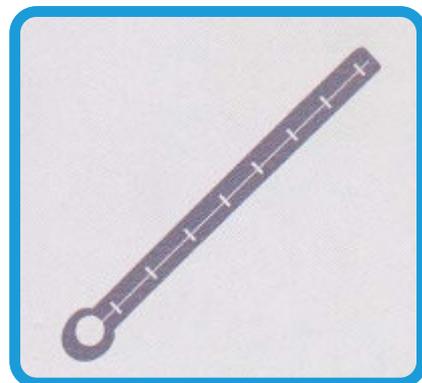
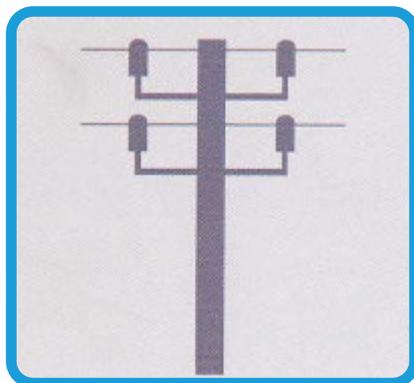
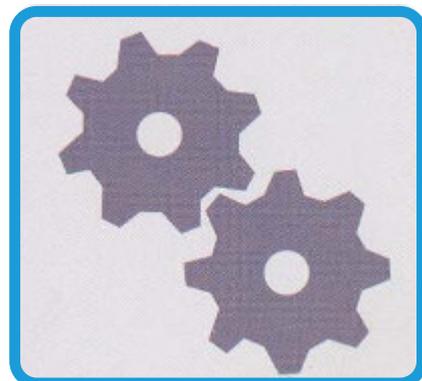
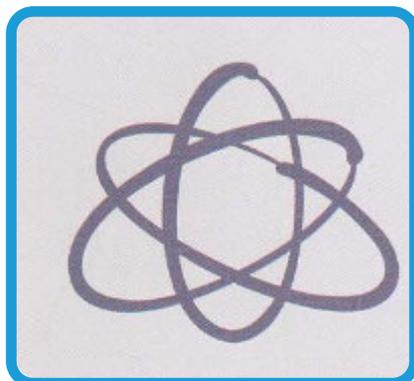
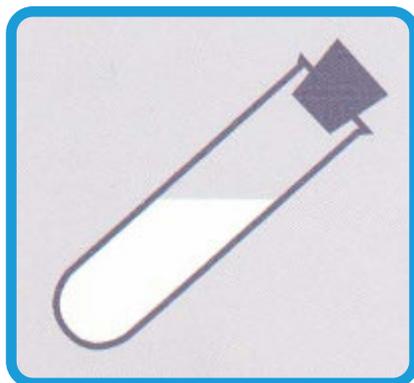
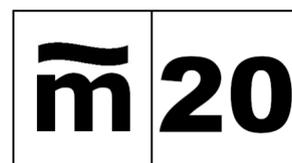


Metrología



PROCEDIMIENTO ME-020 PARA LA
CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE
PRESIÓN DIFERENCIAL



PROCEDIMIENTO ME020

CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

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
	2
1. OBJETO	3
2. ALCANCE	3
3. DEFINICIONES	3
4. GENERALIDADES	3
4.1. Abreviaturas.....	3
5. DESCRIPCIÓN	5
5.1. Equipos y materiales	5
5.2. OPERACIONES PREVIAS	6
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.....	10
7. REFERENCIAS.....	11
8. ANEXOS	12

1. OBJETO

Este procedimiento tiene por objeto dar a conocer un método de calibración de medidores de presión diferencial con indicación directa en unidades de presión.

2. ALCANCE

El presente procedimiento es de aplicación a medidores de presión diferencial con indicación directa en unidades de presión.

Quedan fuera del alcance de este procedimiento los transmisores y transductores de presión diferencial.

3. DEFINICIONES

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

4. GENERALIDADES

Un manómetro de presión diferencial es un dispositivo que mide la diferencia entre dos presiones. Está formado por un elemento sensible a la presión, un sistema de transmisión de la presión, un indicador y dos tomas de conexión.

El elemento sensible a la presión puede estar constituido por un tubo bourdon, una membrana, una cápsula o un fuelle, normalmente en manómetros diferenciales de indicación analógica, o por un transductor o transmisor de presión en manómetros diferenciales de indicación digital.

El sistema de transmisión suele estar constituido, en manómetros analógicos, por una serie de piñones y sectores dentados que amplifican la señal del elemento sensible transformándola en una variación angular. En manómetros digitales, por un circuito que estabiliza, amplifica y transforma la señal del elemento sensible.

El sistema de lectura facilita una indicación directa, en unidades de presión, de la presión a la que está sometido el elemento sensible a la presión.

Las tomas de presión sirven para conectar el manómetro al circuito a medir. Las conexiones se hacen a través de racores adecuados. De las dos tomas, una sirve para conectar la presión de línea o presión de baja, que es la presión que vamos a usar como cero. Esta toma suele ir marcada por el fabricante como "low" o "PL". La otra toma de presión sirve para conectar la presión de alta. Normalmente va marcada como "High" o "PH".

Para la calibración de un manómetro diferencial, es necesario el uso de dos patrones de presión, uno se utiliza para medir la presión de línea o presión de baja y el otro para medir la presión de alta. Dependiendo de la clase de exactitud del manómetro a calibrar se pueden usar como patrones de calibración balanzas de presión o manómetros digitales.

4.1. Abreviaturas

- $A_{(0,t_0)}$ Área efectiva del conjunto pistón cilindro a presión cero y temperatura de referencia
- C Corrección por calibración del manómetro de presión diferencial objeto de calibración.
- ca_i Condiciones ambientales del medidor diferencial.

Cir	Longitud de la circunferencia del pistón.
C_{max}	Corrección máxima por calibración del manómetro de presión diferencial objeto de calibración.
C_P	Corrección del patrón.
$F.S.$	Fondo de escala del manómetro diferencial.
g_l	Valor de la gravedad local.
H	Altitud sobre el nivel del mar, en m.
his	Histéresis.
$H.R.$	Humedad relativa.
I	Indicación del instrumento.
k	Factor de cobertura.
M	Masa total colocada en la balanza de presión; esta masa incluye la masa del pistón y las masas que se colocan sobre éste. Normalmente se trabaja con valores convencionales de masa.
n	Número de medidas para cada punto de calibración.
P	Presión.
P'	Presión corregida.
P_{amb}	Presión atmosférica.
P_H	Presión por la toma de alta
P_{Ho}	Presión por la toma de baja en el momento inicial, medida con el patrón de referencia conectado en la toma de alta cuando la válvula de "bypass" está abierta.
P/C	Conjunto pistón cilindro.
P_N	Presión nominal.
res	Resolución.
t	Temperatura del conjunto pistón cilindro durante su utilización, en °C.
t_{amb}	Temperatura ambiente.
t_0	Temperatura de referencia del conjunto pistón cilindro.
$u(y)$	Incertidumbre típica combinada.
$u_i(y)$	Contribuciones a la incertidumbre típica combinada.
U	Incertidumbre expandida.
V	Volumen del pistón sometido a empuje.
α	Coefficiente de dilatación térmica del P/C ($\alpha = \alpha_c + \alpha_p$).
α_c	Coefficiente de dilatación térmica lineal del cilindro.

- α_p Coeficiente de dilatación térmica lineal del pistón.
- Δh Diferencia de altura entre los niveles de referencia del patrón de referencia y el manómetro diferencial. Si el nivel de referencia del patrón está a más altura que el nivel de referencia del medidor diferencial, Δh es positivo, en caso contrario es negativo.
- $\delta A_{(0,t_0)}$ Corrección debido a la deriva del área efectiva del conjunto pistón cilindro a presión nula y temperatura de referencia
- δ_{cero} Corrección debido a la estabilidad del cero durante la calibración.
- δM Corrección debido a la deriva de la masa entre calibraciones.
- δP_{cai} Corrección debida a las condiciones ambientales sobre el manómetro de presión diferencial.
- δP_{cap} Corrección debida a las condiciones ambientales sobre el manómetro de referencia
- δP_{cero} Corrección debida a la estabilidad del cero o de la presión de línea.
- δP_{der} Corrección debida a la deriva del patrón entre calibraciones.
- δP_{his} Corrección debida a la histéresis del manómetro de presión diferencial.
- δP_{res} Corrección debida a la resolución del indicador del manómetro de presión diferencial.
- ϕ Latitud local, en radian.
- λ Coeficiente de deformación con la presión del conjunto pistón cilindro.
- ρ_a Densidad del aire.
- ρ_f Densidad del fluido transmisor de la presión.
- ρ_M Densidad de las masas.
- σ Coeficiente de tensión superficial del fluido transmisor de la presión. En el caso de que el fluido transmisor de la presión sea un gas vale cero.
- ν_{eff} Grados de libertad efectivos.
- ν_i Grados de libertad efectivos a cada contribución.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

5.1.1. Instrumentos de medida

Como instrumentos de medida patrón se utilizan o dos balanzas de presión, o una balanza de presión y un manómetro digital, o dos manómetros digitales. Los patrones utilizados deben cubrir el intervalo de medida del manómetro diferencial a calibrar, deben tener una clase de exactitud adecuada para poder realizar una correcta calibración del manómetro diferencial y además deben poseer un certificado de calibración en vigor que asegure la trazabilidad. En la medida de lo posible su incertidumbre de medida debe ser como máximo un tercio de la del instrumento a calibrar.

Además, se utilizarán los siguientes instrumentos de medida auxiliar:

- Un barómetro; Rango: (850 a 1150) hPa; $U = \pm 1$ hPa, para $k = 2$.
- Un higrómetro; $U = \pm 5\%$ H. R, para $k = 2$.
- Sondas de temperatura para la medida de la temperatura ambiente y de la temperatura de los conjuntos pistón cilindro, en el caso de que alguno de los patrones utilizados sea una balanza de presión; Rango: (15 a 30) °C; $U = \pm 0,2$ °C, para $k = 2$.
- Una regla; $U = \pm 0,5$ mm, para $k = 2$.
- Nivel de burbuja, sólo si alguno de los patrones es una balanza de presión.; $U = \pm 1^\circ$, para $k = 2$

U es la incertidumbre máxima aconsejable para estos instrumentos de medida auxiliares.

5.1.2. Equipos auxiliares

- Válvulas, racores y tuberías adecuados para la conexión de los instrumentos. Estas deben de ser compatibles con el fluido utilizado y capaces de soportar las presiones del sistema.
- Generadores y controladores de presión (automáticos o manuales).
- Herramienta común (Llaves fijas, destornilladores, llaves allen, etc.).

5.1.3. Material

- Fluido de transmisión de la presión compatible con el patrón y con el instrumento a calibrar.
- Productos de limpieza compatibles con el patrón y con el instrumento a calibrar y que no desprendan impurezas.
- Guantes, en el caso de que algún patrón sea una balanza de presión.

5.2. Operaciones previas

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

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

El laboratorio donde se realicen las medidas no debe ser un lugar de tránsito frecuente con el fin de evitar corrientes de aire.

Se estudiará el manual de operación del manómetro diferencial, de forma que la persona que realice la calibración se asegure de que conoce su funcionamiento. Se dispondrá también de las instrucciones de ajuste del fabricante por si en el transcurso de la calibración se determinara la necesidad de ajustarle.

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

Se comprobará el estado de limpieza del elemento sensible a la presión y del racord de conexión del manómetro de presión diferencial. En el caso de que estuviera sucio se procederá a su limpieza siguiendo las indicaciones de su manual o se comunicará al cliente con el fin de tomar una decisión sobre el procedimiento a seguir.

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

En el caso de que alguno de los patrones utilizados sea una balanza de presión, la mesa donde se sitúe ésta debe soportar el peso de la misma sin flexar. Se nivelará la balanza con un nivel de burbuja para garantizar la verticalidad del conjunto pistón-cilindro. En el caso en que la balanza no lleve acoplado uno, se usará uno externo situándole para la nivelación sobre el pistón.

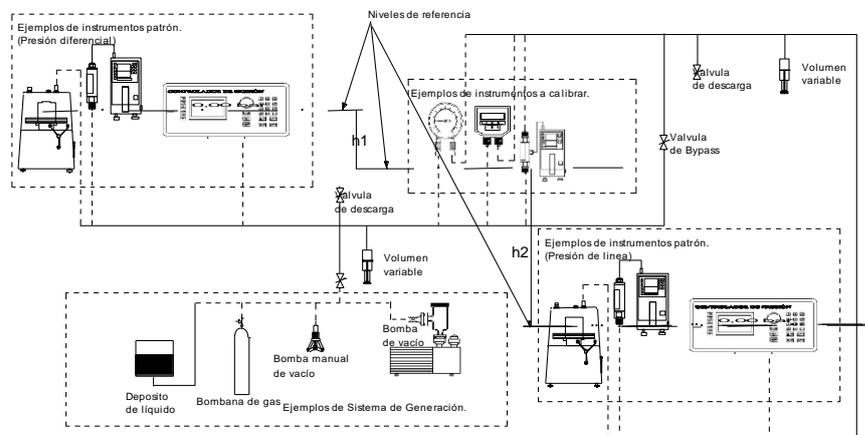
Se conectarán los patrones con el manómetro diferencial procurando que el circuito sea lo más corto y con el menor número de conexiones posibles, para que las medidas se puedan hacer de la manera más estable y reproducible. En el caso de que el fluido transmisor de la presión sea un líquido, debe existir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

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

Se colocará una válvula de bypass entre las tomas de conexión de baja y alta presión del manómetro diferencial con el propósito de hacer el cero del manómetro diferencial.

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

Se seguirá el siguiente esquema. Los instrumentos que aparecen son sólo a título de ejemplo.



5.3. Proceso de calibración

La calibración consiste en la determinación de la corrección del instrumento y la incertidumbre de ésta, para una serie de valores de presión distribuidos aproximadamente de forma uniforme a lo largo de todo el rango de medida del manómetro diferencial. Esta determinación se realizará a distintas presiones de línea. Es aconsejable la realización de la calibración al menos a tres presiones de línea: A presión atmosférica; a la presión de utilización del manómetro y a dos veces la presión de utilización del manómetro, siempre que las características físicas del manómetro lo permitan.

La calibración se realiza por comparación directa de las indicaciones de presión manómetro diferencial y las presiones generadas por los patrones, para cada una de las presiones de línea.

Para la calibración se realizarán al menos tres series de medida de seis puntos de calibración, para cada presión de línea, tal como se explica a continuación. Es aconsejable incrementar el número de puntos.

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

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

Durante la realización del punto de presión cero las dos tomas del manómetro estarán comunicadas a través de la válvula de “bypass”, para el resto de los puntos dicha válvula permanecerá cerrada. En ese momento se registrará el valor indicado por los dos patrones. El valor indicado por el patrón conectado en la toma de alta presión constituye P_{H0} y el valor indicado por el patrón conectado en la toma de baja presión es el valor que hay que mantener a lo largo de la calibración en dicha toma.

Si el manómetro tiene algún dispositivo de puesta a cero o tara, se podrá optar por:

- Al inicio de cada serie de medida, comunicar las tomas de baja presión y alta presión mediante la válvula de “bypass”, de esta manera se igualan las dos presiones; generar la presión de línea y se acciona el dispositivo de puesta a cero o tara. Esta operación también se hará durante el uso del manómetro diferencial.
- No accionar el dispositivo de puesta a cero para evaluar la variación del cero del instrumento con respecto a la presión de línea.

La generación de la presión se efectuará mediante:

- La compresión del fluido de transmisión para incrementar la presión y la descompresión del mismo para disminuir la presión en el caso de que el fluido sea

un líquido. Estas maniobras se llevan a cabo a través de controladores de presión o de un volumen variable.

- El aporte de fluido para incrementar la presión de una fuente que se encuentre a una presión superior y la expulsión del mismo para disminuir la presión a una fuente a una presión inferior, cuando el fluido es un gas. Estas maniobras se llevan a cabo a través de controladores de presión o de un juego de válvulas de aguja.

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

El patrón conectado por el lado de baja presión sirve únicamente para mantener fija la presión de línea y evaluar la variación del cero, siendo los valores del patrón conectado por el lado de alta presión los que se usan para calcular la presión de referencia.

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:

1. Para cada punto de calibración:
 - a. Indicación de los dos patrones de referencia.
(En el caso de que alguno de los patrones de referencia sea una balanza de presión se tomará la masa colocada sobre el pistón y la temperatura de este si la balanza está equipada con un sistema de medida de la temperatura del conjunto pistón cilindro).
 - b. Indicación del manómetro diferencial.
2. Al principio y al final de la calibración:
 - a. La temperatura ambiente.
 - b. La humedad relativa o la temperatura de rocío.
 - c. La presión barométrica (en el caso de que se vaya a calcular la densidad del aire a partir de las condiciones ambientales reales).
3. Una única vez durante la calibración.
 - a. Diferencia de alturas, medida con la regla, entre los niveles de referencia de los patrones y del manómetro diferencial.

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

4. La presión de referencia, como la diferencia entre la presión de referencia en la parte de alta presión del manómetro diferencial medida con el patrón de alta y la presión de referencia en la parte de baja presión del manómetro diferencial medida con el patrón de alta con la válvula de bypass abierta.
5. La indicación media del manómetro diferencial.
6. La corrección como la diferencia entre la presión de referencia y la indicación del manómetro diferencial.
7. La incertidumbre expandida de la corrección del manómetro de presión diferencial para cada punto de calibración, para un intervalo de confianza de aproximadamente el 95,45 %.

El cálculo de la presión de referencia, en el lado de alta o en el lado de baja del manómetro diferencial, y su incertidumbre se desarrolla en el Anexo 3 si el patrón es una balanza de pesos muertos y en el Anexo 4 si el patrón es un medidor de presión.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

El cálculo de incertidumbres se realizará aplicando los criterios establecidos en [2] y [3].

En el Anexo 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 un manómetro diferencial de acuerdo con este procedimiento.

Magnitud X_i	Valor Estimado x_i	Incertidumbre Típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
Presión de referencia	$(P_H - P_{Ho})$	$u(P_H - P_{Ho})$	Normal	1	$u(P_H - P_{Ho})$
Indicación del instrumento	I	$u(I)$	Normal	-1	$-u(I)$
Resolución	δP_{res}	$u(\delta P_{res})$	Rectangular	1	$u(\delta P_{res})$
Histéresis	δP_{his}	$u(\delta P_{his})$	Rectangular	1	$u(\delta P_{his})$
Condiciones ambientales del instrumento	δP_{cai}	$u(\delta P_{cai})$	Rectangular	1	$u(\delta P_{cai})$
Estabilidad del cero	δP_{cero}	$u(\delta P_{cero})$	Rectangular	1	$u(\delta P_{cero})$
		Incertidumbre combinada			$u(C) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)}$
		Número de grados de libertad efectivos $\nu_{eff} =$			$\nu_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^m \frac{u_i^4}{\nu_i}}$
		Factor de cobertura $k =$			$k = f(\nu_{eff})$
		Incertidumbre expandida ($k =$)			$U = ku(C)$
		Corrección no realizada máxima			C_{max}
		Incertidumbre global de calibración			$C_{max} + U$

En el Anexo 2 se incluye un ejemplo numérico de aplicación del cálculo de incertidumbres.

6.2. Interpretación de resultados

Los resultados serán presentados en un certificado de calibración en el que aparecerá:

- Una tabla para cada presión de línea donde se indicará:
 - La presión de línea.

- La presión de referencia, como la diferencia entre la presión de referencia por el lado de alta y la presión de referencia por el lado de baja del manómetro diferencial.
 - La indicación del instrumento.
 - La corrección.
 - La incertidumbre expandida asociada a la corrección del manómetro de presión diferencial para un intervalo de confianza de aproximadamente el 95,45 %.
- Las condiciones ambientales durante la calibración.
 - El nivel de referencia elegido en el manómetro diferencial, cuando sea significativo sobre los resultados finales.
 - Posición del instrumento durante la calibración, cuando sea significativo sobre los resultados finales.
 - El fluido transmisor de la presión utilizado.
 - El número de series de medida realizado.
 - En el caso de que la indicación del instrumento no sea en la unidad del Sistema Internacional, la relación entre ésta y la unidad de presión en el Sistema internacional.

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

En caso de que sea necesario realizar un ajuste, se procederá a una nueva calibración completa, y en el certificado de calibración figuren los resultados de la calibración antes y después de los ajustes realizados.

Antes de la realización de un ajuste se deberá informar al propietario de equipo solicitándole su consentimiento.

Se recomienda que el periodo de recalibración para este tipo de equipos no exceda de doce meses.

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. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). CEM. 3ª edición en español. 2012.
- [2] 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)
- [3] EA-4/02 M 2013. Evaluación de la incertidumbre de medida en las calibraciones.
- [4] UNE-EN 472 Manómetros. Vocabulario. Ed. 1. AENOR, 1996.

8. ANEXOS

ANEXO 1.- Desarrollo del cálculo de incertidumbres.

ANEXO 2.- Ejemplo numérico.

ANEXO 3.- Cálculo de la presión y su incertidumbre en balanzas de presión.

ANEXO 4.- Cálculo de la presión y su incertidumbre en medidores de presión.

ANEXO 1

DESARROLLO DEL CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

El cálculo de incertidumbres se realizará aplicando los criterios establecidos en [2] y [3].

A continuación, se desarrolla el cálculo de incertidumbre para una presión de línea determinada, para las demás presiones de línea habrá que proceder de la misma manera.

- a) La corrección en la calibración de un manómetro diferencial se obtiene de:

$$C = (P_H - P_{H0}) - I + \delta P_{\text{res}} + \delta P_{\text{his}} + \delta P_{\text{cai}} + \delta P_{\text{cero}} \quad (1)$$

- b) Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (1) se obtienen las contribuciones a la incertidumbre de la corrección:

Magnitud	Valor Estimado	Incertidumbre Típica	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
Presión de referencia	$(P_H - P_{H0})$	$u(P_H - P_{H0})$	Normal	1	$u(P_H - P_{H0})$
Indicación del instrumento	I	$u(I)$	Normal	-1	$u(I)$
Resolución	δP_{res}	$u(\delta P_{\text{res}})$	Rectangular	1	$u(\delta P_{\text{res}})$
Histéresis	δP_{his}	$u(\delta P_{\text{his}})$	Rectangular	1	$u(\delta P_{\text{his}})$
Condiciones ambientales del instrumento	δP_{cai}	$u(\delta P_{\text{cai}})$	Rectangular	1	$u(\delta P_{\text{cai}})$
Estabilidad del cero	δP_{cero}	$u(\delta P_{\text{cero}})$	Rectangular	1	$u(\delta P_{\text{cero}})$

- c) A continuación, se desarrolla el cálculo de la incertidumbre típica de cada magnitud de entrada:

- a. $(P_H - P_{H0})$ Es la presión de referencia, la cual se obtiene como la diferencia entre la presión medida por el patrón conectado en el lado de alta para los distintos puntos de calibración y para el cero.

P_H es la presión de referencia en la toma de alta presión del manómetro diferencial.

P_{H0} es la presión de referencia en la toma de baja presión del manómetro diferencial. Su valor se toma con el patrón conectado en la toma de alta presión cuando se hace el cero del manómetro diferencial, en ese momento la válvula de "bypass" está abierta. El patrón conectado en la toma de baja presión sólo se utiliza para mantener la presión de línea y para poder medir la estabilidad del cero.

Teniendo en cuenta que P_H y P_{H0} se miden con el mismo medidor y que existe correlación entre las dos medidas incertidumbre típica de $(P_H - P_{H0})$ se obtiene de:

$$u(P_H - P_{H0}) = u(P_H) - u(P_{H0}) \quad (2)$$

El valor y la incertidumbre típica de P_H y P_{H_0} se calculan según se desarrolla en los Anexos 3 y 4, dependiendo del tipo de patrón utilizado.

- b. I Es la indicación del manómetro diferencial.
La contribución a la incertidumbre de las indicaciones del manómetro para una misma presión es:

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

- c. δP_{res} es la corrección debida a la resolución del manómetro diferencial.

Una de las fuentes de incertidumbre de un instrumento es la resolución de su dispositivo indicador. Aunque, por ejemplo, las indicaciones repetidas fueran todas idénticas, la incertidumbre de medición atribuible a la repetibilidad no sería igual a cero, puesto que para un campo dado de señales de entrada al instrumento, dentro de un intervalo conocido, se obtendría la misma indicación. Si la resolución del dispositivo indicador es δx , el valor de la señal de entrada que produce una indicación dada X puede situarse con igual probabilidad en cualquier punto dentro del intervalo que va desde $(X - \delta x/2)$ a $(X + \delta x/2)$. La señal de entrada puede describirse por medio de una distribución rectangular de rango δx y varianza $u^2 = (\delta x)^2/12$, lo que supone una incertidumbre típica $u = \frac{\delta x}{2\sqrt{3}}$ para cualquier indicación. (apartado F.2.2.1, de ref [2])

En un instrumento digital la resolución, δx , se corresponde con el mínimo incremento del dígito estable menos significativo. En un instrumento analógico se corresponde con el mínimo incremento de presión que somos capaces de apreciar en la escala del instrumento.

- d. δP_{his} es la corrección debida a la histéresis.

La indicación del manómetro diferencial puede diferir en una cierta magnitud fija y conocida dependiendo de si las sucesivas lecturas son alcanzadas incrementando presión o disminuyendo. El operador puede tomar nota de la dirección en al que se realizan las lecturas sucesivas, y llevar a cabo la corrección correspondiente. Sin embargo, la dirección de la histéresis no siempre es observable: pueden existir oscilaciones ocultas en el instrumento alrededor de un punto de equilibrio, de tal manera que la lectura depende de la dirección desde la que se realiza la aproximación a este punto. Si el intervalo de posibles lecturas originado por este motivo es δP_{his} , la varianza es nuevamente $u^2 = (\delta x)^2/12$ y la incertidumbre típica debida a la histéresis es $u = \frac{\delta x}{2\sqrt{3}}$ (apartado F.2.2.2, de ref [2])

δh_{his} es igual a la diferencia máxima, en valor absoluto, entre los valores obtenidos incrementando y disminuyendo presión.

- e. δP_{cai} es la corrección debida a las condiciones ambientales del manómetro diferencial.

Los manómetros diferenciales sufren variaciones en su indicación debido a la variación de temperatura δt . La corrección debido a esta variación es difícil ya que no responden a un fenómeno físico como pudiera ser una dilatación, por consiguiente tiene que ser incluida como una componente de incertidumbre.

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

Los fabricantes suelen especificar el comportamiento de los manómetros diferenciales con la temperatura como un porcentaje, respecto de la indicación o del fondo de escala del manómetro diferencial, de la variación de la presión respecto a la variación de temperatura ($\delta P / ^\circ C$).

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

- f. δP_{cero} es la corrección debido a la estabilidad del cero durante la calibración.

Durante la calibración se ha tratado de mantener el valor de presión de línea P_{Ho} utilizando el patrón conectado en la toma de baja presión del manómetro diferencial. Pues bien, la diferencia de indicación entre los patrones de referencia en el momento de hacer el cero, puede diferir de cero al final de una serie de medida. Si el intervalo de posibles diferencias de cero es δcero , la varianza es nuevamente $u^2 = (\delta \text{cero})^2 / 12$ y la incertidumbre típica debida a la histéresis es $u = \frac{\delta \text{cero}}{2\sqrt{3}}$.

δcero es igual a la diferencia máxima, en valor absoluto, entre los valores obtenidos para los ceros iniciales y finales en las diferentes series de calibración; se mide con el patrón conectado en la toma de baja presión.

- d) La incertidumbre típica combinada asociada a la corrección del manómetro diferencial se obtiene combinando sus distintas contribuciones:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} \quad (4)$$

- e) Una vez obtenida la incertidumbre típica 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:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (5)$$

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

Factores de cobertura k para diferentes grados de libertad ν_{eff} .

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

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

$$U = ku(y) \quad (6)$$

- g) Corrección no realizada máxima e incertidumbre global de calibración

En el caso de no querer aplicar correcciones sobre la indicación del instrumento la incertidumbre global de la calibración será la suma de los valores máximos obtenidos para la corrección y la incertidumbre expandida.

$$U = C_{\text{max}} + U \quad (7)$$

ANEXO 2

EJEMPLO NUMÉRICO

A continuación, se desarrolla la calibración de un medidor de presión diferencial utilizando como patrones una balanza de pesos muertos conectada por la toma de alta presión y un controlador de presión conectado por la toma de baja presión.

a) Datos del medidor diferencial

Rango:	(0 a 0,5) MPa
Exactitud:	0,05 % F.S. a presión de línea igual a la presión atmosférica
Presión máxima de línea:	20 MPa
Resolución:	0,000 1 MPa
Variación con la temperatura:	0,004 % Lect/°C

b) Datos de los patrones utilizados

a. Balanza de presión.

Rango:	(0 a 20) MPa
Exactitud:	0,01% lect.

A_0		$9,806\ 65 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$	$U(A_0)$	$2,9 \times 10^{-10}\ \text{m}^2$	
			δA_0	$\pm 2,0 \times 10^{-10}\ \text{m}^2$	
M	$M_{\text{pistón}}$	0,199 998 5 kg	$U(M)$	$U(M_{\text{pistón}})$	$2,0 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$
	M_{soporte}	0,799 992 3 kg		$U(M_{\text{soporte}})$	$8,0 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$
	M_1	0,999 993 kg		$U(M_1)$	$1,0 \times 10^{-5}\ \text{kg}$
	M_2	1,999 987 kg		$U(M_2)$	$2,0 \times 10^{-5}\ \text{kg}$
	M_3	1,999 988 kg		$U(M_3)$	$2,0 \times 10^{-5}\ \text{kg}$
	M_4	1,999 987 kg		$U(M_4)$	$2,0 \times 10^{-5}\ \text{kg}$
	M_5	1,999 986 kg		$U(M_5)$	$2,0 \times 10^{-5}\ \text{kg}$
	M_6	0,499 996 7 kg		$U(M_6)$	$5,0 \times 10^{-5}\ \text{kg}$
	M_7	0,199 998 4 kg		$U(M_7)$	$2,0 \times 10^{-5}\ \text{kg}$
	M_8	0,199 998 3 kg		$U(M_8)$	$2,0 \times 10^{-6}\ \text{kg}$
	M_9	0,199 998 2 kg	$U(M_9)$	$1,0 \times 10^{-6}\ \text{kg}$	
			δm	$1,0 \times 10^{-5}\ \text{kg/kg}$	
α		$9,00 \times 10^{-6}\ \text{°C}^{-1}$	$\delta \alpha$	$\pm 9,00 \times 10^{-7}\ \text{°C}^{-1}$	
λ		$7,00 \times 10^{-7}\ \text{MPa}^{-1}$	$U(\lambda)$	$7,00 \times 10^{-8}\ \text{MPa}^{-1}$	
ρ_M		$8000\ \text{kg/m}^3$	$\delta \rho_M$	$\pm 100\ \text{kg/m}^3$	
t_0		$20\ \text{°C}$	$U(t_0)$	$0\ \text{°C}$	
V		$0\ \text{m}^3$	δV	$\pm 0\ \text{m}^3$	
Cir		$0,011\ 101\ 081\ \text{m}$	δCir	$\pm 1,00 \times 10^{-6}\ \text{°C}^{-1}$	
		P_N	δP_N	$\pm 1,00 \times 10^{-6}\ \text{Pa/Pa}$	

b. Controlador de presión.

Rango:	(0 a 20) MPa
Exactitud:	0,01% F.S.
Presión máxima de línea:	20 MPa
Resolución:	0,000 1 MPa
Variación con la temperatura:	0,004 % Lect/°C

c) Datos generales

g_l	9,79957 m/s ²	$U(g_l)$ ($k = 2$)	$1,00 \times 10^{-5}$ m/s ²
Δh	0 m	δh	$\pm 0,01$ m
Fluido de transmisión		Nitrógeno	
ρ_f	$\rho_f = 3,369\ 99 \times 10^{-3} \frac{P_{N(abs)}}{t_{amb} + 273,15}$	$\delta \rho_f$	$5,00 \times 10^{-6}(\text{kg/m}^3)/(\text{kg/m}^3)$
σ	0 N/m	$U(\sigma)$	0 N/m
ρ_a	1,106 kg/m ³	$\delta \rho_a$	$\pm 1,00 \times 10^{-2}$ kg/m ³

d) Procedimiento:

Se hace de acuerdo con el punto 5.3.

La calibración del manómetro diferencial se ha realizado a las siguientes presiones de línea:

- Presión atmosférica
- 5 MPa
- 10 MPa

Para cada presión de línea se realizan tres series de medida en los siguientes puntos de calibración:

- (0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5) MPa

En este ejemplo sólo se va a desarrollar la calibración a la presión de línea de 5 MPa. Para la calibración a 10 MPa se procede de la misma manera. La calibración a presión atmosférica se hace manteniendo la toma de baja presión abierta a la atmósfera.

e) Toma de datos:

Se toman los datos según el punto 5.4.

t_{amb}	20,8 °C	δt_{amb}	$\pm 2,00$ °C
$t_{p/c}$	20,52 °C	$\delta t_{p/c}$	$\pm 0,5$ °C
$H.R.$	40 %	$\delta H.R.$	± 5 %
P_{amb}	936,12 hPa	δP_{amb}	$\pm 5,00 \times 10^{-1}$ hPa

Presión de línea nominal MPa	Presión diferencial nominal MPa	Presión nominal lado de alta MPa
5	0	5
5	0,1	5,1
5	0,2	5,2
5	0,3	5,3
5	0,4	5,4
5	0,5	5,5

Serie 1			
Indicación calibrador		Indicación manómetro	
Subida MPa	Bajada MPa	Subida MPa	Bajada MPa
4,996 0	4,996 5	0,001 1	0,001 3
4,996 0	4,996 0	0,101 2	0,101 4
4,996 0	4,996 0	0,201 3	0,201 5
4,996 0	4,996 0	0,301 4	0,301 6
4,996 0	4,996 0	0,401 5	0,401 7
4,996 0	4,996 0	0,501 7	0,501 9

Serie 2			
Indicación calibrador		Indicación manómetro	
Subida MPa	Bajada MPa	Subida MPa	Bajada MPa
4,995 8	4,996 2	0,000 7	0,001 1
4,995 8	4,995 8	0,100 8	0,101 1
4,995 8	4,995 8	0,200 9	0,201 1
4,995 8	4,995 8	0,301 0	0,301 1
4,995 8	4,995 8	0,401 1	0,401 2
4,995 8	4,995 8	0,501 3	0,501 4

Serie 3			
Indicación calibrador		Indicación manómetro	
Subida MPa	Bajada MPa	Subida MPa	Bajada MPa
4,996 3	4,996 8	0,001 0	0,001 2
4,996 3	4,996 3	0,001 1	0,101 3
4,996 3	4,996 3	0,101 2	0,201 4
4,996 3	4,996 3	0,201 3	0,301 5
4,996 3	4,996 3	0,301 4	0,401 6
4,996 3	4,996 3	0,401 6	0,501 8

f) Tratamiento de datos

Los cálculos de la presión de medida por la balanza de presión se hacen según el Anexo 3.

El calibrador de presión se utiliza para mantener constante la presión de línea durante una serie de calibración.

Los cálculos se hacen según 5.4

g) Incertidumbres

Primeramente calculamos la incertidumbre típica sobre la presión de referencia, según el Anexo 3.

Presión nominal MPa	Magnitud X_i	Valor estimado x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
0,0	Masa patrón	4,999 966 kg	$2,5 \times 10^{-5}$ kg	Normal	$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$2,50 \times 10^1$ Pa
0,1		5,099 964 kg	$2,5 \times 10^{-5}$ kg		$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$2,55 \times 10^1$ Pa
0,2		5,199 964 kg	$2,6 \times 10^{-5}$ kg		$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$2,60 \times 10^1$ Pa
0,3		5,299 962 kg	$2,6 \times 10^{-5}$ kg		$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$2,65 \times 10^1$ Pa
0,4		5,399 963 kg	$2,7 \times 10^{-5}$ kg		$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$2,70 \times 10^1$ Pa
0,5		5,499 963 kg	$2,7 \times 10^{-5}$ kg		$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$2,75 \times 10^1$ Pa
0,0	Deriva de la masa	0,0 kg	$2,9 \times 10^{-5}$ kg	Rectangular	$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$2,88 \times 10^1$ Pa
0,1		0,0 kg	$2,9 \times 10^{-5}$ kg		$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$2,94 \times 10^1$ Pa
0,2		0,0 kg	$3,0 \times 10^{-5}$ kg		$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$3,00 \times 10^1$ Pa
0,3		0,0 kg	$3,1 \times 10^{-5}$ kg		$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$3,06 \times 10^1$ Pa
0,4		0,0 kg	$3,1 \times 10^{-5}$ kg		$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$3,11 \times 10^1$ Pa
0,5		0,0 kg	$3,2 \times 10^{-5}$ kg		$9,99 \times 10^5$ Pa/kg	$3,17 \times 10^1$ Pa
0,0	Gravedad local	$9,799\ 567\ \text{m/s}^2$	$5,0 \times 10^{-6}$ m/s ²	Normal	$5,10 \times 10^5$ Pa · s ² /kg	2,55 Pa
0,1		$9,799\ 567\ \text{m/s}^2$	$5,0 \times 10^{-6}$ m/s ²		$5,20 \times 10^5$ Pa · s ² /kg	2,60 Pa
0,2		$9,799\ 567\ \text{m/s}^2$	$5,0 \times 10^{-6}$ m/s ²		$5,30 \times 10^5$ Pa · s ² /kg	2,65 Pa
0,3		$9,799\ 567\ \text{m/s}^2$	$5,0 \times 10^{-6}$ m/s ²		$5,40 \times 10^5$ Pa · s ² /kg	2,70 Pa
0,4		$9,799\ 567\ \text{m/s}^2$	$5,0 \times 10^{-6}$ m/s ²		$5,51 \times 10^5$ Pa · s ² /kg	2,75 Pa
0,5		$9,799\ 567\ \text{m/s}^2$	$5,0 \times 10^{-6}$ m/s ²		$5,61 \times 10^5$ Pa · s ² /kg	2,80 Pa
0,0	Densidad del aire	$1,1065\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^{-3}$ kg/m ³	Rectangular	$-6,25 \times 10^2$ Pa · m ³ /kg	-3,61 Pa
0,1		$1,1065\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^{-3}$ kg/m ³		$-6,37 \times 10^2$ Pa · m ³ /kg	-3,68 Pa
0,2		$1,1065\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^{-3}$ kg/m ³		$-6,50 \times 10^2$ Pa · m ³ /kg	-3,75 Pa
0,3		$1,1065\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^{-3}$ kg/m ³		$-6,62 \times 10^2$ Pa · m ³ /kg	-3,82 Pa
0,4		$1,1065\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^{-3}$ kg/m ³		$-6,75 \times 10^2$ Pa · m ³ /kg	-3,89 Pa
0,5		$1,1065\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^{-3}$ kg/m ³		$-6,87 \times 10^2$ Pa · m ³ /kg	-3,97 Pa
0,0	Densidad de las masas	$8000\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^1$ kg/m ³	Rectangular	$8,64 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	4,99 Pa
0,1		$8000\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^1$ kg/m ³		$8,81 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	5,09 Pa
0,2		$8000\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^1$ kg/m ³		$8,98 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	5,19 Pa
0,3		$8000\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^1$ kg/m ³		$9,16 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	5,29 Pa
0,4		$8000\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^1$ kg/m ³		$9,33 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	5,39 Pa
0,5		$8000\ \text{kg/m}^3$	$5,8 \times 10^1$ kg/m ³		$9,50 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	5,49 Pa
0,0	Volumen del P/C sometido a empuje	0 m ³	0 m ³	Rectangular	$5,72 \times 10^7$ Pa/kg	0 Pa
0,1		0 m ³	0 m ³		$5,83 \times 10^7$ Pa/kg	0 Pa
0,2		0 m ³	0 m ³		$5,95 \times 10^7$ Pa/kg	0 Pa
0,3		0 m ³	0 m ³		$6,06 \times 10^7$ Pa/kg	0 Pa
0,4		0 m ³	0 m ³		$6,18 \times 10^7$ Pa/kg	0 Pa
0,5		0 m ³	0 m ³		$6,29 \times 10^7$ Pa/kg	0 Pa
0,0	Densidad del fluido de transmisión	$58,344\ 86\ \text{kg/m}^3$	$1,7 \times 10^{-4}$ kg/m ³	Rectangular	$9,80 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	$1,65 \times 10^{-5}$ Pa
0,1		$59,490\ 28\ \text{kg/m}^3$	$1,7 \times 10^{-4}$ kg/m ³		$9,80 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	$1,68 \times 10^{-5}$ Pa
0,2		$60,635\ 72\ \text{kg/m}^3$	$1,8 \times 10^{-4}$ kg/m ³		$9,80 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	$1,72 \times 10^{-5}$ Pa
0,3		$61,781\ 14\ \text{kg/m}^3$	$1,8 \times 10^{-4}$ kg/m ³		$9,80 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	$1,75 \times 10^{-5}$ Pa
0,4		$62,926\ 57\ \text{kg/m}^3$	$1,8 \times 10^{-4}$ kg/m ³		$9,80 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	$1,78 \times 10^{-5}$ Pa
0,5		$64,072\ 01\ \text{kg/m}^3$	$1,8 \times 10^{-4}$ kg/m ³		$9,80 \times 10^{-2}$ Pa · m ³ /kg	$1,81 \times 10^{-5}$ Pa
0,0	Tensión superficial del fluido	0 N/m	0 N/m	Rectangular	$1,13 \times 10^3$ 1/m	0 Pa
0,1		0 N/m	0 N/m		$1,13 \times 10^3$ 1/m	0 Pa
0,2		0 N/m	0 N/m		$1,13 \times 10^3$ 1/m	0 Pa
0,3		0 N/m	0 N/m		$1,13 \times 10^3$ 1/m	0 Pa
0,4		0 N/m	0 N/m		$1,13 \times 10^3$ 1/m	0 Pa
0,5		0 N/m	0 N/m		$1,13 \times 10^3$ 1/m	0 Pa
0,0	Longitud de la circunferencia del pistón	$1,11 \times 10^{-2}$ m	$6,4 \times 10^{-7}$ m	Rectangular	0 Pa/m	0 Pa
0,1		$1,11 \times 10^{-2}$ m	$6,4 \times 10^{-7}$ m		0 Pa/m	0 Pa
0,2		$1,11 \times 10^{-2}$ m	$6,4 \times 10^{-7}$ m		0 Pa/m	0 Pa
0,3		$1,11 \times 10^{-2}$ m	$6,4 \times 10^{-7}$ m		0 Pa/m	0 Pa
0,4		$1,11 \times 10^{-2}$ m	$6,4 \times 10^{-7}$ m		0 Pa/m	0 Pa
0,5		$1,11 \times 10^{-2}$ m	$6,4 \times 10^{-7}$ m		0 Pa/m	0 Pa

0,0	Área efectiva del P/C	$9,806\ 65 \times 10^{-6} \text{m}^2$	$1,5 \times 10^{-10} \text{m}^2$	Normal	$-5,09 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-7,49 \times 10^1 \text{Pa}$
0,1		$9,806\ 65 \times 10^{-6} \text{m}^2$	$1,5 \times 10^{-10} \text{m}^2$		$-5,20 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-7,64 \times 10^1 \text{Pa}$
0,2		$9,806\ 65 \times 10^{-6} \text{m}^2$	$1,5 \times 10^{-10} \text{m}^2$		$-5,30 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-7,79 \times 10^1 \text{Pa}$
0,3		$9,806\ 65 \times 10^{-6} \text{m}^2$	$1,5 \times 10^{-10} \text{m}^2$		$-5,40 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-7,94 \times 10^1 \text{Pa}$
0,4		$9,806\ 65 \times 10^{-6} \text{m}^2$	$1,5 \times 10^{-10} \text{m}^2$		$-5,50 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-8,09 \times 10^1 \text{Pa}$
0,5		$9,806\ 65 \times 10^{-6} \text{m}^2$	$1,5 \times 10^{-10} \text{m}^2$		$-5,60 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-8,24 \times 10^1 \text{Pa}$
0,0	Deriva del área efectiva del P/C	0m^2	$1,1 \times 10^{-10} \text{m}^2$	Rectangular	$-5,09 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-5,77 \times 10^1 \text{Pa}$
0,1		0m^2	$1,1 \times 10^{-10} \text{m}^2$		$-5,20 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-5,88 \times 10^1 \text{Pa}$
0,2		0m^2	$1,1 \times 10^{-10} \text{m}^2$		$-5,30 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-6,00 \times 10^1 \text{Pa}$
0,3		0m^2	$1,1 \times 10^{-10} \text{m}^2$		$-5,40 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-6,11 \times 10^1 \text{Pa}$
0,4		0m^2	$1,1 \times 10^{-10} \text{m}^2$		$-5,50 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-6,23 \times 10^1 \text{Pa}$
0,5		0m^2	$1,1 \times 10^{-10} \text{m}^2$		$-5,60 \times 10^{11} \text{Pa/m}^2$	$-6,35 \times 10^1 \text{Pa}$
0,0	Coeficiente de deformación con la presión del P/C	$7,00 \times 10^{-13} 1/\text{Pa}$	$3,5 \times 10^{-14} 1/\text{Pa}$	Normal	$2,50 \times 10^{13} \text{Pa}^2$	$8,73 \times 10^{-1} \text{Pa}$
0,1		$7,00 \times 10^{-13} 1/\text{Pa}$	$3,5 \times 10^{-14} 1/\text{Pa}$		$2,60 \times 10^{13} \text{Pa}^2$	$9,09 \times 10^{-1} \text{Pa}$
0,2		$7,00 \times 10^{-13} 1/\text{Pa}$	$3,5 \times 10^{-14} 1/\text{Pa}$		$2,70 \times 10^{13} \text{Pa}^2$	$9,45 \times 10^{-1} \text{Pa}$
0,3		$7,00 \times 10^{-13} 1/\text{Pa}$	$3,5 \times 10^{-14} 1/\text{Pa}$		$2,80 \times 10^{13} \text{Pa}^2$	$9,81 \times 10^{-1} \text{Pa}$
0,4		$7,00 \times 10^{-13} 1/\text{Pa}$	$3,5 \times 10^{-14} 1/\text{Pa}$		$2,91 \times 10^{13} \text{Pa}^2$	$1,02 \text{Pa}$
0,5		$7,00 \times 10^{-13} 1/\text{Pa}$	$3,5 \times 10^{-14} 1/\text{Pa}$		$3,02 \times 10^{13} \text{Pa}^2$	$1,06 \text{Pa}$
0,0	Presión nominal	$4,995\ 56 \times 10^6 \text{Pa}$	$2,9 \times 10^2 \text{Pa}$	Rectangular	$-3,50 \times 10^{-6} \text{Pa/Pa}$	$-1,01 \times 10^{-3} \text{Pa}$
0,1		$5,095\ 47 \times 10^6 \text{Pa}$	$2,9 \times 10^2 \text{Pa}$		$-3,57 \times 10^{-6} \text{Pa/Pa}$	$-1,05 \times 10^{-3} \text{Pa}$
0,2		$5,195\ 39 \times 10^6 \text{Pa}$	$3,0 \times 10^2 \text{Pa}$		$-3,64 \times 10^{-6} \text{Pa/Pa}$	$-1,09 \times 10^{-3} \text{Pa}$
0,3		$5,295\ 30 \times 10^6 \text{Pa}$	$3,1 \times 10^2 \text{Pa}$		$-3,71 \times 10^{-6} \text{Pa/Pa}$	$-1,13 \times 10^{-3} \text{Pa}$
0,4		$5,395\ 21 \times 10^6 \text{Pa}$	$3,1 \times 10^2 \text{Pa}$		$-3,78 \times 10^{-6} \text{Pa/Pa}$	$-1,18 \times 10^{-3} \text{Pa}$
0,5		$5,495\ 12 \times 10^6 \text{Pa}$	$3,2 \times 10^2 \text{Pa}$		$-3,85 \times 10^{-6} \text{Pa/Pa}$	$-1,22 \times 10^{-3} \text{Pa}$
0,0	Coeficiente de dilatación lineal del P/C	$9,00 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	$5,2 \times 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$	Rectangular	$-2,60 \times 10^6 \text{Pa}^\circ\text{C}$	$-1,35 \text{Pa}$
0,1		$9,00 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	$5,2 \times 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$		$-2,65 \times 10^6 \text{Pa}^\circ\text{C}$	$-1,38 \text{Pa}$
0,2		$9,00 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	$5,2 \times 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$		$-2,70 \times 10^6 \text{Pa}^\circ\text{C}$	$-1,40 \text{Pa}$
0,3		$9,00 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	$5,2 \times 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$		$-2,75 \times 10^6 \text{Pa}^\circ\text{C}$	$-1,43 \text{Pa}$
0,4		$9,00 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	$5,2 \times 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$		$-2,81 \times 10^6 \text{Pa}^\circ\text{C}$	$-1,46 \text{Pa}$
0,5		$9,00 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	$5,2 \times 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$		$-2,86 \times 10^6 \text{Pa}^\circ\text{C}$	$-1,48 \text{Pa}$
0,0	Temperatura	$20,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$1,2 \text{ }^\circ\text{C}$	Rectangular	$-4,50 \times 10^1 \text{Pa}/^\circ\text{C}$	$-5,19 \times 10^1 \text{Pa}$
0,1		$20,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$1,2 \text{ }^\circ\text{C}$		$-4,59 \times 10^1 \text{Pa}/^\circ\text{C}$	$-5,30 \times 10^1 \text{Pa}$
0,2		$20,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$1,2 \text{ }^\circ\text{C}$		$-4,68 \times 10^1 \text{Pa}/^\circ\text{C}$	$-5,40 \times 10^1 \text{Pa}$
0,3		$20,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$1,2 \text{ }^\circ\text{C}$		$-4,77 \times 10^1 \text{Pa}/^\circ\text{C}$	$-5,50 \times 10^1 \text{Pa}$
0,4		$20,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$1,2 \text{ }^\circ\text{C}$		$-4,86 \times 10^1 \text{Pa}/^\circ\text{C}$	$-5,61 \times 10^1 \text{Pa}$
0,5		$20,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$1,2 \text{ }^\circ\text{C}$		$-4,95 \times 10^1 \text{Pa}/^\circ\text{C}$	$-5,71 \times 10^1 \text{Pa}$
0,0	Diferencia de alturas	0m	$5,8 \times 10^{-3} \text{m}$	Rectangular	$5,61 \times 10^2 \text{Pa/m}$	$3,24 \text{Pa}$
0,1		0m	$5,8 \times 10^{-3} \text{m}$		$5,72 \times 10^2 \text{Pa/m}$	$3,30 \text{Pa}$
0,2		0m	$5,8 \times 10^{-3} \text{m}$		$5,83 \times 10^2 \text{Pa/m}$	$3,37 \text{Pa}$
0,3		0m	$5,8 \times 10^{-3} \text{m}$		$5,95 \times 10^2 \text{Pa/m}$	$3,43 \text{Pa}$
0,4		0m	$5,8 \times 10^{-3} \text{m}$		$6,06 \times 10^2 \text{Pa/m}$	$3,50 \text{Pa}$
0,5		0m	$5,8 \times 10^{-3} \text{m}$		$6,17 \times 10^2 \text{Pa/m}$	$3,56 \text{Pa}$
0,0					115 Pa	
0,1					117 Pa	
0,2					119 Pa	
0,3					122 Pa	
0,4					124 Pa	
0,5					126 Pa	

Finalmente se calcula la incertidumbre según se desarrolla en el Anexo 1.

Presión nominal MPa	Magnitud X_i	Valor estimado x_i	Incertidumbre típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
0,0	Presión de referencia	0 MPa	0 MPa	Normal	1	0 MPa
0,1		0,099 910 MPa	$2,3 \times 10^{-6}$ MPa		1	0,000 002 MPa
0,2		0,199 822 MPa	$4,6 \times 10^{-6}$ MPa		1	0,000 005 MPa
0,3		0,299 731 MPa	$6,9 \times 10^{-6}$ MPa		1	0,000 007 MPa
0,4		0,399 643 MPa	$9,2 \times 10^{-6}$ MPa		1	0,000 009 MPa
0,5		0,499 555 MPa	$1,1 \times 10^{-6}$ MPa		1	0,000 011 MPa
0,0	Indicación del instrumento	0,001 1 MPa	0,000 19 MPa	Normal	-1	-0,000 19 MPa
0,1		0,101 2 MPa	0,000 19 MPa		-1	-0,000 19 MPa
0,2		0,201 3 MPa	0,000 20 MPa		-1	-0,000 20 MPa
0,3		0,301 3 MPa	0,000 21 MPa		-1	-0,000 21 MPa
0,4		0,401 5 MPa	0,000 21 MPa		-1	-0,000 21 MPa
0,5		0,501 6 MPa	0,000 21 MPa		-1	-0,000 21 MPa
0,0	Resolución	0,001 1 MPa	0,000 058 MPa	Rectangular	1	0,000 058 MPa
0,1		0,101 2 MPa	0,000 058 MPa		1	0,000 058 MPa
0,2		0,201 3 MPa	0,000 058 MPa		1	0,000 058 MPa
0,3		0,301 3 MPa	0,000 058 MPa		1	0,000 058 MPa
0,4		0,401 5 MPa	0,000 058 MPa		1	0,000 058 MPa
0,5		0,501 6 MPa	0,000 058 MPa		1	0,000 058 MPa
0,0	Histéresis	0,001 1 MPa	0,000 115 MPa	Rectangular	1	0,000 115 MPa
0,1		0,101 2 MPa	0,000 087 MPa		1	0,000 087 MPa
0,2		0,201 3 MPa	0,000 058 MPa		1	0,000 058 MPa
0,3		0,301 3 MPa	0,000 058 MPa		1	0,000 058 MPa
0,4		0,401 5 MPa	0,000 058 MPa		1	0,000 058 MPa
0,5		0,501 6 MPa	0,000 058 MPa		1	0,000 058 MPa
0,0	Condiciones ambientales del instrumento	0,001 1 MPa	0 MPa	Rectangular	1	0 MPa
0,1		0,101 2 MPa	0,000 005 MPa		1	0,000 005 MPa
0,2		0,201 3 MPa	0,000 009 MPa		1	0,000 009 MPa
0,3		0,301 3 MPa	0,000 014 MPa		1	0,000 014 MPa
0,4		0,401 5 MPa	0,000 019 MPa		1	0,000 019 MPa
0,5		0,501 6 MPa	0,000 023 MPa		1	0,000 023 MPa
0,0	Estabilidad del cero	0,001 1 MPa	0,000 115 MPa	Rectangular	1	0,000 115 MPa
0,1		0,101 2 MPa	0,000 115 MPa		1	0,000 115 MPa
0,2		0,201 3 MPa	0,000 115 MPa		1	0,000 115 MPa
0,3		0,301 3 MPa	0,000 115 MPa		1	0,000 115 MPa
0,4		0,401 5 MPa	0,000 115 MPa		1	0,000 115 MPa
0,5		0,501 6 MPa	0,000 115 MPa		1	0,000 115 MPa
0,0					0,000 26 MPa	
0,1					0,000 25 MPa	
0,2					0,000 24 MPa	
0,3					0,000 25 MPa	
0,4					0,000 26 MPa	
0,5					0,000 26 MPa	
0,0	Número de grados efectivos de libertad $\nu_{\text{eff}} =$				17	
0,1					14	
0,2					12	
0,3					11	
0,4					11	
0,5					11	
0,0	Factor de cobertura $k =$				2,17	
0,1					2,20	
0,2					2,25	
0,3					2,28	
0,4					2,28	
0,5					2,28	
0,0	Incertidumbre expandida				0,000 56 MPa	
0,1					0,000 54 MPa	
0,2					0,000 55 MPa	
0,3					0,000 58 MPa	
0,4					0,000 58 MPa	
0,5					0,000 58 MPa	
Corrección no realizada máxima					0,002 0 MPa	
Incertidumbre global de calibración					0,002 6 MPa	

h) Resultados:

A continuación, se presentan los resultados a presión de línea 5 MPa.

Presión referencia MPa	Indicación Instrumento MPa	Corrección MPa	U $k = 2$ MPa
0,000 00	0,001 1	-0,001 07	0,000 56
0,099 91	0,101 2	-0,001 25	0,000 54
0,199 82	0,201 3	-0,001 43	0,000 55
0,299 73	0,301 3	-0,001 62	0,000 58
0,399 64	0,401 5	-0,001 82	0,000 58
0,499 55	0,501 6	-0,002 02	0,000 58

ANEXO 3

CÁLCULO DE LA PRESIÓN Y SU INCERTIDUMBRE EN BALANZAS DE PRESIÓN

A continuación, se desarrolla el cálculo de la presión medida por una balanza de presión, de las llamadas de pesos muertos, y de su incertidumbre típica.

- a) La presión medida por una balanza de presión se obtiene de:

$$P = \frac{(M + \delta M)g_l \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_M}\right) - v g_l (\rho_f - \rho_a) + \sigma C_{ir}}{(A_{(0,t_0)} + \delta A_{(0,t_0)})(1 + \lambda P_N)(1 + \alpha(t - t_0))} + (\rho_f - \rho_a)g_l \Delta h \quad (8)$$

- b) Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (8) se obtienen las contribuciones a la incertidumbre de la corrección:

Magnitud X_i	Valor estimado x_i	Incert. típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
Masa patrón	M	$u(M)$	Normal	$c_1 \approx \frac{P}{M}$	$= c_1 u(M)$
Deriva de la masa	δM	$u(\delta M)$	Rectangular	$c_2 \approx \frac{P}{M}$	$= c_2 u(\delta M)$
Gravedad local	g_l	$u(g_l)$	Normal	$c_3 \approx \frac{P}{g_l}$	$= c_3 u(g_l)$
Densidad del aire	ρ_a	$u(\rho_a)$	Rectangular	$c_4 \approx -\frac{M g_l - v}{A_{(0,t_0)} - g_l \Delta h}$	$= c_4 u(\rho_a)$
Densidad de las masas	ρ_M	$u(\rho_M)$	Rectangular	$c_5 \approx \frac{M g_l \rho_a}{A_{(0,t_0)} \rho_M}$	$= c_5 u(\rho_M)$
Volumen del P/C sometido a empuje	v	$u(v)$	Rectangular	$c_6 \approx \frac{(\rho_f - \rho_a) g_l}{A_{(0,t_0)}}$	$= c_6 u(v)$
Densidad del fluido de transmisión	ρ_f	$u(\rho_f)$	Rectangular	$c_7 = \frac{g_l v}{A_{(0,t_0)}} + g_l \Delta h$	$= c_7 u(\rho_f)$
Tensión superficial del fluido	σ	$u(\sigma)$	rectangular	$c_8 \approx \frac{C}{A_{(0,t_0)}}$	$= c_8 u(\sigma)$
Longitud de la circunferencia del pistón	C_{ir}	$u(C_{ir})$	rectangular	$c_9 \approx \frac{\sigma}{A_{(0,t_0)}}$	$= c_9 u(C_{ir})$
Área efectiva del P/C	$A_{(0,t_0)}$	$u(A_{(0,t_0)})$	normal	$c_{10} \approx -\frac{P}{A_{(0,t_0)}}$	$= c_{10} u(A_{(0,t_0)})$
Deriva del área efectiva del P/C	$\delta A_{(0,t_0)}$	$u(\delta A_{(0,t_0)})$	rectangular	$c_{11} \approx -\frac{P}{A_{(0,t_0)}}$	$= c_{11} u(\delta A_{(0,t_0)})$
Coefficiente de deformación con la presión del P/C	λ	$u(\lambda)$	normal	$c_{12} \approx -\frac{P^2}{(1 + \lambda P_N)}$	$= c_{12} u(\lambda)$
Presión nominal	P_N	$u(P_N)$	rectangular	$c_{13} \approx -\frac{P \lambda}{(1 + \lambda P_N)}$	$= c_{13} u(P_N)$
Coefficiente de dilatación lineal del P/C	α	$u(\alpha)$	rectangular	$c_{14} \approx -P(t - t_0)$	$= c_{14} u(\alpha)$
Temperatura	t	$u(t)$	rectangular	$c_{15} \approx -P \alpha$	$= c_{15} u(t)$
Diferencia de alturas	Δh	$u(\Delta h)$	rectangular	$c_{16} = (\rho_f - \rho_a) g_l$	$= c_{16} u(\Delta h)$

c) A continuación se desarrolla el cálculo de la incertidumbre típica de cada magnitud de entrada:

1. Masa colocada sobre el pistón (M):

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

$$u(M) = \frac{U(M)}{k(U(M))} \quad (9)$$

2. Deriva de las masas colocadas sobre el pistón (δM)

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

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

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

3. Gravedad local (g_l):

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

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

$$g_l = 9,7803184 (1 + 5,3024 \times 10^{-3} \text{sen}^2(2\phi)) - 3,086 \times 10^{-6} H \quad (11)$$

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

4. Densidad del aire (ρ_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:

$$\rho_a = \frac{0,34848 P_{\text{amb}} - 0,009 H \cdot R \cdot e^{0,061 t_{\text{amb}}}}{273,15 + t_{\text{amb}}} \quad (12)$$

Las diferencias de los valores obtenidos con esta fórmula respecto de los obtenidos con la fórmula del BIPM son menores de 0,01 kg/m³. Si se mide la temperatura ambiente con incertidumbre menor de 0,5 °C; la presión ambiente con incertidumbre menor de 2 hPa y la humedad relativa con incertidumbre menor del 10 %, la incertidumbre de la densidad del aire aplicando la fórmula

anterior es menor de $0,012 \text{ kg/m}^3$. 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:

$$u(\rho_a) = \frac{\delta\rho_a}{2\sqrt{3}} \quad (13)$$

5. Densidad de las masas colocadas sobre el pistón (ρ_M):

El valor de la densidad de las masas y su incertidumbre expandida se obtienen del certificado de calibración de las masas en densidad, o en su defecto de las especificaciones del fabricante, en el caso más normal de usar las especificaciones del fabricante:

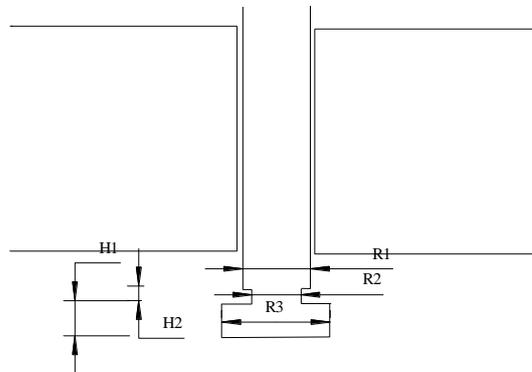
$$u(\rho_M) = \frac{\delta\rho_M}{2\sqrt{3}} \quad (14)$$

$\delta\rho_M$ es la incertidumbre o límite de error máximo de la densidad de las masas correspondiente a la clase de exactitud declarada por el fabricante.

6. Volumen del pistón sometido a empuje del fluido (V):

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

Figura 1



$$V = \pi(R_3^2 h_1 - R_1^2(h_1 + h_2) + R_2^2 h_2) \quad (15)$$

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(V) = \frac{\delta V}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

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

7. Densidad del fluido de transmisión de la presión (ρ_f):

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

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(\rho_f) = \frac{\delta\rho_f}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

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

8. Coeficiente de Tensión superficial del fluido transmisor de la presión (σ):

El valor del Coeficiente de Tensión superficial del fluido y su incertidumbre se obtienen de las especificaciones del fabricante.

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(\sigma) = \frac{\delta\sigma}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

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

9. Longitud de la circunferencia del pistón (C_{ir}):

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

$$C_{ir} = 2\sqrt{\pi A_N} \quad (19)$$

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(C_{ir}) = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{A_N}} \delta A_N}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

δA_N es el semintervalo máximo de variación declarado por el fabricante para el valor del área efectiva.

10. Área efectiva del conjunto pistón cilindro ($A_{(0, to)}$):

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

$$u(A_{(0, to)}) = \frac{U(A_{(0, to)})}{k(U(A_{(0, to)}))} \quad (21)$$

11. Corrección debida a la deriva del área efectiva del conjunto pistón cilindro ($\delta A_{(0, to)}$):

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

$$u(\delta A_{(0,t_0)}) = \frac{\delta A_{(0,t_0)}}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

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

12. Coeficiente de deformación con la presión del conjunto pistón cilindro (λ):

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

$$u(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{k(U(\lambda))} \quad (23)$$

13. Presión nominal (P_N):

Se obtiene de corregir el valor nominal de la presión a gravedad normal a gravedad local.

$$P_N = P_{N(g_N)} \frac{g_1}{g_N} \quad (24)$$

Su incertidumbre se obtiene de las especificaciones del fabricante para la presión generada por la balanza patrón en las condiciones de utilización.

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(P_N) = \frac{\delta P_N}{2\sqrt{3}} \quad (25)$$

δP_N es el intervalo máximo de variación declarado por el fabricante para el valor nominal de la presión generada en las condiciones de utilización.

14. Coeficiente de dilatación térmica del pistón cilindro (α):

Su valor se obtiene de las especificaciones del fabricante o de las características del material con el que está construido y se asume que su valor puede variar en un $\pm 10\%$. Si el intervalo de variación es $\delta\alpha$, la varianza es $u^2 = (\delta\alpha)^2/12$, y la incertidumbre típica es:

$$u(\alpha) = \frac{\delta\alpha}{2\sqrt{3}} \quad (26)$$

15. Temperatura del conjunto pistón cilindro (t):

La temperatura del conjunto pistón cilindro se mide a través de una sonda de temperatura. La incertidumbre expandida, normalmente para un factor de cobertura $k = 2$, se obtienen a partir de la del certificado de calibración de la sonda, de la deriva de la sonda y del método de medida de la temperatura del conjunto pistón cilindro. Se asume que su valor puede variar en $\pm 0,5\text{ °C}$. Si el semintervalo de variación es δt , la varianza es $u^2 = (\delta t)^2/3$, y la incertidumbre típica es:

$$u(t) = \frac{\delta t}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

16. Diferencia de altura entre los niveles de referencia (Δh):

La diferencia de altura se mide a través de una regla. La incertidumbre expandida, normalmente para un factor de cobertura $k = 2$, se obtienen a partir de la del certificado de calibración de la regla, de la deriva de la regla y del método de medida de la diferencia de alturas. Si el semintervalo de variación es δh , la varianza es $u^2 = (\delta h)^2/3$, y la incertidumbre típica es:

$$u(\Delta h) = \frac{\delta h}{\sqrt{3}} \quad (28)$$

- d) La incertidumbre típica combinada asociada a la corrección del manómetro diferencial se obtiene combinando sus distintas contribuciones:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} \quad (29)$$

- e) Una vez obtenida la incertidumbre típica 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-Satterthwait:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (30)$$

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

Factores de cobertura k para diferentes grados de libertad ν_{eff} .

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

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

$$U = ku(y) \quad (31)$$

ANEXO 4

CÁLCULO DE LA PRESIÓN Y SU INCERTIDUMBRE EN BALANZAS DE PRESIÓN

A continuación, se desarrolla el cálculo de la presión medida por un medidor de presión patrón, y de su incertidumbre típica.

- a) La presión medida por un medidor de presión se obtiene de:

$$P_H = P + C_p + \delta P_{\text{der}} + \delta P_{\text{cap}} + (\rho_f - \rho_a)g_1\Delta h \quad (32)$$

- b) Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a (32) se obtienen las contribuciones a la incertidumbre de la presión de referencia medida por el medidor patrón.

Magnitud	Valor Estimado	Incert. Típica	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u(y_i)$
Indicación del medidor	$P + C_p$	$u(P + C_p)$	Normal	1	$u(P + C_p)$
Deriva	δP_{der}	$u(\delta P_{\text{der}})$	Rectangular	1	$u(\delta P_{\text{der}})$
Condiciones ambientales medidor	δP_{cap}	$u(\delta P_{\text{cap}})$	Rectangular	1	$u(\delta P_{\text{cap}})$
Densidad del fluido de transmisión	ρ_f	$u(\rho_f)$	Rectangular	$g_1 \delta \Delta h$	$g_1 \delta \Delta h u(\rho_f)$
Densidad del aire	ρ_a	$u(\rho_a)$	$g_1 \delta \Delta h$	$-g_1 \delta \Delta h$	$-g_1 \delta \Delta h u(\rho_a)$
Gravedad	g_1	$u(g_1)$	Rectangular	$(\rho_f - \rho_a) \delta \Delta h$	$(\rho_f - \rho_a) \delta \Delta h u(g_1)$
Diferencia de niveles de referencia	Δh	$u(\Delta h)$	Rectangular	$(\rho_f - \rho_a) \delta g_1$	$(\rho_f - \rho_a) \delta g_1 u(\Delta h)$

- c) A continuación, se desarrolla el cálculo de la incertidumbre típica de cada magnitud de entrada:

1. Indicación del medidor ($P + C_p$):

Es la indicación del medidor corregida; su valor es el que marca el medidor más la corrección a aplicar y su incertidumbre se obtiene de su correspondiente certificado de calibración. Normalmente en el certificado de calibración figurará la incertidumbre expandida para un intervalo de confianza del 95,45 %, por lo que:

$$u(P + C_p) = \frac{U(P + C_p)}{2} \quad (33)$$

2. Deriva del patrón (δder):

La corrección de un medidor de presión puede variar entre calibraciones, esto es lo que normalmente se conoce como deriva. Se asume que su valor es cero. Si el intervalo de deriva es δder , la varianza es $u^2 = (\delta der)^2/12$, y la incertidumbre típica debida a la deriva es:

$$u(\delta P_{\text{der}}) = \frac{\delta d_{\text{er}}}{2\sqrt{3}} \quad (34)$$

δd_{er} es igual a dos veces 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.

3. Condiciones ambientales del medidor (δP_{cap}):

Los medidores de presión sufren variaciones en su indicación debido a la variación de temperatura δt . La corrección debido a esta variación es difícil ya que no responden a un fenómeno físico como pudiera ser una dilatación, por consiguiente, tiene que ser incluida como una componente de incertidumbre.

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

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

En este caso el intervalo de posibles lecturas es $\frac{\delta P}{^\circ\text{C}} \frac{I}{100} \delta t$, la varianza es

nuevamente $u^2 = \frac{\left(\frac{\delta P}{^\circ\text{C}} \frac{I}{100} \delta t\right)^2}{12}$ y la incertidumbre típica debida a las condiciones ambientales del calibrador $u = \frac{\frac{\delta P}{^\circ\text{C}} \frac{I}{100} \delta t}{2\sqrt{3}}$.

4. Densidad del fluido de transmisión de la presión (ρ_f):

Ver Anexo III, punto c.7.

5. Densidad del aire (ρ_a):

Ver Anexo III, punto c.4.

6. Gravedad local (g_1):

Ver Anexo III, punto c.3.

7. Diferencia de altura entre los niveles de referencia (Δh):

Ver Anexo III, punto c.16.

d) La incertidumbre típica combinada asociada a la corrección del manómetro diferencial se obtiene combinando sus distintas contribuciones:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} \quad (35)$$

e) Una vez obtenida la incertidumbre típica 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-Satterthwait:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)} \quad (36)$$

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

Factores de cobertura k para diferentes grados de libertad ν_{eff} .

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

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

$$U = ku(y) \quad (37)$$

Metrología

NIPO: 113-20-002-9