

EL BARÓMETRO DE MERCURIO

El barómetro de mercurio fue inventado por el matemático y físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), ayudante de Galileo Galileo de 1641 a 1642 y su sucesor como profesor de filosofía y matemáticas en la Academia Florentina. En 1643, siguiendo una sugerencia de Galileo, Torricelli llenó un tubo de vidrio de 1,2 m de largo con mercurio y lo invirtió en un plato. Él observó que parte del mercurio no fluyó fuera y que el espacio creado sobre el mercurio en el tubo era el vacío. Torricelli se convirtió en el primer hombre en crear un vacío sostenido. Después de muchas observaciones, concluyó que las variaciones de la altura del mercurio día a día eran provocadas por los cambios en la presión atmosférica pero nunca publicó sus resultados.

Principio de funcionamiento

La presión estática P se define como la fuerza por unidad de superficie que ejerce un fluido sobre dicha superficie, o sea:

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 8.4 (a)}$$

Donde P es la presión, en Pascal (newton/m²)

F es la fuerza en newton

A es el área en m²

La medición de la presión se asocia generalmente con fluidos, ya sean líquidos o gases. Un recipiente lleno de un líquido (vea Fig. 8.4 (a)) tiene una presión $P_{\text{líquido}}$ (debido al peso del líquido) en un punto dado, que se puede expresar mediante:

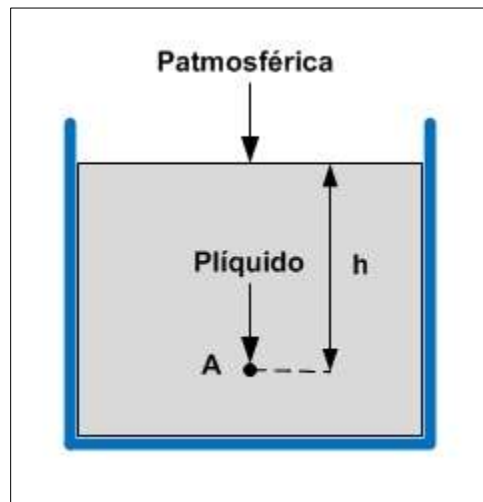


Fig. 8.4 (a) – Presión ejercida por una columna líquida

$$P_{\text{líquido}} = wh \quad \text{Ecuación 8.4 (b)}$$

Donde h es la distancia de la superficie al punto, en m

w es el peso del líquido por unidad de volumen, en newton/m³

Pero el peso por unidad de volumen viene dado por:

$$w = \left[\frac{m}{V} \right] g = \rho g \quad \text{Ecuación 8.4 (c)}$$

Donde m es la masa, en g
 V es el volumen, en m^3
 g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2
 ρ es la densidad de un fluido, en g/m^3

Por tanto, sustituyendo la Ecuación 8.4 (c) en (b) la presión $P_{líquido}$ que ejerce una columna líquida de altura h se puede expresar según:

$$P_{líquido} = \rho gh \quad \text{Ecuación 8.4 (d)}$$

Observe que la densidad del líquido determina la presión $P_{líquido}$ que ejerce para una altura dada. Por ejemplo, el mercurio es 13,63 veces más denso que el agua, por lo que ejercerá una presión 13,63 veces mayor que el agua para una columna de la misma altura. Debe notarse que para calcular la presión total P_{total} a la presión de la columna de líquido se debe añadir la presión atmosférica $P_{atmosférica}$ que actúa sobre la superficie del líquido:

$$P_{total} = P_{atmosférica} + \rho gh \quad \text{Ecuación 8.4 (e)}$$

Uno de los métodos más antiguos para la medición de la presión de una columna de líquido, y en la actualidad aún uno de los más exactos, se basa en la propiedad que tiene un líquido de desplazarse en un tubo cuando se ejerce presión sobre su superficie. El manómetro de líquido que se muestra en la Fig. 8.4 (b) es, en esencia, un tubo en forma de U que se llena parcialmente con un líquido y donde la separación vertical de las superficies del líquido da una medida de la diferencia de presión en cada brazo.

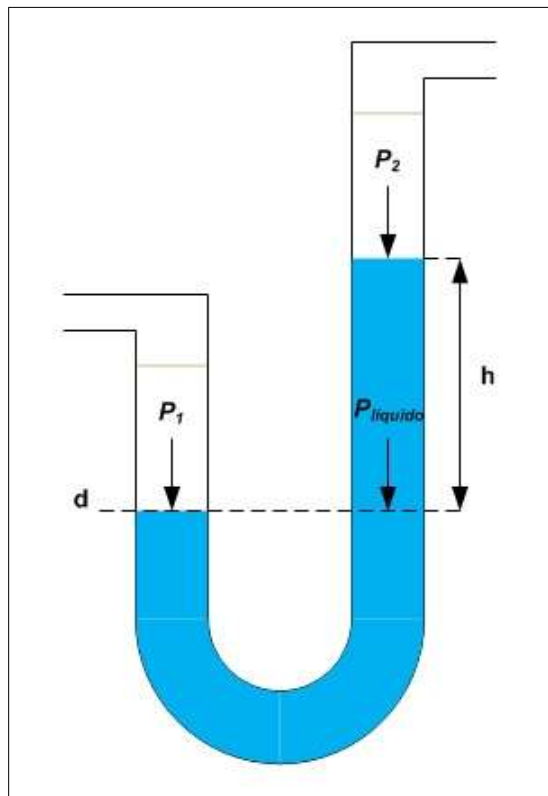


Fig. 8.4 (b) – Manómetro

Por ejemplo, a un nivel d la presión total es igual a la presión $P_{líquido}$ que ejerce hacia abajo el peso del líquido más la presión P_2 que se ejerce en el extremo derecho del tubo. En el extremo izquierdo del tubo se ejerce una presión P_1 . En equilibrio, la columna está soportada por la presión P_1 hacia arriba, que se transmite desde el otro brazo a través del líquido. Si la presión en cualquiera de los brazos cambia, el líquido se mueve hacia arriba en un brazo y hacia abajo en el otro hasta que se restablecen las condiciones de equilibrio. La ecuación del manómetro es la siguiente:

$$P_1 = \rho gh + P_2 \quad \text{Ecuación 8.4 (f)}$$

En dependencia de las conexiones de los brazos del manómetro se podrán realizar diferentes mediciones de presión (vea la Fig. 8.4 (c)).

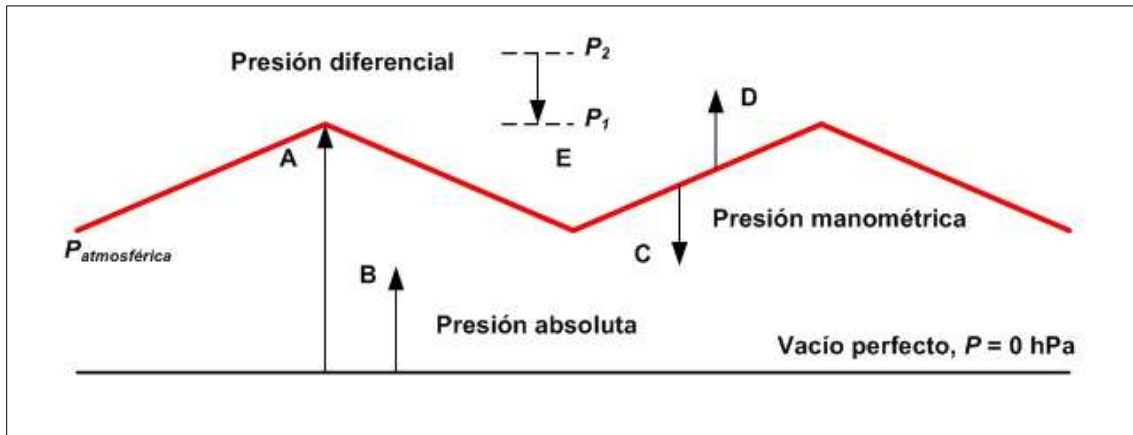


Fig. 8.4 (c) – Mediciones de presión

Si se hace el vacío en el tubo superior ($P_2 = \text{cero}$) entonces P_1 es una presión absoluta (casos A y B) y cuando la presión absoluta que se mide es la atmosférica (caso B) el manómetro de líquido se convierte en un barómetro. Si el tubo superior se conecta a la atmósfera ($P_2 = \text{presión atmosférica}$) P_1 es una presión manométrica (casos C y D) y valdrá cero cuando sea igual a la presión atmosférica. Por último, si P_2 se conecta a una presión de referencia diferente al vacío o la atmosférica, P_1 se denomina presión diferencial (caso E). En general:

$$P_{absoluta} = P_{manométrica} + P_{atmosférica} \quad \text{Ecuación 8.4 (g)}$$

El principio básico del barómetro de mercurio consiste en que la presión de la atmósfera se equilibra con el peso de una columna de mercurio y se mide la longitud de la columna de mercurio con una escala graduada en unidades de presión.

En la Fig. 8.4 (d) el manómetro de líquido de la Fig. 8.4 (b) se ha convertido en un barómetro de mercurio haciendo el vacío en uno de sus brazos y conectando el otro a la presión atmosférica. En este caso, $P_1 = P_{atmosférica}$ y la Ecuación 8.4 (g) se convierte en:

$$P_{atmosférica} = \rho gh \quad \text{Ecuación 8.4 (h)}$$

Donde ρ es la densidad del mercurio, en g/m^3
 g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2
 h es la distancia de la superficie al punto, en m

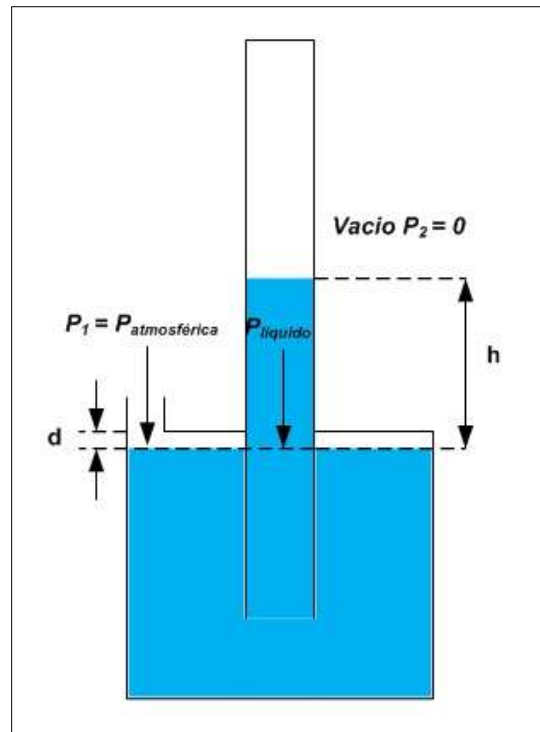
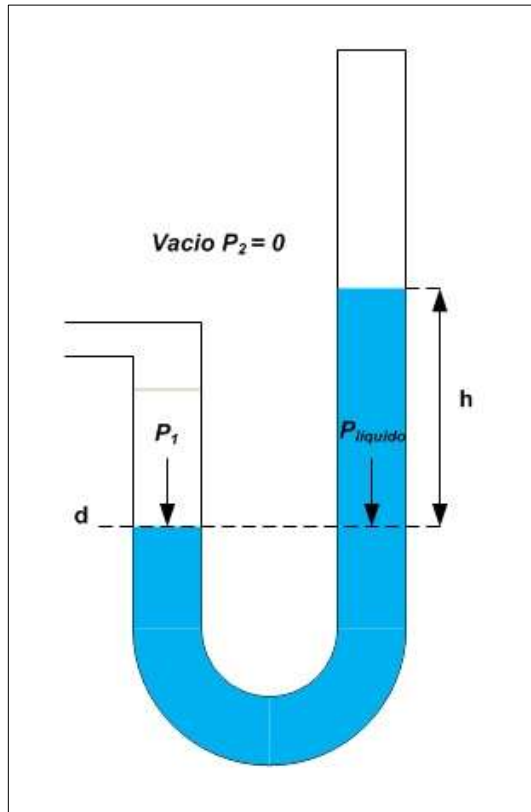


Fig.8.4 (d) – Manómetro como barómetro Fig. 8.4 (e) – Barómetro de mercurio

Como se puede apreciar en la Fig. 8.4 (e), otra transformación que sufre el manómetro de líquido para convertirse en un barómetro de mercurio práctico es que el brazo de la U donde se aplica la presión atmosférica que se desea medir, y que recibe el nombre de cubeta, es de mucho mayor diámetro que el brazo donde se hace el vacío. Por consiguiente, debido a que el área de la cubeta es mucho mayor que la del tubo, las variaciones de altura de la columna de mercurio en la cubeta serán proporcionalmente mucho menores que en el tubo, lo que facilita la construcción de la escala del instrumento.

Barómetro de cubeta ajustable (Fortin)

En la Fig. 8.4 (f) se muestra un esquema del barómetro Fortin. La cubeta del barómetro Fortin está provista de un fondo móvil (hecho de gamuza) que permite ajustar el nivel de mercurio en su interior a un nivel fijo de referencia. La cubeta del barómetro Fortin se compone de tres partes principales: un fondo de cuero con un tornillo para ajustar el nivel de mercurio de la cubeta, la pared del tubo de vidrio de la cubeta y el tope de la cubeta que tiene un índice de marfil cuya punta indica el cero de la escala barométrica. Un pequeño agujero en el tope de la cubierta, provisto de un tornillo, constituye la única entrada de aire atmosférico en la cubeta. La cubeta va fijada a un tubo metálico rasurado, que lleva encima la escala del barómetro y un termómetro ordinario de mercurio. El tubo de metal actúa como protector del tubo barométrico de vidrio. La altura de la columna de mercurio se calcula mediante una escala vernier montada en la abertura de la parte superior del tubo metálico. La escala vernier se mueve respecto a la principal por medio de un micrómetro. Como el nivel de la superficie del mercurio en la cubeta se ajusta, la cantidad exacta de mercurio que tiene el barómetro no es crítica para su operación.

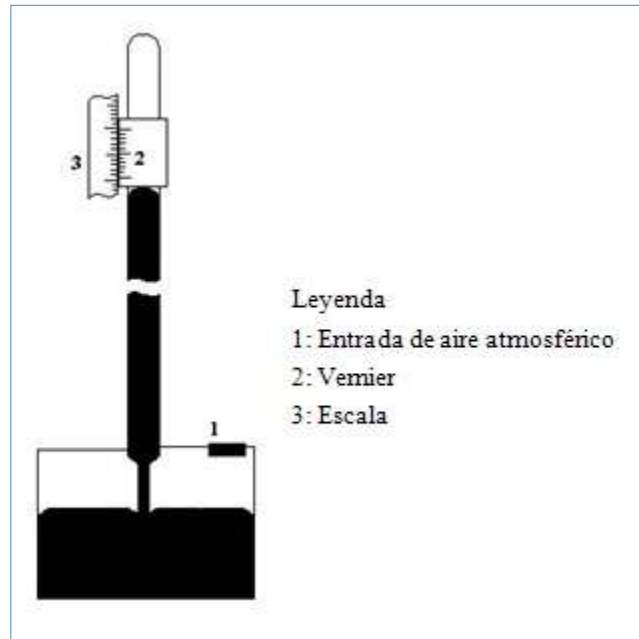


Fig. 8.4 (f) – Barómetro de cubeta ajustable (Fortin)

La lectura del barómetro Fortin se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Haga la lectura del termómetro adjunto;
- 2) Ajuste el nivel del mercurio en la cubeta empleando el tornillo de ajuste del fondo:
 - a) Gire el tornillo para bajar el nivel de la superficie de mercurio a 6 mm o menos por debajo del punto cero (punta del índice de marfil)
 - b) Gire el tornillo en sentido inverso para elevar lentamente el nivel del mercurio en la cubeta hasta una distancia aproximada de 1,5 mm del punto cero. Golpee suavemente con la yema del dedo dos o tres veces la cubeta (para eliminar el exceso de fricción entre el mercurio y la pared interna de la cubeta)
 - c) Seguidamente, gire el tornillo en el mismo sentido hasta que desaparezca el fondo de luz visible entre la superficie del mercurio y la punta del cero. Para un ajuste correcto, aparecerá un hoyuelo diminuto en el punto de contacto. Si la superficie de mercurio es brillante se observará la imagen de la punta de marfil en el espejo de la superficie de mercurio de la cubeta
- 3) Golpee suavemente con la yema del dedo el tubo protector del barómetro a la altura del menisco superior (para eliminar el exceso de fricción entre el mercurio y la pared interna del tubo de vidrio.) Controle el nivel y, si fuera necesario, repita el paso 2)
- 4) Enrase el nonio:
 - a) Gire la perilla hasta que el nonio haya subido a un nivel ligeramente superior al del menisco, después de lo cual se bajará lentamente hasta que el borde inferior del nonio se halle muy próximo al tope del menisco
 - b) Párese firmemente en una posición tal que el nivel del ojo coincida con el tope del menisco. Manteniendo su nivel visual a la altura del menisco del mercurio del tubo, lleve el borde del cero del vernier hasta que entre en contacto visual con el tope de la columna de mercurio.

- c) Durante la etapa final, pero antes de concluir el enrase, se observará una ranurita blanca en el fondo de luz, entre el menisco y el borde inferior del nonio. A medida que se baja el nonio, la ranurita se hace cada vez más estrecha. Con un ligero movimiento vertical de la cabeza, hacia arriba y hacia abajo, se observa que la altura vertical de la ranurita cambia. Se considera que la línea visual es la apropiada cuando se observa la máxima altura vertical de la ranura reducida a nada en el tope del menisco, esto es, en el momento en que el borde inferior del nonio se pone en contacto con el menisco en su punto más alto. Una vez que se haya concluido el enrase será posible observar dos triangulitos (uno a cada lado del menisco) de luz, en lugar de la ranurita original.

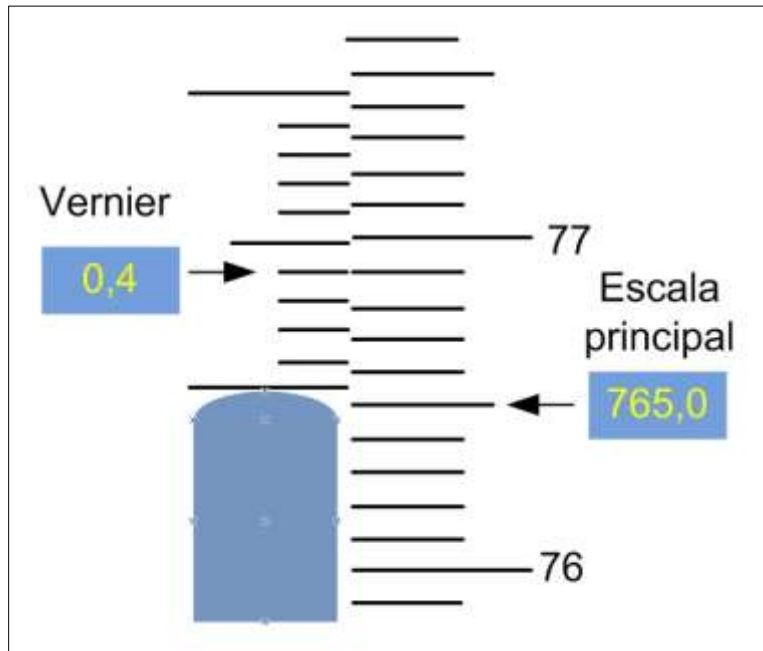


Fig. 8.4 (g) – Lectura del barómetro de mercurio

En la Fig. 8.4 (g) se ejemplifica la lectura de un barómetro graduado en mm de Hg. Después de enrasar el nonio, se lee directamente en la escala fija la centena, decena y unidad del valor de la presión. En el ejemplo se observa que el cero de la escala del nonio indica un valor de 765 mm de Hg. El valor de la décima será el de aquella división de la escala del nonio que mejor coincida con alguna división de la escala principal. En el ejemplo de la Fig. [6.10], la cuarta división de la escala del nonio (0,4 mm de Hg) es la que más se acerca a una división de la escala fija, por consiguiente, sumada al valor de la escala fija da una presión observada de 765,4 mm de Hg

Barómetro de cubeta fija (Kew o de escala compensada)

En la Fig. 8.4 (h) se muestra un esquema del barómetro Kew, instrumento cuya diferencia principal con el barómetro Fortin en que su cubeta es fija.

Como el volumen de la cubeta es constante, a una subida de la columna de mercurio en el tubo le corresponderá una caída de su nivel en la cubeta y viceversa. Como el nivel de la superficie libre del mercurio está cambiando continuamente en la cubeta según las variaciones de la presión y su fondo es fijo, no se puede ajustar un punto de referencia como en el barómetro

Fortin para medir la altura de la columna de mercurio. Por ese motivo, se hace necesario compensar la escala fija del barómetro Kew.

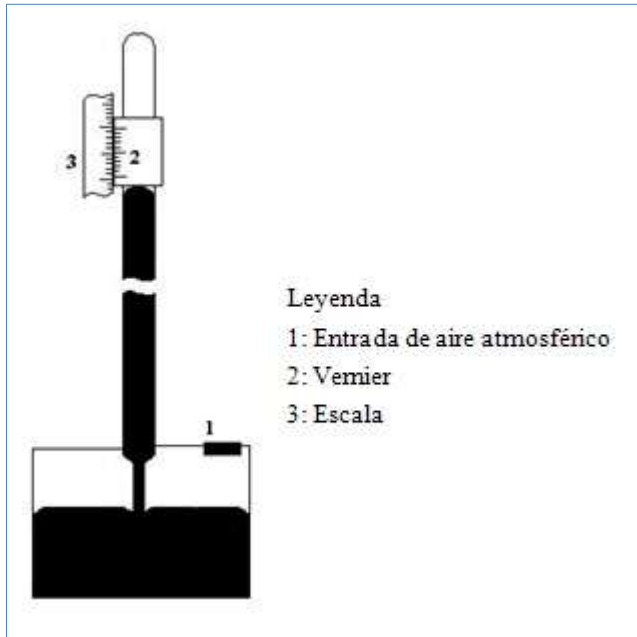


Fig. 8.4 (h) – Barómetro de cubeta fija (Kew)

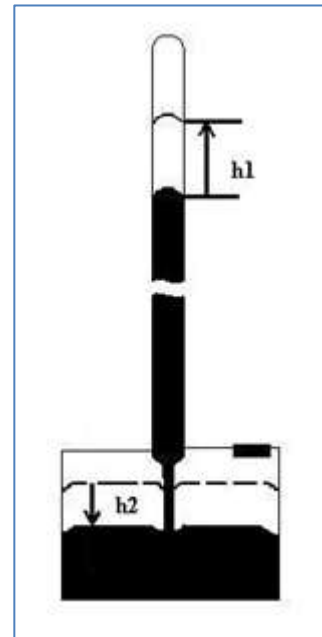


Fig. 8.4 (i) – Cálculo de la compensación

Para calcular la compensación de la escala, consideremos la respuesta del barómetro a un aumento de presión que aumenta la altura de la columna de mercurio en 1 mm. Como se observa en la Fig. 8.4 (i), la altura del menisco aumenta una cantidad h_1 y el nivel del mercurio de la cubeta disminuye una cantidad h_2 . La suma de ambas cantidades tendrá un valor de 1 mm:

$$h_1 + h_2 = 1\text{mm} \quad \text{Ecuación 8.4 (i)}$$

Como la presión se transmite por igual en el fluido el cambio de volumen V_C en la cubeta debe ser igual al cambio de volumen V_T en el tubo:

$$V_C = (\pi R^2 h_2 - \pi r_1^2 h_2) = V_T = \pi r_2^2 h_1 \quad \text{Ecuación 8.4 (j)}$$

Donde R es el radio interno de la cubeta

r_1 es el radio del extremo sumergido en la cubeta del tubo

r_2 es el radio del extremo superior del tubo

h_1 es el cambio en la altura del menisco de mercurio

h_2 es el cambio en la altura del mercurio en la cubeta

Si se resuelven las Ecuaciones 8.4 (i) y (j) para expresar el cambio de altura h_1 del menisco en función de los parámetros de diseño del barómetro, obtenemos el siguiente resultado:

$$h_1 = \frac{R^2 - r_1^2}{R^2 - r_1^2 + r_2^2} \quad \text{Ecuación 8.4 (k)}$$

Sustituyendo los parámetros de diseño de un barómetro Kew típico ($R = 25$ mm, $r_1 = 3$ mm y $r_2 = 4$ mm) se obtiene que, para un aumento de la presión de 1 mm de mercurio, la altura del menisco subirá 0,975 mm (y el nivel del mercurio de la cubeta descenderá 0,025 mm). Por

consiguiente, para compensar la escala se deberá graduar en unidades menores que 1 mm (en el ejemplo, en divisiones de 0,975 mm) y esta es la razón por la que el barómetro Kew se conoce también con el nombre de barómetro de escala contraída.

Una consecuencia del principio de calibración de la escala del barómetro Kew es que cualquier alteración de la cantidad de mercurio con que se diseñó el instrumento introduce errores en la lectura de la presión.

La lectura del barómetro Kew es más simple que la del Fortin, pues no hay que ajustar el nivel del mercurio de la cubeta. Se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- a) Haga la lectura del termómetro adjunto;
- b) Golpee suavemente con la yema del dedo el tubo protector del barómetro a la altura del menisco superior (para eliminar el exceso de fricción entre el mercurio y la pared interna del tubo de vidrio) y
- c) Enrase el nonio y lea las centenas, decenas y unidades del valor de la presión observada en la escala fija y el de las décimas en la escala del nonio.

Principales fuentes de error en los barómetros de mercurio

Las principales fuentes de error en los barómetros de mercurio son las siguientes:

- a) Incertidumbres en la temperatura del instrumento. La temperatura que indica el termómetro unido al barómetro generalmente no es idéntico a la temperatura media del mercurio, la escala y la cubeta. En un local cerrado, se produce con frecuencia un gradiente vertical amplio y estable de temperatura que puede causar diferencias considerables entre las temperaturas de las partes superior e inferior del barómetro. Un ventilador eléctrico puede evitar que se produzca dicha distribución de temperaturas, pero puede causar variaciones de presión locales, por lo que se debe desconectar antes de hacer la observación;
- b) Vacío imperfecto de la cámara barométrica. En general, se supone que un instrumento calibrado tiene un vacío perfecto o sólo una cantidad de gas despreciable por encima de la columna de mercurio. La presencia de pequeñas cantidades de gas se puede detectar como un golpe seco apagado cada vez que se inclina ligeramente el barómetro. El golpe seco normal, que es un sonido agudo y metálico, significa que la columna de mercurio ha alcanzado el extremo del tubo cerrado de vidrio sin encontrar ninguna obstrucción debido a gases comprimidos. Sin embargo, no se puede detectar de este modo la presencia de vapor de agua, porque se condensa por compresión cuando disminuye el volumen de la cámara barométrica. Los vapores de mercurio no afectan la exactitud de las mediciones porque el valor de su presión es despreciable: 0,00399 hPa a 30 °C;
- c) Desviación del barómetro de la posición vertical. Por ejemplo, si el extremo inferior de un barómetro de escala compensada de longitud normal (unos 90 cm) y colgado libremente se desplaza unos 6 mm con respecto a la vertical, la presión que indique tendrá un error por exceso de alrededor de 0,02 hPa. A su vez, el barómetro Fortin es más sensible a la inclinación; por ejemplo, si el índice de referencia de la cubeta está a unos 12 mm del eje del barómetro, basta con que la cubeta se desplace tan solo 1 mm respecto de la vertical para causar un error de 0,02 hPa);
- d) Impurezas del mercurio. El mercurio deberá ser bidestilado, desengrasado, repetidamente lavado y filtrado. Las impurezas de toda clase así como los metales

disueltos en el mercurio son fuentes de error en la lectura de la presión, pues al aumentar la depresión capilar del mercurio disminuyen el valor de la presión observada; y

- e) Depresión capilar de las superficies de mercurio. La altura del menisco y la depresión capilar de un tubo determinado pueden cambiar con la contaminación del mercurio, la tendencia de la presión y la posición del mercurio dentro del tubo. En tubos de diámetro pequeño, la tensión superficial del mercurio puede provocar una depresión apreciable de la columna de mercurio, como se muestra en la siguiente tabla:

Diámetro interno del tubo barométrico, en mm	Valor absoluto de la depresión, en mm
5,1	1,56
7,7	0,73
10,3	0,37
12,9	0,20
15,5	0,10

En la medida de lo posible, la altura media del menisco se observará durante la calibración original y se consignará en el certificado del barómetro. Por ejemplo, un cambio de 1 mm en la altura del menisco (de 1,8 mm a 0,8 mm) en un tubo de 8 mm de diámetro puede causar un error de aproximadamente 0,5 hPa en la lectura de la presión;

Emplazamiento del barómetro de mercurio

La ubicación del barómetro de mercurio deberá escogerse de forma tal que se minimicen las fuentes de errores que se mencionan en el epígrafe 6.3.1.4. Los principales requisitos del lugar de emplazamiento son:

- Ausencia de corrientes de aire. Si no se toman las debidas precauciones con las puertas y ventanas del local donde se halla el instrumento, los cambios de presión dinámica producidos por el viento se añaden al valor de la presión estática y, con viento fuerte y racheado, puede alcanzar una magnitud de 2 hPa a 3 hPa. El aire acondicionado también puede generar una diferencia de presión entre el interior y el exterior de una habitación;
- Temperatura uniforme o que cambie lentamente, y donde no se produzcan gradientes de temperatura;
- Montaje sólido y vertical, preferiblemente en una pared interior y donde no se transmitan vibraciones; y
- Buena iluminación, con una luz artificial que no caliente el barómetro durante las lecturas y que proporcione condiciones de iluminación uniformes en las lecturas. Se empleará un fondo blanco para facilitar el enrase del nonio y la lectura de las escalas del barómetro y del termómetro asociado.

Medidas de seguridad para manipular el barómetro de Hg

El mercurio es un metal venenoso que se encuentra en estado líquido a las temperaturas y presiones de la superficie terrestre. Por tanto, allí donde hay mercurio líquido se formará vapor de mercurio, clasificado como una sustancia peligrosa por sus efectos tóxicos. Deben tomarse

extremas precauciones cuando se trasladan de lugar los barómetros de mercurio para evitar dañar sus propiedades metrológicas o exponer al personal y medio ambiente a los vapores tóxicos.