

EFECTOS DE LAS MAGNITUDES DE INFLUENCIA EN BALANZAS DE PRESIÓN

A. Navarro Nateras / C. Morales Aguillón / P. Olvera Arana / J. C. Torres Guzmán
Centro Nacional de Metrología

RESUMEN

Las balanzas de presión son instrumentos utilizados como patrones para la calibración de equipos de presión; pueden ser del tipo industrial o de alta exactitud. Las industriales utilizan pesas con un valor determinado de presión. En las de alta exactitud se conoce la masa de las pesas, el área del ensamble pistón-cilindro y con estas se obtiene el valor de presión. En todas las balanzas de presión es importante considerar las magnitudes de influencia.

Este artículo presenta los efectos de las magnitudes de influencia más comunes sobre las balanzas de presión (en presión relativa, utilizando líquido como fluido manométrico). Algunos de los factores analizados son: densidad de las pesas, coeficiente de expansión térmica, coeficiente de distorsión elástica, aceleración de la gravedad y tensión superficial. Se incluye un análisis de incertidumbre de las mediciones de estas magnitudes de influencia.

1. INTRODUCCIÓN

La balanza de presión del tipo de alta exactitud se basa en el principio fundamental para la determinación de la presión, donde presión es igual a la fuerza ejercida por la masa bajo la acción de la aceleración de la gravedad local actuando sobre el área del pistón. Las balanzas de presión de tipo industrial miden la presión en base a valores de presión predefinidos para cada una de las pesas bajo ciertas condiciones de referencia [1].

Balanzas de alta exactitud. Para el cálculo de la presión en una balanza de alta exactitud se utiliza el modelo de la *Ecuación 1* [2], en el cual se consideran las correcciones por flotación de las pesas, tensión superficial, dilatación térmica, corrección por coeficiente de presión y una corrección por presión de la columna de fluido manométrico debida a la diferencia de alturas en los niveles de referencia de los instrumentos.

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) g_l + \gamma C}{A_o (1 + \alpha_{p-c} (t - t_r)) (1 + b p_n)} - P_{col} \quad (1)$$

Donde:

p , presión a ser conocida, Pa	$\sum m_i$, es la suma de la masa de las pesas, kg
ρ_a , densidad local del aire, kg/m ³	ρ_m , densidad de las masas, kg/m ³
g_l , aceleración de la gravedad local, m/s ²	C , circunferencia del pistón, m
t_r , temperatura de referencia, °C	b , coeficiente de deformación elástica pistón, Pa ⁻¹
P_n , presión nominal, Pa	P_{col} , presión de columna $P_{col} = \rho \cdot g \cdot h$
γ , tensión superficial del fluido manométrico, N/m	
A_o , área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica, m ²	
α_{p-c} , coeficiente de expansión térmica del ensamble pistón-cilindro, °C ⁻¹	
t , temperatura del pistón al momento de la medición, °C	

Balanzas de tipo industrial. Para la determinación de la presión aplicada, las condiciones de referencia son las siguientes [3]: Aceleración de la gravedad normalizada, $g_n = 9,806 65 \text{ m/s}^2$
 Densidad aire normalizada, $\rho_{an} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ Temperatura de referencia, $t_r = 20 \text{ °C}$ ó 23 °C
 Nivel de referencia, Nr, indicado en el manual del fabricante.

El modelo de la *Ecuación 2* se utiliza para el cálculo de la presión en las balanzas de tipo industrial, realizando corrección por gravedad local, corrección por flotación de las pesas, corrección por dilatación térmica y una corrección por presión de columna:

$$p_c = p_n \cdot \frac{g_l}{g_n} \cdot \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{an}}{\rho_m}\right)} \cdot \frac{1}{1 + \alpha_{p-c}(t - t_r)} - P_{col} \quad (2)$$

Donde:

p_c , presión corregida, Pa

p_n , presión nominal bajo condiciones de referencia, Pa.

Corrección por aceleración de la gravedad local.

Se debe considerar el valor de la aceleración de la gravedad local donde se hacen las mediciones. Este valor puede ser medido o calculado por medio de la ecuación en función de la latitud y altitud del sitio de interés (boletín OIML No. 127 1992).

Flotación las pesas

La corrección por flotación de las pesas considera la fuerza de empuje del aire desplazado por estas; la densidad del aire debe ser evaluada, y la densidad de las pesas conocida.

Tensión superficial

La corrección de tensión superficial se debe realiza por el efecto de la fuerza generada por la tensión de superficie del fluido manométrico actuando sobre el pistón.

Corrección por dilatación térmica

Se deben corregir las variaciones del área del ensamble pistón cilindro por los cambios de temperatura con respecto al valor de referencia, considerando el coeficiente de expansión térmica del ensamble. Para un pistón de carburo-tungsteno y un cilindro de acero, la corrección es 17×10^{-6} por incremento de 1 °C [4]. Un pistón en operación genera calor en tres formas [4]. a) generación de calor por fricción,

b) calentamiento adiabático en el fluido en relación a un cambio rápido de presión,

c) calor generado por la rotación del pistón.

Corrección por deformación elástica

La corrección por deformación elástica se usa para compensar los cambios en el área del ensamble pistón cilindro debido a la presión. Los cambios en los diámetros del pistón y cilindro, bajo la presión aplicada, son muy pequeños y su medición directa es complicada.

Corrección por columna de fluido.

Esta corrección es función de la densidad del fluido y la diferencia en la altura de los niveles de referencia del patrón e instrumento bajo prueba. Cuando se usa liquido el valor de esta corrección es, aproximadamente, mil veces más grande que cuando se usa gas. Es importante determinar el nivel de referencia del pistón, para pistones rectos el nivel de referencia es la parte inferior del pistón, para pistones irregulares el nivel de referencia de calcula con [5]:

$$L = h \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right) \left(\frac{\rho_c}{\rho_p} \right) \quad (3)$$

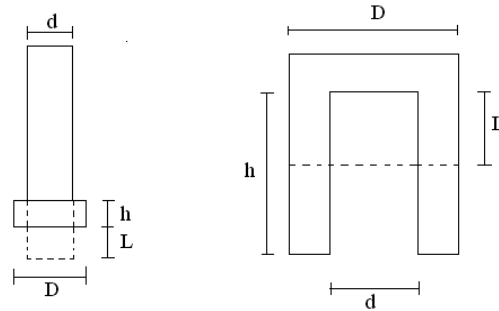


Figura 1. Representación esquemática de pistones irregulares.

Donde el valor de L indica el valor del nivel de referencia, d y D son el diámetro interno y externo y h es la longitud a ser corregida, ρ_c es la densidad del material de que esta hecho la parte ensanchada del pistón y ρ_p es la densidad del material del que esta hecho el pistón.

2. MAGNITUDES DE INFLUENCIA PARA A_o

Para balanzas de alta exactitud la *Ecuación 4* se usa para determinar el área efectiva, A_e .

$$A_e = \frac{1}{P_p} \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) g_i + \gamma C}{1 + \alpha_{p-c} (t - t_r)} \right]_{\text{instrumento}} \quad (4)$$

Donde P_p es la presión medida en el patrón y se calcula con la *Ecuación 1*, el segundo término de la *Ecuación 4* corresponde a la fuerza del instrumento a ser calibrado para lo cual se consideran los siguientes valores de las magnitudes de influencia:

Σm_i proporcionada por certificado de calibración de las pesas en masa
 ρ_a la calculada al momento de la medición g_i 9,780 845 m/s² (CENAM)
 ρ_m calculada de los datos de certificado de masa o datos del fabricante
 γ 0,031 N/m α_{p-c} 17x10⁻⁶ 1/°C
 C valor de la circunferencia calculado en base a A_o del fabricante, en m
 t temperatura del ensamble pistón – cilindro al momento de la medición.

$$A_e = A_o + A_o b P_p \quad (5)$$

El área A_o se determina por medio de la *Ecuación 5*, de una recta por mínimos cuadrados donde la presión del patrón esta en el eje de las abscisas y el área en el eje de las ordenadas. A_o corresponde a la intersección en el eje de las ordenadas.

3. RESULTADOS

Los resultados corresponden a las calibraciones de un ensamble pistón cilindro con alcance de medición de 6 MPa y otro de 100 MPa, calibrados por el método de flotación cruzada [1]. Se presentan los cálculos para balanza de alta exactitud y balanza industrial.

Inicialmente presentaremos el efecto que tienen cada una de las correcciones sobre el valor de presión calculado con la *Ecuación 1*, este análisis se realizó para presiones en el 10, 50 y 100% del alcance de medición para los ensambles de 6 MPa y de 100 MPa.

En la *Tabla 1* se muestra los resultados obtenidos para un alcance de medición de 6 MPa. La diferencia de alturas entre los niveles de referencia para baja presión es de 0,18 m. Las abreviaciones que se utilizan en la tabla son: F. P. = flotación de pesas; D. T. = dilatación térmica; P. C. = presión de columna de fluido; C. D. = coeficiente de deformación elástica y T. S. = tensión superficial.

Tabla 1. Efecto de las correcciones sobre el modelo de alta exactitud para 6 MPa.

	10 % (0,5 MPa)			50 % (3 MPa)			100% (6 MPa)		
	Presión	Δu	ΔP	Presión	Δu	ΔP	Presión	Δu	ΔP
	kPa	$\times 10^{-6} k = 1$	$\times 10^{-6}$	kPa	$\times 10^{-6} k = 1$	$\times 10^{-6}$	kPa	$\times 10^{-6} k = 1$	$\times 10^{-6}$
Correcto	599,18	0,0	0,0	2 992,95	0,0	0,0	5 985,13	0,0	0,0
Sin F. P.	599,26	-0,015	121,4	2 993,32	-0,049	121,5	5 985,86	-0,056	121,4
Sin D. T.	599,18	-0,010	-1,5	2 992,95	-0,030	-0,6	5 985,13	0,023	-0,4
Sin C. D.	599,18	0,000	2,4	2 992,99	-0,007	12,3	5 985,28	0,002	24,5
Sin P. C.	596,93	-29,956	-3 768,9	2 990,69	-2,447	-756,0	5 982,87	-0,655	-379,0
Con T. S.	599,19	0,000	18,5	2 992,96	-0,007	3,7	5 985,14	0,655	1,9

En la *Figura 2* se grafican los resultado presentados en la *Tabla 1*.

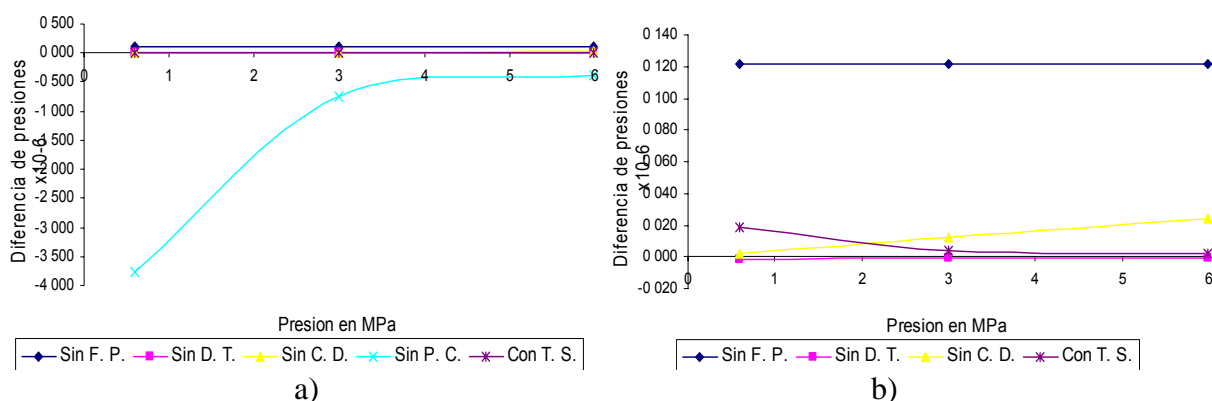


Figura 2. Efecto de las correcciones sobre el modelo de alta exactitud para 6 MPa. a) con corrección de columna. b) sin corrección de columna.

En la *Tabla 2* se incluyen los resultados de los cálculos para 100 MPa. La diferencia de alturas entre los niveles de referencia para baja presión es de 0,22 m.

Tabla 2. Efecto de las correcciones sobre el modelo de alta exactitud para 100 MPa.

	10 % (10 MPa)			50 % (50 MPa)			100% (100 MPa)		
	Presión	Δu	ΔP	Presión	Δu	ΔP	Presión	Δu	ΔP
	MPa	$\times 10^{-6} k = 1$	$\times 10^{-6}$	MPa	$\times 10^{-6} k = 1$	$\times 10^{-6}$	MPa	$\times 10^{-6} k = 1$	$\times 10^{-6}$
Correcto	10,97	0,0	0,0	50,87	0,0	0,0	100,72	0,0	0,0
Sin F. P.	10,97	-0,035	121,35	50,87	-0,039	121,33	100,73	-0,020	121,3
Sin T. S.	10,97	-0,003	-3,20	50,87	0,000	-0,69	100,72	0,000	-0,3
Sin D. T.	10,97	-0,024	1,44	50,87	-0,024	1,44	100,72	-0,012	1,6
Sin C. D.	10,97	0,000	7,02	50,87	-0,005	32,56	100,73	-0,003	64,5
Sin P. C.	10,97	-0,167	-233,87	50,86	-0,008	-51,88	100,72	-0,004	-26,9

La *Figura 3* muestra los valores de diferencia de presiones con respecto al valor correcto.

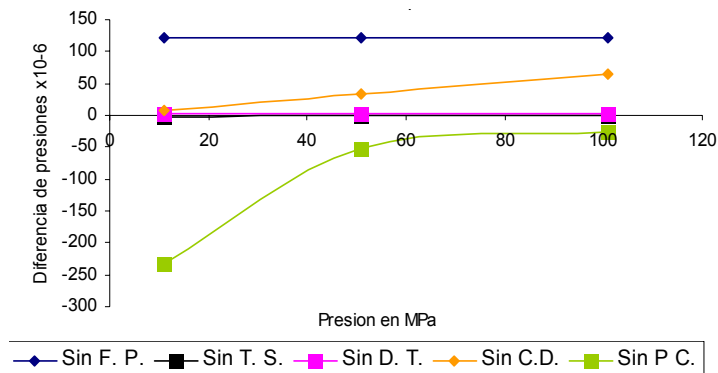


Figura 3. Efecto de las correcciones sobre el modelo de alta exactitud para 100 MPa.

La *Tabla 3* muestra los resultados obtenidos para alta exactitud del pistón de baja. Se indican los cambios que se realizaron en el calibrando para obtener el valor de A_o , así como su incertidumbre e incertidumbre relativa, el valor obtenido de b , el coeficiente de presión y su incertidumbre. Los valores para el cálculo correcto son g_l 9,780 845 m/s², ρ_a 0,96 kg/m³, ρ_m 7836,11 kg/m³, γ 0,031 N/m, α 17x10⁻⁶ °C⁻¹, temperatura del pistón cilindro 19,60 °C.

Tabla 3. Valores de A_o para calibración de 6 MPa cambiando magnitudes de influencia.

Variable	A_o (20 °C) m ²	Incertidumbre m ²	Incertidumbre relativa A_o	b 1/Pa	Incertidumbre 1/Pa	Diferencia $A_o \times 10^{-6}$
Correcto	8,066 95 E-05	± 9,8 E-09	± 1,2 E-04	2,7 E-11	± 8,3 E-12	0.00
$g_{calculada}$	8,066 68 E-05	± 1,1 E-08	± 1,4 E-04	2,7 E-11	± 8,3 E-12	-34,3
ρ_a (1,2)	8,066 71 E-05	± 9,9 E-09	± 1,2 E-04	2,7 E-11	± 8,3 E-12	-30,7
ρ_m 8 000	8,066 98 E-05	± 9,8 E-09	± 1,2 E-04	2,7 E-11	± 8,2 E-12	3,3
ρ_m 7 920	8,066 97 E-05	± 9,8 E-09	± 1,2 E-04	2,7 E-11	± 8,2 E-12	2,1
Sin γ	8,066 83 E-05	± 1,0 E-08	± 1,2 E-04	3,0 E-11	± 9,0 E-12	-15,2
γ 0,075	8,067 13 E-05	± 9,6 E-09	± 1,2 E-04	2,3 E-11	± 7,4 E-12	21,6
γ 0,026	8,066 93 E-05	± 9,9 E-09	± 1,2 E-04	2,7 E-11	± 8,4 E-12	-2,5
α 9E-6	8,066 93 E-05	± 9,7 E-09	± 1,2 E-04	2,7 E-11	± 8,3 E-12	-3,1
α 22,8E-6	8,066 97 E-05	± 1,0 E-08	± 1,2 E-04	2,7 E-11	± 8,3 E-12	2,3
α 36E-6	8,067 01 E-05	± 1,1 E-08	± 1,3 E-04	2,7 E-11	± 8,3 E-12	7,5
m_{conv}	8,066 92 E-05	± 9,9 E-09	± 1,2 E-04	2,7 E-11	± 8,4 E-12	-4,2

En la *Figura 4* se grafican los valores de A_o para una balanza de 6 MPa, (*Tabla 3*, anterior).

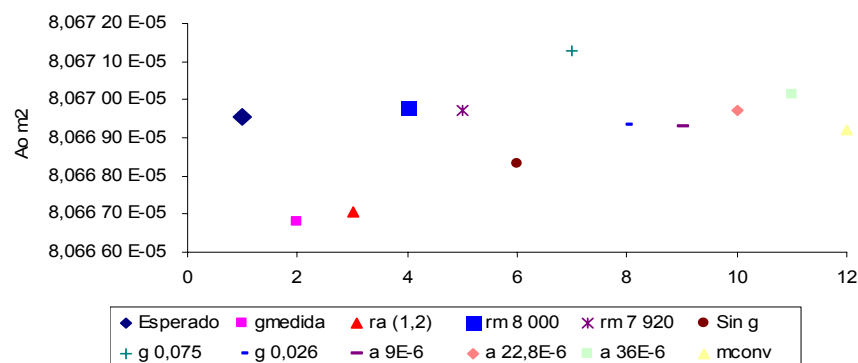


Figura 4. Valores de A_o para calibración de 6 MPa cambiando magnitudes de influencia.

En la *Tabla 4* se presentan los resultados de A_o para alta presión, 100 MPa. Los valores de las variables usadas para el cálculo correcto son g_l 9,780 845 m/s², ρ_a 0,96 kg/m³, ρ_m 7 883,26 kg/m³, γ 0,031, α 17x10⁻⁶ °C⁻¹, temperatura del pistón cilindro 19,94 °C.

Tabla 4. Valores de A_o para calibración de 100 MPa cambiando magnitudes de influencia.

Variable	A_o (20 °C) m ²	Incertidumbre m ²	Incertidumbre relativa A_o	b 1/Pa	Incertidumbre 1/Pa	Diferencia $A_o \times 10^{-6}$
Correcto	4,033 42 E-06	± 2,2 E-10	± 5,3 E-05	3,4 E-12	± 8,7 E-14	
$g_{calculada}$	4,033 28 E-06	± 3,4 E-10	± 8,3 E-05	3,4 E-12	± 8,7 E-14	-34,3
ρ_a (1,2)	4,033 30 E-06	± 2,2 E-10	± 5,4 E-05	3,4 E-12	± 8,9 E-14	-30,3
ρ_m 8 000	4,033 43 E-06	± 2,2 E-10	± 5,4 E-05	3,4 E-12	± 8,7 E-14	1,7
ρ_m 7 920	4,033 42 E-06	± 2,2 E-10	± 5,4 E-05	3,4 E-12	± 8,7 E-14	0,5
Sin γ	4,033 40 E-06	± 2,2 E-10	± 5,4 E-05	3,4 E-12	± 9,2 E-14	-3,8
γ 0,075	4,033 44 E-06	± 2,1 E-10	± 5,3 E-05	3,3 E-12	± 8,1 E-14	5,4
γ 0,026	4,033 42 E-06	± 2,2 E-10	± 5,4 E-05	3,4 E-12	± 8,8 E-14	-0,6
α 9E-6	4,033 42 E-06	± 2,0 E-10	± 4,9 E-05	3,4 E-12	± 8,4 E-14	-0,9
α 22,8E-6	4,033 42 E-06	± 2,3 E-10	± 5,8 E-05	3,4 E-12	± 9,0 E-14	0,6
α 36E-6	4,033 43 E-06	± 2,8 E-10	± 6,9 E-05	3,4 E-12	± 9,8 E-14	2,0
m_{conv}	4,033 41 E-06	± 2,2 E-10	± 5,3 E-05	3,4 E-12	± 8,7 E-14	-2,1

La *Figura 5* muestra los resultados de la *Tabla 4*, graficándose únicamente el A_o .

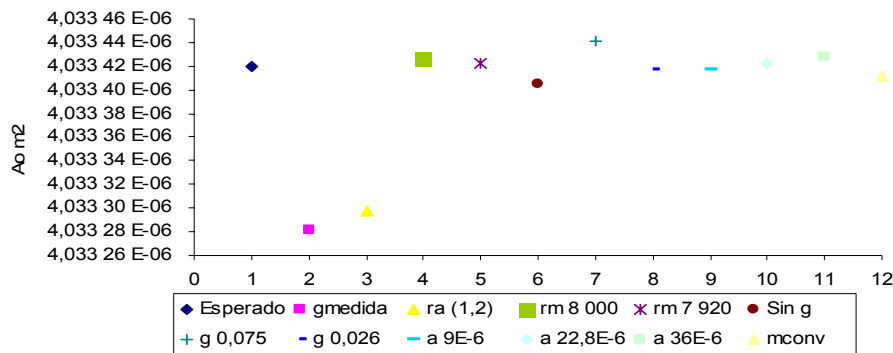


Figura 5. Valores de A_o para calibración de 100 MPa cambiando magnitudes de influencia.

La *Tabla 5* presenta los resultados obtenidos para la calibración de una balanza industrial de baja presión en el 10, 50 y 100 % del alcance de medición para el pistón de 6 MPa. Las abreviaciones que se utilizan en la tabla son: F. P. = flotación de pesas. D. T. = dilatación térmica. P. C. = presión de columna de fluido.

Tabla 5. Efecto de las correcciones sobre el modelo de balanza industrial para 6 MPa.

	10 % (0,5 MPa)			50 % (3 MPa)			100% (6MPa)		
	Presión	Δu	ΔP	Presión	Δu	ΔP	Presión	Δu	ΔP
	kPa	$\times 10^{-6}$ $k = 1$	$\times 10^{-6}$	kPa	$\times 10^{-6}$ $k = 1$	$\times 10^{-6}$	kPa	$\times 10^{-6}$ $k = 1$	$\times 10^{-6}$
Correcto	596,81	0,000	0,0	2 990,5	0,0	0,0	5 982,79	0,0	0,0
Sin g_l/g_n	598,39	0,013	2645,55	2 998,4	0,026	2 639,7	5 998,58	0,028	2 639,04
Sin F. P.	596,79	-0,002	-29,95	2 990,4	-0,003	-29,76	5 982,61	-0,004	-29,80
Sin D. T.	596,71	-1,500	-157,40	2 990,1	-3,528	-156,76	5 981,85	-3,811	-157,10
Sin P. C.	598,44	-18,734	2738,63	2 992,2	-1,201	547,60	5 984,43	-0,310	274,38

En la *Figura 6* se presentan los datos de la *Tabla 5*, graficando únicamente la diferencia de presión en base a la presión calculada con todas las correcciones.

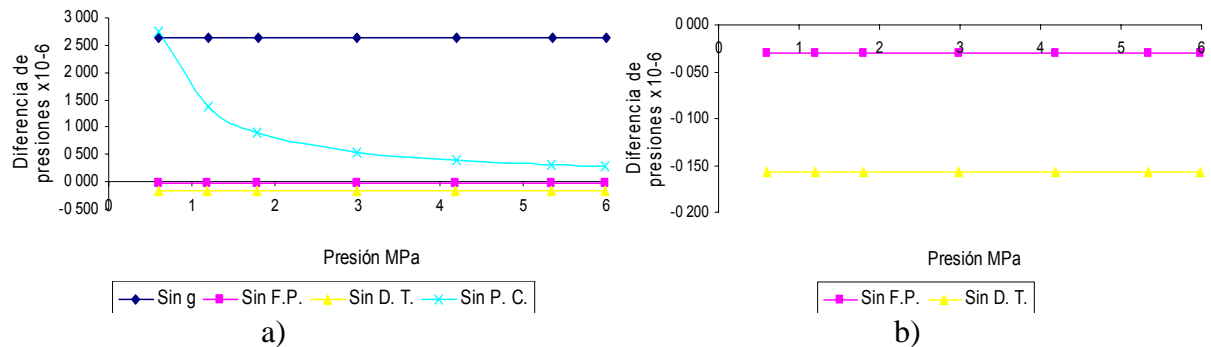


Figura 6. Efecto de las correcciones sobre el modelo de balanza industrial para 6 MPa. a) con correcciones por aceleración de la gravedad local y presión de columna, b) ampliación de estas correcciones.

En la *Tabla 6* se ven los resultados de las correcciones en la balanza industrial de 100 MPa.

Tabla 6. Efecto de las correcciones sobre el modelo de balanza industrial para 100 MPa.

	10 % (10 MPa)			50 % (50 MPa)			100% (100 MPa)		
	Presión	Δu	ΔP	Presión	Δu	ΔP	Presión	Δu	ΔP
	MPa	$\times 10^{-6} k = 1$	$\times 10^{-6}$	MPa	$\times 10^{-6} k = 1$	$\times 10^{-6}$	MPa	$\times 10^{-6} k = 1$	$\times 10^{-6}$
Correcto	10,969	0,0	0	50,865	0,0	0,0	100,735	0,0	0
Sin g	10,998	0,045	2 638,8	51,000	0,045	2 638,4	101,001	0,045	2 638,4
Sin F. P.	10,969	-0,003	-29,9	50,864	-0,003	-29,9	100,732	-0,048	-29,9
Sin D. T.	10,969	-2,638	-1,8	50,865	-2,645	-1,1	100,735	-2,641	-0,4
Sin P. C.	10,971	-0,069	180,6	50,867	-0,005	40,1	100,737	2,640	20,8

En la *Figura 7* se presentan los resultados de la tabla, indicándose la diferencia de la presión entre la presión con correcciones y sin corrección.

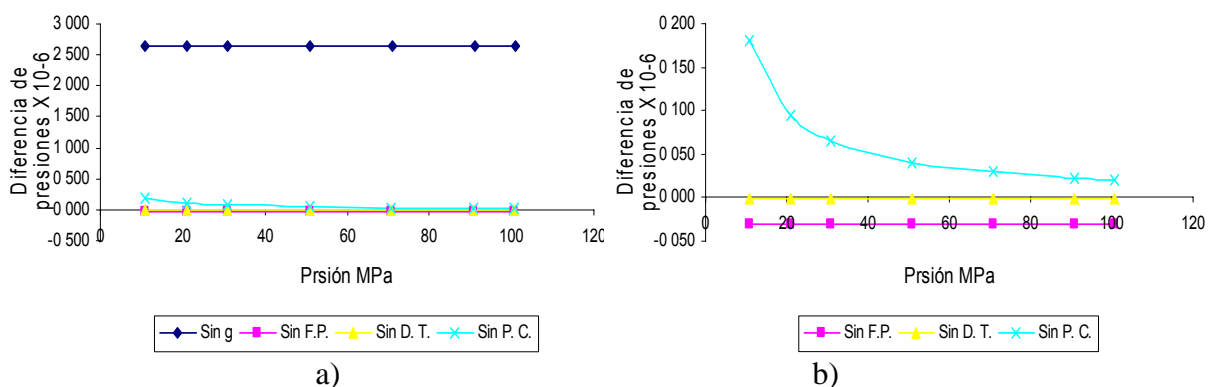


Figura 7. Efecto de las correcciones sobre el modelo de balanza industrial para 100 MPa. a) con corrección por aceleración de la gravedad local, b) sin corrección.

En la *Tabla 7* se muestran los resultados que se obtuvieron en la calibración de la balanza industrial, para el ensamble de baja presión 6 MPa. La tabla muestra los valores correctos del error y su incertidumbre y el error en % de la lectura con respecto a los cambios que se hicieron en las magnitudes de influencia. Los valores para el cálculo correcto son g_l 9,780 845 m/s^2 , ρ_m 7 836,11 kg/m^3 , α $17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ C^{-1}$, temperatura del pistón cilindro 19,60 $^\circ C$.

Tabla 7. Valores de error para la calibración a 6 MPa cambiando magnitudes de influencia.

	Correcto	$g_{calculada}$	ρ_m 7 920	ρ_m 8 300	ρ_m 7 200	α 9×10^{-6}	α $22,8 \times 10^{-6}$	α 36×10^{-6}	Sin P_{col}
E Pa 10%	-127,43	-147,93	-127,25	-128,07	-125,44	-129,39	-126,01	-122,77	1 507,1
U Pa \pm	42,06	54,43	42,06	42,06	42,06	40,86	43,36	47,46	22,20
D E $\times 10^{-6}$		-34,243	0,302	-1,079	3,318	-3,279	2,378	7,788	2730,57
E % L	-0,0213	-0,0247	-0,0213	-0,0214	-0,0210	-0,0216	-0,0211	-0,0205	0,2518
E Pa 20%	-81,31	-122,30	-80,94	-82,60	-77,34	-85,16	-78,51	71,83	1 553,9
U Pa \pm	56,79	89,44	56,79	56,79	56,79	53,16	60,57	98,57	44,13
D E $\times 10^{-6}$		-34,248	0,301	-1,079	3,316	-3,220	2,334	127,935	1366,15
E % L	-0,0068	-0,0102	-0,0068	-0,0069	-0,0065	-0,0071	-0,0066	0,0060	0,1298
E Pa 30%	-134,77	-196,26	-134,23	-136,70	-128,82	-140,22	-130,81	-121,80	1 501,3
U Pa \pm	73,26	126,91	73,26	73,26	73,27	66,85	79,78	98,57	63,94
D E $\times 10^{-6}$		-34,248	0,301	-1,077	3,312	-3,040	2,204	7,220	911,209
E % L	-0,0075	-0,0109	-0,0075	-0,0076	-0,0072	-0,0078	-0,0073	-0,0068	0,0836
EPa 50%	-122,92	-225,41	-122,02	-126,14	-113,03	-132,32	-116,11	-100,61	1 514,7
U Pa \pm	113,94	206,92	113,95	113,94	113,95	102,41	125,51	158,32	108,18
D E $\times 10^{-6}$		-34,249	0,301	-1,075	3,306	-3,140	2,276	7,457	547,277
E % L	-0,0041	-0,0075	-0,0041	-0,0042	-0,0038	-0,0044	-0,0039	-0,0034	0,0506
E Pa 70%	-97,94	-241,42	-96,68	-102,44	-84,11	-111,60	-88,04	-65,50	1 541,2
U Pa \pm	154,23	286,81	154,23	154,23	154,24	137,46	170,94	217,91	150,01
D E $\times 10^{-6}$		-34,250	0,300	-1,074	3,302	-3,260	2,363	7,742	391,297
E % L	-0,0023	-0,0058	-0,0023	-0,0024	-0,0020	-0,0027	-0,0021	-0,0016	0,0368
E Pa 90%	-116,86	-299,63	-115,26	-122,60	-99,22	-135,00	-103,71	-73,77	1 523,8
U Pa \pm	194,01	364,03	194,01	194,01	194,02	172,32	215,54	275,88	190,67
D E $\times 10^{-6}$		-34,250	0,300	-1,075	3,305	-3,400	2,465	8,075	307,470
E % L	-0,0022	-0,0056	-0,0022	-0,0023	-0,0019	-0,0025	-0,0019	-0,0014	0,0286
E Pa 100%	-85,76	-290,73	-83,96	-92,21	-65,94	-105,63	-71,36	-38,57	1 555,8
U Pa	217,51	408,21	217,51	217,50	217,51	193,18	241,66	309,33	214,53
D E $\times 10^{-6}$		-34,250	0,301	-1,077	3,311	-3,320	2,407	7,885	274,305
E % L	-0,0014	-0,0049	-0,0014	-0,0015	-0,0011	-0,0018	-0,0012	-0,0006	0,0260

La *Figura 8* muestra los errores para cada caso de estudio en la calibración de la balanza industrial de 6 MPa, cambiando algunas magnitudes de influencia.

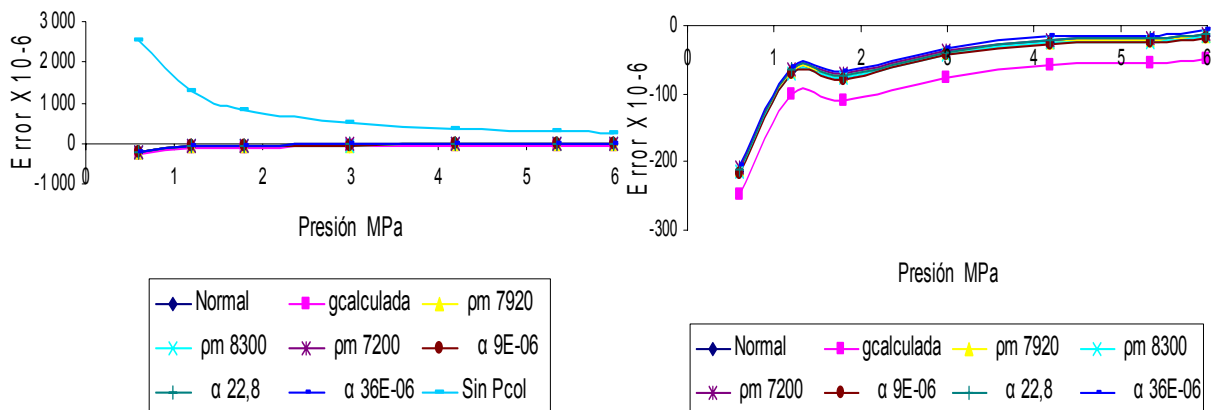


Figura 8. Valores de error para calibración de 6 MPa cambiando magnitudes de influencia. a) con corrección de columna, b) sin corrección de columna.

La *Tabla 8* presenta los resultados obtenidos para el alcance de 100 MPa. Se muestran los errores con sus respectivas incertidumbres, así como el error en % de la lectura para el valor correcto y haciendo cambios en las magnitudes de influencia. Los valores de las variables usadas para el cálculo correcto son g_l 9,780 845 m/s², ρ_m 7883,26 kg/m³, α 17x10⁻⁶ °C⁻¹, temperatura del pistón cilindro 19,94 °C.

Tabla 8. Valores de error para 100 MPa cambiando magnitudes de influencia.

	Correcto	g_{medida}	ρ_m 7 920	ρ_m 8 300	ρ_m 7 200	α 9x10 ⁻⁶	α 22,8x10 ⁻⁶	α 36x10 ⁻⁶	Sin P_{col}
E Pa 10%	-1 367	-1 742	-1 363	-1 379	-1 330	-1 376	-1 360	-1 345	615
U Pa \pm	577,3	856,9	577,3	577,3	577,3	547,6	608,6	703,6	576,1
D E x10 ⁻⁶		-34,251	0,302	-1,079	3,318	-0,840	0,609	1,995	180,58
E % L	-0,0125	-0,0159	-0,0124	-0,0126	-0,0121	-0,0125	-0,0124	-0,0123	0,0056
E Pa 20%	-1 669	-2 387	-1 663	-1 692	-1 600	-1 684	-1 659	1 332	327
U Pa \pm	1 087,8	1 626,4	1 087,9	1 087,9	1 087,9	1 030,4	1 148,3	2 000,1	1 087,1
D E x10 ⁻⁶		-34,248	0,302	-1,082	3,326	-0,680	0,493	143,267	95,30
E % L	-0,0080	-0,0114	-0,0079	-0,0081	-0,0076	-0,0080	-0,0079	0,0064	0,0016
E Pa 30%	-1 617	-2 676	-1 607	-1 650	-1 514	-1 636	-1 603	-1 571	394
U Pa \pm	1 648,0	2 429,3	1 648,1	1 648,1	1 648,2	1 565,6	1 735,2	2 000,1	1 647,6
D E x10 ⁻⁶		-34,249	0,301	-1,079	3,316	-0,620	0,449	1,472	65,03
E % L	-0,0052	-0,0087	-0,0052	-0,0053	-0,0049	-0,0053	-0,0052	-0,0051	0,0013
EPa 50%	473	-1 269	489	418	642	448	492	534	2 511
U Pa \pm	2 683,6	3 977,9	2 683,8	2 683,7	2 683,8	2 546,5	2 828,3	3 267,7	2 683,2
D E x10 ⁻⁶		-34,251	0,302	-1,081	3,323	-0,500	0,363	1,188	40,06
E % L	0,0009	-0,0025	0,0010	0,0008	0,0013	0,0009	0,0010	0,0010	0,0049
E Pa 70%	5 207	2 781	5 228	5 130	5 442	5 181	5 225	5 267	7 268
U Pa \pm	3 873,1	5 631,4	3 873,4	3 873,4	3 873,5	3 689,5	4 067,8	4 662,5	3 872,7
D E x10 ⁻⁶		-34,253	0,302	-1,082	3,325	-0,360	0,261	0,855	29,12
E % L	0,0074	0,0039	0,0074	0,0072	0,0077	0,0073	0,0074	0,0074	0,0103
E Pa 90%	12 732	9 623	12 759	12 633	13 033	12 708	12 749	12 788	14 815
U Pa \pm	4 838,9	7 132,2	4 839,3	4 839,3	4 839,4	4 597,1	5 094,7	5 872,4	4 838,4
D E X10 ⁻⁶		-34,255	0,302	-1,082	3,326	-0,260	0,189	0,618	22,96
E % L	0,0140	0,0106	0,0141	0,0139	0,0144	0,0140	0,0140	0,0141	0,0163
E Pa 100%	17 602	14 151	17 632	17 493	17 937	17 584	17 615	17 645	19 696
U Pa	5 402,3	7 937,5	5 402,8	5 402,8	5 402,9	5 135,6	5 684,7	6 543,9	5 401,8
D E x10 ⁻⁶		-34,257	0,302	-1,082	3,326	-0,180	0,131	0,428	20,79
E % L	0,0175	0,0141	0,0175	0,0174	0,0178	0,0175	0,0175	0,0175	0,0196

En la *Figura 9* se presentan los resultados de la *Tabla 8*, donde se ven los errores para los cambios que se hicieron en las magnitudes de influencia.

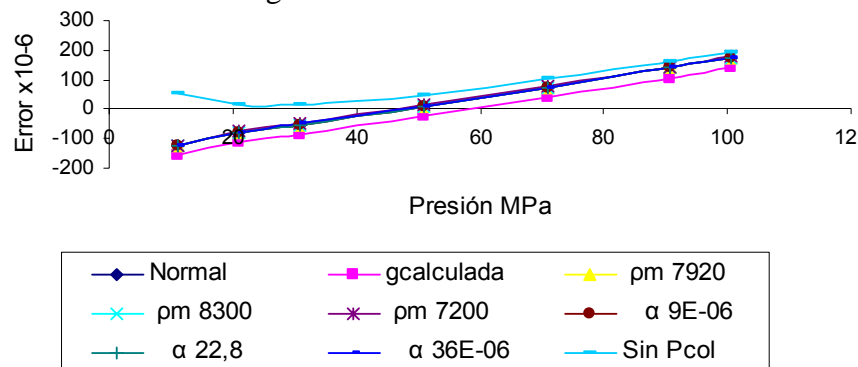


Figura 9. Valores de error para calibración de 100 MPa cambiando magnitudes de influencia.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados de la *Tabla 1* y la *Figura 2* demuestran que cuando se utiliza una balanza de presión hidráulica de alta exactitud en baja presión, la variable crítica es la corrección por columna de líquido y la máxima diferencia llega a ser de aproximadamente $4\,000 \times 10^{-6}$ en la determinación de la presión del patrón; el error por flotación de las pesas es de 121×10^{-6} , por deformación elástica llega a ser de hasta 24×10^{-6} . Para el caso de balanzas de alta exactitud en alta presión, se observa (*Tabla 2* y *Figura 3*) que la variable crítica, para las condiciones de medición fue la presión de columna con un error de 233×10^{-6} , el error si no se corrige por flotación de las pesas es de 121×10^{-6} , y la máxima desviación si no se corrige por deformación del ensamble, es de aproximadamente 65×10^{-6} .

La *Tabla 3* y la *Figura 4* muestran las variaciones en la determinación de A_0 cuando se calibra una balanza por flotación cruzada, en baja presión (6 MPa), y se observa que la variable crítica es debida a la diferencia de usar la aceleración de la gravedad calculada, (boletín OIML No. 127, 1992) en lugar de la medida, esta diferencia es del orden de 34×10^{-6} ; la diferencia de utilizar la densidad normal del aire en lugar de la densidad local resulta del orden de 31×10^{-6} . La *Tabla 4* y la *Figura 5*, para alta presión, (100 MPa), muestra las variaciones en la determinación de A_0 , cuando se calibra una balanza por flotación cruzada y se observa que la variable crítica es debida a la diferencia de usar la aceleración de la gravedad calculada (boletín OIML No. 127, 1992), en lugar de la medida, esta diferencia es del orden de 34×10^{-6} , la diferencia de utilizar la densidad normal del aire en lugar de la densidad local resulta del orden de 30×10^{-6} .

Para las balanzas industriales en baja presión (*Tabla 5* y *Figura 6*), se observa que la corrección por aceleración de la gravedad afecta alrededor de $2\,600 \times 10^{-6}$ y el efecto de no corregir por presión de columna es de $2\,700 \times 10^{-6}$. En las balanzas industriales de alta presión, *Tabla 6* y *Figura 7*, la corrección por gravedad es la más importante, con aproximadamente $2\,600 \times 10^{-6}$ y el efecto de no corregir por presión de columna es 180×10^{-6} .

Al calibrar una balanza industrial en baja presión, (6MPa), *Tabla 7* y *Figura 8*, se observa que la variable crítica es la presión de columna con aproximadamente $2\,700 \times 10^{-6}$, si usamos la aceleración de la gravedad calculada en lugar de la aceleración de la gravedad medida, la diferencia es de 34×10^{-6} . Al calibrar una balanza industrial en alta presión (100 MPa), *Tabla 8* y *Figura 9*, se observa que la variable crítica es la presión de columna con aproximadamente 180×10^{-6} , si usamos la aceleración de la gravedad calculada en lugar de la aceleración de la gravedad medida, la diferencia es de 34×10^{-6} .

REFERENCIAS

- [1] Torres Guzmán J. C., Santander Romero L. A., Olvera Arana P., *Balanzas de presión*. CNM-MMF-PT-003. 3era edición 2005.
- [2] R-110, *Pressure Balance*, OIML 1994.
- [3] Olvera Arana Pablo, *Determinación del coeficiente de deformación elástica en ensambles pistón cilindro de balanzas de presión tipo industrial*, Memorias del Congreso Nacional de Metrología, Normalización y Certificación octubre 2003.
- [4] Charles J. Reed, *Precision Pressure Measurement Handbook*, AMETEK 1994.
- [5] EAL-G26, *Calibration of pressure balances*, EAL European cooperation for accreditation of laboratories, July 1997.