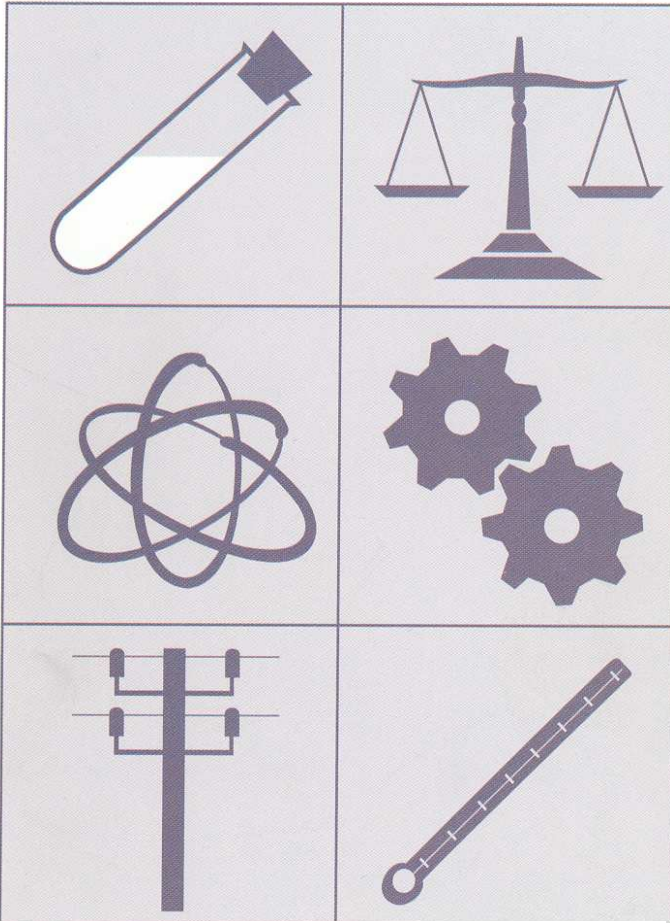


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



PROCEDIMIENTO ME- 008 PARA LA CALIBRACIÓN DE CAUDALÍMETROS DE LÍQUIDOS

m̃ 11



MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO



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

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

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

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

Correo electrónico
cem@cem.es



ÍNDICE

	Página
1. OBJETO	4
2. ALCANCE	4
3. DEFINICIONES.....	5
4. GENERALIDADES.....	6
5. DESCRIPCIÓN	8
5.1. Equipos y materiales	8
5.2. Operaciones previas.....	11
5.3. Proceso de calibración	13
5.4. Toma y tratamiento de datos.....	14
6. RESULTADOS.....	17
6.1. Cálculo de incertidumbres	17
6.2. Interpretación de resultados	24
7. REFERENCIAS.....	25
8. ANEXOS	26



1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer un método para la calibración de caudalímetros de líquidos. Trata, en particular, de los instrumentos de medida, del procedimiento de medida, del método de cálculo del caudal patrón y de las incertidumbres asociadas con las medidas.

2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento es específico para los caudalímetros destinados a la medida de caudal de líquidos en conductos cerrados midiendo estáticamente la masa de líquido vertida en un tanque de pesada.

En principio se puede aplicar a cualquier líquido con la condición de que su presión de vapor sea tal que cualquier escape de líquido del tanque de recogida, por evaporación, no sea suficiente para afectar a la precisión de medida. Está especialmente orientado al caso del agua. Otros líquidos, dependiendo de sus propiedades, podrán requerir consideraciones especiales.

Este procedimiento no es aplicable a líquidos tóxicos o corrosivos.

Se aplicará solamente en instalaciones fijas de laboratorios, siendo necesario asegurar que en funcionamiento la conducción está llena de líquido y que no hay presentes, en la sección de medida, bolsas de aire o vapor.

Debido a la elevada exactitud que puede conseguirse con estos métodos, se utilizan con frecuencia como método primario para calibrar otros métodos o dispositivos para medir el caudal másico o bien el caudal volumétrico. Para este último es necesario conocer exactamente la densidad del líquido.



3. DEFINICIONES

Caudal [3] (4.1):

Cociente entre la cantidad de fluido que circula a través de la sección transversal de un conducto y el tiempo en pasar a través de esta sección.

Caudal másico, [3] (4.1.1):

Caudal para el que la cantidad de fluido se expresa bajo la forma de una masa.

Caudal volumétrico, [3] (4.1.2):

Caudal para el que la cantidad de fluido se expresa bajo la forma de un volumen.

Caudalímetro [3] (6.1):

Instrumento de medición que indica el caudal medido.

Desviador [3] (12.3):

Dispositivo que orienta la corriente hacia el depósito colocado sobre la báscula o hacia un circuito de derivación, sin perturbar el caudal en el circuito.

Estabilizador de flujo:

Dispositivo que forma parte del sistema de medida, asegurando un caudal estable en la conducción alimentada con líquido; por ejemplo, un tanque de carga de nivel constante donde el nivel del líquido se controla por un vertedero de suficiente longitud.



Masa convencional [4] (2.7)

Para una pesa a 20 °C la masa convencional es la masa de una pesa de densidad 8000 kg/m³ que la equilibra en aire con densidad de referencia 1,2 kg/m³.

Método por pesada [3] (12.1):

Método de medida, generalmente aplicado a los líquidos, según el cual la corriente del fluido se dirige intermitentemente o continuamente hacia un depósito colocado sobre la plataforma de un instrumento de pesaje. El caudal se obtiene midiendo la masa de fluido recogida en el tiempo correspondiente.

Pesada estática [3] (12.1.1):

Método según el cual la masa neta de fluido recogida se deduce de la pesada de la tara y de la masa bruta. Estas medidas se realizarán respectivamente antes y después de que el fluido haya sido dirigido hacia el depósito de pesada durante un intervalo de tiempo medido.

4. GENERALIDADES

* Símbolos

Símbolo	Magnitud	Dimensiones	Unidad (SI)
I_0	Indicación con depósito de pesada vacío	M	kg
I	Indicación con depósito de pesada lleno	M	kg
ρ_a	Densidad del aire	ML ⁻³	kg/m ³
ρ_p	Densidad de masas patrón	ML ⁻³	kg/m ³
m	Masa de líquido	M	kg
t	Tiempo de llenado	T	s
q_m	Caudal másico	MT ⁻¹	kg/s
ρ	Densidad del líquido	ML ⁻³	kg/m ³



Símbolo	Magnitud	Dimensiones	Unidad (SI)
q_v	Caudal volumétrico	L^3T^{-1}	m^3/s
D	Diámetro interior de la tubería	L	m
α_c	Coefficiente de calibración	1	1
v	Volumen medido	L^3	m^3

* **Método de calibración mediante pesada estática**

El principio del método de medida de un caudal de líquido por pesada estática consiste en:

- determinar la masa inicial del tanque de pesada más la de cualquier líquido residual que contenga (I_0);
- desviar el flujo dentro del tanque de pesada maniobrando el desviador, el cual acciona un cronómetro para la medida del tiempo de llenado (t);
- determinar la masa final del tanque más la del líquido recogido dentro (I).

Por diferencia entre la lectura de la masa final e inicial se obtiene la masa de líquido medida (m) que permite calcular el caudal másico patrón mediante la indicación del tiempo medido y mediante la densidad del líquido, el caudal másico patrón se transforma en caudal volumétrico patrón.

Finalmente se compara el valor así obtenido con el indicado por el caudalímetro a calibrar.

Comparación de caudal medio y caudal instantáneo

Conviene destacar que sólo puede obtenerse el valor medio del caudal durante el periodo de duración del llenado. Los valores instantáneos de caudal obtenidos en el circuito de flujo mediante otro instrumento, únicamente pueden compararse con el caudal medio, si se mantiene



estable el caudal mediante un dispositivo estabilizador de flujo durante el intervalo de medida o, si los valores instantáneos son estables durante periodo total de llenado.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Desviador

El desviador es un dispositivo móvil que permite dirigir el flujo según su curso normal o bien hacia el tanque de medida. Puede estar constituido por un conducto o canal móvil o, preferentemente, por un deflector que gira alrededor de un eje horizontal o vertical.

El movimiento del desviador debe ser rápido ($\leq 0,1$ s), con el fin de reducir la posibilidad de un error importante sobre la medida del tiempo de llenado. Esto se logra asegurando que el desplazamiento del desviador a través del flujo sea rápido y que el flujo esté en la forma de una fina corriente producida por el paso del líquido a través de una tobera ranurada. Esta corriente de líquido debe tener una longitud de 15 a 50 veces su anchura en el sentido de desplazamiento del desviador. La caída de presión a través de la tobera ranurada no debe exceder de 20 kPa, con el fin de evitar salpicaduras, arrastre de aire y turbulencias en el tanque de pesada. El movimiento del desviador puede producirse mediante dispositivos eléctricos, mecánicos o electromecánicos. El desviador no debe influir sobre el flujo en el circuito durante ninguna fase del proceso de medida.

Para grandes caudales, que implican esfuerzos mecánicos grandes, se pueden utilizar desviadores con tiempos de recorrido mayores (1 s a 2 s) con tal que la ley de maniobra sea constante y cualquier variación en la distribución del caudal como una función de la carrera del desviador sea aproximadamente lineal y sea conocida y pueda verificarse. Se debe controlar cualquier histéresis entre las dos direcciones del recorrido del desviador.



Debe asegurarse, en la utilización del desviador; que no se producen fugas o salpicaduras al exterior cuando el líquido es dirigido de un canal del desviador a otro.

Instrumento para la medida del tiempo

El tiempo de descarga dentro del tanque de pesada o en el tanque volumétrico se mide normalmente mediante un contador electrónico con una base de tiempos de alta precisión, tal como un cristal de cuarzo. El periodo de desviación debe poder leerse con una resolución igual o menor que 0,01 s. El error procedente de esta fuente puede considerarse como despreciable, con tal que la discriminación del dispositivo visualizador del cronómetro sea suficientemente elevada y el equipo sea calibrado periódicamente.

El cronómetro será accionado por el propio movimiento del desviador a través de un interruptor acoplado en el desviador (por ejemplo óptico o magnético). El tiempo de medida debe comenzar o parar cuando el desviador se encuentra en la mitad del recorrido de éste en el chorro de fluido. El error así cometido será despreciable en comparación con el periodo de desviación del líquido al tanque de pesada.

Tanque de pesada

El tanque en el que se descarga el fluido durante cada operación de medida será de suficiente capacidad, de modo que el error en el cálculo del tiempo sea despreciable. El tiempo de llenado para el caudal más elevado previsto será de al menos 30 s.

El tanque puede ser de cualquier forma, pero es fundamental que sea perfectamente estanco, y que se tomen precauciones para evitar salpicaduras de líquido. Para reducir las oscilaciones del líquido en el interior del tanque sus paredes internas pueden ser deflectoras y tener una gran rigidez mecánica.

El tanque puede estar suspendido de un instrumento de pesaje, constituir su bandeja o situarse sobre una bandeja. Para prevenir repentinas sobrecargas que puedan perjudicar al instrumento de pesaje puede ser



necesario inmovilizar el tanque sobre el instrumento de pesaje durante el llenado.

El tanque puede vaciarse por diferentes medios:

- por una válvula de compuerta en el fondo cuya estanqueidad pueda ser comprobada (descarga al aire, manguito transparente o circuito detector de fugas);
- por un sifón acoplado con un dispositivo de descebado controlable;
- por una bomba autocebable o sumergible.

El caudal de desagüe será lo suficientemente grande como para que las medidas puedan sucederse con bastante rapidez.

Se debe comprobar que no existe ninguna conexión por tubería o cable eléctrico susceptible de transmitir tensiones entre el tanque de pesada y las partes fijas de la instalación; las conexiones indispensables serán suficientemente flexibles.

Instrumento de pesaje

El instrumento de pesaje puede ser mecánico o con células de carga indicadoras de tensión y debe ofrecer la sensibilidad, la exactitud y la fiabilidad exigibles.

Este instrumento estará calibrado para masa convencional. De esta forma la densidad de las masas patrón durante la calibración sería siempre 8000 kg/m^3 .

Debe ser calibrado periódicamente para el margen completo de medida utilizando masas patrón.

Medidas auxiliares

Para obtener el caudal volumétrico patrón a partir del caudal másico patrón es necesario conocer con exactitud la densidad del líquido en el momento de la pesada.



La determinación de la densidad del líquido dependerá de sus propiedades, su pureza y sus condiciones de temperatura y presión. Para el caso del agua consultar el anexo II.

Instrumentos climáticos

Se usarán los instrumentos climáticos para la medida de la temperatura, presión y humedad, necesarias para la determinación de la densidad del aire.

5.2. Operaciones previas

Líquido de ensayo

Teniendo en cuenta que las propiedades del líquido de ensayo pueden influir en las características del caudalímetro, la práctica común consiste en utilizar como líquido de calibración agua purificada a una temperatura entre 4 °C y 35 °C, libre de aire retenido y de partículas magnéticas, limpia de partículas visibles y a presión atmosférica.

Consideraciones previas

El caudalímetro a calibrar debe instalarse entre dos tramos rectos de tubería cilíndrica de sección constante. La tubería se considerará rectilínea cuando así se aprecie a simple vista.

El diámetro interior de la tubería debe satisfacer los valores indicados para cada tipo de caudalímetro a calibrar.

El conducto de medida debe presentar una superficie interior limpia, sin incrustaciones, sedimentos ni picaduras, en una longitud mínima de $10D$ aguas arriba y de $5D$ aguas abajo del caudalímetro a calibrar.

A lo largo de las partes rectas mínimas necesarias la tubería debe ser de sección recta interior circular. La sección recta se considerará circular cuando así se aprecie a simple vista. El aspecto circular de la pared exterior puede servir de indicador.



Se pueden utilizar conducciones fabricadas por soldadura siempre que el cordón de soldadura interior sea paralelo al eje de la conducción.

Sobre la conducción se pueden practicar orificios de purga que durante el proceso de calibración deben estar cerrados y no deben permitir circular ningún caudal a su través durante la medición del caudal.

Se comprobará que el caudalímetro a calibrar esté identificado de forma permanente con su marca, nº de serie, o código interno del propietario. Si no fuera así se le asignará un código que identifique marcándolo de forma indeleble, mediante etiqueta fuertemente adherida, etc.

Si para el uso de alguno de los instrumentos de medida es necesario su conexión a alimentación eléctrica es necesario que tengan un periodo de calentamiento de al menos 1 hora.

En caso de usar un programa informático será necesario verificar que está en su versión actual y que ésta está validada.

Se arrancará la bomba y se abrirá lentamente la válvula para evitar daños en el caudalímetro a calibrar. Se procederá a purgar el aire presente en el circuito, para ello se procede a abrir los dispositivos de purga y a verificar el buen funcionamiento de la vena fluidica de salida. Se considerará purgado el circuito cuando por los dispositivos de purga no salga aire interpuesto en la vena fluidica.

Se realizarán varios accionamientos del desviador para verificar su buen funcionamiento (si es de accionamiento neumático se anotarán en el registro de toma de datos las presiones de aire en estas maniobras).

A continuación se procede al llenado del depósito de pesada y su posterior vaciado respetando el tiempo de escurrido (normalmente 30 s) desde el final del caudal principal de salida con el fin de mejorar la repetibilidad de la medición.

5.3. Proceso de calibración

Con el fin de evaluar el funcionamiento del caudalímetro en un campo de caudal prescrito, se deben seleccionar unos puntos de calibración para unos valores de caudal que sean, aproximadamente, 10%; 25 %; 50%; 75% y 100% del intervalo de medida. Se realizarán cinco mediciones para



cada punto de calibración y se calculará el caudal de salida promedio a partir de las cinco lecturas para cada caudal.

En casos especiales, y previa decisión del jefe del laboratorio, se podrán calibrar un número de puntos diferentes, entre ellos se podrían incluir puntos significativos desde el punto de vista del usuario u otros acordados con éste.

Método de calibración por pesada estática

Para cada medición en cada punto de calibración se realizará la siguiente secuencia:

Mediante la válvula de control de caudal se efectúa el ajuste de este al punto de caudal de calibración.

- 1º. Con el desviador situado en posición de vertido en dirección de retorno al tanque de almacenamiento se anotará la lectura dada por el instrumento de pesaje con el depósito de pesaje vacío.
- 2º. Se accionará el desviador a la posición de vertido hacia el depósito de pesada. El detector de proximidad accionará el sistema de medida de tiempo. Una vez transcurrido un tiempo de llenado mínimo de 30 s o una masa de líquido que sea como mínimo un 15% de la capacidad máxima del instrumento de pesaje se accionará el desviador hacia la posición de vertido en dirección de retorno al tanque de almacenamiento y en este momento se detendrá el conteo realizado por el sistema de medida del tiempo.
- 3º. Se anotará la indicación inicial del caudalímetro a calibrar, en el caso que sea necesario (si la medida es por diferencia de dos medidas consecutivas tomadas del caudalímetro a calibrar).
- 4º. En este momento se anota la lectura dada por el caudalímetro a calibrar y la lectura dada por el instrumento de pesaje con la masa de líquido contenida en el depósito de pesada.

Este proceso se repetirá al menos cinco veces para cada punto de caudal calibrado y una vez realizado este proceso se continuará con un nuevo punto de caudal repitiendo la secuencia mencionada anteriormente.



5.4. Toma y tratamiento de datos

Se verificará que todos los instrumentos, medios y sistemas de medida utilizados en el proceso de calibración estén dentro de su periodo válido de calibración. Se anotarán en el registro de datos de la calibración todos los datos identificativos de los instrumentos, medios y sistemas utilizados.

Al inicio del proceso de calibración, en cada punto de caudal se anotarán en la hoja de toma de datos:

- Temperatura ambiente inicial.
- Presión barométrica inicial.
- Humedad relativa inicial
- Temperatura inicial del líquido utilizado en la calibración.
- Densidad del líquido

Para cada punto de calibración se obtienen los datos siguientes:

I_0 = indicación del instrumento de pesaje con el depósito de pesada vacío;

I = indicación del instrumento de pesaje con el depósito de pesada lleno;

t = tiempo de vertido en el depósito de pesaje;

L = lectura del caudalímetro a calibrar.

Cuado el caudalímetro indique volumen se tomarán:

I_0 = indicación del instrumento de pesaje con el depósito de pesada vacío;

I = indicación del instrumento de pesaje con el depósito de pesada lleno;

L_i = lectura inicial caudalímetro a calibrar;



$L_f =$ lectura final del caudalímetro a calibrar.

Al finalizar el proceso de calibración, en cada punto de caudal se anotarán en la hoja de toma de datos:

- Temperatura ambiente final.
- Presión barométrica final.
- Humedad relativa final.
- Temperatura final del líquido utilizado en la calibración.

Se calcularán los siguientes parámetros, utilizando las expresiones que se indican:

1º La magnitud masa $m =$ masa medida

$$m = l - l_0 \quad (1)$$

Si el proceso de calibración se realiza con un instrumento de pesaje de funcionamiento no automático provisto de dispositivo de tara o de puesta a cero la indicación obtenida será:

$$m = I \quad (2)$$

2º Se calculará la densidad del aire húmedo para ello se determinará la presión media, la temperatura media y la humedad relativa media con los datos iniciales y finales de cada una de las condiciones ambientales y de acuerdo con el Anexo I.

3º $q_{mi} =$ caudal másico patrón en una iteración:



$$q_{mi} = \frac{m}{t} \cdot \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}} = \frac{m \cdot \rho \cdot (\rho_p - \rho_a)}{t \cdot \rho_p \cdot (\rho - \rho_a)} \quad (3)$$

Esta expresión se obtiene del apartado 5.1 de la referencia [5].

4º q_{vi} = caudal volumétrico patrón en una iteración:

$$q_{vi} = \frac{q_m}{\rho} = \frac{m \cdot (\rho_p - \rho_a)}{t \cdot \rho_p \cdot (\rho - \rho_a)} \quad (4)$$

Para el caso particular de los cuadralímetros que indican volumen se tiene:

$$v_{vi} = \frac{m \cdot (\rho_p - \rho_a)}{\rho_p \cdot (\rho - \rho_a)} \quad (5)$$

5º Para cada iteración se calculará el correspondiente **coeficiente de calibración** que es el cociente entre el caudal patrón volumétrico y el caudal medio indicado por el cuadralímetro mensurando en cada iteración realizada.

$$\alpha_{vi} = \frac{q_{vi}}{q_{men,i}} \quad (6)$$

Para el caso particular de los cuadralímetros que indican volumen se tiene:

$$\alpha_{vi} = \frac{v_{vi}}{v_{men,i}} \quad (7)$$

6º Como resultado se obtendrá el promedio:



$$\bar{\alpha}_v = \sum_{i=1}^n \alpha_{vi} \quad (8)$$

con n = número de iteraciones en cada punto de caudal de calibración.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

Para el cálculo de incertidumbres se han seguido las pautas recomendadas en la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida” [2].

El resultado de la calibración es el coeficiente de calibración a partir del caudal volumétrico patrón y del caudal medido por el caudalímetro a calibrar.

Para calcular la incertidumbre se aplica la ley de propagación de incertidumbre a la función:

$$\alpha_v = f(q_v, q_{men})$$

con

$$q_v = f(m, t, \rho_a, \rho)$$

por lo tanto

$$u_{\alpha_v}^2 = c_m^2 u_m^2 + c_t^2 u_t^2 + c_{\rho_a}^2 u_{\rho_a}^2 + c_{\rho}^2 u_{\rho}^2 + c_{q_{men}}^2 u_{q_{men}}^2 + s_{\alpha_v}^2 \quad (9)$$

donde s_{α_v} es la desviación típica de la media de la medida, que se calcula como:



$$s_{\alpha_v}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_{vi} - \bar{\alpha}_v)^2}{n \cdot (n-1)} \quad (10)$$

donde n es el número de medidas.

Los coeficientes de sensibilidad son:

$$c_m = \frac{\alpha_v}{m} \quad (11)$$

$$c_t = -\frac{\alpha_v}{t} \quad (12)$$

$$c_{\rho a} = -\alpha_v \cdot \left(\frac{1}{\rho_p - \rho_a} - \frac{1}{\rho - \rho_a} \right) \quad (13)$$

$$c_{\rho} = -\frac{\alpha_v}{(\rho - \rho_a)} \quad (14)$$

$$c_{q_{men}} = \frac{-\alpha_v}{q_{men}} \quad (15)$$

Para el caso particular de los cuadalímetros que indican volumen se tiene:

$$\alpha_v = f(v_v, v_{men})$$

$$v_v = f(m, \rho_a, \rho)$$

por lo tanto

$$u_{\alpha_v}^2 = c_m^2 u_m^2 + c_{\rho a}^2 u_{\rho a}^2 + c_{\rho}^2 u_{\rho}^2 + c_{v_{men}}^2 u_{v_{men}}^2 + s_{\alpha_v}^2 \quad (16)$$

donde s_{α_v} es la desviación típica de la media de la medida, que se calcula igual que en el caso anterior.

Para los coeficientes de sensibilidad se utilizan las ecuaciones anteriormente citadas (11), (12), (13), (14) y (15).



A continuación se estudiarán las distintas contribuciones:

* **Incertidumbre típica asociada al instrumento de pesaje** (u_m).

$$u_m^2 = u_{cal}^2 + u_{res}^2 + u_{res}^2 + u_{temp}^2 + u_{der}^2 + u_{exc}^2 + u_{rep}^2 \quad (17)$$

donde:

u_{cal} = incertidumbre debida al certificado de calibración

u_{res} = incertidumbre debida a la resolución del instrumento

u_{tem} = incertidumbre debida a la influencia de la variación de la temperatura en el instrumento

u_{der} = incertidumbre debida a la deriva del instrumento

u_{exc} = incertidumbre debida a la excentricidad del instrumento

u_{rep} = incertidumbre debida a la repetibilidad del instrumento

Para hacer un uso y una estimación de la incertidumbre adecuadas consúltese el documento “EURAMET/cg-18: Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments” [6]. En general se tendrá:

- Las incertidumbres u_{cal} , u_{rep} y u_{exc} se obtienen a partir de los datos del certificado de calibración. u_{cal} se obtiene de la incertidumbre del calibración dividida entre el factor de cobertura (normalmente $k = 2$), u_{rep} se tomará tal cual y u_{exc} dependerá de la forma de acoplamiento entre balanza y el tanque de pesada.
- La incertidumbre u_{res} se obtiene dividiendo la resolución del instrumento por $\sqrt{12}$ y se multiplica por 2, ya que también hay que tener en cuenta la resolución del cero (o tara). Esto es así en general, pero no es así para los instrumentos multiescalón, por ejemplo. Lo ideal es consultar la referencia [6].
- La incertidumbre u_{der} se obtiene dividiendo la deriva máxima del instrumento en el periodo de calibración entre $\sqrt{3}$. Esta deriva se puede obtener del histórico del instrumento, de datos del fabricante aportados en el manual del equipo, etc.



* **Incertidumbre típica asociada al instrumento de medida del tiempo**
(u_t)

$$u_t^2 = u_{cal}^2 + u_{res}^2 + u_{der}^2 \quad (18)$$

donde:

- u_{cal} = incertidumbre debida al certificado de calibración
- u_{res} = incertidumbre debida a la resolución del instrumento
- u_{der} = incertidumbre debida a la deriva del instrumento

La incertidumbre u_{cal} se calcula a partir de los datos del certificado de calibración.

La incertidumbre u_{res} se obtiene dividiendo la resolución del instrumento entre $\sqrt{12}$.

Y la incertidumbre u_{der} se obtiene dividiendo la deriva máxima del instrumento en el período de calibración entre $\sqrt{3}$. Esta deriva se puede obtener del histórico del instrumento, de datos del fabricante aportados en el manual del equipo, etc.

Dependiendo del tipo de instrumento estas contribuciones pueden variar.

De todas formas en los caudalímetros que indican volumen y no caudal, no se tendrá en cuenta la contribución por incertidumbre.

* **Incertidumbre típica asociada al cálculo de la densidad del aire húmedo** ($u_{\rho a}$).

La densidad del aire húmedo se determina a partir de medidas de presión, temperatura y humedad relativa ambientales y su incertidumbre relativa se estima de acuerdo al Anexo I.

* **Incertidumbre típica asociada al cálculo de la densidad del líquido de calibración** (u_{ρ}).

Dependerá del líquido y las condiciones en las que se encuentre el mismo. Para el caso del agua véase Anexo II.



* **Incertidumbre típica debida al caudalímetro a calibrar** (u_{qmen})

$$u_{qmen}^2 = u_{res}^2 + u_{rep}^2 \quad (19)$$

donde:

u_{res} = incertidumbre debida a la resolución del instrumento;

u_{rep} = incertidumbre debida a la variación en la lectura del caudalímetro durante una iteración.

La incertidumbre u_{res} se obtiene dividiendo la resolución del instrumento entre $\sqrt{12}$.

La incertidumbre u_{rep} se tendrá sólo en el caso de caudalímetros que indiquen caudal, no volumen. Esta contribución sería la máxima variación de la lectura durante la iteración dividida entre $\sqrt{12}$.

A continuación en la tabla 1 se resumen de las contribuciones a la incertidumbre a partir de la cual se obtiene la incertidumbre combinada.

magnitud X_i	estimación x_i	incertidumbre típica $u(x_i)$	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$
m	m	u_m	$\frac{\alpha_v}{m}$	$\frac{\alpha_v}{m} \cdot u_m$
t	t	u_t	$-\frac{\alpha_v}{t}$	$-\frac{\alpha_v}{t} \cdot u_t$
ρ_a	ρ_a	u_{ρ_a}	$-\alpha_v \cdot \left(\frac{1}{\rho_p - \rho_a} - \frac{1}{\rho - \rho_a} \right)$	$-\alpha_v \cdot \left(\frac{1}{\rho_p - \rho_a} - \frac{1}{\rho - \rho_a} \right) \cdot u_{\rho_a}$
ρ	ρ	u_{ρ}	$-\frac{\alpha_v}{(\rho - \rho_a)}$	$-\frac{\alpha_v}{(\rho - \rho_a)} \cdot u_{\rho}$
q_{men}	q_{men}	u_{qmen}	$\frac{-\alpha_v}{q_{men}}$	$\frac{-\alpha_v}{q_{men}} \cdot u_{qmen}$
s_{cov}	0	s_{cov}	1	s_{cov}
α_v				$u(\alpha_v) = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$

Tabla 1: Contribuciones a la incertidumbre para caudalímetros que indican caudal.

Para los caudalímetros que indican volumen se tiene la tabla 2.

magnitud X_i	estimación x_i	incertidumbre típica $u(x_i)$	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$
m	m	u_m	$\frac{\alpha_v}{m}$	$\frac{\alpha_v}{m} \cdot u_m$
ρ_a	ρ_a	u_{ρ_a}	$-\alpha_v \cdot \left(\frac{1}{\rho_p - \rho_a} - \frac{1}{\rho - \rho_a} \right)$	$-\alpha_v \cdot \left(\frac{1}{\rho_p - \rho_a} - \frac{1}{\rho - \rho_a} \right) \cdot u_{\rho_a}$
ρ	ρ	u_ρ	$-\frac{\alpha_v}{(\rho - \rho_a)}$	$-\frac{\alpha_v}{(\rho - \rho_a)} \cdot u_\rho$
v_{men}	v_{men}	$u_{v_{men}}$	$\frac{-\alpha_v}{v_{men}}$	$\frac{-\alpha_v}{v_{men}} \cdot u_{v_{men}}$
s_{α_v}	0	s_{α_v}	1	s_{α_v}
α_v				$u(\alpha_v) = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$

Tabla 2: Contribuciones a la incertidumbre para caudalímetros que indican volumen.

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

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (20)$$

En general los grados de libertad se considerarán infinitos excepto para la desviación típica de la media que son el número de medidas menos uno, es decir (n-1). De todas formas pueden hacerse otras consideraciones [2].

A partir de los grados de libertad efectivos y de la tabla siguiente se obtiene el factor k . La tabla siguiente 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

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

$$U = k \cdot u(y) \quad (21)$$

6.2. Interpretación de los resultados

Se puede realizar una representación gráfica en la cual el caudal mensurando figure en abcisa y el coeficiente de calibración en ordenadas.

El periodo de recalibración debe establecerse en cada caso particular en función de las condiciones y frecuencia de uso y la incertidumbre de uso requerida. En cualquier caso el responsable final de asignar el periodo de recalibración es siempre el usuario del equipo.

7. REFERENCIAS

- [1] Vocabulario Internacional de metrología (VIM), CEM, 3ª Edición 2008
- [2] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008. (GUM 1995 with minor corrections).
- [3] Norma UNE-EN 24006 Medición del caudal de fluidos en conductos cerrados. Vocabulario y símbolos. AENOR 1997.
- [4] OIML R 111-1:2004 Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1–2, M2, M2–3 and M. Part 1: Metrological and technical requirements.



- [5] Norma UNE EN 24185 Medida de caudal de líquidos en conductos cerrados MÉTODO POR PESADA. AENOR 1994.
- [6] EURAMET/cg-18/v.02: Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments,
- [7] A. Picard, R. S. Davis, M. Gläser and K. Fujii; *Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)*. Metrologia 45 (2008,) 149 - 155.
- [8] E. Batista and R. Paton, *The selection of water property formulae for volume and flow calibration*, Metrologia, 44 (2007) 453-463

8. ANEXOS

Anexo I.- Cálculo de la densidad del aire húmedo

Anexo II.- Cálculo de la densidad del agua

Anexo III.- Ejemplo numérico de aplicación de este procedimiento

Anexo IV.- Anexo relativo a los diversos tipos de caudalímetros a calibrar (informativo).



ANEXO I. Cálculo de la densidad del aire húmedo

El presente anexo se basa en la determinación de la densidad del aire y su incertidumbre partiendo de la ecuación recomendada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) para la determinación de la densidad del aire húmedo (ecuación CIPM 2007) [7].

Los rangos de presión y temperatura recomendados con la cual la ecuación del CIPM-2007 debe ser usada son:

$$600 \text{ hPa} \leq p \leq 1100 \text{ hPa}$$
$$15 \text{ °C} \leq t \leq 27 \text{ °C}$$

Así mismo la humedad relativa tiene el siguiente rango: $0 \leq h \leq 1$

* **Símbolos**

p	presión
T	temperatura termodinámica ambiente expresada en kelvin
t	temperatura expresada en grados Celsius
h	humedad relativa del aire
χ_{CO_2}	fracción molar de CO_2
n	número de moles
R	constante molar de los gases
Z	factor de compresibilidad
m	masa del gas
M	masa molar del gas
ρ_a	densidad del aire
χ_v	fracción molar de vapor de agua
M_v	masa molar de vapor de agua
M_a	masa molar de aire seco
f	factor de aumento
p_{sv}	presión de saturación de vapor de agua



* **Proceso de cálculo**

$$\rho_a = p \cdot M_a \cdot [1 - \chi_v (1 - M_v / M_a)] / Z \cdot R \cdot T \quad (22)$$

Esta ecuación contiene una serie de parámetros que son considerados constantes, R , M_v , M_a y otros, χ_v y Z , que serán determinados en cada momento como función de las condiciones ambientales experimentales.

Constante molar de los gases R

R es una constante universal. Su valor fue recalculado según CODATA 2006 como

$$R = 8,314\ 472\ (15)\ \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Masa molar de aire seco M_a

En la fracción molar del aire seco interviene la fracción de CO_2 , si esta no se mide se toma un valor como constante de 4×10^{-4} . Como consecuencia el valor de M_a es $28,965\ 46 \times 10^{-3}\ \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Masa molar de agua M_v

$$M_v = 18,015 \times 10^{-3}\ \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$$

En consecuencia:

$$(1 - M_v / M_a) = 0,378\ 0$$

Fracción molar: χ_v

Es calculada en función de la humedad relativa del aire, de la presión y de la temperatura.

$$\chi_v = h \cdot f(p, t) \cdot p_{SV}(t) \cdot p^{-1} \quad (23)$$

$$p_{SV} = 1\ \text{Pa} \cdot \exp(A \cdot T^2 + B \cdot T + C + D \cdot T^{-1}) \quad (24)$$

Siendo:



$$\begin{aligned}A &= 1,237\,884\,7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2} \\B &= -1,912\,131\,6 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1} \\C &= 33,937\,110\,47 \\D &= -6,3431645 \times 10^3 \text{ K}\end{aligned}$$

T es la temperatura termodinámica expresada en kelvin.

f es el llamado factor de aumento, debido a que el aire húmedo no se comporta como un gas perfecto.

$$f = \alpha + \beta \cdot p + \gamma t^2 \quad (25)$$

$$\begin{aligned}\alpha &= 1,000\,62 \\ \beta &= 3,14 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1} \\ \gamma &= 5,6 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}\end{aligned}$$

La temperatura t se expresa en grados Celsius y la presión p en pascales.

Factor de compresibilidad : Z

$$Z = 1 - p \cdot T^{-1} \cdot [(a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2) + (b_0 + b_1 \cdot t) \cdot \chi_V + (c_0 + c_1 \cdot t) \cdot \chi_V^2] + p^2 \cdot T^2 \cdot (d + e \cdot \chi_V^2) \quad (26)$$

$$\begin{aligned}a_0 &= 1,58123 \times 10^{-6} \text{ KPa}^{-1} \\ a_1 &= -2,9331 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1} \\ a_2 &= 1,1043 \times 10^{-10} \text{ K}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \\ b_0 &= 5,707 \times 10^{-6} \text{ KPa}^{-1} \\ b_1 &= -2,051 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1} \\ c_0 &= 1,9898 \times 10^{-4} \text{ KPa}^{-1} \\ c_1 &= -2,376 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1} \\ d &= 1,83 \times 10^{-11} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2} \\ e &= -0,765 \times 10^{-8} \text{ K}^2 \cdot \text{Pa}^{-2}\end{aligned}$$

* Incertidumbres

Es importante distinguir las contribuciones:



Contribución de incertidumbre debida a los parámetros medidos

Los parámetros medidos son presión, temperatura ambiental y humedad relativa.

Sus contribuciones en la ecuación de la incertidumbre de la densidad del aire son los tres primeros términos de la expresión siguiente:

$$\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial T}\right)^2 u_T^2 + \left(\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial p}\right)^2 u_p^2 + \left(\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial h}\right)^2 u_h^2 + u_{\text{formula}}^2} \quad (27)$$

Analizando cada uno de estos miembros por separado mediante un procedimiento matemático de derivados parciales obtenemos los siguientes valores:

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{d \rho_a}{dT} = -4 \times 10^{-3} \text{ (1/K)}$$

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{d \rho_a}{dp} = 1 \times 10^{-5} \text{ (1/Pa)}$$

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{d \rho_a}{dh} = -9 \times 10^{-3} \text{ (1/h)}$$

Los valores $u(T)$, $u(p)$ y $u(h)$ dependen de los instrumentos climáticos utilizados.

Contribución de incertidumbre debida a la fórmula

Corresponde a la incertidumbre de la densidad del aire debida a la ecuación en sí misma y depende de las incertidumbres de los valores que fueron considerados constantes. Como no se mide CO₂ la incertidumbre relativa debida a la fórmula es $10,3 \times 10^{-5}$.



* **Un ejemplo del cálculo de la densidad del aire húmedo**

En el proceso de calibración se han realizado los ensayos con las siguientes condiciones ambientales, tomadas de las indicaciones dadas por:

- Un termómetro calibrado con una incertidumbre de uso de 0,05 °C (para $k = 1$).
- Un barómetro calibrado con una incertidumbre de uso de 50 Pa (para $k = 1$).
- Un higrómetro analógico calibrado con una incertidumbre de uso de 1,5 % (para $k = 1$).

temperatura ambiente	15°C
presión ambiente	100 000 Pa
humedad relativa ambiente	90%
densidad del aire húmedo	1,202 kg/m ³

La incertidumbre relativa se calculará mediante la ecuación (27):

$$\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = \sqrt{(-4 \times 10^{-3})^2 (0,05)^2 + (1 \times 10^{-5})^2 (50)^2 + (-9 \times 10^{-3})^2 (1,5)^2 + (10,3 \times 10^{-5})^2}$$

La densidad del aire húmedo medida es 1,202 kg/m³, luego la incertidumbre es:

$$u(\rho_a) = 0,015 \text{ kg/m}^3$$

Si las condiciones ambientales varían durante el ensayo, por ejemplo 1°C, 50 Pa y 2 % de HR la densidad de aire será la misma pero la incertidumbre será:



$$\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = \sqrt{\left(-4 \times 10^{-3}\right)^2 \cdot \left((0,05)^2 + \frac{1}{12} \right) + \left(1 \times 10^{-5}\right)^2 \cdot \left((50)^2 + \frac{(50)^2}{12} \right) + \left(-9 \times 10^{-3}\right)^2 \cdot \left((1,5)^2 + \frac{(2)^2}{12} \right) + \left(10,3 \times 10^{-5}\right)^2}$$

En este caso la incertidumbre es:

$$u(\rho_a) = 0,017 \text{ kg/m}^3$$



ANEXO II . Cálculo de la densidad del agua

Para el cálculo del valor de la densidad de una muestra debidamente preparada de agua bidestilada, sin aire y desionizada se utiliza la ecuación de Tanaka (véase referencia [8]), que es la ideal para el rango de 0°C a 40°C, siendo:

$$\rho_w = a_5 \cdot \left(1 - \frac{(t_w + a_1)^2 \cdot (t_w + a_2)}{a_3 \cdot (t_w + a_4)} \right) \quad (28)$$

con

$$\begin{aligned} a_1 &= - 3,9383 \ 035 \\ a_2 &= 301,707 \\ a_3 &= 522 \ 528,9 \\ a_4 &= 69,348 \ 81 \\ a_5 &= 999,974 \ 950 \end{aligned}$$

La ecuación anterior calcula la densidad del agua en kg/m³ donde t es la temperatura en °C. Esta ecuación tiene una incertidumbre para $k = 2$ de 0,000 9 kg/m³.

Si se quiere trabajar a otras temperaturas la ecuación ideal es la IAPWS 95 (véase referencia [8]), que es válida hasta 95 °C:

$$\rho_w = c_0 \cdot \left(\frac{1 + c_1 \cdot t_n + c_2 \cdot t_n^2 + c_3 \cdot t_n^3}{1 + c_4 \cdot t_n + c_5 \cdot t_n^2} \right) \quad (29)$$

con

$$\begin{aligned} c_1 &= 999,843 \ 82 \\ c_2 &= 1,463 \ 938 \ 6 \\ c_3 &= - 0,015 \ 505 \\ c_4 &= -0,030 \ 977 \ 7 \\ c_5 &= 0,064 \ 8931 \end{aligned}$$



La ecuación anterior calcula la densidad del agua en kg/m^3 donde t_n es la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ dividido entre 100 ($t_w/100$). Esta ecuación difiere de la anterior en 10^{-3} kg/m^3 .

El problema radica en que el agua bidestilada, desionizada y sin aire no suele estar disponible en las calibraciones de caudal. Aparte el agua en su movimiento variará su contenido de aire disuelto así como su contenido iónico.

La corrección para la densidad del agua cuando está saturada de aire viene dada en función de la temperatura por la ecuación de Watanabe [8]. La corrección máxima es $c_a = -5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

Por otra parte existe el problema de la posible variación del contenido iónico del agua, así como su posible contaminación durante la medición. Lo que se suele hacer en la práctica es la medida in situ con un densímetro y suponer que su comportamiento con la temperatura es el mismo que para agua bidestilada, desionizada y sin aire. En los casos mejores la incertidumbre en la medida de estos densímetros relativos es de 10^{-2} kg/m^3 [9].

Por otra parte si el agua está a presiones distintas de la atmosférica habrá que tener en cuenta que el coeficiente de compresibilidad isoterma viene dado por la siguiente expresión (véase referencia [8]):

$$\frac{\partial \rho}{\rho_w \cdot \partial p} = A_0 \cdot \left(\frac{1 + A_1 \cdot t_n + A_2 \cdot t_n^2 + A_3 \cdot t_n^3}{1 + A_4 \cdot t_n} \right) \text{Pa}^{-1} \quad (30)$$

con

$$A_1 = 5,088\ 21 \times 10^{-10}$$

$$A_2 = 1,263\ 941\ 8$$

$$A_3 = 0,266\ 026\ 9$$

$$A_4 = 0,373\ 483\ 8$$

$$A_5 = 2,020\ 524\ 2$$



* **Símbolos y abreviaturas**

ρ_w	densidad del agua
t_w	temperatura en grados Celsius de acuerdo con IT-90
c_a	corrección por contenido en aire
r	medida de la densidad con el densímetro

* **Incertidumbres**

Se considera agua a una determinada temperatura inferior a 40 °C a presión atmosférica cuya densidad se mide con un densímetro y de la que no se conoce nada de su contenido en aire. De todas formas el contenido en aire puede variar a lo largo del circuito de medida.

Partiendo de la ecuación de Tanaka (28) para la variación de la densidad con la temperatura y de acuerdo con la ley de la propagación de incertidumbres, la incertidumbre combinada de un resultado de medida se obtiene por combinación de las incertidumbres particulares de cada variable implicada:

$$u_c(\rho_w) = \sqrt{\left(\frac{d\rho_w}{dt}\right)^2 \cdot u^2(t) + u^2(f) + u^2(c_a) + u^2(r)} \quad (31)$$

siendo las expresiones:

$$\left(\frac{d\rho_w}{dt}\right) = \frac{-a_5 \cdot (t_w + a_1)}{a_3 \cdot (t_w + a_4)^2} \cdot [(2t_w + a_1 + a_2) \cdot (t_w + a_4) - (t_w + a_1) \cdot (t_w + a_2)] \quad (32)$$

$u(t)$: incertidumbre asociada a la medida de temperatura. Influirán las contribuciones del termómetro y la posible variación de la temperatura durante la medida.

$$u(f) = \frac{0,0009}{2} \text{ kg/m}^3$$



$$u(c_a) = \frac{5 \times 10^{-3}}{\sqrt{12}} \text{ kg/m}^3$$

$u(r)$: incertidumbre asociada a la medida de la densidad para $k = 1$

* Ejemplo del cálculo de la densidad del agua

Para el cálculo de la densidad del agua se ha utilizado un termómetro con resolución de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ e incertidumbre de calibración de $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ ($k = 1$). La temperatura ha variado $1 \text{ }^\circ\text{C}$ durante el ensayo.

El densímetro proporciona medidas con una incertidumbre para $k = 1$ de 10^{-2} kg/m^3 .

temperatura del líquido	20 °C
densidad del líquido	998,197 kg/m ³

La incertidumbre es:

$$u_c(\rho_w) = \sqrt{0,2^2 \cdot \left(\frac{0,1^2 + 1^2}{12} + 0,05^2 \right) + \frac{0,0009^2}{2} + \frac{0,005^2}{12} + 0,01^2}$$

De forma que el resultado de la incertidumbre para $k = 1$ es $0,062 \text{ kg/m}^3$.



ANEXO III. Ejemplo numérico de aplicación de este procedimiento

En este anexo se da un ejemplo numérico de aplicación del procedimiento descrito.

El instrumento a calibrar es un contador de agua fría con rango de caudal entre 50 L/h y 5 000 L/h.

El punto de calibración realizado se corresponde con un caudal volumétrico de 1 250 L/h repitiéndose las mediciones cinco veces.

Como líquido se ha utilizado agua potable limpia cuya densidad se ha medido con un densímetro. La presión de línea es tal que los efectos en la densidad de agua por compresibilidad se consideran despreciables.

Como equipos de medida se han empleado:

- Instrumento de pesaje de alcance máximo 600 kg, escalón de 0,1 g y calibrado con una incertidumbre máxima expandida de calibración en su rango de utilización de ± 20 g con $k=2$ y de 4,6 g para la repetibilidad. El instrumento tiene una deriva máxima entre dos calibraciones sucesivas de 80 g. No hay efecto de excentricidad apreciable debido a la configuración del sistema.
- Termómetros de resistencia de platino para la medida de la temperatura del agua y del aire de escalón 0,1 °C y calibrados con una incertidumbre de expandida, para $k=2$, de 0.1 °C. Su deriva es despreciable.
- Higrómetro con escalón de medida de 1% de HR e incertidumbre expandida de calibración, para $k=2$, de 2 % HR. Su deriva es despreciable.
- Barómetro con escalón de lectura de 10 Pa y calibrado con una incertidumbre expandida, para $k = 2$, de 12,9 Pa. Su deriva es despreciable.
- Densímetro con un incertidumbre de uso de 10^{-2} kg/m³ para $k = 1$.



En las siguientes tablas 3 y 4 se incluyen los datos de medición, el tratamiento de los mismos y los resultados e incertidumbres, para el método, obtenidos:

Laboratorio: Dirección		Calibración de caudalímetros Nº procedimiento técnico: AA-BB		Hoja de registro de toma de datos pág. 1 de XX páginas	
Nº de certificado (o expediente): XX/YY					
Datos del caudalímetro			Tipo: Contador de agua fría		
Fabricante: AAA		Marca: BBB		Modelo: CCC	
Nº de serie: 97120043		Rango de caudal de medida: 50 L/h a 5 000L/h		Resolución: 0,01 L	
Puntos de caudal de calibración: 500 L/h; 1 250 L/h; 2 500 L/h; 3 750 L/h y 5 000 L/h					
Observaciones: Posición de trabajo horizontal					
Fecha de recepción: DD/MM/AA		Fecha de inicio: DD/MM/AA		Fecha de finalización: DD/MM/AA	
Equipos de medida		Nº de inventario del laboratorio	Calibrado	Incertidumbre de uso ($k = 1$)	
Instrumento de pesaje		LC-001-P	Sí	$8,1 \times 10^{-3}$ kg	
Instrumento de medida del tiempo de llenado		LC-008-P	Sí	1,3 s	
Termómetro para temperatura del líquido		LC-010-P	Sí	0,058 °C	
Termómetro para temperatura ambiente		LC-011-P	Sí	0,058 °C	
Higrómetro		LC-003-P	Sí	1% Hr	
Barómetro		LC-004-P	Sí	7,1 Pa	
Densímetro		LC-005-P	Sí	0,01 kg/m ³	
El técnico que ha realizado la calibración:				Firma:	
				Fecha: DD/MM/AA	

Tabla 3: Formato de hoja para la calibración



La incertidumbre de utilización engloba a todas las componentes de la incertidumbre típica (resolución, repetibilidad, deriva, etc.).

Condiciones de medida:

	Máxima	Mínima
Temperatura ambiente	20,1 °C	19,9 °C
Presión ambiente	93 550 Pa	93 500 Pa
Humedad ambiente	51 %	49 %
Temperatura del líquido	20,5 °C	19,5 °C

Tabla 4: Mediciones de las condiciones ambientales

Como resultado se tendrá que la densidad del aire durante la medida fue de $1,107 \text{ kg/m}^3$ con incertidumbre $0,011 \text{ kg/m}^3$ ($k = 1$).

La densidad de agua a considerar fue de $998,197 \text{ kg/m}^3$ con incertidumbre $0,062 \text{ kg/m}^3$ ($k = 1$).

Medidas obtenidas:

m (kg)	t (s)	L_f (L)	L_i (L)
110,301	292	1 296,85	1 196,45
110,285	293	1 397,27	1 297,65
110,167	292	1 497,45	1 397,25
110,250	288	1 597,60	1 497,45
110,230	289	1 697,90	1 597,60

Tabla 5: Mediciones de las variables

Para esta medida del cuadalímetro el tiempo no influye. Realizando los cálculos se obtiene:

v_v	v_{men}	α_v
0,1106	0,1004	1,1017
0,1106	0,1004	1,1013
0,1105	0,1002	1,1025
0,1106	0,1002	1,1039
0,1105	0,1003	1,1021



A continuación se presenta el resumen de los cálculos de incertidumbre:

magnitud X_i	estimación x_i	incertidumbre típica $u(x_i)$	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a la incertidumbre típica $u_i(y)$
m	101,25 kg	0,047 kg	0,01 kg ⁻¹	$4,7 \times 10^{-4}$
ρ_a	1,107 kg/m ³	0,011 kg/m ³	$-9,7 \times 10^{-4} \text{ (kg/m}^3\text{)}^{-1}$	$-1,1 \times 10^{-5}$
ρ	998,197 kg/m ³	0,062 kg/m ³	$-1,1 \times 10^{-3} \text{ (kg/m}^3\text{)}^{-1}$	$-6,9 \times 10^{-5}$
v_{men}	0,10029 m ³	$2,9 \times 10^{-6}$	- 11	$-3,2 \times 10^{-5}$
s_{env}	0	$4,1 \times 10^{-4}$	1	$4,1 \times 10^{-4}$
α_v	1,1023			$6,3 \times 10^{-4}$

Por el cálculo de la fórmula de Welch-Satterthwaite (20) se tiene:

$$v_{eff} = \frac{(6,3 \times 10^{-4})^4}{(4,1 \times 10^{-4})^4} \cong 23$$

$$5 - 1$$

A estos grados de libertad le corresponde un factor $k = 2,11$.

Como resultado se obtiene un valor de $1,1023 \pm 0,013$.



ANEXO IV. Anexo relativo a los diversos tipos de caudalímetros a calibrar (informativo)

En este anexo se describen los posibles caudalímetros a calibrar y sus normas de referencia, en su caso.

* **Método de presión diferencial**

Caudalímetro insertado en un conducto para crear una diferencia de presión cuya medida, junto con un conocimiento de las condiciones del fluido y de la geometría del dispositivo y del conducto, permiten calcular el valor del caudal. Dentro de este tipo están:

- Placa con orificio (concéntrica, excéntrica, segmental).
- Tobera (ISA 1932; de radio largo).
- Tubo Venturi (clásico, truncado, venturi-tobera).

Norma UNE-EN ISO 5167-1

* **Método de caudal crítico**

Método según el cual se crea una corriente crítica con la ayuda de un dispositivo de presión diferencial adecuado (con velocidad sónica en el cuello). Dentro de este tipo se encuentran:

- Tobera sónica.
- Venturi-tobera sónica.
- Venturi-tobera con cuello toroidal.
- Venturi-tobera con cuello cilíndrico.

* **Método de exploración del campo de velocidades**



A partir de la medida de las velocidades locales en una sección transversal del conducto, permiten deducir el caudal por integración de la distribución de las velocidades en esta sección transversal. De este tipo son:

- Molinetes.
- Molinetes de hélice.
- Hélice autocompensadora.
- Tubo de Pitot (sencillo, doble).

* **Método por trazadores**

Son métodos de medida de caudal que implican la inyección y la detección de un trazador (sustancia química o radiactiva) en la corriente. Dentro de este tipo están los siguientes métodos:

- Dilución.
- Inyección a caudal constante.
- Integración.
- Tiempo de tránsito.

* **Método electromagnético**

El caudalímetro genera un campo magnético perpendicular a la corriente, que permite deducir el caudal a partir de la fuerza electromotriz inducida producida por el desplazamiento del fluido conductor en el campo magnético. Un caudalímetro electromagnético comprende un elemento primario y uno o más elementos secundarios.

- Norma UNE-EN ISO 6817
- Norma UNE-EN 29104 (ISO 9104:1991)

* **Método mediante caudalímetros que actúan por inestabilidad**

Aquellos en que se genera intencionadamente una inestabilidad en la corriente con ayuda de un obstáculo sin ninguna pieza móvil. La inestabilidad presente una frecuencia regular que es función de la



velocidad del fluido y que se mide mediante un sensor. En este tipo podemos destacar:

- Caudalímetro fluídico.
- Caudalímetro de vórtice.
- Caudalímetro de desprendimiento de torbellinos.
- Caudalímetro por precesión de torbellino.
- Oscilador de estela.

* **Método mediante caudalímetros de sección variable**

La corriente pasa a través de un espacio comprendido entre dos elementos donde uno se desplaza con respecto al otro bajo el efecto del empuje hidrodinámico equilibrado por una fuerza contraria (gravedad o tensión elástica) de tal manera que cuanto más aumenta el caudal mayor es la sección transversal de paso de la corriente. La indicación del instrumento es una medida del desplazamiento del elemento móvil a partir de la posición de “caudal cero”, o una medida de la presión diferencial a través del área variable. En este tipo podemos encontrar:

- Caudalímetro de carga constante.
- Caudalímetro de carga variable.
- Caudalímetro cónico de flotador.
- Caudalímetro por obturador.
- Caudalímetro por disco.
- Caudalímetro de compuerta.
- Caudalímetro por muelle.

* **Método de medida ultrasónico**

Son aquellos en los que se mide el efecto de la corriente de un fluido sobre un haz de ultrasonidos y se relaciona con el caudal. Un caudalímetro ultrasónico está constituido de uno o más transductores ultrasónicos y de un equipo que permite realizar la medida de caudal a partir de las señales ultrasónicas generadas y recibidas y convierte esta medida en una salida normalizada proporcional al caudal. En este tipo cabe destacar:



- Caudalímetro por tiempo de propagación.
- Caudalímetro por desviación del haz.
- Caudalímetro por variación de fase.

* **Método por contadores**

Aparatos medidores integradores autónomos, que determinan continuamente el volumen de fluido que pasa por ellos, empleando un procedimiento mecánico directo, en el que intervienen dos cámaras volumétricas con paredes móviles (contadores volumétricos), o en función del efecto de la velocidad del fluido sobre el giro de un elemento en movimiento (contadores de velocidad).

* **Otros métodos**

- Caudalímetro por correlación cruzada.- Caudalímetro en el cual dos señales de separación conocida son moduladas por las perturbaciones de la corriente del fluido. Estas señales se comparan con la ayuda de un correlacionador que permite conocer el tiempo tomado por una perturbación para recorrer la distancia indicada entre los dos receptores y calcular el caudal. El principio por correlación puede aplicarse a numerosos tipos de señales introducidas o existentes (ultrasónicas, térmicas, radioactivas, etc.)
- Caudalímetro por efecto Doppler.- Se aplica el efecto Doppler a una señal emitida en una tubería. La señal es reflejada por las discontinuidades del fluido y captada por un receptor. La comparación de las frecuencias de la señal reflejada y de la señal emitida permite calcular la velocidad.
- Caudalímetro por turbina.- La corriente de fluido acciona un rotor con varias paletas, con el mismo eje que la conducción. El caudal es proporcional a la velocidad de giro del rotor, que se mide mediante un dispositivo que puede ser mecánico, óptico, magnético, etc.



- Caudalímetros de correlación cruzada de varios sensores.- Método en el que se utilizan un mínimo de dos tipos de sensores para proporcionar los datos (del caudal o una característica física). Estos datos se combinan o se tratan para obtener el caudal másico, la energía del fluido.
- Caudalímetro por correlación cruzada.- Método en el que, como mínimo, se emiten tres haces de señales para producir, al menos, dos series combinadas de datos de correlación cruzada.

