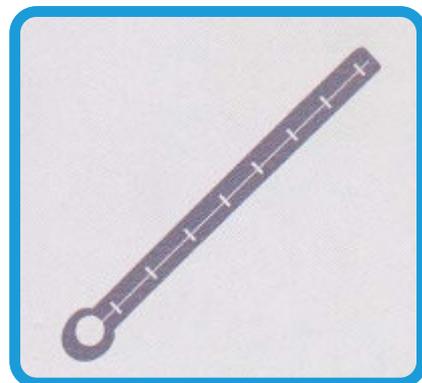
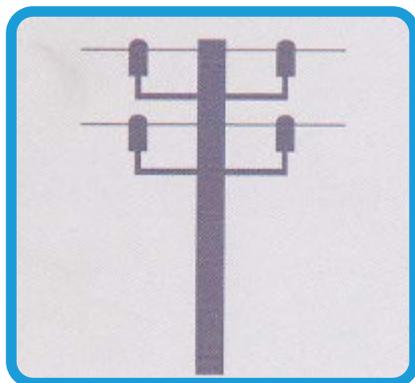
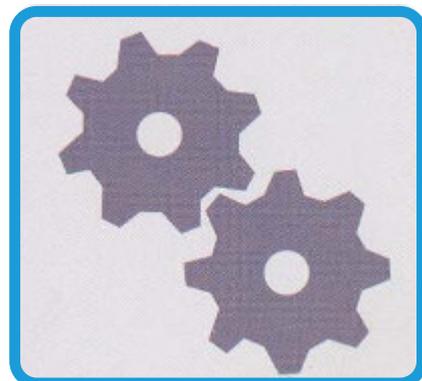
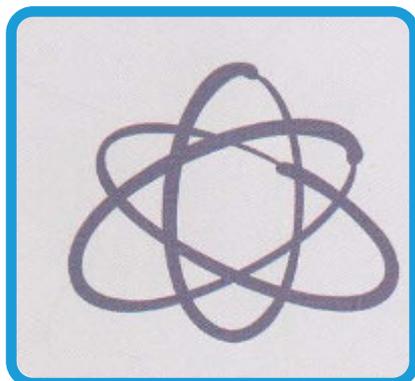
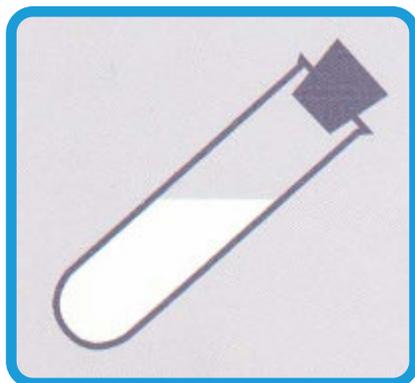
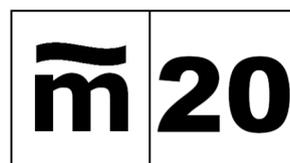


# Metrología



PROCEDIMIENTO ME-021 PARA LA  
CALIBRACIÓN DE COLUMNAS DE LÍQUIDO  
(MANOMÉTRICAS Y BAROMÉTRICAS)



**PROCEDIMIENTO ME021**  
**CALIBRACIÓN DE COLUMNAS DE LÍQUIDO**  
**(MANOMÉTRICAS Y BAROMÉTRICAS)**

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

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

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

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

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

## ÍNDICE

	Página
1. OBJETO.....	3
2. ALCANCE .....	3
3. DEFINICIONES .....	3
4. GENERALIDADES .....	3
5. DESCRIPCIÓN .....	6
5.1. Equipos materiales .....	4
5.2. Operaciones previas .....	7
5.3. Proceso de calibración .....	7
5.4. Toma y tratamiento de datos .....	8
6. RESULTADOS .....	9
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	9
6.2. Interpretación de resultados.....	15
7. REFERENCIAS .....	16
8. ANEXOS.....	17

## 1. OBJETO

Este procedimiento tiene por objeto dar a conocer un método de calibración para columnas de líquido destinadas a la medida de presión.

## 2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a columnas de líquido tanto barométricas como manométricas.

Se aplica únicamente a columnas donde la presión se indica mediante una escala, ya sea directamente o mediante un nonius o vernier.

## 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.

### Barómetro:

Instrumento que mide la presión atmosférica

### Manómetro:

Instrumento que mide la presión relativa. Es diferencial si mide la presión diferencial.

### 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

Las columnas de líquido fueron uno de los primeros medios de medir la presión. Se basa en la compensación entre el empuje generado por la presión a medir y el empuje que ejerce el líquido. Hay muchos diseños dependiendo de si la presión a medir es relativa, absoluta o diferencial y el rango de medida. La columna de líquido básica, de la que derivan todas las demás por simplificación es el tubo en U, formado por dos columnas unidas en su parte inferior. Si el nivel de referencia viene dado por la

superficie del líquido en la columna 1 y, por tanto, es el origen de la escala para medir la diferencia de alturas  $h$ , se tiene

$$P_1 - P_2 = \rho_L \cdot g_1 \cdot h \quad (1)$$

siendo  $P_1$  la presión en la columna 1,  $P_2$  la presión en la columna 2,  $\rho_L$  es la densidad del líquido de la columna,  $g_1$  es la gravedad local y  $h$  es la diferencia en altura entre el nivel del líquido en la columna 2 y el nivel del líquido en la columna 1. La columna 2 será la columna de medida y es donde se colocará la escala para medir.

Si  $P_2$  es cero, es decir, está en vacío, estaremos en el caso de un barómetro y, si es distinto de cero, tendremos un manómetro.

#### Densidad del líquido $\rho_{Hg}$

El líquido utilizado depende de la presión que se quiera obtener. El mercurio se utiliza para altas presiones absolutas, ya que por su alta densidad se necesitará menos altura de columna. Otros líquidos son el agua o el aceite, que se utilizan para medir pequeñas diferencias de presión con más exactitud ya que, al ser menos densos, la altura de la columna aumenta y con ello la resolución de la escala. Para el mercurio la densidad vendrá dada por la ecuación de Ambrose,

$$\rho_{Hg}(t) = \frac{\rho_{Hg}(t=0)}{1 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4} \quad (2)$$

con

$$\begin{aligned} \rho_{Hg}(t=0) &= 13\,595,08 \text{ kg/m}^3 \\ a_1 &= 1,815\,868 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\ a_2 &= 5,458\,3 \cdot 10^{-9} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2} \\ a_3 &= 3,498 \cdot 10^{-11} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3} \\ a_4 &= 1,555\,8 \cdot 10^{-14} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4} \end{aligned}$$

y  $t$  la temperatura en  $^\circ\text{C}$ . La incertidumbre expandida de esta fórmula es  $0,01 \text{ kg/m}^3$  de  $10 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$  y  $0,02 \text{ kg/m}^3$  de  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $10 \text{ } ^\circ\text{C}$  y de  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $40 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La referencia más actual sobre la densidad del mercurio y donde además incluye esta fórmula y mucha más información sobre el tema es la [3].

Si el líquido es agua, la ecuación más reciente es la de Tanaka, que para agua bidestilada sin composición isotópica determinada puede asumirse como la más adecuada con una incertidumbre expandida de  $0,02 \text{ kg/m}^3$ ,

$$\rho_w = b_5 \left[ 1 - \frac{(t + b_1)^2 (t + b_2)}{b_3 (t + b_4)} \right] \quad (2.1)$$

con

$$\begin{aligned} b_1 &= -3,983\,035 \\ b_2 &= 301,797 \\ b_3 &= 522\,528,9 \\ b_4 &= 69,348\,81 \\ b_5 &= 999,974\,95 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

y  $t$  la temperatura en  $^\circ\text{C}$ . La referencia más completa que contiene esta fórmula y otras como las de Biggs y Kell es la [4].

Aunque las referencias [3] y [4] contienen información sobre compresibilidades en general dada la exactitud de este tipo de instrumentos dicha influencia se considerará despreciable.

Si  $P_1$  y  $P_2$  son presiones relativas se habrá de restar la densidad del líquido la densidad del aire  $\rho_a$ . Bastará con suponer que es  $(1,2 \pm 0,1) \text{ kg/m}^3$  ( $k=2$ ). Este término es despreciable para exactitudes peores del 0,1%.

#### Gravedad local $g_l$

La gravedad local  $g_l$ , en el caso de no haber sido medida directamente, vendrá en  $\text{m/s}^2$  dada según la referencia [5] por la fórmula

$$g_l = 9,780\,318\,4 \cdot (1 + 5,302\,4 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(\phi)^2 + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot \sin(2\phi)^2 - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H \quad (3)$$

siendo  $\phi$  la latitud y  $H$  la altitud respecto del nivel del mar en m.

Esta fórmula da el valor de la gravedad local con una incertidumbre del 0,005% ( $k=2$ ).

#### Escala

Al variar la presión el nivel de referencia, es decir, la posición de la superficie del líquido en la columna 1, varía. Ese efecto se minimiza si la sección de la columna 1,  $A_1$ , es mucho mayor que la de la columna 2,  $A_2$ . Aún así habrá que corregir convenientemente. Hay dos formas posibles:

-Añadiendo o disminuyendo líquido al sistema de forma que el nivel de referencia permanezca constante. Esto se llama ajuste del nivel de referencia y se puede hacer en algunos dispositivos como el barómetro de Fortín.

-El fabricante corrige el espaciado entre marcas de la escala según la ecuación

$$d' = \frac{d}{\left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)} \quad (4)$$

siendo  $d$  la distancia entre trazos sin ajuste del nivel de referencia y  $d'$  distancia entre trazos corregida.

#### Efecto por inclinación de la escala

El efecto por inclinación de la escala será de la forma

$$d' = d \cdot \cos(\varphi) \quad (5)$$

siendo  $d$  la distancia entre trazos real,  $d'$  distancia entre trazos corregida y  $\varphi$  el posible ángulo de inclinación.

La columna en sí podrá estar inclinada, especialmente para medir pequeñas presiones diferenciales. Esto se hace para disminuir el efecto de capilaridad, pues la sección del líquido aumenta.

#### Efecto de la temperatura en la escala

La escala puede ir grabada en la columna o estar indicada mediante una regla metálica adosada a la columna. La escala vendrá influenciada por la dilatación según

$$d = d' \cdot (1 + \alpha \cdot [t - t_0]) \quad (6)$$

siendo  $d$  la distancia entre trazos real,  $d'$  distancia entre trazos corregida,  $\alpha$  el coeficiente de dilatación de la escala,  $t$  la temperatura ambiente en  $^{\circ}\text{C}$  y  $t_0$  la temperatura de referencia de la escala en  $^{\circ}\text{C}$ , que si el efecto de dilatación es importante viene dado por el fabricante (normalmente es  $0^{\circ}\text{C}$ ), así como el coeficiente de dilatación con su incertidumbre.

#### Corrección por diferencia de alturas

En principio se colocará la columna y el patrón al mismo nivel de referencia. Si no es posible se tomará en cuenta la variación de presión por diferencia de alturas, que vendrá dada por la expresión

$$\Delta_R = (\rho_g - \rho_a) \cdot g_1 \cdot l \quad (7)$$

donde  $\rho_g$  es la densidad del fluido transmisor de la presión,  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $g_1$  es la gravedad y  $l$  la diferencia de alturas entre el nivel de referencia del patrón y el de la columna.

a) Densidad del aire

Bastará con tomar la densidad del aire como  $1,2 \text{ kg/m}^3$  para estas exactitudes.

b) Densidad del fluido de calibración

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

$$P_R = \frac{\rho_g}{M} \cdot R \cdot T \quad (8)$$

siendo  $P_R$  la presión de referencia,  $\rho_g$  la densidad,  $M$  la masa molecular del gas,  $R$  la constante de los gases ideales, y  $T = t + 273,15$  la temperatura.

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

Si el fluido es líquido su densidad vendrá dada por el fabricante o vendrá dada por otras fórmulas. Un referencia útil de fórmulas a utilizar puede ser [6].

c) Diferencia de alturas

La diferencia de alturas  $l$ , será positiva cuando el nivel de referencia de la columna a calibrar se encuentra más bajo que el patrón.

#### 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 =  $10^5 \text{ Pa}$  y el mmHg =  $133,322 \text{ Pa}$ .

## 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 patrón de presión o varios si fuera necesario dependiendo del rango. La incertidumbre del patrón será adecuada a la incertidumbre máxima esperada en la calibración. Deberá tener vigente su certificado de calibración trazable a un laboratorio nacional o acreditado. 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  $2,0 \text{ kPa}$ , sería deseable disponer de un manómetro de incertidumbre inferior a  $5 \text{ kPa}$ .

#### 5.1.2. Controlador de presión

Se dispondrá de un sistema que genere las presiones necesarias de forma lenta y suave y las pueda mantener de forma estable.

#### 5.1.3. Medidores de condiciones ambientales

Se utilizarán para controlar las condiciones del laboratorio. En especial se tendrá un termómetro calibrado con incertidumbre de uso de  $0,1^{\circ}\text{C}$  ( $k=2$ ).

#### 5.1.4. Accesorios

Se dispondrá de los tubos y racores adecuados para el rango de presiones y un nivel u otro sistema para asegurar la verticalidad e la escala.

### 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 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 le fijará adecuadamente. Se tomará nota también de cualquier posible anomalía y se informará al cliente de ésta.
- b) En la sala de calibración las condiciones ambientales estarán suficientemente controladas, en especial la temperatura y serán adecuadas para el buen funcionamiento de los instrumentos. El nivel de vibración será tal que no afecte a los instrumentos.
- c) Se asegurará la verticalidad de la escala de la columna y la limpieza del líquido de la columna. Se colocará el nivel de referencia del instrumento patrón al mismo nivel de referencia que la columna (comienzo de la escala) o si no se medirá esta diferencia de alturas de forma adecuada (con una regla y un nivel topográfico, por ejemplo). También se verificará la ausencia de fugas en el circuito comprobando la estabilidad de la indicación del patrón. En el caso de que haya fuga se buscará con la ayuda de una solución jabonosa.
- d) Antes de la calibración la columna tendrá que conseguir la estabilidad térmica con el ambiente de la sala. Para ello será recomendable al menos doce horas.

### 5.3. Proceso de calibración

#### 5.3.1. Secuencias de calibración

La calibración se llevará a cabo por el método de comparación directa entre las indicaciones de la columna y el instrumento patrón. Se conectarán la columna y el instrumento patrón entre sí con los tubos y racores adecuados y de igual forma a un controlador o generador de presión que sea capaz de generar las presiones requeridas.

#### 5.3.2. Definición de los puntos de medida.

La calibración se realizará en tres ciclos y cada ciclo estará constituido por cinco puntos o más incluyendo el más alto y el más bajo del rango de medida y tomados primero en

sentido creciente y luego en sentido decreciente. Estos puntos podrán ser elegidos por el cliente.

Para vigilar el buen funcionamiento del instrumento patrón se harán los controles convenientes entre calibraciones, que consistirán en la comparación de indicaciones con otro instrumento patrón de iguales o mejores características metrológicas.

### 5.3.3. Calibración

Se irá introduciendo presión en el circuito con el generador hasta que la indicación del instrumento patrón corregida se aproxime a la presión nominal deseada y se ajustará la presión hasta que el instrumento patrón dé la lectura de forma estable. Después se tomará la lectura de columna tomando como referencia la parte superior del menisco de la columna de medida así como la temperatura. En columnas con ajuste del nivel de referencia se ajustará éste antes de tomar la lectura. Siempre se medirá con el menisco curvado hacia arriba y este hecho se hará constar en el certificado.

Para conseguir que el menisco se curve hacia arriba para presiones decrecientes se decrecerá la presión un poco menos del valor requerido y luego se ajustará subiendo. En general, para cada presión medida, la última modificación de la presión será creciente para conseguir que el menisco se curve hacia arriba.

## 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) Código de identificación de la calibración.
- b) Identificación del instrumento patrón y su resolución.
- c) Identificación de la columna y resolución de la escala.
- d) Indicaciones del instrumento patrón  $P_R$ , la columna  $(P_1 - P_2)_{ij}$ , y la temperatura ambiente  $t_{ij}$  para cada presión  $i$ .
- e) Corrección por diferencia de alturas,  $\Delta_R$ , si la hay.
- f) Condiciones ambientales durante la calibración.
- g) Fluido utilizado.
- h) Cualquier anomalía detectada durante la calibración.
- i) Fechas de realización.
- j) Técnico que la realizó.
- k) Correcciones a realizar.

### Tratamiento de datos

Para cada presión nominal  $i$  se calculará

- a) Presión corregida del patrón,  $P_R$
- b) Media aritmética de las indicaciones de la columna

Si la escala de la columna está en unidades de presión las indicaciones de la columna habrán de referirse a gravedad normal,  $g_n$  igual a  $9,806\ 65\ \text{m/s}^2$  y a una temperatura de

referencia  $t_r$ , que suele ser la de referencia del laboratorio y constará luego en el certificado, según la siguiente ecuación

$$(P_1 - P_2)_{Rji} = (P_1 - P_2)_{ji} \cdot \frac{\rho_L(t_{ji})}{\rho_L(t_r)} \cdot \frac{g_1}{g_n} \cdot \frac{(1 + \alpha \cdot [t_{ji} - t_0])}{(1 + \alpha \cdot [t_r - t_0])} \quad (9)$$

con  $(P_1 - P_2)_{ji}$  es la presión indicada por la columna a temperatura  $t_{ji}$  en cada ensayo  $j$  para la presión nominal  $i$  y  $(P_1 - P_2)_{Rji}$  la que indicaría en condiciones de referencia (gravedad normal y temperatura de referencia).

Si la escala está en unidades de longitud se tiene

$$(P_1 - P_2)_{Rji} = \rho_L(t_{ji}) \cdot g_1 \cdot h_{ji} \cdot (1 + \alpha \cdot [t_{ji} - t_0]) \quad (10)$$

La media aritmética para cada presión nominal vendrá dada por

$$(P_1 - P_2)_i = \frac{\sum_{j=1}^n (P_1 - P_2)_{Rji}}{n} \quad (11)$$

con  $(P_1 - P_2)_{Rji}$  la presión de cada ensayo  $j$  para cada presión nominal  $i$  ya puesta en condiciones de referencia y  $n$  el número de medidas para cada presión nominal.

Corrección

Vendrá dada por la ecuación (12).

$$C_i = P_R - (P_1 - P_2)_i + \Delta_R \quad (12)$$

- c) Incertidumbre para una probabilidad de cobertura del 95,45%

La desviación típica experimental de las indicaciones de la columna según las ecuaciones (9) y (10) para cada presión nominal deberá ser del orden de la resolución.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Cálculo de incertidumbres

El cálculo de incertidumbres se realizará aplicando los criterios establecidos en la Guía para la expresión de la Incertidumbre de Medida editada por el Centro Español de Metrología [2] y la guía EA-4/02 "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration" [3].

En punto 6.1.1 se incluye el desarrollo del cálculo de incertidumbres y la explicación de cómo se calcula cada contribución a la incertidumbre. A continuación se facilita la tabla resumen a partir de la cual se puede realizar el cálculo de la incertidumbre asociada a la calibración de columnas de líquido de acuerdo con este procedimiento. La ecuación modelo para la corrección de calibración será la siguiente:

Magnitud $X_i$	Estimación $x_i$	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad $c_i$	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
Presión de referencia del patrón	$P_R$	$u(P_R)$	normal	1	$\frac{U_{\text{cert } P}}{k}$
Deriva del patrón	$\delta(\text{der})_{P_R}$	$u(\delta(\text{der})_{P_R})$	rectangular	1	$\frac{\text{der}(P)}{\sqrt{3}}$
Condiciones ambientales del patrón	$\delta(\text{amb})_{P_R}$	$u(\delta(\text{der})_{P_R})$	rectangular	1	$\frac{r_P \cdot P \cdot \delta t}{2\sqrt{3}}$
Resolución del patrón	$\delta(\text{res})_{P_R}$	$u(\delta(\text{res})_{P_R})$	rectangular	1	$\frac{\text{res}(P)}{2\sqrt{3}}$
Indicación de la columna	$(P_1 - P_2)_i$	$u((P_1 - P_2)_i)$	normal	-1	$-(s(P_1 - P_2)_i)$
Resolución de la columna	$\delta(\text{res})_C$	$u(\delta(\text{res})_C)$	rectangular	-1	$-\frac{\text{res}(C)}{2\sqrt{3}}$
Histéresis de la columna	$\delta(\text{his})_C$	$u(\delta(\text{his})_C)$	rectangular	-1	$-\frac{ (P_1 - P_2)_{\text{ibaj}} - (P_1 - P_2)_{\text{isub}} }{2\sqrt{3}}$
Densidad del líquido	$\delta(\rho_L)_C$	$u(\rho_L)$	rectangular	$-\frac{(P_1 - P_2)_i}{\rho_L(T_R)}$	$-\frac{u(\rho_L)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(P_1 - P_2)_i}{\rho_L(T_R)}$
Gravedad local	$\delta(g_L)_C$	$u(g_L)$	normal	$\frac{(P_1 - P_2)_i}{g_L}$	$-\frac{(P_1 - P_2)_i}{g_L} \cdot u(g_L)$
Temperatura	$\delta(t)_C$	$u(t)$	normal	$-\left(\frac{\rho'_L(t_R)}{\rho_L(t_R)} + \alpha\right) \cdot (P_1 - P_2)_i$	$-\left(\frac{\rho'_L(t_R)}{\rho_L(t_R)} + \alpha\right) \cdot (P_1 - P_2)_i \cdot u(t)$
Coefficiente de dilatación	$\delta(\alpha)_C$	$u(\alpha)$	rectangular	$-(t - t_R)_{\text{max}} \cdot (P_1 - P_2)_i$	$-(t - t_R)_{\text{max}} \cdot (P_1 - P_2)_i \cdot \frac{u(\alpha)}{\sqrt{3}}$
Inclinación	$\delta(\varphi)_C$	$\frac{1 - \cos(\varphi)}{\sqrt{3}}$	rectangular	$-(P_1 - P_2)_i$	$-(P_1 - P_2)_i \cdot \frac{1 - \cos(\varphi)}{\sqrt{3}}$
Diferencia de altura	$\Delta_R$	$u(\Delta_R)$	Ver anexo 1	1	Ver anexo 1
<b>Incertidumbre combinada</b>				$u(C_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^n u_k^2}$	
<b>Número de grados efectivos de libertad <math>v_{\text{eff}}</math></b>				$v_{\text{eff}} = \frac{u^4(C_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}}$	
<b>Factor de cobertura <math>k</math></b>				<b>Ver referencia [3] anexo E</b>	
<b>Incertidumbre expandida</b>				$U = k \cdot u(C_i)$	
<b>Corrección no realizada máxima</b>				$C_{\text{max}}$	
<b>Incertidumbre global de calibración</b>				$U = U_{\text{max}} + C_{\text{max}}$	

#### Desarrollo del cálculo de incertidumbres

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

$$C_i = P_R + \delta(der)_{P_R} + \delta(amb)_{P_R} + \delta(res)_{P_R} - ((P_1 - P_2) + \delta(res)_C + \delta(his)_C + \delta(\rho_L)_C + \delta(g_1)_C + \delta(t)_C + \delta(\alpha)_C + \delta(\varphi)_C + \Delta_R) \quad (16)$$

Las correcciones de la forma  $\delta(\quad)$  son de valor esperado nulo. Las incertidumbres asociadas serán

- a) 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 haya calculado la incertidumbre se podrá tomar como 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.

- b) Incertidumbre por deriva del patrón de presión,  $u(\delta(der)_{P_R})$

Se tomará la deriva como distribución rectangular, es decir, si la deriva del patrón es  $der(P)$  se tiene

$$u(\delta(der)_{P_R}) = \frac{der(P)}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

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.

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

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  $\delta t$ .

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  $\delta T$  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 momentos de la calibración actual. Tomándolo como una distribución rectangular se tiene

$$u(\delta(amb)_{P_R}) = \frac{r_p \cdot P \cdot \delta t}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

- d) Incertidumbre debida a la resolución del patrón de presión,  $u(\delta(res)_{P_R})$

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

$$u(\delta(res)_{P_R}) = \frac{res(P)}{2\sqrt{3}} \quad (19)$$

siendo  $res(P)$  la resolución del patrón de presión

e) Incertidumbre asociada a la indicación de la columna,  $u((P_1 - P_2)_i)$

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

$$u((P_1 - P_2)_i) = s((P_1 - P_2)_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n ((P_1 - P_2)_{Rji} - (P_1 - P_2)_i)^2}{n - 1}} \quad (20)$$

siendo  $(P_1 - P_2)_{Rji}$  cada una de las medidas de la columna para un mismo valor de presión nominal  $i$  referidas a condiciones de referencia según las ecuaciones (9) o (10).

f) Incertidumbre debida a la resolución de columna,  $u(\delta(res)_C)$

Es la incertidumbre debida a la resolución con que medimos la indicación de la columna, que puede ser mejorada si lleva un nonius acoplado. Será tratada como una distribución rectangular. Esto es,

$$u(\delta(res)_C) = \frac{res(C)}{2\sqrt{3}} \quad (21)$$

siendo  $res(C)$  la resolución de la columna en unidades de presión. Si la escala está en unidades de longitud y  $res(h)$  es la resolución de la escala se tiene

$$res(C) \cong \rho_L(t_R) \cdot g_L \cdot res(h) \cdot (1 + \alpha \cdot [t_R - t_0]) \quad (22)$$

g) Incertidumbre debida a la histéresis de la columna,  $u(\delta(his)_C)$

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

$$u(\delta(his)_C) = \frac{[(P_1 - P_2)_{ibaj} - (P_1 - P_2)_{isub}]}{2\sqrt{3}} \quad (23)$$

siendo  $(P_1 - P_2)_{ibaj}$  la media aritmética de las indicaciones medidas decreciendo la presión y  $(P_1 - P_2)_{isub}$  la media de las indicaciones medidas incrementando la presión para cada presión nominal generada  $i$ .

h) Incertidumbre debida a las características del líquido de la columna,  $u(\delta(\rho_L)_C)$

La incertidumbre dependerá de su pureza, composición y conocimiento que se tenga de la densidad. Normalmente el fabricante o suministrador del líquido dará una tolerancia  $u(\rho_L)$ , que se tomará como una distribución rectangular, es decir,

$$u(\delta(\rho_L)_C) \cong \frac{u(\rho_L)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(P_1 - P_2)_i}{\rho_L(t_R)} \quad (24)$$

i) Incertidumbre asociada a la gravedad local,  $u(\delta(g_L)_C)$

Vendrá dado por el informe de medida de la gravedad local o será 0,005% con  $k = 2$  si se utiliza la ecuación (3). Se toma como distribución rectangular, es decir,

$$u(\delta(g_L)_C) = \frac{U(g_L)}{k} \cdot \frac{(P_1 - P_2)_i}{g_L} \quad (25)$$

j) Incertidumbre debida a la temperatura,  $u(\delta(t)_C)$

La incertidumbre en temperatura influirá en la densidad del líquido y en la dilatación de la regla. Si la incertidumbre en temperatura es  $u(t)$  se tiene

$$u(\delta(t)_C) \cong \left( \frac{\rho'_L(t_R)}{\rho_L(t_R)} + \alpha \right) \cdot (P_1 - P_2)_i \cdot u(t) \quad (26)$$

con  $\rho'_L(t)$  la derivada de la función que da la densidad respecto de la temperatura. La incertidumbre en la medida de la temperatura  $u(t)$  dependerá del instrumento de medida y en general incluirá varias contribuciones tales como la asociada al certificado de calibración, deriva, resolución, etc.

k) Incertidumbre debida al coeficiente de dilatación de la escala de la columna,  $u(\delta(\alpha)_C)$

La dilatación de la escala dependerá de si es una regla adosada o está marcada en la misma columna. Si  $u(\alpha)$  es la incertidumbre del coeficiente de dilatación se tratará como una distribución rectangular, es decir

$$u(\delta(\alpha)_C) \cong (t_R - t)_{\max} \cdot (P_1 - P_2)_i \cdot \frac{u(\alpha)}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

con  $(t_R - t)_{\max}$  la máxima diferencia entre la temperatura medida y la de referencia para la presión de referencia  $i$ . La incertidumbre en el coeficiente de dilatación se obtendrá de las especificaciones del fabricante.

l) Incertidumbre debida a la inclinación de la escala de la columna,  $u(\delta(\varphi)_C)$

La corrección máxima por inclinación de la escala de la columna dependerá del instrumento con la que se asegure su verticalidad. Se tiene:

$$u(\delta(\varphi)_C) \cong (P_1 - P_2)_i \cdot \frac{1 - \cos(\varphi)}{\sqrt{3}} \quad (28)$$

con  $\varphi$  el error máximo que se puede cometer al asegurar la verticalidad, por ejemplo, con un nivel de burbuja puede ser  $1^\circ$ .

m) Incertidumbre asociada a la diferencia de alturas entre patrón e instrumento a calibrar,  $u(\Delta_R)$

Esta corrección viene dada por la ecuación (8). Su incertidumbre típica vendrá dada por:

$$u(\Delta_R) \cong \sqrt{(g_1 \cdot l \cdot u(\rho_g))^2 + ((\rho_g - \rho_a) \cdot g_1 \cdot u(l))^2} \quad (29)$$

Las contribuciones debidas a la incertidumbre de la gravedad y a la incertidumbre de la densidad del aire son despreciables

a) Incertidumbre asociada a la densidad del fluido, que será  $g_1 \cdot l \cdot u(\rho_g)$

Se obtendrá de tomar la ecuación de los gases perfectos (8) si el fluido es un gas o viene dada por el fabricante en el caso de que el fluido sea líquido o por otras fórmulas [6].

b) Incertidumbre asociada a la medida de la diferencia de alturas, que será  $(\rho_g - \rho_a) \cdot g_1 \cdot u(l)$ .

La incertidumbre en la altura dependerá del instrumento con el que se mida y el método.

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

$$u(C_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^n u_k^2} \quad (30)$$

donde  $u_k$  es cada una de las contribuciones a la incertidumbre que se han visto.

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

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(C_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (31)$$

donde  $\nu_i$  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  $\nu_i$  conocido (por ejemplo el indicado en el certificado de calibración en su caso). En nuestro caso se tiene

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(C_i)}{\frac{u((P_1 - P_2)_i)^2}{n-1} + \frac{u(\delta(t))^2}{\nu_t} + \frac{u(\Delta_R)^2}{\nu_\Delta}} \quad (32)$$

con  $\nu_t$  y  $\nu_\Delta$  los grados efectivos de libertad para la incertidumbre de la medida de la temperatura y la asociada a la diferencia de alturas respectivamente. Estos grados efectivos de libertad se calcularán mediante la fórmula de Welch-Satterthwaite [3] dependiendo de cada 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%.

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

**Tabla 1: Factores de cobertura  $k$  para diferentes grados de libertad  $\nu_{\text{eff}}$ .**

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

$$U = k \cdot u(C_i) \quad (33)$$

Según la referencia [2] 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,

$$U = U_{\text{max}} + |C_{\text{max}}| \quad (34)$$

## 6.2. Interpretación de resultados

A continuación se mostrará cómo corregir los datos a partir del certificado.

Si la escala de la columna está en unidades de presión los resultados habrán de corregirse según la gravedad local  $g$  del lugar y la temperatura ambiente  $t$  de acuerdo con la ecuación siguiente,

$$P_1 - P_2 = (C_i + (P_1 - P_2)_i) \cdot \frac{\rho_L(t)}{\rho_L(t_R)} \cdot \frac{g_1}{g_n} \cdot \frac{(1 + \alpha \cdot [t - t_0])}{(1 + \alpha \cdot [t_R - t_0])} \quad (13)$$

con  $t_R$  la temperatura de referencia que conste en el certificado de calibración y  $C_i$  es la corrección de la indicación.

Si la escala está en unidades de longitud y las correcciones en unidades de presión se tiene con las notaciones anteriormente utilizadas

$$P_1 - P_2 = C_i + \rho_L(t) \cdot g_1 \cdot h_i \cdot (1 + \alpha \cdot [t - t_0]) \quad (14)$$

Si la presión está muy próxima a una presión del certificado de calibración la corrección será la misma que establece el certificado para esa presión. En caso contrario se hace una interpolación lineal de las correcciones, es decir, dado que conocemos las correcciones en la presión  $i - 1$  y en la presión  $i + 1$  la corrección en la presión  $i$  será

$$C_i = C_{i-1} + [(P_1 - P_2)_i - (P_1 - P_2)_{i-1}] \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{(P_1 - P_2)_{i+1} - (P_1 - P_2)_{i-1}} \quad (15)$$

con  $(P_1 - P_2)_i$  las presiones de referencia del certificado.

Para las columnas de líquido no existen normas que especifiquen tolerancias o criterios de aceptación de los resultados de la calibración. Cuando en algún caso concreto se establezcan, la declaración de cumplimiento o no cumplimiento con los mismos, se hará siempre considerando los errores o desviaciones obtenidos teniendo además en cuenta las incertidumbres.

El periodo de recalibración dependerá de la conservación de la cantidad del líquido de la columna, excepto para los que se puede ajustar el nivel de referencia, así como del mantenimiento de su pureza. Si el líquido se contamina o se varía su cantidad y no hay posibilidad de ajuste del nivel de referencia será necesaria una nueva calibración. Los periodos de recalibración serán establecidos en función de la estabilidad, propósito y uso del instrumento, de manera que se asegure que la variación del error producido mientras se está utilizando el instrumento, entre dos calibraciones sucesivas, no son superiores a la incertidumbre típica debida a la deriva del instrumento, considerada en el cálculo de incertidumbres. No obstante el responsable final de asignar el período de recalibración, y revisarlo cuando sea preciso, es siempre el usuario del equipo.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Vocabulario Internacional de Metrología VIM, 3ª edición 2012 (español).
- [2] Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. Edición digital. EDICIÓN DIGITAL 1 en español (traducción 1ª Ed. Sept. 2008)..
- [3] Density of mercury –measurements and reference values. H Bettin y H Fehlauer. Metrologia 41(2004) S16-S23
- [4] The selection of water property formulae for volume and flow calibration. E. Batista y R. Paton. Metrología 44 (2007) 453-463.
- [5] The Pressure Balance: Theory and Practice. R.S.Dadson, S.L.Lewis, G.N.Peggs. National Physics Laboratory. Ed 1982

[6] Solid and liquid density determination: F:Spieweck, H: Bettin. TechnischesMessen 59 (1992).

## 8. ANEXOS

### EJEMPLO DE APLICACIÓN

#### a) Datos de partida.

Se quiere calibrar un barómetro tipo Fortín de 800 hPa a 1200 hPa. Las condiciones en las que se realiza la calibración son las siguientes:

Temperatura:  $20 \pm 2^\circ\text{C}$

Humedad:  $< 60\%$

Gravedad local:  $9,79985 \text{ m/s}^2$ ,  $U(k=2)=0,005\%$

Fluido de trabajo: Aire

#### b) Datos de la columna

Registro: 0000

Marca: ---

Modelo: Fortín

Nº serie: ---

Rango: (800 a 1200)hPa

Fluido: Mercurio

Resolución: 0,1 hPa

Coefficiente de dilatación:  $(18,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (bronce)

Temperatura de referencia de la escala:  $0^\circ\text{C}$

El efecto de la pureza del mercurio es despreciable así como la incertidumbre del coeficiente de dilatación de la escala. Para la densidad se utilizará la ecuación de Ambrose (3) ya descrita anteriormente. La máxima inclinación de la escala es  $0,5^\circ$ .

La calibración se realizará en los siguientes puntos:

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

#### c) Datos del patrón:

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

Registro: Patrón-01

Marca: ---

Modelo: Piezoeléctrico

Nº serie: ---

Rango: (0 a 1300) hPa

Incertidumbre: 10 Pa ( $k = 2$ )

Deriva: 10 Pa

Resolución: 1 Pa

Influencia de la temperatura: 0,004% de la lectura por grado Celsius

Temperatura de calibración:  $20^\circ\text{C}$

En la incertidumbre se ha sumado la corrección máxima del equipo. Como consecuencia no se van a realizar correcciones de las indicaciones del patrón por sus desviaciones de calibración.

El termómetro tiene una incertidumbre de uso de  $0,1^\circ\text{C}$  ( $k = 2$ ), habiéndose también sumado la corrección máxima del termómetro.

La corrección por diferencia de alturas es despreciable para estas presiones.

Para la presión de referencia de 800 hPa, que es igual a la presión patrón se obtiene la presión en condiciones de referencia utilizando la ecuación (10). La temperatura de referencia es 20 °C.

Presión indicada (hPa)	Temperatura (°C)	Presión en condiciones de referencia (hPa)
800,8	20,07	800,27
800,8	20,03	800,26
800,7	20,05	800,16
800,6	20,10	800,07
800,8	20,08	800,27
800,6	20,06	800,06

La corrección es -0,2 hPa, que se obtiene a partir de las ecuaciones (10), (12) y (13).

La evaluación de incertidumbres para esta presión es

<i>Magnitud</i> $X_i$	<i>Estimación</i> $x_i$	<i>Incertidumbre típica</i> $u(x_i)$	<i>Distribución de probabilidad</i>	<i>Coficiente de sensibilidad</i> $c_i$	<i>Contribución a la incertidumbre</i> $u_i(y)$
Presión de referencia del patrón	800 hPa	$\frac{0,1}{2}$ hPa	normal	1	0,05 hPa
Deriva del patrón	0	$\frac{0,1}{\sqrt{3}}$ hPa	rectangular	1	0,058 hPa
Condiciones ambientales del patrón	0	$\frac{4 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1 \cdot 800}{\sqrt{3}}$ hPa	rectangular	1	0,0018 hPa
Resolución del patrón	0	$\frac{0,01}{\sqrt{12}}$ hPa	rectangular	1	0,0029 hPa
Indicación de la columna	800,2 hPa	0,049 hPa <sup>(1)</sup>	normal	-1	-0,04 hPa
Resolución de la columna	0	$\frac{0,01}{\sqrt{12}}$ hPa	rectangular	-1	-0,029 hPa
Histéresis de la columna	0	$\frac{800,27-800,06}{\sqrt{12}}$ hPa	rectangular	-1	-0,019 hPa
Gravedad local	9,799 85 m/s <sup>2</sup>	$\frac{0,005}{\sqrt{12}}$ %	normal	-800,2 hPa	-0,02 hPa
Temperatura	20°C	$\frac{0,1}{2}$ °C	normal	-0,16 hPa/°C <sup>(2)</sup>	-0,008 hPa
Inclinación	0	$\frac{1 - \cos(0,5^\circ)}{\sqrt{3}}$	rectangular	-800,2 hPa	-0,018 hPa
<b>Incertidumbre combinada</b>				0,10 hPa	
<b>Número de grados efectivos de libertad <math>\nu_{ef} =</math></b>				190	
<b>Factor de cobertura <math>k =</math></b>				2,01	
<b>Incertidumbre expandida</b>				0,2 hPa <sup>(3)</sup>	
<b>Corrección no realizada máxima</b>				0	
<b>Incertidumbre global de calibración</b>				0,2 hPa	

<sup>(1)</sup>Desviación típica según ecuación (20).

<sup>(2)</sup>Se obtiene de aplicar la ecuación (26) a la ecuación de Ambrose (2) y el valor dado del coeficiente de dilatación junto con el valor de la presión patrón.

<sup>(3)</sup>Se ajusta la incertidumbre a la resolución de la columna.

Los datos obtenidos durante la calibración son los siguientes:

Presión indicada por el patrón (hPa)	Presión indicada por el barómetro (hPa)	Temperatura (°C)
800	800,8	20,07
800	800,8	20,03
800	800,7	20,05
800	800,6	20,1
800	800,8	20,08
800	800,6	20,06
900	900,7	20,02
900	900,8	20,03
900	900,6	20,03
900	900,6	20,01
900	900,7	20,03
900	900,8	20,04
1000	1000,9	19,98
1000	1000,8	20
1000	1000,7	20,02
1000	1000,9	20,01
1000	1000,8	20,01
1000	1000,7	20,04
1100	1101,2	20,01
1100	1101,2	20,02
1100	1101,1	20,02
1100	1101,2	20,03
1100	1101,2	20
1100	1101,0	20,05
1200	1201,0	20,03
1200	1201,2	20,05
1200	1201,1	20,04
1200	1201,2	20,03
1200	1201,1	20,06
1200	1201,0	20,01

Los resultados son:

Presión patrón (hPa)	Presión indicada por el barómetro en condiciones de referencia (hPa)	Corrección (hPa)	Incertidumbre ( $k=2$ ) (hPa)
800	800,2	-0,2	0,2
900	900	0	0,2
1 000	1 000,2	-0,1	0,2
1 100	1 100,4	-0,4	0,2
1 200	1 200,2	-0,2	0,2

# Metrología

NIPO: 113-20-002-9