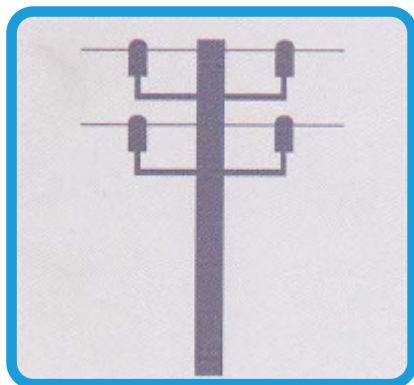
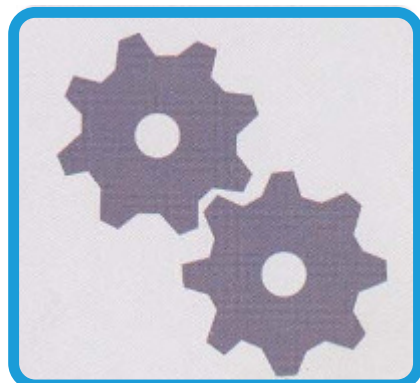
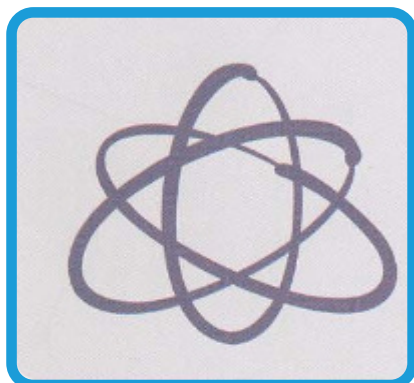
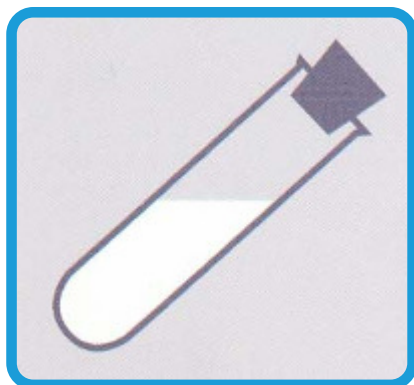


Metrología



PROCEDIMIENTO ME-003 PARA LA
CALIBRACIÓN DE MANÓMETROS,
VACUÓMETROS Y MANOVACUÓMETROS

m 19

PROCEDIMIENTO ME003

CALIBRACIÓN DE MANÓMETROS, VACUÓMETROS Y MANOVACUÓMETROS

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
5. DESCRIPCIÓN	4
5.1. Equipos materiales	4
5.2. Operaciones previas	5
5.3. Proceso de calibración	8
5.4. Toma y tratamiento de datos	9
6. RESULTADOS	10
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	10
6.2. Interpretación de resultados.....	14
7. REFERENCIAS	15
8. ANEXOS.....	16

1. OBJETO

Este procedimiento tiene por objeto definir la sistemática utilizada para la calibración de manómetros, vacuómetros y manovacúómetros de lectura directa de presiones relativas con relación a la presión atmosférica, cuya clase sea igual o peor a 0,05.

2. ALCANCE

Este procedimiento sirve para la calibración de manómetros, vacuómetros y manovacúómetros, de funcionamiento en medio líquido o en medio gas, mediante el método de comparación con otro manómetro utilizado como patrón.

Este procedimiento aplica a manómetros cuya exactitud no supere el 0.05% de su intervalo de medida.

El rango de aplicación de estos instrumentos, normalmente, va desde -0,1 MPa hasta 70 MPa cuando el fluido utilizado es un gas, y hasta 160 MPa cuando el fluido manométrico es un líquido, aunque se pueden encontrar manómetros fuera de estos rangos, de ahí su amplia aceptación a nivel industrial.

3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia [1] que se indican a continuación, además de otras específicas para el presente procedimiento.

Presión absoluta [2]:

Presión medida cuando la referencia es el vacío.

Presión relativa [2]:

Presión medida cuando la referencia es la presión atmosférica.

Presión diferencial [2]:

Se aplica a todos aquellos casos donde la presión de referencia llamada “presión estática” o “presión de línea”, es diferente del vacío o de la presión atmosférica.

4. GENERALIDADES

Los manómetros, vacuómetros o manovacúómetros constan de un elemento sensible a la presión, un dispositivo de transmisión de la indicación y un indicador del valor de la presión.

De los instrumentos de medida de presión por esfuerzo de un medio elástico el más utilizado es el tipo bourdon. El manómetro de ese tipo data del año 1849 cuando el técnico francés del mismo nombre lo diseñó. Es el elemento más utilizado en la industria por su simplicidad de uso, pequeño mantenimiento, gran rango de aplicación y bajo costo.

Consiste básicamente en un tubo de sección elíptica, curvada en forma de arco y tapado por un extremo, el otro extremo es fijo y por él se aplica la presión a medir. Al aplicar la presión al tubo éste tiende a

enderezarse ligeramente, y el movimiento resultante del extremo cerrado del tubo se transmite a una aguja indicadora mediante un sistema mecánico compuesto por un sector dentado y un piñón. La aguja indicadora se mueve sobre una escala graduada en unidades de presión.

Existen otro tipo de elementos sensibles a la presión: mecánicos como la membrana y la cápsula o de tipo electrónico como piezoeléctrico, capacitivo, resistivo, etc.

Estos manómetros se utilizan en general en cadenas de medida, también como patrones secundarios o patrones de trabajo dada su robustez y manejabilidad; en algunos laboratorios, a nivel industrial, son utilizados como Patrones de Referencia.

Los errores típicos de los manómetros van desde el 0.05 % de su rango de medida para los de máxima precisión hasta el 4%. Se recomienda para su calibración utilizar otro manómetro como patrón cuya incertidumbre sea al menos 1/4 de la exactitud del manómetro a calibrar.

La calibración consistirá en la comparación directa entre el patrón a utilizar y el manómetro a calibrar, a un nivel de referencia previamente definido y que se elegirá de tal manera, que las correcciones a realizar sean nulas o, mínimas.

Unidades y simbología utilizadas en este procedimiento

La unidad de Presión en el SI es el pascal, unidad derivada cuyo símbolo es Pa. Otras unidades utilizadas son: el bar = 10^5 Pa y el mmHg = 133,322 Pa. También aparece a lo largo del procedimiento el símbolo: % *hr*, que se refiere al porcentaje de humedad relativa.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Como tales se entiende no solamente los medios para generar y medir, sino todos los equipos accesorios: tuberías, llaves, racores etc., y serán los siguientes:

5.1.1. Patrón o patrones de Trabajo

Como tal se utilizará un manómetro de precisión que puede ser analógico o digital y con una incertidumbre deseable de medida del patrón al menos cuatro veces mejor que la incertidumbre máxima que se espera del manómetro a calibrar. (La clase siempre es indicativa aunque no siempre refleje la realidad del manómetro a calibrar). Deberá tener vigente su certificado de calibración, trazable a una Entidad Acreditada o a un Laboratorio Nacional y cubrir todo el rango del manómetro a calibrar.

El manómetro utilizado como patrón podrá ser del tipo “Controlador de presión” que son aquellos que tienen integrado un sistema de regulación y control de la presión.

5.1.2. Generador y controlador de presión

Es necesario disponer de un medio para generar las presiones a medir, en ocasiones, cuando el manómetro a calibrar no es muy preciso, podría utilizarse simplemente un buen manoreductor; pero lo mejor es disponer de un generador de presión con regulador grueso y fino capaz de estabilizar el sistema perfectamente y que sea capaz de regular con valores mejores que la resolución del manómetro a calibrar.

5.1.3. Separador de fluidos

En algunos casos los fluidos utilizados por el patrón y el instrumento a calibrar son incompatibles, por lo que se hace necesario disponer de un medio para separar ambos y que no introduzca mucha incertidumbre al resultado final de la medida. Básicamente es un sensor de presión diferencial, algunos con un detector de nulo para hacerlos más precisos.

5.1.4. Medidores de condiciones ambientales

Para este tipo de instrumentos en general las correcciones a aplicar por variación en las condiciones ambientales suelen ser muy pequeñas y tener poca influencia en el valor final de la incertidumbre asignada, pero en condiciones extremas de uso pueden ser importantes, aparte de las correcciones que hubiera de realizar en los patrones por este motivo que puede ser significativo.

Se recomienda utilizar para la medida de condiciones ambientales instrumentos con exactitud de al menos 1 °C para la medida de la temperatura y ± 5 % hr para la medida de la humedad relativa.

5.1.5. Racores, llaves de aislamiento y tuberías

Es importante disponer de tuberías adecuadas al fluido y la presión utilizadas, así como de los racores, llaves y purgas que cumplan con las normas vigentes de seguridad.

Para medida de presiones neumáticas bajas es recomendable el uso de tuberías de nylon flexibles; para presiones hidráulicas de tuberías de acero inoxidable.

5.1.6. Detectores de fugas

Como elemento para comprobar la estanqueidad del circuito de medida en sistemas neumáticos será suficiente con una solución jabonosa que se verterá ligeramente en las uniones y racores sospechosos de fuga.

En sistemas hidráulicos no son necesarios, pues con una simple inspección visual pueden encontrarse las fugas.

5.1.7. Otros

También deberá disponerse de una regla metálica o nivel de alturas, y conocer su incertidumbre, para medir la diferencia de alturas entre los niveles de referencia.

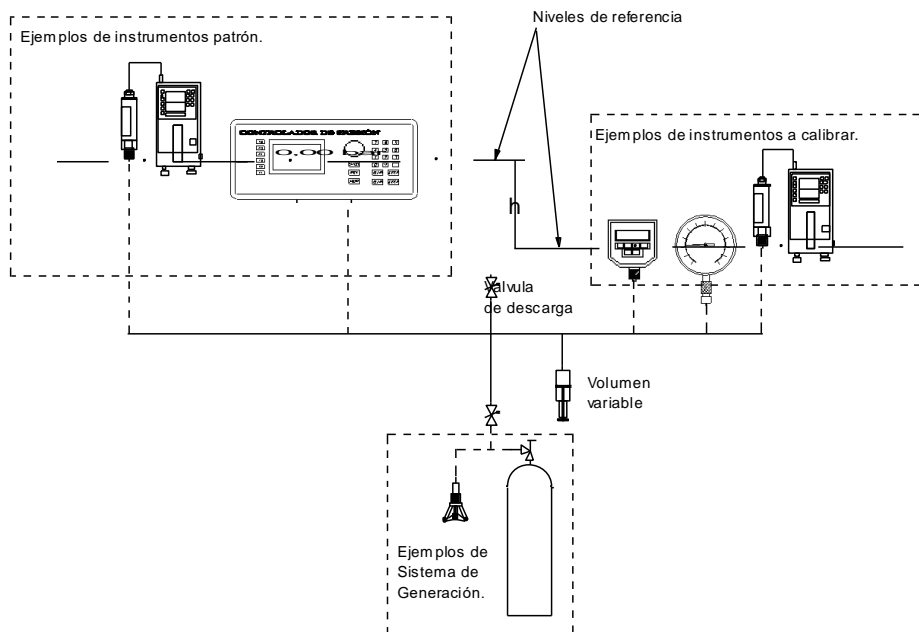
5.2. Operaciones previas

Antes de realizar la calibración se realizarán una serie de comprobaciones preliminares procediéndose a una inspección visual general.

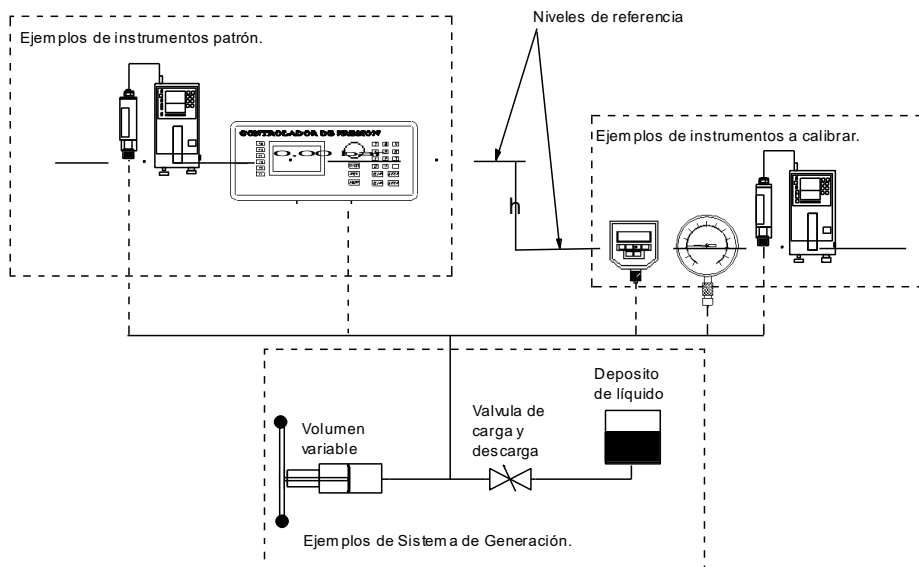
- a) Se comprobará que el manómetro esté identificado con su marca, modelo y número de serie correspondiente, o con un código interno del propietario. En este tipo de manómetros es bastante corriente encontrarse instrumentos sin modelo, marca o número de serie, en este caso se le asignará un código de identificación que se grabará o fijará de forma adecuada sobre el manómetro.

- b) Se comprobará el estado de la carátula y aguja indicadora, para manómetros analógicos y del dispositivo indicador para manómetros digitales. Además se comprobará la respuesta a las variaciones de presión para ambos.
- c) Los manómetros que vayan a ser utilizados con oxígeno, acetileno o cualquier fluido tóxico o inflamable, deberá estar igualmente identificado siguiendo la normativa vigente. Cualquier duda sobre el fluido utilizado (líquido o gas), se consultará con el peticionario de la calibración. Cualquier anomalía detectada se hará saber al cliente antes de realizar ninguna medida.
- d) Las condiciones ambientales, en cuanto a temperatura y humedad estarán dentro de los márgenes especificados por los fabricantes de manómetro a calibrar y del manómetro utilizado como patrón.
- e) Más importante que estar a una temperatura determinada es su estabilidad; deberán medirse las oscilaciones térmicas durante la calibración para realizar las correcciones si fuesen necesarias (en función de la incertidumbre esperada), y calcular la incertidumbre correspondiente a este factor de influencia.
- f) Se comprobarán fugas en los sistemas hidráulicos o neumáticos, y se desperezará el manómetro subiendo y bajando presión dos o tres veces hasta fondo de escala. Una idea de la existencia de fugas nos las dará una indicación del manómetro inestable que van disminuyendo de forma continua. Esta comprobación cobra especial relevancia cuando el patrón utilizado es un controlador de presión y la calibración se realiza con el patrón controlando el valor de presión en el momento de registrar las indicaciones de los instrumentos. Ya que una fuga en el sistema de calibración ocasionaría que la presión a la que están sometidos patrón e instrumento a calibrar no fueran iguales.
- g) Manómetro y patrón se colocarán al mismo nivel de referencia, siempre que sea posible, para minimizar las variaciones de presión por diferencia de alturas. En caso contrario se harán correcciones.
- h) El patrón se programará a ser posible en las mismas unidades que el manómetro a calibrar.
- i) Una vez que se ha comprobado el estado de todos los equipos y medios auxiliares y que estos han alcanzado la estabilidad térmica y eléctrica, se procederá a la calibración del manómetro.
- j) Se seguirá uno de los siguientes esquemas. Los instrumentos que aparecen son solo a título de ejemplo.

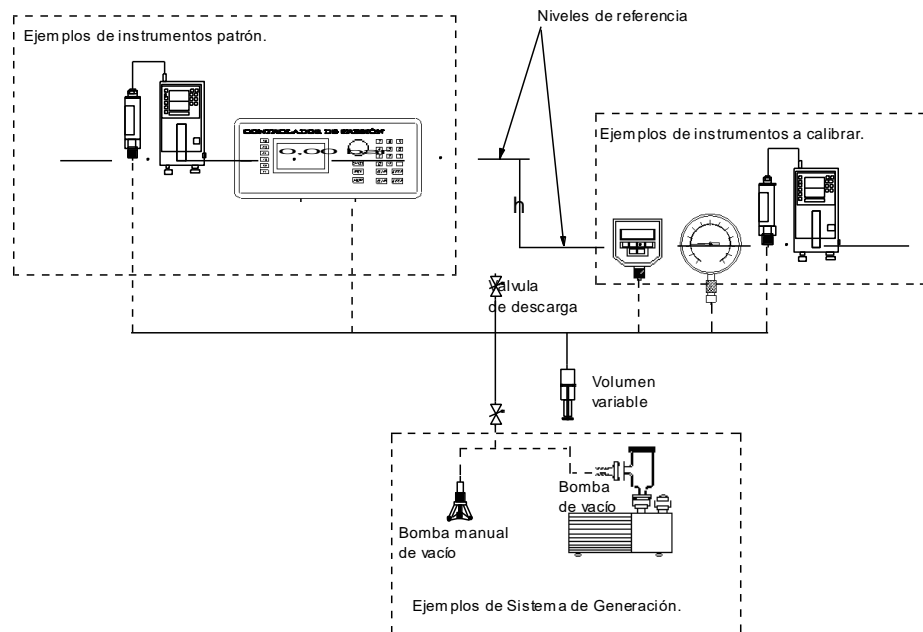
a) Presión relativa positiva o presión manométrica en medio gas



b) Presión relativa positiva o presión manométrica en medio líquido.



c) Presión relativa negativa o presión vacuométrica en medio gas.



5.3. Proceso de calibración

5.3.1. Secuencias posibles de calibración

El proceso de calibración seguirá las secuencias descritas a continuación:

1) Comprobación inicial en tres puntos $1/3$, $2/3$ y $3/3$ del manómetro.

Previamente a la calibración deberán chequearse tres valores en la parte baja, media y alta del manómetro. Estos datos iniciales nos indicarán como se encuentra el instrumento desde su última calibración (si es que disponemos de ella) y si es necesario su ajuste. De esta forma tendremos información del estado del instrumento.

2) Ajustes si fuesen necesarios.

Esta secuencia deberá realizarse, siempre previa consulta al usuario, cuando los valores indicados por el instrumento sean mayores a los permitidos según sea su tolerancia o clase, o cuando los errores encontrados sean superiores a unos límites establecido.

3) Calibración.

Es la calibración propiamente dicha se debe aplicar siempre después de la primera secuencia o de la segunda, si el cliente ha autorizado el ajuste.

5.3.2. Definición de los puntos de medida.

La calibración cubrirá todo el rango del instrumento, se realizarán al menos 5 puntos que estarán regularmente espaciados, desde el 10 % al 100% de su rango, además del cero si no tiene tope. Deberá tenerse en cuenta la posibilidad de que el titular del instrumento

elija los puntos de calibración, en este caso el procedimiento se realizará de la misma forma pero en los valores definidos por el usuario.

5.3.3. Calibración

Una vez despresado el manómetro y definidos los puntos de calibración, se procederá a calibrar el instrumento.

Con el generador o bomba manual se irá generando presión hasta alcanzar un valor cercano al primer punto definido de presión, a continuación con el volumen variable se ajustará la presión hasta que la lectura del patrón o instrumento sea la deseada. Se recomienda fijar la indicación de la aguja del manómetro a los trazos de la escala cuando el manómetro a calibrar sea analógico, y por el contrario, fijar la indicación del patrón cuando el manómetro a calibrar sea digital.

En el caso de que el manómetro a calibrar sea analógico, la lectura del mismo se realizará después de haberle hecho vibrar ligeramente para evitar errores producidos por fricciones mecánicas.

La medida será válida siempre que el sistema sea estable y no se observen saltos o variaciones en las indicaciones del patrón e instrumento.

Se repetirá este paso con los siguientes puntos de calibración, siempre aumentando la presión hasta llegar al valor máximo definido.

El mismo proceso se realizará, pero ahora en sentido de presiones decrecientes hasta llegar al cero del manómetro.

Se realizará la lectura del cero, siempre que sea posible, y se volverá a iniciar el ciclo.

Se recomienda realizar dos series de medidas para manómetros de clase de precisión 0,25 o peor y tres series de medida para manómetros de clase de precisión mejor de 0,25. Las series se realizarán siguiendo los ciclos definidos anteriormente: creciente y decreciente, con lo cual obtendremos cuatro valores por punto de calibración para el primer caso y seis para el segundo.

Una vez finalizada la calibración y antes de quitar el montaje conviene analizar los datos obtenidos por si fuese necesario repetir algún punto de valor dudoso.

5.4. **Toma y tratamiento de datos**

Todas las anotaciones y observaciones que se realicen durante la calibración deberán quedar reflejadas en la correspondiente hoja de calibración o de toma de datos.

Las anotaciones y datos no deberán realizarse con lapicero.

No se realizarán tachaduras, si se quiere eliminar una anotación debido a una confusión en la toma de datos, se cruzará con dos rayas y al lado se anotará el valor corregido.

Los datos mínimos que deben figurar en la correspondiente hoja serán los siguientes:

- a) Identificación inequívoca de la calibración.
- b) Identificación del patrón y del instrumento.

- c) Lecturas del patrón e instrumento indicando el sentido en que se ha generado la presión.
- d) División de escala y resolución del manómetro.
- e) Anomalías detectadas antes o durante la calibración como pueden ser atascos de la aguja indicadora, saltos bruscos, etc.
- f) Fluido utilizado durante la calibración.
- g) Condiciones ambientales durante la calibración.
- h) Nivel de referencia, cuando sea significativo sobre los resultados finales.
- i) Posición del instrumento durante la calibración, cuando sea significativo sobre los resultados finales.
- j) Fechas de realización.
- k) Identificación del personal que realizó la calibración.
- l) Correcciones realizadas, como puede ser la de calibración del patrón o la corrección por diferencia de alturas entre niveles de referencia.

Deberán rechazarse de la calibración de los manómetros todas aquellas medidas que no cumplan las exigencias siguientes:

- i) Cualquier duda sobre la bondad de la medida por parte del operador.
- ii) Todas aquellas medidas que se hagan fuera de las condiciones ambientales establecidas por el Laboratorio.
- iii) Aquellas en que no se consiga una buena estabilidad.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

La asignación y expresión de incertidumbres se realizará siguiendo los criterios de la guía [3]. En primer lugar se determinará la expresión de la magnitud de salida en función de las distintas magnitudes de entrada, modelando una ecuación para las correcciones de calibración. Realizaremos el cálculo en un punto genérico i , para el resto de los puntos se realiza de la misma forma.

La ecuación modelo para la corrección de calibración será la siguiente:

$$C_i = P_{Ri} - P_{xi} + \sum_j \delta_j(\text{Pat}) + \sum_k \delta_k(\text{Ins}) + \Delta_{NR} \quad (1)$$

donde:

- a) C_i es la corrección final de calibración.
- b) P_{Ri} es el valor de la lectura del patrón en el punto i .
- c) P_{xi} es el valor de la lectura del instrumento en el punto i .
- d) $\sum_j \delta_j(\text{Pat})$ es la suma de las correcciones debidas al patrón, nulas o no, que van a tener contribución en la incertidumbre.

e) $\sum_k \delta_k(\text{Ins})$ es la suma de las correcciones debidas al instrumento, nulas o no, que van a tener contribución en la incertidumbre.

f) Δ_{NR} es la corrección por diferencia de alturas entre los niveles de referencia.

- El término d) comprende las siguientes correcciones:

d-1) $\delta(\text{Pat})_{\text{cal}}$, corrección de calibración.

d-2) $\delta(\text{Pat})_{\text{der}}$, corrección debida a deriva.

d-3) $\delta(\text{Pat})_{\text{tem}}$, corrección debida a temperatura.

- El término e) comprende las siguientes correcciones:

e-1) $\delta(\text{Inst})_{\text{res}}$, corrección debida a resolución.

e-2) $\delta(\text{Ins})_{\text{tem}}$, corrección debida a temperatura.

e-3) $\delta(\text{Ins})_{\text{hist}}$, corrección debida a histéresis.

- El término f) viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta_{NR} = (\rho_f - \rho_a) g_1 h \quad (2)$$

donde ρ_f es la densidad del fluido manométrico y ρ_a es la densidad del aire.

Componentes de la incertidumbre (evaluados de acuerdo a la referencia [3])

a.1.) $\delta(\text{Pat})_{\text{cal}}$: Debida al patrón (certificado de calibración). Tipo B

La incertidumbre de calibración del patrón vendrá reflejada en su certificado de calibración. En los certificados se indican las incertidumbres expandidas, por lo que será necesario dividir el valor indicado por el k_{cert} correspondiente. Normalmente no coincidirá el punto de calibración con el valor del certificado, en este caso, se incluirá como componente de incertidumbre la mayor incertidumbre de calibración del patrón.

a.2.) $\delta(\text{Pat})_{\text{der}}$: Debida a deriva del patrón

El valor de la deriva suele obtenerse a partir del estudio de los certificados de calibración a partir de la máxima variación obtenida de los resultados entre dos calibraciones. Si este dato no se puede obtener (por ejemplo, sólo se tiene una calibración) se determinará partir de las especificaciones de fabricante. Es una incertidumbre tipo B, consideraremos una distribución rectangular, luego dicho valor se dividirá entre $(3)^{0.5}$.

a.3.) $\delta(\text{Pat})_{\text{tem}}$: Debida a temperatura (Patrón).

La indicación de patrón puede cambiar debido a variaciones de temperatura, estos cambios no pueden corregirse y tienen que introducirse como un factor más de incertidumbre. Suele ser el fabricante quien da las especificaciones, que suelen venir en porcentaje del rango del instrumento/grado. A este factor habrá que multiplicarle por la máxima variación de la temperatura ambiental durante las mediciones. Es una incertidumbre tipo B, consideraremos una distribución rectangular, luego dicho valor se dividirá entre $(12)^{0,5}$.

a.4.) $\delta(\text{Inst})_{\text{res}}$: Debida a resolución del manómetro a calibrar.

Se considerará la resolución del instrumento o la variación de la indicación para una misma presión del patrón estable, si esta fuera mayor que la resolución. Es una incertidumbre tipo B, consideraremos una distribución rectangular, luego dicho valor se dividirá entre $(12)^{0,5}$.

a.5.) $\delta(\text{Ins})_{\text{tem}}$: Debida a temperatura (instrumento).

Análogamente a lo descrito en el apartado a.3.), tendremos una componente de incertidumbre debida a variaciones térmicas durante la calibración, que afectarán a las lecturas del manómetro a calibrar.

a.6.) $\delta(\text{Ins})_{\text{hist}}$: Debida a histéresis.

Este factor de incertidumbre se debe a que las indicaciones del manómetro pueden variar una cierta cantidad dependiendo que se obtengan mediante presiones crecientes o decrecientes. Considerando el intervalo de posibles lecturas debido a este motivo, y que es una incertidumbre tipo B, consideraremos una distribución rectangular, luego dicho valor se dividirá entre $(12)^{0,5}$.

a.7.) Debida a la repetibilidad de las medidas (P_{Ri} - P_{Xi}).

La incertidumbre debido a la falta de repetibilidad del manómetro viene dada por la siguiente expresión:

$$u_{\text{rep},i} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left((P_{Ri} - P_{Xi}) - \frac{\sum_{j=1}^n (P_{Ri} - P_{Xi})}{n} \right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

donde:

$u_{\text{rep},i}$ es la incertidumbre aleatoria de tipo A asociada al manómetro en el punto de calibración i .

n es el número de medidas (4 ó 6 según la precisión del manómetro).

P_{Ri} - P_{Xi} es cada una de las correcciones calculadas en un punto en los diferentes ciclos.

a.8.) Debida a diferencia de alturas entre niveles de referencia.

Según la ecuación (2), es función de la densidad del fluido, de la densidad del aire, de la gravedad del laboratorio y de la altura entre los niveles de referencia: la incertidumbre típica se obtiene de aplicar la ley de propagación de incertidumbres a (2):

$$u^2(\Delta_{NR}) = (u(\rho_f)g_1h)^2 + (u(\rho_a)g_1h)^2 + ((\rho_f - \rho_a)u(g_1)h)^2 + ((\rho_f - \rho_a)g_1u(h))^2 \quad (4)$$

donde:

$u(\rho_f)$ Es la incertidumbre típica de la densidad del fluido. Su valor y su incertidumbre, 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.

$u(\rho_a)$ El valor de la densidad del aire y su incertidumbre expandida, se obtienen a partir de la temperatura ambiente t_{amb} , de la presión atmosférica P_{amb} y de la humedad relativa en % hr :

Una posible fórmula para evaluarla es:

$$\rho_a = \frac{0,348\ 48\ P_{amb} - 0,009\ 024\ hr^{0,061}t_{amb}}{273,15 + t_{amb}} \quad (5)$$

La incertidumbre relativa de esta fórmula aproximada es $2,4 \times 10^{-4}$ bajo las siguientes condiciones ambientales

$$600\ \text{hPa} \leq P_{amb} \leq 1\ 100\ \text{hPa}$$

$$20\ \% \leq hr \leq 80\ \%$$

$$15\ ^\circ\text{C} \leq t_{amb} \leq 27\ ^\circ\text{C}$$

La incertidumbre de la densidad del aire viene determinada, además de por la incertidumbre de la fórmula por las incertidumbres de la temperatura ambiente t_{amb} , de la presión atmosférica P_{amb} y de la humedad relativa en % hr , aunque en la mayor parte de los casos suelen ser despreciables. S

Si no se quiere considera la ecuación un límite máximo puede ser $0,012\ \text{kg/m}^3$.

$u(g)$ Para las exactitud requerida por este procedimiento se puede utilizarse como valor de la aceleración de la gravedad $9,80\ \text{m/s}^2$ con una incertidumbre para $k = 2$ de $0,05\ \text{m/s}^2$.

$u(h)$ Normalmente, la diferencia de altura se mide a través de una regla. Su incertidumbre típica se obtiene 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, normalmente esta última es la contribución dominante.

La incertidumbre típica combinada asociada a la calibración del manómetro se obtiene combinando sus distintas contribuciones

$$u(C_i) = \sqrt{\sum_m u_m^2} = \sqrt{u_{rep,i}^2 + u^2(\Delta_{NR}) + \sum_i u^2(\delta_i) + \sum_j u^2(\delta_j)} \quad (6)$$

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:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u^4(C_i)}{\sum_m \frac{u_m^2}{v_m}} \quad (7)$$

donde v_m 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 v_m conocido (por ejemplo el indicado en el certificado de calibración en su caso).

A partir de los grados de libertad efectivos y de la tabla 1 se obtiene el factor k . La tabla está basada en una distribución t de Student evaluada para una distribución de probabilidad del 95,45 %.

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

Tabla 1: Factores de cobertura k para diferentes grados de libertad v_{eff} .

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

$$U(C_i) = k u(C_i) \quad (8)$$

NOTA:

En el caso de no realizar la corrección debida al certificado de calibración, Se puede dar un límite superior de la incertidumbre de calibración, que se hallaría sumando aritméticamente el valor absoluto de la corrección no corregida debido al certificado, con la incertidumbre indicada anteriormente.

6.2. Interpretación de resultados

Los valores se darán tabulados indicando:

- Presión de referencia.
- Valor medio de la indicación del instrumento.
- Correcciones o errores de calibración en cada punto.
- La incertidumbre para un factor de cobertura $k=2$. También se puede dar una incertidumbre máxima para todo el intervalo de calibración en lugar de dar una para cada punto.

En el certificado de calibración, se deberá dar la incertidumbre expandida y especificarse el valor de cobertura k utilizado.

Excepto cuando la unidad utilizada sea el pascal, se expresara la relación que existe entre la unidad de presión utilizada y el pascal que es la unidad de presión en el Sistema Internacional.

NOTA:

Si por el tipo de uso del manómetro no resulta aconsejable realizar las correcciones de calibración, se puede utilizar una incertidumbre maximizada, que englobaría la máxima corrección encontrada en la calibración, en valor absoluto.

$$U = U_{i\text{max}} + |C_{\text{max}}| \quad (9)$$

7. REFERENCIAS

- [1] Vocabulario Internacional de Metrología VIM, 3ª edición 2012 (español).
- [2] La mesure des pressions statiques. J.C. Legras. Ed. Chiron, 1986.
- [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) Primera edición Septiembre 2008 (original en inglés).Centro Español de Metrología.
- [4] UNE-EN 472 Manómetros. Vocabulario. Ed. 1. AENOR, 1996.

8. ANEXOS

EJEMPLO DE APLICACIÓN

a) Datos de partida.

Se pretende calibrar un manómetro tipo bourdon hidráulico con rango de 0 a 400 bar, con las siguientes características:

Fabricante: wwwxxx

Modelo: CuBe

Nº de serie: 2458NI

División de escala: 1 bar

Resolución: 0,5 bar.

Clase: 0,25. Según fabricante

No hay especificaciones del Fabricante en cuanto a la influencia de temperatura en la presión, estimamos un 0.002% del fondo de escala del patrón por grado.

La calibración se realizará en los siguientes puntos:

0; 40; 100; 200; 300 y 400 bar en dos series de medidas en ciclos crecientes y decrecientes (c, d).

b) Datos del patrón:

Manómetro digital de precisión.

Fabricante: ZZZKKK.

Modelo: PS40.

Nº de serie: 854698/40.líquido

Rango: 0 a 500 bar.

Resolución: 0,01 bar.

$U(k=2) = 5 \times 10^{-4} \times P_m + 0,02 \text{ bar}$ (Siendo P_m la presión medida).

De las especificaciones del fabricante se conoce una influencia de temperatura en la presión del 0,002 % de la indicación del instrumento por grado Celsius.

De datos de los dos últimos certificados, se ha comprobado una deriva máxima del 0,02 % del fondo de escala del patrón.

c) Condiciones ambientales durante la calibración.

La calibración se realiza en un laboratorio con control de temperatura a $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

d) Otros datos.

g	9,80 m/s ²
h	0 con un resolución de ± 1 cm
ρ_f	920 kg/m ³ con unas especificaciones de ± 20 kg/m ³ según el fabricante
ρ_a	1,120 kg/m ³ con una

tabla 2

e) Resultados obtenidos durante la calibración.

Presión de referencia	instrumento 1ª serie		instrumento 2ª serie		valor medio	corrección valor medio	$u_{rep}^{(1)}$
	c	d	c	d			
bar	bar		bar				bar
0,00	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	-0,10	0,05
40,01	40,2	40,6	40,2	40,8	40,5	-0,49	0,15
99,98	100,4	100,8	100,6	100,5	100,6	-0,62	0,09
199,98	200,6	200,8	200,4	200,8	200,7	-0,72	0,10
299,97	300,6	300,6	300,4	300,8	300,6	-0,63	0,08
399,97	400,8	400,6	400,8	401,0	400,8	-0,83	0,08

tabla 3

⁽¹⁾ Se obtiene aplicando (3).

Analizamos ahora los valores numéricos de las distintas componentes de incertidumbre, solo para un punto. Elegimos el punto de 200 bar.

Aplicando (1) obtenemos el valor de la corrección:

$$C_i = 199,98 - 200,7 + 0 + 0 + 0 = -0,72 \text{ bar} \quad (11)$$

Las correcciones debidas al patrón, al instrumento toman el valor cero. También toma en este caso el valor cero la corrección por diferencia de altura ya que los niveles de referencia del patrón e instrumento están a la misma altura. No ocurre lo mismo con sus contribuciones a la incertidumbre:

Magnitud X_i	estimación x_i	incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad c_i	incertidumbre $u_i(y)$
Densidad del fluido	920 kg/m ³	$\frac{20}{\sqrt{3}}$	rectangular	$9,8 \cdot 0,01^{(1)}$	11,3 Pa
Densidad del aire	1,120 kg/m ³	$\frac{0,012}{\sqrt{3}}$	rectangular	$-9,8 \cdot 0,01^{(1)}$	$6,7 \times 10^{-4}$ Pa
Gravedad local	9,80 m/s ²	$\frac{0,05}{\sqrt{3}}$	rectangular	$(920-1,12) \cdot 0,01^{(1)}$	0,26 Pa
Diferencia de altura	0 m	$\frac{0,01}{\sqrt{3}}$	rectangular	$(920-1,12) \cdot 9,8$	52 Pa
Corrección por nivel de referencia	Δ_{NR}	Incertidumbre combinada		52 Pa	

tabla 4

⁽¹⁾ Como la diferencia de altura toma el valor cero, para calcular los coeficientes de sensibilidad se ha utilizado el valor de su incertidumbre.

Se aprecia claramente que la contribución predominante a la incertidumbre típica combinada de la corrección por nivel de referencia es la debida a la diferencia de altura.

La tabla 5 desarrolla el cálculo de la incertidumbre expandida de la corrección.

Magnitud X_i	estimación x_i	incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad c_i	incertidumbre $u_i(y)$
Repetibilidad	-0,72	0,10	normal	1	0,10
Calibración del patrón	0	0,12/2	normal	1	0,06
Deriva del Patrón	0	$\frac{0,02 \cdot 200 \cdot 1,5}{100\sqrt{3}}$	rectangular	1	0,057
Temperatura del Patrón	0	$\frac{0,002 \cdot 200 \cdot 1,5}{100\sqrt{3}}$	rectangular	1	0,0035
Resolución del manómetro	0	$\frac{0,5}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	0,14
Temperatura del manómetro	0	$\frac{0,002 \cdot 200 \cdot 1,5}{100\sqrt{3}}$	rectangular	1	0,0035
Histéresis del manómetro	0	$\frac{0,31}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	0,089
Corrección por nivel de referencia	0	0,000 52	normal	1	0,000 52
Corrección de calibración	C_i	Incertidumbre combinada		0,21 bar	
Número de grados efectivos de libertad $\nu_{\text{ef}} =$				$\nu_{\text{ef}} = \frac{0,21^4}{\frac{0,10^4}{3}} = 58$	
Factor de cobertura $k =$				$k = 2,04$	
Incertidumbre expandida ($k=2,04$)				$U = 0,43$ bar	
Corrección no realizada máxima				- 0,72 bar	
Incertidumbre global de uso				$U = 1,2$ bar	

tabla 5

Metrología

NIPO: 113-19-006-0