

# MEDICIÓN PRIMARIA DE PRESIÓN BAROMÉTRICA

Torres Guzmán J., Soriano Cardona B., Olvera Arana P.  
Centro Nacional de Metrología  
km 4,5 carretera a Los Cués, El Marqués, Querétaro, México  
Tel. (52) 4 211 0572, fax (52) 4 211 0578, e-mail jtorres@cenam.mx

**RESUMEN:** La medición de presión barométrica se utiliza en la medición de presión atmosférica, para correcciones en la medición de presión manométrica, para la determinación de la densidad del aire y la corrección de la flotación de las masas en el aire. Por esto, se mide en la mayoría de laboratorios secundarios y primarios. Debido a este uso generalizado y a los niveles de incertidumbre requeridos se ha hecho necesaria la implantación de instrumentos primarios para su medición.

A nivel internacional, para la medición de presión barométrica se consideran como patrones primarios a aquellos reconocidos ampliamente como patrones que tiene las más altas cualidades metroológicas y cuyo valor es aceptado sin referencia a otros patrones de la misma magnitud. Este es el caso de las columnas de líquido y las balanzas de presión (balanzas de pesos muertos).

Los dos tipos de patrones primarios mencionados para presión manométrica son utilizados en el Centro Nacional de Metrología (CENAM, México). El caso de la columna de líquido, es el producto de un proyecto de desarrollo tecnológico conjunto entre el CENAM y el Istituto di Metrologia Gustavo Colonneti (IMGC, Italia).

En este artículo se presentan las características de los patrones del CENAM así como un resumen del diseño, construcción y operación del proyecto de la columna de líquido.

## INTRODUCCIÓN

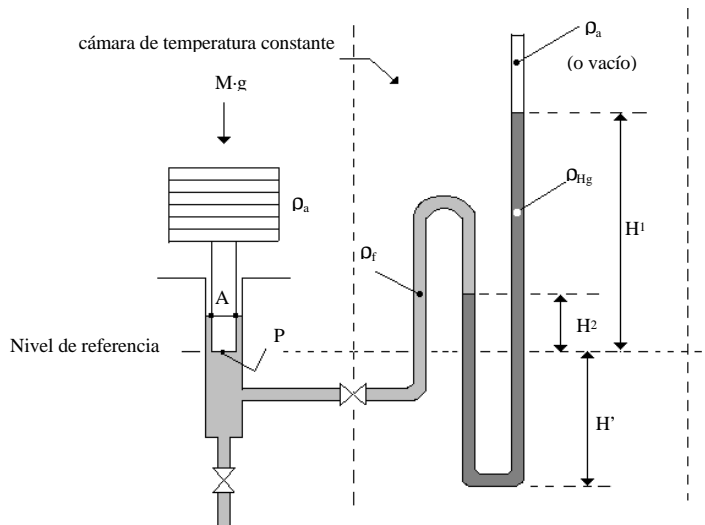
La magnitud de presión es una de las pocas con un intervalo de medición que rebasa las 19 décadas, desde  $1 \cdot 10^{-10}$  Pa hasta  $2 \cdot 10^9$  Pa. Las mejores mediciones en todo el intervalo de medición de presión se logran en el alcance de presión barométrica (típicamente de 10 kPa hasta 130 kPa). [1].

Por esto el origen para la trazabilidad de todas las mediciones de presión (absoluta, manométrica, barométrica y negativa o vacío) esta en el alcance de medición de presión barométrica.

Para la medición de presión barométrica existen dos tipos de patrones primarios, los cuales se basan en diferentes principios para realizar la medición: a) Las balanzas de presión, en el principio de equilibrio de fuerzas (fuerza por unidad de área). b) Las columnas de líquido, en el equilibrio de presiones (densidad del fluido manométrico por la diferencia de altura en las columnas por la atracción gravitacional). [2].

En este artículo se presentan los dos tipos de patrones primarios utilizados para la medición de presión barométrica y se indican las particularidades de los patrones del CENAM.

La figura siguiente esquematiza los dos tipos de sistemas primarios para la medición de presión barométrica.



**Figura 1. Esquema de los 2 sistemas primarios para la medición de presión barométrica.**

## COLUMNAS DE LÍQUIDO

Gracias a la simplicidad de su funcionamiento y a lo económico que puede resultar su compra o fabricación, las columnas de líquido (principalmente mercurio o agua) son el patrón de referencia de mayor uso en este intervalo de presión. Las columnas de líquido son el único instrumento basado en métodos primarios que puede encontrarse tanto como patrón de referencia como instrumento ordinario.

Las columnas de líquido son el instrumento de medición de presión más versátil, ya que permite implementar fácilmente configuraciones para la medición de diferentes tipos de presión, prácticamente con cualquier líquido: a) presión relativa, b) presión diferencial c) con manómetros de mercurio, presión negativa, presión absoluta y presión barométrica. [1].

La mayor parte de los sistemas primarios de presión barométrica se basan en sistemas de columnas de mercurio. Estos son reconocidos internacionalmente como patrones primarios de presión, ya que pueden ser referidos a magnitudes básicas, medidas con muy baja incertidumbre.

En el alcance de medición de 100  $\mu$ Pa hasta 130 kPa las columnas de mercurio son los instrumentos más exactos para medir presión. Para cubrir distintos intervalos de medición se han fabricado diferentes diseños. [3].

El método clásico para la medición de presión en una columna de líquido, emplea agujas metálicas orientadas por micrómetros o un catetómetro para determinar la posición de los niveles de mercurio y con esto, la diferencia de altura de la columna. Esta técnica tiene un límite de exactitud de 0,01 mm para el catetómetro (esto es, cercano a 3 Pa).

Para presiones de hasta 100 kPa, se pueden lograr mejores exactitudes utilizando interferometría óptica. Su exactitud va hasta 0,01  $\mu$ m, una incertidumbre relativa expandida aproximada de  $3 \cdot 10^{-6}$  de la lectura.

A estos niveles de exactitud, las incertidumbres en la medición de longitud, aceleración de la gravedad, densidad del líquido (que es dependiente de la presión y temperatura), columna de aire, presión de vapor del líquido, y depresión por capilaridad, se vuelven críticas.

Para medición de alta exactitud deben considerarse forzosamente las correcciones de los posibles errores debidos a las variables de influencia mencionadas,

exceptuando la depresión por capilaridad de la superficie del mercurio, efecto que puede ser minimizado mediante el uso de tubos con algunos centímetros de diámetro.

La presión generada por las columnas de mercurio se determina mediante la siguiente ecuación general:

$$P_a = r_{Hg} \cdot g \cdot h \cdot \cos q + P_b \quad (1)$$

Donde,

- $P_a$  presión a ser medida,
- $r_{Hg}$  densidad del líquido,
- $g$  aceleración de la gravedad local,
- $h$  altura de la columna de líquido,
- $r_{Hg} \cdot g \cdot h$  presión generada por la columna de líquido manométrico,
- $q$  ángulo de desviación de la columna con respecto a la vertical,
- $P_b$  presión en la columna de referencia.

## BALANZAS DE PRESIÓN

La balanza de presión, conocida también como balanza de pesos muertos o manómetro de pistón, es un instrumento de medición que es utilizado como patrón para calibrar. Generalmente, las balanzas de presión miden con referencia a la presión atmosférica, sin embargo existen algunos diseños a los cuales se les adapta una campana con una conexión que se puede conectar a una línea de vacío y así poder medir presión absoluta. Para realizar una medición con una balanza, se debe conocer la presión del fluido manométrico; la forma de hacerlo es encontrando el equilibrio de la presión interna de la balanza (suministrada por el compresor) y la presión generada por el peso de las masas sobre el área del pistón. Una vez encontrado este equilibrio o flotación se puede conocer la presión utilizando la ecuación (2).

Existen varios factores que limitan la exactitud de las balanzas de presión, algunos de los principales son la fricción entre el pistón y el cilindro, y la incertidumbre en la medición del área del pistón. Para reducir la fricción, en el momento de la flotación se hace girar el conjunto de las masas con el pistón (el coeficiente de fricción dinámico es mucho menor que el coeficiente de fricción estático). Por otra parte, para lograr una fuga despreciable de fluido manométrico en las balanzas (flujo de fluido a través del espacio anular entre el pistón y el cilindro) se utilizan superficies largas, esto es longitudes mayores del pistón. [4].

El área sobre la que actúa la fuerza se llama área efectiva, la cual es el área del pistón más una parte del huelgo o separación entre el pistón y el cilindro.

Una ecuación general para calcular la presión con una balanza de presión es:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \left[ 1 - \left( \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \right] g + \gamma C}{A_0 \left( 1 + (\alpha_c + \alpha_p) (t - t_r) \right) (1 + b p_n)} \quad (2)$$

- P = presión,
- $m_i$  = i-ésima masa,
- g = aceleración de la gravedad local,
- $\rho_a$  = densidad del aire local,
- $\rho_m$  = densidad de las masas de la balanza,
- C = circunferencia del pistón,
- $\gamma$  = tensión superficial del fluido,
- $A_0$  = área efectiva a la temperatura de referencia y presión atmosférica,
- $\alpha_c$  = coeficiente de dilatación térmica del cilindro,
- $\alpha_p$  = coeficiente de dilatación térmica del pistón,
- t = temperatura del pistón al momento de realizar la calibración,
- $t_r$  = temperatura de referencia del pistón,
- b = coeficiente de deformación elástica del pistón,
- $p_n$  = presión nominal.

## PATRONES PRIMARIOS DE MÉXICO

### Columnas de líquido. Manobarómetro

El manobarómetro CENAM/HG-6 es una columna de mercurio en forma de U del tipo Fortín. Esta configuración permite utilizar el instrumento para la medición de diferentes tipos de presión: presión relativa, presión negativa, presión diferencial y presión absoluta o bajo vacío.

El manobarómetro está formado por dos tubos de vidrio de 90 cm de altura y 60 mm de diámetro interno, interconectadas y parcialmente llenas de mercurio (hasta un nivel medio de la altura de la columna). El gran diámetro de los tubos reduce el efecto de capilaridad e histéresis del menisco de mercurio. Las columnas de mercurio están inmersas en un baño termostático de alta estabilidad con agua en recirculación, con el propósito de mantener la temperatura del mercurio a 20 °C. La temperatura del mercurio se mide con dos sensores de temperatura de resistencia de platino (RTD Pt-100) ubicados en el fondo y dentro de las columnas de mercurio. La

densidad del mercurio utilizado en el CENAM/HG-6 es conocida, así como su composición isotópica lo cual equivale a su número de identificación única.

La diferencia de alturas entre las dos columnas de mercurio, se mide mediante un sistema de interferometría láser de helio – neón (He-Ne) de haz simple con resolución de 10 nm y estabilidad a largo plazo de  $0,02 \cdot 10^{-6}$  de la lectura (incertidumbre relativa expandida). Una característica importante del sistema de medición de altura, son los dispositivos de reflexión del haz, que constan de retroreflectores colocados en flotadores cerámicos flotando sobre la superficie del mercurio.

En la siguiente figura se muestra el patrón de presión barométrica por columna de líquido.



**Figura 2. Patrón nacional de presión barométrica por columna de líquido. Manobarómetro.**

### Balanzas de presión

La balanza de presión primaria del CENAM, usa una campana de vidrio para aislar el ambiente de operación del ensamble pistón cilindro y las masas aplicadas. Este aditamento le permite medir presión absoluta (dentro de la cual se mide la presión

barométrica), así como manométrica (positiva y negativa). [5].

Para medir presión barométrica (o cualquier presión absoluta), se agrega la operación de una bomba de vacío, la cual tiene la función de extraer el aire dentro de la campana de vidrio, para eliminar la presión atmosférica local y tomar el “cero absoluto” de presión como referencia para las lecturas de la balanza. El cero absoluto se asume, ya que no es alcanzable, la presión interna de la campana de vidrio solo tiene que ser lo suficientemente pequeña como para no ser significativa (aproximadamente 0,1 Pa) para la medición de la presión barométrica.

Para la medición de presión barométrica, o cualquier presión absoluta, la densidad del aire en la ecuación (2) se considera cero.

Esta balanza es de fabricación en Estados Unidos, sin embargo en su caracterización colaboró personal del CENAM. [7].

En la figura 3 se muestra la balanza con masas colocadas y la campana de vidrio instalada.



**Figura 3. Balanza de presión (patrón primario) preparada para la medición de presión barométrica.**

## CONCLUSIONES

El manobarómetro CENAM/HG-6 desarrollado por metrologos del CENAM entre 1994 y 1999 (en IMGC Italia y en CENAM), es la nueva generación de una familia de barómetros italianos (HG-3 y HG-5) diseñados en el Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti (IMGC). [6].

Las mejores características metrológicas del CENAM/HG-6 se obtienen en el modo de presión absoluta, dado que se eliminan algunas variables de influencia como: las variaciones de la presión atmosférica durante el día; al mantener la columna de referencia a vacío mediante un sistema de bombeo de arrastre molecular, se mide el vacío en la columna de referencia con un sensor de diafragma capacitivo de presión total; en lugar de calcular la presión de saturación del vapor de mercurio; así mismo, se mantiene el mercurio en atmósfera inerte de nitrógeno (grado investigación) para evitar el contacto de la superficie de mercurio con el aire.

El alcance de medición del manobarómetro es desde 1 kPa hasta 120 kPa con una incertidumbre de medición esperada (para  $k = 1$ ) menor a  $\pm 0,5$  Pa que corresponden a una incertidumbre relativa de  $\pm 4 \cdot 10^{-6}$ . Lo que lo sitúa como uno de los barómetros más exactos en el ámbito metrológico internacional.

El patrón de presión mediante balanza de presión cuenta con un ensamble pistón-cilindro (identificación PC-216) del tipo huelgo controlado, utiliza gas como fluido manométrico y un módulo de control donde se registran la velocidad de giro del pistón, la caída del pistón, la temperatura y la humedad.

El alcance de medición de la balanza de presión es desde 2,5 kPa hasta 175 kPa con una incertidumbre relativa expandida de  $\pm 2,0 \cdot 10^{-5}$  ó  $\pm 0,25$  Pa, lo que sea mayor.

El pistón tiene un diámetro de 50 mm, siendo este el mayor diámetro actualmente utilizado a nivel internacional. [7].

La caracterización de esta balanza en el National Institute of Science and Technology (NIST, de Estados Unidos), permitió desarrollar mejores características para esta balanza, así como seleccionar la mejor combinación de materiales para el ensamble pistón cilindro. La experiencia en la operación y el uso de esta balanza desarrollado por el CENAM, permite contar con un nivel de incertidumbre que la coloca entre los mejores instrumentos a nivel mundial.

## RECONOCIMIENTOS

En el diseño y construcción del manobarómetro colaboraron Víctor Aranda y Alfredo Esparza de la División de Metrología de Fuerza y Presión del CENAM. Agradecemos el enorme apoyo, expertas asesorías y continua supervisión de Franco Alasia del Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti (IMGC de Italia) para la construcción y operación del manobarómetro.

## REFERENCIAS

- [1] Torres Guzmán Jorge C., Aranda Contreras Víctor M., Manómetros de Columna de Líquido, Publicación Técnica del CENAM CNM-MMF-PT-001. Febrero de 2001.
- [2] Soriano Cardona Benjamín, Torres Guzmán Jorge C., Olvera Arana Pablo, Santander Romero Luis, Metrología de Presión, Notas del curso del CENAM, División de Metrología de Fuerza y Presión. Mayo de 2000.
- [3] Tilford C. R., Three and a half centuries later – the modern art of liquid-column manometry, Metrologia 1993/94, 30.
- [4] Torres Guzmán Jorge C., Soriano Cardona Benjamín, Santander Romero Luis, Balanzas de Presión, Publicación Técnica del CENAM CNM-MMF-PT-003. Diciembre de 1999.
- [5] Soriano Cardona Benjamín, Torres Guzmán Jorge C., Santander Romero Luis, Metrología de Vacío, Notas del curso del CENAM, División de Metrología de Fuerza y Presión. Noviembre de 2000.
- [6] Alasia F., Capelli A., Cignolo G., Sardi M., A new generation of mercury manometers at the IMG, Metrologia 1993/94, 30.
- [7] Ehrlich C., Drajoud P., Girard M., Early History of the Development and Characterization of a 50 mm Diameter, Gas-Operated Piston Gauge as a Primary Pressure Standard, International Conference on Pressure Metrology from Ultra High Vacuum to Very High Pressures, Torino, Italia, Mayo de 1999.