

Certificado de Calibración la Llave de la Confirmación Metrológica

Lic. Alhelí Ponce Rodríguez¹; Ing. Alejandro Crisanto Arriaga y Mtro. Jorge Pérez Vera

Resumen—Las regulaciones vigentes en el sector de hidrocarburos solicitan a los operadores y permisionarios petroleros mantener un control metrológico de los equipos e instrumentos instalados en el sistema de medición, por lo cual, deben realizar la calibración de sus equipos y dar seguimientos a su Sistema de Gestión de las Mediciones, como un mecanismo para asegurar la confiabilidad de sus procesos de transferencia de hidrocarburos. Estos sistemas de gestión emplean el proceso de confirmación metrológica para conocer si un equipo es apto para su uso previsto; por lo que es indispensable establecer adecuadamente las especificaciones metrológicas contra las cuales se compararán los resultados de las mediciones del certificado de calibración. Un correcto análisis e interpretación del certificado de calibración del equipo, permite a la organización dar trazabilidad a la medición, conocer el grado de desviación, predecir estadísticamente la deriva del instrumento, asegurar sus mediciones y con base en la información obtenida ayudar en la toma de acciones oportunas para la mejora de sus procesos.

Palabras clave—Calibración, Confirmación Metrológica, Deriva, Sistema de Gestión de las Mediciones

Introducción

Siguiendo el ritmo global, en México derivado de la reforma energética, el sector de hidrocarburos ha sufrido grandes cambios para tener un mejor control en la calidad y la cantidad de los hidrocarburos extraídos, producidos y comercializados. Dentro de estos cambios las diferentes regulaciones aplicables solicitan la implantación de Sistemas de Gestión de las Mediciones (SGM) como un requisito de operación para permisionarios y operadores petroleros (Ponce, 2021). Dentro de las actividades inmersas en el SGM para gestionar el riesgo de mediciones incorrectas, se realiza la Confirmación Metrológica de equipos y sistemas de medición que considera entre otras actividades: Identificación y control metrológico de los equipos (calibración, ajuste, reparación), procedimientos de medición, software de medición, condiciones de uso, habilidades del operador y la verificación del equipo/sistema en el tiempo (IMNC, 2004).

Para realizar la confirmación metrológica se lleva a cabo una verificación que consiste en comparar los resultados del certificado de calibración con las especificaciones metrológicas, para asegurar el correcto funcionamiento del equipo o sistema de medición y la calidad de las mediciones realizadas con él, de esta manera si los resultados cumplen con la especificación, se tiene un soporte para asegurar la conformidad del producto o servicio con los requisitos del cliente.

Descripción del Método

Como se determinan las especificaciones metrológicas

La determinación de las especificaciones metrológicas depende tanto de la magnitud, como de las características del proceso en el que intervenga el equipo, y pueden ser expresadas en términos de: resolución, error máximo permitido, repetibilidad, linealidad, incertidumbre, límites operacionales, entre otros. Para poder ser determinadas, se parte de lo siguiente:

- Los requisitos legales y reglamentarios, que se encuentran indicados en normas oficiales mexicanas, normas de referencia mexicanas, disposiciones, lineamientos técnicos o normas internacionales, entre otros.
- Las prescripciones o características del producto o servicio.
- Documento de referencia interno del cliente.

A manera de ejemplo, en la Figura 1 se muestran las especificaciones metrológicas que deben cumplir los equipos que integran los sistemas de medición de caudal de hidrocarburos gaseosos en una sola fase, en el cual se usan medidores de caudal tipo dinámico que generan pulsos, ya sea turbina, ultrasónico, másico o desplazamiento positivo. Estas especificaciones fueron establecidas por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) en la RESOLUCIÓN 776/2015 que son Disposiciones Administrativas de Carácter General en materia de medición aplicables a la actividad de transporte por ducto de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos, tomando como base normas API, AGA, ISO, JCGM, NOM, NMX, entre otras. La RES 776/2015 busca promover un desarrollo eficiente de los mercados y de la

¹ Lic. Alhelí Ponce Rodríguez es Técnico Especializado CIATEQ A.C. | Hidalgo, México. alheliponce@ciateq.mx (autor corresponsal)

² Ing. Alejandro Crisanto Arriaga es Gerente Medición Multifásica CIATEQ A.C. | Bernardo Quintana, Querétaro, México crisanto@ciateq.mx

³ Mtro. Jorge Pérez Vera es Líder de especialidad CIATEQ A.C. | Bernardo Quintana, Querétaro, México. jorge.perez@ciateq.mx

industria, proteger los intereses de los usuarios y propiciar una adecuada cobertura nacional de tales servicios en México (DOF, 2015).

	Resolución	Repetibilidad	Linealidad	EMP	Incertidumbre
Medidor de caudal	0.1 L	0.05 %	± 0.15 %	± 0.3 %	0.1 %
Medidor de temperatura	0.05 °C			± 0.18 °C	0.05 °C
Medidor de presión					
p/MPa < 1	5 kPa			± 30 kPa	10 kPa
1 < p/MPa < 4	0.5 %			± 3 %	1 %
p/MPa > 4	20 kPa			± 120 kPa	40 kPa
Medidor de densidad Para cálculo de CTL o CPL	0.5 kg/m ³			± 3 kg/m ³	1 kg/m ³
Volumen a condiciones base					0.25 %

Figura 1 Especificaciones metroológicas que deben cumplir los equipos que integran sistemas de medición de caudal de hidrocarburos gaseosos en una sola fase RESOLUCIÓN 776/2015. Recuperado de: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5422403&fecha=11/01/2016 el 24 de agosto 2021.

Sin embargo, para otras actividades como la extracción y exploración de hidrocarburos la regulación aplicable que dicta la Comisión Nacional de Hidrocarburos son los Lineamientos Técnicos en Materia de Medición de Hidrocarburos (LTMMH), los cuales dan la apertura al operador o permisionario de establecer las especificaciones metroológicas con base en una serie de normativas y criterios como guía.

Cuando no se cuentan con parámetros puntuales dictados por el ente regulador, la especificación metroológica se debe establecer con base en un análisis detallado del proceso de medición que incluya las características del equipo, el proceso, las necesidades del cliente tomando en cuenta guías internacionales de referencia y el cumplimiento regulatorio o normativo aplicable para que el producto o servicio cumpla, a fin de poder determinar los parámetros correctos que minimicen el riesgo de mediciones incorrectas

Antecedentes del caso de estudio

El presente artículo analiza un caso práctico para una organización cuya actividad es Exploración y Extracción de Hidrocarburos en México, para un medidor Coriolis (medición de densidad) de línea. cuyas características metroológicas cumplen con las requeridas para el proceso en el cual interviene, dentro de las que destacan:

- Equipo nuevo
- Intervalo de medición 0 kg/m³ a 5000 kg/m³
- Clase de exactitud 0.3
- Resolución 0.001 kg/m³
- Producto por medir: Condensado

Se analizó su comportamiento en el tiempo con base a su normativa aplicable, con la finalidad de:

- Determinar los aspectos a considerar para establecer correctamente las especificaciones metroológicas.
- Crear conciencia del impacto de analizar los certificados de calibración previo a realizar la confirmación metroológica.
- Definir los planes de acción a seguir para asegurar la confiabilidad de la medición una vez que se tiene un equipo no confirmado.

Determinación de las especificaciones metroológicas

Para poder determinar la especificación metroológica que correspondía al equipo de medición en cuestión, la primera actividad a seguir fue definir la regulación aplicable de acuerdo con actividad realizada por la organización dueña del equipo. En el caso práctico se estableció que la regulación correspondiente eran los LTMMH, ya que tienen carácter obligatorio para todos los Operadores Petroleros en relación con los Mecanismos de Medición utilizados en sus actividades de Exploración y Extracción de Hidrocarburos en México, al amparo de un Contrato o de una Asignación, desde el pozo hasta el Punto de Medición (DOF, 2015).

Una vez que se determinó la regulación aplicable, se analizó el contenido del documento, precisando que los LTMMH no establecen una tabla de especificaciones metroológicas (Resolución, Repetibilidad, Linealidad, EMP e Incertidumbre) a cumplir, por lo que se debieron determinar con base en las referencias normativas y estándares guía dentro del Artículo 7. I. Normas, Estándares y Procedimiento, donde se establece que el Operador Petrolero deberá cumplir con la normativa y estándares referidos en su Anexo 2, aplicables al diseño, instalación, operación, control y mantenimiento de los Mecanismos de Medición, así como contar con los protocolos, guías, instructivos, criterios, métodos de trabajo o manuales que sean necesarios para la correcta Medición de los Hidrocarburos (DOF, 2015). En la Tabla 1 se muestran las referencias normativas contenidas en el Anexo 2 de los LTMMH, donde se puede ubicar la OIML R 117-1 Sistemas de medición dinámicos para líquidos distintos del agua, que es una Recomendación

Internacional que establece las características metroológicas requeridas de ciertos instrumentos de medición donde se especifican métodos y equipos para verificar su conformidad, que son los que aplican.

Anexo 2 Referencias Normativas	
NMX-CH-140-IMNC	Guía para la Expresión de Incertidumbre en las Mediciones
NMX-Z055-IMNC-2009	Vocabulario internacional de metrología -Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM)
ISO GUM	Guía para la Expresión de Incertidumbre en las Mediciones
ISO 5168-2006	Medición de flujo de fluidos Procedimientos para la evaluación de incertidumbres
NIST- 2008	Guía para el uso del Sistema Internacional de Unidades (SI)
ISO 5168-2006	Medición de flujo de fluidos Procedimientos para la evaluación de incertidumbres
OIML R 117-1	Sistemas de medición dinámicos para líquidos distintos del agua

Figura 2. Fragmento del Anexo 2 sección I Normas generales en el diseño e instalación de sistemas, equipos e instrumentos de medida Lineamientos Técnicos en Materia de Medición de Hidrocarburos (DOF, 2021). Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5433280&fecha=15/04/2016 el 24 de agosto 2021.

Considerando la OIML R 117- 1 como guía, se tomó como base la clase de exactitud del medidor Coriolis (medición de densidad) asociado a la medición, que es de 0.3. En la Figura 3 se indican las especificaciones señaladas, Errores Máximos Permitidos (MPE) de $\pm 1.0 \text{ kg/ m}^3$, cuando se utiliza la densidad para realiza una conversión de masa a volumen y (MPE) de $\pm 5.0 \text{ kg/ m}^3$, cuando se considera la densidad a las condiciones de Presión o Temperatura para hacer la conversión con ayuda de ecuaciones del API. Para esté artículo se analizaron ambos escenarios a fin de identificar los mecanismos de reacción en caso de incumplimiento, ya sean acciones correctivas o preventivas que se deben tomar, estableciendo cada una de estas especificaciones metroológicas.

Errores máximos permitidos (MPE), y Fallos significativos en la medición:	La clase de exactitud del sistema de medición			
	0,3	0,5	1,0	1,5
Temperatura	$\pm 0,30 \text{ }^\circ\text{C}$		$\pm 0,50 \text{ }^\circ\text{C}$	
Presión	Menos de 1 MPa : Entre 1 Mpa y 4 Mpa : Más de 4 MPa :		$\pm 50 \text{ kPa}$ $\pm 5 \%$ $\pm 200 \text{ kPa}$	
Densidad (conversión de masa a volumen)	$\pm 1,0 \text{ kg/m}^3$		$\pm 2,0 \text{ kg/m}^3$	
Densidad (conversión de temperatura o presión)	$\pm 5 \text{ kg/m}^3$			

Figura 3. Errores Máximos Permitidos (MPE) para indicaciones de dispositivos asociados de Medición. Fuente OIML R 117-1 (2007)

Cada una de estas opciones se elige dependiendo de la operación que realiza el equipo de medición para obtener el valor de densidad, es decir, se selecciona:

- Conversión de masa a volumen, cuando en el equipo se realiza la medición de caudal automáticamente teniendo en cuenta las características del líquido, tomando la densidad del sensor interno del medidor para la conversión a volumen.
- Conversión de temperatura o presión, cuando se realiza la medición para la conversión a volumen, tomando las diferentes variables como presión, temperatura y densidad con dispositivos asociados que enviaran la señal al computador.

Análisis de certificados de calibración

El comportamiento de los equipos puede cambiar con el transcurso del tiempo, debido a la influencia ambiental, el desgaste natural, la exposición a una sobrecarga, o por un uso inapropiado, por esta razón los equipos son ingresados de manera periódica a la calibración. De acuerdo con el vocabulario internacional de metrología conceptos fundamentales y generales, y términos asociados, la calibración (IMNC, 2009) es el conjunto de operaciones que establecen bajo condiciones especificadas, la relación entre los valores indicados por un aparato o sistema de medición o los valores representados por una medida materializada y los valores correspondientes de la magnitud realizada por los patrones. Como evidencia de esta actividad los laboratorios emiten un certificado de calibración, que

es un documento físico o digital que contiene los resultados de la calibración, mostrando la relación existente entre las lecturas de un instrumento y los valores indicados por un patrón, de una manera exacta, clara y sin ambigüedades. El servicio de calibración al equipo de medición evaluado fue realizado por el mismo laboratorio, el cual fue seleccionado considerando:

- Acreditación ante la Entidad Mexicana de Acreditación
- La incertidumbre reportada en su tabla CMC
- Trazabilidad a Patrón Nacional de Densidad (CENAM) y National Physical Laboratory (NPL)
- Método de calibración por Comparación directa tomando como referencia la norma ISO 15212 - 2 Densímetros de tipo oscilatorio. Parte 2: Instrumentos de proceso para líquidos homogéneos
- Las mismas condiciones de proceso, para no tener una variable más que considerar

Se analizó el comportamiento del equipo durante sus dos primeros años bajo los 2 escenarios que menciona la norma OIML R 117-1 (2007), a fin de definir el mecanismo de acción en caso de seleccionar cada una de las especificaciones establecidas en la Figura 3. Para iniciar el análisis del certificado de calibración se revisó a detalle el documento emitido por el laboratorio, asegurando que la información presentada fuera la correcta, ya que si los datos del instrumento no corresponden este certificado no puede ser usado como evidencia de la realización de la calibración ante una auditoría, lo que genera conflictos de trazabilidad de las mediciones realizadas con este equipo, dentro de los aspectos analizados se encuentran:

- Fechas de calibración y emisión del certificado
- Declaración de trazabilidad metrológica
- Incertidumbre reportada
- Información de condiciones relevantes que permiten la repetición de la calibración

En la Figura 4 se pueden observar las especificaciones y los resultados dentro del certificado de calibración para el EMP y la Incertidumbre, considerando las dos especificaciones de la figura 3.

Año	Conversión Masa a Volumen			Conversión de Temperatura o Presión		
	EMP ± 1.0 kg/m ³	Incertidumbre 1/3 EMP = 0.33 kg/m ³	Confirmación Metrológica	EMP ± 5.0 kg/ m ³	Incertidumbre 1/3 EMP = 1.66 kg/m ³	Confirmación Metrológica
2020	0.10	0.33	Aprobado	0.10	0.33	Aprobado

Figura 4. Comportamiento del medidor Coriolis (medición de densidad) y su relación con la confirmación metrológica en 2020.

Como se puede observar en ambos escenarios durante el primer año se obtuvo una confirmación metrológica aprobada, sin embargo, para la especificación metrológica utilizando la conversión Masa a Volumen el resultado de incertidumbre se encuentra en el límite, por lo que se debe y se realizó un análisis de resultados como una acción preventiva que permitiera minimizar el riesgo de quedar fuera en la siguiente calibración, ya que al ser un equipo nuevo no se contaba con un histórico que permitiera predecir estadísticamente su comportamiento a través de los años. Estas acciones se resumen en la Figura 5.

2020	Confirmación Metrológica	Acción
Conversión Masa a Volumen	Aprobado	<p>Se realizó un análisis para descartar que el equipo estuviera funcionando de manera incorrecta, por lo que se:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analizó el desempeño del equipo conforme a las recomendaciones del fabricante, teniendo un comportamiento normal lo que confirma que tiene un desempeño adecuado. • Analizó el estimado de incertidumbre del laboratorio de calibración para revisar su modelo matemático, el cual arrojó que la fuente de incertidumbre de mayor contribución es la temperatura del proceso debido a la variabilidad. Por lo que se debe tener cuidado en monitorear la variabilidad de las condiciones del proceso durante la calibración para minimizar el impacto de esta variable. • Verifiqué el funcionamiento periódico del equipo para concluir que mantiene un comportamiento homogéneo. Lo que elimina la posibilidad de fallo en el resultado.

		<ul style="list-style-type: none"> Analizó la pertinencia de la especificación metrológica establecida de inicio.
Conversión de Temperatura o Presión	Aprobado	No se tomaron acciones por considerar mínimo el riesgo de quedar fuera de especificación para el año siguiente, ya que los resultados del equipo se ubicaron con un margen significativo respecto al límite inferior y superior,

Figura 5. Acciones para tomar de acuerdo con el comportamiento el medidor Coriolis (medición de densidad) en el 2020 y su relación con la confirmación metrológica.

Con base en el análisis mostrado en la Figura 5, se pudo concluir que las consideraciones para el control de la variabilidad del laboratorio de calibración contribuyó en el resultado de confirmación metrológica, sin embargo se aceptaron los resultados en espera de su comportamiento al año siguiente bajo los mismos criterios, por otro lado, se generó una hipótesis de que el equipo quedaría fuera de especificación en el escenario de conversión Masa a Volumen para el año siguiente, ya que los resultados estuvieron en el límite de especificación impidiendo contar con un intervalo de seguridad para la toma de decisión como lo establece la Guía para establecer reglas de decisión en la declaración de conformidad ILAC-G8:09/2019. Como evidencia se generó un reporte de confirmación metrológica aprobada y se etiquetó el equipo para fácil identificación del que el equipo era apto para continuar en el proceso.

Los resultados obtenidos durante el 2021 se muestran en la Figura 6, donde se comprueba la hipótesis de que la confirmación metrológica utilizando las especificaciones de conversión Masa a Volumen de la OIML R 117-1 es rechazada, ya que, aunque el criterio de EMP es aceptado, el criterio de Incertidumbre no. Por otro lado, al utilizar la conversión Temperatura o Presión el comportamiento se mantiene en el límite inferior manteniendo un desempeño constante a través de los años, validando que el equipo es apto para el uso señalado.

Año	Conversión Masa a Volumen			Conversión de Temperatura o Presión		
	EMP ± 1.0 kg/ m ³	Incertidumbre 1/3 EMP = 0.33 kg/m ³	Confirmación Metrológica	EMP ± 5.0 kg/ m ³	Incertidumbre 1/3 EMP = 1.66 kg/m ³	Confirmación Metrológica
2021	0.12	0.35	Rechazada	0.12	0.36	Aprobada

Figura 6. Comportamiento del medidor Coriolis (medición de densidad) y su relación con la confirmación metrológica en 2021.

Es importante resaltar que el declarar una especificación metrológica de manera incorrecta tiene un impacto significativo desde el aspecto económico, de proceso y legal, ya que al rechazar una confirmación metrológica significa que el equipo no es apto para su uso previsto y se deben tomar acciones para corregir esta desviación como:

1. Generar un reporte de confirmación metrológica no aprobada
2. Identificar y segregar el equipo del proceso.
3. Reemplazar el equipo por uno que tenga una confirmación metrológica aprobada.
4. Intervenir el equipo de medición.
5. Calibrar y confirmar de nuevo el equipo.
6. Tomar la decisión si el equipo regresa al proceso cuando la confirmación metrológica es aprobada o se destina a otro donde si cumpla la confirmación metrológica y por ende sea apto.

Comentarios Finales

Resumen de resultados

En este trabajo se analizó un medidor Coriolis (medición de densidad) de línea con clase de exactitud 0.3 utilizado para medir condensados de una organización cuya actividad es la exploración y extracción de hidrocarburos, para verificar el comportamiento en el tiempo de su especificación metrológica, evaluando EMP e Incertidumbre, tomando como guía la OIML R 117-1, confirmando que el desempeño del equipo y el patrón de calibración cambia con el tiempo de operación y que la especificación metrológica debe definirse con base en el proceso, ya que para este equipo aunque el primer año en ambas especificaciones cumplió, con el tiempo quedó fuera para Conversión Masa a Volumen, mientras que para Conversión Presión o Temperatura el equipo se mantiene dentro de los límites de especificación metrológica, mostrando una holgura considerable. El análisis de los resultados del informe de calibración permite generar acciones preventivas, que minimizan el riesgo de tener mediciones no conformes, lo que tiene un impacto económico de proceso, ya que al no poder demostrar ante la autoridad que el equipo es apto para el

uso planeado, se deben notificar las acciones a seguir que garanticen una medición confiable y que el proceso se realiza con equipos confirmados metrológicamente.

Conclusiones

La calibración de equipos juega un papel crucial en el aseguramiento de las mediciones, ya que permite conocer el grado de desviación que tiene en relación con un equipo patrón y con ello poder dar seguimiento a los resultados obtenidos con él, a fin de garantizar una medición confiable. Sin el análisis de la información contenida en el certificado, el costo de la calibración se convierte en un desperdicio. La correcta interpretación y análisis del certificado de calibración es una herramienta para la toma de acciones de mejora que permite:

- Relacionar los resultados de una medición individual a patrones nacionales e internacionales mediante la llamada cadena de trazabilidad, lo que permite conocer el grado de exactitud y precisión de las mediciones que realiza dicho equipo y el proceso de medición en el que está involucrado.
- Realizar la confirmación metrológica del equipo para identificar si el equipo es el apto para su uso previsto o si es necesario sustituirlo.
- Mediante el análisis histórico del equipo de medición, a través de los resultados reportados por un laboratorio de calibración dentro del certificado, es posible predecir el comportamiento de los equipos en el tiempo, para tomar decisiones oportunas en el aseguramiento de las mediciones.
- Identificar errores en el proceso de calibración o bien en el presupuesto de incertidumbre realizado por el laboratorio de calibración.
- El análisis del certificado de calibración no solo representa la visualización de los datos reportados, sino el análisis de los modelos y las consideraciones empleadas por el laboratorio para obtener dichos resultados, a fin de corroborar que la información corresponde y representa al proceso en el cual está inmerso el equipo calibrado. Ya que, la confirmación metrológica depende tanto de los resultados del certificado como de las especificaciones metrológicas para el uso previsto del equipo.

Recomendaciones

Se recomienda continuar en los años siguientes con el análisis para validar el desempeño predictivo del equipo con fundamento estadístico.

Para visualizar el impacto de la variabilidad de la temperatura de proceso, se recomienda preferentemente realizar la calibración de densidad en sitio.

Referencias

- DOF. 2015. Lineamientos técnicos en materia de medición de hidrocarburos.
- IMNC. 2009. NMX-Z-055-IMNC-2009 Vocabulario Internacional de metrología Conceptos fundamentales y generales, términos asociados
- IMNC. 2004. NMX- CC-10012-IMNC- 2004 Sistemas de Gestión de las Mediciones- Requisitos para los procesos de medición y los equipos de medición
- OIML. 2007. Sistemas dinámicos de medición para líquidos diferentes al agua Parte 1: Requisitos técnicos y metrológicos.
- Ponce A., Crisanto A., Moncada D.2021. El Impacto de la Resolución Miscelánea Fiscal (RMF) para 2021 en el Sector de Hidrocarburos en México. Academia Journals Morelia 2021.

Notas Biográficas

La **Lic. Alhelí Ponce Rodríguez** es Técnico Especializado en CIATEQ A.C. | Hidalgo. Cuenta con una Maestría en Dirección de Proyectos en la Universidad Tecnológica de México. Ha publicado artículos en la Revista Mexicana de Física, Revista de la Sociedad Química de México y la Revista Exploratoris.

El **Ing. Alejandro Crisanto Arriaga** es Gerente de Medición Multifásica de CIATEQ A.C. | Querétaro. Cuenta con una Especialidad en Métodos Estadísticos en el Centro de Investigación en Matemáticas CIMAT y es Catedrático en el posgrado de CIATEQ A.C., impartiendo la materia de probabilidad y estadística. Ha publicado artículos en la Revista Exploratoris.

El **Mtro. Jorge Pérez Vera** es Ingeniero especializado A en CIATEQ A.C. | Bernardo Quintana. Cuenta con una Maestría en Ingeniería Administrativa en el Instituto de Estudios Universitarios de Puebla. Ha publicado y participado en el 1er. Congreso y Exposición Internacional de Medición de Flujo y Calidad de los Hidrocarburos 2014.