

GUÍA TÉCNICA SOBRE TRAZABILIDAD E INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS EMPLEANDO COMO REFERENCIA UN PATRÓN VOLUMETRICO

México, Revisión 1, Abril de 2008

Derechos reservados ©

PRESENTACIÓN

Para asegurar la uniformidad y validez técnica de la expresión de la trazabilidad de las mediciones y de la estimación de la incertidumbre de las mismas, la entidad mexicana de acreditación, a. c., solicitó al Centro Nacional de Metrología la revisión y elaboración de Guías Técnicas sobre Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones.

Los Subcomités de evaluación de Laboratorios Acreditados de Calibración y de Ensayo de la entidad mexicana de acreditación se incorporaron a este proyecto transmitiendo sus conocimientos y experiencias relacionados con la trazabilidad e incertidumbre de sus mediciones.

El Centro Nacional de Metrología coordinó la elaboración de las Guías, proponiendo criterios técnicamente sustentados, procurando que las opiniones de los Subcomités fueran apropiadamente consideradas y asegurando la coherencia de las mismas con otros documentos técnicos de referencia.

Las Guías Técnicas de Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones observan lo establecido en documentos de referencia conocidos ampliamente en la comunidad internacional, en los cuales se fundamentan las políticas de Trazabilidad e Incertidumbre de la entidad mexicana de acreditación.

Las Guías aportan criterios técnicos que sirven de apoyo a la aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006. La coherencia de las Guías con esta norma y con otros documentos de referencia, contribuye a asegurar la confiabilidad y uniformidad de las mediciones que realizan los laboratorios acreditados.

Abril de 2008.

Dr. Héctor O. Nava Jaimes

María Isabel López Martínez

Director General
Centro Nacional de Metrología

Directora Ejecutiva
entidad mexicana de acreditación, a. c.

AGRADECIMIENTOS

La entidad mexicana de acreditación expresa su reconocimiento al Fondo de Apoyo para la Micro, Pequeña y Mediana Empresa (FONDO PYME), auspiciado por la Secretaría de Economía, por haber proporcionado los recursos financieros para la elaboración de este documento, mediante el proyecto aprobado con folio FP2007-1605 de nombre “Elaboración de guías técnicas sobre trazabilidad e incertidumbre para la medición que permitan el fortalecimiento del Sistema Nacional de Acreditación de Laboratorios de Ensayo y Calibración” y por este medio hace patente su sincero reconocimiento y agradecimiento a la Secretaría de Economía, a la Subsecretaría para la Pequeña y Mediana Empresa, a la Dirección General de Desarrollo Empresarial y Oportunidades de Negocio, y a los profesionales que aportaron su tiempo y conocimiento en su desarrollo, destacando a los responsables de la elaboración:

GRUPO DE TRABAJO

Grupo de Trabajo que participó en la elaboración de esta Guía:

ALTAMIRANO CONTRERAS, Alejandro, SICA-Medición, S.A. de C.V.
DE LA VEGA NÚÑEZ, Jaime Alejandro, Flujo Comítl, S.A. de C.V.
ESCALANTE ESTRELLA, Javier Enrique, CICY, A.C.
LARA MANRÍQUEZ, José, CENAM (†)
LOZA GUERRERO, Dario Alejandro, CENAM
MACÍAS BECEIRO, Gustavo Alejandro, CIDESI, A.C.
PEREZ FLORES, José Carmen, Fujisan, Survey, S.A. DE C.V.
SOTELO CATALÁN, Juan Carlos, Emerson Process Management, S.A de C.V.

Grupo de Trabajo que participó en la revisión de esta Guía:

ALTAMIRANO CONTRERAS, Alejandro, SICA-Medición, S.A. de C.V.
CANALEJO CABRERA, Pablo, IBSEI, S.A. DE C.V.
DE LA VEGA NÚÑEZ, Jaime Alejandro, Flujo Comítl, S.A. de C.V.
LOZA GUERRERO, Dario Alejandro, CENAM
MACÍAS BECEIRO, Gustavo Alejandro, CIDESI, A.C.
NAJERA MARTELL, Guillermo, CIATEQ, A.C.
SEVILLA GARCIA, José Ángel, SIMCA, S.A de C.V.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
GRUPO DE TRABAJO	3
ÍNDICE.....	4
1. PROPÓSITO	5
2. ALCANCE DE LA GUÍA TÉCNICA	5
3. MENSURANDO.....	6
4. MÉTODO Y SISTEMA DE MEDICIÓN.....	7
5. CONFIRMACIÓN METROLÓGICA Y CALIFICACIÓN DE EQUIPOS.....	18
6. TRAZABILIDAD	18
7. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN.....	22
8. MODELOS MATEMÁTICOS E HIPÓTESIS NECESARIAS PARA SU VALIDEZ.....	23
9. VALIDACIÓN DE MÉTODOS	41
10. BUENAS PRÁCTICAS DE MEDICIÓN.....	42
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
12. ANEXOS.....	44

1. PROPÓSITO

El propósito de esta Guía Técnica es establecer los criterios y requisitos en la calibración de medidores de flujo de líquidos empleando como referencia un patrón volumétrico para lograr mediciones con incertidumbre y trazabilidad confiables.

Estos criterios serán aplicados

- a) por los evaluadores de laboratorios de calibración en el proceso de la acreditación;
- b) por los laboratorios en preparación para ser acreditados; o
- c) por los interesados en iniciar un laboratorio de calibración.

La Guía Técnica está destinada a complementar y dar detalles sobre la forma de cumplir los requisitos de trazabilidad e incertidumbre de las mediciones establecidas en la NMX-EC-17025-2006 [2]. En ningún caso debe interpretarse el contenido de esta Guía Técnica como sustituto de los requisitos mencionados.

En todos los casos, se mantiene la consideración de que el proceso de evaluación no debe convertirse en un servicio de asesoría y que como tal el evaluado tiene la responsabilidad de mostrar al evaluador que cumple las condiciones para brindar sistemáticamente servicios de calibración técnicamente válidos.

Es posible que haya situaciones en las cuales no sea posible o no sea razonable aplicar de manera estricta los criterios establecidos en la Guía Técnica, en cuyo caso deberá discutirse el asunto en el cuerpo colegiado competente, como el comité de evaluación o el subcomité de evaluación, con la participación de los autores de la Guía Técnica y del CENAM.

2. ALCANCE DE LA GUÍA TÉCNICA

Esta guía técnica describe el método volumétrico para determinar el factor del medidor (FM) o el factor K de un medidor de flujo volumétrico para líquidos, utilizando como referencia un patrón volumétrico.

Factor del medidor, FM : es el factor adimensional por el cual debe multiplicarse la respuesta del medidor para obtener la mejor estimación del mensurando.

Factor K , KF : es la señal de salida de un medidor de flujo, expresada en número de pulsos por unidad de volumen.

Esta técnica contempla el empleo de medidas volumétricas, probadores de desplazamiento positivo tipo bidireccionales, probadores de desplazamiento positivo compactos y medidores de flujo de referencia, utilizados como patrones en la calibración de medidores de flujo de líquidos.

El método es aplicable a fluidos en fase líquida, con excepción de líquidos criogénicos y gas natural licuado, cuando la variación de temperatura del líquido durante una prueba no excede de 2 °C.

3. MENSURANDO

El factor del medidor (*FM*) determinado a condiciones estándar (20 °C y 101 325 Pa). En algunos casos el mensurando puede ser el factor *K* (*KF*) del medidor bajo prueba.

Nota: Las condiciones estándar del factor del medidor pueden variar a solicitud del usuario.

Tabla de alcances de medición e incertidumbres de medición típicas

Magnitud Flujo Volumétrico	Alcance de medición	Característica del instrumento bajo calibración	Contribución del laboratorio a la incertidumbre de medición	Mejor capacidad de medición expresada como una incertidumbre
Servicio				
Calibración de medidores de flujo de líquidos empleando como patrón de referencia una medida volumétrica.	hasta 3 300 L/min	0,1 L (resolución)	± 0,02 % del Factor del medidor o del factor <i>K</i>	± 0,04 % del factor del medidor o del factor <i>K</i>
Calibración de medidores de flujo de líquidos empleando un patrón de referencia un probador de desplazamiento positivo.	desde 0,04 L/min hasta 40 000 L/min (Depende del probador a emplear)	0,1 L (resolución)	± 0,03 % del Factor del medidor o del factor <i>K</i>	± 0,06 % del factor del medidor o del factor <i>K</i>
Calibración de medidores de flujo de líquidos empleando como medidor de referencia un medidor de flujo.	desde 0,04 L/min hasta 22 000 L/min	0,1 L (resolución)	± 0,06 % del Factor del medidor o del factor <i>K</i>	± 0,1 % del factor del medidor o del factor <i>K</i>

Notas:

- Las incertidumbres de medición mostradas en la tabla son típicas de un laboratorio de calibración y no necesariamente aplican para todos los laboratorios. En todo caso, el laboratorio deberá demostrar durante el proceso de evaluación su capacidad para alcanzar las incertidumbres de medición que manifieste.
- Las incertidumbres expresadas en la tabla deben reflejar la mejor capacidad de medición del laboratorio.
- La incertidumbre expandida U_T del factor *K* y del factor del medidor *MF* en la tabla anterior se deben expresar de acuerdo a lo siguiente:
 - con un factor de cobertura $k = 2$ que corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95 %.

b) con un factor de cobertura k basado en la distribución t para ν_{ef} grados efectivos de libertad que corresponden aproximadamente a un nivel de confianza $p = 95 \%$.

4. MÉTODO Y SISTEMA DE MEDICIÓN

Se entiende que el resultado de una medición y la expresión de su incertidumbre, depende de diversos elementos y es afectada por diferentes factores de influencia que limitan la operación del sistema de medición bajo prueba, entre otros de:

Elementos del sistema de medición

- Elemento primario (sensor de flujo)
- Elemento secundario (transmisor de flujo)
- Circuito hidráulico
- Dispositivo de eliminación de gases
- Filtro
- Elemento de impulsión de flujo
- Dispositivos de regulación de flujo
- Dispositivos auxiliares

Los límites de aplicación del sistema de medición por calibrar están en función de las siguientes **características de operación**:

- Alcance de medición
- Intervalo de operación
- La presión mínima y la presión máxima de trabajo
- Temperatura mínima y temperatura máxima de trabajo
- Los niveles de seguridad requeridos

La medición de flujo es compleja debido a que es afectada por los siguientes factores:

- Temperatura
- Presión
- Densidad
- Viscosidad
- Estabilidad de flujo
- Condiciones de instalación del sistema de medición
- Distorsión y vórtices en el perfil de velocidades
- El método de medición que se utiliza para llevar a cabo la calibración
- La competencia técnica del personal que realice las pruebas de calibración.

4.1 Método de medición

Método de comparación volumétrica

El método de comparación volumétrica, consiste en la comparación del volumen indicado en un patrón volumétrico contra el volumen indicado en el medidor; expresados a condiciones estándar.

Por el impacto en la incertidumbre de la medición debe considerarse la limpieza, la nivelación, resolución del instrumento, integridad de la señal de pulsos, condiciones de instalación, además de la temperatura y presión del líquido en la línea a las condiciones de la medición.

4.2 Documentos de consulta

- Procedimientos desarrollados por el laboratorio.
- Certificados e informes de calibración de los patrones a utilizar.
- **Normas** relacionadas al método de calibración empleado – El laboratorio debe observar las normas que especifiquen el método de calibración empleado, la lista que aparece aquí no es exhaustiva ni requisito para los laboratorios secundarios acreditados.

ISO 91-2

Tablas de medición de petróleo

Parte 2: Tablas basadas en temperatura de referencia a 20 °C.

Primera edición, 1991-11-15

ISO 4269

Petróleo y productos del petróleo líquidos

Calibración de tanques por medición líquida, método de incrementos utilizando un medidor volumétrico.

Primera edición, 2001-03-15

ISO 9200

Petróleo y productos del petróleo líquidos

Medición volumétrica de hidrocarburos viscosos.

Primera edición, 1993-07-01

ISO 7278

Petróleo y productos del petróleo líquidos

Medición dinámica. Sistemas de probadores para medidores volumétricos.

Primera edición, 1987-03-15

ISO 4267

Petróleo y productos del petróleo líquidos

Cálculo de cantidades.

Primera edición, 1988-12-01

ISO 2714

Medición volumétrica-Hidrocarburos líquidos.

Sistemas de medición por desplazamiento y bombas de despacho.

Primera edición, 1980-10-15

ISO 2715

Medición volumétrica-Hidrocarburos líquidos.

Sistemas de medición por turbina.

Primera edición, 1981-08-15

ISO 4124

Hidrocarburos líquidos- Medición dinámica.

Control estadístico en sistemas de medición volumétrica.

Primera edición, 1994-12-15

OIML R 117

Recomendación internacional.

Sistemas de medición para líquidos diferentes al agua.

Primera edición, 1995

OIML R 120

Standard capacity measures for testing measuring systems for liquid others than water.

Edition 1996

API MPMS

Manuel de normas para la medición del petróleo.

Capítulo. 4.- Probadores

Capítulo. 5.- Medidores

Capítulo. 7.- Determinación de temperatura.

Capítulo. 9.- Densidad.

Capítulo. 11.- Propiedades físicas (Factores de corrección).

Capítulo. 12.- Calculo de cantidades del petróleo.

Capítulo. 13.- Control estadístico.

NOM-012-SCFI – 1994 -Medición de flujo de agua en conductos cerrados de sistemas hidráulicos-Medidores para agua potable fría-Especificaciones.

- Manuales del fabricante del medidor.
- Publicaciones Técnicas:
M. Tanaka, G. Girard, R. Davis, A. Peuto and N. Bignell- Recommended table for the density of water between 0°C and 40 °C based on recent experimental reports – Metrologia - 2001.

Nota: Esta publicación técnica permite efectuar correcciones por *CTL* y *CPL* cuando se utilice agua como líquido de prueba.

4.3 Procedimientos de medición

4.3.1 Procedimiento general para la calibración de medidores de flujo empleando una medida volumétrica.

I Instrumentos y equipo

- Medida volumétrica cuya capacidad debe ser igual o mayor al volumen colectado al flujo máximo del medidor en un minuto,
- Sensores de temperatura instalados en la medida volumétrica y en la línea, lo más cercano al medidor de flujo con división de la escala de 0,1 °C o mejor.

Incertidumbre en la medición de temperatura $\pm 0,2$ °C o mejor. En mediciones de hidrocarburos se recomienda una incertidumbre en la medición de temperatura de $\pm 0,05$ °C. Referencia [7].

- Sensor de presión. Incertidumbre en la medición de $\pm 0,05$ MPa o mejor. En algunas mediciones de hidrocarburos recomiendan una incertidumbre de $\pm 0,025$ MPa o mejor Referencia [7].
- Cronómetro con división de la escala de centésimas de segundo.

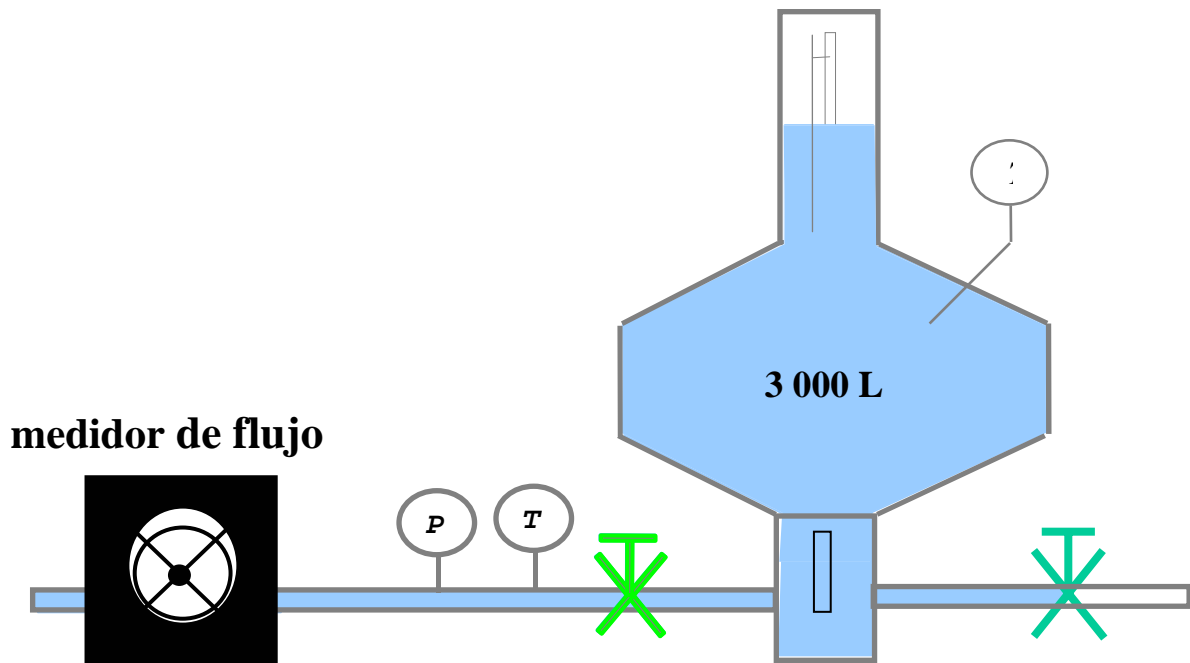


Figura 1. Esquema general de la instalación de un medidor de flujo de líquidos cuando se emplea para su calibración una medida volumétrica.

II. Requerimientos

- El medidor de flujo debe ser calibrado con el líquido o líquidos a emplear.
- El medidor de flujo debe ser instalado de acuerdo a las instrucciones del fabricante.
- No debe existir vibración o pulsaciones que puedan afectar el comportamiento del medidor de flujo.
- Deben seleccionarse entre 2 y 5 valores de flujo dentro del alcance de operación del medidor.

III Actividades preliminares

- Nivelar la medida volumétrica.
- Realizar corridas de ambientación con el objeto de estabilizar las condiciones de prueba tanto del medidor de flujo como de la medida volumétrica a emplear.

-
- Verificar la instalación por fugas.

IV Procedimiento de calibración (descripción general)

1. Fijar el flujo de prueba mediante la operación de la válvula instalada a la salida del medidor de flujo.
2. Determinar el flujo empleando el indicador del medidor y/o un cronómetro durante la prueba.
3. Cerrar la válvula de drenado de la medida volumétrica con el objeto de llenarlo.
4. Cuando la medida volumétrica se ha llenado hasta un punto de la escala preestablecido, de preferencia el cero, cerrar la válvula de llenado del patrón.
5. Abrir la válvula de salida de la medida volumétrica para vaciarla.
6. Cuando el nivel de líquido aparece en la mirilla del cuello inferior de la medida volumétrica, se debe cerrar la válvula de drenado y abrir la válvula de ajuste del cero dando un tiempo de escurrimiento de 30 segundos antes de cerrar la válvula de ajuste del cero.
7. Verificar que el indicador del medidor marque cero y/o efectué la lectura inicial del medidor,
8. Iniciar las corridas al flujo predeterminado, abriendo la válvula de llenado de la medida volumétrica.
9. Mientras se colecta el volumen en la medida volumétrica efectuar y registrar la lectura de temperatura y de la presión de la línea, así como el flujo indicado,
10. Cuando aparezca el líquido en el cuello superior dejar que se acerque al volumen nominal y cerrar la válvula de llenado de la medida volumétrica.
11. Registrar la lectura del medidor.
12. Registrar la lectura de la escala de la medida volumétrica.
13. Registrar la temperatura de la medida volumétrica.
14. Repetir los puntos del 5 al 13, al menos tres veces para cada flujo.
15. Calcular el valor del mensurando y su incertidumbre con los datos obtenidos.

4.3.2 Procedimiento general para la calibración de medidores de flujo con señal de salida digital empleando como referencia un probador bidireccional de desplazamiento positivo.

I Instrumentos y equipo

- Probador bidireccional con volumen certificado a condiciones de referencia.
- Sensores de temperatura, tanto en el probador como en el medidor a calibrar. Incertidumbre en la medición de temperatura $\pm 0,2$ °C o mejor.
- En mediciones de hidrocarburos se recomienda una incertidumbre de medición de temperatura $\pm 0,05$ °C. Referencia [7].
- Sensores de presión, tanto en el probador como en el medidor en calibración. Incertidumbre en la medición de presión $\pm 0,05$ MPa o mejor. En mediciones de hidrocarburos se recomienda una incertidumbre de $\pm 0,025$ MPa o mejor.

Accesorios

- Tornillos y juntas para instalar el probador en la línea.
- Línea de alimentación eléctrica
- Mangueras flexibles o tubería acoplada
- Cable para la toma de la señal de pulsos
- Computadora con programa de aplicación para el probador o instrumentos para colección y despliegue de temperatura, pulsos, presión y señal eléctrica.

II. Requerimientos

- El medidor de flujo debe ser calibrado con el líquido o líquidos con los que opera normalmente el sistema de medición.
- No debe existir vibración o pulsaciones en la tubería que puedan afectar el comportamiento del medidor de flujo.
- Flujos de prueba. El número de flujos seleccionados puede estar entre 2 y 5 flujos diferentes en el alcance del medidor.

III Actividades preliminares

- Instalar el probador aguas abajo del medidor a calibrar de acuerdo a la figura 2.
- Conectar la computadora o instrumentos al probador.
- Conectar la señal de pulsos del medidor a la computadora o contador.
- Verificar que la señal del sistema de medición a la computadora u osciloscopio.

IV Procedimiento de Calibración

1. Fijar el flujo de prueba a través de la operación de la válvula instalada a la salida del probador.
2. Definir los flujos a los cuales será calibrado el medidor.
3. Definir el número de corridas del probador.
4. Ambientar y eliminar aire del probador.
5. Iniciar la prueba (cambio de posición de la válvula de 4 vías).
6. Tomar los datos de temperatura presión y pulsos del medidor.
7. Calcular el mensurando e incertidumbre con los datos obtenidos.

El MPMS del API capítulo 4 sección 2 indica que en tres o más mediciones consecutivas, la desviación del factor del medidor o factor K debe ser menor o igual al $\pm 0,05$ % del factor promedio. En caso de calibración de un medidor de referencia la repetibilidad cuantificada como desviación estándar no debe exceder 0,02 %.

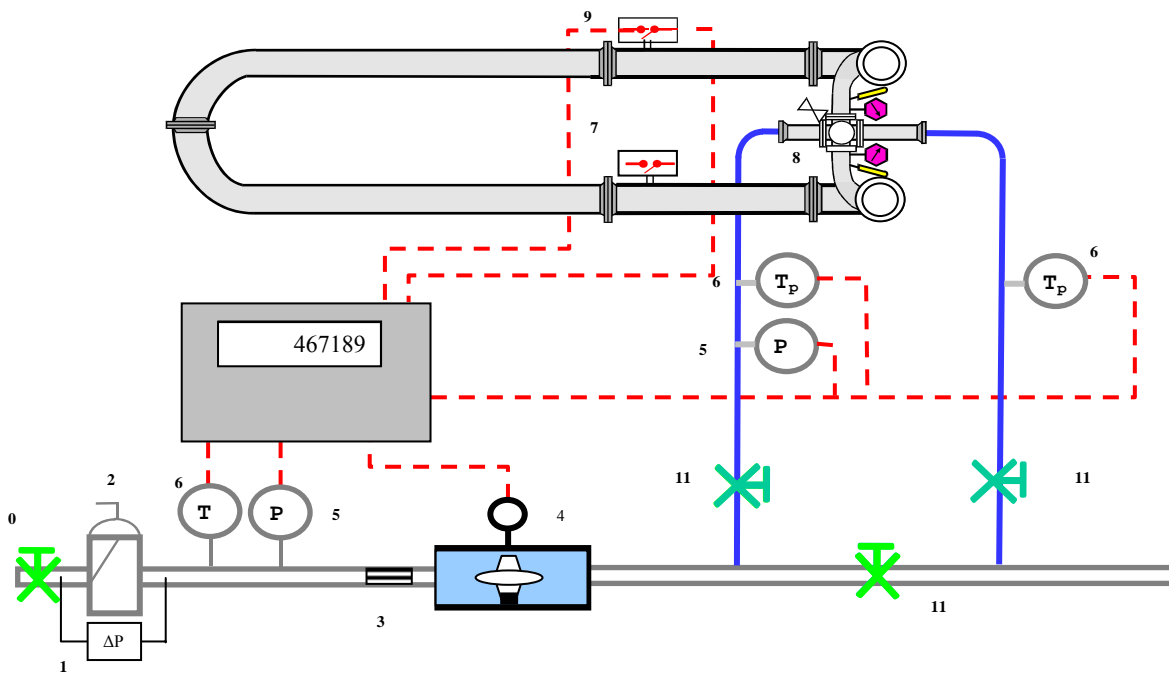


Figura 2. Instalación del probador bidireccional.

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 0. Válvula reguladora | 7. Disparo número 1 |
| 1. Indicador de presión diferencial | 8. Válvula de 4 vías |
| 2. Sistema de filtrado | 9. Disparo número 2 |
| 3. Sistema acondicionador de flujo | 10. Válvula reguladora de flujo |
| 4. Medidor turbina | 11. Válvula de bloqueo |
| 5. Indicador de presión | 12. Probador bidireccional |
| 6. Indicador de temperatura | |

4.3.3 Procedimiento general para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un probador compacto de desplazamiento positivo.

I Instrumentos y equipo

- Probador compacto con volumen a condiciones de referencia certificado.
- Sensores de temperatura, tanto en el probador como en el medidor a calibrar. Incertidumbre en la medición de temperatura $\pm 0,2$ °C o mejor. En algunas mediciones de hidrocarburos recomiendan una incertidumbre de $\pm 0,05$ °C. Referencia [7].
- Sensores de presión, tanto en el probador como en el medidor en calibración. Incertidumbre en la medición de $\pm 0,05$ MPa o mejor. En algunas mediciones de hidrocarburos recomiendan una incertidumbre de $\pm 0,025$ MPa o mejor.

Accesorios

- Tornillos para bridas ANSI 150, o bien para bridas ANSI 300.
- Juntas de neopreno.

-
- Aire o nitrógeno comprimido
 - Nivel de gota
 - Línea eléctrica.
 - Mangueras de alta presión.
 - Carretes de adaptación a la línea de calibración.
 - Cable para toma de señal de pulsos del medidor.
 - Computadora con programa de aplicación para el probador o instrumentos para colección y despliegue de temperatura, pulsos, presión y señal eléctrica.

II. Requerimientos

- El medidor de flujo debe de ser calibrado con el líquido o líquidos empleados normalmente por el sistema de medición.
- No debe existir vibración o pulsaciones que puedan afectar el comportamiento del medidor de flujo.
- Flujos de prueba. El número de valores seleccionados puede estar entre 2 y 5 diferentes en el alcance del medidor.

III Actividades preliminares

- Instalar el probador compacto aguas abajo del medidor de flujo, tal como se muestra en la figura 3.
- Asegurar que todas las válvulas de drenado y de venteo se hallen bien cerradas.
- Abrir sólo ligeramente la válvula de entrada del probador para llenar de fluido tanto el probador compacto como las mangueras de conexión.
- Abrir lentamente las válvulas de venteo para eliminar por completo el aire localizado en el interior del probador y de las mangueras.
- Asegurar la inexistencia de fugas en todos los puntos del sistema.
- Abrir completamente la válvula de entrada del probador. **ESTA OPERACIÓN DEBE REALIZARSE LENTAMENTE** para revisar fugas y expulsar el aire contenido.
- Abrir lentamente la válvula de salida del probador.
- Cerrar lentamente la válvula de bloqueo (si existe), situada entre las válvulas de entrada y salida del probador.
- (Si existe en la instalación), Asegurar que el sello de la válvula de bloqueo funciona de manera apropiada. Esto puede lograrse observando la válvula de testigo instalada en el cuerpo de la válvula.
- Realizar la conexión eléctrica entre el probador compacto y la computadora de flujo.
- Conectar eléctricamente la señal de salida del amplificador de la turbina a la computadora de flujo.

-
- Suministrar la energía eléctrica a la computadora de flujo.
 - Encender la computadora.
 - Accionar la bomba del sistema hidráulico.
 - Verificar que la señal pulsante del medidor a calibrar sea recibida en la computadora de flujo.
 - Conectar, si se tiene la posibilidad, las señales de temperatura y presión de los transductores respectivos a la computadora de flujo.
 - Verificar que las señales de temperatura y presión estén presentes en la computadora de flujo.
 - Permitir que el pistón del probador se desplace al menos 10 veces para verificar la presencia de fugas y la presencia de aire en el interior del probador.
 - Esperar un tiempo de al menos 30 minutos para alcanzar un equilibrio térmico entre el probador compacto y la turbina (realice en este tiempo lanzamientos del pistón para que el vástago del pistón también alcance el equilibrio térmico).

IV Procedimiento de Calibración

1. Registrar en el formato los datos de identificación del medidor y de la instrumentación involucrada en la práctica de calibración.
2. Determinar los flujos a los cuales el medidor será calibrado. Para calibraciones iniciales, es muy recomendable elegir al menos 5 valores de flujo dentro del alcance de medición de la turbina.
3. Registrar las condiciones ambientales al inicio de la sesión de calibración.
4. Introducir como parámetro de operación del probador compacto un tiempo de espera de 30 segundos entre la finalización del viaje del pistón y el inicio de un viaje posterior (tiempo entre pasadas).
5. Ordenar desde la computadora de flujo la realización de una serie de 5 corridas de comparación entre el probador compacto y la turbina. Si el valor de alguna de las propiedades termodinámicas del fluido no es adquirida en la computadora de flujo entonces es necesario registrarlas manualmente en un formato.
6. Ordenar nuevamente la ejecución de 5 corridas de comparación hasta completar un total de al menos 30 corridas de comparación (completar 30 viajes de ida y vuelta del pistón) entre el probador compacto y la turbina bajo calibración.
7. Obtener del computador de flujo los informes de cada una de las comparaciones individuales.
8. Obtener para cada corrida individual el valor del factor de corrección para el medidor MF , o bien el valor de la constante de calibración factor K . Determinar el factor de calibración o en su caso el factor K del medidor.
9. Evaluar la repetibilidad de cada grupo de corridas, todos los datos deben agruparse alrededor de la media con una desviación estándar máxima de $\pm 0,025$ %. De igual

forma, los 6 valores promedio de cada uno de los grupos de corridas deben manifestar una dispersión máxima de $\pm 0,025$ % alrededor de la media. Si la dispersión de los datos obtenidos excede los límites establecidos, entonces la prueba debe detenerse y se debe iniciar la búsqueda y solución del problema.

10. Repetir desde el paso 3 hasta el paso 10 para cada uno de los valores de flujos definidos.

El MPMS del API capítulo 4 sección 2 indica que en tres o más mediciones consecutivas, la desviación del factor del medidor o factor K debe ser menor o igual al $\pm 0,05$ % del factor promedio. En caso de calibración de un medidor de referencia la repetibilidad no debe exceder $0,02$ %.

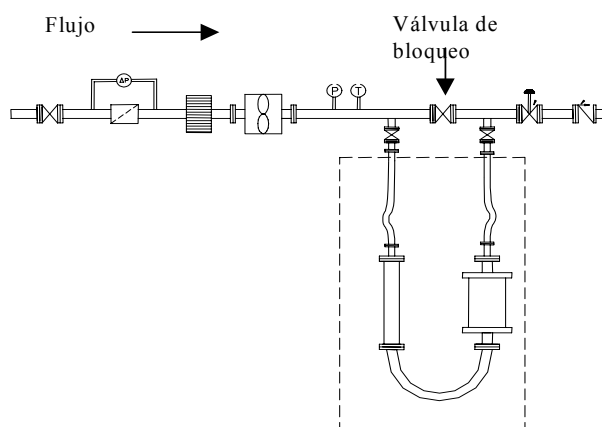


Figura 3. Instalación típica del probador compacto.

4.3.4 Procedimiento general para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un medidor de flujo.

I Instrumentos y equipo

- Medidor de flujo de referencia cuya capacidad debe ser igual o mayor al medidor bajo calibración.
- Sensores de temperatura en el patrón y en el medidor, lo más cercanos a los medidores de flujo. Incertidumbre en la medición de temperatura $\pm 0,2$ °C o mejor. En algunas mediciones de hidrocarburos se recomiendan una incertidumbre de $\pm 0,05$ °C. Referencia [7].
- Sensores de presión en cada uno de los medidores. Incertidumbre en la medición de $\pm 0,05$ MPa o mejor. En algunas mediciones de hidrocarburos recomiendan una incertidumbre de $\pm 0,025$ MPa o mejor.
- Cronómetro

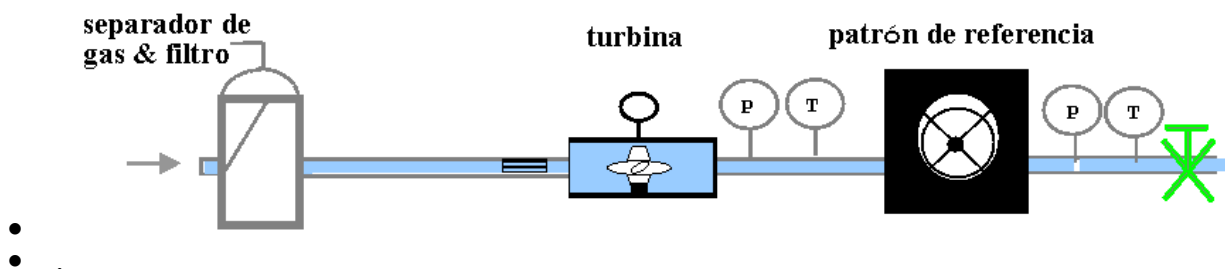


Figura 4. Arreglo de la instalación medidor bajo prueba y del patrón de referencia.

II. Requerimientos

- El medidor de flujo a calibrar debe de ser calibrado con el líquido o líquidos con los que opera normalmente el sistema de medición.
- El medidor de referencia debe estar calibrado con el fluido correspondiente.
- El medidor de flujo debe ser instalado de acuerdo a las instrucciones del fabricante.
- No debe existir vibración o pulsaciones que puedan afectar el comportamiento del medidor de flujo.
- Flujos de prueba. El número de valores seleccionados puede estar entre 2 y 5 diferentes en el alcance del medidor.

III. Actividades preliminares

- Corrida de ambientación con el objeto de estabilizar las condiciones.
- Verificar la instalación por fugas.

IV. Procedimiento de Calibración

1. Fijar el flujo de prueba a través de la operación de la válvula instalada a la entrada del medidor bajo calibración.
2. Determinar el flujo mediante el empleo del indicador del medidor y/o un cronómetro durante la prueba.
3. Iniciar las corridas al flujo predeterminado, abriendo la válvula a la salida del medidor de referencia.
4. Medir el tiempo de la prueba para obtener el flujo de la prueba.
5. Cuando en el medidor de referencia ha pasado el volumen establecido (tiempo mínimo de la prueba 1,5 s), cerrar la válvula del medidor de referencia.
6. Durante el tiempo de la prueba registrar la temperatura y la presión del fluido en ambos medidores.
7. Registrar la lectura de volumen en ambos medidores.
8. Repetir los pasos del 3 al 7 al menos cinco veces para cada flujo.
9. Calcular el resultado de la medición (mensurando) e incertidumbre con los datos obtenidos.

4.4 Competencia del personal

- El personal encargado de realizar las calibraciones deberá contar por lo menos con un nivel académico técnico, además de tener conocimientos en:
- Metrología básica. La convención del metro, conceptos de calidad, conceptos de metrología e introducción a la estimación de incertidumbres.
- Vocabulario metrológico. Comprensión de la norma NMX-Z-055.
- Sistema Internacional de unidades. Magnitudes fundamentales y magnitudes derivadas, conocimiento de la definición de las magnitudes involucradas en los procesos de calibración.
- Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Comprensión del Título Segundo – Metrología y del Título Cuarto – De la acreditación y la determinación del cumplimiento.
- Metrología de flujo y volumen. Definición de fluido, propiedades de los fluidos, flujo laminar y flujo turbulento, perfil de velocidades, acondicionadores de flujo, ecuación de Bernoulli y ecuación de continuidad, fenómenos de cavitación y golpe de ariete.
- Estimación de incertidumbres. Conocer la metodología de la GUM, conceptos de incertidumbre, incertidumbre estándar, incertidumbre estándar combinada, incertidumbre expandida, nivel de confianza, factor de cobertura, resolución, desviación estándar experimental de una muestra, cuantificación incertidumbre tipo A, cuantificación incertidumbre tipo B, grados de libertad, grados efectivos de libertad.
- Debe contar con experiencia de al menos haber ejecutado 10 calibraciones por lo menos y haber fungido como responsable de tres pruebas de calibración bajo supervisión.
- Debe demostrar su habilidad y conocimiento en la ejecución de las calibraciones durante la evaluación del laboratorio de calibración.

5. CONFIRMACIÓN METROLÓGICA Y CALIFICACIÓN DE EQUIPOS

Este apartado está ligado a los equipos de medición, no aplica cuando se especifican las características metrológicas de cada uno, de otra manera debería considerarse la confirmación metrológica.

6. TRAZABILIDAD

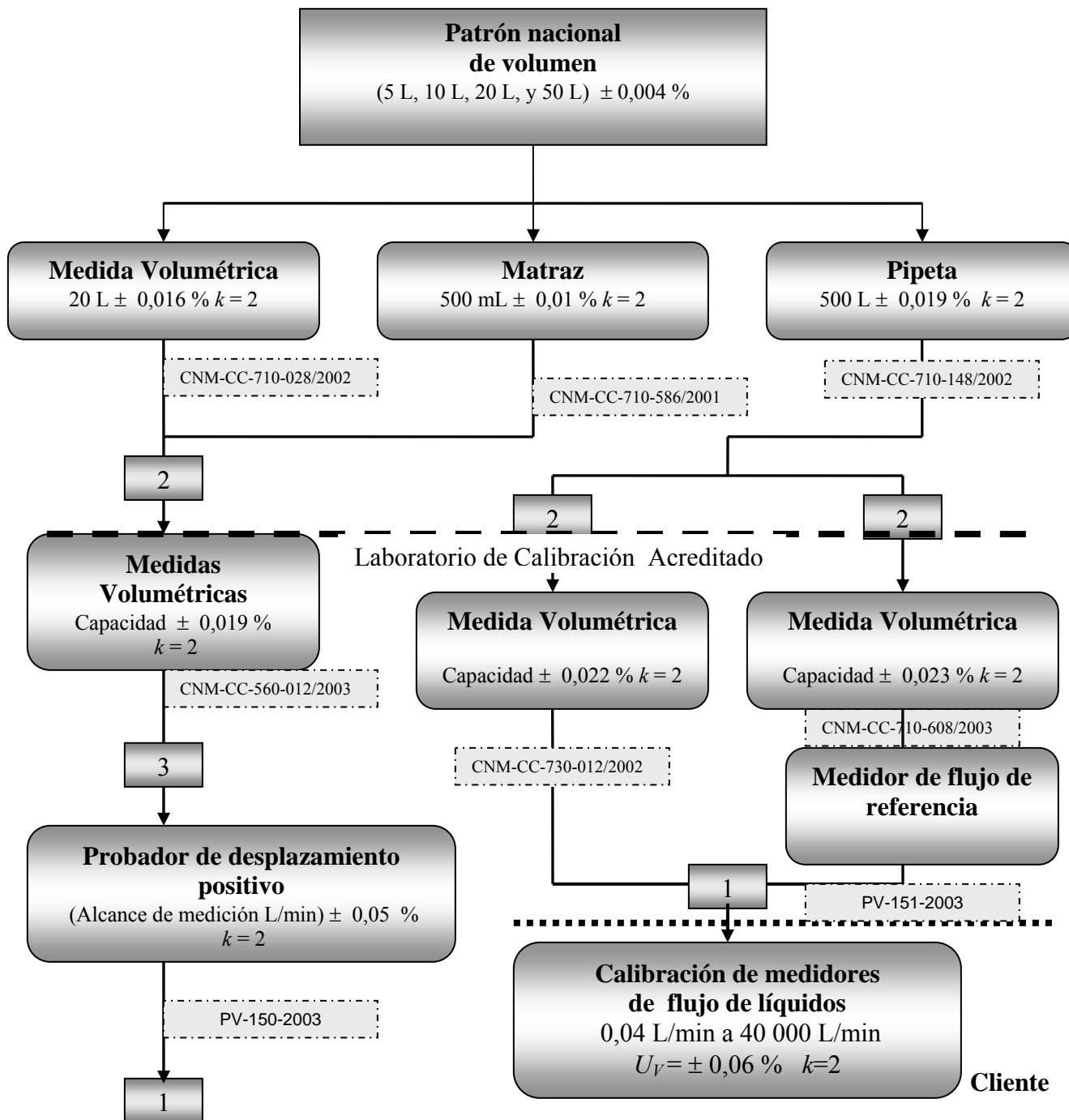
Los criterios relativos a la trazabilidad de los resultados de las mediciones deben atender los elementos siguientes:

- a. resultado de medición cuya trazabilidad se desea mostrar;
- b. referencias determinadas, preferentemente los patrones nacionales de volumen;

-
- c. cadena de comparaciones, es decir conjunto de calibraciones o comparación con el material de referencia certificado, que conecta las referencias determinadas con el resultado de la medición;
 - d. incertidumbre de las mediciones, en cada eslabón preferentemente;
 - e. referencia al procedimiento de calibración, en cada eslabón preferentemente;
 - f. referencia al organismo responsable de la calibración en cada eslabón.

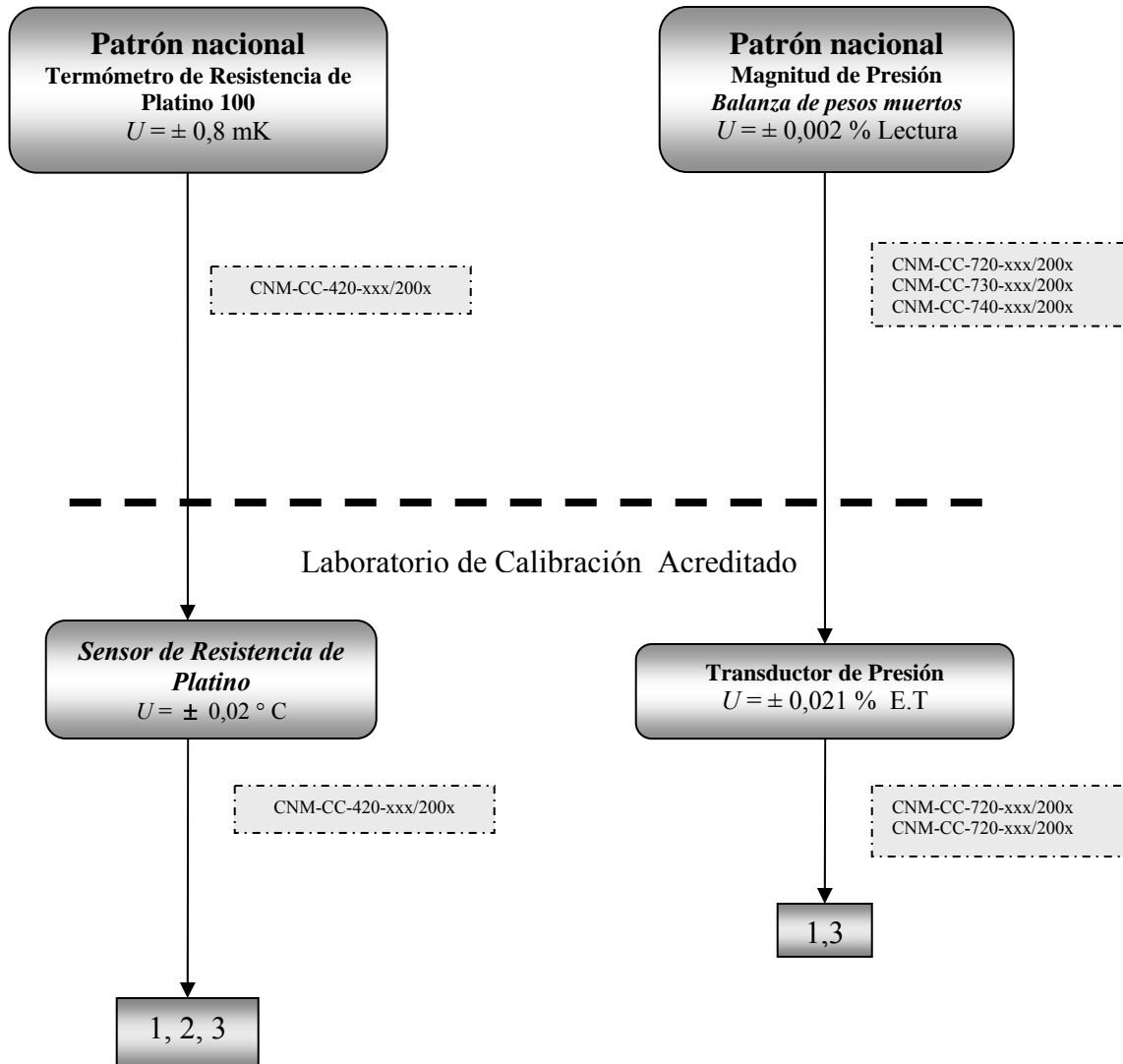
Carta de trazabilidad (ejemplo)

Las cartas de trazabilidad que se presentan a continuación sirven únicamente para guiar la construcción de las mismas y se presentan a manera de ejemplo. Es necesario destacar que deben presentarse para cada magnitud relacionada con la definición del mensurando.



El factor de cobertura k es un factor numérico usado para expandir la incertidumbre estándar combinada u_C con el propósito de obtener la incertidumbre expandida U .

NOTA: La información actualizada sobre los patrones nacionales se encuentra en la página web del CENAM (www.cenam.mx).



Debe hacerse alusión a los periodos de recalibración basados en cartas de control donde se pueda observar un análisis estadístico del comportamiento del patrón con respecto al tiempo.

La frecuencia de calibración es responsabilidad del usuario del sistema de medición. Los periodos de calibración se establecen sobre la base de los requerimientos contractuales, al tipo de aplicación, a las condiciones de operación y a la experiencia sobre el historial del comportamiento del sistema de medición comentado en el párrafo anterior.

Se recomienda que el patrón de control, en todos los casos, sea una medida volumétrica y que existan métodos alternativos de verificación interna de los equipos, como comparación entre patrones.

Deben examinarse con todo detenimiento los elementos asociados a los eslabones dentro de la cadena de comparaciones dentro del laboratorio de calibración, al eslabón que da trazabilidad a los patrones de referencia del laboratorio y al eslabón que da trazabilidad a las medidas producidas por el laboratorio.

7. INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

Todo resultado de medición debe ser acompañado de una estimación de su incertidumbre.

La incertidumbre de un resultado de una medición es una combinación de lo siguiente:

- a) La incertidumbre de los patrones empleados durante la calibración de los medidores de flujo de líquidos.
- b) La incertidumbre de los instrumentos de presión, temperatura y densidad.
- c) La incertidumbre derivada de los modelos matemáticos que definen la determinación del mensurado.
- d) La repetibilidad de los sistemas de medición bajo las condiciones de operación.
- e) la reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos;
- f) características del propio instrumento, como resolución, histéresis, deriva, etc.;
- g) variaciones de las condiciones de operación de los medidores de flujo de líquidos;
- h) variaciones en las magnitudes de influencia.

Deben incluirse los siguientes elementos sobre incertidumbre de la medición:

- a) El modelo matemático de la medición, expresado mediante una ecuación acompañada de la nomenclatura correspondiente, y la mención explícita de las hipótesis necesarias para su validez.
- b) La lista y la descripción breve pero suficiente de las fuentes de incertidumbres significativas.
- c) La mención a fuentes de incertidumbre que típicamente no aportan contribuciones significativas, pero que se conviertan en significativas bajo condiciones que pudieran ocurrir probablemente en el transcurso de una medición.

Durante una prueba de calibración de un medidor de flujo empleando un patrón volumétrico, es posible determinar el valor de la constante **factor K** del medidor, o preferentemente, el **factor de corrección del medidor, MF** .

Hipótesis

- La masa de fluido entre el medidor bajo calibración y el patrón volumétrico permanece constante.
- El flujo ocurre en fase líquida.
- El flujo es estable, es decir con fluctuaciones de gasto pequeñas que no cambian el comportamiento del medidor durante su calibración a esas condiciones.
- La temperatura del fluido a través del patrón volumétrico es la misma que la temperatura del metal del patrón volumétrico.
- Es suficiente una aproximación lineal para estimar la deformación del patrón volumétrico por efectos de temperatura.
- La densidad del fluido en el patrón volumétrico se calcula como función de la temperatura y la presión.
- Las condiciones de operación del sistema de medición no son afectadas en el proceso de calibración.
- Durante el proceso de calibración no se presenta el fenómeno de cavitación provocada por altas velocidades instantáneas en zonas de baja presión absoluta.
- El sistema de medición no es afectado por su instalación física, y los efectos de vibración e instalación originados por el arreglo de tuberías y sus accesorios no provocan vórtices severos o distorsiones en el perfil de velocidades.

8. MODELOS MATEMÁTICOS E HIPÓTESIS NECESARIAS PARA SU VALIDEZ

Ecuación general utilizada en la calibración de medidores de flujo de líquidos empleando como referencia un patrón volumétrico.

Para el factor de corrección del medidor, MF .

$$MF = \frac{V_{P20} \cdot CTS_p \cdot CPS_p \cdot CTL_p \cdot CPL_p}{V_m \cdot CTS_m \cdot CPS_m \cdot CTL_m \cdot CPL_m} \quad [\text{adimensional}] \quad (1)$$

Donde:

V_{P20} - Volumen a condiciones estándar del patrón volumétrico [L].

V_m - Volumen determinado por el medidor bajo prueba a condiciones de operación [L].

El subíndice *p* se emplea para designar los factores de corrección del patrón de referencia empleado y el subíndice *m* para designar los factores de corrección del medidor bajo prueba

CTS - Factor de corrección por efecto de la temperatura en el acero del instrumento [adimensional]. Se usa cuando los instrumentos de medición son empleados a temperaturas diferentes a las cuales se encuentra referido su resultado de calibración.

Deformación lineal. Escalas lineales y bases de montaje

$$CTS = 1 + \alpha_l \cdot (T - T_{20}) \quad [\text{adimensional}] \quad (1.1)$$

Deformación en superficie. Cilindros

$$CTS = 1 + 2\alpha_l \cdot (T - T_{20}) \quad [\text{adimensional}] \quad (1.2)$$

Deformación cúbica. Medidas volumétricas, probadores, patrones de volumen

$$CTS = 1 + 3\alpha_l \cdot (T - T_{20}) \quad [\text{adimensional}] \quad (1.3)$$

α_l - Coeficiente de dilatación lineal del acero [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].

T_{20} - Temperatura de referencia [$^{\circ}\text{C}$].

T - Temperatura promedio del líquido dentro del instrumento [$^{\circ}\text{C}$].

CPS - Factor de corrección por efectos de la presión en el acero del instrumento [adimensional]. Se usa cuando los instrumentos de medición son empleados a presiones diferentes a las cuales se encuentra referido su resultado de calibración.

$$CPS = \frac{P \cdot D_i}{E \cdot t} \quad [\text{adimensional}] \quad (1.4)$$

P - Presión interna de operación (presión manométrica) [Pa].

D_i - Diámetro interno de la sección de prueba de un probador [m].

E - Módulo de elasticidad del material del probador [Pa].

t - Espesor de la pared de la sección de prueba del probador [m].

CTL - Factor de corrección por efecto de la temperatura en la densidad del líquido [adimensional].

$$CTL = \frac{\rho_T}{\rho_{20}} \quad [\text{adimensional}] \quad (1.5)$$

$$CTL = 1 + \beta \cdot (T - T_{20}) \quad [\text{adimensional}] \quad (1.6)$$

ρ_T - Densidad del fluido a la temperatura de prueba [kg/m^3]

ρ_{20} - Densidad del fluido a la temperatura de prueba [kg/m^3]

-
- β - Coeficiente volumétrico de expansión térmica del fluido [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
 T_{20} - Temperatura de referencia [$^{\circ}\text{C}$].
 T - Temperatura promedio del líquido dentro del instrumento [$^{\circ}\text{C}$].

Nota: refiérase al Anexo A de esta guía para los modelos matemáticos para la determinación de la densidad de hidrocarburos líquidos. El anexo B propone un modelo para determinar la densidad del agua.

CPL - Factor de corrección por efecto de la presión en la densidad del líquido [adimensional].

$$CPL = \frac{1}{1 - (P_a - P_e) \cdot F} \quad [\text{adimensional}] \quad (1.7)$$

- P_a - Presión del fluido a las condiciones de la prueba [Pa]
 P_e - Presión de vapor del fluido a la temperatura del fluido en la prueba [Pa]
 F - Factor de compresibilidad del líquido [Pa^{-1}]

Nota: refiérase al Anexo A de esta guía para los modelos matemáticos del factor de compresibilidad (F) de hidrocarburos líquidos. El anexo B propone un modelo para el CPL del agua.

Para el factor K del medidor:

$$\text{factor } K = \frac{N}{V_{P20} \cdot CTS_p \cdot CPS_p \cdot CTL_p \cdot CPL_p \cdot CTL_m \cdot CPL_m} \quad [\text{pulsos/L}] \quad (2)$$

Donde N es el número de pulsos del medidor bajo calibración totalizados durante el tiempo de prueba.

8.1 Modelo matemático para la calibración de medidores de flujo empleando una medida volumétrica.

$$MF = \frac{((V_{P20}(1+3\alpha_l(T-T_{20}))) + (L_{pi} \cdot k_p)) \cdot CTL_p}{(L_f - L_i) \cdot CTL_m} \quad [\text{adimensional}] \quad (3)$$

- L_{pi} - Lectura de la escala en el cuello de la medida volumétrica patrón, en el evento i [L]
 k_p - Factor de corrección de la escala del cuello en la medida volumétrica patrón [adimensional]
 L_i - Lectura inicial del medidor bajo calibración [L]
 L_f - Lectura final del medidor bajo calibración [L]

Hipótesis particulares para la validez del modelo matemático anterior.

- La presión del fluido entre el medidor bajo prueba y la medida volumétrica no es mayor a 100 000 Pa, por lo que no se toma en cuenta la corrección por efectos de la presión en el fluido. Si la diferencia de presiones es mayor deben efectuarse las correcciones por *CPL*.
- La densidad del fluido en la medida volumétrica se calcula como función de la temperatura, a la presión barométrica del lugar.

Listado y descripción de las fuentes de incertidumbre

- V_{P20} - Volumen a condiciones estándar del patrón [L].
- V_m - Volumen determinado por el medidor bajo prueba a condiciones de operación [L].
- 3α - Coeficiente cúbico de expansión térmica del material de fabricación de la medida volumétrica [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].
- T - Temperatura del fluido [$^{\circ}\text{C}$].
- ρ_m - Densidad del fluido a la temperatura de prueba en el medidor [kg/m^3]
- ρ_P - Densidad del fluido a la temperatura de de la medida volumétrica [kg/m^3]
- L_{pi} - Lectura del menisco en el cuello graduado de la medida volumétrica [L].
- s - Repetibilidad del MF del medidor bajo prueba [adimensional]

Volumen del patrón volumétrico, a condiciones de referencia, V_{20} :

Volumen certificado de calibración del patrón volumétrico, se le asigna una distribución normal.

La lectura del volumen del medidor ($L_f - L_i$), V_m :

Al volumen determinado por el medidor bajo prueba se le asigna una incertidumbre debida a la resolución del dispositivo registrador de lectura. Para estimar la incertidumbre estándar se asume una distribución de probabilidad del tipo uniforme. Así, si el instrumento posee una resolución de 0,1 L, entonces la incertidumbre estándar es igual a $0,1/\sqrt{12}$ ($\pm 0,029$ L).

La medición de temperatura, T :

Esta fuente de incertidumbre resulta de la combinación del gradiente del campo de temperaturas del líquido, se propone una distribución de probabilidad uniforme con una variación de temperatura de acuerdo a la prueba, la debida a la calibración del sistema de medición de temperatura a la cual se le asigna una distribución normal y la resolución del instrumento con una distribución de probabilidad uniforme.

Densidad del fluido, ρ :

La densidad se determina en función de la temperatura del fluido en el patrón volumétrico y el medidor bajo prueba.

Coefficiente de dilatación cúbica del acero inoxidable, α :

Depende del material de fabricación de la medida volumétrica (acero inoxidable tipo 304, 316 o acero al carbón) del cual se desconoce su composición química particular. En

este caso, se le asigna una distribución uniforme al valor del coeficiente de dilatación cúbica del material.

Lectura en el patrón volumétrico, L_p :

Además de la incertidumbre expresada en el certificado de calibración de la medida volumétrica, se considera una contribución al realizar la lectura en el cuello graduado de la medida volumétrica, se le atribuye una distribución de probabilidad rectangular con un intervalo de variación de acuerdo a la resolución de la escala del cuello de la medida volumétrica.

Repetibilidad del MF del medidor, s :

Incertidumbre tipo A de mediciones consecutivas a un gasto estable para el factor de corrección, MF, se le asigna una distribución de probabilidad normal.

Incertidumbre tipo A (u_A)

La incertidumbre de la magnitud de entrada X_i obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad y se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

$$u_A(X_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad [\text{adimensional}] \quad (3.1)$$

Incertidumbre estándar combinada (u_c)

De acuerdo con los modelos matemáticos y aplicando la metodología propuesta en la GUM [1], se estima la incertidumbre estándar combinada del factor de corrección del medidor, MF, a partir de la siguiente expresión:

$$u_c^2 = \sum_1^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u_{x_i}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial V_{P20}}\right)^2 u_{V_{P20}}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L_p}\right)^2 u_{L_p}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial V_m}\right)^2 u_{V_m}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)^2 u_T^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial T_m}\right)^2 u_{T_m}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right)^2 u_\alpha^2 + \frac{s^2}{n}$$

[adimensional] (3.2)

8.2 Modelo matemático para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un probador bidireccional.

Si el volumen que pasa a través del medidor bajo calibración se define como:

$$V_m = \frac{N}{\text{factor K}} \quad [L] \quad (4)$$

Donde N es el número de pulsos del medidor bajo calibración totalizados durante el tiempo de prueba, la ecuación general puede escribirse como:

$$MF = \frac{V_{P20} \cdot CTS_p \cdot CPS_p \cdot CTL_p \cdot CPL_p}{N \cdot CTL_m \cdot CPL_m} \cdot factor K \quad [\text{adimensional}] \quad (5)$$

Sustituyendo las definiciones, la ecuación queda así:

$$MF = \frac{V_{P20} \cdot (1 + \alpha_p (T_p - 20)) \left(1 + \frac{P_p D_i}{t \cdot E}\right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_{20}}\right) \left(\frac{1}{1 - P_p F_p}\right)}{N \left(\frac{\rho_m}{\rho_{20}}\right) \left(\frac{1}{1 - P_m F_m}\right)} \cdot factor K \quad [\text{adimensional}] \quad (5.1)$$

Donde α_p es el coeficiente cúbico de expansión térmica del acero del patrón [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Listado y descripción de las fuentes de incertidumbre

De las ecuaciones 5.1 se observa que las variables de entrada que definen al factor de corrección del medidor, MF , son las siguientes:

V_{P20}	- Volumen a condiciones estándar del probador [L]
N	- Total de pulsos generados por el medidor de flujo durante el viaje redondo (ida y vuelta) [pulsos]
P_m	- Presión del fluido en el medidor [Pa]
T_m	- Temperatura del fluido en el medidor [$^{\circ}\text{C}$]
P_p	- Presión del fluido en el probador [Pa]
T_p	- Temperatura del fluido en el probador [$^{\circ}\text{C}$]
T_T	- Temperatura a la cual se conoce la densidad del fluido [$^{\circ}\text{C}$]
ρ_T	- Densidad del fluido a la temperatura T [kg/m^3]
ρ_{15}	- Modelo matemático para la estimación de la densidad del fluido a 15 $^{\circ}\text{C}$ [kg/m^3]
F	- Modelo matemático para la estimación del factor de compresibilidad [Pa^{-1}]
t	- Espesor de tubería del probador [m]
D_i	- Diámetro interno de la tubería del probador [m]
E	- Módulo de elasticidad del material [Pa]
α_p	- Coeficiente cúbico de expansión térmica en probador, [$1/^{\circ}\text{C}$]
s	- Repetibilidad de mediciones consecutivas para el factor de corrección, MF [adimensional]

Volumen a condiciones estándar del probador, V_{p20} :

Determinado mediante la calibración del probador bidireccional mediante la técnica de desplazamiento de agua empleando una medida volumétrica. El volumen está definido por el viaje redondo de la esfera en el interior del probador y definido por dos sensores en la

sección de medición. El volumen se expresa a una temperatura estándar, en México normalmente la temperatura estándar es 20 °C.

La distribución de probabilidad que describe esta variable es una distribución de probabilidad normal, como es usual en un certificado de medición.

Pulsos emitidos por el medidor de flujo bajo calibración y colectados durante un viaje redondo de la esfera, N :

La totalización de los pulsos generados por el medidor de flujo se efectúa mediante contadores instalados en el computador de flujo. La variación que se acepta para esta variable es de ± 1 pulso. La distribución de probabilidad que se le asocia a esta variable es uniforme.

Presión del fluido en el medidor bajo calibración, P_m :

Las contribuciones que se toman en cuenta son: la calibración del sistema de medición de presión, la resolución del instrumento y del gradiente de presión que ocurre entre el medidor bajo prueba y el sensor de presión. La contribución por calibración puede representarse mediante una función con distribución de probabilidad normal, mientras que la contribución por los gradientes de presión y la resolución del instrumento pueden interpretarse como de tipo uniforme.

Temperatura en el medidor, T_m :

Tres contribuciones asociadas con esta magnitud son tomadas en cuenta: a) la que se debe a la calibración del sistema de medición de temperatura a la cual se le asigna una distribución normal, b) la debida a los gradientes de temperatura que ocurren entre medidor y sensor de temperatura, lo que puede ser evaluado durante el número de mediciones efectuada tomando la variación en la medición de temperatura, distribución uniforme y c) la resolución del instrumento, distribución uniforme.

Temperatura en el medidor, T_p :

En el probador normalmente se instalan dos sensores de temperatura, uno a la entrada y otro a la salida del probador. El valor promedio de las dos temperaturas es tomada en cuenta para la evaluación del factor de corrección del medidor. La contribución a la incertidumbre por la temperatura en el patrón procede de tres fuentes: la calibración de cada uno de los dos sensores de temperatura con una distribución de probabilidad normal, la resolución de los instrumentos y los gradientes de temperatura que pueden presentarse a lo largo del probador, a estas dos últimas fuentes se les asigna una distribución de probabilidad uniforme.

Presión en el medidor, P_p :

La presión en el probador se mide tanto a la entrada como a la salida del probador. El valor promedio se utiliza para la evaluación del factor de corrección del medidor. La calibración del sensor a la cual se le asigna una distribución de probabilidad uniforme, la resolución con una distribución de probabilidad uniforme y las variaciones de presión ocurridas durante el viaje de ida y vuelta de la esfera en el probador asumiendo una distribución de

probabilidad uniforme son las fuentes de incertidumbre que deben tomarse en consideración para la evaluación de la incertidumbre estándar combinada.

Temperatura de la muestra para la determinación de la densidad, T_T :

Si el sistema de medición de flujo cuenta con un densímetro a frecuencia la temperatura puede obtenerse del sensor de temperatura del instrumento. Si la densidad se determina a partir de una muestra del hidrocarburo, por ejemplo mediante un densímetro de inmersión, entonces es probable que el instrumento para medir la temperatura sea un termómetro del tipo de líquido en vidrio. Cualquiera que sea el caso, la incertidumbre en el valor de T_T se deberá a la calibración del instrumento de temperatura.

Densidad del fluido a la temperatura T_T , ρ_T :

Esta contribución es atribuible a la calibración del sistema de medición de densidad, la distribución de probabilidad que se asume es normal.

Modelo matemático para la estimación de F :

En el capítulo 11, sección 2, parte 1M del MPMS publicada por API se establece que el factor de compresibilidad para los hidrocarburos líquidos puede estimarse mediante la ecuación dada en el anexo A de esta Guía.

Coefficiente de dilatación cúbica del probador, α_p :

El material de fabricación de los probadores convencionales es acero al carbón, la incertidumbre estándar que puede atribuirse a esta variable está en función del valor propuesto por el fabricante o la literatura, en base a una distribución uniforme.

Diámetro de la tubería, D_j :

El diámetro de la tubería debe ser estimado a partir de varias mediciones, realizadas con algún instrumento con trazabilidad de sus mediciones. Para esta fuente se asume una distribución de probabilidad uniforme.

Espesor de pared del probador, t :

De acuerdo con las tolerancias de fabricación de tuberías, el espesor de una tubería en particular puede variar entre un valor de espesor mínimo y un máximo. De acuerdo con dicha información, es posible atribuir una distribución de probabilidad rectangular a esta contribución. Un valor conservador de incertidumbre estándar para esta variable es de 0,001 m.

Módulo de elasticidad, E :

De acuerdo con la bibliografía, la mejor estimación para esta variable es de $2,068 \cdot 10^5$ MPa y se basa en la hipótesis de que el material con que está fabricado el probador es acero suave y se considera isotrópico.

Repetibilidad, s :

La contribución a la incertidumbre de medición puede obtenerse de la variabilidad del factor de corrección del medidor MF , después de haber realizado un número suficiente de

repeticiones. Así, la contribución por repetibilidad puede asociarse en forma directa al mensurando, aplicando un coeficiente de sensibilidad unitario. Se asume una distribución de probabilidad normal.

Definiciones:

Pasada: Movimiento en un solo sentido de la esfera a lo largo de la sección calibrada del probador bidireccional (movimiento entre los sensores de posición del probador) que tiene por objeto determinar los pulsos emitidos por el medidor bajo calibración durante el desplazamiento de la esfera en la sección calibrada.

Viaje redondo o corrida: Movimiento de ida y vuelta de la esfera a lo largo de la sección calibrada del probador bidireccional.

Incertidumbre tipo A (u_A)

La incertidumbre de la magnitud de entrada X_i obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad y se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

$$u_A(X_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad [\text{adimensional}] \quad (3.1)$$

Incertidumbre estándar combinada (u_c)

De acuerdo con los modelos matemáticos y aplicando la metodología propuesta en la GUM [1], se estima la incertidumbre estándar combinada del factor de corrección del medidor, MF , a partir de la siguiente expresión:

$$u_c(MF) = \sqrt{\left[\left[\frac{\partial MF}{\partial V_{P20}} \cdot u(V_{P20}) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial N} \cdot u(N) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial Ec_F} \cdot u(Ec_F) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial T_m} \cdot u(T_m) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial P_m} \cdot u(P_m) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial T_p} \cdot u(T_p) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial P_p} \cdot u(P_p) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial T_T} \cdot u(T_T) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial \rho_T} \cdot u(\rho_T) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial \alpha_p} \cdot u(\alpha_p) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial D_i} \cdot u(D) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial t} \cdot u(t) \right]^2 + \left[\frac{\partial MF}{\partial E} \cdot u(E) \right]^2 + \frac{s^2}{n}} \quad [\text{adimensional}] \quad (5.2)$$

8.3 Modelo matemático para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un probador compacto de desplazamiento positivo.

Cálculo de los pulsos interpolados \hat{N} , usando la técnica de doble cronometría para la interpolación de pulsos:

$$\hat{N} = N \frac{tp}{tm} \quad [\text{pulsos}] \quad (6)$$

donde:

\hat{N} - Número de pulsos interpolados.

N - Número de pulsos enteros en una pasada.

tp - Tiempo entre sensores ópticos [s].

tm - Tiempo transcurrido para el conteo del número de pulsos completos [s].

$$Kfactor = \frac{N * tp}{CPL_p \cdot CPS_p \cdot CTL_p \cdot CTS_c \cdot CTS_v \cdot CPL_m \cdot CTL_p \cdot tm \cdot V_{p20e}} \quad [\text{adimensional}] \quad (7)$$

La ecuación para el CTS en un probador compacto requiere una pequeña modificación, debido a que los detectores de posición están montados externamente en un material distinto al empleado en el probador y ese material se expande y contrae de manera diferente.

CTS_c - Factor de corrección por efecto de la temperatura en el cilindro [adimensional]

CTS_v - Factor de corrección por efecto de la temperatura en el vástago [adimensional]

Listado y descripción de las fuentes de incertidumbre

En la ecuación 7 se observa que las variables de entrada que definen el factor K, son las siguientes:

V_{p20} -Volumen del patrón a 20 °C [L]

T_l -Temperatura del líquido [°C]

T_a -Temperatura del aire [°C]

P -Presión del líquido [Pa]

D_i -Diámetro interno del cilindro [m]

E -Módulo de elasticidad del material del cilindro [Pa]

t - Espesor de la pared del cilindro [m]

α_c - Coeficiente de expansión térmica del material del cilindro [°C⁻¹]

α_v -Coeficiente de expansión térmico del material del vástago [°C⁻¹]

β -Coeficiente de expansión térmica del líquido, en °C⁻¹

P_e -Presión de vapor del líquido [Pa]

F -Factor de compresibilidad del líquido [Pa⁻¹]

N - Número de pulsos enteros en una pasada.

tp - Tiempo transcurrido entre el paso de la bandera por los sensores ópticos [s].

tm - Tiempo transcurrido para el conteo del número de pulsos completos [s].

s - Desviación estándar de la muestra [adimensional]

Volumen base del probador, V_{P20} :

Determinado durante la calibración del probador mediante la técnica de desplazamiento de agua (water draw). El volumen se expresa a una temperatura de referencia, normalmente 20 °C. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta a esta variable aleatoria es una distribución de probabilidad normal.

Total de pulsos emitidos por la turbina durante la transferencia, N :

El conteo de los pulsos emitidos por la turbina se realiza generalmente mediante osciladores de alta frecuencia (comparada con la frecuencia a la cual se generan los pulsos en la turbina). La variación que se acepta para esta variable aleatoria de ± 1 pulso. La distribución de probabilidad que puede asociarse a esta variable es uniforme.

Modelo matemático para la estimación de F :

En el capítulo 11, sección 2, parte 1M del MPMS publicado por API se establece que el factor de compresibilidad para los hidrocarburos líquidos puede estimarse mediante una ecuación descrita en el anexo A. El factor de compresibilidad está en función de la temperatura del líquido y la densidad a 15 °C.

Presión en el medidor, P_m :

Esta contribución tiene su origen en la calibración del sistema de medición de presión, además del gradiente de presión que ocurre entre el medidor tipo turbina y el sensor de presión. La contribución por calibración puede representarse mediante una función con distribución de probabilidad normal, mientras que la contribución por los gradientes de presión puede interpretarse como de tipo uniforme.

Temperatura en el medidor, T_m :

En un sistema de medición con turbina, el sensor de temperatura debe instalarse aguas abajo de la turbina. Así, de igual forma que para la medición de presión, se pueden distinguir dos contribuciones asociadas con esta magnitud: a) la que se debe a la calibración del sistema de medición de temperatura y b) debido a los gradientes de temperatura que ocurren entre turbina y sensor de temperatura. La incertidumbre estándar combinada puede obtenerse a partir de la raíz cuadrada de la suma cuadrática de las contribuciones.

Temperatura en el probador, T_p :

El sensor de temperatura normalmente se instala a la entrada del probador. Las fuentes de incertidumbre que deben considerarse para la medición de temperatura son: a) la calibración del sensor(s) y b) los gradientes de temperatura que pueden presentarse a lo largo del probador.

Presión en el probador, P_p :

De igual forma que para el caso de la temperatura, la presión en el probador se mide a la entrada del probador. La calibración del sensor y las variaciones de presión ocurridas durante el viaje del pistón en el probador son las fuentes de incertidumbre que deben tomarse en consideración para la evaluación de la incertidumbre estándar combinada.

Coefficiente de dilatación cuadrática del probador, α_{cp} :

El material de fabricación del probador normalmente es acero inoxidable. El valor del coeficiente depende del tipo específico de acero inoxidable de fabricación. Para determinar el valor de incertidumbre estándar de esta variable aleatoria se sugiere atribuirle una distribución de probabilidad rectangular. Los límites de variación deben obtenerse de las diferentes fuentes de información para la obtención del mejor valor para α_{cp} .

Diámetro de la tubería, D_i :

El diámetro de la tubería debe ser estimado a partir de varias mediciones, realizadas con algún instrumento con trazabilidad. Un valor de incertidumbre típico para el diámetro de la tubería adyacente es del orden de 0,25 %, para niveles de confianza del orden de 95 %.

Espesor de pared del probador, t :

De acuerdo con las tolerancias de fabricación de tuberías, el espesor de una tubería puede variar entre un valor de espesor mínimo y un máximo. De acuerdo con dicha información, es posible atribuir una distribución de probabilidad rectangular a esta contribución. Un valor conservador de incertidumbre estándar para esta variable es de 0,001 m.

Módulo de elasticidad, E :

De acuerdo con la bibliografía, la mejor estimación para esta variable es de $2,068\ 4 \cdot 10^5$ MPa y se basa en la hipótesis de que el material con que está fabricado el probador es acero suave y se considera isotrópico.

Repetibilidad:

La contribución a la incertidumbre de medición puede obtenerse de la variabilidad del factor de corrección del medidor MF , después de haber realizado un número suficiente de repeticiones. Así, la contribución por repetibilidad puede asociarse en forma directa al mensurando, aplicando un coeficiente de sensibilidad unitario.

Incertidumbre tipo A (u_A)

La incertidumbre de la magnitud de entrada X_i obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad y se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

$$u_A(X_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad [\text{pulsos/L}] \quad (3.1)$$

Incertidumbre estándar combinada (u_c)

De acuerdo con los modelos matemáticos y aplicando la metodología propuesta en la GUM [1], se estima la incertidumbre estándar combinada del factor K del medidor, a partir de la siguiente expresión:

$$u_c(\text{FactorK}) = \sqrt{\left[\left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial V_{P20}} \cdot u(V_{P20}) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial N} \cdot u(N) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial t_m} \cdot u(t_m) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial t_p} \cdot u(t_p) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial \alpha_c} \cdot u(\alpha_c) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial T_p} \cdot u(T_p) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial \alpha_v} \cdot u(\alpha_v) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial T_v} \cdot u(T_v) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial P_p} \cdot u(P_p) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial E} \cdot u(E) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial D_i} \cdot u(D_i) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial t} \cdot u(t) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial \beta} \cdot u(\beta) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial T_m} \cdot u(T_m) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial P_m} \cdot u(P_m) \right]^2 + \left[\frac{\partial \text{FactorK}}{\partial F} \cdot u(F) \right]^2 + \frac{s^2}{n}} \quad [\text{pulsos/L}] \quad (7.1)$$

8.4 Modelo matemático para la calibración de medidores de flujo empleando como patrón de referencia un medidor de flujo.

$$MF = \frac{MF_p \cdot V_p \cdot CTS \cdot CTL_p \cdot CPL_p}{V_m \cdot CTL_m \cdot CPL_m} \quad [\text{adimensional}] \quad (8)$$

donde:

$$V_p = (L_f - L_i)_p \quad [L] \quad (8.1)$$

$$V_m = (L_f - L_i)_m \quad [L] \quad (8.2)$$

$$FM = \frac{(MF_{P20} \cdot (L_f - L_i)_p \cdot (1 + 3\alpha(T_p - 20)) \cdot \frac{\rho_p}{\rho_{20}})}{(L_f - L_i)_m \cdot \frac{\rho_m}{\rho_{20}}} \quad [\text{adimensional}] \quad (8.3)$$

donde:

V_p - Volumen indicado en el patrón [L]

V_m - Volumen indicado en el Medidor [L]

L_i - Lectura inicial del patrón, medidor [L]

L_f - Lectura final del patrón, medidor [L]

MF_{P20} - Factor de corrección del patrón [adimensional]

Hipótesis particular para la validez del modelo matemático anterior.

-
- La presión del fluido entre el medidor bajo prueba y la medida volumétrica no es mayor a 100 000 Pa, por lo que no se toma en cuenta la corrección por efectos de la presión en el fluido. Si la diferencia de presiones es mayor debe efectuarse las correcciones por *CPL*.

Listado y descripción de las fuentes de incertidumbre

En la ecuación 8.3 se observa que las variables de entrada que definen el factor K , son las siguientes:

- V_p - Volumen indicado por el patrón volumétrico [L]
- MF_{P20} - Factor de Calibración del Patrón [adimensional]
- ρ_p - Densidad del líquido en el patrón [kg/m³]
- T_p - Temperatura observada en el patrón [°C]
- V_m - Volumen indicado en el Medidor [L]
- ρ_m - Densidad del líquido en el medidor [kg/m³]
- T_m - Temperatura observada en el medidor [°C]
- s - Desviación estándar de la muestra [adimensional]

El factor de corrección del patrón volumétrico, a la temperatura de referencia 20 °C, MF_{P20} :

Valor obtenido de la calibración del patrón volumétrico y vertido en el certificado de calibración. Se le asigna una distribución de probabilidad normal.

Volumen indicado por el patrón volumétrico, a condiciones de la prueba, V_p :

Volumen obtenido por la diferencia entre la lectura final y la lectura inicial, la incertidumbre se debe a la resolución del registrador del patrón volumétrico, se le asigna una distribución uniforme.

La lectura del volumen del medidor bajo calibración (L_f-L_i), V_m :

Al volumen determinado por el medidor bajo prueba se le asigna una incertidumbre debida a la resolución del dispositivo registrador de lectura. Para estimar la incertidumbre estándar se asume una distribución de probabilidad del tipo uniforme. Así, si el instrumento posee una resolución de 0,1 L, entonces la incertidumbre estándar es igual a $0,1/\sqrt{12}$ ($\pm 0,029$ L).

La medición de temperatura en el patrón volumétrico, T_p :

Esta fuente de incertidumbre resulta de la combinación del gradiente del campo de temperaturas del líquido, se propone una distribución de probabilidad uniforme con una variación de temperatura de acuerdo a la prueba, la debida a la calibración del sistema de medición de temperatura a la cual se le asigna una distribución normal y la resolución del instrumento con una distribución de probabilidad uniforme.

La medición de temperatura en el patrón volumétrico, T_m :

Esta fuente de incertidumbre resulta de la combinación del gradiente del campo de temperaturas del líquido, se propone una distribución de probabilidad uniforme con una variación de temperatura de acuerdo a la prueba; la debida a la calibración del sistema de medición de temperatura a la cual se le asigna una distribución normal y la resolución del instrumento con una distribución de probabilidad uniforme.

Densidad del fluido: $\rho_p, \rho_m, \rho_{20}$:

La densidad se determina en función de la temperatura del fluido en el patrón volumétrico y en el medidor bajo prueba. Determinada en base a la densidad de la muestra, ρ_M y la temperatura de la muestra T_M . Ver Anexos B y A de acuerdo al fluido de prueba empleado.

Coefficiente de dilatación cúbica del acero inoxidable, α :

Depende del material de fabricación del patrón volumétrico (acero inoxidable tipo 304, 316 o acero al carbón) del cual se desconoce su composición química particular. En este caso, se le asigna al valor del coeficiente cúbico de expansión del material una distribución uniforme.

Repetibilidad del MF del medidor, s :

Incertidumbre tipo A de mediciones consecutivas a un gasto estable para el factor de corrección, MF , se le asigna una distribución de probabilidad normal.

Incertidumbre tipo A (u_A)

La incertidumbre de la magnitud de entrada X_i obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

$$u_A(X_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad [\text{adimensional}] \quad (3.1)$$

Incertidumbre estándar combinada (u_c)

De acuerdo con los modelos matemáticos y aplicando la metodología propuesta en la GUM [1], se estima la incertidumbre estándar combinada del factor de corrección del medidor, MF , a partir de la siguiente expresión:

Incertidumbre Combinada del MF_m

$$\begin{aligned} (u_c(MF))^2 = & \left(\frac{\partial MF}{\partial V_p} \cdot u(V_p) \right)^2 + \left(\frac{\partial MF}{\partial MF_p} \cdot u(MF_p) \right)^2 + \left(\frac{\partial MF}{\partial \alpha_p} \cdot u(\alpha_p) \right)^2 + \left(\frac{\partial MF}{\partial T_p} \cdot u(T_p) \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial MF}{\partial V_m} \cdot u(V_m) \right)^2 + \left(\frac{\partial MF}{\partial T_m} \cdot u(T_m) \right)^2 + \left(\frac{\partial MF}{\partial \rho_m} \cdot u(\rho_m) \right)^2 + \left(\frac{\partial MF}{\partial \rho_p} \cdot u(\rho_p) \right)^2 + \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right)^2 \end{aligned}$$

[adimensional] (8.4)

d) Una tabla con el “presupuesto de incertidumbre” típico que contenga al menos, para cada fuente de incertidumbre, su variabilidad, la distribución de probabilidad que se le asocie, el coeficiente de sensibilidad y su contribución a la incertidumbre estándar combinada de la medición.

Ver ejemplo página 41 de esta Guía.

e) La tabla también debe mostrar la incertidumbre estándar combinada con las consideraciones a la correlación entre fuentes.

f) Una nota relativa a la correlación entre fuentes.

Se desprecian las diferentes contribuciones por correlación entre el coeficiente de dilatación del material de fabricación del patrón volumétrico, la temperatura y la presión. Así como también aquellas contribuciones por correlación derivadas de la calibración de los instrumentos hacia un mismo patrón de referencia.

g) Una nota relativa a la distribución de probabilidad del mensurando.

Se considera que el mensurando tiene una distribución normal debido a que los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal.

h) Recomendaciones sobre el cálculo y la expresión de la incertidumbre expandida de la medición, incluyendo preferentemente y cuando aplique los grados de libertad asociados a cada contribución y el número efectivo de grados de libertad.

Determinación de los grados efectivos de libertad.

El número efectivo de grados de libertad (ν_{ef}) del mensurando considera el número de grados de libertad ν_i de cada fuente de incertidumbre, donde a su vez, se asignará el número de grados de libertad asociada a una distribución de una magnitud considerando su contribución ν a los grados efectivos de libertad.

$$\frac{1}{\nu_{ef}} = \sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{u_i(y)}{u_c(y)} \right)^4}{\nu_i} \quad [\text{adimensional}] \quad (9)$$

Expresión de la incertidumbre

Incertidumbre expandida

Se calcula de la siguiente manera:

$$U = u_c \cdot t_p(v_{ef}) \quad [\text{adimensional}] \quad (10)$$

Donde $t_p(v_{ef})$ es el factor derivado de la distribución t de Student a un nivel de confianza p y v_{ef} grados de libertad.

El factor de cobertura k corresponde al valor $t_p(v_{ef})$.

Otro camino es la determinación del laboratorio de cómo expresar la incertidumbre de los resultados de sus mediciones con un nivel de confianza no menor al 95%, en vista de la costumbre en laboratorios similares.

Es difícil asegurar un valor preciso de la incertidumbre debido a las múltiples aproximaciones realizadas durante su estimación. Una consecuencia es la posibilidad de sustituir los valores correspondientes a $p = 95\%$ con los valores correspondientes a $p = 95,45\%$, con el fin de obtener un valor de $k = 2,00$ correspondiente a una distribución normal.

$$U = k \cdot u_c \quad [\text{adimensional}] \quad (11)$$

- i) **Nota de advertencia:** la tabla de presupuesto de incertidumbre presentada tiene el propósito único de ilustración, el laboratorio de calibración debe realizar sus propias pruebas y consideraciones sobre la estimación de la incertidumbre de los resultados de sus mediciones.
Obsérvese, en la tabla de presupuesto de incertidumbre, que las contribuciones de los renglones en verde se contabilizan para el cálculo de la incertidumbre estándar en la variable de influencia que corresponde al número dado en la misma tabla.

Ejemplo del formato para documentar la estimación de la incertidumbre.

Balance de incertidumbres de la calibración de un medidor de flujo empleando como referencia un probador compacto											
	Magnitud	Valor	Unidades	Fuente	Tipo	U original	Ci	u Ci	(u Ci) ²	Confianza %	gl
1	N	404	pulsos	prueba	uniforme	1,12E-01	0,016215	0,000524901	2,75522E-07	100	infinito
2	tp	0,933 580	segundos	certificado	normal	1,00E-09	7,016995	7,02E-09	4,92382E-17	95	200
3	tm	0,933 932	segundos	certificado	normal	1,00E-09	-7,014354	-7,01435E-09	4,92012E-17	95	200
4	Vp20	61, 615 300	L	certificado	normal; k=2	3,08E-02	-0,106320	-0,001637732	2,68217E-06	90	50
5	α _C	3,18E-05	°C ⁻¹	fabricante	uniforme	2,00E-06	-20,5866	-1,18857E-05	1,41269E-10	100	infinito
6	Tp	23,14	°C				1,40E-03	0,000150963	2,27899E-08	90	50
6,1				certificado	normal	2,00E-01	1	1,00E-01			
6,2				resolución	uniforme	1,00E-01	1	2,89E-02			
6,3				variación	uniforme	1,00E-01	1	2,89E-02			
7	α _V	1,59E-05	°C ⁻¹	fabricante	uniforme	2,00E-06	-3,34E+01	-1,92876E-05	3,7201E-10	100	infinito
8	Tv	25,10	°C				-1,04E-04	-1,0854E-05	1,1781E-10	90	50
8,1				certificado	normal	2,00E-01	1	1,00E-01			
8,2				resolución	uniforme	1,00E-01	1	2,89E-02			
8,3				variación	uniforme	0,00E+00	1	0,00E+00			
9	Pp	616 857	Pa				-3,44E-09	-4,35979E-07	1,90077E-13	85	22
9,1				certificado	normal, k=2	1,00E+02	1	5,00E+01			
9,2				resolución	uniforme	5,00E+01	1	1,44E+01			
9,3				variación	uniforme	4,00E+02	1	1,15E+02			
10	E	1,97E+11	Pa	fabricante	uniforme	2,00E+09	1,47E-15	8,45884E-07	7,15519E-13	100	infinito
11	Di	3,11E-01	m	fabricante	uniforme	2,00E-03	9,25E-04	5,34199E-07	2,85369E-13	100	infinito
12	t	2,22E-02	m	fabricante	uniforme	5,00E-04	1,30E-02	1,8697E-06	3,49577E-12	100	infinito
13	β	0, 000 245	1/C°				-4,650349	-1,14041E-07	1,30053E-14	85	22
13,1				Ec. PTB	normal, k=1	2,45E-08	1	2,45E-08			
13,2				Temperatura	normal; k=1	1,19E-01	0	0,00E+00			
14	Tm	23,85285714	°C				-0,001606	-8,1638E-05	6,66476E-09	90	50
14,1				certificado	normal k=2	1,00E-01	1	5,00E-02			
14,2				resolución	uniforme	1,00E-02	1	2,89E-03			
14,3				variación	uniforme	3,00E-02	1	8,66E-03			
15	Pm	347 586	Pa				2,97E-09	1,76727E-07	3,12325E-14	85	22
15,1				certificado	normal, k=2	2,80E+01	1	1,40E+01			
15,2				resolución	uniforme	1,00E-01	1	2,89E-02			
15,3				variación	uniforme	2,00E+02	1	5,77E+01			
16	F	4,5416E-10	1/Pa				1764193,491	8,01223E-07	6,41958E-13	85	22
16,1				Ec. PTB	normal, k=1	4,54E-13	1	4,54E-13			
16,2				Temperatura	normal; k=1	1,19E-01		0,00E+00			
17	repetibilidad	0, 000 732		prueba	normal; k=1	2,77E-04	1	0,000276656	7,65384E-08	1	6
Mesurando	KF =	6, 550 928	pulsos/L	suma de uc 0, 000 003 raíz (uc) 0, 001 751 grados efectivos 64 factor t (p=95,45) 2,04 inc. Expandida (U) [pulsos/L] 0, 003 571 0,055%							

9. VALIDACIÓN DE MÉTODOS

Deben indicarse los métodos que es necesario validar para asegurar que a) la trazabilidad de las mediciones se logra y se mantiene; y, b) que el valor de la incertidumbre de la medición es válido.

Deben identificarse y validarse los aspectos que puedan influir sobre la trazabilidad y la incertidumbre de las mediciones.

En este caso, los procedimientos contenidos en esta Guía se basan en las Normas cuyos métodos son normalizados. La validación entonces se reduce a los cálculos y la adquisición de variables de entrada.

Ensayos de Aptitud

Esta herramienta empleada en el aseguramiento de las mediciones de flujo de líquidos permite comparar métodos, procedimientos, sistemas de medición, personal, cálculos e incertidumbre entre los laboratorios participantes con el propósito de establecer oportunidades de mejora en los mismos.

Entre los objetivos que se persiguen con su realización están:

- a) Establecer grados de equivalencia entre participantes en la prueba de aptitud,
- b) demostrar de competencia técnica. Este tipo de ensayos es un requisito para obtener y mantener la acreditación conforme a la norma NMX-EC-17025-IMNC-2005,
- c) coadyuvar a la validación de métodos, y
- d) determinar errores sistemáticos

Existen diferentes enfoques o criterios para evaluar los resultados de los Ensayos de Aptitud, uno de los más empleados es el Error Normalizado. Sin embargo, si se decide usar el En u otra métrica para evaluar los resultados se debe establecer claramente el enfoque en el protocolo del ensayo de aptitud.

Error normalizado

El error normalizado es una de las maneras para evaluar los resultados de las pruebas de aptitud.

El error normalizado En con respecto a la incertidumbre declarada por el laboratorio está dado por:

$$En_i = \frac{|MF_{lab_i} - MF_{ref}|}{\sqrt{(U_{lab_i}^2 + U_{ref}^2) + U_{pt}^2}} \quad (12)$$

Donde:

$MF_{lab\ i}$ es el resultado promedio del laboratorio participante i

MF_{ref} es el valor de referencia

$U_{lab\ i}$ es la incertidumbre expandida de $MF_{lab\ i}$

U_{ref} es la incertidumbre expandida de MF_{ref}

U_{pt} es la incertidumbre expandida debida estabilidad del patrón de transferencia – reproducibilidad- (toma en cuenta los efectos por las condiciones de operación del sistema de llenado de autos tanque sobre el patrón de transferencia).

Los valores de referencia a los diferentes flujos seleccionados para la comparación son los valores promedio obtenidos durante las pruebas inicial y final realizadas por el laboratorio piloto (CENAM).

El parámetro de aceptación es $En < 1$.

Un $En = 0$ clasifica los resultados de la prueba de un laboratorio en completo acuerdo mientras que un $En > 1$ significa que existen discrepancias entre esos resultados y el valor de referencia.

10. BUENAS PRÁCTICAS DE MEDICIÓN

Deben describirse aquellas buenas prácticas necesarias para asegurar el logro y mantenimiento de la trazabilidad y del valor de la incertidumbre.

Medida volumétrica

- Efectuar lecturas del menisco en la escala del cuello de la medida volumétrica adecuadamente, es decir eliminando los errores de paralaje y observando si la lectura se efectúa por arriba o por abajo del cero de la escala del cuello.
- Nivelar correctamente la medida volumétrica.
- Limpiar suficientemente la medida volumétrica.
- Observar el tiempo de escurrimiento corresponda a lo especificado por el fabricante o en el caso de fluidos muy viscosos determinarlo en función de el tiempo requerido para el vaciado en las pruebas iniciales.
- Calibrar la medida volumétrica en los intervalos y condiciones establecidos.

Probadores

- Filtrar el fluido de prueba
- Instalar válvula de sobre presión para proteger los sistemas de medición.
- Dar mantenimiento adecuado de la esfera y de la válvula de cuatro vías en un probador bidireccional (inflado, almacenamiento).
- Mantener una buena condición de los empaques y sellos y mantenimiento de los sistemas neumático e hidráulico en un probador compacto.
- Ajustar la presión del plenum de acuerdo a la presión del fluido a la entrada en un probador compact, de acuerdo a la recomendación del fabricante.
- Purgar el aire en los sistemas de referencia.

-
- Calibrar de acuerdo a lo establecido por cada laboratorio de calibración.

Medidores de flujo

- Operar adecuadamente las válvulas de control.
- Mantener el buen estado mecánico del medidor.
- Eliminar la presencia de aire.
- Filtrar el fluido de prueba.
- Procurar la estabilidad del flujo.
- Eliminar fugas.
- Efectuar la lectura en el registrador mecánico del patrón o medidor.
- Efectuar la instalación de acuerdo a lo recomendado por las normas.

En general, en todos los casos se deben evitar los fenómenos de cavitación y golpe de ariete, flujos en más de una fase, la vibración excesiva y ondas elásticas provocadas por el golpe de ariete son fenómenos indeseables.

En algunos casos los medidores tienen recomendaciones especiales en su instalación para evitar perfiles de velocidades con vértices o distorsiones que afectan el desempeño de los sistemas de medición.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Deben describirse los documentos necesarios para la aplicación de la Guía Técnica.

- [1] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML (1995).
- [2] Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración - NMX-EC-17025-IMNC-2000.
- [3] Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones CNM-MED-PT-0002.
- [4] API Standard 2540, Manual of Petroleum Measurement Standards, 1st ed., chap. 11.1 Tables 5A, 5B, 6A, 6B, American Petroleum Institute, Washington D.C., 1980.
- [5] API Standard 2540, Manual of Petroleum Measurement Standards, 1st ed., chap. 11.2.2, “Compressibility factors of hydrocarbons: 0 – 90 °API gravity range”, American Petroleum Institute, 1984.
- [6] M. Tanaka, G. Girard, R. Davis, A. Peuto and N. Bignell- Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports – metrologia - 2001.
- [7] OIML R 120 Standard capacity measures for testing measuring systems for liquid others than water. 1996.

12. ANEXOS

ANEXO A.

Productos terminados derivados del petróleo.

Para el *CTL*

La densidad del fluido a las temperaturas de 15 °C, 20 °C y a la temperatura del medidor se obtienen a partir de la aplicación del modelo propuesto en API 2540, [4].

$$\beta_{15} = \frac{K_0}{\rho_{15}^2} + \frac{K_1}{\rho_{15}} \quad [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (12)$$

$$\rho_T = \rho_{15} \cdot \exp[-\alpha_{15}(T_T - T_{15})(1 + 0,8 \cdot \alpha_{15}(T_T - T_{15}))] \quad [\text{kg/m}^3] \quad (13)$$

donde :

- β - Coeficiente volumétrico de expansión térmica del fluido a una temperatura de 15 °C [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].
- K_0, K_1 - Constantes propias de cada líquido.
- T_T - Temperatura a la cual se conoce la densidad del fluido, [°C].
- ρ_{15} - Densidad del fluido a 15 °C, [kg/m^3]
- ρ_T - Densidad del fluido a la temperatura T_T , [kg/m^3]

Para el *CPL*

Ecuación para determinar el factor de compresibilidad del líquido, F , con base en la temperatura y densidad a 15 °C.

El modelo matemático para el cálculo del factor de compresibilidad es propuesto en el MPMS de API, 12.2.1 [3], para fluidos cuya densidad esté comprendida entre 638 kg/m^3 y 1 074 kg/m^3 :

$$F = 0,001 \cdot \exp\left(-1,620 \ 8 + 2,159 \ 2 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,870 \ 96 \cdot \rho_{15}^{-2} + 4,209 \ 2 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot \rho_{15}^{-2}\right) \quad [\text{MPa}^{-1}] \quad (14)$$

donde :

- T - Temperatura a la cual se conoce la densidad del fluido, [°C].
- ρ_{15} - Densidad del fluido a 15 °C, [kg/L]

ANEXO B

Ecuación para determinar la densidad del agua [6].

$$\rho = a_5 \left[1 - \frac{(T_L + a_1)^2 (T_L + a_2)}{a_3 (T + a_4)} \right] \quad [\text{kg/m}^3] \quad (15)$$

T_L - Es la temperatura de la línea [°C]

$$a_1 = -3,983\,035 \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$$

$$a_2 = 301,797 \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$$

$$a_3 = 522\,528,9 \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$$

$$a_4 = 69,348\,81 \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$$

$$a_5 = 999,974\,950 \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$$

El factor de compresibilidad C_{PL} [6] para el agua está dado por:

$$C_{PL} = \left[1 + \left(50,74 \cdot 10^{-11} - 0,326 \cdot 10^{-11} \cdot T_L + 0,00416 \cdot 10^{-11} \cdot T_L^2 \right) (P_L - 101325) \right] \text{ [adimensional]} \quad (16)$$

Donde T_L es la temperatura de la línea (°C) y P_L es la presión absoluta de la línea (Pa).

IDENTIFICACIÓN DE CAMBIOS

INCISO	PÁGINA	CAMBIO(S)
Todos	Todas	Se modificó en su totalidad.
Observaciones:		