

EFFECTOS DEL SENTIDO DE ROTACIÓN EN BALANZAS DE PRESIÓN

Víctor Aranda, Gerardo Aranda, Silvia Medrano y Noel Gutiérrez
MetAs, S.A. de C.V. Metrologos Asociados
Calle: Jalisco # 313, C.P. 49 000, Cd. Guzmán, Jalisco, México
01 (341) 4 13 61 23 y 4 13 16 91, www.metas.com.mx, metas@metas.com.mx

Resumen: Las balanzas de presión también conocidas como balanzas de pesos muertos o manómetros de pistón, son patrones de referencia para la calibración de presión y basan su principio de operación en un método primario [1] por la definición de la magnitud de presión que es fuerza por unidad de área, tanto para presión neumática como hidráulica. Normalmente el pistón de estas balanzas debe mantenerse girando a cierta velocidad y sentido de rotación durante la flotación y equilibrio de las pesas. Se han recabado datos respecto al efecto de: sentido de rotación, frecuencia de rotación y nivel de flotación, sobre el comportamiento que presentan balanzas comerciales de tipo pistón operadas con aceite, con clase de exactitud del $\pm 0,2\%$ al $\pm 0,02\%$. Se concluye en recomendaciones prácticas para mejorar la exactitud y repetibilidad de estas balanzas.

INTRODUCCIÓN

Con el propósito de estudiar los efectos de la rotación del pistón en ambos sentidos de giro, diferentes frecuencias de rotación y diferentes niveles de flotación, se han recabado datos de aproximadamente 50 balanzas de presión comerciales, con clases de exactitud que van del $\pm 0,2\%$ al $\pm 0,02\%$, en los alcances de medición de 700 kPa (100 psi) hasta 70 MPa (10000 psi), operadas con aceite o agua, de marcas (listadas en orden alfabético) como: Ametek-M&G, Amthor, Ashcroft-Dresser, Chandler-EG&G, Dewit, Terriss. Las balanzas operadas con gas en alcances de 12 kPa (50 inH₂O) hasta 7 MPa (1 000 psi) no han sido consideradas dentro de esta evaluación.

Nomenclatura y factores de conversión

Frecuencia de rotación [2, 3] en min^{-1} ($r/\text{min} = \text{rpm}$).

CW = rotación en sentido de las manecillas del reloj (por su abreviatura en inglés).

CCW = rotación en sentido opuesto de las manecillas del reloj (por su abreviatura en inglés).

%L = porcentaje de la lectura (relativo).

%ET = porcentaje de escala total (fiducial).

6 894,757 Pa = 1 psi = 1 lbf/in².

BALANZAS DE PRESIÓN

La primera balanza de presión fue descrita en París por Galy-Cazalat en 1846, posterior a 1871 Amagat utilizó la rotación para eliminar la fricción entre el pistón y el cilindro. Tanto Galy - Cazalat como

Amagat utilizaron una combinación de columna de mercurio con un multiplicador hidráulico de pistón.

En 1882 Ruchholz patentó en Alemania el pistón cilindro tipo simple incluyendo características como: pesas sobre el pistón, pistón recto, rotación del pistón, válvula y conector para manómetros y depósito de aceite, características que se mantienen en las balanzas de presión que hoy en día utilizamos [4].

Dos factores limitan la exactitud de las balanzas de presión: a) la incertidumbre en el área del ensamble pistón cilindro y b) la fricción entre el pistón y el cilindro [5].

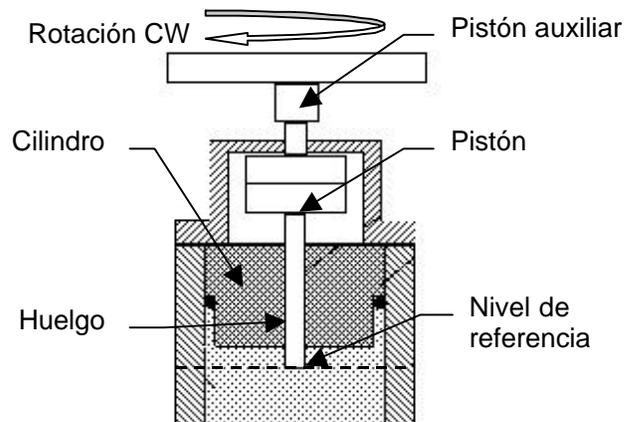


Fig. 1 ensamble pistón cilindro reentrante [6]

CALIBRACIÓN DE BALANZAS DE PRESIÓN

La calibración de balanzas de presión con clase de exactitud no mejor 0,005 %L, se puede realizar mediante el procedimiento de flotación cruzada, ver figura 2, por dos métodos [7, 8]: a) *presión generada*, determinando el valor de presión que a condiciones normalizadas genera cada pesa en combinación con su ensamble pistón cilindro, y b) *área efectiva*, en la que se requiere la calibración de las masas y del área del ensamble pistón cilindro.

En cualquiera de los métodos se deberán evaluar los efectos de fricción y fuga del ensamble pistón cilindro. La fricción se observa principalmente en la disminución del tiempo de desaceleración de rotación del pistón por efectos de fricción a bajas presiones esto es alrededor del 10 % del alcance de medición. La fuga se evalúa por la disminución del tiempo de caída del pistón a alta presión, es decir al 100 % del alcance de medición del ensamble. Tanto el efecto de fricción a baja presión y de fuga a alta presión incrementan la temperatura del ensamble pistón cilindro.

De acuerdo con la OIML R 110 para la calibración de balanzas de presión con clase de exactitud del 0,2 %L; 0,1 %L y 0,05 %L el patrón de referencia debe tener una clase de exactitud al menos dos veces mejor. Mientras que para balanzas de presión del 0,02 %L; 0,01 %L y 0,005 %L la incertidumbre del patrón de referencia combinada con la del método de calibración debe ser al menos mejor a la clase de exactitud de la balanza a ser calibrada.

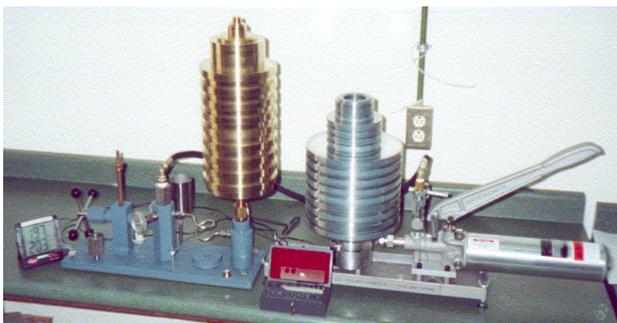


Fig. 2 calibración por flotación cruzada

La recomendación internacional OIML R 101 y el documento EAL-G26, indican que los patrones de referencia utilizados para la calibración de balanzas de presión deben ser: a) otras balanzas de presión, y b) columnas de mercurio para alcances menores a

300 kPa. Los datos experimentales mostrados adelante, han sido recabados en el proceso de calibración de balanzas de presión hidráulicas con alcances de 700 kPa a 70 MPa contra patrones de referencias como: a) Balanza de presión operada con aceite, con dos ensambles pistón cilindro tipo reentrante con alcances de 7 MPa y 70 MPa e incertidumbre de medición del $\pm 0,01$ %L en presión, y b) columna de mercurio [9] con alcance de 160 kPa e incertidumbre de medición del $\pm 0,015$ %ET. En todos los casos los resultados cuentan con trazabilidad a patrones nacionales y constantes físicas, tomando los puntos de calibración indicados en la tabla 1.

Los resultados mostrados en este artículo han sido recabados en la calibración de balanzas de presión por el método a) determinación del valor de *presión generada*, con balanza de presión patrón la cual a su vez es calibrada por el método b) de *área efectiva*.

Puntos de calibración Vs. alcance	
$\approx 10\%$	Π CW, Θ CCW, Π CW, Θ CCW
$\approx 50\%$	Π CW, Θ CCW, Π CW, Θ CCW
$\approx 100\%$	Π CW, Θ CCW, Π CW, Θ CCW
$\approx 50\% - P_i$	Π CW
$\approx 50\% + P_j$	Π CW

Tabla 1 puntos de calibración

FRECUENCIA Y SENTIDO DE ROTACIÓN

En la calibración de balanzas de presión, se debe alternar la dirección de rotación del pistón tanto en sentido de las manecillas del reloj (CW) como en sentido opuesto (CCW) cuando se ve el conjunto de pistón y pesas desde la parte superior. La rotación se provoca normalmente de forma manual, procurado impulsar el conjunto pistón y pesas a la altura del plato del pistón que actúa como porta pesas, para evitar que en el impulso de rotación las pesas oscilen, lo cual puede provocar que el pistón

se llegue a torcer. A bajas presiones cuando el momento de inercia de las pesas utilizadas es pequeño, el tiempo que dura girando el pistón se reduce, lo cual es un indicativo del límite inferior de presión que puede ser medido por la balanza [4]. Para establecer la velocidad o frecuencia de rotación es suficiente con estimar el tiempo en que tarda en dar un giro completo el conjunto de pesas, correspondiendo 6 s para 10 min^{-1} [6], 4 s para 15 min^{-1} [4] y 2 s para 30 min^{-1} [4, 6].

El sentido de rotación del pistón puede afectar el comportamiento de la balanza. Esto se atribuye a las marcas helicoidales que dejan las herramientas con que se fabrican el pistón y el cilindro [6], por lo cual es conveniente que se observe el efecto del sentido de rotación en la incertidumbre de las balanzas de presión.

La desaceleración del pistón y pesas es causado por el arrastre viscoso del aceite en el huelgo entre el pistón y el cilindro, el tiempo de rotación libre del pistón se puede aumentar utilizando: aceite menos viscoso o aumentando el huelgo a expensas de sensibilidad y exactitud o utilizando pesas con momento de inercia alto [4].

El propósito de mantener girando el pistón, durante la medición de presión con la balanza, es reducir la fricción viscosa en dirección axial del pistón en el cilindro, y mantener una película de aceite lubricante entre el pistón y el cilindro. El aceite de lubricación (incluso en balanzas neumáticas) además de reducir el desgaste reduce la velocidad de caída del pistón o fuga, además el uso de superficies de contacto entre el pistón y el cilindro lo bastante largas como se denota en la ecuación (2) asegura un flujo o fuga despreciable del aceite a través del huelgo anular entre el pistón y el cilindro [5].

El tiempo de rotación libre del pistón evaluado al 20 % del alcance, iniciando con una frecuencia de rotación de 30 min^{-1} impulsada manualmente, se debe mantener como mínimo dentro de los valores recomendados por la OIML R 110 que se muestran en la tabla 2.

Límite superior del alcance	Tiempo de rotación libre (min) Clase de exactitud		
	0,005 a 0,01	0,02	0,05 a 0,2
0,1 a 6 MPa	4	3	2
6 a 500 MPa	6	5	3

Tabla 2 tiempo de rotación libre del pistón [7]

FRICCIÓN

Fricción o rozamiento es la resistencia que surge cuando dos superficies sólidas se deslizan o tienden a deslizarse una sobre la otra. Cuando las superficies están separadas entre si por una película delgada de lubricante, la fricción es llamada de superficie lubricada o grasosa o lubricación circundante [10].

Cuando la lubricación se dispone de modo que las superficies que se frotan quedan separadas por una película de fluido, y la carga en las superficies queda por completo soportada por la presión hidrostática o hidrodinámica de la película, la fricción es de lubricación completa o viscosa. En este caso, las pérdidas por fricción se deben únicamente a la fricción interna del fluido de la película [10].

Coefficiente de fricción dinámica

Cuando no hay fricción, la resultante de las fuerzas entre las superficies de dos cuerpos que se oprimen entre si es normal a la superficie de contacto; con la presencia de fricción, la resultante se desvía respecto de la normal [10].

Dentro de los límites prácticos de velocidades de deslizamiento, los coeficientes de fricción dinámica (por deslizamiento o cinética) son menores que los coeficientes de fricción estática [10].

A presiones moderadas, la fuerza de fricción es proporcional a la carga normal sobre las superficies que se rozan y es independiente de la presión por unidad de área de las superficies. El coeficiente de fricción es, aproximadamente independiente de la frecuencia de rotación, si ésta es lo bastante baja como para no afectar la temperatura de la superficie; a frecuencias de rotación mas altas, el coeficiente de fricción disminuye al aumentar la frecuencia de rotación [10].

Con fricción de superficie lubricada, los coeficientes de fricción dependen de los materiales y el acabado superficial, así como del lubricante utilizado. Los coeficientes de fricción son sensibles al polvo, humedad, películas de óxido, acabado superficial, frecuencia de rotación, la temperatura, la vibración y contaminación [10].

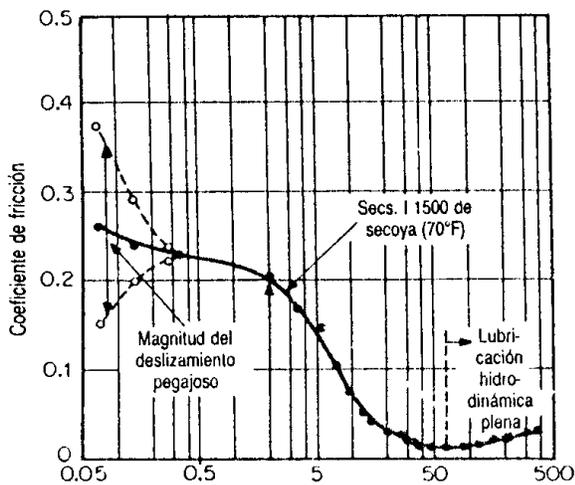


Fig. 3 coeficiente de fricción Vs. frecuencia de rotación en min^{-1} [10]

En la figura 3 se indican los resultados de pruebas aplicadas en guías lubricadas de máquinas herramientas obtenidos por Dudley D. Fuller [10], en los que se observa una reducción del coeficiente de fricción al aumentar la frecuencia de rotación a valores mayores a 10 min^{-1} , con frecuencias de rotación mayores, se establece una película de fluido entre el pistón y el cilindro y los valores del coeficiente de fricción dependen de la frecuencia de rotación, de la presión ejercida sobre el cilindro y de la viscosidad del aceite.

En la tabla 3 se dan los valores de los coeficientes de fricción dinámica [10] de las combinaciones de

materiales más comunes utilizados en ensambles pistón cilindro lubricados con aceite.

Combinación de materiales pistón y cilindro	Coefficiente de fricción dinámica
Acero duro y acero duro	0,081 a 0,108
Acero dulce y bronce fosforado	0,173
Acero dulce y acero dulce	0,19

Tabla 3 coeficientes de fricción dinámica

NIVEL DE REFERENCIA

El nivel de referencia de las balanzas de presión corresponde a la superficie inferior del pistón cuando está flotando al centro de la carrera del pistón, ver figura 1. El pistón tiene una carrera de trabajo y mientras se mantiene flotando dentro de esta carrera la balanza de presión mantiene un desempeño adecuado, la longitud de esta carrera varía según el fabricante, aunque típicamente es de 12 mm, $\pm 6 \text{ mm}$ sobre y bajo el nivel de referencia. No todas las balanzas de presión tienen claramente indicado el nivel de referencia también llamado nivel de flotación del pistón por lo que el usuario deberá tomar previsiones para marcar éste en la base de la balanza o sobre la superficie visible del pistón con respecto al poste de montaje.

Si el instrumento calibrado por una balanza de presión no se encuentra a la misma altura que el nivel de referencia de la balanza, se deberá aplicar una corrección por la diferencial de presión debido a la columna de fluido.

$$\Delta P = r_{\text{fluido}} \cdot g l \cdot \Delta h \quad (1)$$

Para una carrera del pistón de 12 mm la presión de una columna de agua equivalente puede llegar a ser de 120 Pa lo cual representa el 0,01 %L para una presión de 1,2 MPa (174 psi).

De acuerdo a la recomendación internacional OIML R 110 la indicación del nivel vertical de la carrera del pistón debe tener una sensibilidad suficiente para detectar cualquier cambio equivalente a una variación de presión igual al 10 % del error máximo permitido al 10 % del alcance de la balanza.

La corrección exacta por efecto de distorsión del pistón cilindro depende de la posición del huelgo mínimo, aunque en la práctica la posición del huelgo mínimo cambia con la presión [4] y con el nivel de referencia.

El área en que actúa la fuerza generada por la atracción gravitacional de las masas, no es el área del pistón ni el área del cilindro, sino cierta área efectiva entre estas dos, que depende del valor del huelgo mínimo y la viscosidad del aceite, mientras menor es el huelgo mínimo, más cercana es el área efectiva al área de la sección transversal del pistón [5]. El porcentaje de error %E debido al huelgo [5] varía de acuerdo con la ecuación (2)

$$\%E \approx \frac{b^3 \cdot \sqrt{r \cdot \Delta P_C}}{m D_P \cdot L_P} \quad (2)$$

Donde: *b* es el huelgo entre el pistón y cilindro, *r* es la densidad del aceite, ΔP_C es la presión diferencial del cilindro, *m* es la viscosidad del aceite, *D_P* es el diámetro del pistón, *L_P* es la longitud del pistón. A altas presiones en ensambles pistón cilindro tipo simple existe deformación elástica del pistón cilindro, lo cual aumenta el huelgo y por lo tanto aumenta el error de la balanza [5], debido a la fuga de aceite a través del huelgo y el aumento en la razón de caída del pistón.

PRUEBAS EXPERIMENTALES

Se realizaron pruebas en el intervalo de medición de las balanzas al 10 %, 50 % y 100 % del alcance, alternando el sentido de rotación del pistón en sentido de las manecillas del reloj (CW) y en sentido opuesto a las manecillas del reloj (CCW) para cada una de las cuatro series de la prueba de repetibilidad, a una frecuencia de rotación de 30 min⁻¹ y nivel de flotación normal (en el nivel de referencia) , como se indica en la tabla 4.

Sentido de rotación Vs. alcance		
≈ 10 %	≈ 50 %	≈ 100 %
Π CW	Π CW	Π CW
Θ CCW	Θ CCW	Θ CCW
Π CW	Π CW	Π CW
Θ CCW	Θ CCW	Θ CCW

Tabla 4 sentido de rotación del pistón

Para evaluar el efecto de la frecuencia de rotación del pistón se optó por realizar las pruebas con el pistón girando en el sentido de las manecillas del reloj (CW) y el pistón flotando en el nivel normal de referencia, al 10 %, 50 % y 100 % del alcance, a frecuencia de rotación = 0, frecuencia de rotación normal de 30 min⁻¹, y a la máxima frecuencia de rotación lograda del conjunto pistón y pesas por impulso manual, como se indica en la tabla 5.

Frecuencia de rotación @ Π CW Vs. Alcance		
≈ 10 %	≈ 50 %	≈ 100 %
0	0	0
≈ 30 min ⁻¹	≈ 30 min ⁻¹	≈ 30 min ⁻¹
máxima	máxima	máxima

Tabla 5 frecuencia de rotación del pistón

Las pruebas del nivel de flotación se realizaron con el pistón girando a 30 min⁻¹ en el sentido de las manecillas del reloj (CW) al 10 %, 50 % y 100 % del alcance, en tres diferentes niveles de flotación: inferior, medio o normal y máximo, como se indica en la tabla 6.

Nivel de flotación @ Π CW Vs. alcance		
≈ 10 %	≈ 50 %	≈ 100 %
Inferior	Inferior	Inferior
Medio-normal	Medio-normal	Medio-normal
Superior	Superior	Superior

Tabla 6 nivel de flotación del pistón

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las balanzas de presión con clases de exactitud del 0,2 %L al 0,05 %L y ensamble pistón cilindro con acabado superficial por torneado, se ven influenciadas por el sentido de rotación del pistón, observándose que el mejor sentido de rotación podría ser en sentido de las manecillas del reloj (CW).

Las balanzas de presión con clases de exactitud igual y mejor al 0,05 %L y ensamble pistón cilindro con acabado superficial por pulido manual, no se ven influenciadas por el sentido de rotación del pistón. Es conveniente que los procedimientos de operación de las balanzas indiquen claramente el sentido de rotación del pistón.

Respecto a la frecuencia de rotación es conveniente que se conozca el valor mínimo de ésta, la cual puede ser evaluada estimando el tiempo por revolución con la pesa base de la balanza. Se observa que frecuencias de rotación mayores a 30 min^{-1} o tiempos menores a 2 s por revolución, también afectan el comportamiento de la balanza, además del desgaste por oscilación del conjunto pistón y pesas.

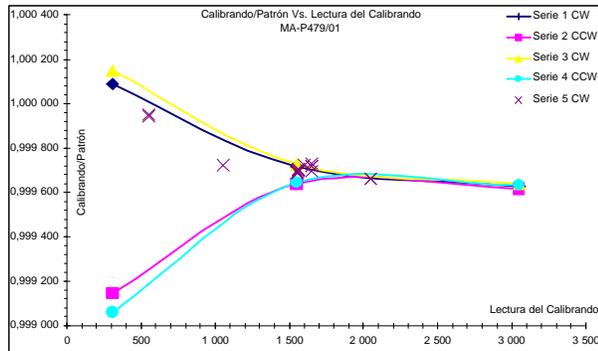


Fig. 4 efecto del sentido de rotación del pistón

Respecto al nivel de referencia para flotación del pistón, se observa que las balanzas estudiadas no cuentan con sistemas de indicación adecuado del nivel de referencia, por lo cual es conveniente que sean revisados y redefinidos por el usuario.

RECONOCIMIENTOS

Para el desarrollo de este artículo han sido valiosas las experiencias e información recabada por: Lenin Bautista, Noel Gutiérrez y Jorge Rolón, del ITCG Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán durante su periodo de residencias profesionales de enero a junio del 2001, como becarios en el laboratorio de presión y vacío de MetAs desarrollando el proyecto “monitor de posición, velocidad y temperatura en balanza de presión”.

REFERENCIAS

- [1] T. J. Quinn, Primary methods of measurement and primary standards, Metrologia, 1997, Vol. 34, pp. 61-65.
- [2] H. Nava, F. Pezet, J. Mendoza e I. Hernández, El sistema internacional de unidades (SI), CENAM, CNM-MMM-PT-003, 1997.
- [3] NOM-008-SCFI-1993, Sistema general de unidades de medida, SECOFI – DGN.
- [4] P. L. M. Heydemann y B. E. Welch, Part 3 Piston gages, Experimental thermodynamics volume II, NBS, IUPAC, Butterworths, 1975.
- [5] J. P. Holman, Métodos experimentales para ingenieros, McGraw-Hill, 4a edición, 1988, pp. 229 a 231.
- [6] C. J. Reed, Precision pressure measurement handbook, Ametek, 1996.
- [7] OIML R 110, Pressure balances, OIML International recommendation, Organisation internationale de métrologie légale, 1994.
- [8] EAL-G26, Calibration of pressure balances, EAL European cooperation for accreditation of laboratories, 1997.
- [9] V. Aranda, G. Aranda y S. Medrano, Columna de líquido manómetro ‘primario’ en laboratorios ‘secundarios’, MetAs, Simposio de metrología, 2001.
- [10] T. Baumeister, E. A. Avallone, T. Baumeister III y D. D. Fuller, Rozamiento y Cojinetes de película fluida, Marks manual del ingeniero mecánico, McGraw-Hill, 8a edición, volumen I y II, pp. 3-24 a 3-33 y 8-119 a 8-129.