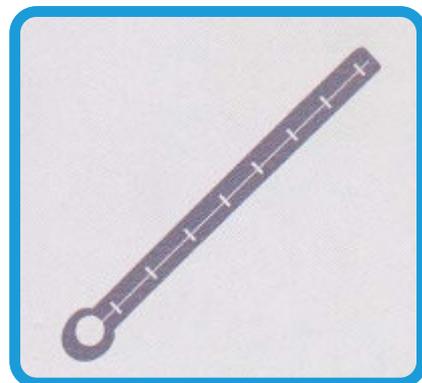
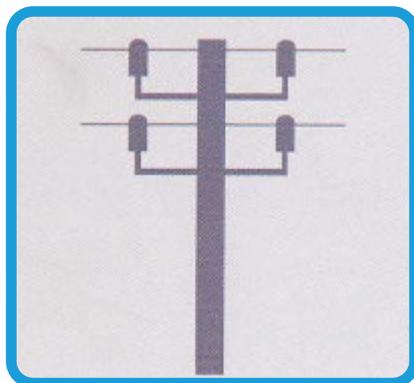
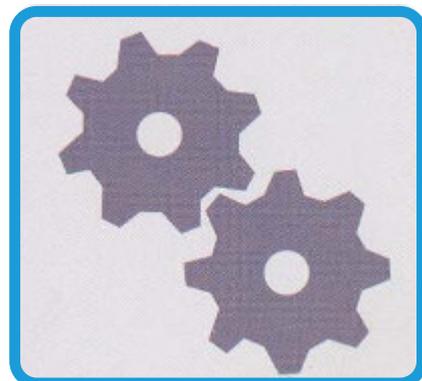
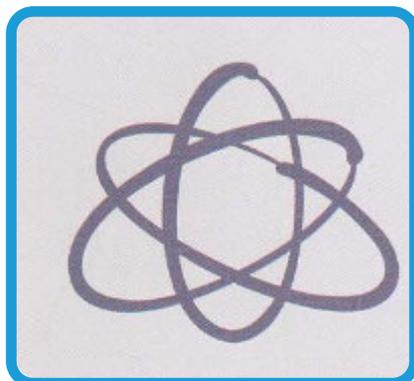
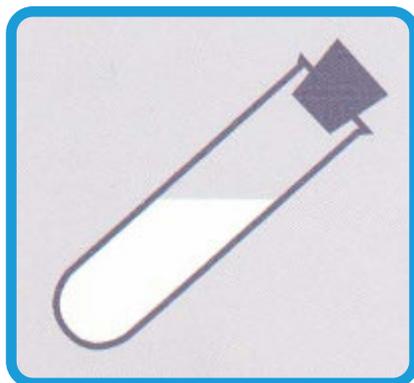
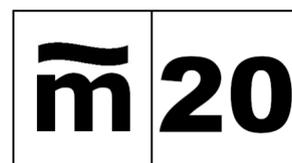


Metrología



PROCEDIMIENTO ME-017 PARA LA
CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE
PRESIÓN CON SALIDA ELÉCTRICA



PROCEDIMIENTO ME017

CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE PRESIÓN CON SALIDA ELÉCTRICA

La presente edición de este procedimiento se emite exclusivamente en formato digital y puede descargarse gratuitamente de nuestra página web (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	3
4.1. Descripción	3
4.3. Abreviaturas y símbolos	4
5. DESCRIPCIÓN	7
5.1. Equipos y materiales	7
5.2. Operaciones previas.....	8
5.3. Proceso de calibración	9
5.4. Toma y tratamiento de datos	10
6. RESULTADOS.....	12
6.1. Cálculo de incertidumbres	12
6.2. Interpretación de resultados	17
7. REFERENCIAS	18
8. ANEXOS.....	18

1. OBJETO

Este documento tiene por objeto describir la sistemática para realizar la calibración de transmisores de presión con salida eléctrica. Este procedimiento no aplica a la calibración de transductores de presión.

Este procedimiento ha sido realizado conforme a lo establecido en las recomendaciones de la referencia [1].

2. ALCANCE

Este procedimiento es de aplicación a los transmisores de 2, 3 o 4 hilos y salida lineal con la presión tanto en voltaje como en intensidad de corriente que se calibren estáticamente con un medidor de presión de mayor exactitud. Para calibrar hace falta además un multímetro que mida la salida.

Este procedimiento se aplicará a transmisores cuya clase de exactitud sea peor o igual que el 0,1% de su rango de medida.

NOTA:

Para calibrar transmisores de mejor exactitud se seguirá este procedimiento conjuntamente con el "Procedimiento ME-010 para la calibración de calibradores de presión".

3. DEFINICIONES

Las definiciones aplicables están recogidas en la referencia [1].

4. GENERALIDADES

4.1. Descripción

Los transductores y transmisores de presión con salida eléctrica proporcionan una señal eléctrica proporcional a la presión medida. Esta señal eléctrica, generalmente en mA, V o mV se ha de leer externamente con un multímetro.

La principal diferencia entre transmisores y transductores de presión es que los transductores de presión dan la señal eléctrica de salida que depende linealmente de la señal eléctrica de entrada, por lo que dependen de la alimentación eléctrica. Los transmisores llevan asociados una electrónica que permite un margen de tensión de alimentación, por ejemplo de 10 a 50 V, sin que varíe la señal de salida.

Algunos transmisores son re-ajustables, es decir, se puede ajustar la señal eléctrica a un rango nominal de presión más pequeño que el rango total de medida consiguiendo más sensibilidad, siempre que el sensor lo permita.

En general para transmisores y transductores la relación entre la presión medida P y la señal eléctrica I es:

$$P = \frac{R_p}{L_E - l_E} \cdot (I - l_E) \quad (1)$$

donde R_p es el rango de medida en unidades de presión y L_E y l_E son los valores inferior y superior del rango eléctrico del instrumento.

El sensor es la parte fundamental de transmisores y transductores. Hay muchos tipos de sensores de presión: piezoeléctricos, Bourdon, de cilindro vibrante, de cuarzo vibrante, inductivos, capacitivos, elásticos. Algunos como los capacitivos y los elásticos permiten medir presiones diferenciales directamente, es decir, no como diferencia de presiones. Estos sensores consiguen transformar las variaciones de presión en variaciones de voltaje o intensidad o en variaciones de las características de algún elemento de un circuito como la capacidad o la resistencia que el circuito transforma en variaciones de voltaje o intensidad.

Los transmisores y transductores pueden tener 2, 3 o 4 hilos. Veamos los esquemas de conexión eléctrica que tiene cada uno.

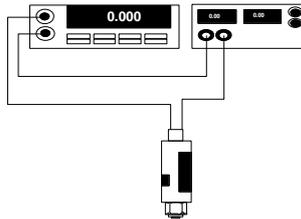


Fig 1: conexión a dos hilos

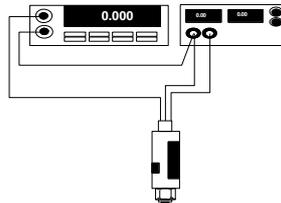


Fig 2: conexión a tres hilos

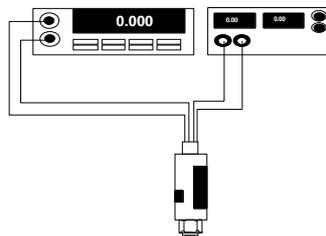


Fig 3: conexión a cuatro hilos

4.3. Abreviaturas y símbolos

$\delta(his)_E$ Corrección por histéresis del medidor medida a través del multímetro y en unidades de presión.

Δ_R	Corrección por diferencia de alturas.
$\delta(res)_E$	Corrección por resolución de la indicación eléctrica por el medidor a calibrar, en unidades de presión.
$\delta(res)_{PR}$	Corrección por resolución del patrón de presión.
$\delta(amb)_M$	Corrección en el medidor a calibrar por la temperatura en unidades de presión.
$\delta(der)_E$	Corrección por deriva del multímetro en unidades de presión.
$\delta(amb)_{PR}$	Corrección en el patrón de presión por las condiciones ambientales.
$\delta(der)_{PR}$	Corrección por deriva del patrón de presión.
$\delta(med)_E$	Corrección de calibración que hay que hacer al multímetro, en unidades de presión.
g_0	Gravedad a nivel del mar, cuyo valor es 9,780 318 4 m/s ² .
α	Constante cuyo valor es 0,005 302 4.
β	Constante cuyo valor es 0,000 005 9.
\bar{I}	Media de las indicaciones del multímetro para una misma presión nominal.
\bar{I}_{sub}	Media de las indicaciones del multímetro para una misma presión nominal cuando la siguiente presión nominal es mayor.
\bar{I}_{baj}	Media de las indicaciones del multímetro para una misma presión nominal cuando la siguiente presión nominal es menor.
ϕ	Latitud en radianes.
ρ_a	Densidad del aire.
ν_{eff}	Grados efectivos de libertad (véase referencia [3]).
ρ_f	Densidad del fluido.
ν_i	Grados de libertad de la contribución a la incertidumbre i (véase referencia [3]).
ρ_m	Masa molecular del gas.
δt	Máxima variación de temperatura, en valor absoluto, desde la calibración del patrón a cualquier momento de la calibración actual o, si fuese más desfavorable, entre cualquier momento de la calibración actual.
$\delta t'$	Máxima variación de la temperatura en valor absoluto durante la calibración actual.
C_i	Corrección de calibración.
$corr_i$	Corrección de un instrumento en el punto de calibración i .

$corr_{max}$	Máxima corrección que tiene un instrumento tomando en cuenta todos sus puntos de calibración.
der_E	Deriva del patrón eléctrico.
der_P	Deriva del patrón de presión.
g	Gravedad local.
H	Altura sobre el nivel del mar en metros.
h	Diferencia de alturas respecto a la horizontal entre patrón y equipo a calibrar.
his	Histéresis.
$I_{baj,i}$	Indicación del multímetro para una presión nominal cuando la siguiente presión nominal es menor.
I_i	Indicación del multímetro para una determinada presión nominal.
ind_i	Indicación de un instrumento en el punto de calibración i
$I_{sub,i}$	Indicación del multímetro para una presión nominal cuando la siguiente presión nominal es mayor.
k	Factor de cobertura (véase referencia [3]).
L_E	Mayor valor del rango eléctrico.
l_E	Menor valor del rango eléctrico.
n	Entero que se refiere al número de medidas consideradas en un cierto cálculo.
P	Presión generada.
P_I	Indicación del multímetro en unidades de presión.
P_R	Indicación del patrón de presión de referencia.
R	Constante de los gases ideales.
R_E	Rango eléctrico.
R_P	Rango de medida del instrumento en unidades de presión.
res_E	Resolución de la indicación eléctrica para ese medidor.
res_P	Resolución del patrón de presión.
r_M	Porcentaje de variación de la indicación del medidor a calibrar con la temperatura.
r_P	Porcentaje de variación de la indicación del patrón con la temperatura.
R_p	Rango de presión del medidor.
s	Desviación típica (véase referencia [3]).

T	Temperatura en kelvin.
U	Incertidumbre expandida (véase referencia [3]).
$u()$	Contribución a la incertidumbre de ...
$U_{\text{cert E}}$	Incertidumbre del certificado del patrón eléctrico.
$U_{\text{cert P}}$	Incertidumbre del certificado del patrón de presión.
u_i	Cada una de las contribuciones a la incertidumbre.
U_{max}	Incertidumbre máxima entre todos los puntos de calibración

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

5.1.1.- Patrones

Se utilizará un patrón de presión o varios si fuera necesario dependiendo del rango. La incertidumbre máxima del patrón será como mucho la cuarta parte de la incertidumbre máxima esperada en la calibración y deberá cubrir todo el rango del equipo a calibrar.

Se utilizará también un multímetro que mida voltaje o intensidad, según sea el caso, en el rango necesario. Su incertidumbre máxima será tal que transformada a unidades de presión por la ecuación (1) contribuya como mucho como la cuarta parte de la incertidumbre máxima esperada en la calibración.

Ambos patrones deberán tener vigente sus certificados de calibración trazables a un laboratorio nacional o acreditado.

5.1.2.- Generador y controlador de presión

En general se dispondrá de un sistema que genere las presiones necesarias de forma lenta y suave y las pueda mantener de forma estable. Lo ideal sería con valores mejores que la resolución del patrón de presión. Esto es así ya que se conseguiría una lectura estable.

5.1.3.- Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales han de cumplir siempre las especificaciones de todos los equipos. Unas posibles condiciones de referencia serían una temperatura ambiente de $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ y una humedad relativa $< 60\%$.

La temperatura suele ser lo más determinante, sobre todo a la hora de hacer correcciones a los transductores y transmisores, aunque muchos de ellos la llevan corregida internamente o el fabricante suele dar un coeficiente de variación de la indicación del medidor con la temperatura. Este dato se tomará en cuenta a la hora de estimar la incertidumbre asociada a las condiciones ambientales del medidor.

La corrección por temperatura para los multímetros es despreciable para la calibración de este tipo de medidores si las temperaturas no son muy extremas.

5.1.4.- Accesorios

Se dispondrán de los tubos y racores adecuados para el fluido y las presiones utilizadas. En el caso de los transductores será necesaria una fuente de alimentación adecuada.

Se dispondrá también de una regla y un nivel de alturas trazables que permitan medir la diferencia de alturas entre los niveles de referencia, aunque se procurará que la diferencia de alturas sea nula y hacer más fácil todo el tratamiento.

5.2. Operaciones previas

Se realizarán las siguientes comprobaciones generales antes de realizar la calibración.

5.2.1.- Identificación del instrumento

Se comprobará que el instrumento está identificado con su marca, modelo y número de serie o código del propietario y se tomará nota de estos datos. Si está sin identificar se le asignará una identificación que se fijará adecuadamente. También se tomará nota de cualquier posible anomalía y se informará al usuario de ésta.

5.2.2.- Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales estarán de acuerdo con lo contemplado en las especificaciones de los instrumentos utilizados. Las condiciones ambientales aparecerán especificadas en el certificado de calibración.

5.2.3.- Posición del instrumento

El instrumento se colocará en su posición normal de trabajo, que no cambiará durante la calibración. Se colocará el instrumento a calibrar y patrón o patrones al mismo nivel de referencia. Si no es posible se sumará al valor patrón la variación de presión por diferencia de alturas, que vendrá dada por la expresión

$$\Delta_R = (\rho_f - \rho_a) \cdot g \cdot h \quad (2)$$

a) Densidad del aire

Bastará con tomar la densidad del aire, ρ_a , como $1,2 \text{ kg/m}^3$ para calibrar transductores y transmisores de presión con exactitud igual o peor al 0,1% en la mayor parte de los casos.

b) Densidad del fluido de calibración

Si el fluido es un gas la densidad vendrá dada por la ley de los gases ideales,

$$P = \frac{\rho_f}{\rho_m} \cdot R \cdot T \quad (3)$$

En nuestro caso basta con tomar R como $8,31 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$. Para que la densidad, ρ_f , esté en kg/m^3 hay que tomar la presión en Pa, la temperatura en K y la masa molecular, ρ_m , en kg/mol .

Si el fluido es líquido se deberá conocer su densidad, aunque si la diferencia de alturas es nula no será necesaria conocerla con mucha exactitud ya que sólo influirá en la incertidumbre y no de manera significativa para este tipo de medidores.

c) Gravedad

La gravedad local g , en el caso de no haber sido medida directamente, vendrá en m/s^2 dada según la referencia [2] por la fórmula

$$g = g_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \text{sen}^2(\varphi) + \beta \cdot \text{sen}^2(2\varphi)) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H \quad (4)$$

Esta fórmula da el valor de la gravedad local con una exactitud mejor del 0,01%.

d) Diferencia de alturas

Se refiere a la diferencia de alturas entre patrón y medidor a calibrar respecto a la horizontal. La diferencia de alturas, h , será positiva cuando el equipo a calibrar se encuentra más bajo que el patrón.

5.2.4.- Estabilización del equipo

Antes de calibrar se esperará el tiempo mínimo de estabilización térmica especificada para los equipos. Si no se especifica bastará con 24 h. Los instrumentos que necesiten alimentación eléctrica habrán de estar conectados a la red el tiempo necesario antes del comienzo de la calibración. Si no se especifica bastará con 1 h. Si el laboratorio no está preacondicionado habrá que esperar un mínimo de 48 h para llegar a las condiciones necesarias de calibración, aunque esto depende de la potencia de la climatización, el tamaño del laboratorio y el aislamiento de éste.

5.2.5.- Fugas

Se comprobará que no hay fugas en el circuito comprobando la indicación del patrón. En el caso en que haya fuga se buscará su origen. Esto se hará si el fluido transmisor es gas echando una solución jabonosa en los posibles puntos de fuga. En el caso en que el fluido transmisor sea líquido bastará la mera comprobación visual para buscar el origen de la fuga.

5.3. Proceso de calibración

La calibración se llevará a cabo por el método de comparación directa, es decir, la comparación de las medidas del instrumento a calibrar y el patrón en las mismas condiciones ambientales.

5.3.1.- Puntos de medida

La calibración se realizará en 3 ciclos. Generalmente en cada ciclo se generarán 5 presiones nominales o más incluyendo aquella que corresponde al cero eléctrico y la del fondo de escala y distribuidas uniformemente a lo largo del rango de medida tomadas primero en sentido creciente y después en decreciente. Estas presiones nominales podrán ser elegidas por el usuario en su caso.

5.3.2.- Pasos en una calibración

1) Comprobación inicial

Previo a la calibración se despresurizará el instrumento. Después se realizará un ciclo de medida. Estas medidas junto con el cálculo de las incertidumbres pertinentes nos indicarán el estado del transmisor y si es necesario su ajuste. Su ajuste será necesario si la suma del valor absoluto de la diferencia de los valores entre el patrón de presión y el equipo a calibrar con su incertidumbre expandida asociada superan los valores establecidos como límites de tolerancia para los resultados de la calibración y que podrán ser las especificaciones del fabricante u otros.

2) Ajuste si es necesario

Si el ajuste es necesario se le comunicará al usuario y si éste da su autorización se procederá a su ajuste.

3) Calibración

Después viene la calibración realizando los otros dos ciclos si no se ha realizado el ajuste o realizando los tres ciclos pertinentes si se ha realizado el ajuste.

5.3.3.- Modo de operación

Se irá introduciendo presión en el circuito con el generador hasta que el patrón se aproxime a la primera presión nominal. Con el controlador se ajustará la presión hasta que el patrón de presión dé la lectura deseada de forma estable. Es importante mantener así la presión hasta que el equipo dé una señal que se traduzca en una lectura estable para el patrón eléctrico.

Se repetirán estos pasos con las siguientes presiones siempre en sentido ascendente hasta llegar al máximo. Después se realizará el proceso contrario en sentido descendente hasta el mínimo del rango a calibrar completando así cada ciclo.

5.4. Toma y tratamiento de datos

Todos los datos correspondientes a una calibración estarán recogidos en su correspondiente hoja de calibración. Entre estos como mínimo estarán los siguientes:

- a) Código de identificación de la calibración y procedimiento aplicado.
- b) Identificación del instrumento y su resolución.

- c) Identificación de los patrones de presión y eléctrico, su resolución y deriva.
- d) Lecturas de patrón de presión y multímetro para cada presión generada.
- e) Condiciones ambientales durante la calibración.
- f) Fluido utilizado durante la calibración.
- g) Cualquier anomalía detectada durante la calibración.
- h) Correcciones a realizar (por ejemplo por calibración de los patrones).
- i) Diferencia de alturas entre patrones e instrumento a calibrar así como su incertidumbre.
- j) Fechas de realización.
- k) Técnico que realizó la calibración.
- l) Técnico que revisó la calibración.

A continuación se verá el tratamiento de los datos obtenidos.

5.4.1.- Corrección de las lecturas de los patrones

Las lecturas de los patrones habrán de corregirse según sus certificados de calibración. Si el punto está muy próximo a un punto del certificado de calibración la corrección será la misma que establece el certificado para ese punto. En caso contrario se hace una interpolación lineal de las correcciones, es decir, dado que conocemos las correcciones en el punto $i-1$ y en el punto $i+1$ la corrección en el punto i será

$$corr_i = corr_{i-1} + \frac{corr_{i+1} - corr_{i-1}}{ind_{i+1} - ind_{i-1}} \cdot (ind_i - ind_{i-1}) \quad (5)$$

En nuestro caso la corrección del patrón eléctrico será despreciable en la mayor parte de los casos y esta contribución se sumará a la incertidumbre final de la forma explicada en la referencia [3] en su punto F.2.4.5 (esto se tratará en el apartado de cálculo de incertidumbres).

5.4.2.- Corrección por diferencia de alturas

Se realizará de la forma explicada en el punto 5.2.3 y con su valor se corregirá cada presión de referencia.

5.4.3.- Cálculo de las indicaciones del medidor

Para cada presión nominal generada se hallará la media de las indicaciones eléctricas como

$$\bar{I} = \frac{R_p}{L_E - l_E} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \quad (6)$$

donde n es seis si tomamos tres ciclos y si tomamos un ciclo (para ver si es necesario el ajuste) n es dos.

5.4.4.- Cálculo de la desviación típica del medidor

Vendrá dada en unidades de presión para cada presión de referencia por

$$s = \frac{R_p}{L_E - l_E} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(I_i - \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \right)^2}{n-1}} \quad (7)$$

donde n es seis si tomamos tres ciclos y si tomamos un ciclo (para ver si es necesario el ajuste) n es dos.

5.4.5.- Cálculo de la histéresis del medidor

Para cada presión de referencia se tendrá

$$\bar{I}_{\text{sub}} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{\text{sub},i}}{n} \quad (8)$$

$$\bar{I}_{\text{baj}} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{\text{baj},i}}{n} \quad (9)$$

$$his = \frac{R_p}{L_E - l_E} \cdot |\bar{I}_{\text{baj}} - \bar{I}_{\text{sub}}| \quad (10)$$

siendo $I_{\text{sub},i}$ cada una de las indicaciones eléctricas medidas decrementado la presión y $I_{\text{baj},i}$ cada una de las indicaciones eléctricas medidas incrementando la presión. Para tres ciclos n será tres y para un ciclo uno.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

Este cálculo se realizará teniendo en cuenta los criterios de los documentos [3] y [4].

La ecuación modelo para la corrección de calibración para cada punto C_i será la siguiente,

$$C_i = P_R + \delta(\text{der})_{\text{PR}} + \delta(\text{amb})_{\text{PR}} + \delta(\text{res})_{\text{PR}} - (P_I + \delta(\text{med})_E + \delta(\text{der})_E + \delta(\text{amb})_M + \delta(\text{res})_E + \delta(\text{his})_E) + \Delta_R \quad (11)$$

Considerando que todas las variables de entrada son independientes entre sí, es decir, las correlaciones son cero aplicaremos la expresión de la propagación de varianzas de la referencia [3] por lo que se tiene para la incertidumbre combinada

$$u(C_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (12)$$

donde u_i es cada una de las contribuciones a la incertidumbre que veremos a continuación.

6.1.1.- Incertidumbre asociada al patrón de presión de referencia, $u(P_R)$

Será la incertidumbre, U_{certP} , dada en su último certificado de calibración. Se tomará dividida por su factor de cobertura, normalmente 2.

En el caso de que en el certificado del patrón no figure el punto de calibración, o uno muy próximo, en el que se está calculando la incertidumbre se podrá tomar como U_{certP} y k el

valor máximo de U_{certP}/k de los indicados en el certificado de calibración del patrón, en valor absoluto o, si resultase más conveniente, trabajando con valores relativos.

6.1.2.- Incertidumbre por deriva del patrón de presión, $u(\delta(\text{der})_{\text{PR}})$.

Se tomará la deriva como distribución rectangular, es decir, si la deriva del patrón es der_p se tiene

$$u(\delta(\text{der})_{\text{PR}}) = \frac{\text{der}_p}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

siendo der_p la diferencia máxima, en valor absoluto, entre las correcciones obtenidas para el medidor en dos certificados de calibración consecutivos. Cuando sólo se tiene una calibración se pueden utilizar las especificaciones del fabricante del equipo.

6.1.3.- Incertidumbre asociada a influencia de las condiciones ambientales en el patrón de presión, $u(\delta(\text{amb})_{\text{PR}})$.

Las indicaciones de los sensores de presión suelen estar muy influenciadas por la temperatura. Normalmente la electrónica corrige estos efectos y los fabricantes suelen especificar el comportamiento de los equipos con la temperatura como un porcentaje, r_p , respecto de la indicación o del fondo de escala de la variación de la presión con la variación de la temperatura δt . En este caso el intervalo de posibles lecturas será $r_p \cdot P \cdot \delta t$, siendo P la presión leída o el fondo de escala en su caso y δt para el patrón de presión sería la máxima variación de temperatura, en valor absoluto, desde la calibración del patrón a cualquier momento de la calibración actual o, si fuese más desfavorable, entre cualquier momento de la calibración actual. Tomándolo como una distribución rectangular se tiene

$$u(\delta(\text{amb})_{\text{PR}}) = \frac{r_p \cdot P \cdot \delta t}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

6.1.4.- Incertidumbre debida a la resolución del patrón de presión, $u(\delta(\text{res})_{\text{PR}})$.

Es la incertidumbre debida a la resolución del patrón de presión tratada como una distribución rectangular. Esto es,

$$u(\delta(\text{res})_{\text{PR}}) = \frac{\text{res}_p}{2\sqrt{3}} \quad (15)$$

siendo res_p la resolución del patrón de presión.

6.1.5.- Incertidumbre asociada a la indicación del medidor en unidades de presión, $u(P_1)$.

Esta contribución vendrá dada por la desviación típica experimental de la media de las presiones medidas en cada punto en los diferentes ciclos. Esto es

$$u(P_1) = \frac{R_p}{L_E - l_E} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(I_i - \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \right)^2}{n-1}} \quad (16)$$

siendo I_i cada una de las medidas eléctricas para un mismo valor de presión nominal.

6.1.6.- Incertidumbre asociada a la calibración del multímetro, $u(\delta(\text{med})_E)$

Es la incertidumbre debida a la medida de la señal eléctrica. Se toma como distribución normal, esto es,

$$u(\delta(\text{med})_E) = \frac{R_P}{L_E - l_E} \cdot \frac{U_{\text{certE}}}{k} \quad (17)$$

siendo U_{certE} la incertidumbre de la indicación eléctrica para cierto factor de cobertura k , normalmente 2.

En el caso de que en el certificado del patrón no figure el punto de calibración, o uno muy próximo, en el que se está calculando la incertidumbre se podrá tomar como U_{certE} y k el valor máximo de U_{certE}/k de los indicados en el certificado de calibración del patrón, en valor absoluto o, si resultase más conveniente, trabajando con valores relativos.

6.1.7.- Incertidumbre asociada a influencia de las condiciones ambientales en el medidor a calibrar, $u(\delta(\text{amb})_M)$

Como en el caso de influencia de las condiciones ambientales en el patrón de presión si r_M es el porcentaje de variación con la temperatura, P presión y $\delta t'$ la máxima variación de la temperatura en valor absoluto durante la calibración actual se tiene

$$u(\delta(\text{amb})_M) = \frac{r_M \cdot P \cdot \delta t'}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

6.1.8.- Incertidumbre asociada a la deriva del multímetro, $u(\delta(\text{der})_E)$, en unidades de presión

Se toma esta contribución como distribución rectangular. Si la deriva del multímetro es $(\text{der})_E$ se tiene

$$u(\delta(\text{der})_E) = \frac{R_P}{L_E - l_E} \cdot \frac{\text{der}_E}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

siendo der_E la diferencia máxima, en valor absoluto, entre las correcciones obtenidas para el medidor en dos certificados de calibración consecutivos. Cuando sólo se tiene una calibración se pueden utilizar las especificaciones del fabricante del equipo.

6.1.9.- Incertidumbre debida a la resolución del instrumento a calibrar, $u(\delta(\text{res})_E)$, en unidades de presión

Es la incertidumbre debida a la resolución con que medimos la indicación eléctrica del transductor, que, como mínimo, será la del multímetro y tratada como una distribución rectangular. Esto es,

$$u(\delta(\text{res})_E) = \frac{R_P}{L_E - l_E} \cdot \frac{\text{res}_E}{2\sqrt{3}} \quad (20)$$

siendo res_E la resolución de la indicación eléctrica para ese medidor.

6.1.10.- Incertidumbre debida a la histéresis del medidor medida por el multímetro, $u(\delta(\text{his})_E)$, en unidades de presión

Este factor de incertidumbre se debe a que las indicaciones del instrumento a calibrar pueden variar dependiendo de si se obtiene decrementando o incrementado la presión. Vendrá dado por la diferencia entre los valores medios obtenidos incrementando o decrementando la presión tomada como distribución rectangular, es decir,

$$u(\delta(his)_E) = \frac{R_P}{L_E - l_E} \cdot \frac{|\bar{I}_{\text{baj}} - \bar{I}_{\text{sub}}|}{2\sqrt{3}} \quad (21)$$

siendo \bar{I}_{baj} la media de las indicaciones eléctricas medidas decrementado la presión y \bar{I}_{sub} la media de las indicaciones eléctricas medidas incrementando la presión para cada presión nominal generada.

6.1.11.- Incertidumbre asociada a la diferencia de alturas entre patrón e instrumento a calibrar,

$u(\Delta_R)$

Esta corrección viene dada por la ecuación (2). Su incertidumbre típica vendrá dada por:

$$u(\Delta_R) \cong \sqrt{(g \cdot h \cdot u(\rho_f))^2 + (g \cdot h \cdot u(\rho_a))^2 + ((\rho_f - \rho_a) \cdot g \cdot u(h))^2} \quad (22)$$

La contribución debida a la incertidumbre de la gravedad es despreciable para calibrar transductores y transmisores de presión con exactitud igual o peor al 0,1% en la mayor parte de los casos y, por lo tanto, tendremos como contribuciones

- a) Incertidumbre asociada a la densidad del fluido, que será $g \cdot h \cdot u(\rho_f)$.
En el caso de que el fluido sea líquido y se desconozca su incertidumbre se supondrá una incertidumbre que cubra todos los casos posibles, por ejemplo una incertidumbre relativa del 20 %, aunque su influencia para este tipo de medidores si la diferencia de alturas es nula es despreciable.

Si el fluido es gas la densidad tendrá una incertidumbre relativa del 5 %. Esto se obtiene de tomar la ecuación de los gases perfectos (3) al suponer una variación máxima de temperatura de 3 °C y de presión de 1000 Pa durante la calibración. Su influencia para este tipo de medidores si la diferencia de alturas es nula es despreciable en general.

Se tomará como distribución rectangular en ambos casos.

- b) Incertidumbre asociada a la densidad del aire, que será $g \cdot h \cdot u(\rho_a)$.

En el aire como es una mezcla gases que no reaccionan entre sí estaremos en el mismo caso que antes y la densidad tendrá una incertidumbre relativa del 5 %. Esto se obtiene de tomar la ecuación de los gases perfectos (3) al suponer una variación máxima de temperatura de 3 °C y de presión de 1000 Pa durante la calibración. Su influencia para este tipo de medidores si la diferencia de alturas es nula es despreciable en general.

Se tomará como distribución rectangular.

- c) Incertidumbre asociada a la medida de la diferencia de alturas, que será $(\rho_f - \rho_a) \cdot g \cdot u(h)$.

La incertidumbre en la diferencia de alturas dependerá de la resolución de la regla, d , que se tomará como distribución rectangular y de la incertidumbre indicada en el certificado de calibración del nivel, $u(nivel)$, que tomaremos con un factor de cobertura igual a 1. Suponiendo que el nivel estará a 2 metros de la regla como máximo la incertidumbre en la diferencia de alturas expresada en metros será

$$u(h) = \sqrt{4 \cdot u(nivel)^2 + \frac{d^2}{3}} \quad (23)$$

donde d está en metros y $u(nivel)$ en radianes.

A continuación vemos un cuadro resumen de todas las componentes evaluadas en la incertidumbre

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$ ($k = 1$)	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre u_i
Presión de referencia	P_R	$u(P_R)$	Normal	1	$\frac{U_{certP}}{k}$
Deriva del patrón	$\delta(der)_{PR}$	$u(\delta(der)_{PR})$	Rectangular	1	$\frac{der_P}{\sqrt{3}}$
Condiciones ambientales del patrón	$\delta(amb)_{PR}$	$u(\delta(amb)_{PR})$	Rectangular	1	$\frac{r_P P \delta t}{2\sqrt{3}}$
Resolución del patrón	$\delta(res)_{PR}$	$u(\delta(res)_{PR})$	Rectangular	1	$\frac{res_P}{2\sqrt{3}}$
Indicación del medidor	P_I	$u(P_I)$	Normal	-1	$-\frac{R_P}{L_E - I_E} s(I_i)$
Calibración del múltímetro	$\delta(med)_E$	$u(\delta(med)_E)$	Normal	1	$-\frac{R_P}{L_E - I_E} \frac{U_{certP}}{k}$
Condiciones ambientales del medidor	$\delta(amb)_M$	$u(\delta(amb)_M)$	Rectangular	-1	$-\frac{r_P P \delta t'}{2\sqrt{3}}$
Deriva del múltímetro	$\delta(der)_E$	$u(\delta(der)_E)$	Rectangular	-1	$-\frac{R_P}{L_E - I_E} \frac{der_E}{\sqrt{3}}$
Resolución del medidor	$\delta(res)_E$	$u(\delta(res)_E)$	Rectangular	-1	$-\frac{R_P}{L_E - I_E} \frac{res_E}{2\sqrt{3}}$
Histéresis del medidor	$\delta(his)_E$	$u(\delta(his)_E)$	Rectangular	-1	$-\frac{R_P}{L_E - I_E} \frac{ \bar{I}_{baj} - \bar{I}_{sub} }{2\sqrt{3}}$
Densidad del fluido	ρ_f	$u(\rho_f)$	Rectangular	$g \cdot h$	$g \cdot h \cdot u(\rho_f)$
Densidad del aire	ρ_a	$u(\rho_a)$	Rectangular	$-g \cdot h$	$-g \cdot h \cdot u(\rho_a)$
Medida de la diferencia de las alturas	h	$u(h)$	-	$(\rho_f - \rho_a) \cdot g$	$(\rho_f - \rho_a) \cdot g \cdot h \cdot u(h)$
Corrección	C	-	-	-	$\sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$

Una vez obtenida la incertidumbre combinada se calculan los grados de libertad efectivos, ν_{eff} , a partir de la incertidumbre combinada y sus contribuciones mediante la aplicación de la fórmula de Welch-Satterthwaite, según la referencia [3],

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(C_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (24)$$

donde ν_i es infinito si la distribución es rectangular, $N - 1$ si la distribución es normal siendo N el número de medidas en cada punto y en condiciones de repetibilidad o el valor de ν_i conocido (por ejemplo el indicado en el certificado de calibración en su caso).

Según la tabla siguiente a partir del número de grados de libertad efectivos obtenido se obtiene el factor de cobertura k . Esta tabla se basa en una distribución t de Student para una fracción del 95,45%.

ν_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,09	2,05	2,00

Se obtendrá la incertidumbre expandida para un intervalo de confianza del 95,45% multiplicando a la incertidumbre combinada por el factor de cobertura, esto es:

$$U = k \cdot u(C_i) \quad (25)$$

Según la referencia [3] en su punto F.2.4.5 en el caso de que no se puedan realizar correcciones de calibración se tomará como incertidumbre el valor absoluto de máxima corrección de la calibración sumada aritméticamente a la máxima incertidumbre, esto es,

$$U = U_{\text{max}} + |corr_{\text{max}}| \quad (26)$$

Así si no se corrige el patrón o el multímetro habrá que sumar sus máximas correcciones, en unidades de presión, a la incertidumbre total expandida. También habría que sumar a la incertidumbre total expandida la corrección por nivel de referencia si no se hubiera corregido antes.

6.2. Interpretación de resultados

Los resultados se presentarán en forma de tabla. Para cada punto de presión figurarán:

- La presión del patrón de referencia.
- La indicación eléctrica del instrumento a calibrar.
- La indicación en unidades de presión del instrumento a calibrar, obtenida mediante la ecuación (1).
- La corrección, obtenida como diferencia entre la presión de referencia y la indicación en unidades de presión del instrumento a calibrar.

e) La incertidumbre expandida para un intervalo de confianza del 95,45% y el factor de cobertura k utilizado. También se puede suponer una incertidumbre máxima para todos los puntos de calibración.

También estará presente la ecuación (1) particularizada para cada caso, que es la utilizada para convertir las medidas eléctricas en medidas de presión así como las condiciones ambientales durante la calibración y el procedimiento utilizado.

Después de la realización del primer ciclo se hará un tratamiento previo de los datos obtenidos. El ajuste del equipo a calibrar será necesario si la suma del valor absoluto de la diferencia de los valores entre el patrón de presión y el equipo a calibrar con su incertidumbre expandida asociada superan los valores establecidos como límites de tolerancia para los resultados de la calibración y que podrán ser las especificaciones del fabricante u otros.

El periodo de calibración recomendado será de un año, aunque el usuario será el responsable final de asignarlo.

7. REFERENCIAS

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

- a) Manual del equipo a calibrar.
- b) Manuales de los patrones, en su caso así como sus certificados de calibración.

7.2. Otras referencias para consulta

- [1] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). CEM. 3ª edición en español. 2012.
- [2] The Pressure Balance: Theory and Practice. R.S.Dadson, S.L.Lewis, G.N.Peggs. National Physics Laboratory. Ed 1982.
- [3] JCGM 100: 2008. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. EDICIÓN DIGITAL 1 en español (traducción 1ª Ed. Sept. 2008).
- [4] EA-4/02 M 2013. Evaluación de la incertidumbre de medida en las calibraciones.

8. ANEXOS

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se quiere calibrar un transmisor de presión con salida en mA en el rango de 0 bar a 40 bar (1 bar = 10^5 Pa). Para ello se necesitará un patrón de presión y un multímetro. Las condiciones en las que se realiza la calibración son las siguientes:

Temperatura:	$(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$
Humedad:	< 60 %
Fluido de trabajo:	Nitrógeno

Diferencia de alturas: (0 ± 5) mm

En la diferencia de alturas ya se indica las incertidumbres por la regla y por el nivel combinadas según ya se explicó en 6.1.11 apartado c.

Los datos de los equipos que se utilizarán son los siguientes:

a) Datos del transmisor de presión.

Registro:	0000
Marca:	YYYYY
Modelo:	Piezoeléctrico a 4 hilos
Nº serie:	11111111
Rango:	(0 a 40) bar
Exactitud:	0,1 % del fondo de escala
Señal de salida:	(4 a 20) mA
Alimentación:	(10 a 50) Vcc
Temperatura de trabajo:	20 °C
Influencia de la temperatura:	0,004 % de la lectura por grado Celsius

b) Datos del patrón de presión.

El patrón de presión de referencia es un manómetro digital con las siguientes características:

Registro:	Patrón-01
Marca:	AAAA
Modelo:	Piezoeléctrico
Nº serie:	22222
Rango:	(0 a 70) bar
Exactitud:	0,025 % del fondo de escala
Temperatura de trabajo:	20 °C
Influencia de la temperatura:	0,004 % de la lectura por grado Celsius

En el último certificado de calibración constan los siguientes datos:

Presión de referencia bar	Indicación instrumento bar	Corrección bar	U (k = 2) bar
0,000 0	0,000 0	0,000 0	0,001 4
9,999 0	1,002 4	-0,003 4	0,001 4
19,991 4	19,996 6	-0,005 2	0,001 8
29,983 8	29,990 7	-0,006 9	0,002 3
39,976 2	39,982 0	-0,005 8	0,007 6
49,968 5	49,976 7	-0,008 2	0,005 6
59,960 9	59,971 6	-0,010 7	0,003 4
69,953 3	69,964 2	-0,010 9	0,003 8

La deriva máxima entre las dos últimas calibraciones fue de 0,0035 bar.

c) Datos del multímetro.

El multímetro tomado como patrón eléctrico tiene las siguientes características:

Registro:	Patrón-02
Marca:	BBBB
Modelo:	4444A
Nº serie:	33333
Sensibilidad:	0,001 mA
Resolución:	4 dígitos y 1/2
Rango:	(0 a 20) mA
Exactitud:	0,025 % del fondo de escala
Influencia de la temperatura:	No hay influencia entre 10 °C y 40 °C.

En el último certificado de calibración constan los siguientes datos:

Intensidad de referencia mA	Indicación Instrumento mA	Corrección mA	U (k = 2) mA
-20,000 0	-19,998	0,000 0	0,001 0
0,000 0	0,000	0,000 0	0,001 0
2,000 0	1,999	0,001 0	0,001 0
5,000 0	5,000	0,000 0	0,001 0
10,000 0	9,999	0,001 0	0,001 0
20,000 0	19,998	0,002 0	0,001 0

La deriva máxima entre las dos últimas calibraciones fue de 0,001 mA.

La hoja de registro de calibración para este transmisor con sus correspondientes datos obtenidos es la siguiente,

Hoja de datos	HD_MExxx
Registro	nnnn
Procedimiento	ME-xxx

Equipo	
Equipo	Transmisor de presión
Marca	YYYYYY
Modelo	Piezoeléctrico (4 hilos)
Nº serie	11111111
Rango de presión	(0 a 40) bar
Señal eléctrica	(4 a 20) mA

Patrones	
Presión	Patrón-01
Eléctrico	Patrón-02

Condiciones ambientales	
Temperatura	(20 ± 2) °C
Humedad	< 60 %
Fluido de trabajo	Nitrógeno
Diferencia de alturas	(0 ± 5) mm

Fecha de recepción	19/06/2001
Fecha de calibración	26/06/2001
Técnico	Jgp
Revisado	Nmm

Indicación patrón	Indicación instrumento					
	Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
	subida mA	bajada mA	subida mA	bajada mA	subida mA	bajada mA
0,000 bar	3,994	3,994	3,993	3,992	3,994	3,995
2,000	4,801	4,800	4,802	4,800	4,801	4,800
10,000	8,003	8,001	8,004	8,002	8,004	8,001
20,000	12,005	12,003	12,004	12,003	12,003	12,001
30,000	15,999	15,997	15,998	15,997	15,999	15,996
40,000	19,998	19,996	19,999	19,997	20,000	19,998

Realizaremos los cálculos teniendo en cuenta los tres ciclos, es decir, supondremos que ya hemos hecho los cálculos para un ciclo y no es necesario el ajuste del equipo. Los cálculos para un ciclo se realizarían de forma equivalente.

Dado que la diferencia de alturas entre el patrón y el equipo a calibrar es nula no hay corrección por diferencia de alturas.

Por otro lado no se harán correcciones múltímetro y se sumarán su máxima corrección según su certificado de calibración en unidades de presión a la incertidumbre total expandida.

Para el múltímetro es fácil estimar su incertidumbre pues todos los puntos de calibración de su certificado tienen la misma.

En el punto de 2 bar no se conoce la corrección del patrón de presión directamente según el certificado de calibración por lo que haremos una interpolación lineal. Lo que se hace es hacer una interpolación lineal de las correcciones, es decir, dado que conocemos las correcciones en 0 bar (punto $i - 1$) y 10 bar (punto $i + 1$) la corrección en el punto i será

$$corr_{2bar} = corr_{0bar} + \frac{corr_{10bar} - corr_{0bar}}{ind_{10bar} - ind_{0bar}} \cdot (ind_{2bar} - ind_{0bar}) \quad (27)$$

El resto de los puntos para el patrón de presión están muy próximos a los puntos del certificado de calibración y se considera que las correcciones son las mismas como ya se explicó.

Las incertidumbres asociadas para las presiones del patrón de presión serán las de su certificado de calibración menos para el punto de 2 bar donde se tomará la incertidumbre relativa máxima del certificado, que corresponde al punto de 40 bar.

Hay que tener en cuenta que la contribución a la incertidumbre asociada a la diferencia de alturas es del orden de 100 veces menor que las otras componentes de la incertidumbre y, por lo tanto, despreciable ya que para el nitrógeno, que tiene una masa molecular de 28 g/mol a 20°C y 40 bar tiene una densidad aproximada de 46 kg/m³ lo que da una incertidumbre aproximada de $1,27 \cdot 10^{-6}$ bar. La contribución a esta incertidumbre por la incertidumbre de la densidad del aire y por la densidad del fluido es todavía menor. Se toma como diferencia de alturas la resolución de la regla aunque esta diferencia es nula.

A continuación se hace la estimación de la incertidumbre para el punto de más presión. Para los otros se realizará de forma equivalente

Magnitud X_i	Estimación x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$ ($k=1$)	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre u_i
Presión de referencia	39,9942 bar	$3,80 \times 10^{-3}$ bar	Normal	1	$3,80 \times 10^{-3}$ bar
Deriva del patrón	0	$2,02 \times 10^{-3}$ bar	Rectangular	1	$2,02 \times 10^{-3}$ bar
Condiciones ambientales del patrón	0	$2,77 \times 10^{-3}$ bar	Rectangular	1	$2,77 \times 10^{-3}$ bar
Resolución del patrón	0	$2,89 \times 10^{-5}$ bar	Rectangular	1	$2,89 \times 10^{-5}$ bar
Indicación del medidor	39,9945 bar	$1,25 \times 10^{-3}$ bar	Normal	-1	$-1,44 \times 10^{-3}$ bar
Medida del multímetro	0	$5,77 \times 10^{-3}$ bar	Normal	-1	$-1,25 \times 10^{-3}$ bar
Condiciones ambientales del medidor	0	$2,77 \times 10^{-3}$ bar	Rectangular	-1	$-2,77 \times 10^{-3}$ bar
Deriva del multímetro	0	$1,44 \times 10^{-3}$ bar	Rectangular	-1	$-1,44 \times 10^{-3}$ bar
Histéresis del medidor	0	$2,89 \times 10^{-3}$ bar	Rectangular	-1	$-2,89 \times 10^{-3}$ bar
Resolución del medidor	0	$7,22 \times 10^{-4}$ bar	Rectangular	-1	$-7,22 \cdot \times 10^{-4}$ bar
Densidad del fluido	46 kg/m ³	1,33 kg/m ³	Rectangular	$4,9 \cdot 10^3$ N·m/kg	$4,63 \cdot \times 10^{-9}$ bar
Densidad del aire	1,2 kg/m ³	$3,46 \times 10^{-2}$ kg/m ³	Rectangular	$-4,9 \times 10^{-3}$ N·m/kg	$1,29 \times 10^{-10}$ bar
Medida de la diferencia de alturas	5 mm	$2,88 \times 10^{-3}$ m	Rectangular	439,04 N·m ³ /kg	$1,27 \times 10^{-6}$ bar
Corrección	-0,000 8 bar				$6,96 \times 10^{-3}$ bar

Con la fórmula de Welch-Satterthwaite de la forma anteriormente vista se obtienen un número de grados efectivos de libertad que asegura la validez de un factor de cobertura $k = 2$ para un nivel de confianza del 95,45%. Por lo tanto se obtiene una incertidumbre expandida

$$U = 0,0140 \text{ bar}$$

Habría que sumar la corrección no realizada del multímetro, hecha su transformación a unidades de presión, esto es 0,002 mA que en unidades de presión son 0,005 bar.

Veamos un cuadro resumen de los resultados obtenidos.

Presión de referencia	Indicación del instrumento		Corrección	<i>U</i> (<i>k</i> = 2)
	mA	bar		
0,0000	3,994	-0,0154	0,0154	0,0165
1,9993	4,801	2,0017	-0,0023	0,0165
9,9966	8,003	10,0063	-0,0096	0,0167
19,9948	12,003	20,0079	-0,0131	0,0168
29,9931	15,998	29,9942	-0,0011	0,0168
39,9942	19,998	39,9950	-0,0008	0,0189

El equipo cumple las tolerancias de la calibración ya que la suma de la incertidumbre con el valor absoluto de la corrección es siempre menor que 0,04 bar, es decir, 0,1% del fondo de escala.

Metrología

NIPO: 113-20-002-9