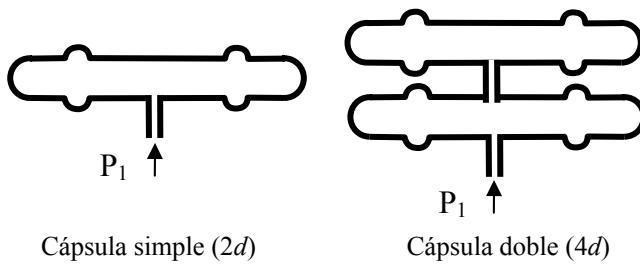
Diafragma metálico



Diafragma no metálico

La fuerza de presión origina una deflexión en el centro del disco la cual es proporcional a la presión aplicada.

Los diafragmas metálicos emplean directamente la característica elástica del material, mientras que los no metálicos tienen por lo general un resorte calibrado cuya fuerza se opone al movimiento.



Estos elementos se usan por lo general para medir presiones diferenciales bajas o presiones de vacío.

La sensibilidad de estos instrumentos suele ser muy grande pudiendo detectar comúnmente valores del 0.01 % de la presión para la cual fue diseñado.

Cuando dos diafragmas iguales se unen por sus periferias herméticamente se obtiene una cápsula. Esta produce una mayor deflexión para una misma presión aplicada

Materiales de construcción para diafragmas

Metálicos

- Latón
- Bronce fosforoso
- Cobre berilio
- Acero inoxidable
- Monel

No metálicos

- Neopreno
- Teflón
- Polietileno
- Cuero

Estos resisten mayor corrosión, pero se usan para presiones más bajas.

Rangos de presión:

El rango de presión depende principalmente del material con el cual está fabricado el tubo y puede abarcar valores

- Manómetro: desde 0 a 1.2 KPa ($\approx 5''\text{H}_2\text{O}$) hasta 0 a 5500 KPa (≈ 800 psi).
- Vacuómetro: desde -1.2 a 0 KPa hasta -100 a 0 KPa (≈ -30 a 0 "Hg)

Diseño de diafragmas

La ecuación que relaciona la deflexión en el centro del diafragma con la presión aplicada es:

$$d = KN(P - P_0)D_a^4 t^{-1.5}$$

Donde:

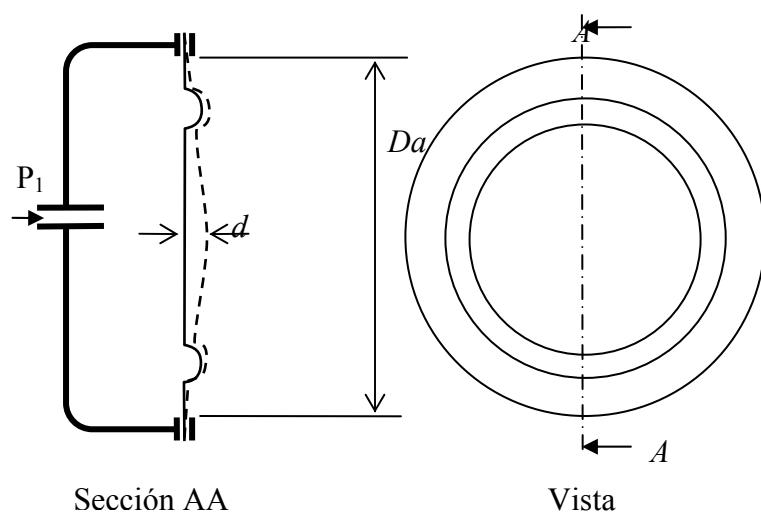
d : deflexión en el centro del diafragma (pulg)

K : constante elástica del diafragma que es función del modulo de Young y de las corrugaciones del diafragma

N : número de cápsulas

P : presión aplicada (psi)

P_0 : presión inicial (para $d = 0$) (psi)



D_a : diámetro activo del diafragma (pulg)
 t : espesor de la pared del diafragma (pulg)

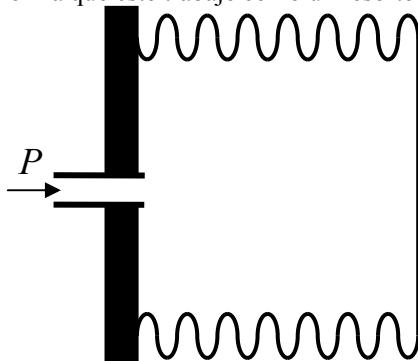
Se puede observar en la fórmula que la deflexión es proporcional a la cuarta potencia del diámetro activo. Por lo tanto duplicando el diámetro se obtendrá un desplazamiento 16 veces mayor para la misma presión.

Para diafragmas no metálicos se debe tomar en cuenta en el diseño la fuerza ejercida por el resorte.

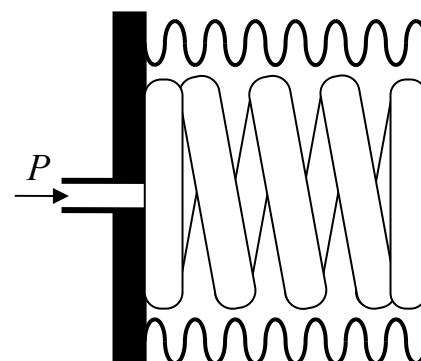
El fuelle

Este elemento consiste en un tubo de material flexible con uno de sus extremos empotrado y conectado al proceso al cual se le quiere medir la presión; y el otro cerrado y libre de moverse.

Para producir flexibilidad del tubo se hacen corrugaciones o convoluciones circulares sobre las paredes del tubo, de tal forma que este trabaje como un resorte helicoidal.



Fuelle



Fuelle con resorte

Para aumentar el rango de presión o la vida útil del fuelle se acostumbra acoplarlo a un resorte interno o externo. Estos elementos se usan principalmente para medir bajas presiones.

Diseño de fuelles

Los fuelles se diseñan haciendo un equilibrio de fuerzas sobre la pared o cara móvil del mismo.

Para un fuelle sin resorte tendremos:

$$F = PA_e = K_f x$$

$$P = \frac{K_f}{A_e} x$$

Donde:

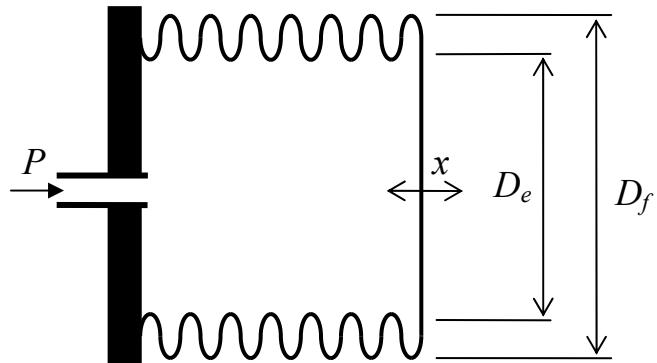
K_f : constante del fuelle, que se comporta como un resorte

$$A_e = \frac{\pi}{4} D_e^2$$

Para un fuelle con resorte:

$$F = PA_e = K_f x + K_r x$$

$$P = \frac{(K_f + K_r)}{A_e} x$$



Materiales de construcción de fuelles

Metálicos

- Latón

- Bronce fosforoso
- Monel
- Acero inoxidable

Nó metálicos

- Neopreno
- Teflón
- Polietileno

Rangos de presión:

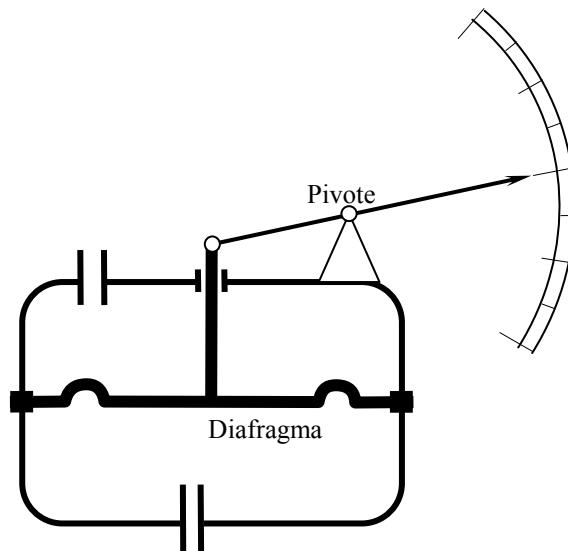
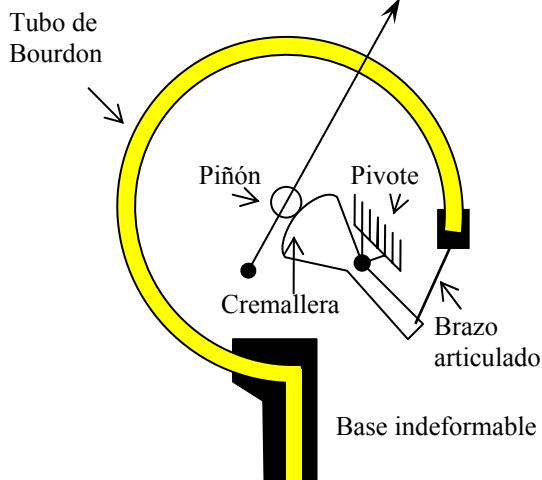
El rango de presión depende principalmente del material con el cual está fabricado el tubo y puede abarcar valores

- Manómetro: desde 0 a 0.5 KPa ($\approx 0.2''\text{H}_2\text{O}$) hasta 0 a 7000 KPa ($\approx 1000 \text{ psi}$).
- Vacuómetro: desde -0.5 a 0 KPa hasta -100 a 0 KPa ($\approx -30 \text{ a } 0 \text{ ''Hg}$)

Manómetros mecánicos

Los manómetros mecánicos se componen principalmente de los siguientes elementos funcionales:

- Un sensor de presión, tubo de Bourdon, fuelle o diafragma
- Un mecanismo de amplificación: cremallera piñón, mecanismo de cuatro barras u otro:
- Un sistema de indicación que consiste en una aguja indicadora sobre una escala calibrada en unidades de presión.



Transductores eléctricos de presión

Todos los elementos estudiados anteriormente permiten medir presión en el proceso. Sin embargo para procesos industriales se requiere en muchos casos conocer el valor de la medición en una sala de control o en un lugar alejado del proceso. Otras veces se requiere de la medida para la aplicación de una acción de control. Para todo esto se requiere entonces poder comunicar el valor de la variable a otros instrumentos. Una de las formas sencillas para realizar esto es tener una salida eléctrica en el instrumento de medición, para esto se debe entonces utilizar un transductor eléctrico de presión. La función de este elemento será el de transformar la el desplazamiento producido por un sensor de presión en una señal eléctrica que se pueda leer.

Los tipos más comunes de transductores eléctricos son:

Transductor resistivo

Este elemento está conformado por un potenciómetro (resistencia variable) en donde la guía móvil (elemento que permite variar la resistencia) está conectada a un sensor de presión (diafragma, fuelle o tubo Bourdon), el desplazamiento producido por el sensor de presión producirá un cambio en la resistencia del potenciómetro. La medida del valor de esta resistencia será entonces proporcional al valor de la presión del proceso, y se puede calcular con la expresión:

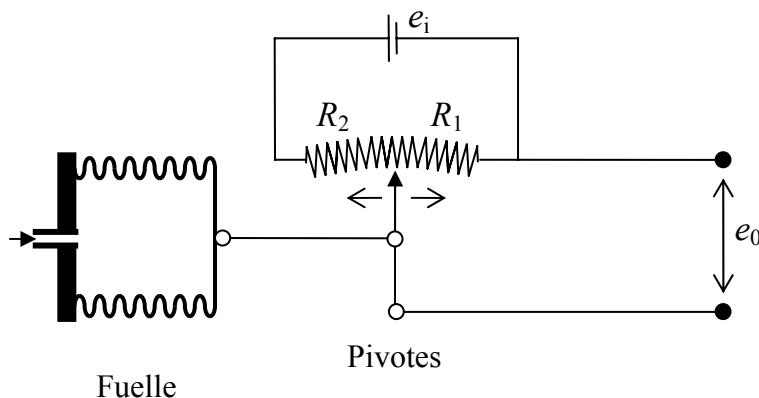
$$e_0 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) e_i$$

El elemento de resistencia puede ser:

- Grafito depositado
- Películas metálicas
- Resistencias bobinadas

Este elemento es muy usado, ya que su eficiencia eléctrica es alta y genera salidas suficientes para alimentar otros elementos sin necesidad de amplificación.

Su precisión es pequeña, del orden del 2 %.



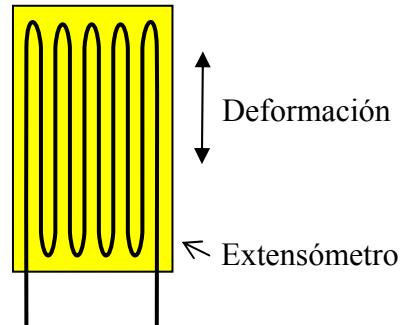
Ventajas	Desventajas
Salida alta	Usualmente requiere gran tamaño
Económico	Posee una alta fricción mecánica
Se puede usar con corriente alterna o continua	Tiene una vida limitada
No es necesario amplificar o acoplar impedancias	Es sensible a vibraciones o choques
	Requiere un gran desplazamiento por lo cual el sensor de presión debe ser relativamente grande
	Tiene una baja respuesta a la frecuencia
	Desarrolla altos niveles de ruido con el desgaste
	Es insensible a pequeños movimientos (baja sensibilidad)

Transductor Extensométrico

En el transductor extensométrico se utiliza un extensómetro o galga extensométrica (Strain gage) para transformar la deformación que se produce sobre un diafragma en una señal eléctrica.

El extensómetro es un elemento que está diseñado para medir deformaciones en materiales sometidos a esfuerzos. Estos están compuestos por varios lazos de un alambre muy fino o por un material semiconductor, el cual al estirarse produce un cambio en la sección transversal del alambre o en el área transversal del semiconductor. El cambio de sección transversal de este alambre hace que cambie su resistencia eléctrica, este cambio de resistencia será proporcional a la deformación al cual está sometido el extensómetro.

Existen varios tipos de transductores extensométricos:

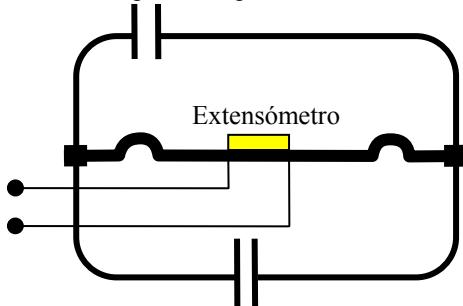


Galgas cementadas

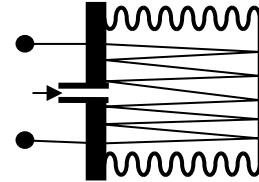
Estas están formadas por un extensómetro que se pega a una hoja base de cerámica, papel o plástico, el cual se adhiere mediante un pegamento especial al miembro al cual se le quiere medir la deformación. En este caso se trata generalmente de medir la deformación producida por un cambio de presión a un diafragma.

Galgas no cementadas

En este caso el extensómetro no se adhiere en toda su superficie, sino que los extremos de los hilos de este descansan entre una armazón móvil y una fija, sometido a una ligera tensión inicial. En este caso se trata generalmente de medir el alejamiento entre las dos paredes, que suelen ser las dos caras de un diafragma.



Galga cementada



Galga no cementada

Galgas de silicio difundido.

Las galgas de silicio difundido utilizan el mismo principio de cambio en la resistencia eléctrica, pero en este caso de un material semiconductor. En este caso la galga esta conformada por un monocristal de silicio en cuyo seno se difunde boro para formar varias resistencias, conectadas en forma de puentes de Wheatstone constituyendo una galga extensométrica autocontenido.

Para medir la resistencia de las galgas estas se conectan a un puente de Wheatstone o alguna variante más elaborada de este. Este es un arreglo de cuatro resistencias (en su versión básica) que cuando se encuentran en equilibrio, si se aplica una tensión al circuito (V_{IN}) la tensión de salida (V_{OUT}) será de cero.

Si alguna de las resistencias cambia su valor, como por ejemplo la de la galga (R_g) entonces el puente se desequilibra y empieza a pasar corriente a través de él con lo cual aparecerá una tensión de salida, tensión que será proporcional a la tensión de entrada y el valor de las resistencias, y puede ser calculado mediante la fórmula siguiente:

$$V_{OUT} = V_{IN} \left(\frac{R_3}{R_3 + R_g} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

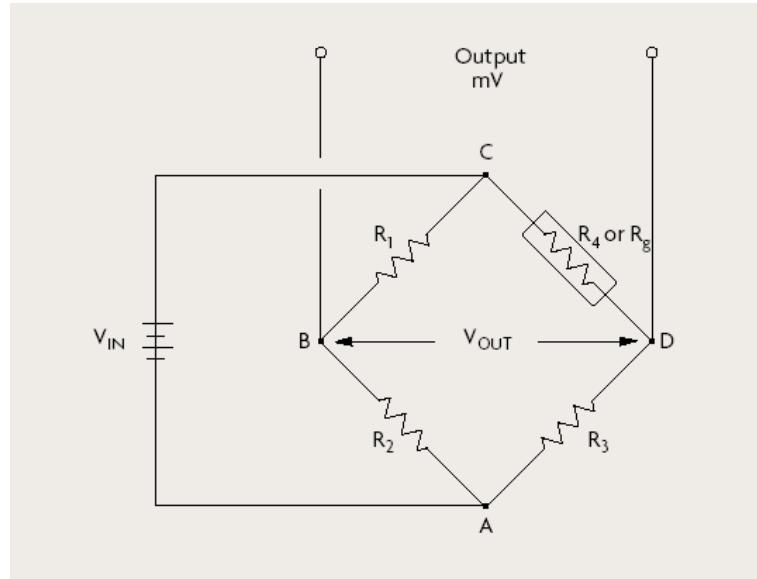
Este puente estará en equilibrio cuando:

$$R_1 R_3 = R_2 R_g$$

A partir de la expresión para el voltaje de salida se puede entonces determinar el valor de la resistencia de la galga extensométrica, y por ende la presión a la cual está sometido el instrumento.

En las galgas de silicio difundido el puente de Wheatstone esta contenido en la misma, con lo cual solo deberá aplicarse una tensión y medir la tensión de salida para conocer el valor de presión. En cambio en las otras galgas el puente de Wheatstone se debe añadir a la galga.

Se debe también tomar en cuenta en los extensómetros el efecto de la temperatura ambiente, esto ya que la resistencia de estos elementos varía también en función de la temperatura a la cual están sometidos. Una forma de compensar el efecto de la temperatura es usar una resistencia de compensación en el puente de Wheatstone (R_1). Esto ya que si las características de esta resistencia son idénticas a las de la galga extensométrica entonces al producirse un cambio en la temperatura, cambiarán tanto las características de la galga como las de la resistencia de compensación y el puente seguirá en equilibrio. De esta forma el transductor será sensible solo a la presión.



El rango de las algas extensométricas puede ir entre las 3 pulgadas de columna de agua hasta 1400 MPa (200000psi) y su exactitud varía entre 0.1% de la amplitud a 0.25% del valor máximo del rango. Se debe además considerar la posibilidad de un error del 0.25% después de 6 meses de instalado y un 0.25% adicional por efecto de temperatura para cada 550°C de cambio en la temperatura el ambiente donde se encuentra.

Ventajas	Desventajas
Alta exactitud	Tienen una señal de salida débil, la cual requiere accesorios de acondicionamiento como puentes.
Miden presiones estáticas y dinámicas	
Pueden excitarse con corriente alterna o continua	Requiere una fuente de alimentación
Baja sensibilidad a choques o vibraciones	Existen limitaciones para medir procesos con altas temperaturas
Resolución continua	
Excelente respuesta a la frecuencia	
Compensación por temperatura fácil	

Para las galgas de silicio difundido existe la ventaja adicional de poder utilizarse en contacto directo con el proceso y sin mecanismos intermedios para medir presión. Esta conforma en si misma un sensor de presión.

Transductor Magnético

Los transductores magnéticos utilizan unas bobinas con un núcleo magnético móvil conectado a un sensor de presión, con lo cual al producirse el movimiento del núcleo magnético cambian las características magnéticas del circuito eléctrico. Existen principalmente dos tipos:

Transductor magnético de inductancia variable

En este caso se mide la inductancia de la bobina que varía en forma proporcional a la porción de núcleo magnético contenido en ella. La precisión es para estos instrumentos del orden de 1%.

Transductor magnético por transformador diferencial

En este caso el núcleo móvil que esta conectado a un sensor de presión se desplaza dentro de un transformador diferencial. El voltaje obtenido en la salida será:

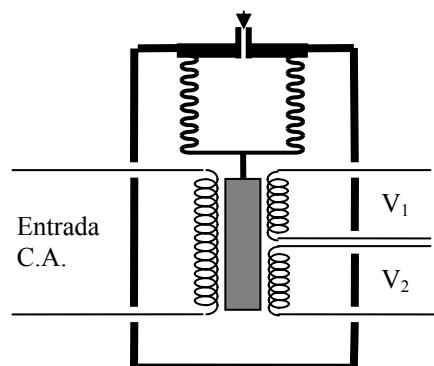
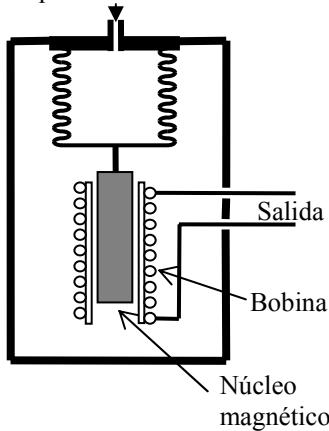
$$V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}; \quad V_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

Donde:

N es el número de bobinas en presencia de núcleo

$\frac{d\phi}{dt}$ rata de cambio del flujo magnético

La precisión suele ser aquí del orden del 0.5%.

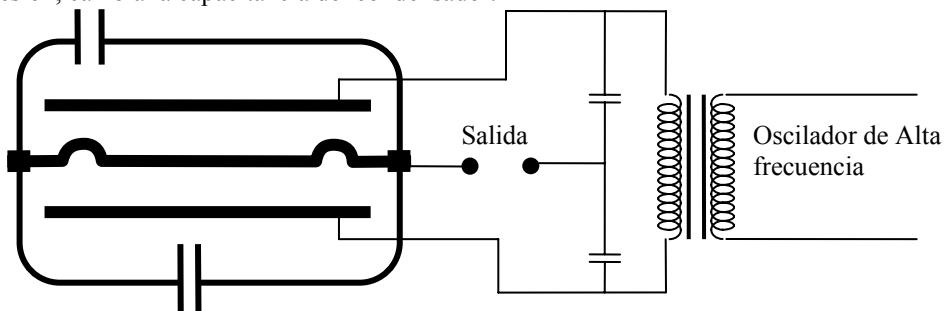


Ventajas	Desventajas
Salida alta	Se excitan solo con Corriente alterna por lo que el receptor debe funcionar con corriente alterna
Respuesta lineal	Requiere un gran desplazamiento del núcleo magnético
No precisan ajustes críticos en el montaje	Sensible a choques y vibraciones
Baja histéresis por no haber roce	
Construcción robusta	

Transductor Capacitivo

Se basan en la variación de la capacidad de un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de la presión. En este caso la placa móvil suele ser un diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas, con lo cual se tienen dos condensadores: uno de referencia y uno de capacidad variable. Las dos capacidades se comparan en circuitos osciladores.

Como la capacidad es función del ancho del dieléctrico (distancia entre placas) cuando el diafragma se reflecta por efecto de la presión, cambia la capacitancia del condensador.



La capacitancia se puede calcular con la expresión:

$$C = 0.0558K \frac{N-1}{t} A$$

Donde:

- A: área de la placa
- N: Número de placas
- t: ancho del dieléctrico
- K: constante del dieléctrico

La precisión de estos transductores suele ser del orden del 0.2 a 0.5 % de la amplitud.

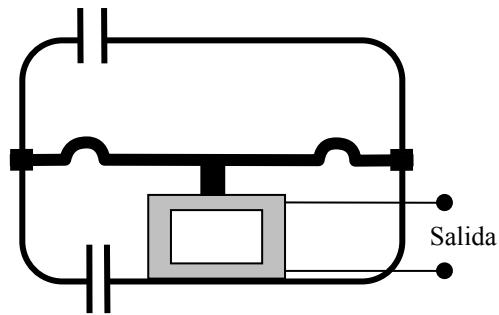
Ventajas	Desventajas
Excelente respuesta a la frecuencia	El movimiento de cables de gran longitud origina distorsión y error
Construcción sencilla	Alta impedancia de salida
Mide presiones estáticas y dinámicas	Deben balancearse reactiva y resistivamente
Costo relativamente bajo	Sensible a variaciones de temperatura
Para pequeños desplazamientos	El instrumento receptor es grande y complejo
De resolución continua	
Poco afectado por vibraciones	

Transductor Piezoelectrónico

Cuando ciertos cristales se deforman elásticamente a lo largo de planos específicos de esfuerzos se produce un potencial eléctrico en el cristal. Por lo tanto si se acopla un diafragma a un cristal de características geométricas adecuadas para que este pueda deformarse con la deformación del diafragma, entonces al producirse la deformación se producirá una corriente eléctrica que será proporcional a la deformación del cristal.

Entre los cristales usados están: el cuarzo, la turmalina, el titanio de bario y las sales de Rochelle.

Los cristales naturales como el cuarzo permiten medir variaciones



lentas de presión porque operan a bajas frecuencias, son resistentes a la temperatura y se pueden usar en aplicaciones duras como choques.

Los cristales sintéticos como las sales de Rochelle dan una salida mucho mayor para una presión dada pero son incapaces de resistir altos esfuerzos mecánicos sin fracturarse rápidamente.

Con estos instrumentos se pueden medir presiones hasta de 70 MPa (10000 psi).

Ventajas	Desventajas
Tamaño pequeño, compacto y ligero	Son sensibles a cambios de temperatura
Muy lineales	No miden presiones estáticas
Alta respuesta a la frecuencia hasta 100000 ciclos/s	Alta impedancia de salida
No requieren frecuente calibración	Cables de conexión largos originan ruido
	Después de un choque severo no retornan rápidamente a la salida de referencia previa
	Su señal de salida es relativamente débil por lo que precisan de amplificadores y acondicionadores de señal que pueden introducir errores de medición

Métodos de protección contra los efectos destructivos del fluido

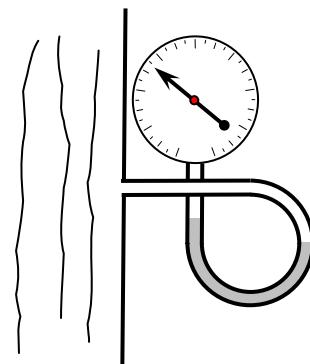
En la mayoría de los procesos en los que se mide presión el fluido del proceso se conduce al interior del sensor. Sin embargo cuando el fluido se encuentra a altas temperaturas, es corrosivo, está sucio o tiene materiales semisólidos en suspensión entonces se puede aislar el instrumento del proceso. Para ello existen métodos particulares que nos permiten excluir el fluido del elemento de medición y que permiten sensar aún así la presión del proceso.

En algunos casos se puede también proteger los instrumentos con recubrimientos especiales de níquel, cromo o cadmio por ejemplo. Si embargo esto puede ser difícil en algunos casos como por ejemplo en el interior de un tubo de Bourdon. Los métodos de protección más comunes son los siguientes:

Sifón de espira simple

Este método consiste hacer una espira con el tubo de conexión del manómetro al proceso. En esta espira se colocara algún líquido de mayor densidad que el proceso el cual permite el aislamiento del manómetro y el proceso.

Este es muy efectivo para medir presiones de vapor a alta temperatura. En este caso el vapor se condensa en el tubo y forma por si mismo un sello de agua entre la tubería y el instrumento.



Líquido sellador

En este caso se usa una cámara cerrada en la cual se coloca un líquido que produce un sello hidráulico entre el instrumento y el proceso.

Varias configuraciones son posibles en este caso:

- Cuando el instrumento se coloca por debajo de la toma de presión al proceso el líquido debe tener una densidad mayor a la del fluido del proceso
- Cuando el instrumento se coloca por encima de la toma de presión el líquido sellador deberá tener una densidad menor a la del fluido del proceso o se deberán colocar tubos que sobresalgan del fluido de manera que solo el líquido sellador pueda estar en contacto con el instrumento.

Por lo general la cámara debe ser de un área suficientemente grande para que el nivel en el tanque no varíe mucho y no se afecte así la medida de presión por el peso del líquido sellador.

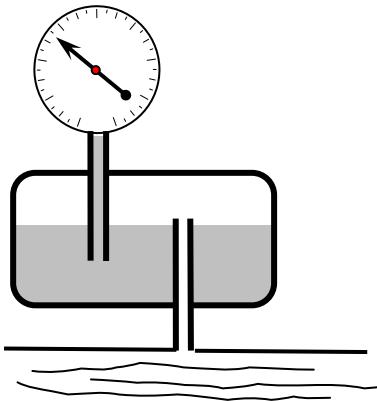
Los líquidos selladores de uso más frecuente son:

- Etileno glicol + agua
- Glicerina + agua
- M-Xileno +Kerosen

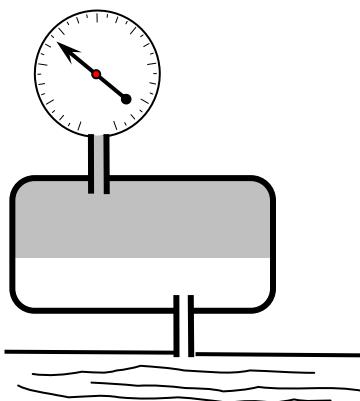
Las propiedades deseables de estos líquidos son:

- Bajo punto de fusión o solidificación
- Alto punto de ebullición

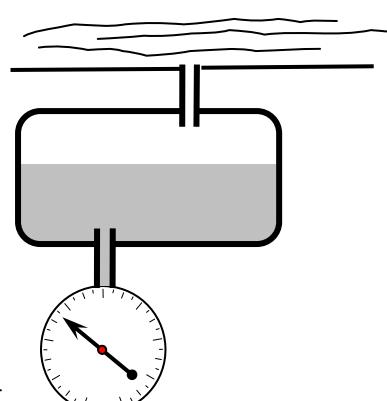
- Bajo coeficiente de expansión térmica
- No ser corrosivos



$$\rho_{LS} > \rho_{FP}$$



$$\rho_{LS} < \rho_{FP}$$



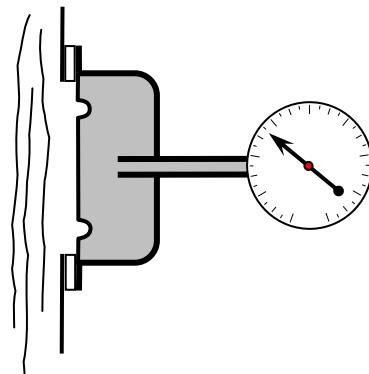
Toma por debajo del proceso

Sello volumétrico

En este caso el medidor de presión se aísla totalmente del proceso mediante un diafragma flexible. El elemento de sello es usualmente de latón o bronce y se rellena el espacio comprendido entre el sello y el instrumento mediante un líquido tal como glicerina o aceite.

El diafragma de sello debe ser en este caso totalmente flexible para poder transmitir la presión del proceso al sensor.

Con esto se permite un total aislamiento entre el sensor y el proceso y se traslada el problema de corrosión y temperatura a la unidad de sello en donde es más fácil hacer una selección de materiales.

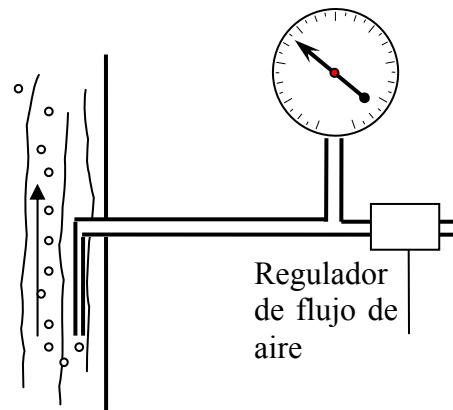


Sistema de purga o burbujeo

El sistema consiste en introducir un tubo dentro del proceso con aire a una presión levemente superior a la de este de manera que exista siempre una salida de aire (burbujeo) por la punta del tubo. Para esto se debe colocar en la línea de aire un regulador de flujo de manera que exista siempre un flujo constante y muy pequeño de aire por la tubería.

La presión medida por el instrumento será en este caso siempre levemente superior a la del proceso, lo cual produce un error en la medición que se debe tomar en cuenta.

Tiene la ventaja de poderse colocar el medidor a cualquier altura respecto a la toma de presión ya que no existe líquido dentro de la conexión, y por lo tanto no se produce error por diferencia de altura.



Medición de Presión absoluta

Existen dos formas de medir la presión absoluta de un proceso, la primera denominada método indirecto y la segunda con algún método directo.

Método indirecto

La primera forma conocida como método indirecto consiste en medir la presión manométrica y añadirle el valor de la presión atmosférica:

$$P_{ABS} = P_{MAN} + P_{ATM}$$

Para esto se debe entonces conocer con precisión el valor de la presión atmosférica, esta varía de un lugar a otro según el valor de la altitud y de las condiciones climatológicas. Por ejemplo:

- A nivel del mar esta es de aproximadamente 100 KPa (14.7 Psi)
- En Mérida esta es de aproximadamente 85 KPa (12.3 Psi)

Si no se conoce la presión atmosférica exacta se pueden entonces cometer errores de hasta 15 KPa (2 Psi).

Una de las formas más usadas para medir la presión atmosférica con exactitud consiste en calentar agua llevándola a ebullición, y medir esta temperatura. Esta será la temperatura de saturación del agua a una determinada presión, la cual se puede conseguir en las tablas termodinámicas, esta presión será entonces la presión atmosférica local.

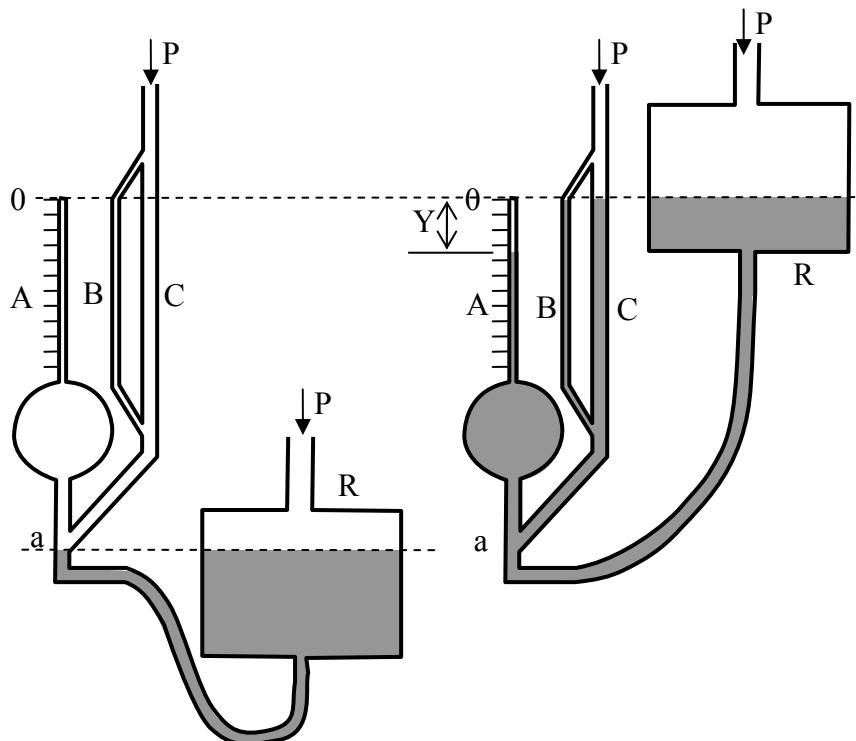
Métodos directos

Para evitar las dificultades de medir la presión atmosférica y la posibilidad de cometer errores relativamente grande se inventaron una serie de métodos directos. Los más importantes se enuncian a continuación.

Estos métodos permiten medir presiones con una precisión muy grande, pero su utilidad principal es la de medir presiones de vacío por debajo de 1 mm de columna de mercurio, que es la presión de vacío más pequeña que se puede medir con un instrumento que posea una muy buena sensibilidad.

Medidor de McLeod

Este es un instrumento que permite medir valores de presión absoluta mediante nivel de líquidos. No es un instrumento de uso industrial debido a su uso complejo e incapacidad de medir presiones que varían continuamente, sin embargo su uso es común para la calibración de instrumentos de presión absoluta.



Este consta de los siguientes elementos:

- Un tubo capilar (A) cerrado y calibrado en términos de presión el cual posee en su parte inferior una reserva para acoger un volumen de líquido dado.
- Un tubo doble conectado a la presión a medir. Este consta de un tubo capilar (B) y otro tubo de mayores dimensiones (C), cuya función es disminuir el error que se produce por capilaridad.
- Una reserva (R) de mercurio (u otro líquido pesado) conectada a la presión a medir y a los tubos mediante una conexión flexible por su parte inferior.

El funcionamiento es el siguiente:

1. Se baja el recipiente (R) hasta que el líquido descubra el punto (a) para que el gas al cual se le quiere medir presión pase al tubo (A).
2. Se sube luego el recipiente (R) hasta que el líquido iguale la línea de cero: El valor (Y) de gas que queda dentro del capilar indicará la medida de la presión según las siguientes expresiones:

En el momento 1 $PV_A = mRT$ donde V_A es el volumen del tubo (A) a partir del punto (a).

En el momento 2 $P_C V_C = mRT$ donde V_C es el volumen atrapado en el capilar: $V_C = YA_C$

Si consideramos que no existe cambio notable de temperatura, entonces como la masa no varía tenemos:

$$PV_A = P_C V_C \quad P_C = \frac{PV_A}{V_C} = \frac{PV_A}{A_C Y}$$

Además sabemos que la presión dentro del capilar será:

$$P_C = \gamma_L Y + P \text{ donde } \gamma_L \text{ es el peso específico del líquido manométrico}$$

Entonces sustituyendo tenemos que la presión exacta es:

$$P = \frac{\gamma_L A_C Y^2}{V_A - A_C Y} = \gamma_L P_h$$

Donde P_h indica la presión en términos de altura del líquido manométrico utilizado.

Por ejemplo:

Se tiene un medidor de McLeod con un volumen del tubo (A) de 10 cm^3 , el diámetro del capilar es de 1 mm y se utiliza mercurio como líquido manométrico. Calcular la presión exacta en términos de altura del líquido manométrico si la longitud de la lectura es de 3 cm.

Solución:

$$A_C = \frac{\pi \times 1^2}{4} = 0.7854 \text{ mm}^2$$

$$P_h = \frac{A_C Y^2}{V_A - A_C Y} = \frac{0.7854 \times 30^2}{10000 - (0.7854 \times 30)}$$

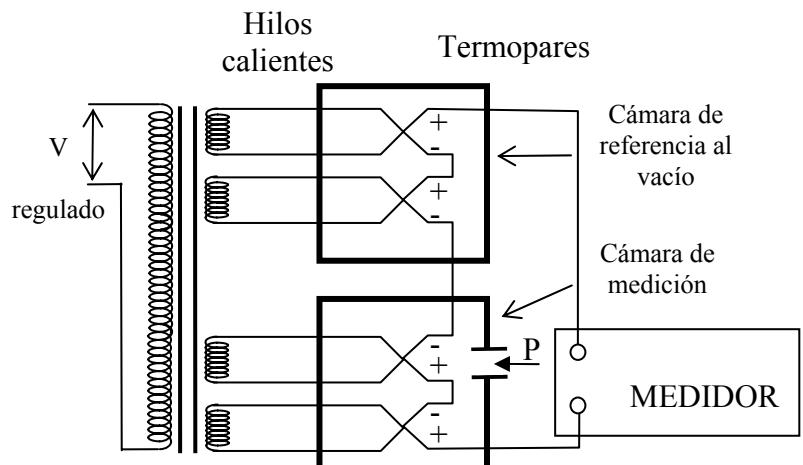
$$P_h = 70.9 \mu\text{Hg}$$

Medidores térmicos eléctricos

Estos instrumentos utilizan las características eléctricas del sensor para determinar el valor de la presión, existen principalmente dos tipos:

Medidor de termopar

En este caso se usa una serie de filamentos que se calientan por el efecto del paso de una corriente. La temperatura de estos filamentos será proporcional a la presión a la cual están sometidos, uno estará en una cámara de referencia en alto vacío y otro estará



expuesto a la presión a medir. Para medir la temperatura de los filamentos se utiliza un arreglo de termopares. Estos generan una corriente eléctrica que es función de la temperatura medida, por lo tanto la diferencia entre las corrientes eléctricas medidas en cada termopar será directamente proporcional a la presión del proceso.

Ventajas: Bajo costo, Larga duración y Confiabilidad

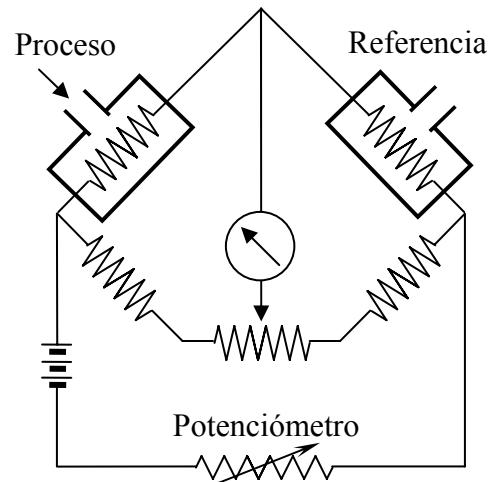
Desventajas: Sensible a la composición del gas y presenta riesgos de combustión si se expone a la atmósfera.

Medidor de Pirani

Utiliza el mismo principio de variación de la temperatura de un filamento según la presión a la cual está sometido. Pero en este caso mide la resistencia de los filamentos y no la temperatura.

Para ello utiliza un circuito de puente de Wheatstone que compara las resistencias de dos filamentos de tungsteno, uno sellado en alto vacío en un tubo y otro en contacto con el gas medido y que por lo tanto pierde calor por conducción. Luego la resistencia del filamento será proporcional a la presión a la que se encuentra el proceso.

Tiene la ventaja de ser compacto y de funcionamiento sencillo. El indicador en este caso es un microamperímetro calibrado en unidades de presión y es capaz de medir desde $1 \mu\text{Hg}$ hasta $2000 \mu\text{Hg}$.



Medidores de Ionización

Estos se basan en la formación de iones que se producen en las colisiones que existen entre moléculas y electrones. La velocidad de formación de los iones, es decir la corriente iónica, varía directamente con la presión.

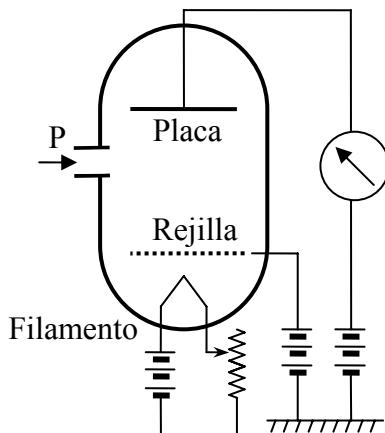
Existen principalmente tres tipos:

Medidor de filamento caliente

Consiste en un tubo electrónico con filamento de tungsteno, rodeado por una rejilla en forma de bobina, la cual a su vez está envuelta por una placa colectora. El filamento emite electrones los cuales pasan a través de la rejilla y en su camino hacia la placa colectora chocan con las moléculas del gas. La corriente positiva que se forma es función del número de iones, y por lo tanto constituye la medida de la presión del gas.

Este instrumento es capaz de medir presiones entre $10^{-8} \mu\text{Hg}$ a $1 \mu\text{Hg}$. Si se someten a presiones mayores el filamento se puede quemar.

Otra desventaja de este instrumento es que el filamento puede descomponer el gas.

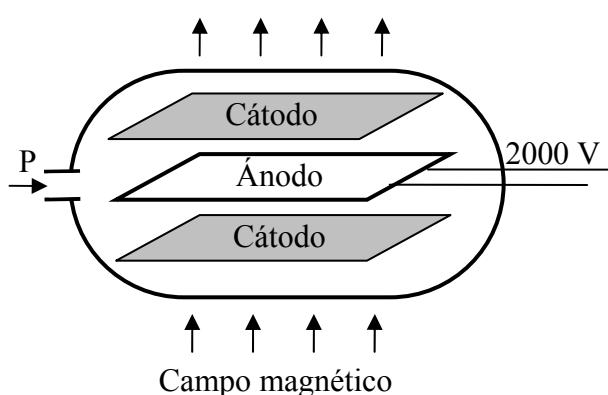


Medidor de cátodo frío

Este se basa en la medida de una corriente iónica producida por una descarga de alta tensión.

Este instrumento es más robusto y no presenta el problema de combustión del filamento. Pero tiene el defecto de no poder ser vaciado del gas rápidamente y es susceptible a contaminación por mercurio. Además posee una escala logarítmica.

Su campo de aplicación es de 10^{-2} a 10^{-7} mmHg .



Radiación

Este utiliza una fuente de radio sellada la cual produce partículas α que ionizan las moléculas de gas, los iones resultantes se recogen en un electrodo, y producen una corriente que es proporcional al número de moléculas en la cámara, por lo tanto a la presión del gas.

Este instrumento, por no poseer filamento, puede exponerse sin daño a la presión atmosférica, además tiene una emisión estable y no es frágil.

Su intervalo de medición va de 760 mmHg a 10^{-4} mmHg, pero para presiones muy pequeñas requiere un amplificador ya que la corriente producida es del orden de 10^{-11} a 10^{-13} A.

