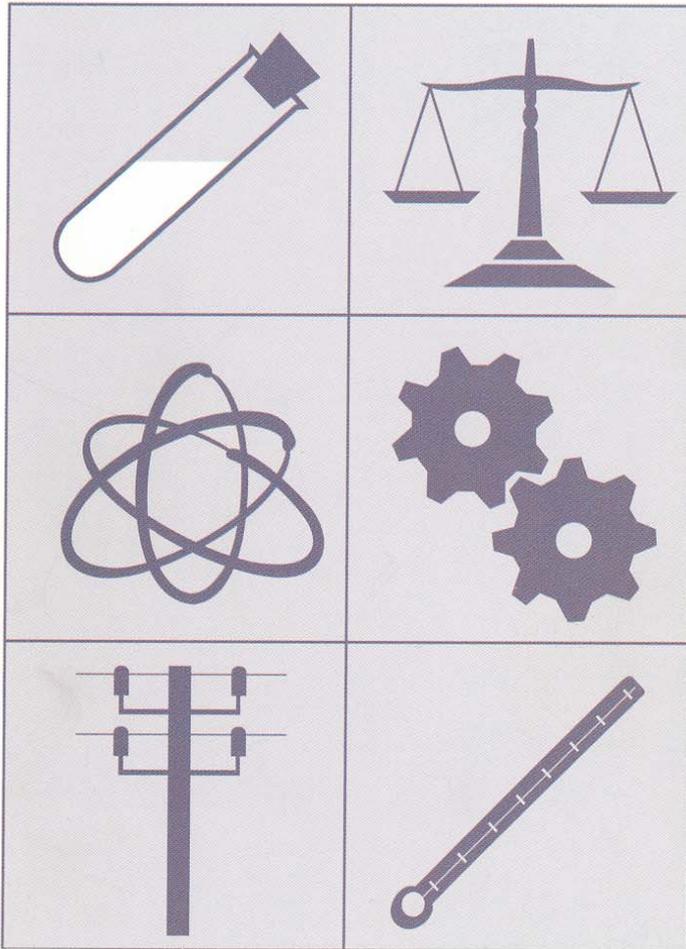


Metrología

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN



**PROCEDIMIENTO ME- 009 PARA
LA CALIBRACIÓN DE
CAUDALÍMETROS DE GASES.**

m̃ 08



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



INDICE

	Página
1. OBJETO	5
2. ALCANCE	5
3. DEFINICIONES	5
4. GENERALIDADES	8
4.1. Descripción y base de funcionamiento de algunos caudalímetros	10
4.2. Calibradores para caudalímetros de gases	17
4.3. Efectos del fluido de calibración	17
5. DESCRIPCIÓN.....	19
5.1. Equipos y materiales	19
5.2. Condiciones durante la calibración y operaciones previas....	20
5.3. Proceso de calibración.....	23
5.4. Toma y tratamiento de datos	30
6. RESULTADOS	37
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	37
6.2. Interpretación de resultados.....	52
7. REFERENCIAS	54
7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración	54
7.2. Otras referencias de consulta	54



8. ANEXOS	55
ANEXO I: Ejemplo de calibración de un caudalímetro en situación a)	56
ANEXO II: Ejemplo de calibración de un caudalímetro en situación b)	61
ANEXO II: Ejemplo de calibración de un caudalímetro de turbina	67
ANEXO IV: Algunos tipos de calibradores de caudalímetros de gases	74
ANEXO V: Ejemplos donde se necesita instrumentación auxiliar.....	78
ANEXO VI: Criterio estadístico de Chauvenet	80



1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto dar a conocer los métodos y la sistemática necesaria para realizar la calibración de caudalímetros de gases.

2. ALCANCE

El ámbito de aplicación del presente procedimiento se limita a la calibración de caudalímetros de gases.

Puesto que se usará algún patrón de trabajo como los descritos en el ANEXO D, cuya incertidumbre es del orden del 0,2% de la lectura, los caudalímetros de gases objeto de calibración bajo este procedimiento tendrán una incertidumbre ligeramente superior a esta.

El campo de medida se extenderá desde casi 0 L/min hasta 1500 L/min..

3. DEFINICIONES

Ajuste de un sistema de medida [11] (3.11)

Conjunto de operaciones realizadas sobre un sistema de medida para que proporcione indicaciones prescritas, correspondientes a valores dados de la magnitud a medir.

NOTA 1 Diversos tipos de ajuste de un sistema de medida son: ajuste de cero, ajuste del offset (desplazamiento) y ajuste de la amplitud de escala (denominado también ajuste de la ganancia).

NOTA 2 No debe confundirse el ajuste de un sistema de medida con su propia calibración, que es un requisito para el ajuste.

NOTA 3 Después de su ajuste, generalmente un sistema de medida debe ser calibrado nuevamente.



Calibración. [11] (2.39)

Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

NOTA 1 Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

NOTA 2 Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medida, a menudo llamado incorrectamente “autocalibración”, ni con una verificación de la calibración.

NOTA 3 Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

Repetibilidad de medida [11] (2.21)

Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad.

Error de medida [11] (2.16):

Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

NOTA 1 El concepto de error de medida puede emplearse

a) cuando exista un único valor de referencia, como en el caso de realizar una calibración mediante un patrón cuyo valor medido tenga una incertidumbre de medida despreciable, o cuando se toma un valor convencional, en cuyo caso el error es conocido.

b) cuando el mensurando se supone representado por un valor verdadero único o por un conjunto de valores verdaderos, de amplitud despreciable, en cuyo caso el error es desconocido.

NOTA 2 Conviene no confundir el error de medida con un error en la producción o con un error humano.

Corrección [11] (3.15)



Compensación de un efecto sistemático estimado.

NOTA 1 Véase la Guía ISO/IEC 98-3:2008, 3.2.3, para una explicación del concepto de “efecto sistemático”.

NOTA 2 La compensación puede tomar diferentes formas, tales como la adición de un valor o la multiplicación por un factor, o bien puede deducirse de una tabla.

Incertidumbre de medida [11] (2.26)

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.

NOTA 1 La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

NOTA 2 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o una semiamplitud con una probabilidad de cobertura determinada.

NOTA 3 En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

NOTA 4 En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

Trazabilidad [11] (2.41)

Propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.



NOTA 1 En esta definición, la referencia puede ser la definición de una unidad de medida, mediante una realización práctica, un procedimiento de medida que incluya la unidad de medida cuando se trate de una magnitud no ordinal, o un patrón.

NOTA 2 La trazabilidad metrológica requiere una jerarquía de calibración establecida.

NOTA 3 La especificación de la referencia debe incluir la fecha en la cual se utilizó dicha referencia, junto con cualquier otra información metrológica relevante sobre la referencia, tal como la fecha en que se haya realizado la primera calibración en la jerarquía.

NOTA 4 Para mediciones con más de una magnitud de entrada en el modelo de medición, cada valor de entrada debiera ser metrológicamente trazable y la jerarquía de calibración puede tener forma de estructura ramificada o de red. El esfuerzo realizado para establecer la trazabilidad metrológica de cada valor de entrada debería ser en proporción a su contribución relativa al resultado de la medición.

NOTA 5 La trazabilidad metrológica de un resultado de medida no garantiza por sí misma la adecuación de la incertidumbre de medida a un fin dado, o la ausencia de errores humanos.

NOTA 6 La comparación entre dos patrones de medida puede considerarse como una calibración si ésta se utiliza para comprobar, y si procede, corregir el valor y la incertidumbre atribuidos a uno de los patrones.

NOTA 7 La ILAC considera que los elementos necesarios para confirmar la trazabilidad metrológica son: una cadena de trazabilidad metrológica ininterrumpida a un patrón internacional o a un patrón nacional, una incertidumbre de medida documentada, un procedimiento de medida documentado, una competencia técnica reconocida, la trazabilidad metrológica al SI y los intervalos entre calibraciones (véase ILAC P-10:2002).

NOTA 8 Algunas veces el término abreviado “trazabilidad” se utiliza en lugar de “trazabilidad metrológica” así como para otros conceptos, como trazabilidad de una muestra, de un documento, de un instrumento, de un material, etc., cuando interviene el historial (“traza”) del elemento en cuestión. Por tanto, es preferible utilizar el término completo “trazabilidad metrológica” para evitar confusión.

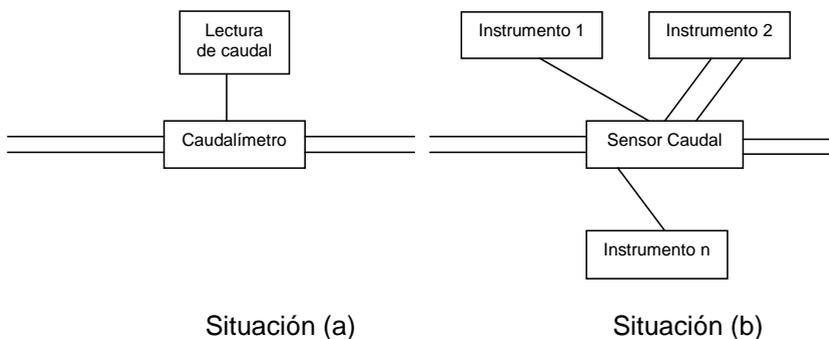
4. GENERALIDADES

La medida de caudal de gases se efectúa con sensores de caudal, cuya base de funcionamiento es muy variada, como pueden ser:

- Medidores de presión diferencial: placas de orificios, tubos Venturi, toberas sónicas, medidores de área variable (conocidos también como rotámetros), caudalímetros de placa resistente, caudalímetros V-cone, ...
- Medidores de velocidad y técnicas de integración.
- Medidores de caudal mediante el uso de ultrasonidos: caudalímetros Doppler, medidores ultrasónicos de impulsos.
- Medidores Vortex y oscilatorios.
- Caudalímetros de desplazamiento positivo.
- Turbinas.
- Etc.

Durante el proceso de calibración, estos se colocan de forma apropiada en la tubería donde se genera un caudal conocido, que se medirá con el caudalímetro a calibrar. Ahora bien, se tienen dos alternativas, representadas en la figura 1:

- a) El caudalímetro puede ir acompañado con su equipamiento electrónico necesario para proporcionar directamente la medida de caudal, y en este caso se calibraría como un conjunto.
- b) O bien, puede calibrarse únicamente el sensor, que proporciona diversas “salidas” que son las entradas para diversos instrumentos, útiles para la obtención de la medida del caudal mediante cálculo auxiliar y la calibración correspondiente.





— Figura 1 —

En cuanto a la primera alternativa, se presentará el procedimiento de calibración y el cálculo de incertidumbres para un caso general, como el de la mayoría de los caudalímetros de la lista anteriormente expuesta.

Respecto a la segunda, cabe destacar que es de aplicación sobre todo a los caudalímetros clásicos. Se expondrá cuál sería el método de calibración a seguir. Se presentarán las tareas de calibración para un ejemplo convencional (una tobera sónica) y a una turbina, como uno de los caudalímetros de uso más extendido y, a la vez, de calibración muy particular.

4.1. Descripción y base de funcionamiento de algunos caudalímetros

4.1.1.- Caudalímetros basados en la medida de presión diferencial [1]

Hay tres tipos clásicos de caudalímetros que se basan principalmente en la medida de una presión diferencial para determinar el valor del caudal que circula a través de ellos:

- Placas de orificios.
- Tubos Venturi.
- Toberas sónicas.

Con la inserción en un conducto, de diámetro D , de una placa con un orificio central, de diámetro d , se genera una depresión, Δp , entre dos puntos localizados uno aguas arriba de la placa y el otro aguas abajo. Con los tubos Venturi se genera la depresión insertando un estrechamiento en el tubo. Sobre las toberas sónicas puede consultarse el ANEXO B.

En todos estos dispositivos, el caudal, q , se obtiene mediante la expresión:



$$q = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Donde:

- C es el coeficiente de descarga, y tiene una expresión bastante compleja que depende de la geometría del dispositivo (placa de orificio, Venturi o tobera sónica), del tubo y del número de Reynolds.
- d Diámetro del orificio central de la placa, o diámetro del estrechamiento del tubo Venturi, o diámetro del extremo de descarga de la tobera sónica. $\beta = \frac{d}{D}$
- Δp Diferencia de presiones entre dos puntos característicos del dispositivo con el que se mida el caudal, uno localizado aguas arriba y el otro localizado aguas abajo. Consultar la referencia [1].
- ρ Densidad del gas.

4.1.2.- Medidores de área variable (o rotámetros)

El flujo circula por un ensanchamiento del tubo, dentro del cual se desplaza, de forma ascendente, un flotador, de tal forma que sube más por el ensanchamiento cuanto mayor sea el caudal. En la mayoría de los casos el ensanchamiento es transparente y el flotador señala en una escala el caudal que circula por el rotámetro.



4.1.3.- Caudalímetros de placa resistente

La placa resistente es un disco delgado montado sobre una barra perpendicular al eje del tubo por donde circula el caudal. El flujo induce una fuerza normal al disco produciendo un momento en la barra, donde hay un transductor de desplazamiento. Ese desplazamiento está relacionado con el caudal.

4.1.4.- Caudalímetros V-cone

Se inserta un cono dentro del tubo, de forma que coincidan sus ejes y que su vértice apunte en sentido contrario a la dirección del flujo. Se mide la presión diferencial entre dos puntos: uno aguas arriba del vértice del cono y el otro en su base. En este tipo de caudalímetros el caudal, q , se obtiene mediante la expresión

$$q = Cte \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

donde

Δp Es la diferencia de presiones entre las dos tomas anteriormente descritas.

ρ Es la densidad del gas.

Cte Es una constante de proporcionalidad cuyo valor se obtiene mediante calibración.



4.1.5.- Medidores de velocidad y técnicas de integración

Según las referencias [2] y [3] el caudal se obtiene simplemente multiplicando la velocidad del fluido en un punto del tubo (generalmente el centro) por al área de la sección recta donde se ha localizado ese punto de medida. Esta expresión establece la hipótesis de que la velocidad es la misma en todos los puntos del interior del tubo, lo cual es falso en la inmensa mayoría de los casos, pero este es un método a tener en cuenta.

NOTA

El método clásico de medida de velocidad en fluidos consiste en la utilización de un tubo Pitot. La velocidad del fluido se obtiene mediante la expresión

$$V = Cte \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

y por tanto, el caudal

$$q = Cte \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \cdot A = Cte \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

donde

- Δp Es la presión dinámica del gas, o la diferencia de presiones entre la toma de presión total y la estática del tubo Pitot.
- ρ Es la densidad del gas.
- A Es el área de la sección recta del tubo donde se miden el resto de variables.
- Cte Es una constante de proporcionalidad teórica.



Si, de alguna manera, se pueden obtener velocidades del fluido en varios puntos de la misma sección del tubo, entonces el caudal puede obtenerse acudiendo a su definición: $Q = \iint_A V(x,y) \cdot dA$, siendo: $V(x,y)$ la velocidad perpendicular a la sección recta en el punto (x,y) .

Uno de los problemas que surge con la utilización de sondas Pitot es que éstas perturban la uniformidad del flujo y por tanto influyen en la medida. Para solventar este problema pueden utilizarse velocímetros basados en la utilización de luz láser que no perturban el fluido, tales como LDV (*Laser Doppler Velocimetry*) y PIV (*Particle Image Velocimetry*).

4.1.6.- Medidores de caudal mediante el uso de ultrasonidos

Hay dos tipos clásicos de caudalímetros que basan la medida del caudal en el uso de ultrasónicos:

- Los caudalímetros Doppler
- Los medidores ultrasónicos de impulsos.

Los caudalímetros Doppler tienen un emisor que lanza ondas, de frecuencia f , hacia el fluido con partículas en movimiento, y éstas reflejan esas ondas, con frecuencia mayor que f como influencia del movimiento de las partículas hacia un receptor.

La frecuencia de las ondas emitidas es f y la de las recibidas es mayor que f . Ese desplazamiento en frecuencia δf se debe a la velocidad V que tienen las partículas durante su movimiento, de tal forma que la velocidad de las partículas es proporcional a δf , y por tanto el caudal.

$$V = Cte \cdot \delta f \quad \rightarrow \quad q = Cte \cdot \delta f$$

donde Cte es una constante de proporcionalidad teórica.



Los medidores ultrasónicos de impulsos basan la medida del caudal en la emisión y recepción de impulsos sonoros entre un emisor y un receptor, ambos debidamente localizados en la pared del tubo e inmersos en el seno del fluido considerado.

En un primer momento se tiene el emisor lanzando los impulsos hacia un receptor, que se encuentra enfrente y aguas abajo. Debido al movimiento del fluido a velocidad V , hay un adelanto en la recepción de los impulsos porque estos se desplazarán a una velocidad mayor que la del sonido.

En un momento posterior, el que antes era receptor ahora hace de emisor, emite, en dirección aguas arriba otro tren de impulsos hacia el que ahora es receptor. En estas condiciones habrá un retraso en la recepción puesto que el impulso sonoro se desplazará a velocidad menor que la del sonido por el movimiento del fluido.

Después de varias transmisiones se establecen dos frecuencias, cuya diferencia es directamente proporcional al caudal.

4.1.7.- Medidores Vortex y oscilatorios

Si se coloca una barra perpendicular a la velocidad de una corriente, en las inmediaciones y aguas abajo del cuerpo, el fluido se separa alternativamente de él desde cada uno de sus lados. Esa frecuencia de oscilación es proporcional a la velocidad incidente, y por tanto al caudal.

4.1.8.- Caudalímetros de desplazamiento positivo

Son caudalímetros con accionamiento mecánico, generalmente de tipo rotativo. Miden la cantidad de fluido que circula a través de una tubería como la suma de volúmenes pequeños de fluido. En todo caudalímetro de este tipo hay tres componentes comunes:



- Cámara de trabajo o volumen discreto.
- Un desplazador que, bajo la acción del flujo, transfiere el fluido desde un extremo de la cámara de trabajo hacia el otro.
- Un registrador conectado al desplazador, que cuenta el número de veces que el desplazador se mueve a través de la cámara de trabajo.

Existen caudalímetros de desplazamiento positivo para gases (medidores de gas húmedo, de diafragma, rotatorios, etc.) y para líquidos (de tipo pistón, de paletas deslizantes, de engranajes, de disco rotatorio, etc.).

4.1.9.- Turbinas

También son caudalímetros de accionamiento mecánico. Constan de un cuerpo cilíndrico dentro del cual gira una hélice por acción del flujo. Aguas arriba y aguas debajo de dicha hélice se colocan unos enderezadores de flujo que también sirven como soporte del eje de la turbina.

En un extremo, y en la sección de la hélice, se coloca algún tipo de sensor (piezoeléctrico o de bobina) que acusa el paso de las palas. La señal generada en el sensor por el giro de la hélice es una onda de pulsos rectangulares, cuya frecuencia es proporcional al caudal que circula a través del caudalímetro.

Son muy sensibles al tipo de fluido que circula por ellas, cuya influencia se tiene en cuenta a través de la curva de viscosidad universal. Son bastante exactas, fiables y de uso muy extendido. Suelen tener una relación de alcances (alcance máximo/alcance mínimo) de 1:10.



Existen otras turbinas que cuentan con dos hélices dispuestas para que giren en sentidos contrarios. Son las turbinas de rango extendido, con una relación de alcances muy superior: de 1:1000.

La calibración de una turbina queda definida principalmente por su Curva de Viscosidad Universal (UVC) que, como se verá posteriormente, es el factor K en función del número de Roshko. Por lo general los factores K no son constantes cuando se varía el número de Roshko o el caudal, y deben determinarse mediante calibración.

4.2. Calibradores para caudalímetros de gases.

Algunos calibradores de caudal, especialmente los de rango elevado, requieren el empleo de tuberías extremadamente largas. Por tanto las dimensiones de la sala también serán considerables, que es un dato a tener muy en cuenta en cuanto a inversión se refiere.

Las limitaciones del tipo de calibrador utilizado son:

- Los campos de medida mínimo y máximo.
- Su incertidumbre.
- El tiempo de medida de un punto de caudal, que en algunos casos puede ser extremadamente pequeño.

Por lo general todos los calibradores patrón descritos en el ANEXO D pueden encontrarse en el mercado y están disponibles de forma más o menos automatizada. Todos ellos vienen a ofrecer una incertidumbre que ronda el 0,2%.

4.3. Efectos del fluido de calibración

En general las prestaciones de muchos caudalímetros dependen del tipo de fluido que circula a través de ellos. Por esta razón es



importante calibrarlos con el mismo fluido con el que trabajarán en operación normal. Las medidas de algunos caudalímetros, por ejemplo algunos basados en medidas de presión diferencial, pueden depender simplemente del número de Reynolds, y la calibración puede realizarse con algún fluido diferente al de trabajo. Esto puede aplicarse incluso entre líquido y gas. Una calibración en función del número de Reynolds permitirá que el caudalímetro pueda ser utilizado, dentro de su rango e igualando los números de Reynolds, en diferentes fluidos.

Una de las desventajas de las turbinas es que son muy sensibles al número de Reynolds (R_e), definido éste como:

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

donde

- V Es la velocidad de la corriente.
- D Es el diámetro interior del tubo por el que circula el fluido.
- ν Es la viscosidad cinemática del fluido.

pero su ventaja es que son fiables y muy precisas. Para las turbinas se sustituye el número de Reynolds por el número de Roshko (R_o) que depende de la frecuencia de la señal eléctrica de salida y de la viscosidad cinemática del fluido:

$$R_o = \frac{f}{\nu}$$

Donde:

- f Es la frecuencia de la señal generada por la turbina cuando gira circula fluido por su interior.



ν Es la viscosidad cinemática del fluido.

Es importante calibrar estos caudalímetros con el mismo fluido de trabajo, o alguno de viscosidad cinemática parecida en el margen de temperaturas de trabajo.

Para caudalímetros de gas, se suele utilizar el aire como fluido de calibración. Cuando los caudalímetros se utilizan con otros gases pueden conseguirse números de Reynolds similares, excepto para caudalímetros de área variable y algunos caudalímetros térmicos. Si la viscosidad cinemática del gas de trabajo es muy diferente de la del aire, entonces es conveniente realizar la calibración con el mismo gas de trabajo.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

En primer lugar, para realizar la calibración descrita en este procedimiento se necesitará disponer de un patrón. Dicho patrón puede consistir en un calibrador como los descritos en el ANEXO D, acompañado de toda la instrumentación que necesite. Sus requisitos metroológicos son:

- Alta estabilidad.
- Que sus medidas sean fielmente reproducibles.
- Exactitud mayor que la del caudalímetro a calibrar.
- Que pueda cubrir el campo de medida donde desea calibrarse el caudalímetro.
- Que los valores de caudal que genere estén bien definidos por sus parámetros de trabajo (condiciones climáticas, condiciones del caudal, fluido).
- Etc.



Otra instrumentación fundamental es la relacionada con el registro de las condiciones climáticas del laboratorio: humedad, temperatura y presión atmosférica. Los requisitos metroológicos de esta instrumentación son las necesarias para medir las condiciones climáticas elegidas para el laboratorio de calibración.

Recordando las dos alternativas expuestas al principio del apartado de “Generalidades” se tiene:

- En situación (a) se tiene del caudalímetro a calibrar una medida directa del caudal que circula a través de él, lectura que se toma de su indicador. En este caso no se necesitará más instrumentación adicional, ya que se tienen la medida del patrón y la lectura del instrumento a calibrar.
- En situación (b), el caudalímetro a calibrar puede no venir acompañado de toda la electrónica que requiere para mostrar la medida del caudal, sino que se trata tan solo del sensor; es el caso típico de las turbinas, toberas, placas de orificios, etc.. Esto da lugar a que se requiera instrumentación de apoyo que se le conectará, y que con las respectivas lecturas se obtendrá indirectamente el caudal que circula a través de él mediante cálculo. En estos casos se considerará el conjunto {sensor+instrumentación} como un bloque a calibrar.

En cuanto a materiales se refiere, se requieren todos los necesarios para construir el circuito que conduzca el caudal generado por el calibrador de caudal hacia el caudalímetro a calibrar. Este material es muy diverso y estará formado por tuberías, bridas, válvulas, racores, enderezadores, etc. Ahora bien, el circuito ha de ser perfectamente estanco para evitar la pérdida de fluido por las uniones de todos estos elementos, ya que de lo contrario el caudal generado por el calibrador no será el mismo que el que circula por el caudalímetro objeto de calibración.

5.2. Condiciones durante la calibración y operaciones previas.

5.2.1.- Condiciones durante la calibración



La presión y la temperatura a la cual trabaja el caudalímetro de gases son parámetros importantes a tener en cuenta, no sólo afectan a las dimensiones de la garganta de una tobera o al espacio libre en caudalímetros de desplazamiento positivo, sino que también tiene un efecto importante sobre la densidad y viscosidad del fluido gaseoso. A menos que la densidad del gas se mida directamente debe considerarse su composición, incluyendo la humedad, que puede provocar errores importantes si se ignora.

La mayoría de los caudalímetros son sensibles a los perfiles de velocidad del flujo en sus inmediaciones, y para asegurar que este perfil está totalmente desarrollado y es simétrico es esencial que el sistema de calibración tenga zonas de tubo recto cerca del caudalímetro objeto de calibración: no menos de 100 diámetros aguas arriba y 40 diámetros aguas abajo, siendo éste diámetro el interior del tubo donde se instala el caudalímetro. Cabe destacar que es muy conveniente conservar igualdad entre el diámetro interior del tubo y del caudalímetro con el objeto de que el flujo no se encuentre escalones que rompan la uniformidad del perfil de velocidades que se había conseguido.

También es conveniente insertar enderezadores de flujo [2], aunque también es válida la inserción en el conducto de un núcleo tipo panal de abeja (*honeycomb*) [5]. Cuando se ha insertando algún enderezador de flujo aguas arriba del caudalímetro objeto de calibración, basta con dejar una longitud de tubo recto no menor a 5 diámetros.

Si la calibración se realiza en estas condiciones, es conveniente avisar al cliente para que instale su caudalímetro en condiciones semejantes para que pueda aplicar directamente los resultados de la calibración a la operación normal, pero muchas veces le puede resultar imposible por diversos factores, por eso otros sistemas de calibración reproducen las condiciones de trabajo. Un ejemplo es la presencia de alguna válvula cercana, que con seguridad afectará a sus medidas. El error debido a esta válvula se reducirá si la calibración se realiza en la misma posición que en la operación normal de trabajo. Otro ejemplo es que el caudalímetro se encuentre instalado cerca de un codo, que introducirá distorsiones en el perfil del flujo.



5.2.2.- Operaciones previas

Antes de iniciar la calibración se realizarán las siguientes operaciones:

También durante la recepción se comprobará que funciona al ponerlo en marcha, es decir, que hay lecturas de caudal en el visor del caudalímetro, o en la instrumentación auxiliar que le acompaña, si es el caso, etc. En caso de que se sospeche que existe avería, se avisará al cliente para su reparación.

Se depositarán todos estos elementos en el lugar de almacenamiento, o en la sala donde se vaya a calibrar, para que se atempere al menos durante 24 horas. La temperatura de almacenamiento ha de ser la misma que en la que se realizan las calibraciones en el laboratorio.

Las condiciones ambientales que debe respetar el laboratorio durante la calibración serán:

- Las condiciones climáticas (de humedad y temperatura) que tiene estipuladas.
- Que no haya ninguna fuente térmica en las proximidades de los elementos que participan en la calibración.

Durante este estudio se determinará cuál será el rango de calibración. Este será el que ha solicitado el cliente siempre y cuando esté dentro de las posibilidades del laboratorio y del instrumento a calibrar. Si el cliente no ha indicado nada al respecto, el rango de calibración será el establecido en este procedimiento.

También se seleccionará todo el material auxiliar (tubos, bridas, racores, válvula de cierre aguas abajo del caudalímetro a calibrar, ...) para el montaje del caudalímetro en el circuito donde se generará el caudal.

A continuación se procederá a montar de forma correcta el caudalímetro en ese circuito, comprobando que la dirección del



flujo es la misma que la dibujada en el cuerpo del caudalímetro (o según se indique en el manual). Recuérdense las dos situaciones de calibración anteriormente expuestas al principio del apartado de “Generalidades”:

- En la situación (a), el caudalímetro proporciona directamente lecturas de caudal.
- En la situación (b), el caudalímetro montado es tan sólo el sensor, al cual se conectará debidamente toda la instrumentación auxiliar que necesite, según de qué sensor se trate. En este segundo caso se utilizarán cables adecuados y/o tubos para medidas de presión sin fugas.

Posteriormente se abrirán las válvulas de cierre para que pueda generarse flujo.

Se pondrá en funcionamiento el caudalímetro e instrumentación auxiliar, presionando sobre sus botones de puesta en marcha. En caso de que sean necesarios se utilizarán cables de potencia adecuados. Se dejarán un tiempo mínimo funcionando (p.e. 30 minutos).

El paso siguiente consistirá en generar caudales, subiendo y bajando varias veces, dentro del rango de calibración para desprezar el caudalímetro e instrumentación auxiliar.

5.3. Proceso de calibración

El proceso de calibración dependerá de la petición del cliente: la solicitud puede consistir en:

Primero: Sólo calibración.

Segundo: Calibración y Ajuste: opción válida en la situación (a) de la anterior Figura 1. La secuencia consistirá en:

- Realizar una calibración inicial del instrumento para conocer en qué situación se encuentra respecto de la última calibración



que se le ha realizado. Basta con que sea una calibración muy sencilla: generar caudales conocidos y medirlos sólo una vez con el caudalímetro.

- Según sea el resultado de esta calibración se le realizará o no el ajuste correspondiente mediante instrucciones del manual de funcionamiento del caudalímetro. Por supuesto para realizar el ajuste deberá disponerse de la correspondiente autorización del usuario.
- Si se ha realizado ajuste se procederá a efectuar una calibración completa para comprobar los resultados del ajuste.

¿Cuál es el número de puntos, N ($i=1..N$), que cubrirán el rango de calibración?

- En primer lugar el número de puntos de calibración dependerá principalmente de la petición del cliente y la calibración se realizará en cuantos haya solicitado.
- Si el cliente no ha elegido el número de puntos de calibración, entonces el personal del laboratorio definirá cuántos. En este caso el laboratorio puede tener establecido cierto número de puntos dependiendo de su experiencia y de las particularidades de cada caudalímetro. Puede ser suficiente con que N tome valores mayores que 5 para unos valores de caudal uniformemente repartidos por el rango de calibración solicitado.

5.3.1.- Calibración en situación (a)

En este caso el caudalímetro a calibrar mide directamente el caudal generador a través de él. Los pasos a seguir para una calibración completa son los siguientes:

Paso 1: Con el calibrador se genera un caudal deseado, Q_i , y se deja transcurrir un tiempo prudencial hasta que éste se ha



estabilizado (Q_i no varía con el tiempo), anotándose su valor en la correspondiente hoja de toma de datos.

En el peor de los casos, si no se consigue una estabilización, entonces se anotará una muestra, de tamaño m_i , de las lecturas de caudal Q_{ij} , con $j=1..m_i$. El tamaño de la muestra lo elige el personal del Laboratorio ($m_i \geq 10$).

Paso 2: El paso siguiente es la toma de medidas de caudal proporcionadas por el caudalímetro objeto de calibración, q_{ij} , con $j=1..n_i$. Se recogerán muestras de tamaño n_i elegido por el personal del laboratorio. O bien se puede decidir que $m_i = n_i$ y adquirir pares de valores, ya que los pasos 1 y 2 pueden simultanearse durante la adquisición de datos. De hecho esto es más recomendable.

Paso 3: Se vuelve al “paso 1” hasta completar el número de puntos N para cubrir el rango de calibración.

Paso 4: Se toman los valores de las condiciones atmosféricas: Presión P_a , Temperatura T_a y Humedad H .

Recordando cuáles son las tareas que componen una calibración en situación a):

Tarea 1: En primer lugar, se realizará una calibración muy sencilla, es decir basta con que $m_i=1$, $N=5$ y $n_i=1$ para saber en qué estado se encuentra el caudalímetro desde la última calibración.

Tarea 2: En segundo lugar, si de la tarea anterior se puede concluir que es recomendable el ajuste del caudalímetro, entonces se le comunicará al cliente y se le solicitará autorización para realizarlo tal y como figure en su manual de operación y funcionamiento, con instrucciones dadas por el fabricante.

Tarea 3: Una vez realizado el ajuste se pasará a realizar una



calibración más completa como la descrita anteriormente, con $m_i \geq 10$, $N \geq 5$ o a petición del cliente y $n_i \geq 10$.

5.3.2.- Calibración en situación (b).

Se trata de calibrar un sensor caudalímetro al que se le ha conectado diversa instrumentación. Para detallar este tipo de calibración se presentará primero el caso general y posteriormente un ejemplo aplicado a una tobera sónica.

En la mayoría de los caudalímetros clásicos el caudal es proporcional a una función que depende de las medidas de la instrumentación conectada al caudalímetro objeto de calibración:

$$q = Cte \cdot f(ins_1, ins_2, \dots, ins_k, \dots, ins_s)$$

Donde:

ins_k : Es la medida proporcionada por el instrumento n^o k ($k=1..s$).

$f(\dots)$: Es la función característica del sensor caudalímetro.

Cte : Es una constante de proporcionalidad teórica.

q : Es el caudal determinado mediante la función $f(\dots)$ a partir de las medidas ins_k

Los pasos a seguir durante la calibración son:

Paso 1: Con el calibrador se genera un caudal deseado, Q_i , y se deja transcurrir un tiempo prudencial hasta que éste se ha estabilizado (Q_i no varía con el tiempo), anotándose su valor en la correspondiente hoja de toma de datos.

En el peor de los casos, si no se consigue una estabilización,



entonces se anotará una muestra, de tamaño m_i , de las lecturas de caudal $Q_{i,j}$, con $j=1..m_i$. El tamaño de la muestra lo elige el personal del Laboratorio ($m_i \geq 10$).

Paso 2: A continuación se anotan las medidas proporcionadas por la instrumentación conectada al sensor caudalímetro, $ins_{k,i,j}$. Se recogerá una muestra de cada medida de tamaño n_i elegido por el personal del laboratorio ($n_i \geq 10$):

$ins_{1,i,j}$	...	$ins_{k,i,j}$	...	$ins_{s,i,j}$
$ins_{1,i,1}$	...	$ins_{k,i,1}$	...	$ins_{s,i,1}$
$ins_{s,i,2}$	...	$ins_{s,i,2}$	...	$ins_{s,i,2}$
.
.
.
$ins_{1,i,j}$	...	$ins_{k,i,j}$	...	$ins_{s,i,j}$
.
.
.
$ins_{s,i,ni-1}$	...	$ins_{s,i, ni-1}$	...	$ins_{s,i, ni-1}$
$ins_{s,i,ni}$	...	$ins_{s,i, ni}$	...	$ins_{s,i, ni}$

Los pasos 1 y 2 pueden simultanearse durante la adquisición de datos y podría hacerse $n_i=m_i$. De hecho esto es más recomendable.

Paso 3: Se vuelve al “Paso 1” hasta completar el número de puntos N para cubrir el rango de calibración.

Paso 4: Se toman los valores de las condiciones atmosféricas: Presión P_a , Temperatura T_a y Humedad H .

Para más aclaraciones véase el ejemplo mostrado en el ANEXO II que trata de la calibración de una tobera sónica: para este sensor



el caudal se determina mediante la expresión $q = Cte \frac{P_0}{\sqrt{T_0}}$, y

las medidas proporcionadas por la instrumentación conectada a ella son $ins_{k,i,j}$, es este ejemplo k toma valores 1 y 2: $ins_{1,i,j}=Po_{i,j}$, $ins_{2,i,j}=To_{i,j}$.

5.3.3.- Caso especial de calibración en situación (b): turbinas [10]

Este caso especial es la obtención de la Curva de Calibración Universal (UVC) para una turbina de gases. La particularidad surge porque son muy sensibles a la viscosidad cinemática del fluido, efecto que debe tenerse en cuenta porque el fluido de calibración y el de operación normal por lo general no coincidirán, aunque los resultados de la calibración son perfectamente válidos.

Cuando se genera un caudal Q de un fluido de temperatura T y viscosidad cinemática $\nu=\nu(P,T)$ (la viscosidad cinemática de un gas depende de la presión absoluta a la que se encuentre y de su temperatura), las palas de la turbina giran generando una señal eléctrica (una onda de pulsos rectangulares) de frecuencia f . En estas condiciones pueden calcularse dos parámetros:

- El número de Roshko: $Ro = \frac{f}{\nu} \left[\frac{Hz}{cSt} \right]$
- El factor K_f : $K_f = \frac{60 \cdot f}{Q} \left[\frac{pulsos}{litro} \right]$

En el ANEXO C se muestra cómo se construye la UVC de una turbina y cómo se utiliza en operación normal.

No es obligatorio que la turbina se esté utilizando con un líquido exactamente igual al de calibración, sólo es



necesario que sus viscosidades cinemáticas sean “parecidas” (no más de 1 cSt de diferencia), de forma que los números de Roshko en operación normal estén dentro de los correspondientes al rango de calibración.

NOTA

¿Cómo se mide caudal con una turbina durante operación normal?

1º. El usuario ha de medir la frecuencia de los pulsos y temperatura del fluido (para determinar la viscosidad cinemática) para obtener el número de Roshko de operación Ro

2º. Con ese número Ro obtenido, se interpola en la Curva de Viscosidad Universal para obtener el factor K de la turbina K_f .

3º. El caudal entonces se calcula como:
$$Q = \frac{60 \cdot f}{K_f (Ro)}$$

Los pasos para la calibración de turbinas son:

Paso 1: Con el calibrador se genera un caudal deseado, Q_i , y se deja transcurrir un tiempo prudencial hasta que éste se ha estabilizado (Q_i no varía con el tiempo), anotándose su valor en la correspondiente hoja de toma de datos.

En el peor de los casos, si no se consigue una estabilización, entonces se anotará una muestra, de tamaño m_i , de las lecturas de caudal $Q_{i,j}$, con $j=1..m_i$. El tamaño de la muestra lo elige el personal del Laboratorio ($m_i \geq 10$).

Paso 2: El paso siguiente es la toma de medidas proporcionada por la instrumentación conectada a la turbina, es decir, las lecturas del frecuencímetro $f_{i,j}$, medidor de presión absoluta P_i y del termómetro $T_{i,j}$. De cada una de ellas se recogerá una muestra de tamaño n_i elegido por el personal del laboratorio, $n_i \geq 10$.

Los pasos 1 y 2 pueden simultanearse durante la adquisición de



datos y podría hacerse $n_i=m_i$.

Paso 3: Se vuelve al paso 1 hasta completar el total de puntos N de calibración, con $N \geq 5$.

Paso 4: Se toman los valores de las condiciones atmosféricas: Presión P_a , Temperatura T_a y Humedad H .

5.4. Toma y tratamiento de datos

5.4.1.- Hojas de Toma de Datos o Formatos.

Es conveniente registrar todas las medidas en hojas de toma de datos destinadas para tal efecto. Estos formatos los diseñará el propio laboratorio de forma que se adapten a sus necesidades, pero es conveniente que contengan un **mínimo número de campos** para que permitan conocer en cualquier momento cómo se realizó la calibración y el posterior tratamiento de datos:

- La identificación completa del peticionario de la calibración.
- La identificación completa del instrumento que se está calibrando: marca, modelo, nº de serie, o código de identificación inequívoco.
- Fecha de calibración.
- El rango de calibración.
- Qué medidas se realizaron: las del patrón: Q_i (o $Q_{i,j}$), las del instrumento: $q_{i,j}$ (o $ins_{i,j}$) y las condiciones ambientales: P_a , T_a y H .
- Operador del laboratorio que realizó las medidas.
- Procedimiento de calibración.

5.4.2.- Tratamiento de Datos.

El primer paso será el cálculo de valores medios y desviaciones típicas empleando las expresiones ya presentadas.



A continuación se debe imponer algún criterio de aceptación/rechazo de las medidas.

Para una mayor claridad de éste apartado pueden observarse los ejemplos mostrados en los ANEXOS A, B y C. En ellos se muestra el criterio estadístico de Chauvenet para la aceptación o rechazo de las medidas.

Un tratamiento de datos típico consiste en el cálculo de los errores absolutos o desviaciones, que se incluye en los certificados o informes de calibración. Consiste en calcular la diferencia entre la medida del instrumento a calibrar (\bar{q}_i) y la medida del patrón (\bar{Q}_i):

$$Error_i = Desviación_i = \bar{q}_i - \bar{Q}_i$$

En vez del error absoluto, puede presentarse el error relativo:

$$Error\ relativo_i = \frac{\bar{q}_i - \bar{Q}_i}{\bar{Q}_i}$$

Si para los diferentes puntos de calibración ($i=1..N$) el error absoluto es el mismo, entonces la medida del caudalímetro se podría corregir restando a su lectura el error absoluto.

Tratamiento de datos para situación a).

- Tto. 1 : Si en el Paso 1 de la calibración del caudalímetro no se conseguía estabilización de la lectura del caudal generado, entonces se anotaron las lecturas $Q_{i,j}$, con las que se calculan valores medios \bar{Q}_i y una desviación típica S_i , empleando las expresiones:



$$\bar{Q}_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} Q_{i,j}}{m_i}, \quad S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m_i} (Q_{i,j} - \bar{Q}_i)^2}{m_i - 1}}, \text{ con}$$

$j=1..m_i$

si $m_i=1$ entonces $\bar{Q}_i = Q_i$ y $S_i=0$.

Tto. 2 : El paso 2 se recogieron las medidas de caudal proporcionadas por el caudalímetro objeto de calibración, $q_{i,j}$. También la muestra proporcionará un valor medio \bar{q}_i y una desviación típica s_i , con las expresiones:

$$\bar{q}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} q_{i,j}}{n_i}, \quad s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (q_{i,j} - \bar{q}_i)^2}{n_i - 1}} \quad \text{con}$$

$j=1..n_i$

En el caso de que se hubiesen tomado series de valores \bar{Q}_i , \bar{q}_i , sería más útil calcular la desviación típica de las diferencias.

Tto. 3 : A continuación se utiliza algún criterio de aceptación/rechazo de las medidas. Si se utiliza el de Chauvenet se procederá como indica el ANEXO F.

Tto. 4 : También se calcula el error, o desviación, de la lectura del caudalímetro respecto de la del patrón, mediante la expresión: $D_i = \bar{q}_i - \bar{Q}_i$



Tratamiento de datos en situación b).

Tto. 1 : Si en el Paso 1 de la calibración del caudalímetro no se conseguía estabilización de la lectura del caudal generado, entonces se anotaron las lecturas $Q_{i,j}$, con las que se calculan valores medios \bar{Q}_i y una desviación típica S_i , empleando las expresiones:

$$\bar{Q}_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} Q_{i,j}}{m_i}, \quad S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m_i} (Q_{i,j} - \bar{Q}_i)^2}{m_i - 1}},$$

con $j=1..m_i$ e $i = 1, \dots N$.

Si $m_i=1$ entonces $\bar{Q}_i = Q_i$ y $S_i=0$.

Tto. 2 : Recordando que el caudal con un sensor caudalímetro clásico se obtiene mediante el uso de la expresión:

$$q = Cte \cdot f(\text{ins}_1, \text{ins}_2, \dots, \text{ins}_k, \dots, \text{ins}_s)$$

Se calcularán los caudales medidos por el caudalímetro a calibrar mediante aplicando la expresión:

$$q_{i,j} = Cte \cdot f(\text{ins}_{1,i,j}, \text{ins}_{2,i,j}, \dots, \text{ins}_{k,i,j}, \dots, \text{ins}_{s,i,j})$$

con $j = 1 \dots n_i$, $i = 1 \dots N$, valores de caudal con los que se calcularán medias y desviaciones típicas mediante el uso de las siguientes expresiones:



$$\bar{q}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} q_{i,j}}{n_i}, \quad s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (q_{i,j} - \bar{q}_i)^2}{n_i - 1}}$$

Tto. 3 : A continuación se utiliza algún criterio de aceptación/rechazo de las medidas. Si se utiliza el de Chauvenet se procederá como indica el ANEXO F.

Tto. 4 : También se calcula el error, o desviación, de la lectura del caudalímetro respecto de la del patrón, mediante la expresión: $D_i = \bar{q}_i - \bar{Q}_i$

Tratamiento de datos para la calibración de turbinas.

Las operaciones a realizar con los datos recogidos en las correspondientes hojas de toma de datos son los siguientes:

Tto. 1 : Si en el Paso 1 de la calibración de la turbina no se conseguía estabilización de la lectura del caudal generado, entonces se anotaron las lecturas $Q_{i,j}$ con las que se calculan valores medios \bar{Q}_i y una desviación típica S_i , empleando las expresiones:

$$\bar{Q}_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} Q_{i,j}}{m_i}, \quad S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m_i} (Q_{i,j} - \bar{Q}_i)^2}{m_i - 1}}, \quad \text{con}$$

$j=1..m_i$



si $m_i=1$ entonces $\bar{Q}_i = Q_i$ y $S_i=0$.

Tto. 2 : Si había estabilización del caudal, entonces los datos anotados son todos válidos, pero si no había estabilización, entonces se aplica algún criterio de aceptación/rechazo de las medidas. Si se utiliza el de Chauvenet se procede como se indica en el ANEXO F.

Tt De los datos recogidos en el Paso 2 se calcularán los valores medios y desviaciones típicas, empleando las expresiones:

:

$$\bar{f}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} f_{i,j}}{n_i}, \quad Sf_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (f_{i,j} - \bar{f}_i)^2}{n_i - 1}}, \quad \text{con } j=1..n_i$$

$$\bar{P}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} P_{i,j}}{n_i}, \quad SP_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (P_{i,j} - \bar{P}_i)^2}{n_i - 1}}, \quad \text{con } j=1..n_i$$

$$\bar{T}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} T_{i,j}}{n_i}, \quad ST_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (T_{i,j} - \bar{T}_i)^2}{n_i - 1}}, \quad \text{con } j=1..n_i$$

Tto. 4 : A continuación se utiliza algún criterio de



aceptación/rechazo de las medidas. Si se utiliza el de Chauvenet se procederá como indica el ANEXO F.

Tto. 5 : A continuación se calculan las viscosidades cinemáticas del gas para cada presión absoluta y temperatura, mediante las expresiones:

$$\text{viscosidad}_{\text{cinematica}}(P,T) = \frac{\text{viscosidad}_{\text{dinamica}}(T)}{\text{densidad}(P,T)}$$

En la referencia [4] se encuentran expresiones para obtener la viscosidad cinemática de muchos gases que pueden emplearse como fluido de calibración. Para obtener la densidad del gas a una presión y temperatura dada puede utilizarse su ecuación de estado: $P = \rho R_g T$, de donde se obtiene la densidad ρ , siendo R_g la constante del gas, que para aire seco tiene un valor de $R_g = 287,05 \text{ Pa}/((\text{kg}/\text{m}^3) \cdot \text{K})$.

Se obtienen las viscosidades $v_{i,j}$, que proporcionan un valor medio y una desviación típica, empleando las expresiones:

$$\bar{v}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} v_{i,j}}{n_i}, \quad Sv_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (v_{i,j} - \bar{v}_i)^2}{n_i - 1}}, \quad \text{con } j=1..n_i$$

Tto. 6 : Se calculan los números de Roshko (Ro_i) y los factores K (Kf_i) de la turbina empleando las expresiones:



$$Ro_i = \frac{\bar{f}_i}{\bar{v}_i} \qquad Kf_i = 60 \frac{\bar{f}_i}{\bar{Q}_i}$$

Con los que ya puede construirse la Curva de Viscosidad Universal de la Turbina.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo de incertidumbres

6.1.1.- Cálculo de incertidumbres en calibración bajo situación (a)

La corrección en función de las magnitudes de entrada incluyendo todas las correcciones asociadas que pueden contribuir a la incertidumbre es:

$$C = \bar{Q} + \delta p_{cal} + \delta p_{der} + \delta p_{res} + \delta p_T + \dots - (\bar{q} + \delta q_{res} + \dots)$$

Donde:

\bar{Q}	Valor medio de las indicaciones del patrón.
δp_{cal}	Corrección debida a la incertidumbre de calibración.
δp_{der}	Corrección debida a la deriva del patrón desde su calibración.
δp_{res}	Corrección debida a la resolución del patrón.
δp_T	Corrección debida a la influencia de la temperatura sobre el patrón desde su calibración y durante la calibración en la que se está utilizando.
...	



\bar{q} Valor medio de las indicaciones del instrumento a calibrar.

δq_{res} Corrección debida a la resolución del instrumento a calibrar.

...

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres se expresa la incertidumbre típica asociada a la magnitud de salida C en función de las incertidumbres típicas asociadas a las magnitudes de entrada. Considerando todas las magnitudes de entrada independientes, la incertidumbre típica asociada a C , $u(C)$, será:

$$u^2(C) = u^2(\bar{Q}) + u^2(\delta p_{cal}) + u^2(\delta p_{der}) + u^2(\delta p_{res}) + u^2(\delta p_T) + \dots + u^2(\bar{q}) + u^2(\delta q_{res}) + \dots$$

El cálculo de cada una de estas incertidumbres típicas asociadas a las magnitudes de entrada desde los datos de partida de que se dispone es:

$u(\bar{Q})$ Incertidumbre debida a la falta de repetibilidad del patrón, se considera distribución normal y se obtiene mediante la expresión

$$u(\bar{Q}) = \frac{S}{\sqrt{m}}$$

donde S es la desviación de una muestra de tamaño m .

$u(\delta p_{cal})$ Incertidumbre típica de calibración del patrón, que será la reflejada en el correspondiente certificado de calibración, para el punto considerado. Puesto que en los certificados se indican incertidumbres expandidas, para hallar la



incertidumbre típica será necesario emplear la siguiente expresión

$$u(\delta_{pcal}) = \frac{Up_{cal}}{k_{pcal}}$$

donde:

Up_{cal}:

Es la incertidumbre expandida que figura en el certificado de calibración del patrón para el punto de calibración en el que se está calculando la incertidumbre.

k_{pcal}:

Es el factor de cobertura asociado a dicha incertidumbre expandida *Up_{cal}* (normalmente *k_{pcal}*=2). Se considera distribución normal.

NOTA

En el caso de que en el certificado del patrón no figure el punto de calibración, o uno muy próximo, en el que se está calculando la incertidumbre, se podrá tomar como *Up_{cal}* y *k_{pcal}* el valor máximo de *Up_{cal}*/*k_{pcal}* de los indicados en el certificado de calibración del patrón, en valor absoluto o, si resultase más conveniente, trabajando con valores relativos.

u(δ_{pder}) Incertidumbre típica debida a la deriva de la corrección del patrón desde su última calibración. Se considera que tiene una distribución rectangular y que es igual a:

$$u(\delta_{pder}) = \frac{\text{deriva}_{-anual}}{\sqrt{12}}$$

u(δ_{pres}) Incertidumbre típica debida a la resolución del patrón. Se considera distribución rectangular y se obtiene mediante la expresión



$$u(\delta p_{res}) = \frac{resp}{\sqrt{3}}$$

siendo *resp* la resolución del patrón.

$u(\delta p_T)$ Incertidumbre típica debida a la variación de la temperatura atmosférica respecto de una temperatura de referencia. En prácticamente todos los calibradores expuestos en el ANEXO D, el caudal Q es proporcional al área de la sección recta por donde se genera el caudal, en general ésta será igual a $\pi \frac{D_0^2}{4}$, siendo D_0 el diámetro de ese conducto a una temperatura de referencia T_0 . Si este conducto está fabricado en un material de que tiene un coeficiente de dilatación α , entonces la corrección por temperatura del caudal generado por el calibrador será

$$\bar{Q} \cdot [2 \cdot \alpha \cdot \Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2]$$

Normalmente T es la temperatura atmosférica, T_a , durante la calibración. Considerando una distribución rectangular, entonces la incertidumbre típica de esa influencia sobre el patrón será

$$u(\delta p_T) = \frac{\bar{Q} \cdot [2 \cdot \alpha \cdot \Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2]}{\sqrt{3}}$$

$u(\bar{q})$ Incertidumbre típica debida a la falta de repetibilidad del instrumento a calibrar, se considera distribución normal y se obtiene mediante la expresión

$$u(\bar{q}) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

donde s es la desviación de una muestra de tamaño n .



$u(\delta q_{res})$ Incertidumbre típica debida a la resolución del caudalímetro a calibrar. Se considera distribución rectangular y se obtiene mediante la expresión

$$u(\delta q_{res}) = \frac{resc}{\sqrt{3}}$$

siendo *resc* la resolución del caudalímetro a calibrar.

La incertidumbre típica de la corrección será:

$$u^2(C) = \left[\frac{S}{\sqrt{m}} \right]^2 + \left[\frac{Up_{cal}}{kcal} \right]^2 + \left[\frac{deriva_anual}{\sqrt{12}} \right]^2 + \left[\frac{resp}{\sqrt{3}} \right]^2 + \left[\frac{\bar{Q} \cdot [2 \cdot \alpha \cdot \Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2]}{\sqrt{3}} \right]^2 + \dots + \left[\frac{s}{\sqrt{n}} \right]^2 + \left[\frac{resc}{\sqrt{3}} \right]^2 + \dots$$



El balance de componentes será

Magnitud	Valor estimado de la magnitud	Distribución de probabilidad considerada	Coefficiente de sensibilidad	Incertidumbre típica para k=1
\bar{Q}	\bar{Q}	Normal	+1.0	$\frac{S}{\sqrt{m}}$
δ_{pcal}	0	Normal	+1.0	$\frac{Up_{cal}}{kcal}$
δ_{pder}	0	Rectangular	+1.0	$\frac{deriva_anual}{\sqrt{12}}$
δ_{pres}	0	Rectangular	+1.0	$\frac{resp}{\sqrt{3}}$
δ_{pT}	0	Rectangular	+1.0	$\frac{\bar{Q} \cdot [2 \cdot \alpha \cdot \Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2]}{\sqrt{3}}$
...				
\bar{q}	\bar{q}	Normal	+1.0	$\frac{s}{\sqrt{n}}$
δ_{qres}	0	Rectangular	+1.0	$\frac{resc}{\sqrt{3}}$
...				

Y la incertidumbre expandida se calculará como

$$U = k \cdot \sqrt{\left[\frac{S}{\sqrt{m}} \right]^2 + \left[\frac{Up_{cal}}{kcal} \right]^2 + \left[\frac{deriva_anual}{\sqrt{12}} \right]^2 + \left[\frac{resp}{\sqrt{3}} \right]^2 + \left[\frac{\bar{Q} \cdot [2 \cdot \alpha \cdot \Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2]}{\sqrt{3}} \right]^2 + \dots + \left[\frac{s}{\sqrt{n}} \right]^2 + \left[\frac{resc}{\sqrt{3}} \right]^2 + \dots}$$

donde el factor k se calculará de acuerdo a la referencia [10].

6.1.2.- Cálculo de incertidumbres en calibración bajo situación (b)

La estructura de cálculo bajo esta situación es muy parecida a la presentada en el apartado anterior (6.1.1.-), con una pequeña corrección: recuérdese que al sensor caudalímetro a calibrar se le conectaba instrumentación, con las lecturas de ésta se efectuaba un cálculo con el que determinar el valor del caudal q . Ahora bien, ésta instrumentación añade una incertidumbre típica combinada.

La expresión de la corrección es la misma que en el caso anterior

$$C = \bar{Q} + \delta p_{cal} + \delta p_{der} + \delta p_{res} + \delta p_T + \dots - (\bar{q} + \delta q_{res} + \dots)$$

Las expresiones de cálculo de las correspondientes incertidumbres típicas son iguales al caso anterior, excepto la expresión de $u(\bar{q})$, que se transforma de la siguiente manera



$$u^2(\bar{q}) = \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \sum_{k=1}^s \left(\frac{\partial q(\dots, ins_k, \dots) U(ins_k)}{\partial ins_k k_k}\right)^2$$

La incertidumbre típica de la corrección será

$$\begin{aligned} u^2(C) = & \left[\frac{S}{\sqrt{m}}\right]^2 + \left[\frac{Up_{cal}}{k_{cal}}\right]^2 + \left[\frac{deriva_anual}{\sqrt{12}}\right]^2 + \left[\frac{resp}{\sqrt{3}}\right]^2 \\ & + \left[\frac{\bar{Q} \cdot [2 \cdot \alpha \cdot \Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2]}{\sqrt{3}}\right]^2 + \dots + \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \\ & + \sum_{k=1}^s \left(\frac{\partial q(\dots, ins_k, \dots) U(ins_k)}{\partial ins_k k_k}\right)^2 + \left[\frac{resc}{\sqrt{3}}\right]^2 + \dots \end{aligned}$$



El balance de componentes será

Magnitud	Valor estimado de la magnitud	Distribución de probabilidad considerada	Coficiente de sensibilidad	Incertidumbre típica para $k=1$
\bar{Q}	\bar{Q}	Normal	+1.0	$\frac{S}{\sqrt{m}}$
δ_{pcal}	0	Normal	+1.0	$\frac{U_{pcal}}{kcal}$
δ_{pder}	0	Rectangular	+1.0	$\frac{deriva_anual}{\sqrt{12}}$
δ_{pres}	0	Rectangular	+1.0	$\frac{resp}{\sqrt{3}}$
δ_{pT}	0	Rectangular	+1.0	$\frac{\bar{Q} \cdot [2 \cdot \alpha \cdot \Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2]}{\sqrt{3}}$
...				
\bar{q}	\bar{q}	Normal	+1.0	$\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \sum_{k=1}^s \left(\frac{\partial q(\dots ins_k \dots)}{\partial ins_k} \frac{U(ins_k)}{k_k}\right)^2$
δ_{pres}	0	Rectangular	+1.0	$\frac{resc}{\sqrt{3}}$
...				

Y la incertidumbre expandida se calculará como



$$U = k \cdot \sqrt{\left[\frac{S}{\sqrt{m}} \right]^2 + \left[\frac{Up_{cal}}{k_{cal}} \right]^2 + \left[\frac{deriva_anual}{\sqrt{12}} \right]^2 + \left[\frac{resp}{\sqrt{3}} \right]^2 + \left[\frac{\bar{Q} \cdot \left[2 \cdot \alpha \cdot \Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2 \right]}{\sqrt{3}} \right]^2 + \dots + \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right)^2 + \sum_{k=1}^s \left(\frac{\partial q(\dots, ins_k, \dots)}{\partial ins_k} \frac{U(ins_k)}{k_k} \right)^2 + \left[\frac{resc}{\sqrt{3}} \right]^2 + \dots}$$

donde el factor k se calculará de acuerdo a la referencia [10].

6.1.3.- Cálculo de incertidumbres en calibración de turbinas

Cuando se obtiene la Curva de Viscosidad Universal de una turbina, en el correspondiente certificado de calibración suele mostrarse las incertidumbres del caudal generado, y del resto de instrumentación (frecuencia de pulsos, temperatura y presión de la corriente).

La expresión del caudal generado por el calibrador patrón es

$$Q = \bar{Q} + \delta p_{cal} + \delta p_{der} + \delta p_{pres} + \delta p_T + \dots$$

Por tanto, la incertidumbre típica del caudal generado por el calibrador patrón será



$$u^2(Q) = \left[\frac{S}{\sqrt{m}} \right]^2 + \left[\frac{Up_{cal}}{k_{cal}} \right]^2 + \left[\frac{deriva_{anual}}{\sqrt{12}} \right]^2 + \left[\frac{resp}{\sqrt{3}} \right]^2 + \left[\frac{\bar{Q} \cdot [2 \cdot \alpha \cdot \Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2]}{\sqrt{3}} \right]^2 + \dots$$

Las incertidumbres típicas del resto de la instrumentación serán:

$u(\delta_{fcal})$

Incertidumbre típica de calibración del instrumento utilizado para medir la frecuencia de los pulsos generados por la turbina, que será la reflejada en el correspondiente certificado de calibración, para el punto considerado. Puesto que en los certificados se indican incertidumbres expandidas, para hallar la incertidumbre típica será necesario emplear la siguiente expresión

$$u(\delta_{fcal}) = \frac{U_{fcal}}{k_{fcal}}$$

donde

U_{fcal}:

Es la incertidumbre expandida que figura en el certificado de calibración de este instrumento, para el punto de calibración en el que se está calculando la incertidumbre.

k_{fcal}:

Es el factor de cobertura asociado a dicha incertidumbre expandida *U_{fcal}* (normalmente *k_{fcal}*=2). Se considera distribución normal.



NOTA

En el caso de que en el certificado del patrón no figure el punto de calibración, o uno muy próximo, en el que se está calculando la incertidumbre, se podrá tomar como U_{fcal} y k_{fcal} el valor máximo de U_{fcal}/k_{fcal} de los indicados en el certificado de calibración del patrón, en valor absoluto o, si resultase más conveniente, trabajando con valores relativos.

$u(\bar{f})$ Incertidumbre típica debida a la falta de repetibilidad del instrumento utilizado para medir la frecuencia de los pulsos generados por la turbina, se considera distribución normal y se obtiene mediante la expresión

$$u(\bar{f}) = \frac{Sf}{\sqrt{n}}$$

donde Sf es la desviación de una muestra de tamaño n .

$u(\delta P_{cal})$ Incertidumbre típica de calibración del instrumento utilizado para medir la presión absoluta de la corriente, que será la reflejada en el correspondiente certificado de calibración, para el punto considerado. Puesto que en los certificados se indican incertidumbres expandidas, para hallar la incertidumbre típica será necesario emplear la siguiente expresión

$$u(\delta P_{cal}) = \frac{UP_{cal}}{kP_{cal}}$$

donde:

UP_{cal} :

Es la incertidumbre expandida que figura en el certificado de calibración de este instrumento, para el punto de calibración en el que se está calculando la incertidumbre.



kPcal:

Es el factor de cobertura asociado a dicha incertidumbre expandida $UPcal$ (normalmente $kPcal=2$). Se considera distribución normal.

NOTA

En el caso de que en el certificado del patrón no figure el punto de calibración, o uno muy próximo, en el que se está calculando la incertidumbre, se podrá tomar como $Ufcal$ y $kfcal$ el valor máximo de $Ufcal/kfcal$ de los indicados en el certificado de calibración del patrón, en valor absoluto o, si resultase más conveniente, trabajando con valores relativos.

$u(\bar{P})$

Incertidumbre típica debida a la falta de repetibilidad del instrumento utilizado para medir la presión absoluta de la corriente, se considera distribución normal y se obtiene mediante la expresión

$$u(\bar{P}) = \frac{SP}{\sqrt{n}}$$

donde SP es la desviación de una muestra de tamaño n .

$u(\delta Tcal)$

Incertidumbre típica de calibración del instrumento utilizado para medir la temperatura de la corriente, que será la reflejada en el correspondiente certificado de calibración, para el punto considerado. Puesto que en los certificados se indican incertidumbres expandidas, para hallar la incertidumbre típica será necesario emplear la siguiente expresión

$$u(\delta Tcal) = \frac{UTcal}{kTcal}$$

donde:



UTcal:

Es la incertidumbre expandida que figura en el certificado de calibración de este instrumento, para el punto de calibración en el que se está calculando la incertidumbre.

kTcal:

Es el factor de cobertura asociado a dicha incertidumbre expandida *UTcal* (normalmente *kTcal*=2). Se considera distribución normal.

NOTA

En el caso de que en el certificado del patrón no figure el punto de calibración, o uno muy próximo, en el que se está calculando la incertidumbre, se podrá tomar como *UTcal* y *kTcal* el valor máximo de *UTcal/kTcal* de los indicados en el certificado de calibración del patrón, en valor absoluto o, si resultase más conveniente, trabajando con valores relativos.

$u(\bar{T})$

Incertidumbre típica debida a la falta de repetibilidad del instrumento utilizado para medir la presión absoluta de la corriente, se considera distribución normal y se obtiene mediante la expresión:

$$u(\bar{T}) = \frac{ST}{\sqrt{n}}$$

donde *ST* es la desviación de una muestra de tamaño *n*.

Las incertidumbres expandidas, para *k* (normalmente =2) serán:



$$u(Q) = \sqrt{\left[\frac{S}{\sqrt{m}} \right]^2 + \left[\frac{Upcal}{kcal} \right]^2 + \left[\frac{deriva \text{ anual}}{\sqrt{12}} \right]^2 + \left[\frac{resp}{\sqrt{3}} \right]^2 + \left[\frac{Q \cdot [2\alpha \cdot \Delta T + (\alpha \cdot \Delta T)^2]}{\sqrt{3}} \right]^2 + \dots}$$

$$u(f) = \sqrt{\left(\frac{Sf}{\sqrt{n}} \right)^2 + \left(\frac{Ufcal}{kfcal} \right)^2}$$

$$u(P) = \sqrt{\left(\frac{SP}{\sqrt{n}} \right)^2 + \left(\frac{UPcal}{kPcal} \right)^2}$$

$$u(T) = \sqrt{\left(\frac{ST}{\sqrt{n}} \right)^2 + \left(\frac{UTcal}{kTcal} \right)^2}$$

De estas expresiones podremos calcular las incertidumbres para los números de Roshko (Ro) y los factores Kf de la turbina empleando las expresiones

$$U(Ro) = k \cdot Ro \cdot \sqrt{\left(\frac{u(f)}{f} \right)^2 + \left(\frac{u(P)}{P} \right)^2 + \left(\frac{u(T)}{T} \right)^2 + \left(\frac{u(vform)}{v} \right)^2}$$

donde $u(vform)$ es la incertidumbre en la estimación de la viscosidad cinemática y

$$U(Kf) = k \cdot Kf \cdot \sqrt{\left(\frac{u(f)}{f} \right)^2 + \left(\frac{u(Q)}{Q} \right)^2}$$



donde el factor k se calculará de acuerdo a la referencia [10].

6.2. Interpretación de Resultados

6.2.1.- Datos que deben incluirse en los certificados de calibración

Sobre calibración en situación (a), los valores tabulados que deben aparecer son:

- Los caudales generados por el calibrador patrón (Q)
- Los medidos por el caudalímetro objeto de calibración (q).
- Con estos valores puede obtenerse la tabla de errores o desviaciones ($e = q - Q$).
- Las incertidumbres expandidas, detallando el factor de cobertura, con indicación del intervalo de confianza que supone de acuerdo con la referencia [10].

Sobre calibración en situación (b), los valores tabulados que deben aparecer son:

- Los caudales generados por el calibrador patrón (Q),
- Los medidos por la instrumentación conectada al caudalímetro objeto de calibración (ins), junto con sus unidades de medida,
- Los caudales q calculados a partir de la expresión teórica del sensor caudalímetro $q=Cte \cdot f(\dots, insk, \dots)$.
- Errores o desviaciones ($e = q - Q$).
- Las incertidumbres expandidas, detallando el factor de cobertura, con indicación del intervalo de confianza que supone de acuerdo con la referencia [10].

Sobre la calibración de turbinas, los valores tabulados que deben aparecer son:

- Los caudales generados por el calibrador patrón (Q),



- Los medidos por la instrumentación conectada a la turbina: frecuencia (f), presión absoluta (P) y temperatura (T).
- Viscosidad cinemática del fluido de calibración,
- Números de Roshko: $Ro = f/\nu$, calculado a partir de los datos anteriores,
- Factor $Kf = 60 \cdot f/Q$,
- Las incertidumbres expandidas, detallando el factor de cobertura, con indicación del intervalo de confianza que supone de acuerdo con la referencia [10].

De forma general habría que incluir:

- Cuando sean aplicables los criterios de interpretación establecidos en normas, recomendaciones internacionales o cualquier otro documento o especificación que se considere relevante. Se indicarán los límites de error permitidos.
 - Se indicará expresamente que la “Declaración de cumplimiento o no” con un determinado criterio o requisito se hará teniendo en cuenta las incertidumbres.
 - Se indicará expresamente que las unidades en que se darán los resultados son las establecidas en el R.D. 1317/1989, modificado por RD 1737/1997.
 - Se dará una orientación acerca del periodo de tiempo razonable para la recalibración del equipo, dejando claro en cualquier caso que el responsable final de asignar el periodo de recalibración es siempre el usuario del equipo.

6.2.2.- Precisión de Calibración

Abundando un poco más en lo mencionado anteriormente y según la referencia [7], la curva de calibración de un caudalímetro sólo puede aplicarse a él y bajo las mismas condiciones de trabajo en que fue calibrado.

Tampoco puede calibrarse un caudalímetro con una incertidumbre mejor que su repetibilidad. Las incertidumbres tipo A de una calibración pueden calcularse



estadísticamente a partir de los resultados de la calibración, pero las incertidumbres tipo B sólo pueden estimarse a partir del conocimiento del sistema de calibración y su método de calibración.

7. REFERENCIAS

7.1. Documentos necesarios para realizar la calibración

- Manual de funcionamiento del caudalímetro a calibrar y de los elementos que lo componen.
- Manual de funcionamiento del calibrador y de los elementos que lo componen.

7.2. Otras referencias para consulta

- [1] ISO 5167-1. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices. Part 1: Orifice plates, nozzles and Ventury tubes inserted in circular coss-section conduits running full.
- [2] ISO 7194. Measurement of fluid flow in closed conduits — Velocity-area methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of current-meters or Pitot static tubes.
- [3] ISO 3966. Measurement of fluid flow in closed conduits — Velocity area method using Pitot static tubes.
- [4] Flow Measurement, Practical Guides for Measurement and Control. D.W. Spitzer. Enero 1996. ISBN 1-55617-334-2
- [5] Low Speed Wind Tunnel Testing. William H. Rae, JR and Alan Pope. John Willey and Sons. Mayo 1984.
- [6] The Calibration of Flowmeters, Basic Principles and Practice of Flow Measurement. Richard Paton. 1998



- [7] Fundamentals of Flow Measurement. Joseph P. DeCarlo. 1983. ISBN 0-87664-627-5.
- [8] The utilization of the Universal Viscosity Curve for Turbine Flowmeters in the gas service. Larry S. Renda. FTI.
- [9] Guía EA/4-02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. EA, December, 1999.
- [10] Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. CEM.
- [11] Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados. CEM, 3ª Edición 2008.

8. ANEXOS

- ANEXO I: Ejemplo de calibración de un caudalímetro en situación a)
- ANEXO II: Ejemplo de calibración de un caudalímetro en situación b)
- ANEXO III: Ejemplo de calibración de un caudalímetro de turbina
- ANEXO IV: Algunos tipos de calibradores de caudalímetros de gases
- ANEXO V: Ejemplos donde se necesita instrumentación auxiliar
- ANEXO VI: Criterio estadístico de Chauvenet



ANEXO I: Ejemplo de calibración de un caudalímetro en situación a).

Peticionario:	PET		
Instrumento:	Nombre: NOM	Modelo: MOD	Nº/s: xxx-xxx-xxx
Fecha recepción:	Fecha_recep	Fecha calibración:	Fecha_cal
Rango calibración:	1-5 L/min	Operador:	OPER
Condiciones amb:	Pa = Pa ± IPa	Ta = 23.1 ± ITa	H = H ± IH

Nº de punto	Lecturas del patrón	Lecturas del instrumento
1	1.01	1
	1	1
	1.01	1
	1	1
	1.01	1
	1.01	1
	1	1
	1.01	1
	1	0.9
	1.01	1
		1
		1
		1
		0.9
	1	
2	2.02	2
	2.01	2
	2.01	1.9
	2.01	1.9
	2.02	2
	2.02	2
	2.01	2.1
	2.02	2.1
	2.01	2.1
		2
	2	
	2	



Nº de punto	Lecturas del patrón	Lecturas del instrumento
		1.9
		2
		1.9
3	3.02	3.1
	3.01	3
	3	2.9
	3	3
	3.02	3
	3.02	3
	3.01	3
	3	3.1
	3	3
	3.02	3.1
		2.9
		2.9
		3
		2.9
		3
4	4.01	4
	4.03	3.9
	4.01	3.9
	4.03	3.9
	4.04	4
	4.01	4
	4.03	4
	4.01	4
	4.03	4
	4.04	4
		3.9
		3.9
		3.9
		3.9
		3.9
		3.9
5	5.01	5.3
	5.03	5
	5.01	5



El paso siguiente es el cálculo de medias y desviaciones típicas:

Nº de punto i	Patrón		Caudalímetro	
	Medias \bar{Q}_i L/min	Desviaciones típicas S_i L/min	Medias \bar{q}_i L/min	Desviaciones típicas s_i L/min
1	1.01	0.005	0.99	0.035
2	2.01	0.005	1.99	0.07
3	3.01	0.009	2.99	0.07
4	4.02	0.013	3.95	0.052
5	5.02	0.013	5.1	0.156

A continuación se utiliza el criterio de Chauvenet para aceptar/rechazar

medidas: se calculan los parámetros $R_{i,j} = \left| \frac{Q_{i,j} - \bar{Q}_i}{S_i} \right|$ y

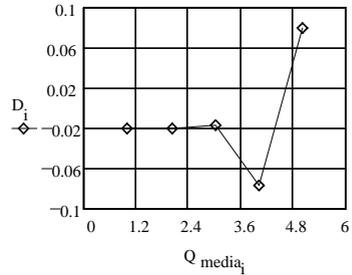
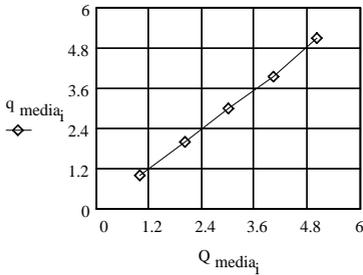
$$r_{i,j} = \left| \frac{q_{i,j} - \bar{q}_i}{q_i} \right| :$$

- Si $R_{i,j} \leq R(m_i=10 \text{ medidas})=1.96$, entonces se acepta la medida $Q_{i,j}$. En caso contrario se sustituye por una medida nueva, recalculándose los valores medios y desviaciones típicas.
- Si $r_{i,j} \leq R(n_i=15 \text{ medidas})=2.13$, entonces se acepta la medida $q_{i,j}$. En caso contrario se sustituye por una medida nueva, recalculándose los valores medios y desviaciones típicas.

En el caso del ejemplo, todas las medidas han resultado válidas.

También se calcula el error, o desviación, de la lectura del caudalímetro respecto de la del patrón, mediante la expresión: $D_i = \bar{q}_i - \bar{Q}_i$

Unas representaciones gráficas de los valores medios y del error, son las siguientes:



A continuación se calcularán las incertidumbres teniendo en cuenta las contribuciones explicadas anteriormente en el apartado de “Cálculo de Incertidumbres en situación (a). Los resultados han sido los siguientes:

- Resolución del patrón = 0.01.
- Resolución del caudalímetro = 0.1.
- Coeficiente de dilatación = $11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.
- $\Delta T = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- $U_{pcal} = 0.2 \text{ \% de } Q$.
- $Deriva = 0.1 \text{ \% de } Q$.

	$u(Q)$	$u(\delta p_{cal})$	$u(\delta p_{der})$	$u(\delta p_{res})$	$u(\delta p_T)$	$u(q)$	$u(\delta q_{res})$	$U(k=2)$
1	0.002	0.001	0.0003	0.006	7.681×10^{-13}	0.009	0.058	0.118
2	0.002	0.002	0.0006	“	1.538×10^{-12}	0.018	“	0.122
3	0.003	0.003	0.0009	“	2.298×10^{-12}	0.018	“	0.122
4	0.004	0.004	0.001	“	3.073×10^{-12}	0.013	“	0.12
5	0.004	0.005	0.001	“	3.833×10^{-12}	0.04	“	0.142



ANEXO II: Ejemplo de calibración de un caudalímetro en situación b).

Peticionario:	PET		
Instrumento:	Nombre: TOBERA	Modelo: MOD	Nº/s: xxx-xxx-xxx
Fecha recepción:	Fecha_recep	Fecha calibración:	Fecha_cal
Rango calibración:	1-5 L/min	Operador:	OPER
Condiciones amb:	Pa = Pa ± IPa	Ta = 23.1 ± ITa	H = H ± IH

Nº punto	Q kg/s	Medida 1 Presion bar	Medida 2 Temp. °C	Medida 3
1	2.41	1.2	23.1	
	2.39	1.21	23.1	
	2.4	1.21	23.3	
	2.39	1.21	23.2	
	2.41	1.19	23.1	
	2.41	1.2	23.1	
	2.39	1.21	23.1	
	2.4	1.19	23.3	
	2.4	1.21	23.1	
	2.41	1.21	23.1	
		1.2	23.2	
		1.2	23.3	
		1.21	23.1	
		1.19	23.1	
		1.21	23.2	
2	4.8	2.4	23.2	
	4.79	2.41	23.2	
	4.81	2.4	23.2	
	4.81	2.4	23.3	
	4.79	2.4	23.2	
	4.8	2.4	23.2	
	4.79	2.41	23.2	
	4.81	2.41	23.1	
	4.81	2.4	23.1	
	4.79	2.39	23.2	
		2.39	23.2	
		2.4	23.1	
		2.4	23.2	
		2.41	23.2	
		2.4	23.3	



Nº punto	Q kg/s	Medida 1 Presion bar	Medida 2 Temp. °C	Medida 3	
3	7.21	3.7	23.1		
	7.19	3.69	23.3		
	7.2	3.7	23.2		
	7.2	3.7	23.4		
	7.21	3.71	23.1		
	7.2	3.7	23.1		
	7.19	3.69	23.3		
	7.2	3.71	23.3		
	7.2	3.7	23.3		
	7.21	3.69	23.2		
			3.72	23.3	
			3.72	23.1	
			3.7	23.2	
			3.71	23.3	
		3.7	23.2		
4	9.59	5	23.2		
	9.6	5.01	23.1		
	9.61	4.99	23.3		
	9.6	5	23.2		
	9.61	5.02	23.2		
	9.59	5	23.2		
	9.61	5.01	23.2		
	9.61	5.02	23.1		
	9.59	4.99	23.2		
	9.6	5.01	23.3		
			5	23.2	
			5.02	23.2	
			5	23.3	
			5.02	23.2	
		5	23.2		
5	12.01	5.98	23.1		
	12.01	6	23.2		
	11.99	6	23.1		
	12	6.01	23.1		
	12.01	6.02	23.2		
	11.99	5.98	23.2		
	12.01	6	23.2		
	11.99	6.01	23.2		
	12.01	6	23.1		
	12	5.98	23.2		



Nº punto	Q kg/s	Medida 1 Presion bar	Medida 2 Temp. °C	Medida 3
		6.01	23.1	
		6.02	23.1	
		5.99	23.1	
		6.02	23.1	
		6.02	23.2	

Como se ha notado poca estabilidad en el patrón se han tomado $m = 10$ medidas de caudal para cada punto de calibración, y con el instrumento se tiene establecido en el laboratorio que se tomen al menos 10, se han adquirido $n = 15$.

El paso siguiente es el cálculo de medias, desviaciones típicas y medidas de caudal q mediante la expresión:

$$q = \left(\frac{2}{\gamma - 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \sqrt{\frac{\gamma}{Rg \cdot T} \cdot P_0 \cdot A}$$

Donde:

- γ Es la relación de calores específicos del gas de calibración, en este caso se trata de aire. $\gamma = 1.4$.
- Rg Constante del gas, que para el aire es $Rg = 287.05 \text{ Pa}/((\text{kg}/\text{m}^3)\text{K})$.
- A Área de la boca de salida de la tobera. Esta es circular de diámetro 0.75 cm.
- P_0 Presión absoluta medida en el gas



Nº punto	Patrón Q kg/seg		Presión absoluta bares		Temperatura °C		q kg/seg	
	Medias	Desviaciones típicas	Medias	Desviaciones típicas	Medias	Desviaciones Típicas	Medias	Desviaciones Típicas
1	2.4	0.007	1.203	0.008	23.17	0.082	2.313	0.016
2	4.8	0.007	2.401	0.006	23.19	0.059	4.615	0.012
3	7.2	0.006	3.703	0.01	23.23	0.096	7.115	0.019
4	9.6	0.006	5.006	0.011	23.21	0.059	9.62	0.021
5	12	0.006	6.003	0.015	23.15	0.052	11.537	0.029



A continuación se utiliza el criterio de Chauvenet para aceptar/rechazar

medidas: se calculan los parámetros $R_{i,j} = \left| \frac{Q_{i,j} - \bar{Q}_i}{S_i} \right|$ y

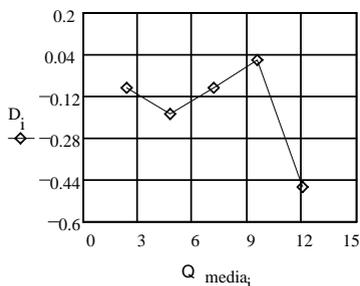
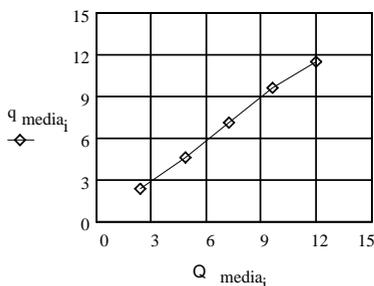
$Rq_{i,j} = \left| \frac{q_{i,j} - \bar{q}_i}{s_i} \right|$, siendo “S”, “s” las desviaciones típicas de Q y q

respectivamente:

- Si $R_{i,j} \leq R(m_i=10 \text{ medidas})=1.96$, entonces se acepta la medida $Q_{i,j}$. En caso contrario se rechaza y/o se sustituye por una medida nueva, recalculándose los valores medios y desviaciones típicas.
- Si $Rq_{i,j} \leq R(n_i=15 \text{ medidas})=2.13$, entonces se acepta la medida $q_{i,j}$. En caso contrario se sustituye y/o se sustituye por una medida nueva, recalculándose los valores medios y desviaciones típicas.

En el caso del ejemplo, todas las medidas han resultado válidas.

A continuación se calculan las desviaciones, o errores, con la expresión $D_i = \bar{q}_i - \bar{Q}_i$. Representaciones gráficas de valores medios y desviaciones son:





A continuación se calcularán las incertidumbres teniendo en cuenta las contribuciones explicadas anteriormente en el apartado de “Cálculo de Incertidumbres en situación (a) y (b). Los resultados han sido los siguientes:

- Resolución del patrón = 0.01.
- Resolución del sensor caudalímetro = 0.01.
- Coeficiente de dilatación = $11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.
- $\Delta T = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- $U_{pcal} = 0.2 \%$ de Q.
- Deriva = 0.1 % de Q.
- Incertidumbre en la medida de $P = U_{Pcal} = 0.1 \%$ de la lectura, para $k=2$.
- Incertidumbre en la medida de $T = 0.15 \text{ } ^\circ\text{C}$, para $k=2$.

	$u(Q)$	$u(\delta p_{cal})$	$u(\delta p_{der})$	$u(\delta p_{res})$	$u(\delta p_T)$	$u(q)$	$u(\delta q_{res})$	$U(k=2)$
1	0.002	0.002	0.0007	0.006	3.18×10^{-6}	0.004	0.006	0.018
2	0.002	0.005	0.001	“	6.374×10^{-6}	0.004	“	0.02
3	0.002	0.007	0.002	“	9.562×10^{-6}	0.006	“	0.022
4	0.002	0.01	0.003	“	1.275×10^{-6}	0.007	“	0.026
5	0.002	0.012	0.003	“	1.594×10^{-6}	0.010	“	0.03



ANEXO III: Ejemplo de calibración de un caudalímetro de turbina.

Peticionario:	PET		
Instrumento:	Nombre:TURBINA	Modelo: MOD	Nº/s: xxx-xxx-xxx
Fecha recepción:	Fecha_recep	Fecha calibración:	Fecha_cal
Rango calibración:	0.2-1 L/min	Operador:	OPER
Condiciones amb:	Pa=Pa±IPa	Ta=Ta±ITa	H=H±IH

Nº punto	Q L/min	f Hz	T °C	P bar	
1	1.01	15.59	23.1	1.029	
	1	15.56	23.1	1.034	
	1.01	15.65	23.3	1.032	
	1	15.65	23.2	1.027	
	1.01	15.65	23.1	1.032	
	1.01	15.59	23.1	1.031	
	1	15.56	23.1	1.034	
	1.01	15.65	23.3	1.032	
	1	15.65	23.1	1.035	
	1.01	15.65	23.1	1.028	
			15.58	23.2	1.03
			15.57	23.3	1.03
			15.57	23.1	1.029
			15.54	23.1	1.034
		15.50	23.2	1.032	
2	2.02	32.01	23.2	1.029	
	2.01	32.02	23.2	1.027	
	2.01	32	23.2	1.034	
	2.01	32.12	23.3	1.029	
	2.02	32.07	23.2	1.032	
	2.02	32.01	23.2	1.028	
	2.01	32.02	23.2	1.034	
	2.02	32	23.1	1.032	
	2.01	32.11	23.1	1.031	
			32.07	23.2	1.033
			32.07	23.2	1.031
			32.09	23.1	1.032
			32.04	23.2	1.032
			32.08	23.2	1.031



Nº punto	Q L/min	f Hz	T °C	P bar
		32.05	23.3	1.033
3	3.02	49.74	23.1	1.028
	3.01	49.62	23.3	1.029
	3	49.92	23.2	1.031
	3	49.68	23.4	1.029
	3.02	49.86	23.1	1.028
	3.02	49.74	23.1	1.035
	3.01	49.62	23.3	1.035
	3	49.92	23.3	1.029
	3	49.68	23.3	1.031
	3.02	49.86	23.2	1.032
		49.75	23.3	1.031
		49.75	23.1	1.032
		49.77	23.2	1.034
		49.99	23.3	1.033
		50	23.2	1.032
4	4.01	97.84	23.2	1.029
	4.03	67.6	23.1	1.032
	4.01	67.59	23.3	1.03
	4.03	67.88	23.2	1.032
	4.04	67.70	23.2	1.032
	4.01	67.84	23.2	1.031
	4.03	67.6	23.2	1.033
	4.01	67.95	23.1	1.032
	4.03	67.88	23.2	1.034
	4.04	67.70	23.3	1.032
		67.87	23.2	1.035
		67.58	23.2	1.033
		67.75	23.3	1.033
		67.71	23.2	1.03
		67.78	23.2	1.03
5	5.01	85.60	23.1	1.028
	5.03	85.79	23.2	1.034
	5.01	85.67	23.1	1.028
	5.05	85.82	23.1	1.028
	5.02	85.6	23.2	1.033



Nº punto	Q L/min	f Hz	T °C	P bar
	5.01	85.6	23.2	1.032
	5.03	85.79	23.2	1.031
	5.01	85.68	23.2	1.031
	5.01	85.82	23.1	1.028
	5.02	85.6	23.2	1.033
		85.61	23.1	1.034
		85.69	23.1	1.034
		85.59	23.1	1.029
		85.73	23.1	1.028
		85.7	23.2	1.034

En el calibrador patrón de caudal se han recogido muestras de tamaño $m = 10$, pero de la instrumentación conectada a la turbina las muestras han sido de $n = 15$.

El primer paso ha sido el cálculo de valores medios y desviaciones típicas:



Nº punto	Q Patrón L/min		Frecuencia Hz		Temperatura °C		Presión bar	
	media	Desviación típica	media	Desviación típica	media	Desviación típica	media	Desviación típica
1	1.01	0.005	15.647	0.069	23.17	0.082	1.031	0.002
2	2.01	0.005	32.077	0.045	23.19	0.059	1.031	0.002
3	3.01	0.009	49.865	0.146	23.23	0.096	1.031	0.002
4	4.02	0.013	67.709	0.146	23.21	0.059	1.032	0.002
5	5.02	0.013	85.606	0.12	23.15	0.052	1.031	0.003



A continuación se ha aplicado el criterio de Chauvenet a todas estas muestras tal y como indica el ANEXO F: todas las medidas han resultado válidas.

Ya puede calcularse la viscosidad cinemática del fluido. Los valores en centiStokes han sido:

Nº punto	Viscosidad Cinemática cSt
1	0.14867
2	0.148687
3	0.148701
4	0.148601
5	0.148682

Una vez que se tienen las viscosidades se calculan los números de

Roshko $Ro_i = \frac{f_i}{v_i}$, y los factores K de la turbina $Kf_i = \frac{60 \cdot f_i}{Q_i}$, para

poder construir la Curva de Viscosidad Universal de la turbina, como resultado de la calibración:

Nº punto	Ro Hz/cSt	Kf Pulsos/litro
1	105.3	933.2
2	215.7	955.4
3	335.3	994.0
4	455.6	1009.6
5	575.8	1023.2

El último paso es el cálculo de las incertidumbres expandidas del patrón y de la instrumentación conectada a la turbina, para un factor de cobertura $k=2$:

- Resolución del patrón = 0.01.
- Coeficiente de dilatación = $11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.



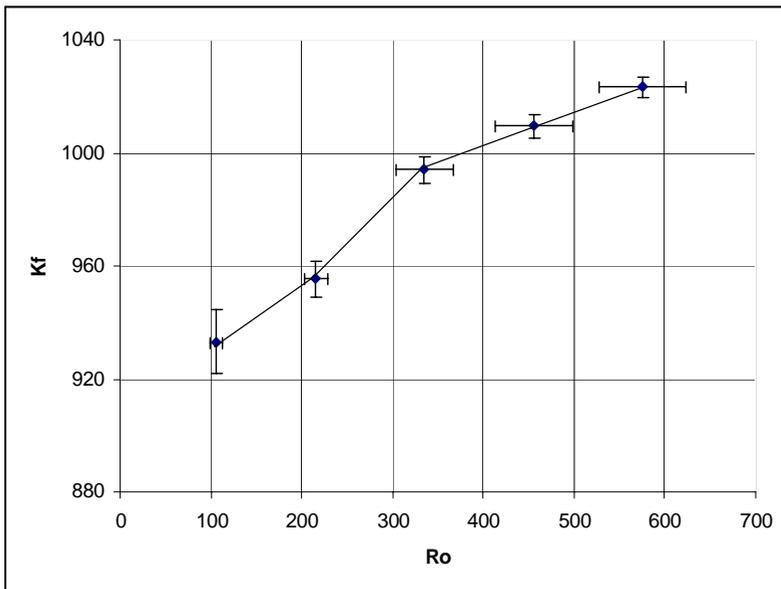
- $\Delta T = 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$.
- $Up_{cal} = 0.2 \%$ de Q .
- Deriva = 0.1% de Q .
- Incertidumbre en la medida de $P = UP_{cal} = 0.1 \%$ de la lectura, para $k=2$.
- Incertidumbre en la medida de $T = 0.15 \text{ }^\circ\text{C}$, para $k=2$.
- La incertidumbre en la estimación de la viscosidad cinemática es un 10% como un distribución rectangular (ver ref[10]).

Nº punto	$u(Q)$ patrón L/min	$u(f)$ Hz	$u(T)$ $^\circ\text{C}$	$u(P)$ bar
1	0.006	0.018	0.078	0.018
2	0.007	0.012	0.077	0.012
3	0.007	0.038	0.079	0.038
4	0.008	0.038	0.077	0.038
5	0.009	0.033	0.076	0.031

Las incertidumbres para los números de Roshko (Ro) y los factores K_f de la turbina son

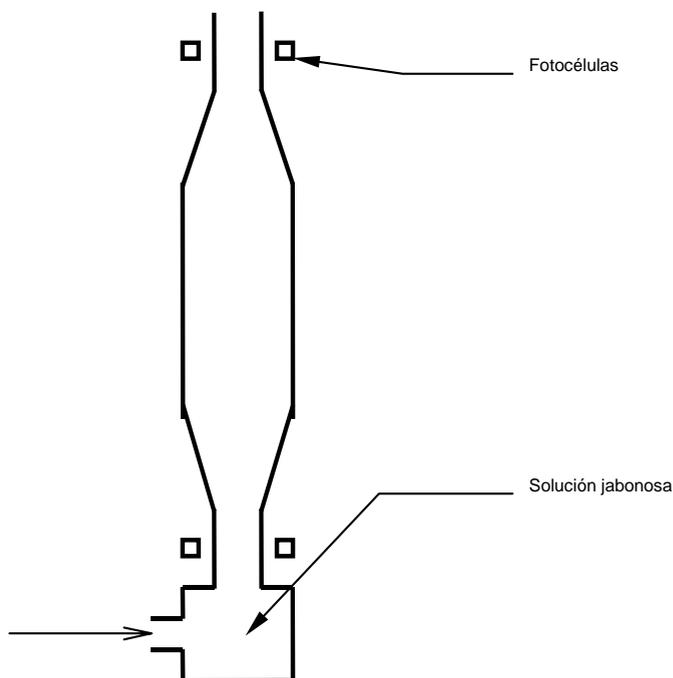
Nº punto	$u(Ro)$ Hz/cSt	$u(K_f)$ Pulsos/litro
1	7.1	11
2	13	6,3
3	31	4.9
4	42	4.2
5	48	3.8

Una representación gráfica de la Curva de viscosidad Universal con las incertidumbres de sus parámetros es:



ANEXO IV: Algunos tipos de calibradores de caudalímetros de gases

Dentro de los métodos de desplazamiento se tiene el calibrador de películas de jabón, tiene un rango bajo (de 10^{-7} a 10^{-4} m³/s). Consta de un tubo donde el desplazador está formado por una película de jabón.

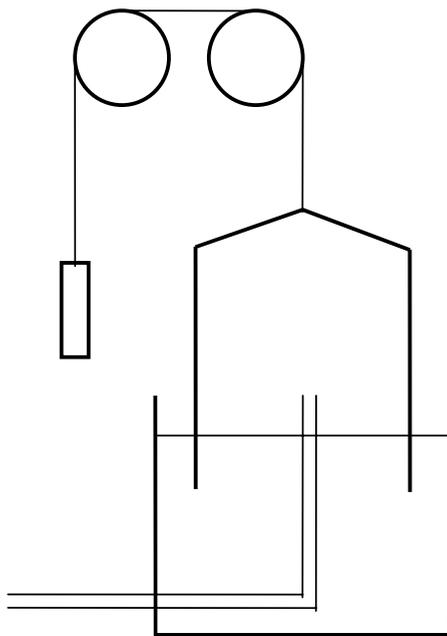


Cuando el gas entra en el depósito con la solución jabonosa se forma una película de jabón a través del tubo y se desplaza según el eje del tubo a la misma velocidad que el gas. Midiendo el tiempo que ha empleado la película en el cruce por las dos células fotoeléctricas y conociendo el volumen comprendido entre estas mediante calibración, se obtiene fácilmente el flujo volumétrico de gas. Pueden conseguirse incertidumbres de 0,25 % bajo condiciones cuidadosamente controladas.

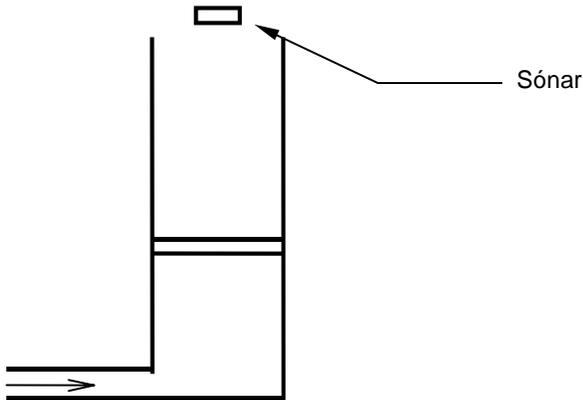


Otro método de desplazamiento común son las *Bell provers* o sencillamente campanas, utilizadas para calibrar caudalímetros de bajo rango como los domésticos. Un cilindro cerrado por un extremo y abierto por el otro, tal como una campana, se introduce dentro de un baño. El cilindro está sostenido por pesos a través de una polea que no ofrezca fricción para crear una presión predeterminada en el volumen atrapado. Un tubo que pasa a través del líquido se comunica con ese gas atrapado y, bajando la campana, se desplaza el gas hacia el caudalímetro objeto de calibración. Midiendo el tiempo de caída y conociendo su relación volumen-longitud puede determinarse el caudal. El líquido suele ser agua o algún aceite de baja viscosidad y alta presión de vapor.

Para minimizar la expansión o contracción del gas, las temperaturas del líquido, gas y aire no deben ser diferentes en más de 1°C. Pueden conseguirse caudales desde 60 a 1500 L/min, con una incertidumbre de hasta del 0,25 %.



También pueden utilizarse la medida del desplazamiento de pistones para calibración de caudal de gases con un dispositivo como el de la figura. Consta de un tubo de cristal de diámetro (área) calibrado, por cuyo interior se desplaza un pistón sellado con mercurio cuando hay caudal de gas. En el extremo superior del tubo hay un sónar que emite ondas que se reflejan en la superficie del pistón. La medida del tiempo que emplean las ondas desde que son emitidas hasta que son recibidas se emplea para calcular la velocidad del pistón en su ascenso. El caudal se obtiene finalmente como el producto de esa velocidad por el área frontal del tubo. Con este sistema se obtienen caudales de hasta 50 L/min con una incertidumbre del 0,2 %.



Las toberas críticas tienen la propiedad de que si la presión aguas arriba es la suficiente para alcanzar condiciones sónicas en su garganta, la velocidad en esta sección será constante e igual a la del sonido, independientemente de fluctuaciones de presión aguas abajo. El caudal másico a través de la tobera se obtiene mediante la expresión:

$$\frac{dm}{dt} = \left(\frac{2}{\gamma - 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{Rg \cdot T_0}} \cdot P_0 A$$



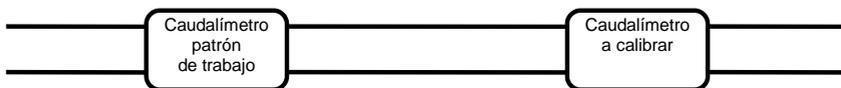
Siendo P_0 y T_0 la presión y temperatura de remanso, γ la relación entre calores específicos del gas, R_g una constante del gas, que para el aire tienen los valores 1,4 y 287,05 Pa/(K·(kg/m³)), respectivamente, y A el área de la garganta de la tobera.

Según la referencia [1] hay dos tipos de toberas patrón:

- Toberas patrón ISA 1932.
- Toberas patrón de radio largo.

La referencia [1] también describe la forma de operación con ellas. Para reducir las pérdidas de presión por la presencia de la tobera en el circuito, éstas se combinan con tubos Venturi.

También pueden encontrarse calibradores por comparación con otro caudalímetro. Consta de un caudalímetro, patrón de trabajo, calibrado con un caudalímetro de transferencia. Tanto el caudalímetro patrón de trabajo, como el caudalímetro objeto de calibración están montados en serie en el circuito de calibración, en el cual se genera el caudal mediante bombas o compresores, según el caso. Uno de los problemas que surgen en este tipo de calibradores es la estabilidad del flujo generado.





ANEXO V: Ejemplos donde se necesita instrumentación auxiliar

Si se genera caudal volumétrico y se desea caudal másico, una forma fácil de relacionar los dos es a través de la densidad del fluido ρ . La densidad de los líquidos depende principalmente de la temperatura $\rho=\rho(T)$, si en un experimento exterior a la calibración se ha obtenido esta relación para el líquido de calibración, basta con medir la temperatura para tener la medida de la densidad del líquido. Si se trata de gases, será necesaria la medida de la presión absoluta y temperatura para calcular la densidad a través de su ecuación de estado $\rho=P/(Rg\cdot T)$, siendo Rg la constante del gas, que para el aire tiene un valor de $Rg=287,05 \text{ Pa/K}\cdot(\text{kg/m}^3)$.

Cuando se calibran caudalímetros muy sensibles al número de Reynolds de la corriente, como las turbinas y caudalímetros basados en la medida de presión diferencial, el problema se resuelve en parte por la determinación de la viscosidad cinemática del gas ν , para lo cual se empleará la expresión

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

donde

μ Es la viscosidad dinámica del gas, que depende principalmente de su temperatura.

ρ Es la densidad del gas, que depende principalmente de su presión absoluta y temperatura.

En la referencia [2] pueden encontrarse expresiones para el cálculo de viscosidades dinámicas en función de la temperatura para muchas sustancias (líquidos y gases) que tienen la forma:

$$\mu(cP) = \frac{K}{\left(\frac{T(^{\circ}C) + 273}{100}\right)^c}$$



Los valores de las constantes K y c vienen tabulados en esa referencia. Si el fluido de trabajo es el aire: $K=0.194$ y $c=0.674$.

Si se están calibrando turbinas habrá que construir la curva de calibración universal, por lo que será necesario obtener la relación;

$$\frac{f}{\nu}$$

Siendo f la frecuencia de esa señal y ν la viscosidad cinemática del gas. La frecuencia se mide con un frecuencímetro y la viscosidad cinemática se obtiene mediante la medida de la presión absoluta del gas y de su temperatura (ver ANEXO C).

Si se están calibrando sensores caudalímetros basados en la medida de la presión diferencial, lógicamente se necesitará instrumentación para medir diferencia de presiones.

Si se desea calibrar toberas sónicas, como puede observarse en párrafos anteriores, el caudal másico es proporcional a la relación:

$$q = Cte \frac{P_0}{\sqrt{T_0}}$$

Por tanto es necesaria instrumentación adecuada para la medida de presión absoluta y temperatura.

Si se está calibrando un rotámetro, hay que tener en cuenta que el caudal que indica es proporcional a la relación:

$$q = Cte \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{T}}$$

Por tanto es necesaria instrumentación para la medida de las presiones absolutas aguas arriba y aguas abajo del flotador: P_1 y P_2 , y para la medida de la temperatura del flujo que circula por él.



ANEXO VI: Criterio estadístico de Chauvenet

Puede darse el caso de que en algún punto del muestreo realizado pueda parecer cuestionable en comparación con el resto de ellos, ya sea debido a un error de lectura, a una perturbación en la cadena de medida o a la aparición de un fenómeno externo o adicional al fenómeno que se pretende medir. Resultaría de gran interés una regla para poder eliminar ese punto. Tal regla puede ser el criterio estadístico de Chauvenet. Este criterio da una base consistente para poder tomar la decisión de aceptar o rechazar este punto. El operador que realiza la calibración no obstante debe juzgar con su propio criterio si este punto es debido a una equivocación y por lo tanto debe rechazarse o es debido a una causa natural y por lo tanto aceptarse. La aplicación del criterio de Chauvenet requiere el cálculo de un coeficiente de desviación R para cada punto:

$$R_i = \left| \frac{x_i - \bar{x}}{S} \right|, \text{ donde } x_i \text{ es una de las de una muestra de tamaño } n, \bar{x} \text{ es}$$

el valor medio de la muestra y S es la desviación típica de esa misma muestra. La comparación de estos coeficientes con un coeficiente normalizado R_0 , que depende del tamaño de la muestra n , tal y como muestra la siguiente tabla, permite cuestionar un punto, bajo los siguientes criterios: Si $R_i > R_0$ entonces es aconsejable rechazar ese punto x_i , que puede sustituirse por una nueva medida, y a continuación se recalcula el valor medio y la desviación típica para volver a obtener los coeficientes R_i ; Si $R_i \leq R_0$, entonces se acepta es x_i .

El criterio de Chauvenet sólo debe aplicarse cada vez para eliminar un solo punto de un muestreo. Si éste contiene varios puntos para los cuales se cumple que $R_i > R_0$ entonces es posible que la instrumentación sea inadecuada o que el proceso que está siendo investigado es muy variable.



Tamaño de la muestra	R_0
2	1.15
3	1.38
4	1.54
5	1.65
7	1.80
10	1.96
15	2.13
25	2.33
50	2.57
100	2.81
300	3.14
500	3.29

