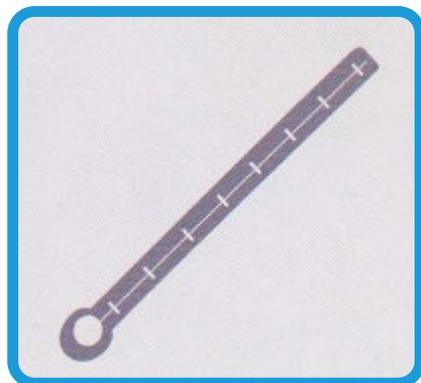
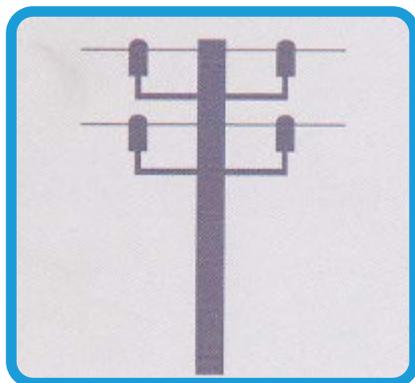
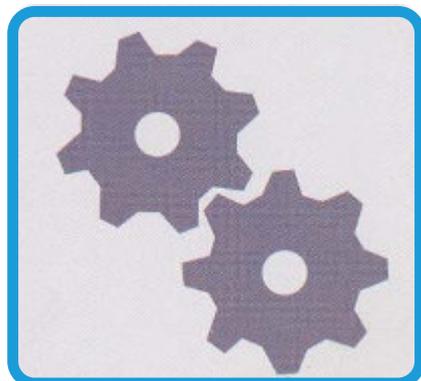
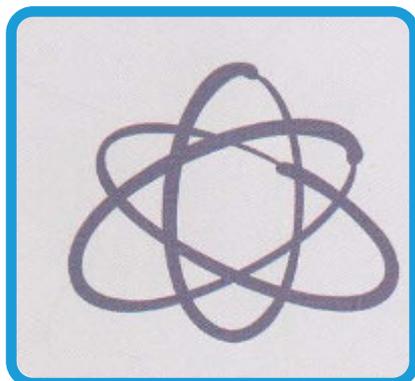
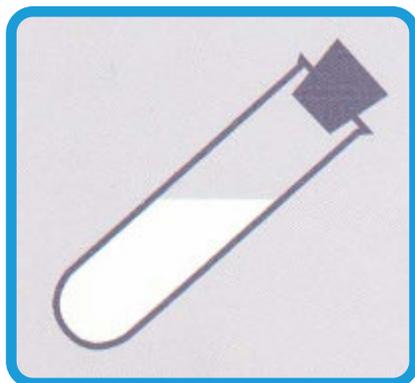
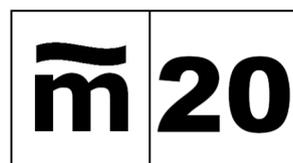


# Metrología



PROCEDIMIENTO ME-010 PARA LA  
CALIBRACIÓN DE CALIBRADORES DE  
PRESIÓN



# **PROCEDIMIENTO ME010**

## **CALIBRACIÓN DE CALIBRADORES DE PRESIÓN**

La presente edición de este procedimiento se emite exclusivamente en formato digital y puede descargarse gratuitamente de nuestra página web ([www.cem.es](http://www.cem.es)).

El procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, respecto a la edición digital anterior.

Los procedimientos editados por el CEM presentan modelos de calibración, en línea con documentos clave universales como son el Sistema Internacional de unidades (SI), el Vocabulario internacional de metrología (VIM) o la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Como modelos que son, los usuarios de los mismos pueden, bajo su responsabilidad, modificarlos para adecuarlos a sus necesidades específicas (instrumentación, condiciones ambientales, etc.). En tal caso, siempre deberá primar el sentido crítico y la ética profesional.

El CEM no acepta ninguna responsabilidad derivada de la interpretación y/o uso de este procedimiento.

El CEM no mantiene correspondencia sobre el contenido de los procedimientos.

## ÍNDICE

	Página
1. OBJETO .....	3
2. ALCANCE .....	3
3. DEFINICIONES .....	3
4. GENERALIDADES .....	4
4.1. Descripción .....	4
4.2. Abreviaturas y símbolos.....	4
5. DESCRIPCIÓN .....	6
5.1. Equipos y materiales .....	6
5.2. Operaciones previas.....	7
5.3. Proceso de calibración .....	9
5.4. Toma y tratamiento de datos .....	10
6. RESULTADOS.....	10
6.1. Cálculo de incertidumbres .....	10
6.2. Interpretación de resultados .....	19
7. REFERENCIAS .....	20
8. ANEXOS.....	21

## 1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto mostrar un método para la calibración de calibradores de presión.

## 2. ALCANCE

Este procedimiento sirve para la calibración de calibradores de presión, de funcionamiento en medio líquido o en medio gas en modos absoluto o relativo, mediante el uso de balanzas de presión.

Los calibradores de presión son instrumentos cuya exactitud suele ser mejor del 0,05 % de su intervalo nominal de medida, por lo que es necesario realizar su calibración mediante el uso de una balanza de presión.

Este procedimiento aplica a calibradores de presión cuyo rango nominal de medida este comprendido entre  $10^2$  Pa y  $10^8$  Pa.

Los calibradores de presión se calibran únicamente como un medidor de presión.

NOTA: También es de aplicación a la calibración de medidores de presión de exactitud mejor del 0,05 % de su intervalo nominal de medida.

## 3. DEFINICIONES

### Calibrador de presión:

Equipo compuesto por:

- Un dispositivo de medida de presión, generalmente formado o por un manómetro bourdon de tubo de cuarzo o por un manómetro piezoeléctrico, entre otros.
- Un sistema de generación y control de la presión.

### Manómetro bourdon de tubo de cuarzo:

Está compuesto por:

- Una espiral de bourdon de cuarzo, mucho más sensible que las tradicionales metálicas, a la que se le ha soldado un tubo con un espejo.
- Una fuente de luz.
- Un fotodetector.
- Un sistema de amplificación.
- Un sistema de medida.

Cuando la presión en el exterior de la espiral coincide con la interior, el bourdon se encuentra en equilibrio.

La fuente de luz incide en el espejo y es recogida por dos fotodetectores generando una corriente, que una vez amplificada es medida en unidades eléctricas y convertida a unidades de presión.

Una variación de la presión en el interior de la espiral respecto de la exterior produce un par de torsión en la espiral que lleva consigo la variación de la posición del espejo. Esta variación produce un cambio de las señales que reciben los fotodetectores, generando un desequilibrio y por consiguiente un cambio en la indicación de la presión.

### Manómetro piezoeléctrico:

Está compuesto por:

- Un puente de Wheatstone de resistencias piezoeléctricas montadas en una membrana de silicio.
- Un sistema de amplificación.
- Un sistema de medida.

A presión atmosférica el puente está equilibrado y la indicación es cero.

Un cambio de presión causa una variación en la membrana que se transforma en un cambio en la resistencia del puente y por consiguiente un cambio en la indicación del equipo.

## 4. GENERALIDADES

### 4.1. Descripción

Un calibrador de presión es un dispositivo formado por un transductor de presión, un sistema de lectura y un sistema de generación y control de la presión.

El sistema de lectura nos facilita una indicación directa, en unidades de presión, de la presión a la que está sometido el transductor de presión del calibrador.

Para la calibración de calibradores de presión, se utilizan balanzas de presión. La calibración se realiza por comparación directa de las indicaciones de presión del instrumento a calibrar y los valores de presión generados por el patrón.

Una balanza de presión consiste en un pistón vertical que gira libremente en el interior de un cilindro. Los dos elementos de buena calidad mecánica, definen una superficie llamada "área efectiva". La presión a medir se aplica sobre la base del pistón, creando una fuerza vertical. Esta fuerza se equilibra por la fuerza de la gravedad, de sentido inverso, debidos a las masas sometidas a la gravedad local y situadas en la parte superior del pistón. El pistón forma parte de la carga.

Algunas veces y especialmente a bajas presiones, por razones prácticas, el cilindro gira en lugar del pistón. En este caso, el principio y los métodos de ensayo son los mismos.

La presión se transmite al elemento móvil por un fluido, que puede ser un gas, usualmente nitrógeno o aire, o líquido, usualmente aceite o agua.

Cuando la balanza está en equilibrio, se considera que la parte inferior del pistón es el nivel de referencia de la balanza.

La presión generada por la balanza de presión al nivel de referencia del instrumento a calibrar, se obtiene de:

$$P_{\text{generada}} = \frac{(M + \delta M) g_l \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_M}\right) - v g_l (\rho_f - \rho_a) + \sigma C_{ir}}{(A_{(0, t_0)} + \delta A_{(0, t_0)})(1 + \lambda P_N) (1 + \alpha(t - t_0))} + (\rho_f - \rho_a) g_l \Delta h + P_{\text{res}} \quad (1)$$

### 4.2. Abreviaturas y símbolos

$A_0$  Área efectiva del conjunto pistón cilindro a presión nula y temperatura de referencia.

$A_N$	Valor nominal del Área efectiva del conjunto pistón cilindro a presión nula y temperatura de referencia.
$C$	Corrección.
$cac$	Condiciones ambientales del calibrador.
$C_{ir}$	Longitud de la circunferencia del pistón.
$g_1$	Valor de la gravedad local.
$H$	Altitud sobre el nivel del mar, en m.
$his$	Histéresis.
$H.R.$	Humedad relativa.
$k$	Factor de cobertura.
$M$	Masa total colocada en la balanza patrón; esta masa incluye la masa del pistón y las masas que se colocan sobre éste. Normalmente se trabaja con valores convencionales de masa.
$n$	Número de medidas para cada punto de calibración, en nuestro caso 6.
$P_{amb}$	Presión atmosférica.
$P_{generada}$	Presión generada por la balanza de presión al nivel de referencia del calibrador de presión.
$P/C$	Conjunto pistón cilindro.
$P_{leida}$	Media de las presiones indicadas en el calibrador de presión para un mismo punto de calibración.
$P_{leida i}$	Cada una de las presiones medidas en un punto de medida en las diferentes series.
$P_N$	Presión nominal generada por la balanza.
$P_{res}$	Presión residual en la medida de presión absoluta.
$x$	Resolución.
$t$	Temperatura del conjunto pistón cilindro durante su utilización, en °C.
$t_{amb}$	Temperatura ambiente.
$t_0$	Temperatura de referencia del conjunto pistón cilindro. Es la temperatura a la que fue calibrado, en °C.
$v$	Volumen del pistón sometido a empuje del fluido.
$u(y)$	Incertidumbre típica combinada.
$u_i(y)$	Contribuciones a la incertidumbre típica combinada.
$\alpha$	Coefficiente de dilatación térmica del $P/C$ ( $\alpha = \alpha_c + \alpha_p$ ).
$\alpha_c$	Coefficiente de dilatación térmica lineal del cilindro.
$\alpha_p$	Coefficiente de dilatación térmica lineal del pistón.

$\Delta h$	Diferencia de altura entre los niveles de referencia del calibrador de presión y de la balanza de presión. Si el nivel de referencia de la balanza está a más altura que el nivel de referencia del calibrador, $\Delta h$ es positivo, en caso contrario es negativo.
$\delta A_{(0,t_0)}$	Corrección debido a la deriva del área efectiva del conjunto pistón cilindro a presión nula y temperatura de referencia
$\delta M$	Corrección debido a la deriva de las masas.
$\delta P_{cac}$	Corrección debida a las condiciones ambientales del calibrador de presión (su valor es cero, aunque no su incertidumbre).
$\delta P_{his}$	Corrección debida a la histéresis del calibrador de presión (su valor es cero, aunque no su incertidumbre).
$\delta P_x$	Corrección debida a la resolución del indicador del calibrador de presión (su valor es cero, aunque no su incertidumbre).
$\varnothing$	Latitud, en radian.
$\lambda$	Coefficiente de deformación con la presión del conjunto pistón cilindro.
$\rho_a$	Densidad del aire. Para su cálculo se puede utilizar la ecuación de los gases perfectos.
$\rho_f$	Densidad del fluido transmisor de la presión. En el caso de que el fluido sea un gas se puede utilizar la ecuación de los gases perfectos para su cálculo.
$\rho_M$	Densidad de las masas. En el caso de utilizar valores convencionales de masa toma el valor de 8 000 kg/m <sup>3</sup> .
$\sigma$	Coefficiente de tensión superficial del fluido transmisor de la presión. En el caso de que el fluido transmisor de la presión sea un gas vale cero.
$\nu_{eff}$	Grados de libertad efectivos.
$\nu_i$	Grados de libertad efectivos a cada contribución.

## 5. DESCRIPCIÓN

### 5.1. Equipos y materiales

#### Instrumentos de medida

Como instrumento de medida patrón se utilizara una balanza de presión, de intervalo de medida y exactitud adecuada para poder realizar una correcta calibración del calibrador de presión. El intervalo de medida de la balanza debe cubrir el intervalo de medida del instrumento a calibrar y su incertidumbre de medida debe ser al menos dos veces menor que la del instrumento a calibrar.

Además se utilizarán una serie de instrumentos de medida auxiliar:

- Un barómetro;  $U = \pm 1$  hPa, para  $k = 2$ .
- Un higrómetro;  $U = \pm 5\%$  h. r, para  $k = 2$ .
- Un termómetro;  $U = \pm 0,2$  °C, para  $k = 2$ .
- Una regla;  $U = \pm 0,5$  mm, para  $k = 2$ .
- Nivel de burbuja;  $U = \pm 1^\circ$ , para  $k = 2$ .

### Equipos auxiliares

- Sistema de generación de presión.
- Válvulas, racores y tuberías adecuados para la conexión de los instrumentos.

### Material

- Fluido de transmisión de la presión compatible con el instrumento a calibrar.
- Productos de limpieza compatibles con el instrumento a calibrar.
- Guantes.

## **5.2. Operaciones previas**

Para proceder a la calibración de un calibrador de presión, éste debe encontrarse perfectamente identificado en lo que se refiere a MARCA, MODELO y NÚMERO DE SERIE o a través de un código de identificación del usuario. En caso de que no exista alguno de estos datos, se procederá a la identificación del instrumento asignándole un código (p. ej., mediante etiqueta fuertemente adherida al instrumento) de forma que no surja duda alguna en cuanto a la correspondencia entre el equipo calibrado y el Certificado emitido.

La calibración se realizará en un recinto acondicionado, con una temperatura y humedad relativa que estén dentro de los márgenes de utilización de la balanza y del instrumento a calibrar, especificados por los fabricantes. Se recomienda que la temperatura este lo más próxima posible a la temperatura de referencia de la balanza. (p. ej. entre 15 °C y 25 °C estabilizada en  $\pm 3$  °C).

Se estudiará el manual de operación del calibrador de presión, de forma que la persona que realice la calibración esté familiarizada con su manejo. Se dispondrá también las instrucciones de ajuste del fabricante por si en el transcurso de la calibración se determinara la necesidad de ajustarle.

Los equipos deben ser localizados en el laboratorio de calibración el tiempo necesario para alcanzar la estabilidad térmica, antes de empezar la calibración. Así mismo los equipos electrónicos se conectaran a la tensión de alimentación al menos durante un tiempo igual al indicado por los fabricantes de los mismos con el fin de alcanzar la estabilidad térmica de sus componentes electrónicos.

Se comprobará el estado de limpieza de la balanza. En el caso de que estuviera sucia se procederá a su limpieza siguiendo las indicaciones del manual de la misma.

Los equipos se instalarán fuera de las zonas de turbulencia como son la ventilación, el aire acondicionado y las fuentes de calor.

La mesa donde se sitúe la balanza debe soportar el peso de la misma sin flexar.

Se conectará la balanza con el calibrador de presión procurando que el circuito sea lo más corto y con el menor número de conexiones posibles, para que las medidas se puedan hacer de la manera más estable y reproducible. En el caso de que el fluido transmisor de la presión sea un líquido, debe existir un sistema de purga en la parte superior del circuito para extraer el aire. Los niveles de referencia entre el calibrador de presión deben estar lo más cercanos posible, en altura, con el fin de minimizar la corrección por nivel de referencia. La diferencia de altura entre los mismos se medirá con la regla.

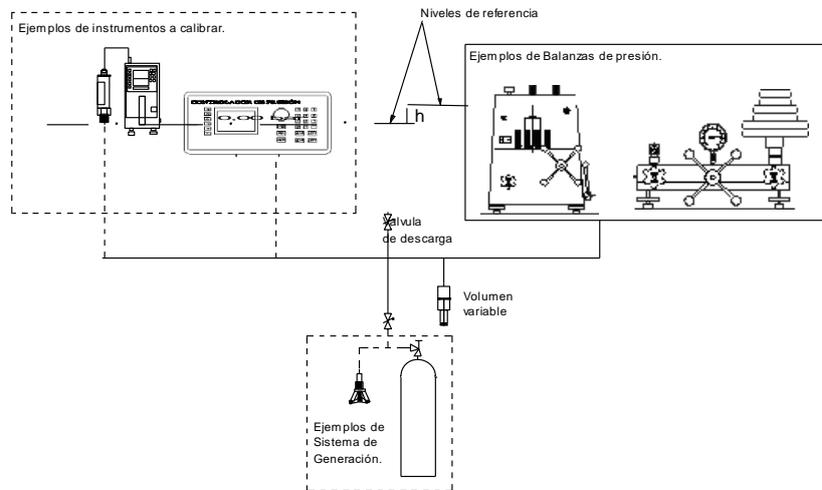
Se utilizarán accesorios para la interconexión de los equipos capaces de soportar las presiones generadas por la balanza. Además deben ser compatibles con el fluido utilizado.

Se nivelará la balanza con un nivel de burbuja para garantizar la verticalidad del conjunto pistón-cilindro. En el caso en que la balanza no lleve acoplado uno, se usará uno externo situándole para la nivelación sobre el pistón.

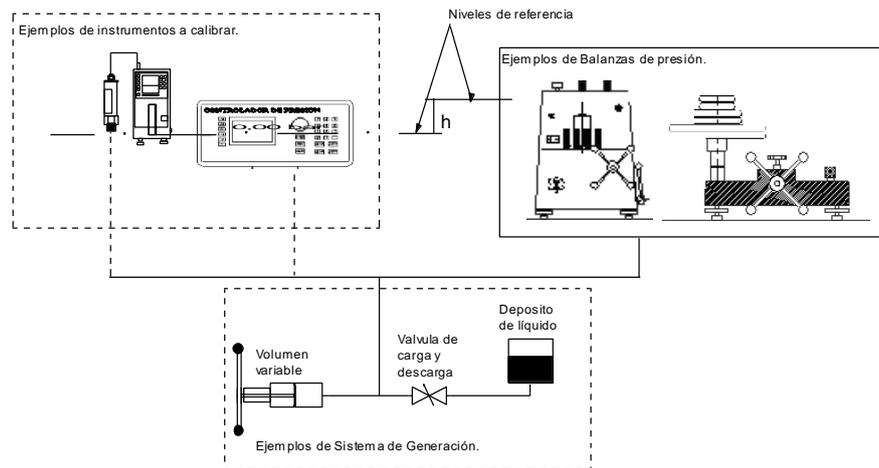
Se despresurizarán los equipos antes de proceder a la calibración, sometiéndoles al menos dos veces a la presión máxima de calibración. Durante este proceso se comprobará: el correcto funcionamiento de los equipos; la ausencia de fugas en el circuito y las indicaciones a presión mínima y máxima.

A continuación se dan algunos esquemas de conexión de los equipos a modo de ejemplo.

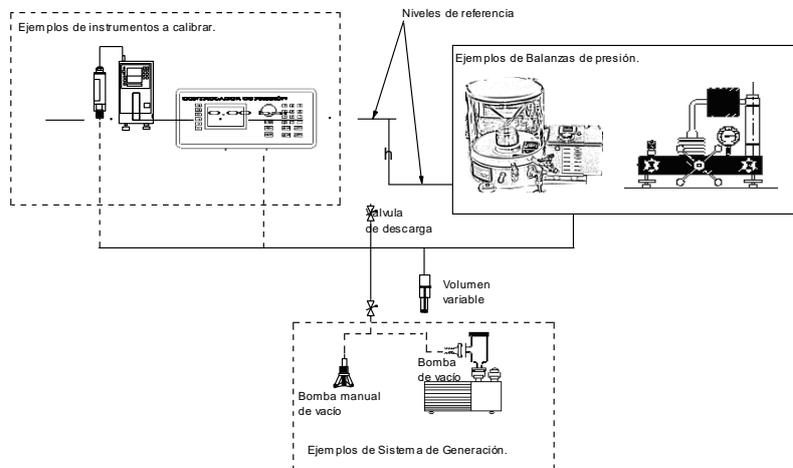
- Presión relativa positiva o presión manométrica en medio gas:



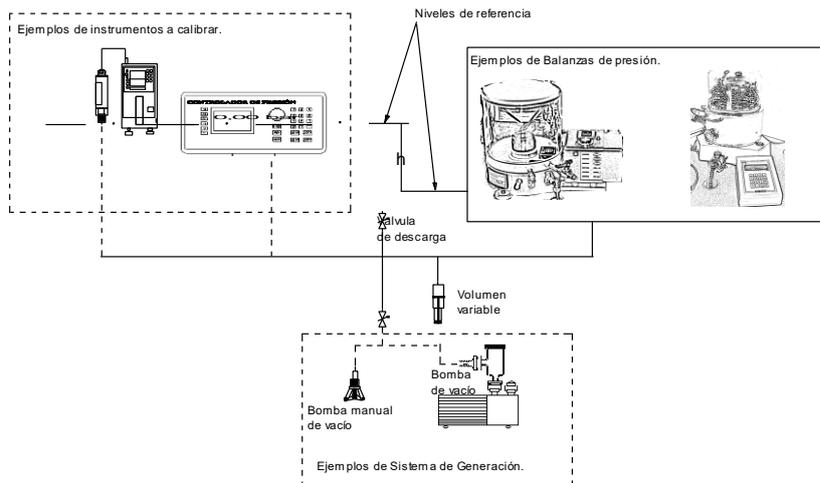
- Presión relativa positiva o presión manométrica en medio liquido



- Presión relativa negativa o presión vacuométrica en medio gas.



- Presión absoluta en medio gas.



### 5.3. Proceso de calibración

La calibración se realiza por comparación directa de las indicaciones de presión del calibrador de presión y las presiones generadas por la balanza.

Para la calibración se realizarán al menos tres series de medidas de seis puntos de calibración. Siendo aconsejable incrementar el número de puntos.

Los puntos de calibración incluirán el cero y un punto próximo al límite superior del intervalo de medida del calibrador de presión. El resto de los puntos se distribuirá aproximadamente de forma uniforme y teniendo en cuenta, en su caso, puntos singulares, en función de la utilización que hace el usuario.

Si el calibrador tiene algún dispositivo de puesta a cero o tara, éste deberá ser accionado al inicio de cada serie.

Una serie de medidas consiste en la comparación de las indicaciones del patrón y del instrumento a calibrar, en todos los puntos de calibración, alcanzando estos de forma consecutiva, empezando por el punto de presión cero e incrementando la presión del sistema punto a punto hasta llegar al punto de presión máxima. Una vez alcanzado el punto de presión máxima, si este no coincide con el límite superior del intervalo de medida se debe incrementar la presión y esperar al menos un minuto; en el caso de que el punto de presión máxima coincida con el límite superior del intervalo de medida del calibrador no se incrementará la presión y únicamente habrá que esperar al menos un minuto. Transcurrido el tiempo, se alcanzan otra vez todos los puntos de manera consecutiva decrementando la presión del sistema hasta volver a presión cero.

Para generar las distintas presiones nominales de una serie se irán colocando o quitando masas sobre el pistón, hasta obtener el valor de presión buscado, y comprimiendo o descomprimiendo el fluido de transmisión, para llevar el pistón con las masas al estado de flotación. La masa total que se coloca sobre el pistón dependerá de las características del mismo.

Para la medida de una presión el pistón se tiene que encontrar en su posición de flotación. Ésta coincide con el punto medio entre su posición más alta y su posición más baja.

Después de la realización de cada ensayo se dejará sin presión al sistema.

#### 5.4. Toma y tratamiento de datos

Los datos a tomar son los siguientes:

Datos a tomar para cada punto de calibración:

- Masa total colocada en la balanza de presión. Incluye la masa del pistón y las masas colocadas sobre él.
- Indicación del medidor de presión residual asociado a la balanza en el caso de medida de presión absoluta.
- Indicación del calibrador de presión.

Datos a tomar una sola vez para toda la calibración.

- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa.
- Presión ambiente.
- Temperatura del conjunto pistón cilindro, si la balanza tiene un dispositivo de medida; en caso contrario se le asignará la temperatura ambiente.
- Diferencia de alturas.

Se calcularán los siguientes parámetros, para cada punto de calibración:

- La presión de referencia ( $P_{\text{generada}}$ ).
- La media aritmética de las indicaciones del calibrador ( $\sum P_{\text{leida } i} / n; n = 6$ ).
- Corrección ( $C = P_{\text{generada}} - \sum P_{\text{leida } i} / n; n = 6$ ).
- La incertidumbre, para un factor de cobertura  $k = 2$ .

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Cálculo de incertidumbres

Para la estimación y cálculo de las incertidumbres se seguirá lo establecido en las referencias [2]

y [3]).

La corrección para un punto de presión de un calibrador de presión se obtiene de:

$$C = P_{\text{generada}} - P_{\text{leída}} + \delta P_{\text{res}} + \delta P_{\text{his}} + \delta P_{\text{cac}} \quad (2)$$

#### 6.1.1. Presión generada por la balanza de presión ( $P_{\text{generada}}$ ):

La presión generada por la balanza de presión al nivel de referencia del instrumento a calibrar, se obtiene de (1):

##### 6.1.1.1 Masa colocada en la balanza patrón ( $M$ ):

El valor de masa y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen del certificado de calibración del patrón.

$$u(M) = \frac{U}{k} \quad (3)$$

##### 6.1.1.2 Deriva de las masas colocadas sobre el pistón ( $\delta M$ ):

El valor de la masa puede variar entre calibraciones, esto es lo que normalmente se conoce como deriva. Se considera que su valor es cero y se incluye como una contribución a la incertidumbre. Si el semintervalo de deriva es  $\delta m$ , la varianza es  $u^2 = (\delta m)^2/3$ , y la incertidumbre típica debida a la deriva es:

$$u(\delta M) = \frac{\delta m}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

$\delta m$  es igual a la diferencia máxima, en valor absoluto, entre los valores de masa obtenidos para una misma pesa en dos certificados de calibración consecutivos. Cuando sólo se tiene una calibración se pueden utilizar las especificaciones del fabricante del equipo o la experiencia.

##### 6.1.1.3 Gravedad local ( $g_1$ ):

El valor de la gravedad local y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen del certificado de calibración de la gravedad en el lugar de utilización de la balanza.

En el caso de no disponer de un certificado de calibración de la gravedad local, ésta se puede obtener en función de la altitud y la latitud.

$$g_1 = 9,7803184 \cdot \left(1 + 5,3024 \times 10^{-3} \text{sen}^2 \varphi - 5,9 \times 10^{-6} \text{sen}^2(2\varphi)\right) - 3,086 \times 10^{-6} H \quad (5)$$

La incertidumbre del uso de esta fórmula es de  $U = 1 \times 10^{-4} \times g_1$ , para  $k = 2$ .

El uso de la fórmula (5) en lugar de la determinación experimental de la gravedad hace

que esta contribución se convierta en una de las de mayor peso en la incertidumbre de la presión generada.

#### 6.1.1.4 Densidad del aire ( $\rho_a$ ):

El valor de la densidad del aire y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen a partir de la temperatura ambiente, de la presión atmosférica y de la temperatura de rocío.

Una posible fórmula para evaluarla es:

$$\rho_a = \frac{0,34848P_{\text{amb}} - 0,009H.R. \times e^{0,061t_{\text{amb}}}}{273,15 + t_{\text{amb}}} \quad (6)$$

donde  $P_{\text{amb}}$  se mide en hPa,  $H.R.$  en% y  $t_{\text{amb}}$  en °C.

Las diferencias de los valores obtenidos con esta fórmula respecto de los obtenidos con la fórmula del BIPM son menores de 0,01 kg/m<sup>3</sup>. Si se mide la temperatura ambiente con incertidumbre menor de 0,5 °C; la presión ambiente con incertidumbre menor de 2 hPa y la humedad relativa con incertidumbre menor del 10 %, la incertidumbre de la densidad del aire aplicando la fórmula anterior es menor de 0,012 kg/m<sup>3</sup>. Si consideramos este valor como el intervalo de variación  $\delta\rho_a$ , la varianza es  $u^2 = (\delta\rho_a)^2/12$ , y la incertidumbre típica debida a la densidad del aire es:

$$u(\rho_a) = \frac{\delta\rho_a}{2\sqrt{3}} \quad (7)$$

#### 6.1.1.5 Densidad de las masas ( $\rho_M$ ):

El valor de la densidad de las masas y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen del certificado de calibración del patrón, o en su defecto de las especificaciones del fabricante, en el caso más normal de usar las especificaciones del fabricante:

$$u(\rho_M) = \frac{\delta\rho_M}{2\sqrt{3}} \quad (8)$$

#### 6.1.1.6 Volumen del pistón sometido a empuje del fluido ( $v$ ):

Su valor y su incertidumbre se pueden obtener o bien de las especificaciones del fabricante, o bien mediante una sencilla determinación dimensional mediante el uso de un calibre.

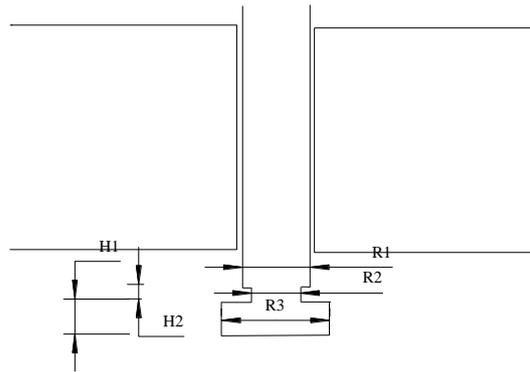


Figura 1.

$$v = \pi(R_3^2 h_1 - R_1^2 (h_1 + h_2) + R_2^2 h_2) \quad (9)$$

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(v) = \frac{\delta v}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

$\delta v$  es el semintervalo máximo de variación del volumen sometido a empuje declarada por el fabricante como límite máximo la obtenida en la determinación dimensional.

Este término normalmente solo se aplica a Balanzas de presión hidráulicas, ya que en las neumáticas su corrección y su aportación a la incertidumbre es despreciable.

#### 6.1.1.7 Densidad del fluido de transmisión de la presión ( $\rho_f$ ):

La densidad del fluido de se obtienen de las especificaciones del fabricante o de la ecuación de los gases perfectos en el caso de que el fluido sea un gas.

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(\rho_f) = \frac{\delta \rho_f}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

$\delta \rho_f$  es el semintervalo máximo de variación de la densidad del fluido declarada por el fabricante.

#### 6.1.1.8 Coeficiente de tensión superficial del fluido transmisor de la presión ( $\sigma$ ):

El valor del coeficiente de tensión superficial del fluido y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen de las especificaciones del fabricante. Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(\sigma) = \frac{\delta \sigma}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

$\delta\sigma$  es el semintervalo máximo de variación declarada por el fabricante para el valor de la tensión superficial del fluido.

#### 6.1.1.9 Longitud de la circunferencia del pistón ( $C_{ir}$ ):

El valor de la longitud de la circunferencia del pistón a calibrar, se obtiene a partir del valor nominal de su área efectiva. Su incertidumbre se obtiene de las especificaciones del fabricante para el valor del área efectiva.

$$C_{ir} = 2\sqrt{\pi A_N} \quad (13)$$

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(C_{ir}) = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{A_N}} \delta A_N}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

$\delta A_N$  es el semintervalo máximo de variación declarado por el fabricante para el valor del área efectiva.

#### 6.1.1.10 Área efectiva del conjunto pistón cilindro ( $A_{(0,t_0)}$ ):

El valor del Área efectiva del conjunto pistón cilindro y su incertidumbre expandida, normalmente para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen del certificado de calibración del patrón.

$$u(A_{(0,t_0)}) = \frac{U(A_{(0,t_0)})}{k(U(A_{(0,t_0)}))} \quad (15)$$

#### 6.1.1.11 Corrección debida a la deriva del área efectiva del conjunto pistón cilindro ( $\delta A_{(0,t_0)}$ ):

El valor del área efectiva puede variar entre calibraciones, esto es lo que normalmente se conoce como deriva. Se considera que su valor es cero y se incluye como una contribución a la incertidumbre. Si el semintervalo de deriva es  $\delta A_{(0,t_0)}$ , la varianza es  $u^2 = (\delta A_{(0,t_0)})^2/3$ , y la incertidumbre típica debida a la deriva es:

$$u(\delta A_{(0,t_0)}) = \frac{\delta A_{(0,t_0)}}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

$\delta A_{(0,t_0)}$ , es igual a la diferencia máxima, en valor absoluto, entre el valor del área efectiva obtenido en dos certificados de calibración consecutivos. Cuando sólo se tiene una calibración se pueden utilizar las especificaciones del fabricante del equipo o la experiencia.

#### 6.1.1.12 Coeficiente de deformación con la presión del conjunto pistón cilindro ( $\lambda$ ):

El valor del coeficiente de deformación con la presión del conjunto pistón cilindro y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen del certificado de calibración del patrón.

#### 6.1.1.13 Coeficiente de dilatación térmica del pistón cilindro ( $\alpha$ ):

El coeficiente de dilatación térmica del pistón cilindro y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen del certificado de calibración del patrón, o en su defecto de las especificaciones del fabricante.

#### 6.1.1.14 Temperatura del conjunto pistón cilindro ( $t$ ):

La temperatura del conjunto pistón cilindro se mide a través de una sonda de temperatura. La incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen a partir de la del certificado de calibración de la sonda, de la deriva de la sonda y del método de medida de la temperatura del conjunto pistón cilindro.

#### 6.1.1.15 Densidad del fluido de transmisión ( $\rho_f$ ):

La densidad del fluido de transmisión y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen del certificado de calibración del fluido, o en su defecto de las especificaciones del fabricante o de la ecuación de los gases perfectos en el caso de que el fluido sea un gas.

#### 6.1.1.16 Diferencia de altura ( $\Delta h$ ):

La diferencia de altura se mide a través de una regla. La incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen a partir de la del certificado de calibración de la regla, de la deriva de la regla y del método de medida de la diferencia de alturas.

#### 6.1.1.17 Presión residual en la medida de presión absoluta. ( $P_{res}$ ):

Este valor solo aplica cuando se miden presiones absolutas. Se mide normalmente con un medidor de vacío de conductividad térmica. La incertidumbre expandida, para un factor de cobertura  $k = 2$ , se obtienen a partir de la del certificado de calibración del medidor y de la su deriva.

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (1) se obtienen las contribuciones a la

incertidumbre debida a la presión generada al nivel de referencia del calibrador.

**Tabla 1: Contribuciones a la componente de incertidumbre debidas a la presión generada al nivel de referencia del calibrador**

Magnitud de entrada $X_i$	Estimación $x_i$	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución a la incertidumbre $u(y)$
Masa	$M$	$u(M)$	normal	$c_1 \approx \frac{P_{\text{generada}}}{M}$	$c_1 u(M)$
Deriva de las masas	$\delta M$	$u(\delta M)$	rectangular	$c_2 \approx \frac{P_{\text{generada}}}{M}$	$c_2 u(\delta M)$
Gravedad local	$g_1$	$u(g_1)$	normal	$c_3 \approx \frac{P_{\text{generada}}}{g_1}$	$c_3 u(g_1)$
Densidad del aire	$\rho_a$	$u(\rho_a)$	normal	$c_4 \approx \frac{-\frac{M g_1}{A_0} - g_1 \Delta h}{\rho_M}$	$c_4 u(\rho_a)$
Densidad de las masas	$\rho_M$	$u(\rho_M)$	rectangular	$c_5 \approx \frac{M g_1 \rho_a}{A_0} \frac{1}{\rho_M^2}$	$c_5 u(\rho_M)$
Volumen del P/C sometido a empuje	$v$	$u(v)$	rectangular	$c_6 \approx \frac{g_1(\rho_f - \rho_a)}{A_{0,t_0}}$	$c_6 u(v)$
Densidad del fluido de transmisión	$\rho_f$	$u(\rho_f)$	rectangular	$c_7 \approx \frac{g_1 v}{A_{0,t_0}} + g_1 \Delta h$	$c_7 u(\rho_f)$
Tensión superficial del fluido	$\sigma$	$u(\sigma)$	rectangular	$c_8 \approx \frac{Cir}{A_0}$	$c_8 u(\sigma)$
Longitud de la circunferencia del pistón	$Cir$	$u(Cir)$	rectangular	$c_9 \approx \frac{\sigma}{A_0}$	$c_9 u(Cir)$
Área efectiva del P/C	$A_0$	$u(A_0)$	normal	$c_{10} \approx -\frac{P_{\text{generada}}}{A_0}$	$c_{10} u(A_0)$

Magnitud de entrada $X_i$	Estimación $x_i$	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución a la incertidumbre $u(y)$
Deriva del área efectiva del P/C	$\delta A_{(0,t_0)}$	$u(\delta A_{(0,t_0)})$	rectangular	$c_{11} \approx -\frac{P}{A_0}$	$c_{11} u(\delta A_{(0,t_0)})$
Coficiente de deformación con la presión del P/C	$\lambda$	$u(\lambda)$	normal	$c_{12} \approx -\frac{P_{\text{generada}}^2}{(1 + \lambda P_N)}$	$c_{12} u(\lambda)$
Presión nominal	$P_N$	$u(P_N)$	rectangular	$c_{13} \approx -\frac{P\lambda}{(1 + \lambda P_N)}$	$c_{13} u(\lambda)$
Coficiente de dilatación lineal del P/C	$\alpha$	$u(\alpha)$	rectangular	$c_{14} \approx -P_{\text{generada}}(t - t_0)$	$c_{14} u(\alpha)$
Temperatura	$t$	$u(t)$	rectangular	$c_{15} \approx -P_{\text{generada}} \alpha$	$c_{15} u(t)$
Diferencia de alturas	$\Delta h$	$u(\Delta h)$	rectangular	$c_{16} = (\rho_f - \rho_a) g_l$	$c_{16} u(\Delta h)$
Presión residual	$P_{\text{res}}$	$u(P_{\text{res}})$	rectangular	1	$c_{17} u(P_{\text{res}})$

La incertidumbre típica asociada a la presión generada por la balanza se obtiene combinando sus distintas contribuciones

$$u(P_{\text{generada}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} \quad (17)$$

#### 6.1.2.- Presión indicada en el calibrador de presión ( $P_{\text{leída}}$ ):

La contribución a la incertidumbre de las indicaciones del calibrador para una misma presión es:

$$u(P_{\text{leída}}) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{\text{leída } i} - \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{leída } i}}{n})^2}{n-1}} \quad (18)$$

#### 6.1.3.- Corrección debida a la resolución del indicador del calibrador de presión ( $\delta P_x$ ):

Una de las fuentes de incertidumbre de un instrumento digital es la resolución de su dispositivo indicador. Aunque, por ejemplo las indicaciones repetidas fueran todas idénticas, la incertidumbre de medición atribuible a la repetibilidad no sería igual a cero, puesto que para un campo dado de señales de entrada al instrumento, dentro de un intervalo conocido, se obtendría la misma indicación. Si la resolución del dispositivo indicador es  $\delta x$ , el valor de la señal de entrada

que produce una indicación dada  $X$  puede situarse con igual probabilidad en cualquier punto dentro del intervalo que va desde  $(X - \delta x/2)$  a  $(X + \delta x/2)$ . La señal de entrada puede describirse por medio de una distribución rectangular de rango  $\delta x$  y varianza  $u^2 = (\delta x)^2/12$ , lo que supone una incertidumbre típica  $u = \frac{\delta x}{2\sqrt{3}}$  para cualquier indicación.

En un instrumento digital la resolución,  $\delta x$ , se corresponde con el mínimo incremento del dígito estable menos significativo.

#### 6.1.4.-Corrección debida a la histéresis del calibrador de presión ( $\delta P_{his}$ ):

La indicación del calibrador puede diferir en una cierta magnitud fija y conocida dependiendo de si las sucesivas lecturas son alcanzadas incrementando presión o decrementando presión. El operador puede tomar nota de la dirección en al que se realizan las lecturas sucesivas, y llevar a cabo la corrección correspondiente. Sin embargo, la dirección de la histéresis no siempre es observable: pueden existir oscilaciones ocultas en el instrumento alrededor de un punto de equilibrio, de tal manera que la lectura depende de la dirección desde la que se realiza la aproximación a este punto. Si el intervalo de posibles lecturas originado por este motivo es  $\delta his$ , la varianza es nuevamente  $u^2 = (\delta his)^2/12$  y la incertidumbre típica debida a la histéresis es  $u = \delta his/2\sqrt{3}$ .

$\delta his$  es igual a la diferencia máxima, en valor absoluto, entre los valores obtenidos incrementando y decrementando presión.

#### 6.1.5.-Corrección debida a las condiciones ambientales del calibrador de presión ( $\delta P_{cac}$ ):

Los calibradores de presión sufren variaciones en su indicación debido a la variación de temperatura  $\delta t$ . En algunos casos estas variaciones son compensadas internamente mediante métodos de compensación, pero cuando esto no ocurre es difícil de cuantificar su valor ya que no responden a un fenómeno físico como pudiera ser una dilatación, por consiguiente tiene que ser incluida como una componente de incertidumbre.

Normalmente el operario no puede obtener datos del comportamiento del calibrador con la temperatura por lo tiene que utilizar las especificaciones del fabricante.

Los fabricantes suele especificar el comportamiento de los calibradores con la temperatura como un porcentaje, respecto a la indicación del calibrador o al fondo de escala del calibrador, de la variación de la presión respecto a la variación de temperatura ( $\delta P/^\circ\text{C}$ ).

En este caso el intervalo de posibles lecturas es  $\frac{\delta P}{^\circ\text{C}} \frac{P_{leida}}{100} \delta t$ , la varianza es nuevamente  $u^2 = \left(\frac{\delta P}{^\circ\text{C}} \frac{P_{leida}}{100} \delta t\right)^2 / 12$  y la incertidumbre típica debida a las condiciones ambientales del calibrador  $u = \left(\frac{\delta P}{^\circ\text{C}} \frac{P_{leida}}{100} \delta t\right) / (2\sqrt{3})$ .

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (2) se obtienen las contribuciones a la incertidumbre en la calibración de calibradores de presión.

**Tabla 2: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de calibradores de presión**

Magnitud de entrada $X_i$	Estimación $x_i$	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad $c_i$	contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
Presión generada	$P_{\text{generada}}$	$u(P_{\text{generada}})$	normal	1	$u(P_{\text{generada}})$
Presión leída	$P_{\text{leída}}$	$u(P_{\text{leída}})$	normal	- 1	$-u(P_{\text{leída}})$
Resolución	$\delta P_x$	$u(\delta P_x)$	rectangular	1	$u(\delta P_x)$
Histéresis	$\delta P_{\text{his}}$	$u(\delta P_{\text{his}})$	rectangular	1	$u(\delta P_{\text{his}})$
Cond. amb. calibrador	$\delta P_{\text{cac}}$	$u(\delta P_{\text{cac}})$	rectangular	1	$u(\delta P_{\text{cac}})$

La incertidumbre típica combinada asociada a la calibración del calibrador de presión se obtiene combinando sus distintas contribuciones:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} \quad (19)$$

Una vez obtenida la incertidumbre combinada se calculan los grados de libertad efectivos,  $\nu_{\text{eff}}$ , a partir de la incertidumbre combinada y sus contribuciones mediante la aplicación de la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (20)$$

A partir de los grados de libertad efectivos y de la Tabla 3 se obtiene el factor  $k$ . La tabla está basada en una distribución t evaluada para una distribución de probabilidad del 95,45%.

**Tabla 3: Factores de cobertura  $k$  para diferentes grados de libertad  $\nu_{\text{eff}}$**

$\nu_{\text{eff}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
$k$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

La incertidumbre expandida, para un intervalo de confianza del 95,45%, se obtiene multiplicando a la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura:

$$U = ku(y) \quad (21)$$

## 6.2. Interpretación de resultados

Los resultados se presentarán en forma de tabla. En dicha tabla deben figurar, para cada punto de ensayo:

- La presión de referencia.
- La indicación del calibrador.

- La corrección.
- La incertidumbre, para un factor de cobertura  $k = 2$ , aproximadamente. También se puede suponer una incertidumbre máxima para todo el intervalo nominal en lugar de dar una para cada punto de ensayo.

Las correcciones a aplicar, para cada uno de los puntos de calibración considerados, serán los errores cambiados de signo.

En el certificado de calibración, además de dar la incertidumbre expandida, se especificará el valor del factor de cobertura  $k$  utilizado.

Además en el certificado de calibración que se emita debe figurar:

- Las condiciones ambientales durante la calibración.
- El número de series realizadas.
- El nivel de referencia elegido en el calibrador.
- El fluido de transmisión de la presión utilizado.
- Debe indicarse la relación entre las unidades utilizadas y el Pa.

Por no existir norma alguna para este tipo de instrumentos, no cabe incluirlos en clase de precisión alguna, a la vista de las desviaciones obtenidas. Sin embargo, puede ser habitual el haber definido previamente una tolerancia admisible, o bien utilizar como tolerancia la exactitud indicada en el manual del instrumento. En este caso, el cumplimiento o no con dicha tolerancia deberá comprobarse teniendo en cuenta las desviaciones obtenidas, con sus incertidumbres asociadas.

En el caso que el calibrador no cumpla con la tolerancia utilizada y se decida realizar ajustes, se procederá a una nueva calibración completa después de realizar los ajustes, y se incluirá en el certificado de calibración los resultados antes y después de realizar los ajustes.

Aunque el responsable final de asignar el periodo de recalibración de los calibradores de presión es el usuario del equipo, se recomienda que éste no exceda de 12 meses.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Vocabulario Internacional de términos básicos y generales de metrología (VIM). CEM. Ed 3. 2008.
- [2] JCGM 100: 2008 (GUM 1995 con ligeras correcciones). Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. EDICIÓN DIGITAL 1 en español (traducción 1ª Ed. Sept. 2008)
- [3] EA-4/02 M: 2013. Evaluación de la incertidumbre de medida en las calibraciones.

## 8. ANEXOS

### EJEMPLO DE APLICACIÓN

#### a) Datos del calibrador.

Intervalo nominal de medida:	(0 a 2) MPa
Exactitud:	0,02 % F.S. = 0,000 40 MPa
Resolución:	0,000 01 MPa
Variación con la temperatura:	0,001 5 % Lect./ °C

#### b) Datos del patrón (Balanza de pesos muertos).

	$A_0$	$9,80665 \times 10^{-5} \text{ m}^2$		$u(A_0)$	$2,90 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
	$\delta A_0$	$0,00 \times 10^0 \text{ m}^2$		$u(\delta A_0)$	$1,00 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
M	$M_{\text{pistón}}$	0,1999985 kg	$u(M)$	$u(M_{\text{pistón}})$	$2,00 \times 10^{-9} \text{ kg}$
	$M_{\text{soporte}}$	0,799992 kg		$u(M_{\text{soporte}})$	$8,00 \times 10^{-6} \text{ kg}$
	$M_1$	0,999993 kg		$u(M_1)$	$2,00 \times 10^{-5} \text{ kg}$
	$M_2$	1,999987 kg		$u(M_2)$	$2,00 \times 10^{-5} \text{ kg}$
	$M_3$	1,999988 kg		$u(M_3)$	$2,00 \times 10^{-5} \text{ kg}$
	$M_4$	1,999987 kg		$u(M_4)$	$2,00 \times 10^{-5} \text{ kg}$
	$M_5$	1,999986 kg		$u(M_5)$	$2,00 \times 10^{-5} \text{ kg}$
	$M_6$	1,999985 kg		$u(M_6)$	$2,00 \times 10^{-5} \text{ kg}$
	$M_7$	1,999984 kg		$u(M_7)$	$2,00 \times 10^{-5} \text{ kg}$
	$M_8$	1,999983 kg		$u(M_8)$	$2,00 \times 10^{-5} \text{ kg}$
	$M_9$	1,999982 kg		$u(M_9)$	$2,00 \times 10^{-5} \text{ kg}$
	$M_{10}$	1,999981 kg		$u(M_{10})$	$2,00 \times 10^{-5} \text{ kg}$
	$\delta M$			$u(\delta M)$	$1,00 \times 10^{-6} \text{ M kg}$
$\alpha$	$9,00 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$		$u(\alpha)$		$9,00 \times 10^{-7} \text{ °C}$
$\lambda$	$7,00 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1}$		$u(\lambda)$		$7,00 \times 10^{-8} \text{ MPa}^{-1}$
$\rho_M$	$8000 \text{ kg/m}^3$		$u(\rho_M)$		$0 \text{ kg/m}^3$
$t_0$	$20 \text{ °C}$		$u(t_0)$		$0 \text{ °C}$
			$u(P_N)$		$1,00 \times 10^{-4} \times P_N \text{ MPa}$

#### b) Otros datos.

$g_1$	$9,80665 \text{ m/s}^2$	$u(g_1)$	$1,00 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$
$\Delta h$	0 m	$u(\Delta h)$	0,01 m
Fluido de transmisión:			Nitrógeno
$\rho_f$	(1)	$u(\rho_f)$	$5,00 \times 10^{-6} \text{ (kg/m}^3\text{)}/\text{(kg/m}^3\text{)}$
$\rho_a$	(2)	$u(\rho_a)$	$5,00 \times 10^{-6} \text{ (kg/m}^3\text{)}/\text{(kg/m}^3\text{)}$

$$(1) \rho_f = 3,36999 \times 10^{-3} \frac{P_N}{t_{\text{amb}+273,15}}$$

$$(2) \rho_a = 3,47181 \times 10^{-3} \frac{P_{amb}}{t_{amb} + 273,15}$$

a) Procedimiento.

Para la calibración del calibrador se han realizado tres series de medida de once puntos de medida los cuales se han alcanzado incrementando y decrementando la presión. Los puntos elegidos han sido los siguientes:

(0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 y 2,0)MPa

Durante la calibración se han tomado los siguientes datos:

- Masa total colocada en la balanza de presión para cada punto de medida. El valor de la masa es el mismo en las tres series.
- Indicaciones del calibrador de presión, para cada punto de medida.
- Temperatura ambiente (inicio y fin).
- Humedad relativa (inicio y fin).
- Presión ambiente (inicio y fin).
- Temperatura del conjunto pistón cilindro (una sola vez).
- Incremento de altura entre el patrón y el calibrador (una sola vez).

b) Toma de datos.

$t_{amb}$	20,80	°C
$t_{P/C}$	20,52	°C
<i>H. R.</i>	40	%
$P_{amb}$	1012,75	hPa

$\Delta h$	0	mm
------------	---	----

Presión Nominal MPa	Masa kg	Indicación calibrador					
		Serie 1		Serie 2		Serie 3	
		subida MPa	bajada MPa	subida MPa	bajada MPa	subida MPa	bajada MPa
0,00	0,000 000 0	0000 00	0,000 02	0,000 00	0,000 01	0,000 00	-0,000 01
0,20	1,999 983 8	0,199 98	0,199 97	0,199 97	0,199 96	0,199 95	0,199 96
0,40	3,999 970 8	0,399 90	0,399 93	0,399 98	0,399 93	0,399 95	0,399 93
0,60	5,999 958 8	0,599 97	0,599 90	0,599 97	0,599 91	0,599 94	0,599 89
0,80	7,999 945 8	0,799 84	0,799 87	0,799 88	0,799 85	0,799 89	0,799 86
1,00	9,999 931 8	0,999 89	0,999 84	0,999 88	0,999 83	0,999 86	0,999 83
1,20	11,999 916 8	1,199 78	1,199 81	1,199 85	1,199 80	1,199 84	1,199 80
1,40	13,999 900 8	1,399 71	1,399 77	1,399 79	1,399 76	1,399 79	1,399 76
1,60	15,999 883 8	1,599 69	1,599 74	1,599 76	1,599 72	1,599 77	1,599 73
1,80	17,999 865 8	1,799 62	1,799 71	1,799 73	1,799 70	1,799 76	1,799 70
2,00	19,999 846 8	1,999 60	1,999 67	1,999 69	1,999 65	1,999 69	1,999 66

c) Tratamiento de datos.

La presión de referencia para los diferentes puntos se calcula aplicando la ecuación (1).

La indicación del calibrador para cada punto se obtiene como la media aritmética de las indicaciones obtenidas para un punto en los diferentes ensayos.

El error de indicación se obtiene como la diferencia entre las indicaciones del calibrador y la presión de referencia.

El cálculo de las incertidumbres se realiza según 6.1.

d) Incertidumbres.

A continuación se desarrolla el cálculo de incertidumbres para el punto de 2 MPa, para el resto de puntos se procede de la misma manera.

- Debida a la presión generada por la balanza de presión al nivel de referencia del calibrador de presión.

$$u(P_{\text{generada}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i(y)} = 6,35 \times 10^{-5} \text{ MPa}$$

**Tabla 4: Contribuciones a la componente de incertidumbre debida a la presión medida al nivel de referencia del calibrador**

Magnitud de entrada $X_i$	Estimación $x_i$	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ (MPa)
Masa	19,999 85 kg	$u(M) = 2,00 \times 10^{-4}$	normal	$c_1 = 1,00 \times 10^{-1}$	$2,00 \times 10^{-5}$
Deriva de la masa	0	$u(\delta M) = 2,00 \times 10^{-5}$	rectangular	$c_2 = 1,00 \times 10^{-1}$	$2,00 \times 10^{-6}$
Gravedad local	9,806 65 m/s <sup>2</sup>	$u(g_1) = 1,00 \times 10^{-7}$	Normal	$c_3 = 2,04 \times 10^{-1}$	$2,04 \times 10^{-8(1)}$
Densidad del aire	1,196 1 kg/m <sup>3</sup>	$u(\rho_a) = 5,98 \times 10^{-6}$	normal	$c_4 = -2,50 \times 10^{-4}$	$-1,50 \times 10^{-9(1)}$
Densidad de las masas	8000 kg/m <sup>3</sup>	$u(\rho_M) = 100$	rectangular	$c_5 = -3,74 \times 10^{-2}$	$-3,74 \times 10^{-6}$
Volumen del P/C sometido a empuje	0	$u(v)^{(2)}$	rectangular	(2)	(2)
Densidad del fluido de transmisión	22,947 kg/m <sup>3</sup>	$u(\rho_f) = 1,15 \times 10^{-4}$	rectangular	$c_7 = -9,81 \times 10^{-8(3)}$	$1,13 \times 10^{-11(1)}$
Tensión superficial del fluido	0	$u(\sigma)^{(3)}$	rectangular	(4)	(4)
Longitud de la circunferencia del pistón	$11,098 \times 10^{-3}$ m	$u(Cir)^{(3)}$	rectangular	(4)	(4)
Área efectiva del	$9,806\ 65 \times 10^{-5}$ m <sup>2</sup>	$u(A_0) = 2,90 \times 10^{-9}$	normal	$c_{10} = -2,04 \times 10^4$	$-5,91 \times 10^{-5}$
Deriva del área efectiva del P/C	0 m <sup>2</sup>	$u(A_0) = 1,00 \times 10^{-9}$	normal	$c_{11} = -2,04 \times 10^4$	$-2,04 \times 10^{-5}$
Coficiente de deformación con la presión del P/C	$7 \times 10^{-7}$ MPa <sup>-1</sup>	$u(\lambda) = 7,00 \times 10^{-8}$	normal	$c_{12} = -2,00 \times 10^0$	$-1,40 \times 10^{-7}$
Presión nominal	2 MPa	$u(P_N) = 2,00 \times 10^{-4}$	rectangular	$c_{13} = -1,40 \times 10^{-6}$	$-2,80 \times 10^{-10(1)}$
Coficiente de dilatación lineal del P/C	$9 \times 10^{-6}$ °C <sup>-1</sup>	$u(\alpha) = 9,00 \times 10^{-7}$	rectangular	$c_{14} = -1,04 \times 10^0$	$-9,36 \times 10^{-7}$
Temperatura	20 °C	$u(t) = 6,00 \times 10^{-1(5)}$	rectangular	$c_{15} = -1,80 \times 10^{-5}$	$1,08 \times 10^{-5}$
Diferencia de alturas	0	$u(\Delta h) = 1,00 \times 10^{-2}$	rectangular	$c_{16} = 2,13 \times 10^{-4}$	$2,13 \times 10^{-6}$
Presión residual	0	$u(P_{res})^{(6)}$	rectangular	(6)	(6)

<sup>(1)</sup> En este caso, y en la mayoría de los casos aunque debe valorarse, estos términos son despreciables.

<sup>(2)</sup> En este ejemplo el volumen del pistón sometido a empuje del fluido de transmisión es cero.

<sup>(3)</sup> Se sustituye  $\Delta h$  por  $u(\Delta h)$ .

<sup>(4)</sup> Cuando el fluido transmisor es un gas la tensión superficial del fluido es cero por lo que el término  $\sigma Cir$  desaparece de la ecuación (1).

$$^{(5)} u(t) = \frac{|\Delta t|}{2\sqrt{3}}$$

<sup>(6)</sup> Solo aplica a balanzas de presión absoluta.

- Debida a la presión indicada en el calibrador de presión.

$$u(P_{leída}) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{leída\ i} - \frac{\sum_{i=1}^n P_{leída\ i}}{n})^2}{n-1}} = 1,25 \times 10^{-5} \text{ MPa}$$

- Debida a la resolución del calibrador.

$$u(\delta P_x) = \frac{\delta x}{2\sqrt{3}} = 2,89 \times 10^{-6} \text{MPa}$$

- Debida a la histéresis.

$$u(\delta P_{\text{his}}) = \frac{\delta \text{his}}{2\sqrt{3}} = 2,02 \times 10^{-5} \text{MPa}$$

- Debida a las condiciones ambientales del calibrador.

$$u(\delta P_{\text{cac}}) = \frac{\frac{\delta P_{\text{leída}}}{^{\circ}\text{C}} \frac{100}{100} \delta t}{2\sqrt{3}} = 2,08 \times 10^{-6} \text{MPa}$$

**Tabla 5: Contribuciones a la incertidumbre combinada en la calibración de calibradores de presión en el punto de 2 MPa**

Magnitud de entrada $X_i$	Estimación $x_i$	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución a la incertidumbre $u(y)$ (MPa)
Presión generada	1,999 67 MPa	$u(P_{\text{generada}}) = 6,35 \times 10^{-5}$	normal	1	$6,35 \times 10^{-5}$
Presión leída	1,999 66 MPa	$u(P_{\text{leída}}) = 1,25 \times 10^{-5}$	normal	- 1	$1,25 \times 10^{-5}$
Resolución	0	$u(\delta P_x) = 2,89 \times 10^{-6}$	rectangular	1	$2,89 \times 10^{-6}$
Histéresis	0	$u(\delta P_{\text{his}}) = 2,02 \times 10^{-5}$	rectangular	1	$2,02 \times 10^{-5}$
Condiciones ambientales calibrador	0	$u(\delta P_{\text{cac}}) = 2,08 \times 10^{-6}$	rectangular	1	$2,08 \times 10^{-6}$

incertidumbre combinada ( $u$ )	$u = 7,1 \times 10^{-5}$ MPa
Grados de libertad efectivos ( $\nu_{\text{eff}}$ )	$\nu_{\text{eff}} = 124$
Factor de cobertura ( $k$ )	$k = 2,02$
Incertidumbre expandida ( $U$ )	$U = 0,000 14$ MPa

Las incertidumbres expandidas de calibración indicadas corresponden a incertidumbres típicas multiplicadas por un factor de cobertura  $k = 2$ , que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95 % aproximadamente.

A continuación se muestran los cálculos de la incertidumbre para todos los valores:

**Tabla 6. Incertidumbre típica**

$u(P_{\text{generada}})$												
$u(M)$	$u(\delta M)$	$u(g_i)$	$u(\rho_a)$	$u(\rho_M)$	$u(A_0)$	$u(\delta A_0)$	$u(\lambda)$	$u(P_N)$	$u(\alpha)$	$u(t)$	$u(\rho_l)$	$u(\Delta h)$
kg	kg	m/s <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	MPa <sup>-1</sup>	MPa	°C <sup>-1</sup>	°C	kg/m <sup>3</sup>	m
$0,00 \times 10^0$	$0,00 \times 10^0$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$0,00 \times 10^0$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$0,00 \times 10^0$	$1,00 \times 10^{-2}$
$2,00 \times 10^{-5}$	$2,00 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$2,00 \times 10^{-5}$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$1,15 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-2}$
$4,00 \times 10^{-5}$	$4,00 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$4,00 \times 10^{-5}$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$2,29 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-2}$
$6,00 \times 10^{-5}$	$6,00 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$6,00 \times 10^{-5}$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$3,44 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-2}$
$8,00 \times 10^{-5}$	$8,00 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$8,00 \times 10^{-5}$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$4,59 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-2}$
$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$5,74 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-2}$
$1,20 \times 10^{-4}$	$1,20 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$1,20 \times 10^{-4}$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$6,88 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-2}$
$1,40 \times 10^{-4}$	$1,40 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$1,40 \times 10^{-4}$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$8,03 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-2}$
$1,60 \times 10^{-4}$	$1,60 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$1,60 \times 10^{-4}$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$9,18 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-2}$
$1,80 \times 10^{-4}$	$1,80 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$1,80 \times 10^{-4}$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$1,03 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-2}$
$2,00 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-7}$	$5,98 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,90 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-9}$	$7,00 \times 10^{-8}$	$2,00 \times 10^{-4}$	$9,00 \times 10^{-7}$	$6,00 \times 10^{-1}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-2}$

Tabla 7. Coeficientes de sensibilidad

$u(x_i)$ $u(P_{generada})$												
$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_7$	$c_{10}$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$	$c_{14}$	$c_{15}$	$c_{16}$
MPa/kg	MPa/kg	MPa/(m/s <sup>2</sup> )	MPa/(kg/m <sup>3</sup> )	MPa/(kg/m <sup>3</sup> )	MPa/(kg/m <sup>3</sup> )	MPa/m <sup>2</sup>	MPa/m <sup>2</sup>	MPa <sup>2</sup>	MPa/MPa	MPa°C	MPa/°C	MPa/m
0,00 × 10 <sup>0</sup>	0,00 × 10 <sup>0</sup>	0,00 × 10 <sup>0</sup>	-9,81 × 10 <sup>-8</sup>	0,00 × 10 <sup>0</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	0,00 × 10 <sup>0</sup>	-1,17 × 10 <sup>-5</sup>					
1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,00 × 10 <sup>-1</sup>	2,04 × 10 <sup>-2</sup>	-2,51 × 10 <sup>-5</sup>	-3,74 × 10 <sup>-9</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	-2,04 × 10 <sup>-3</sup>	-2,04 × 10 <sup>-3</sup>	-2,00 × 10 <sup>-7</sup>	1,40 × 10 <sup>-13</sup>	-1,04 × 10 <sup>-1</sup>	-1,80 × 10 <sup>-6</sup>	1,08 × 10 <sup>-5</sup>
1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,00 × 10 <sup>-1</sup>	4,08 × 10 <sup>-2</sup>	-5,01 × 10 <sup>-5</sup>	-7,48 × 10 <sup>-9</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	-4,08 × 10 <sup>-3</sup>	-4,08 × 10 <sup>-3</sup>	-4,00 × 10 <sup>-7</sup>	2,80 × 10 <sup>-13</sup>	-2,08 × 10 <sup>-1</sup>	-3,60 × 10 <sup>-6</sup>	3,33 × 10 <sup>-5</sup>
1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,00 × 10 <sup>-1</sup>	6,12 × 10 <sup>-2</sup>	-7,51 × 10 <sup>-5</sup>	-1,12 × 10 <sup>-8</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	-6,12 × 10 <sup>-3</sup>	-6,12 × 10 <sup>-3</sup>	-6,00 × 10 <sup>-7</sup>	4,20 × 10 <sup>-13</sup>	-3,12 × 10 <sup>-1</sup>	-5,40 × 10 <sup>-6</sup>	5,58 × 10 <sup>-5</sup>
1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,00 × 10 <sup>-1</sup>	8,16 × 10 <sup>-2</sup>	-1,00 × 10 <sup>-4</sup>	-1,50 × 10 <sup>-8</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	-8,16 × 10 <sup>-3</sup>	-8,16 × 10 <sup>-3</sup>	-8,00 × 10 <sup>-7</sup>	5,60 × 10 <sup>-13</sup>	-4,16 × 10 <sup>-1</sup>	-7,20 × 10 <sup>-6</sup>	7,83 × 10 <sup>-5</sup>
1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,02 × 10 <sup>-1</sup>	-1,25 × 10 <sup>-4</sup>	-1,87 × 10 <sup>-8</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	-1,02 × 10 <sup>-4</sup>	-1,02 × 10 <sup>-4</sup>	-1,00 × 10 <sup>-6</sup>	7,00 × 10 <sup>-13</sup>	-5,20 × 10 <sup>-1</sup>	-9,00 × 10 <sup>-6</sup>	1,01 × 10 <sup>-4</sup>
1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,22 × 10 <sup>-1</sup>	-1,50 × 10 <sup>-4</sup>	-2,24 × 10 <sup>-8</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	-1,22 × 10 <sup>-4</sup>	-1,22 × 10 <sup>-4</sup>	-1,20 × 10 <sup>-6</sup>	8,40 × 10 <sup>-13</sup>	-6,24 × 10 <sup>-1</sup>	-1,08 × 10 <sup>-5</sup>	1,23 × 10 <sup>-4</sup>
1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,43 × 10 <sup>-1</sup>	-1,75 × 10 <sup>-4</sup>	-2,62 × 10 <sup>-8</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	-1,43 × 10 <sup>-4</sup>	-1,43 × 10 <sup>-4</sup>	-1,40 × 10 <sup>-6</sup>	9,80 × 10 <sup>-13</sup>	-7,28 × 10 <sup>-1</sup>	-1,26 × 10 <sup>-5</sup>	1,46 × 10 <sup>-4</sup>
1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,63 × 10 <sup>-1</sup>	-2,00 × 10 <sup>-4</sup>	-2,99 × 10 <sup>-8</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	-1,63 × 10 <sup>-4</sup>	-1,63 × 10 <sup>-4</sup>	-1,60 × 10 <sup>-6</sup>	1,12 × 10 <sup>-12</sup>	-8,32 × 10 <sup>-1</sup>	-1,44 × 10 <sup>-5</sup>	1,68 × 10 <sup>-4</sup>
1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,84 × 10 <sup>-1</sup>	-2,25 × 10 <sup>-4</sup>	-3,36 × 10 <sup>-8</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	-1,84 × 10 <sup>-4</sup>	-1,84 × 10 <sup>-4</sup>	-1,80 × 10 <sup>-6</sup>	1,26 × 10 <sup>-12</sup>	-9,36 × 10 <sup>-1</sup>	-1,62 × 10 <sup>-5</sup>	1,91 × 10 <sup>-4</sup>
1,00 × 10 <sup>-1</sup>	1,00 × 10 <sup>-1</sup>	2,04 × 10 <sup>-1</sup>	-2,50 × 10 <sup>-4</sup>	-3,74 × 10 <sup>-8</sup>	9,81 × 10 <sup>-8</sup>	-2,04 × 10 <sup>-4</sup>	-2,04 × 10 <sup>-4</sup>	-2,00 × 10 <sup>-6</sup>	1,40 × 10 <sup>-12</sup>	-1,04 × 10 <sup>0</sup>	-1,80 × 10 <sup>-5</sup>	2,13 × 10 <sup>-4</sup>

Tabla 8. Contribuciones a la componente de incertidumbre típica  $u(P_{generada})$

$u(P_{generada})$													$u(P_{generada})$
$c_1 u(M)$	$c_2 u(\delta M)$	$c_3 u(g_1)$	$c_4 u(\rho_a)$	$c_5 u(\rho_M)$	$c_7 u(\rho_i)$	$c_{10} u(A_0)$	$c_{11} u(\delta A_0)$	$c_{12} u(\lambda)$	$c_{13} u(P_N)$	$c_{14} u(\alpha)$	$c_{15} u(t)$	$c_{16} u(\Delta h)$	
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	0	0	MPa	0	0	MPa	
0,00 × 10 <sup>0</sup>	0,00 × 10 <sup>0</sup>	0,00 × 10 <sup>0</sup>	-5,87 × 10 <sup>-13</sup>	0,00 × 10 <sup>0</sup>	0,00 × 10 <sup>0</sup>	0,00 × 10 <sup>0</sup>	0,00 × 10 <sup>0</sup>	-1,17 × 10 <sup>0</sup>	1,17 × 10 <sup>-7</sup>				
2,00 × 10 <sup>-6</sup>	2,00 × 10 <sup>-7</sup>	2,04 × 10 <sup>-9</sup>	-1,50 × 10 <sup>-10</sup>	-3,74 × 10 <sup>-7</sup>	1,13 × 10 <sup>-12</sup>	-5,91 × 10 <sup>-6</sup>	-2,04 × 10 <sup>-6</sup>	-1,40 × 10 <sup>-14</sup>	2,80 × 10 <sup>-18</sup>	-9,36 × 10 <sup>-8</sup>	-1,08 × 10 <sup>-6</sup>	1,08 × 10 <sup>-7</sup>	6,67 × 10 <sup>-6</sup>
4,00 × 10 <sup>-6</sup>	4,00 × 10 <sup>-7</sup>	4,08 × 10 <sup>-9</sup>	-3,00 × 10 <sup>-10</sup>	-7,48 × 10 <sup>-7</sup>	2,25 × 10 <sup>-12</sup>	-1,18 × 10 <sup>-5</sup>	-4,08 × 10 <sup>-6</sup>	-2,80 × 10 <sup>-14</sup>	1,12 × 10 <sup>-17</sup>	-1,87 × 10 <sup>-7</sup>	-2,16 × 10 <sup>-6</sup>	3,33 × 10 <sup>-7</sup>	1,33 × 10 <sup>-6</sup>
6,00 × 10 <sup>-6</sup>	6,00 × 10 <sup>-7</sup>	6,12 × 10 <sup>-9</sup>	-4,49 × 10 <sup>-10</sup>	-1,12 × 10 <sup>-6</sup>	3,38 × 10 <sup>-12</sup>	-1,77 × 10 <sup>-5</sup>	-6,12 × 10 <sup>-6</sup>	-4,20 × 10 <sup>-14</sup>	2,52 × 10 <sup>-17</sup>	-2,81 × 10 <sup>-7</sup>	-3,24 × 10 <sup>-6</sup>	5,58 × 10 <sup>-7</sup>	2,00 × 10 <sup>-5</sup>
8,00 × 10 <sup>-6</sup>	8,00 × 10 <sup>-7</sup>	8,16 × 10 <sup>-9</sup>	-5,99 × 10 <sup>-10</sup>	-1,50 × 10 <sup>-6</sup>	4,50 × 10 <sup>-12</sup>	-2,37 × 10 <sup>-5</sup>	-8,16 × 10 <sup>-6</sup>	-5,60 × 10 <sup>-14</sup>	4,48 × 10 <sup>-17</sup>	-3,74 × 10 <sup>-7</sup>	-4,32 × 10 <sup>-6</sup>	7,83 × 10 <sup>-7</sup>	2,67 × 10 <sup>-5</sup>
1,00 × 10 <sup>-5</sup>	1,00 × 10 <sup>-6</sup>	1,02 × 10 <sup>-8</sup>	-7,48 × 10 <sup>-10</sup>	-1,87 × 10 <sup>-6</sup>	5,63 × 10 <sup>-12</sup>	-2,96 × 10 <sup>-5</sup>	-1,02 × 10 <sup>-5</sup>	-7,00 × 10 <sup>-14</sup>	7,00 × 10 <sup>-17</sup>	-4,68 × 10 <sup>-7</sup>	-5,40 × 10 <sup>-6</sup>	1,01 × 10 <sup>-6</sup>	3,34 × 10 <sup>-5</sup>
1,20 × 10 <sup>-5</sup>	1,20 × 10 <sup>-6</sup>	1,22 × 10 <sup>-8</sup>	-8,98 × 10 <sup>-10</sup>	-2,24 × 10 <sup>-6</sup>	6,75 × 10 <sup>-12</sup>	-3,55 × 10 <sup>-5</sup>	-1,22 × 10 <sup>-5</sup>	-8,40 × 10 <sup>-14</sup>	1,01 × 10 <sup>-16</sup>	-5,62 × 10 <sup>-7</sup>	-6,48 × 10 <sup>-6</sup>	1,23 × 10 <sup>-6</sup>	4,00 × 10 <sup>-5</sup>
1,40 × 10 <sup>-5</sup>	1,40 × 10 <sup>-6</sup>	1,43 × 10 <sup>-8</sup>	-1,05 × 10 <sup>-9</sup>	-2,62 × 10 <sup>-6</sup>	7,88 × 10 <sup>-12</sup>	-4,14 × 10 <sup>-5</sup>	-1,43 × 10 <sup>-5</sup>	-9,80 × 10 <sup>-14</sup>	1,37 × 10 <sup>-16</sup>	-6,55 × 10 <sup>-7</sup>	-7,56 × 10 <sup>-6</sup>	1,46 × 10 <sup>-6</sup>	4,67 × 10 <sup>-5</sup>
1,60 × 10 <sup>-5</sup>	1,60 × 10 <sup>-6</sup>	1,63 × 10 <sup>-8</sup>	-1,20 × 10 <sup>-9</sup>	-2,99 × 10 <sup>-6</sup>	9,00 × 10 <sup>-12</sup>	-4,73 × 10 <sup>-5</sup>	-1,63 × 10 <sup>-5</sup>	-1,12 × 10 <sup>-13</sup>	1,79 × 10 <sup>-16</sup>	-7,49 × 10 <sup>-7</sup>	-8,64 × 10 <sup>-6</sup>	1,68 × 10 <sup>-6</sup>	5,34 × 10 <sup>-5</sup>
1,80 × 10 <sup>-5</sup>	1,80 × 10 <sup>-6</sup>	1,84 × 10 <sup>-8</sup>	-1,35 × 10 <sup>-9</sup>	-3,36 × 10 <sup>-6</sup>	1,01 × 10 <sup>-11</sup>	-5,32 × 10 <sup>-5</sup>	-1,84 × 10 <sup>-5</sup>	-1,26 × 10 <sup>-13</sup>	2,27 × 10 <sup>-16</sup>	-8,42 × 10 <sup>-7</sup>	-9,73 × 10 <sup>-6</sup>	1,91 × 10 <sup>-6</sup>	6,01 × 10 <sup>-5</sup>
2,00 × 10 <sup>-5</sup>	2,00 × 10 <sup>-6</sup>	2,04 × 10 <sup>-8</sup>	-1,50 × 10 <sup>-9</sup>	-3,74 × 10 <sup>-6</sup>	1,13 × 10 <sup>-11</sup>	-5,91 × 10 <sup>-5</sup>	-2,04 × 10 <sup>-5</sup>	-1,40 × 10 <sup>-13</sup>	2,80 × 10 <sup>-16</sup>	-9,36 × 10 <sup>-7</sup>	-1,08 × 10 <sup>-5</sup>	2,13 × 10 <sup>-6</sup>	6,67 × 10 <sup>-5</sup>

**Tabla 9. Balance de incertidumbres**

$u_A$	$u(P)$	$u(\delta P_x)$	$u(\delta P_{his})$	$u(\delta P_{cac})$	$u$	$\nu_{eff}$	$k$ 95,45%	$U$ $k \times u$
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa			MPa
$3,85 \times 10^{-6}$	$0,00 \times 10^0$	$2,89 \times 10^{-6}$	$5,77 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$7,80 \times 10^{-6}$	66	2,04	$1,6 \times 10^{-5}$
$3,91 \times 10^{-6}$	$6,68 \times 10^{-6}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$9,00 \times 10^{-6}$	96	2,03	$1,8 \times 10^{-5}$
$9,91 \times 10^{-6}$	$1,33 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$1,44 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$2,23 \times 10^{-6}$	93	2,03	$4,5 \times 10^{-5}$
$1,31 \times 10^{-6}$	$2,00 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$2,02 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$3,15 \times 10^{-5}$	108	2,02	$6,4 \times 10^{-5}$
$6,97 \times 10^{-6}$	$2,67 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$8,66 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$2,91 \times 10^{-5}$	128	2,02	$5,9 \times 10^{-5}$
$9,65 \times 10^{-6}$	$3,34 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$1,44 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$3,78 \times 10^{-5}$	140	2,02	$7,6 \times 10^{-5}$
$9,91 \times 10^{-6}$	$4,00 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$1,44 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$4,38 \times 10^{-5}$	132	2,02	$8,8 \times 10^{-5}$
$1,10 \times 10^{-5}$	$4,68 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$1,73 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$5,12 \times 10^{-5}$	133	2,02	$1,0 \times 10^{-4}$
$1,07 \times 10^{-5}$	$5,34 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$1,44 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$5,64 \times 10^{-5}$	120	2,02	$1,1 \times 10^{-4}$
$1,74 \times 10^{-5}$	$6,02 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$2,59 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$6,79 \times 10^{-5}$	138	2,02	$1,4 \times 10^{-4}$
$1,25 \times 10^{-5}$	$6,68 \times 10^{-5}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$2,02 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-6}$	$7,10 \times 10^{-5}$	124	2,02	$1,4 \times 10^{-4}$

# Metrología

NIPO: 113-20-002-9