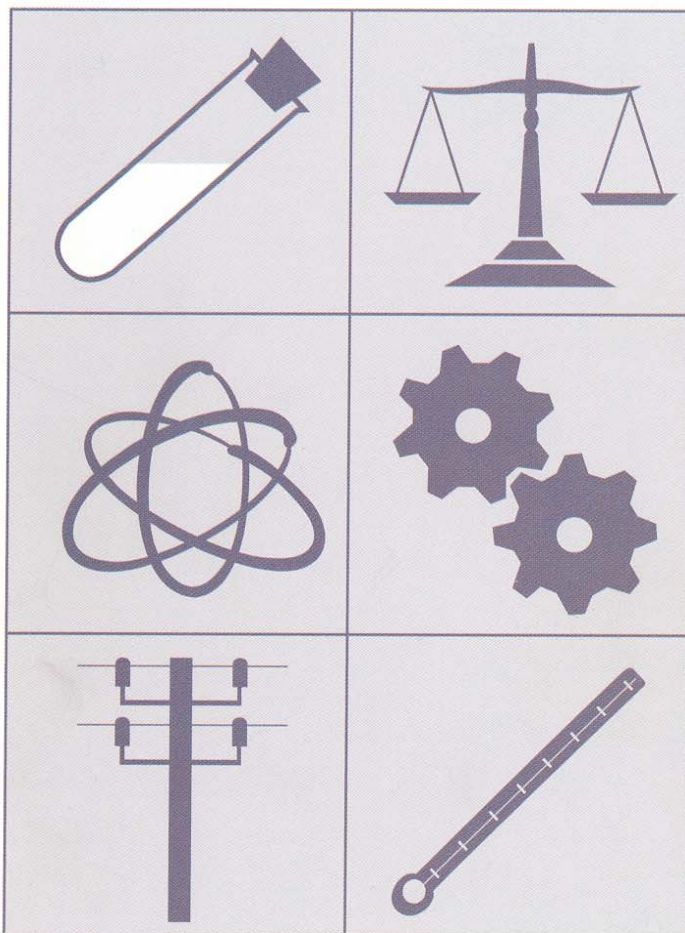


## PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



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

m 08



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, TURISMO  
Y COMERCIO

**CEM**  
CENTRO ESPAÑOL  
DE METROLOGÍA

Este procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, si ha sido necesario.

La presente edición se emite en formato digital. Hay disponible una edición en papel que se puede adquirir en nuestro departamento de publicaciones.

Este procedimiento de calibración es susceptible de modificación permanente a instancia de cualquier persona o entidad. Las propuestas de modificación se dirigirán por escrito, justificando su necesidad, a cualquiera de las siguientes direcciones:

Correo postal  
Centro Español de Metrología  
C/ del Alfaro, 2,  
28760 Tres Cantos, Madrid

Correo electrónico  
[cem@cem.es](mailto:cem@cem.es)



## ÍNDICE

	Página
1. ANTECEDENTES.....	4
2. OBJETO .....	4
3. ALCANCE .....	4
4. DEFINICIONES .....	5
5. GENERALIDADES .....	9
6. DESCRIPCIÓN .....	11
6.1. Equipos y materiales .....	11
6.2. Operaciones previas .....	13
6.3. Proceso de calibración.....	16
6.4. Toma y tratamiento de datos .....	18
7. RESULTADOS .....	19
7.1. Cálculo de incertidumbres .....	19
7.2. Interpretación de resultados .....	26
8. REFERENCIAS .....	27
9. ANEXOS .....	27



## 1. ANTECEDENTES

Este procedimiento en su Edición 0 se denominaba “Procedimiento ME-003 para la calibración de manómetros tipo bourdon”, dado que no solo es aplicable a la calibración de dichos instrumentos, sino que se puede aplicar a cualquier medidor de presión relativa de exactitud peor o igual que el 0,05 % de su límite superior de medida se ha decidido cambiarle el nombre por el de “Calibración de manómetros, vacuómetros y manovacuómetros”.

## 2. OBJETO

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

Una parte muy importante de los instrumentos que requieren calibración en el área de presión pertenece a este tipo por lo que es necesario dedicarles una atención especial.

## 3. ALCANCE

Este procedimiento sirve para la calibración de manómetros, vacuómetros y manovacuómetros, 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.



#### 4. DEFINICIONES

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

##### Unidad derivada (de medida) [1] (1.14)

Unidad de medida de una magnitud derivada en un sistema de magnitudes dado.

##### NOTA

Determinadas unidades derivadas tienen nombres y símbolos especiales; por ejemplo, en el SI:

Magnitud	Unidad derivada SI	
	Nombre	Símbolo
Fuerza	Newton	N
Energía	Joule	J
Presión	Pascal	Pa

##### 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.



### Ajuste (de un instrumento de medida) [1] (4.30)

Operación destinada a llevar un instrumento de medida a un estado de funcionamiento conveniente para su utilización.

NOTA:

El ajuste puede ser automático, semiautomático o manual.

### División de escala [1] (4.20)

Parte de una escala comprendida entre dos trazos consecutivos cualesquiera.

### Resolución (de un dispositivo visualizador) [1] (5.12)

La menor diferencia de indicación de un dispositivo visualizador que puede percibirse de forma significativa.

NOTAS:

Para un dispositivo visualizador digital, diferencia de la indicación que corresponde al cambio de una unidad en la cifra menos significativa.

Este concepto se aplica también a un dispositivo registrador.

### Calibración [1] (6.11)

Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones.

NOTAS

El resultado de una calibración permite atribuir a las indicaciones los valores correspondientes del mensurando o bien determinar las correcciones a aplicar en las condiciones.

Una calibración puede también servir para determinar otras propiedades metrológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.

Los resultados de una calibración pueden consignarse en un documento denominado, a veces, certificado de calibración o informe de calibración.

### Desviación estándar experimental [1] (3.8)

Para una serie de  $n$  mediciones de un mismo mensurando, la magnitud  $s$  que caracteriza la dispersión de los resultados, dada por la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

siendo  $x_i$  el resultado de la  $i$ -ésima medición y  $\bar{x}$  la media aritmética de los  $n$  resultados considerados.

#### NOTAS:

Considerando la serie de  $n$  valores como muestra de una distribución,  $\bar{x}$  es un estimador insesgado de la media  $\mu$ , y  $s^2$  es un estimador insesgado de la varianza  $\sigma^2$  de dicha distribución.

La expresión  $s/\sqrt{n}$  es una estimación de la desviación estándar de la distribución de  $\bar{x}$  y se denomina **desviación estándar experimental de la media**.

La desviación estándar experimental de la media en ocasiones se denomina, incorrectamente, **error de la media**.

### Error (de indicación) de un instrumento de medida [1] (5.20)

Indicación de un instrumento de medida menos un valor verdadero de la magnitud de entrada correspondiente.

#### NOTAS

Dado que un valor verdadero no puede determinarse, en la práctica se utiliza un valor convencionalmente verdadero.



Este concepto se aplica principalmente cuando se compara el instrumento con un patrón de referencia.

Para una medida materializada, la indicación es el valor que le ha sido asignado.

### Incertidumbre de medida [1] (3.9)

Parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando.

#### NOTAS:

El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ésta) o la semiapertura de un intervalo con un nivel de confianza determinado.

La incertidumbre de medida comprende, en general, varios componentes. Algunos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden caracterizarse por sus desviaciones estándar experimentales. Los otros componentes, que también pueden ser caracterizados por desviaciones estándar, se evalúan asumiendo distribuciones de probabilidad, basadas en la experiencia adquirida o en otras informaciones.

Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor del mensurando, y que todos los componentes de la incertidumbre, comprendidos los que provienen de efectos sistemáticos, tales como los componentes asociados a las correcciones y a los patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

Esta definición es la de la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida” [3] donde sus bases están expuestas con detalle (en particular ver 2.2.4 y anexo D).

### Trazabilidad [1] (6.10)

Propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencias determinadas, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas.

#### NOTAS:





A menudo, este concepto se expresa por el adjetivo trazable.

La cadena ininterrumpida de comparación se denomina cadena de trazabilidad.

### Clase de precisión [6] (4.5)

Clase de un manómetro que satisface a ciertas exigencias metrológicas destinadas a conservar los errores dentro de los límites especificados.

## 5. 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.

## 6. DESCRIPCIÓN

### 6.1. 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:

#### 6.1.1. 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.

Como ejemplo para la calibración de un manómetro de incertidumbre máxima esperada 2.0 kPa, sería deseable disponer de un manómetro de incertidumbre inferior a 5 kPa.

#### 6.1.2. 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.

#### 6.1.3. 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.

#### 6.1.4. 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  $1^{\circ}\text{C}$  para la medida de la temperatura y  $\pm 5\%$  hr para la medida de la humedad relativa.

#### 6.1.5. 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.

#### 6.1.6. 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.

#### 6.1.7. 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.

### 6.2. Operaciones previas



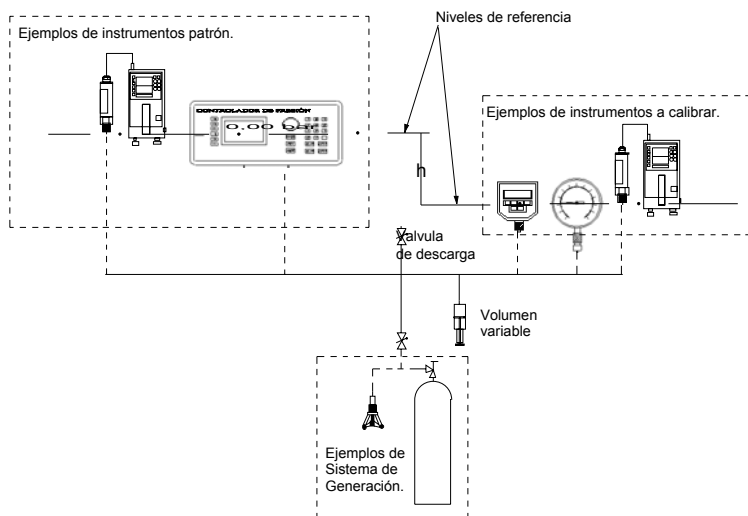
Antes de realizar la calibración se realizarán una serie de comprobaciones preliminares procediéndose a una inspección visual general.

- 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

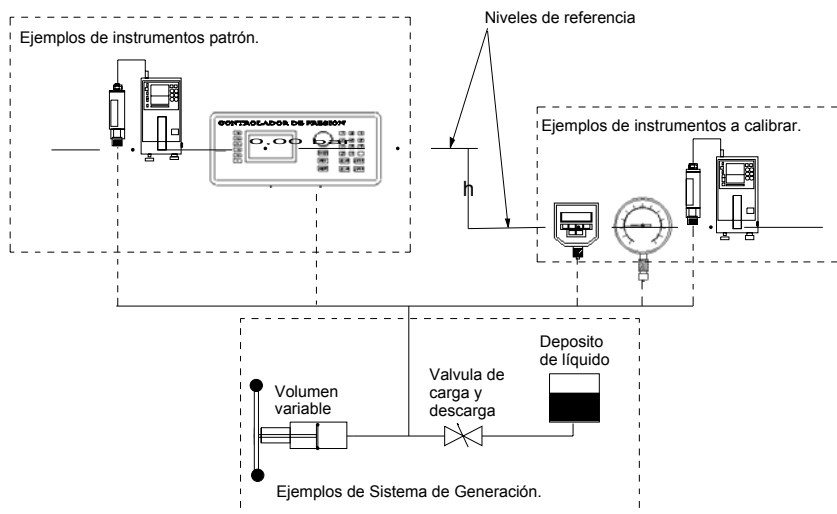


relevancia cuando el patrón utilizado es un controlador de presión y la calibración se realiza con el patrón controlando el valor de presión en el momento de registrar las indicaciones de los instrumentos. Ya que una fuga en el sistema de calibración ocasionaría que la presión a la que están sometidos 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

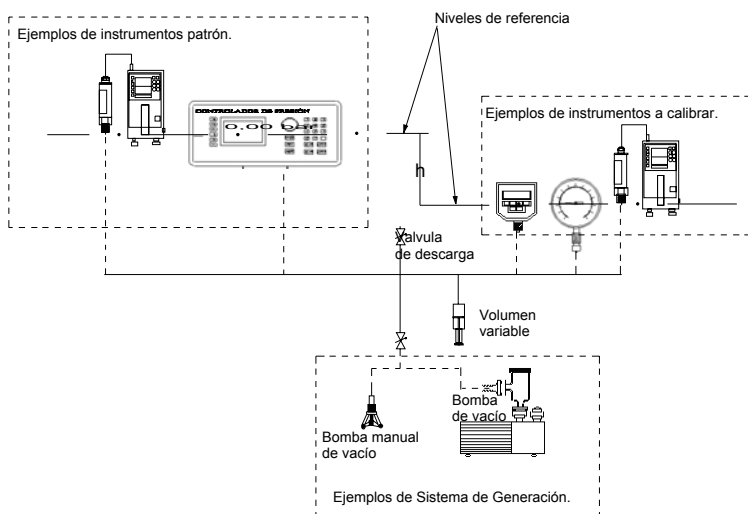


b) Presión relativa positiva o presión manométrica en medio líquido





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



## 6.3. Proceso de calibración

### 6.3.1. 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 desperezado 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.

#### **6.4. 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.

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Cálculo de incertidumbres

La asignación y expresión de incertidumbres se realizará siguiendo los criterios de la guía CEA-ENAC-LC/02 [4]. 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:

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

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)  $\sum_j \delta_j(Pat)$  es la suma de las correcciones debidas al Patrón, nulas o no, que van a tener contribución en la incertidumbre.
- e)  $\sum_k \delta_k(Inst)$  es la suma de las correcciones debidas al instrumento, nulas o no, que van a tener contribución en la incertidumbre.
- f)  $\Delta_{NR}$  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:

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

Donde  $\rho_f$  es la densidad del fluido manométrico y  $\rho_a$  es la densidad del aire.

### Componentes de la incertidumbre

- 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  $k_{\text{cert}}$  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

$$u(\delta(\text{Pat})_{\text{cal}}) = U_{\text{cert}} / k_{\text{cert}} .$$

(Apartado 3.3 de la ref [4])

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

Es una incertidumbre tipo B, consideraremos una distribución rectangular, su valor vendrá dado por  $u(\delta(Pat)_{der}) = der / 2\sqrt{3}$ .

(Apartado 3.3 de la ref [4])

a.3.)  $\delta(Pat)_{tem}$ : 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.

Es una incertidumbre tipo B, se tratará como una distribución rectangular y viene dada por  $u(\delta(Pat)_{tem}) = tem(Pat) / 2\sqrt{3}$ , el valor  $tem(Pat)$ , se obtendrá de las especificaciones del fabricante.

(Apartado 3.3 de la ref [4])

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

Incertidumbre tipo B. Puede describirse también por una distribución rectangular y de valor  $u(\delta(Inst)_{res}) = res / 2\sqrt{3}$ , siendo  $res$  la resolución del manómetro.

(Apartado 3.3 de la ref [4])

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

Análogamente a lo descrito en el apartado a.4.), tendremos una componente de incertidumbre debida a variaciones térmicas durante la calibración, que afectarán a las lecturas del manómetro

a calibrar. Su valor vendrá dado por  
 $u(\delta(Ins)_{tem}) = tem(Ins) / 2\sqrt{3}$ .

(Apartado 3.3 de la ref [4])

a.6.)  $\delta(Ins)_{hist}$ : 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. Si llamamos *his* al intervalo de posibles lecturas debido a este motivo, su varianza sería  $u(\delta(Ins)_{hist})^2 = (his)^2 / 12$ , y su incertidumbre típica  $u(\delta(Ins)_{hist}) = his / 2\sqrt{3}$ .

(Apartado 3.3 de la ref [4])

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:

$$u(rep) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( C_i - \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

Donde:

$u(rep)$  es la incertidumbre aleatoria de tipo A asociada al manómetro.

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



$C_i$  es cada una de las correcciones calculadas en un punto en los diferentes ciclos.

(Apartado 3.1 de la ref [4])

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):

$$u(\Delta_{NR}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial \rho_f} u(\rho_f)\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial \rho_a} u(\rho_a)\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial g_l} u(g_l)\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial h} u(h)\right)^2} \quad (4)$$

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, de la presión atmosférica y de la humedad relativa.

Una posible fórmula para evaluarla es:

$$\rho_a = \frac{0,34848 P_{amb} - 0,009024 h \cdot r^{0,061 t_{amb}}}{273,15 + t_{amb}} \quad (5)$$

Las diferencias de los valores obtenidos con ésta fórmula respecto de los obtenidos con la formula de 1991 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 formula 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:

$$u(\rho_a) = \frac{\delta\rho_a}{2\sqrt{3}} \quad (6)$$

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

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

En la tabla 1 resume el cálculo de la incertidumbre típica por diferencia de alturas:

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	$\rho_f$	$u(\rho_f)$	rectangular	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial \rho_f} = g_l \times h$	$g_l \times h \times u(\rho_f)$
Densidad del aire	$\rho_a$	$u(\rho_a)$	rectangular	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial \rho_a} = -g_l \times h$	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial \rho_a} = -g_l \times h$
Gravedad local	<b><math>g</math></b>	<b><math>u(g)</math></b>	rectangular	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial g_l} = (\rho_f - \rho_a) \times h$	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial g_l} = (\rho_f - \rho_a) \times h$
Diferencia de altura	<b><math>h</math></b>	<b><math>u(h)</math></b>	rectangular	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial h} = (\rho_f - \rho_a) \times g_l$	$\frac{\partial \Delta_{NR}}{\partial h} = (\rho_f - \rho_a) \times g_l$



Corrección por nivel de referencia	$\Delta_{NR}$	Incertidumbre combinada	$u(\Delta_{NR}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)}$
------------------------------------	---------------	-------------------------	---

**Tabla 1**

Finalmente, aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (1) se obtienen la incertidumbre típica combinada en al calibración de manómetros

Magnitud $X_i$	estimación $x_i$	incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad $C_i$	incertidumbre $u(y)$
Repetibilidad	$P_{Ri} - P_{xi}$	$u(\text{rep})$ (a.7)	normal	1	$u(\text{rep})$ (a.7)
Calibración del patrón	$\delta(\text{Pat})_{\text{cal}}$	$U / k$	normal	1	$U / k$
Deriva del Patrón	$\delta(\text{Pat})_{\text{der}}$	$der / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$der / 2\sqrt{3}$
Temperatura del Patrón	$\delta(\text{Pat})_{\text{tem}}$	$tem(\text{Pat}) / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$tem(\text{Pat}) / 2\sqrt{3}$
Resolución del manómetro	$\delta(\text{Ins})_{\text{res}}$	$res / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$res / 2\sqrt{3}$
Temperatura del manómetro	$\delta(\text{Ins})_{\text{tem}}$	$tem(\text{Ins}) / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$tem(\text{Ins}) / 2\sqrt{3}$
Histéresis del manómetro	$\delta(\text{Ins})_{\text{hist}}$	$his / 2\sqrt{3}$	rectangular	1	$his / 2\sqrt{3}$
Corrección por nivel de referencia	$\Delta_{NR}$	$u(\Delta_{NR})$	normal	1	$(\rho_f - \rho_a) \times g_l \times u(h)$
Corrección de calibración	$C_i$	Incertidumbre combinada	$u(C_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)}$		
Número de grados efectivos de libertad $v_{\text{ef}} =$				$v_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}}$	

Factor de cobertura $k =$	$k = f(v_{\text{eff}})$
Incertidumbre expandida ( $k=$ )	$U = k \cdot u(P)$
Corrección no realizada máxima	$C_{\text{max}}$
Incertidumbre global de uso	$U' = C_{\text{max}} + U$

**Tabla 2**

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

$$u(C_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad (7)$$

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

$$v_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (8)$$

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 un distribución de probabilidad del 95,45 %.

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

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

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



$$U = ku(y) \quad (9)$$

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.

## 7.2. 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.



$$U = U_{i\text{ máx}} + |C_{\text{máx}}| \quad (10)$$

## 8. REFERENCIAS

- [1] Vocabulario Internacional de términos básicos y generales de metrología (VIM)-CEM.1994.
- [2] La mesure des pressions statiques. J.C. Legras. Ed. Chiron, 1986.
- [3] Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO 1993. (ISBN92-67-10188-9).
- [4] CEA-ENAC-LC/02, Rev. 1, Enero 98 Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones.
- [5] Procedimiento para la realización de procedimientos de calibración. MINER-CEM. Edición 0. 1997.
- [6] UNE-EN 472 Manómetros. Vocabulario. Ed. 1. AENOR, 1996.



## 9. 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.

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  $22^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ .

d) Otros datos.

$g_l$	$9,80 \text{ m/s}^2$	$\delta g_l$	$0,05 \text{ m/s}^2$
$h$	0	$\delta h$	0,01 m
$\rho_f$	$920 \text{ kg/m}^3$	$\delta \rho_f$	$20 \text{ kg/m}^3$
$\rho_a$	$1,120 \text{ kg/m}^3$	$\delta \rho_a$	$0,012 \text{ kg/m}^3$

**Tabla 4**





e) Resultados obtenidos durante la calibración.

Presión de referencia	instrumento 1ª serie		instrumento 2ª serie		valor medio	corrección valor medio	u(rep) <sup>(1)</sup>
bar	bar		bar				bar
	c	d	c	d			
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 5**

<sup>(1)</sup> Se obtiene aplicando (3).

Analicemos 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 $u(y)$
Densidad del fluido	920 kg/m <sup>3</sup>	$\frac{20}{\sqrt{3}} = 11,5 \text{ kg / m}^3$	rectangular	$9,80 \times 0,01^{(1)}$	1,13 Pa
Densidad del aire	1,120 kg/m <sup>3</sup>	$\frac{0,012}{\sqrt{3}} =$ $0,0069 \text{ kg / m}^3$	rectangular	$-9,80 \times 0,01^{(1)}$	$6,7 \times 10^{-4} \text{ Pa}$
Gravedad local	9,80 m/s <sup>2</sup>	$\frac{0,05}{\sqrt{3}} =$ $0,029 \text{ m / s}^2$	rectangular	$(920 - 1,120_{\rho}) \times 0,01^{(1)}$	0,26 Pa
Diferencia de altura	0	$\frac{0,01}{\sqrt{3}} =$ $0,0058 \text{ m}$	rectangular	$(920 - 1,120_{\rho}) \times 9,80$	52 Pa
Corrección por nivel de referencia	$\Delta_{NR}$	Incertidumbre combinada		$u(\Delta_{NR}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)}$ $= 52 \text{ Pa} = 0,00052 \text{ bar}$	

**Tabla 6**

- (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 7 desarrolla el cálculo de la incertidumbre expandida de la corrección.

Magnitud $X_i$	estimació n $x_i$	incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad $c_i$	incertidumbre $u(y)$
Repetibilidad	-0,72	0,10	normal	1	0,10
Calibración del patrón	0	$0,12 / 2 = 0,06$	normal	1	0,06
Deriva del Patrón	0	$\frac{0,02 \times 500}{100} \times \frac{1}{\sqrt{3}}$ $= 0,057$	rectangular	1	0,057
Temperatura del Patrón	0	$\frac{0,002 \times 200 \times 1,5}{100}$ $\times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,0035$	rectangular	1	0,0035
Resolución del manómetro	0	$\frac{0,5}{2\sqrt{3}}$ $= 0,14$	rectangular	1	0,14
Temperatura del manómetro	0	$\frac{0,002 \times 400 \times 1,5}{100}$ $\times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,0069$	rectangular	1	0,0069
Histéresis del manómetro	0	$\frac{0,31}{\sqrt{12}} = 0,089$	rectangular	1	0,089
Corrección por nivel de referencia	0	0,000 52	normal	1	0,000 52



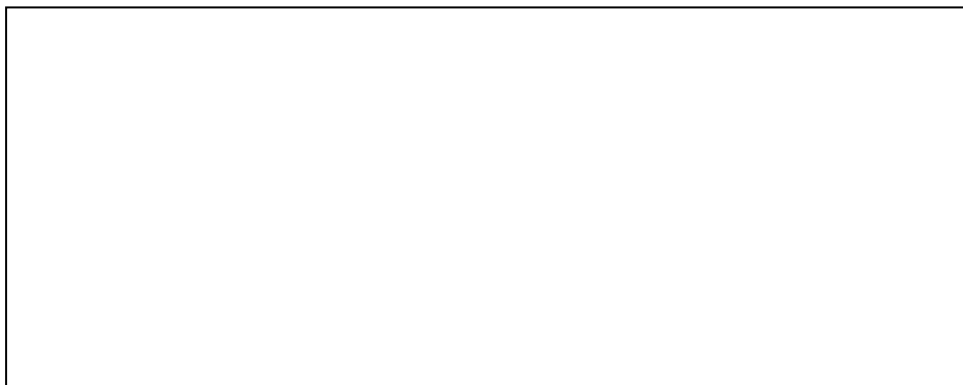
Corrección de calibración	$C_i$	Incertidumbre combinada	$u(C_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} =$ $0,21 \text{ bar}$
---------------------------	-------	-------------------------	---

**Tabla 7**

Número de grados efectivos de libertad $v_{\text{ef}} =$	$v_{\text{eff}} = \frac{0,21^4}{\frac{0,10^4}{3}} = 58$
Factor de cobertura $k =$	$k = 2,04$
Incertidumbre expandida ( $k=2,04$ )	$U = 0,43 \text{ bar}$
Corrección no realizada máxima	$- 0,72 \text{ bar}$
Incertidumbre global de uso	$U' = 1,2 \text{ bar}$

**Tabla 8**

La tabla 9 muestra los resultados para el punto de calibración de 200 bar y una nota aclaratoria sobre la relación entre el Pascal y la unidad utilizada.





Presión de referencia	Indicación Instrumento	Corrección	U <i>k</i>
Pr [bar]	Pi [bar]	Pr - Pi [bar]	[bar]
199,98	200,7	-0,72	0,43

La Unidad de presión en el Sistema Internacional de Unidades es el Pascal:

