



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Calibración de un medidor de flujo tipo
Coriolis empleando un método de
comparación directa y un
procedimiento de tipo estático para
flujo másico**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Ricardo Arturo Flores Sánchez

ASESOR DE INFORME

M.C. Arturo Ronquillo Arvizu



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

Índice

Objetivo.....	4
1. Antecedentes.....	4
2. Introducción:	7
2.1 Sistema Internacional de unidades S.I.	8
2.2 Vocabulario Internacional de la Metrología V.I.M.	9
2.3 Metrología	10
2.4 Deriva.....	10
2.5 Mensurando	11
2.6 Calibración	11
2.7 Trazabilidad metrológica	11
2.8 Error.....	12
2.9 Precisión	12
2.10 Exactitud	13
2.11 Repetibilidad	13
2.12 Reproducibilidad.....	13
2.13 Incertidumbre de medición	13
2.14 Incertidumbre estándar	14
2.15 Evaluación Tipo A de la incertidumbre de medida	14
2.16 Evaluación Tipo B de la incertidumbre de medida	14
2.17 Incertidumbre estándar combinada.....	14
2.18 Incertidumbre expandida	14
2.19 Patrón de medida.....	14
2.20 Intervalo de cobertura	15
2.21 Método de medición.	15
2.22 Procedimiento de medición.	16
2.23 Calibración por comparación directa.	16
2.24 Sensor	16
2.24.1 Sensores de flujo.....	16
2.25 Acreditación y certificación	19
2.26 Marco Legal	20
2.26.1 NMX-EC-17025-IMNC-2018	20
2.26.2 NMX-CH-140-IMNC-2002	22
3. Medidores tipo Coriolis.....	22
3.1 Principio de funcionamiento del medidor tipo Coriolis	22

3.2 Partes que integran a un sensor tipo Coriolis	24
3.3 Funcionamiento del medidor tipo Coriolis.....	26
4. Procedimiento utilizado	29
4.1 Recepción de solicitud de calibración.	29
4.2 Selección de equipos patrón a emplear	30
4.3 Llenado de formato de condiciones de trabajo.	30
4.4 Instalación mecánica del instrumento en el circuito de calibración.	31
4.5 Pruebas hidrostáticas	33
4.6 Instalación eléctrica del instrumento en el circuito de calibración.....	33
4.7 Ajuste de cero de los medidores y ambientación del sistema	34
4.8 Configuración de unidades y totalizados en caudal másico.	35
4.9 Arranque de bomba para comenzar con la calibración.	35
4.10 Toma de lecturas durante cada corrida de calibración.....	35
4.11 Cálculo de los resultados obtenidos	36
4.12 Evaluación de los flujos subsecuentes.....	38
4.13 Etiquetado señalizador de calibración.	38
4.14 Carga de configuraciones al término de la calibración.....	38
4.15 Desmontaje eléctrico del instrumento en el circuito de calibración.	38
4.16 Desmontaje mecánico del instrumento en el circuito de calibración.	39
4.17 Entrega del instrumento al cliente.....	39
4.18 Generación del reporte que avale el servicio.	39
4.19 Generación del certificado de calibración.	41
4.20 Entrega de documentos al cliente.	44
5. Resultados.....	47
Conclusiones:	48
Bibliografía:	49
Anexos:.....	51
Anexo A Cálculos para obtener error y repetibilidad.....	51
Anexo B Tabla de cálculo de incertidumbres.....	54

Objetivo

El objetivo del presente documento es describir el proceso de calibración de un medidor de flujo másico, cuyo principio de funcionamiento es el efecto Coriolis, empleando un banco de calibración, así como un método de comparación directa en flujo másico, dicho proceso se encuentra regulado por las entidades mexicanas de acreditación, apegándose a normas y estándares vigentes.

1. Antecedentes

Kalibra Systems Industry es una empresa fundada el 22 de junio del año 2022, la cual en conjunto con el laboratorio de la marca internacional Endress + Hauser se dedican a brindar servicios de confiabilidad y transparencia en el campo de calibración de instrumentación en plantas industriales. En conjunto las empresas ofertan el servicio de calibración así como comisionamiento de instrumentos en un amplio mercado a través de diversos sectores de la industria, por ejemplo, F&B (alimentos y bebidas), farmacéuticas, químicas o hidrocarburos. A partir de la fecha indicada Kalibra Systems se ha dedicado a prestar sus servicios en el ámbito de las calibraciones de instrumentación en plantas industriales en conjunto con dicha empresa.

Dentro de la empresa Kalibra Systems se ocupó el puesto de ingeniero de calibración y servicio, cuyas principales responsabilidades se centraron en coordinar la calibración para las solicitudes de los distintos clientes, llevando a cabo este servicio, el cual comprende en un inicio validar la información del contacto con el cliente, de igual forma aclarar los detalles de la visita a sus instalaciones para llevar a cabo dicho servicio, posteriormente examinar las características del equipo para el cual se realizará el servicio de calibración; una vez conociendo el equipo a calibrar es necesario reunir el tipo de conexiones requeridas para poder montar el instrumento bajo calibración (I.B.C.) al circuito en el que se realizará dicho servicio, es decir, seleccionar de forma apropiada el tipo de material a recolectar; así como el debido transporte y traslado de dicho material. Aunado a ello, el ingeniero de calibración, es responsable de la correcta emisión de los certificados de calibración, los cuales avalan el estado del instrumento.

Tradicionalmente, en función del campo de aplicación, la metrología se suele clasificar en tres categorías:

- Metrología Fundamental o Científica: su objetivo es el desarrollo y mantenimiento de los patrones de medida, realizaciones prácticas de las definiciones de las unidades correspondientes.

La metrología fundamental se desarrolla en un colectivo muy limitado, usualmente institutos nacionales de metrología y organismos de investigación, aplicando desarrollos, técnicas y principios que requieren un alto nivel tecnológico.

– Metrología Aplicada o Industrial: relacionada con el aseguramiento de la exactitud de los instrumentos de medida utilizados en los procesos productivos y de control de la industria.

La metrología aplicada requiere de un nivel tecnológico medio y afecta a un colectivo no tan amplio, que incluye normalmente organismos y laboratorios que realizan ensayos y calibraciones en productos, incluyendo las propias industrias.

– Metrología Legal: enfocada al aseguramiento de la exactitud de los instrumentos de medida cuyos resultados puedan tener influencia sobre la transparencia de las transacciones comerciales, la salud o la seguridad de consumidores y usuarios, así como sobre el medio ambiente.

La metrología legal, dado su objetivo y campo de actuación, afecta a un gran número de usuarios y su nivel tecnológico es bajo, tal como se ilustra a continuación¹.

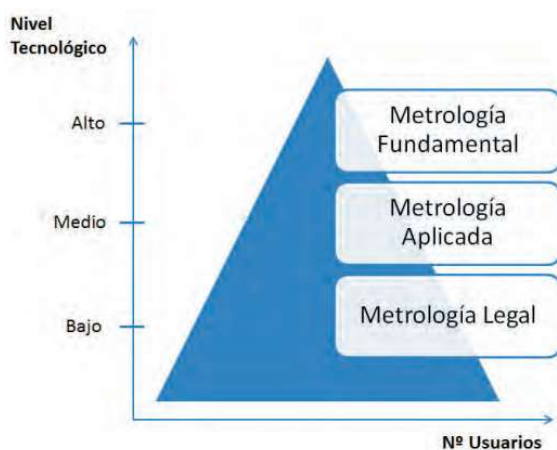


Figura 1 Clasificación de la metrología.²

Por lo anterior, en este reporte se abordará la calibración partiendo desde el enfoque de la metrología aplicada, específicamente para un caso práctico en la industria alimenticia, dado que este sector, cuenta con una amplia relevancia para la ingeniería, ya que se busca la exactitud de los instrumentos de medición empleados para los procesos, los cuales en muchas ocasiones forman parte fundamental de complejas líneas de producción, tales como un medidor de flujo por cuyo interior circulan productos como materias primas en

¹ Comité de Metrología del Instituto de la Ingeniería de España. (Diciembre 2019). *La Metrología también existe*. España. Editorial: Centro Español de Metrología.

² Ibid., p. 19

líneas. Razón por la cual es necesario que los instrumentos operen bajo condiciones conocidas monitoreando su desempeño y conociendo sus características de operación.

La metrología aplicada, es una herramienta que protege a la industria de medidas incorrectas y promueve el desarrollo comercial al fomentar la competencia leal y prohibir la comercialización de productos que no satisfacen los requisitos técnicos y metrológicos establecidos en las regulaciones de los Estados.

En la industria los instrumentos de medida, se utilizan para determinar las propiedades de los componentes y de los productos terminados y se emplean cada vez más para controlar, regular, automatizar y monitorear procesos (metrología en proceso). Se emplean mediciones para verificar las tolerancias de fabricación y la operatividad funcional de los productos. Las mediciones son un componente crucial para asegurar que el producto terminado cumpla con los requisitos establecidos.

La metrología ayuda a la industria a:

- Mejorar la calidad de los productos, a partir de la mejora de las mediciones y métodos de control.
- Aumentar la competitividad. Promueve el desarrollo de sistemas de medida, análisis y ensayo.
- Disminuir las pérdidas por defectos (pocos rechazos).
- Asegurar la intercambiabilidad de las partes y componentes a través de medidas trazables.
- Mayor normalización internacional.
- Proporcionar confianza en los productos a través de las mediciones realizadas con incertidumbres reducidas y conocidas, y la utilización de procedimientos apropiados de evaluación de la conformidad.
- Reconocimiento y aceptación de productos en los distintos mercados (mercado globalizado).
- Generar conocimiento.

La medición sistemática, con un nivel de incertidumbre conocido, es una de las bases para garantizar la satisfacción del cliente, así como para evitar fabricar productos defectuosos y, en general, en las industrias más modernas, el coste de las mediciones supone del 10% al 15 % de los costes de producción.³

Un equipo debe ser calibrado cuando:

- La exactitud o la incertidumbre de medición afectan la validez de los resultados

³ Ibid., P37

informados.

- Se requiere establecer la trazabilidad metrológica de los resultados informados.
- Los tipos de equipos que tienen efecto sobre la validez de los resultados informados pueden incluir aquellos utilizados para:
- La medición directa del mensurando
- La realización de correcciones al valor medido, por ejemplo, las mediciones de temperatura.
- La obtención de un resultado de medición calculada a partir de magnitudes múltiples.⁴

En el ámbito industrial y apegándose a las normatividades, los sectores de producción requieren contar con un documento emitido por un órgano evaluador de la conformidad, es decir, un certificado de calibración, el cual refleje el estado operativo de cada instrumento de medición, dicho documento deberá contar dentro de sus características con el mensurando, el error encontrado durante la prueba, repetibilidad e incertidumbre asociada con el instrumento calibrado, buscando de esta forma dar cabal cumplimiento a un sistema de gestión de la calidad. Es por ello que en el presente reporte se describe a fondo el proceso a seguir para llevar a cabo una calibración conforme a las normas vigentes. Para lo cual se comienza recibiendo una solicitud por parte del cliente para realizar el correspondiente servicio de calibración, finalizando dicho proceso con la entrega de un certificado de calibración, comprendiendo el proceso desde la recepción del instrumento a calibrar hasta su entrega al cliente.

2. Introducción:

La metrología juega un papel fundamental en el sostenimiento de una sociedad eficiente y tecnológicamente justa. El Centro Nacional de Metrología, CENAM, fue creado con el fin de apoyar al sistema metrológico nacional y entre sus funciones principales está el establecimiento y el mantenimiento de los patrones nacionales de medida y materiales de referencia certificados, mediante los cuales es posible asegurar la uniformidad entre las mediciones que se realizan en México. El avance de la tecnología y las exigencias de competitividad de los mercados fomentan el desarrollo tecnológico de los sectores productivos maduros, dinámicos y emergentes.⁵

La medición está en todas partes jugando un papel vital en nuestras vidas. La metrología es la ciencia y la práctica de la medición y sus objetivos son que las mediciones sean estables, comparables y coherentes. El logro de estos objetivos se realiza proporcionando

⁴ Comité de Metrología del Instituto de la Ingeniería de España. (Diciembre 2019). *La Metrología también existe*. España. Editorial: Centro Español de Metrología.

⁵ Centro Nacional de Metrología, (06 de junio de 2023). *Acerca del CENAM, ¿Quiénes somos?*. Gobierno de México. Recuperado del 29-01-2024.

la infraestructura para que las mediciones se realicen con instrumentos calibrados en referencia con los patrones nacionales (trazables).⁶

El Centro Nacional de Metrología (CENAM) forma parte del sector coordinado de la Secretaría de Economía y fue creado con el fin de apoyar al sistema metrológico nacional, como un organismo descentralizado, de acuerdo con el artículo 29 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.⁷

Es el laboratorio nacional de referencia en materia de mediciones, responsable de establecer y mantener los patrones nacionales de medida, necesarios para alcanzar la uniformidad y confianza en las mediciones de naturaleza física y química que se realizan en México de manera cotidiana, contribuyendo a la protección de la salud y la seguridad de la población, al cuidado del ambiente, a la equidad de las transacciones comerciales y a la competitividad de la industria nacional. Estos patrones propician que las mediciones dentro del país sean comparables y, gracias a su participación en comparaciones internacionales, contribuyen a que también lo sean con las correspondientes de otras economías con las cuales México tiene relaciones comerciales.

La primera actividad del CENAM en metrología está orientada al desarrollo, establecimiento, conservación y disseminación de patrones nacionales de las magnitudes eléctricas, físicas, mecánicas, químicas y biológicas, que aseguran la confiabilidad metrológica de los servicios de medición y calibración que ofrece a sus usuarios. Su trabajo se ha orientado a conseguir que los patrones nacionales sean del tipo patrón primario, con el propósito de asegurar que el origen de la trazabilidad de los patrones nacionales esté en el CENAM. Actualmente cuenta con 68 patrones nacionales de medida establecidos y se ha logrado la reproducción de las unidades de longitud, el metro (m), de la intensidad luminosa, la candela (cd), y de la temperatura termodinámica, el kelvin (K); así como la adopción del prototipo internacional del kilogramo (kg) para la unidad de masa, además de la realización experimental de la unidad de tiempo, el segundo (s). Todas las anteriores son unidades base del Sistema Internacional (SI). También se logró la reproducción de las unidades derivadas del SI de tensión eléctrica, el volt (V), y de resistencia eléctrica, el ohm (Ω).⁸

2.1 Sistema Internacional de unidades S.I.

El Sistema Internacional de Unidades tuvo sus orígenes en 1875 en Francia, en la llamada convención del metro, en donde se estableció la Agencia Internacional de Pesas y

⁶ Lizardi Nieto V.J., González Rojano N., (10 de mayo de 2016). Mundo Nano, Vol. 9, No. 16, p.p. 169

⁷ *Ibidem*

⁸ *Ibidem*

Medidas. Sentando así las bases para reconocer al metro y al kilogramo como unidades atribuidas a longitud y peso.

Hoy en día el órgano con mayor autoridad en cuanto a asuntos correspondientes a medidas y pesos es la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM).

En algunos países persistía la incongruencia en cuanto a unidades internacionales. Para ello, en 1954, durante la décima CGPM; se introdujo un sistema de seis unidades básicas. Este sistema se denominó *Systeme International d'Unités* o SI. Reuniones posteriores permitieron hacer modificaciones al sistema. En 1971, durante la décima cuarta reunión del CGPM, se agregó la séptima unidad básica, el mol; dicha unidad representa una cantidad determinada de sustancia. El esfuerzo invertido culminó durante la trigésima Asamblea de la Organización Mundial de la Salud, celebrada en 1977. Fue en ese entonces que se recomendó la integración y adopción del SI desarrollado por la CGPM. Debido a ello, el SI se emplea en los siguientes países: Holanda, Finlandia, Nueva Zelanda, Suecia, Noruega, Alemania, Hungría, Estados Unidos de América y México, entre otros.⁹ Las unidades básicas que conforman el SI son las siguientes:

Magnitud	Unidad	Símbolo	Definición:
longitud	metro	m	Es la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío en un lapso de 1/299 792 458 de segundo, (17ª CGPM, 1983).
masa	kilogramo	kg	Es la masa igual a la del prototipo internacional del kilogramo, (1ª y 3ª CGPM, 1889 y 1901)
tiempo	segundo	s	Es la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133 (13ª CGPM, 1967).
corriente eléctrica	ampere	A	Es la intensidad de una corriente constante que mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos de longitud infinita, de sección circular despreciable, colocados a un metro de distancia entre sí, en el vacío, producirá entre ellos una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud (9ª CGPM, 1948).
temperatura termodinámica	kelvin	K	Es la fracción de 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (13ª CGPM, 1967)
intensidad luminosa	candela	cd	Es la intensidad luminosa en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} hertz y cuya intensidad energética en esa dirección es 1/683 watt por esterradián (16ª CGPM, 1979).
cantidad de sustancia	mol	mol	Es la cantidad de sustancia que contiene tantas entidades elementales como existen átomos en 0,012 kg de carbono 12 (14ª CGPM, 1971).

Tabla 1 Unidades base del SI¹⁰

2.2 Vocabulario Internacional de la Metrología V.I.M.

Como en todas las comunidades, la constituida por los estudiosos y usuarios de la metrología requieren de un medio de comunicación formal, escrito, una terminología que

⁹ Lopez Avilés M. y Gómez Dantés O. (1988). *El sistema Internacional de Unidades*. Vol. 30. No. 6, p.p. 906-907.

¹⁰ Nava Jaimes H. y Pezet Samdoval F. (2001). *El Sistema Internacional de Unidades (SI)*. México. Editorial: CENAM.

permita el desempeño de las actividades de la disciplina. El Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) compendia dicha terminología.

La preparación de la nueva versión del VIM inició en 1997, por un Comité Conjunto constituido originalmente con representantes de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), de la Federación Internacional de Química Clínica y de Biología Médica (IFCC), de la Organización Internacional de Normalización (ISO) de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP) y de la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) a quienes se unió posteriormente la Cooperación Internacional sobre Acreditación de Laboratorios (ILAC).

Después de haber recibido comentarios sobre un primer borrador emitido en 2004, y ser comprendidos los vertidos por numerosos Institutos Nacionales de Metrología, los ocho organismos participantes aprobaron el documento por unanimidad que fue publicado por la ISO en diciembre de 2007. Para conformar la versión del VIM en español, se ha tomado la iniciativa de unificar los esfuerzos de los países hispanohablantes para obtener una versión única, iniciativa que fue aceptada por los países hispanohablantes que conforman el Sistema Interamericano de Metrología y por España.¹¹

El Vocabulario Internacional de la Metrología es la base para entender las distintas definiciones y conceptos que se emplean en el ámbito de las mediciones, favoreciendo así la unificación de criterios durante cualquier procedimiento de medición.

2.3 Metrología

Existen diversas definiciones respecto al significado de la metrología por ejemplo:

-La definición del término metrología en la norma mexicana NMX-Z-044:1996.IMNC.Metrología. Vocabulario de términos fundamentales y generales (VIM) es: La metrología es la ciencia de la medición, comprendiendo las determinaciones experimentales y teóricas a cualquier nivel de incertidumbre en cualquier campo de la ciencia.

-Mientras que para el V.I.M. la definición de metrología es: ciencia de las mediciones y sus aplicaciones.

2.4 Deriva

Variación continua o incremental de una indicación a lo largo del tiempo, debida a variaciones de las características metrológicas de un instrumento de medida.

¹¹ Lazos Martinez, R. y Pezet Sandoval F. (2008). *¿Qué tan Nuevo es el Nuevo Vocabulario Internacional de Metrología?*. Santiago de Querétaro, México. Simposio de Metrología.

2.5 Mensurando

Magnitud que se desea medir¹².

2.6 Calibración

Operación que bajo condiciones específicas establece, en una primera etapa, una relación entre valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información, para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación como se ilustra a continuación¹³.

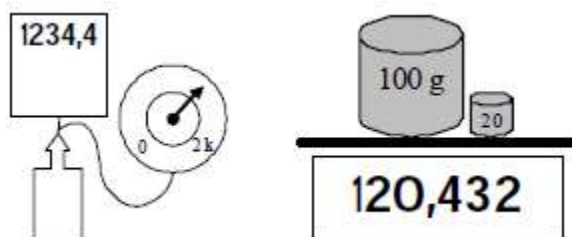


Figura 2 Calibración.¹⁴

2.7 Trazabilidad metrológica

Trazabilidad metrológica es la propiedad del resultado de una medición por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.

La medición trazable y confiable forma la base de nuestra sociedad moderna y tiene una función crítica en el apoyo a la competitividad económica, a la manufactura y al comercio, así como en la calidad de vida en donde también la salud y el ambiente influyen.¹⁵ En la siguiente imagen se hace una representación respecto a la cadena de trazabilidad ininterrumpida.

¹² Sáez Pueyo C. (11 de junio de 1986). *NORMA Oficial Mexicana de Metrología NOM-Z-55-1986 Metrología-Vocabulario de Términos Fundamentales y Generales*. Ciudad de México. Diario Oficial de la Federación. Centro Español de Metrología. (2012).

¹³ Metrólogos Asociados (julio de 2005). *Métodos de: Medición, Prueba y Calibración*. Zapotlán El Grande, Jalisco, México.

¹⁴ *Ibidem.*, p. 6

¹⁵ Lizardi Nieto V.J., González Rojano N., (10 de mayo de 2016). *Mundo Nano*, Vol. 9, No. 16, p.p. 169



Figura 3 Cadena de trazabilidad¹⁶

2.8 Error

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

En general, una medición tiene imperfecciones, las cuales dan origen a una diferencia en el resultado de una medición.

2.9 Precisión

Proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.

En la figura 4(a), se muestran valores poco precisos, mientras que en la figura 4(b), se muestran valores más precisos, lo cual indica mayor proximidad entre ellos.

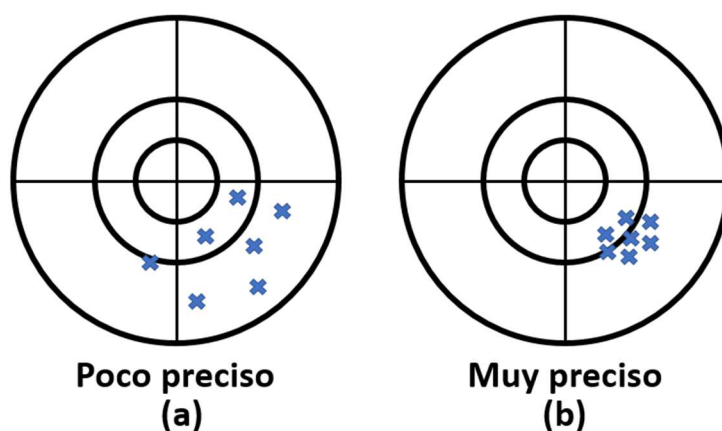


Figura 4 Ejemplo Exactitud (elaboración propia)

¹⁶ Laurila, H. (27 de noviembre de 2019). Ilustración de cadena de trazabilidad. Recuperado de: <https://goo.su/OzeJ0>

2.10 Exactitud

Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando.

En la figura 5(a), se muestran valores poco exactos, es decir, más alejados de un valor real, representado por el centro de la diana, mientras que en la figura 4(b), se muestran valores más exactos, lo cual indica mayor cercanía entre el valor real y los valores mostrados.

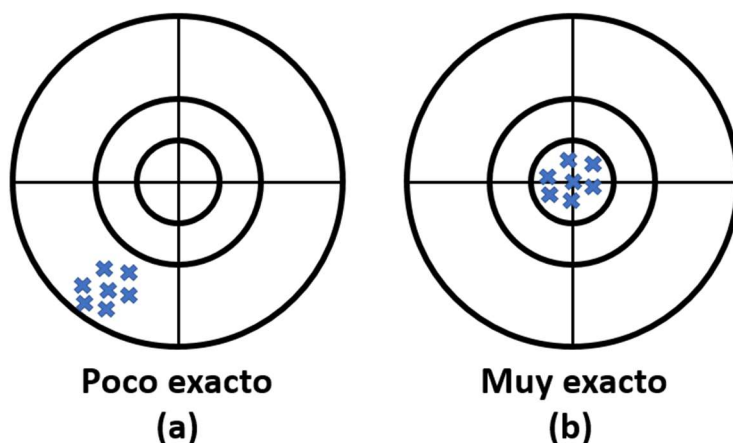


Figura 5 Ejemplo precisión (elaboración propia)

2.11 Repetibilidad

Precisión de medida bajo un conjunto de las mismas condiciones. (VIM). Es decir, proximidad entre las indicaciones o valores bajo un conjunto de las mismas condiciones.

2.12 Reproducibilidad

Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones distintas. (VIM). Es decir, proximidad entre las indicaciones o valores bajo un conjunto de condiciones distintas.

2.13 Incertidumbre de medición

Tomando como referencia la norma NOM-Z-55-IMNC, podemos definir el concepto de incertidumbre de medición como: “Parámetro asociado con el resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores, que razonablemente pudiera ser atribuida al mensurando.”¹⁷

De igual forma el VIM, nos proporciona otra definición para este concepto, el cual será empleado en este trabajo, el cual nos define la incertidumbre de medición como un

¹⁷ Metrología y sus aplicaciones NMZ-Z-055-IMNC

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

2.14 Incertidumbre estándar

Incertidumbre del resultado de una medición expresada como una desviación típica.

2.15 Evaluación Tipo A de la incertidumbre de medida

Evaluación de una componente de la incertidumbre de medida mediante un análisis estadístico de los valores medidos obtenidos bajo condiciones de medida definidas.

2.16 Evaluación Tipo B de la incertidumbre de medida

En este caso para facilitar la comprensión del concepto se podría decir que es la evaluación de este tipo de incertidumbre obtenida mediante documentos técnicos. Como por ejemplo las incertidumbres:

- Asociadas a valores publicados y reconocidos.
- Asociadas al valor de un material de referencia certificado.
- Obtenidas a partir de un certificado de calibración.
- Relativas a la deriva.
- Obtenidas a partir de la clase de exactitud de un instrumento de medida verificado.
- Obtenidas a partir de los límites procedentes de la experiencia personal.

2.17 Incertidumbre estándar combinada

Incertidumbre típica obtenida a partir de las incertidumbres típicas individuales asociadas a las magnitudes de entrada de un modelo de medición.

Incertidumbre estándar del resultado de una medición cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de algunas otras magnitudes ponderadas considerando el resultado de la medición que varía respecto al cambio en estas magnitudes [NMX-Z-055-IMNC].

2.18 Incertidumbre expandida

Producto de una incertidumbre típica combinada y un factor mayor que uno.

2.19 Patrón de medida

Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor y una incertidumbre de medida asociada tomada como referencia.¹⁸

Un ejemplo de ellos son los patrones nacionales desarrollados por el CENAM ya que estos son las referencias que le dan coherencia a las mediciones que se realizan en el país y su

¹⁸ Instituto Mexicano de Normalización y Certificación. (2009). Vocabulario Internacional de metrología-Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM). IMNC

exactitud se disemina por medio de servicios de calibración hacia los patrones de los laboratorios secundarios e industriales, los cuales mantienen la infraestructura de la medición en los sectores productivos, comerciales y sociales. Un claro ejemplo de un patrón de medida se muestra a continuación:



Figura 6 Patrón de masa¹⁹

2.20 Intervalo de cobertura

Intervalo que contiene el conjunto de valores verdaderos de un mensurando con una probabilidad determinada, basada en la información disponible.

2.21 Método de medición.

Sucesión lógica de las operaciones, descritas de una forma genérica, utilizadas en la ejecución de las mediciones.

Existen diferentes métodos de medición, cada uno de ellos utiliza una amplia gama de técnicas y enfoques, para la selección de algún tipo de método de medición se debe de considerar al menos los siguientes factores:

- Exactitud requerida,
- Costo,
- Tiempo,
- Conveniencia, y
- Disponibilidad de equipos.

Dentro del método de medición podemos encontrar el método de medición directa, en este método se obtiene un valor en unidades del mensurando, mediante un instrumento, cadena o sistema de medición, digital o analógico, en forma de: indicador, registrador, totalizador o integrador. El sensor del instrumento es colocado directamente en contacto con el fenómeno que se mide.

¹⁹ Nava Jaimes H. y Pezet Samdoval F. (2001). El Sistema Internacional de Unidades (SI). México. Editorial: CENAM.

Un ejemplo de un método de medición directa es la medición de volumen en base al principio de Arquímedes como se muestra a continuación:

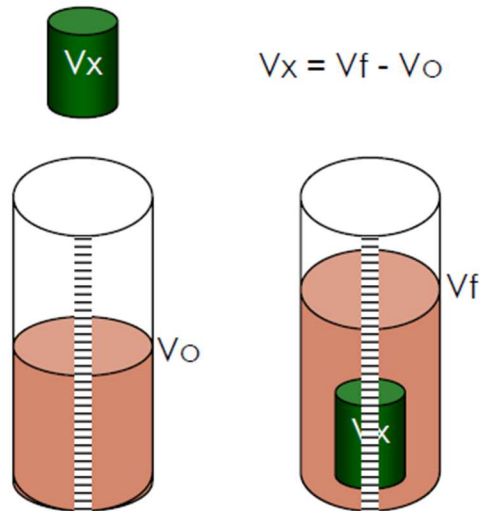


Figura 7 Método directo²⁰.

2.22 Procedimiento de medición.

Conjunto de operaciones, descrito específicamente, para realizar mediciones particulares de acuerdo a un método determinado.

Un procedimiento de medición es usualmente descrito con ese nombre, con suficiente detalle que permite al operador efectuar una medición sin información adicional.²¹

2.23 Calibración por comparación directa.

En este método se comparan directa e instantáneamente los valores proporcionados por el equipo bajo calibración, contra los valores proporcionados por un patrón.

2.24 Sensor

Un sensor es un dispositivo que se encuentra en contacto con el proceso el cual es capaz de medir magnitudes físicas o químicas llamadas variables de proceso, y transformarlas en variables eléctricas, es decir, generar una salida.

2.24.1 Sensores de flujo

Dentro de la industria existen diversos tipos de sensores los cuales empleando distintos principios de funcionamiento logran la cuantificación de flujo, por ejemplo:

²⁰ Metrólogos Asociados (julio de 2005). *Imagen principio de arquímedes*. Zapotlán El Grande, Jalisco, México.

²¹ Metrólogos Asociados (julio de 2005). *Métodos de: Medición, Prueba y Calibración*. Zapotlán El Grande, Jalisco, México.

➤ Sensores tipo electromagnéticos

El principio de funcionamiento bajo el cual operan este tipo de sensores es el de la ley de Faraday, la cual señala que el voltaje inducido es proporcional a la variación en un campo magnético. En resumen, este tipo de sensores no cuantifican el volumen sino la velocidad del fluido que pasa en su interior para posteriormente determinar el flujo volumétrico mediante cálculos²². A continuación, se ilustra un ejemplo con respecto a los sensores de flujo electromagnéticos.

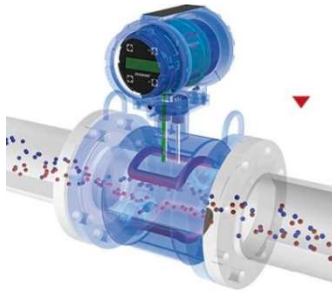


Figura 8 Sensor electromagnético²³

➤ Sensores tipo turbina

Los medidores de turbina consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal, la velocidad del fluido ejerce una fuerza de arrastre en el rotor; la diferencia de presiones debidas al cambio entre el rotor y el cono posterior ejerce una fuerza igual y opuesta.²⁴

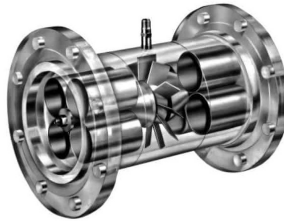


Figura 9. Sensor tipo turbina²⁵

²² Piña, P. (01 de abril de 2020). *Medidor de flujo electromagnético*. Recuperado de: <https://0grados.com/sensor-de-flujo-electromagnetico/>

²³ *Idem*.

²⁴ Carbonó de la Rosa, M. E. y Aislant Antolines, I. A., (2010), *Diseño y Construcción de un sensor de flujo tipo turbina para flujo no uniforme*. 1ra edición, Bucaramanga, Ed. Universidad Pontificia Bolivariana Escuela de Ingeniería y Administración.

²⁵ Villajulca, J.C. (14 de octubre de 2009). *Medidor A Turbina*. Recuperado de: <https://instrumentacionycontrol.net/flujo-medidores-de-area-variable-magneticos-turbina-vortice-y-flujo-total/>

➤ Sensores ultrasónicos

Este tipo de sensores funcionan según el principio de la diferencia de tiempo de tránsito de una señal. Una señal acústica (ultrasónica) se transmite en ambos sentidos desde un sensor de medición a otro. Dado que la velocidad de propagación de las ondas es menor cuando las ondas viajan contra la dirección de flujo que cuando lo hacen en la misma dirección, se obtiene una diferencia de tiempo en el tránsito de la señal. Esta diferencia es directamente proporcional a la velocidad del caudal. Por lo cual se calcula el caudal a partir del área de la sección transversal de la tubería y la diferencia de tiempo de tránsito de la señal.²⁶

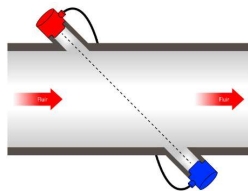


Figura 10. Sensor tipo ultrasónico²⁷

➤ Tipo vortex

Los sensores vortex funcionan según el principio de Karman. Cuando un fluido se encuentra con un cuerpo de interferencia, a cada lado del cuerpo se forman y se desprenden alternativamente vórtices con sentidos de giro opuestos. Cada uno de estos vórtices genera una caída de presión local. El sensor registra estas fluctuaciones de presión y las convierte en pulsos eléctricos. Los vórtices se forman con una gran regularidad dentro de los límites de aplicabilidad del equipo. De este modo, la frecuencia del desprendimiento de los vórtices resulta ser directamente proporcional al caudal volumétrico.²⁸

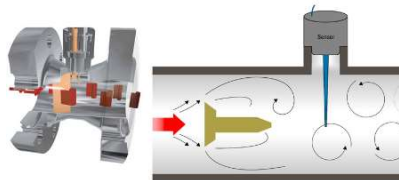


Figura 11 Sensor tipo Vortex²⁹

²⁶ Endress + Hauser, (2006), La Guía de Mantenimiento: Medición de Caudal, España, Editorial: Endress + Hauser, pag. 42.

²⁷ García D. (8 de enero de 2024). *Medición de Líquidos y Gases: 4 Tipos de Medidores de Flujo para Petróleo y Gas.*

²⁸ Endress + Hauser, (2006), La Guía de Mantenimiento: Medición de Caudal, España, Editorial: Endress + Hauser, pag. 40.

²⁹ García D. (8 de enero de 2024). *Medición de Líquidos y Gases: 4 Tipos de Medidores de Flujo para Petróleo y Gas.*

➤ Sensores del tipo másicos por dispersión térmica

El principio de dispersión térmica consiste en monitorizar el efecto de enfriado del vapor de gas cuando pasa por un transductor calentado (Pt100). Un gas que circula por la sección activa del sensor pasa por dos transductores Pt100 RTD, uno de los cuales se utiliza como sensor de temperatura convencional, mientras que el otro se emplea como sistema de calefacción. El sensor de temperatura registra los valores de proceso en curso mientras el sistema de calefacción se mantiene sobre el primero a una diferencia de temperatura constante haciendo variar la potencia consumida por el sensor. Cuanto mayor es el caudal másico, mayor resulta el efecto de enfriado y la potencia requerida para mantener la diferencia de temperatura. Por lo tanto, la potencia consumida por el sistema de calefacción es una medida de la velocidad del caudal másico del gas.³⁰

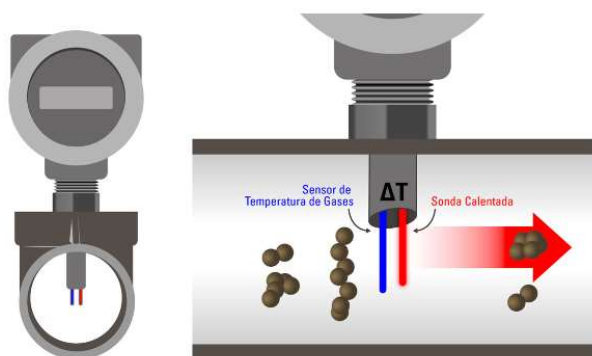


Figura 12. Sensor tipo dispersión térmica.³¹

2.25 Acreditación y certificación

La Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), fundada en 1999, es la primera entidad de gestión privada en nuestro país, que tiene como objetivo acreditar a los Organismos de la Evaluación de la Conformidad que son los laboratorios de ensayo, laboratorios de calibración, laboratorios clínicos, unidades de verificación (organismos de inspección) y organismos de certificación, Proveedores de Ensayos de Aptitud y a los Organismos certificadores/Validadores de Emisión de Gases Efecto Invernadero (OVV GEI) Productores de Materiales de Referencia y la autorización de Buenas Prácticas de Laboratorio de la OCDE.

Dicha entidad define acreditación como el acto por el cual una entidad de acreditación reconoce la competencia técnica y confiabilidad de los laboratorios de ensayo, laboratorios de calibración, laboratorios clínicos, unidades de inspección (organismos de inspección),

³⁰ Endress + Hauser, (2006), *La Guía de Mantenimiento: Medición de Caudal*, España, Editorial: Endress + Hauser, pag. 44.

³¹ García D. (8 de enero de 2024). *Medición de Líquidos y Gases: 4 Tipos de Medidores de Flujo para Petróleo y Gas*.

proveedores de ensayos de aptitud, productores de materiales de referencia y organismos de certificación para la Evaluación de la Conformidad. Contar con dicha acreditación implica contar con una igualdad de competencia, así como el aseguramiento de la calidad en los productos o servicios.³²

Por otro lado, se define certificación como procedimiento realizado por un organismo de certificación acreditado para asegurar que un producto, proceso, sistema o servicio se ajuste a las normas o lineamientos. Evaluando con base en la norma ISO 9001 orientada solamente al sistema de gestión de calidad. Dado el alcance de la norma ISO 9001 no se evalúan competencias técnicas del laboratorio.

2.26 Marco Legal

Para un servicio de calibración es de suma importancia apegarse a las normativas vigentes para poder ejecutar de forma adecuada las actividades realizadas, es por ello que en torno a este tipo de servicios se encuentran presentes distintas normas y estándares de suma importancia ya que contribuyen al correcto desempeño de los organismos evaluadores en sus procesos, como los laboratorios, dentro de la normativas que impactan a este sector se encuentran algunas como la norma internacional ISO 9001 correspondiente a los Requisitos de los Sistemas de Gestión de Calidad, la norma mexicana NMX-Z-055-2009 correspondiente al Vocabulario Internacional de metrología (VIM), la norma internacional ISO/IEC 17000 correspondiente a la evaluación de la conformidad.

Así mismo existen dos normas de suma importancia para el personal que forma parte de un laboratorio de calibración, como lo son: la norma internacional ISO/IEC 17025:2017 o NMX-EC-17025-IMNC-2018 la cual dicta los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Por otra parte se encuentra la norma NMX-CH-140-IMNC-2002, Guía para la expresión de Incertidumbre en las mediciones.

2.26.1 NMX-EC-17025-IMNC-2018

En el marco normativo relacionado al tema de organismos de evaluación de la conformidad deben tener presentes normas y estándares tales como la norma internacional ISO/IEC 17025 correspondiente a Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. La cual contiene apartados relativos a la imparcialidad, laboratorio, verificaciones, confidencialidad, la estructura con la que debe contar un laboratorio, así como lo relativo al personal que integra este organismo, el equipamiento, contar con un programa de calibración de sus instrumentos, identificación de los instrumentos patrón así como sus registros, establece de igual forma lo relativo a la trazabilidad metrológica.

³² Entidad Mexicana de Acreditación, Página Principal de la EMA. Recuperado del 31-01-2024 de https://www.ema.org.mx/portal_v3/index.php/que-es-ema#arribaEma

De igual forma aborda aspectos que competen a este trabajo como:

- Requisitos comunes para los Informes (Ensayo, calibración o muestreo).
 - Un título.
 - Nombre y la dirección del laboratorio.
 - Lugar en el que se realizaron las actividades.
 - Una identificación única de que todos sus componentes se reconocen como una parte de un informe completo y una clara identificación al final.
 - El nombre y la información del contacto del cliente.
 - La identificación del método utilizado.
 - Una descripción, una identificación inequívoca y, cuando sea necesario la condición del ítem.
 - La fecha de recepción de los ítems de calibración o ensayo, y la fecha del muestreo, cuando esto sea crítico para la validez de los resultados.
 - Las fechas de ejecución de la actividad del laboratorio.
 - La fecha de emisión del informe.
 - La referencia al plan y método de muestreo usados por el laboratorio u otros organismos, cuando sean pertinentes para la validez o aplicación de los resultados.
 - Una declaración acerca de que los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo, calibración o muestreo.
 - Los resultados con las unidades de medición, cuando sea apropiado.
 - Las acciones, desviaciones o exclusiones del método.
 - La identificación de las personas que autorizan el informe.
 - Una identificación clara cuando los resultados provengan de proveedores externos.
- Requisitos Específicos para los certificados de calibración.
 - La incertidumbre de medición del resultado de medición presentado en la misma unidad que la de la unidad del mensurando o en un término relativo a dicha unidad.
 - Las condiciones en las que se hicieron las calibraciones, que influyen en el resultado de la medición.
 - Una declaración que identifique cómo las mediciones son trazables metrológicamente.
 - Los resultados antes y después de cualquier ajuste o reparación, si está disponible.
 - Cuando sea pertinente, una declaración de conformidad con los requisitos o especificaciones.
 - Cuando sea apropiado opiniones e interpretaciones.
- Información del muestreo
 - La fecha del muestreo.
 - La identificación única del ítem o material sometido a muestreo (incluido el nombre de fabricante, el modelo o tipo de designación y los números de serie, según sea apropiado).
 - La ubicación del muestreo, incluido cualquier diagrama, croquis o fotografía.

- Una referencia al plan y método de muestreo.
- Los detalles de cualquier condición ambiental durante el muestreo, que afecte la interpretación del resultado.
- La información requerida para evaluar la incertidumbre de medición para ensayos o calibraciones subsiguientes.

2.26.2 NMX-CH-140-IMNC-2002

La Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones, establece las reglas generales de evaluación y expresión de incertidumbre, sin embargo, no establece formatos de cálculo específicos.

Esta guía es empleada generalmente por los laboratorios que llevan a cabo sus propias calibraciones en el momento en que elaboran sus procedimientos, señala que un laboratorio de calibración o ensayos, que realiza sus propias calibraciones, debe tener y aplicar un procedimiento para estimar la incertidumbre de medición para todas las calibraciones y tipos de calibración.

La GUM establece reglas generales de evaluación y expresión de incertidumbre, sin embargo no establece formatos de cálculo específicos. Debido a esto, los laboratorios diseñan sus propias hojas de cálculo, por lo general electrónicas, generándose así una gran diversidad de hojas de cálculo, que en muchas ocasiones son entendibles solo para la persona que las elaboró.³³

De acuerdo a la Guía ISO se debe emplear una tabla de Cálculo de Incertidumbre TCI la cual permite a los laboratorios y a grupos evaluadores entender de mejor manera los cálculos respecto a la expresión de incertidumbre.

3. Medidores tipo Coriolis

3.1 Principio de funcionamiento del medidor tipo Coriolis

En 1835, el ingeniero y matemático francés Gustave Gaspard Coriolis describió el efecto Coriolis: cuando un objeto se mueve en un sistema de coordenadas que rota con una velocidad angular, experimenta una fuerza Coriolis proporcional a la masa (m), a la velocidad del objeto (v) y a la velocidad angular del sistema (w). Esta fuerza es perpendicular a la velocidad del objeto y a la velocidad angular del sistema de coordenadas.

La segunda ley de Newton establece la fuerza (F) que actúa sobre un objeto de masa (m) con aceleración (a).

³³ Angel Moreno, J. (15, 16 y 17 de Junio del 2005). *Metodología para el cálculo de incertidumbre*. Querétaro, México. Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica.

$$F = m * a \text{ [N]} \quad (1)$$

Esta ley se modifica cuando se trata de objetos situados dentro de un sistema acelerado que gira con velocidad angular ω , por lo que el mismo objeto de masa m , cuya velocidad lineal es v , se encuentra sometido a la siguiente aceleración de Coriolis:

$$a = 2 * \omega * v \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (2)$$

Como consecuencia la fuerza de Coriolis debida a la aceleración anterior será:

$$F = m * (2 * \omega * v) \text{ [N]} \quad (3)$$

A consecuencia del efecto Coriolis, cuando un objeto se desplaza sobre un sistema en rotación, sufre una desviación de su recorrido que da lugar a una trayectoria curva.³⁴

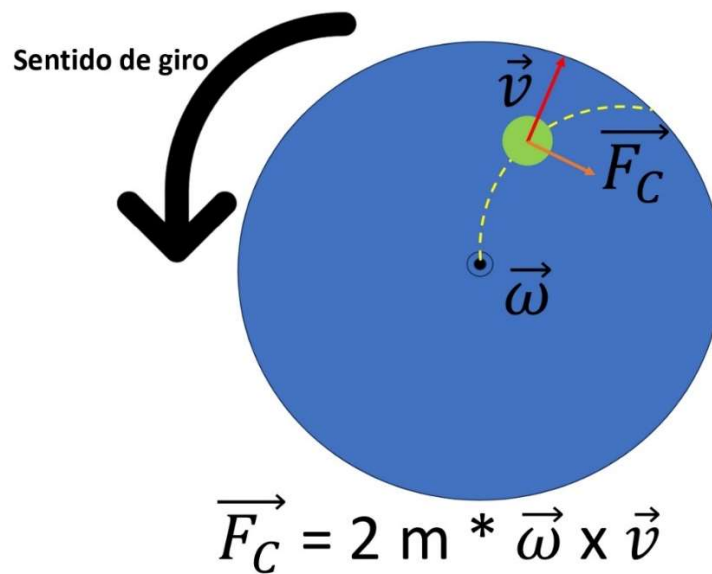


Figura 13. Sistema en rotación (elaboración propia).

El gran aporte de este hombre fue demostrar que, para aplicar las leyes newtonianas del movimiento, en un sistema de referencia en rotación, es necesario incluir en la ecuación una fuerza inercial que actúe a la derecha de la dirección del movimiento del cuerpo

³⁴ Vazquez Espinosa I. (2016). *Estudio del empleo de Medidores de flujo másico por efecto Coriolis, instalados en la C.T. Francisco Pérez Ríos* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

cuando el sistema de referencia gira en el sentido contrario a las agujas del reloj, o a la izquierda cuando gira en el sentido de las agujas del reloj.

El efecto Coriolis adquiere más impacto debido a la velocidad del sistema de referencia en rotación y a la del objeto que se desplaza en él y que es desviado por esta fuerza. De modo que se vuelve más significativo a altas velocidades o grandes distancias.³⁵

3.2 Partes que integran a un sensor tipo Coriolis

Las partes principales que conforman a un sensor de tipo Coriolis son dos: el sensor que se encuentra en contacto directo con el proceso (elemento principal) y el transmisor el cual puede encontrarse unido al sensor o actuar a distancia o como se le conoce, un transmisor remoto, el cuál es el encargado de recibir la señal del sensor y darle el tratamiento para poder interpretar las señales.

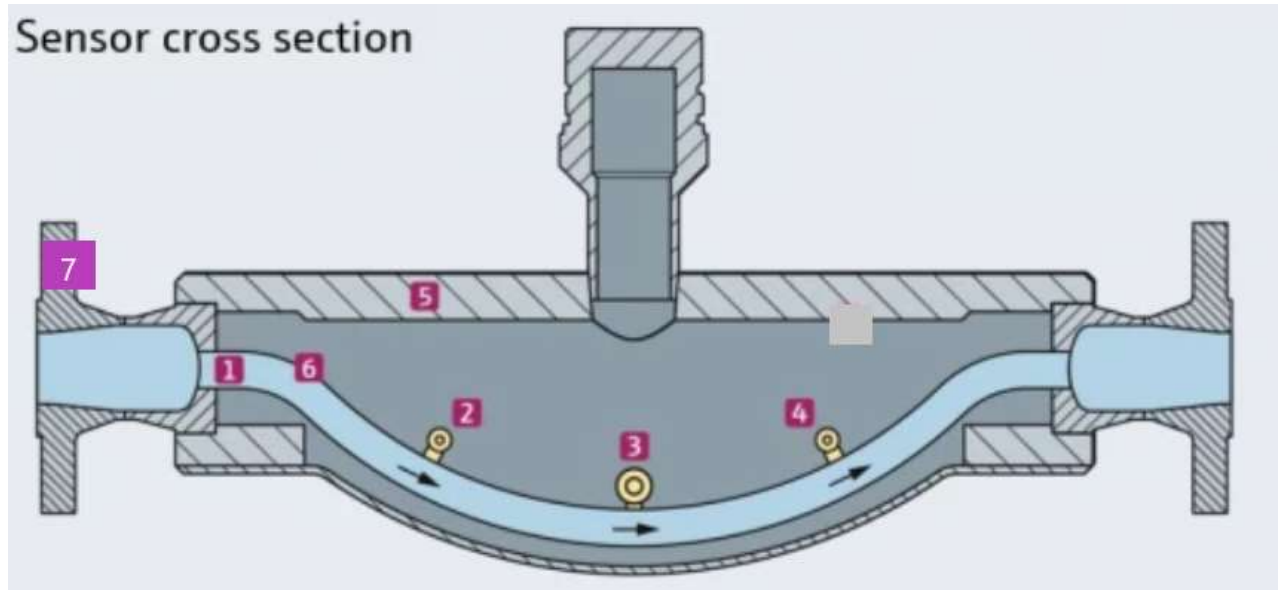


Figura 14. Ilustración del interior del sensor ³⁶

1. Divisor de flujo.

Se encuentra a la entrada del sensor, el cual es una bifurcación cuya función es ingresar el fluido a los tubos oscilantes de una manera uniforme.

2. Bobinas electrodinámicas.

El sensor cuenta con dos elementos como este, las cuales tienen la función de sensar las oscilaciones generadas, una bobina se encuentra cercana a la entrada del medidor

³⁵ Milo A. (24 de agosto de 2023). *Efecto Coriolis: qué es y cómo afecta a la duración de los vuelos*. National Geographic en Español de <https://goo.su/1QCj6Mr>

³⁶ Reher García O. (2023). Sección Esquemática del sensor tipo Coriolis. [Figura 14]. Recuperado de <https://goo.su/l735uvT>

mientras que la otra está posicionada cerca de la salida, con la finalidad de poder tener la fase o en su caso el desfase de las señales generadas.

3. Bobina excitadora.

Elemento magnético el cual tiene la función de generar vibraciones en los tubos oscilantes.

4. RTD o elemento sensor de temperatura.

Es un elemento medidor de temperatura el cual se encuentra integrado dentro del medidor de flujo cuya finalidad es la de tener un control de esta variable durante la medición de proceso.

5. Carcaza protectora.

Esta parte lleva a cabo la función de protección de los elementos que se encuentran en su interior, ya sea el cableado o los elementos electrónicos albergados en su interior.

6. Tubos oscilantes.

Conductos metálicos por los que circula el fluido, los cuales son sometidos a vibraciones generadas por la bobina excitadora.

7. Conexión a proceso.

Es el acoplamiento a la línea de proceso con la que cuenta el medidor. Esta conexión puede ser de distintos tipos, las más comunes empleadas en el sector industrial son las conexiones tipo Brida, Triclamp, SMS y DIN.

Por otra parte el transmisor se encuentra integrado la mayoría de las veces por los siguientes elementos:

➤ Fuente de alimentación

La cual dependiendo del modelo trabaja a 24 V o 127 V.

➤ Tarjeta de entradas y salidas

Dentro de este elemento se encuentran las distintas clemas de conexión, como la conexión a la fuente de alimentación siendo esta una entrada así como recibir alguna entrada conmutable o para la comunicación del transmisor con otro elemento de control o sistema de adquisición de datos, viendo estos datos como salidas.

➤ Memorias

Cuya función principal es la de contener parámetros específicos del sensor o del transmisor para un correcto desempeño del conjunto, dichos parámetros hacen referencia a características del sensor como algunos de ellos son: principio de funcionamiento, diámetro nominal del sensor y factores de fábrica.

➤ Módulo de display

La mayoría de los sensores cuentan con un módulo como este, cuya función principal es la de visualizar la variables de proceso, tales como el flujo instantáneo, totalizador, valores de densidad y de temperatura.

3.3 Funcionamiento del medidor tipo Coriolis

La forma en que opera este medidor es la siguiente: al momento en que se energiza el instrumento, la bobina excitadora comienza a realizar una conmutación en su campo magnético, preniendo y apagando, esto causa que el tubo por el que circulará el fluido comience a realizar una oscilación.



Figura 15. Bobinas dentro del sensor, sin flujo³⁷



Figura 16. Bobina electromagnética del sensor encendida, sin flujo.³⁸

³⁷ Endress + Hauser. (2009). The Coriolis Flow Measuring Principle [Funcionamiento de bobinas] . Youtube <https://goo.su/stiXNq>

³⁸ Idem.



Figura 17. Oscilación posterior a la acción de la bobina excitadora.³⁹

A la par de este funcionamiento las bobinas electrodinámicas ubicadas una a la entrada del medidor y una a la salida registran las pulsaciones que presenta en el tubo.

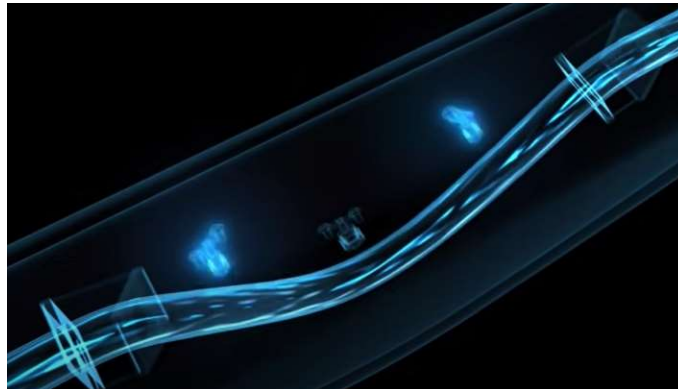


Figura 18. Detección de oscilación por parte de las bobinas electrodinámicas, sin flujo.⁴⁰

A medida que la sustancia en su interior comienza a fluir, se presenta una torsión en el tubo, debido a la inercia del fluido que se presenta, es decir las fuerzas de Coriolis, durante la vibración del tubo. Por lo que ahora las bobinas electrodinámicas presentarán un desfase en el registro de la señal, el cual será proporcional al flujo instantáneo. A mayor desfase entre las señales de las bobinas electrodinámicas mayor será el flujo registrado.

A continuación, se ilustra la forma en la que registran los pulsos las bobinas electrodinámicas, en la Figura 19 (a) y (b) representan el pulso recibido por la bobina de entrada apreciando una torsión en el tubo de ingreso, posteriormente se aprecia en la Figura 19 (c) y (d) el desfase que existe en los pulsos a medida que hay flujo presente.

³⁹ *Idem.*

⁴⁰ *Idem.*

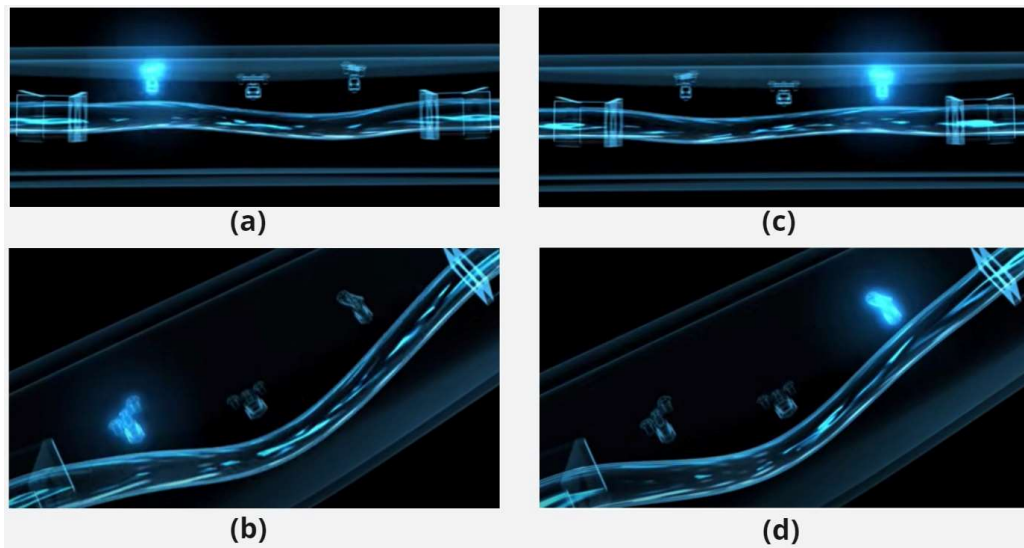


Figura 19 Representación visual de las bobinas electrodinámicas en operación⁴¹

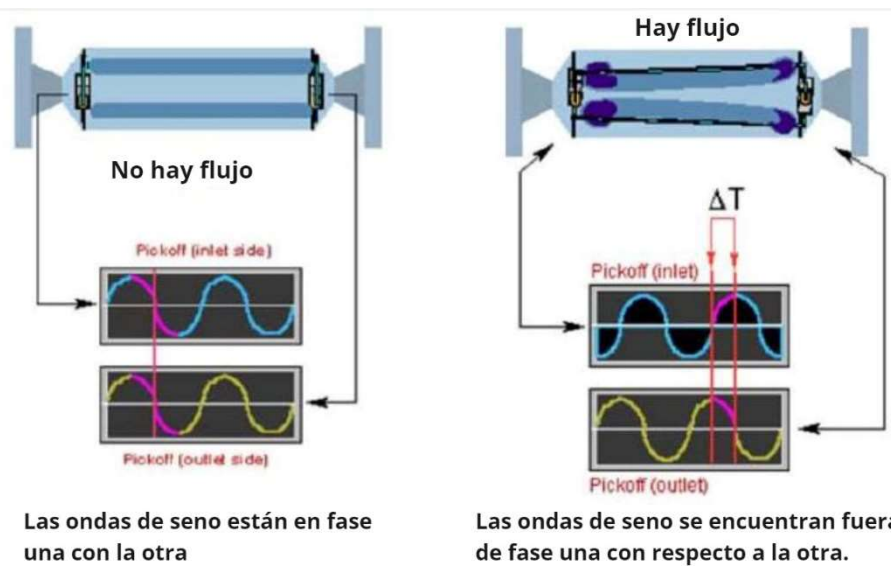


Figura 20 Comportamiento de la onda senoidal generada por las bobinas electrodinámicas.⁴²

⁴¹ Idem.

⁴² Vazquez Espinosa I. (2016). *Estudio del empleo de Medidores de flujo másico por efecto Coriolis, instalados en la C.T. Francisco Pérez Ríos* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

4. Procedimiento utilizado

A continuación, se describe el procedimiento empleado durante la calibración.

4.1 Recepción de solicitud de calibración.

El proceso para realizar una calibración comenzó con una solicitud por parte del cliente en la que requirió de un servicio de calibración, posterior a ello se le proporcionan los datos de contacto al ingeniero de calibración, mismo que contactó al cliente, con la finalidad de establecer los alcances de dicha calibración.

Durante esta primer interacción con el cliente, se establece que la calibración se llevará a cabo en sitio, es decir, es necesario presentarse en sus instalaciones, de igual forma se estableció que la calibración se llevaría a cabo en banco, lo cual quiere decir que el instrumento será retirado de línea, lavado y estará a disposición del personal que llevará a cabo el servicio de calibración en tiempo y forma contemplando la duración de la calibración, aproximadamente 3 horas, con la finalidad de evitar tener contratiempos o quejas por parte de otros sectores de planta que puedan depender del abastecimiento de la línea que se encuentra intervenida; implicando que el fluido de trabajo durante la calibración será agua así como realizar la calibración de forma estática. Se consultó con el cliente respecto al tipo de calibración, quien indicó se realizaría en flujo másico.

Así mismo, se establecen los requisitos previos para entrar a planta tales como documentación requerida o en su defecto equipo de protección personal, puesto que a pesar de no ser una actividad que involucre trabajos de alto riesgo este equipo es indispensable en las industrias.

También se le solicitó al cliente proporcionar los datos específicos del instrumento tales como: Número de serie del medidor, marca, modelo, conexión a proceso, datos del receptor del certificado de calibración, razón social, domicilio, encargado y contacto.

Finalmente y conforme a las necesidades del cliente, se definen los flujos para llevar a cabo la calibración de su instrumento, en donde a solicitud del cliente, indicó los valores que serán evaluados durante el proceso de calibración, dependiendo de la relevancia del medidor en las instalaciones del cliente, serán los puntos a evaluar, para este caso de estudio el cliente solicitó 3 puntos, los cuales serán nombrados como nominal, es decir su flujo de operación, un flujo inferior y uno superior al nominal, asegurando de esta manera, que los puntos de calibración se encuentren dentro del intervalo acreditado por la EMA, para el laboratorio de calibración.

4.2 Selección de equipos patrón a emplear

Una vez que se conocieron los detalles del servicio, tales como los flujos a los que se realizará la calibración y sabiendo que el laboratorio cuenta con el intervalo acreditado para realizar la calibración, se procedió a escoger los equipos patrón que se ponen a disposición del personal para poder cumplir con las especificaciones del cliente, debido a que existen ocasiones en las que es necesario emplear más de un patrón de flujo para cubrir el intervalo requerido en la solicitud del cliente.

Posteriormente se seleccionó el patrón que cumple con el intervalo requerido, se recolectó el material necesario para hacer la conexión y adaptar el equipo del cliente al banco de calibración, eligiendo entre distintos tipos de conexión existentes en el laboratorio: Tri clamp, DIN, SMS o brida, seleccionando el primer tipo, según las especificaciones del cliente y la información que proporcionó. Así mismo, se llevó a cabo la recolección del material para el armado del circuito de calibración, el cual será descrito a continuación.

En la siguiente figura se muestra el material de trabajo recolectado para realizar el servicio de calibración.



Figura 21. Material de trabajo.

4.3 Llenado de formato de condiciones de trabajo.

Se realizó el llenado del correspondiente formato, por parte del laboratorio de calibración, en donde se hicieron constar las condiciones que se encuentran presentes en el área de trabajo, entre las cuales, se encuentra: contar con un suministro eléctrico adecuado, iluminación necesaria, que no exista alguna clase de polvo nocivo para el personal, donde se declara que no existe alguna interferencia electromagnética, algún tipo de radiación, atmósfera explosiva, los niveles de ruido sean bajos, no haber vibración presente, la

temperatura atmosférica se encuentre dentro del rango establecido para no perjudicar al personal, así como la humedad relativa presente en el sitio de trabajo.

Si por alguna razón, una de estas características pusiera en riesgo al personal de calibración, este cuenta con evidencia de dichas condiciones, facilitándole solicitar una reprogramación del mismo o inclusive la cancelación de este.



Figura 22. Llenado de formato de condiciones de trabajo

4.4 Instalación mecánica del instrumento en el circuito de calibración.

Personal de calibración realizó el ingreso del material empleado, mediante una lista de material, tras el correspondiente llenado en formatos proporcionados por planta, entre los cuales podemos identificar los siguientes materiales necesarios para completar el servicio:

- Un reservorio de agua, para este caso una tina.
- Una fuente de bombeo, es decir una bomba centrífuga.
- Mangueras de neopreno, normalmente de 2".
- Controlador de bomba centrífuga, refiriéndose a un variador de frecuencia.
- Equipos auxiliares de temperatura y presión.
- Extensiones eléctricas, ya sea de capacidad de 127 V o 220 V.
- Conexiones de grado alimenticio, tales como válvulas, codos o extensiones de tubería.

Posterior al ingreso del material se estableció con el cliente el área de trabajo quien facilitó el agua para el reservorio, así como indicar la ubicación de un toma corrientes de 127 V o 220V.

Cuando el cliente entregó el medidor al personal de calibración, se realizó una inspección física, con la finalidad de analizar el estado en el que se recibió este, es decir, que se encuentre limpio y libre de residuos tales como incrustaciones o solidos debidos al fluido

empleado en el proceso de planta, notificando al cliente cualquier desperfecto encontrado en su instrumento, ya sea algún daño físico interno o externo en el medidor.

Posteriormente, el personal de calibración comenzó con el armado mecánico del circuito, a continuación, se muestra un esquema del arreglo final empleado para esta calibración.

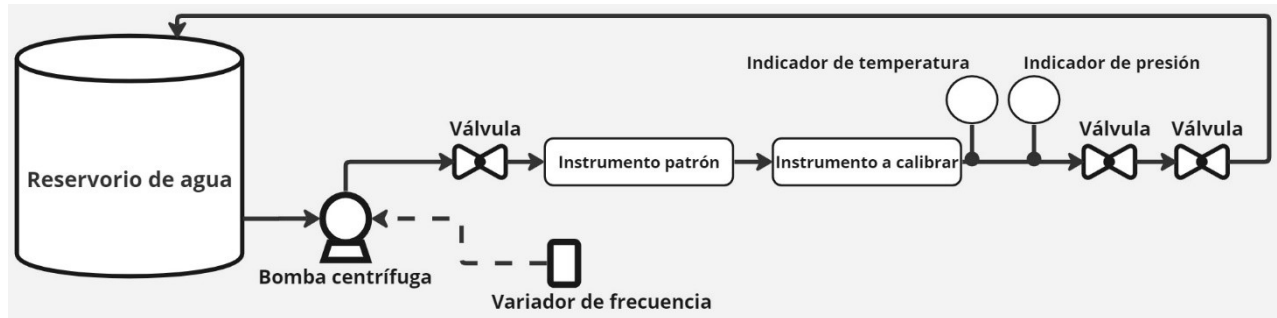


Figura 23. Distribución de elementos en el banco de calibración

Un aspecto relevante a tomar en cuenta durante la instalación mecánica del banco de pruebas, es el de colocar de forma apropiada los soportes para el sistema, ya que, de no hacerlo adecuadamente, podrían presentarse condiciones que propicien un mal desempeño de los medidores, generando un estrés mecánico debido a un mal soporte de cargas. Lo anterior, es posible mitigarse en gran medida haciendo uso de un nivel para identificar puntos donde el sistema requiere el uso de un soporte. En la imagen mostrada a continuación se ilustra el montaje mecánico previo al sensor patrón 24(a), como posterior al instrumento patrón 24 (b).

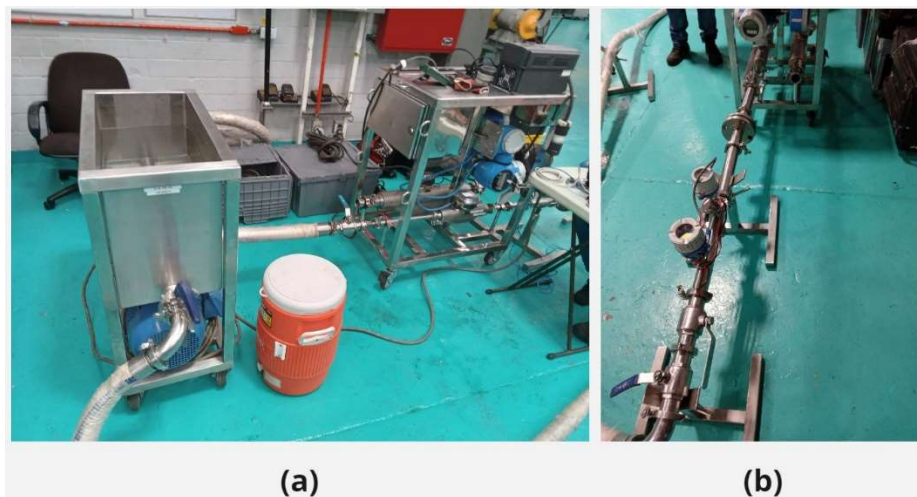


Figura 24. Montaje mecánico

4.5 Pruebas hidrostáticas

Habiendo completado el ensamble mecánico descrito anteriormente, se dio inicio con las pruebas hidrostáticas, la cuales consisten en verificar la hermeticidad del sistema, en este punto se energizó el variador de frecuencia, el cual generalmente trabaja a un voltaje de 220 V trifásico, generando así bombeo de agua a través del sistema, para lo cual se abre la válvula aguas arriba y posteriormente válvulas aguas abajo, buscando que el flujo sea bajo, pero suficiente para detectar fugas presentes en el sistema.

En caso de que el circuito de calibración hubiese presentado alguna fuga, se habría detenido inmediatamente el bombeo, se cierran válvulas y se procede a ajustar las conexiones.

En esta etapa de la calibración se busca mediante el bombeo inundar completamente la tubería, con la finalidad de llevar a cabo una eliminación de las burbujas de aire contenidas al interior de la tubería, para ello se realizó una serie de aperturas y cierres de las válvulas presentes en el arreglo mecánico. Posterior a la eliminación de las burbujas y al término de este procedimiento se realizó el cierre de las válvulas, dejando completamente inundado el sistema.

4.6 Instalación eléctrica del instrumento en el circuito de calibración.

Una vez concluidas las pruebas hidrostáticas del circuito, se procedió con la conexión eléctrica del sistema necesaria para llevar a cabo la calibración, en donde, en primer lugar, se energizó el instrumento patrón, para continuar con el instrumento a calibrar finalizando con el medidor auxiliar de temperatura y con el medidor auxiliar de presión.

Durante esta etapa se tuvo especial cuidado de energizar el medidor del cliente de forma adecuada, puesto que existen medidores que trabajan a un voltaje de 127 V u otros cuya energía necesaria es de 24V. El personal de calibración destapó la carcasa del medidor para tener acceso a las indicaciones eléctricas del medidor y se consultó la especificación de alimentación, el personal de calibración procedió a energizar el medidor al voltaje indicado, verificando que no existiera alguna falla presente al momento de realizar la conexión. Una vez se energizó de forma adecuada el medidor, el equipo de calibración procedió con la conexión entre el sistema de cómputo y el medidor.

Al haber establecido dicha conexión, se realizó la correspondiente descarga de configuraciones empleando un software especializado, es decir contar con una copia de los parámetros previos a la calibración, verificando que se encuentre presente información de vital importancia como la configuración en sus salidas de comunicación, las configuraciones en unidades, valores de totalizados, es decir, cuanta masa ha cruzado por el medidor, factores de funcionamiento como el factor de calibración; contando de esta forma con un registro de estos valores, puesto que muchas veces se trata de instrumentos

utilizados para la transferencia de custodia, o en recetas las cuales no pueden darse el lujo de perder esta información de relevancia dado el método que se empleará durante la calibración.

Existen ocasiones en las que, debido a los requerimientos de la calibración, es necesario modificar parámetros, tales como, unidades del sensor, puesto que el cliente emplea unidades de medida diferentes a las comunes.

4.7 Ajuste de cero de los medidores y ambientación del sistema

Al haber respaldado las configuraciones del medidor a calibrar se procedió a realizar el ajuste de cero en ambos medidores, puesto que para este punto el circuito de calibración ya cuenta con las siguientes condiciones para realizar el ajuste, no hay flujo presente al interior, la tubería se encuentra completamente llena, no cuenta con burbujas de aire, no existen incrustaciones en el medidor y se presentan condiciones adecuadas de proceso en cuanto a presión y temperatura.

El ajuste de cero, busca la frecuencia específica en el medidor, para hacer oscilar los tubos de manera síncrona, ya que, en muchas ocasiones, el fluido con el que trabaja el cliente cuenta con características distintas que hacen que se requiera realizar un ajuste de cero al momento de realizar la calibración en banco, empleando agua como fluido. De igual forma compensa algún estrés mecánico presente en la instalación.

Posterior al ajuste realizado en el instrumento a calibrar se realizó este mismo proceso para el instrumento patrón. Este ajuste se realizó para ambos medidores en 3 ocasiones.

De este modo, al haber realizado el ajuste en ambos medidores, se volvieron a abrir válvulas tanto aguas arriba como aguas abajo y se generó bombeo para iniciar de esta forma con un periodo de ambientación donde se lleva a cabo la recirculación del fluido, este periodo duró aproximadamente 10 a 15 minutos.



Figura 25. Ambientación del sistema.

4.8 Configuración de unidades y totalizados en caudal másico.

A la par de que realiza el periodo de ambientación, se realizó la configuración de las unidades tanto del caudal másico como las unidades del totalizado, para dejar de esta forma unidades iguales tanto en el medidor patrón como el medidor a calibrar debido a que se empleará el método de comparación directa para la obtención de los resultados, de igual forma se modificó la resolución para ambos medidores mostrando en el display la máxima resolución es decir 0.0001 kg.

Posterior a esta configuración y al término del periodo de ambientación se hace uso del variador de frecuencia para ajustar el flujo másico al que se requiere llegar y una vez se ha estabilizado el flujo, se procedió nuevamente con el cierre de válvulas y detener el bombeo, para colocar los totalizados de ambos instrumentos en cero. Ya que ambos medidores comenzarán a contar la cantidad de masa que atraviesa en un determinado intervalo de tiempo definido por el laboratorio de calibración.



Figura 26. Display del sensor

4.9 Arranque de bomba para comenzar con la calibración.

Cuando ambos totalizadores se hubieron colocado en la cantidad de cero, se procedió a iniciar la calibración generando nuevamente bombeo y abriendo válvulas, permitiendo el flujo al interior de la tubería, dando inicio a la primera corrida del primer punto de calibración, en donde ambos medidores se encuentran contabilizando la cantidad de masa que pasa por el circuito.

4.10 Toma de lecturas durante cada corrida de calibración.

Siguiendo lo establecido por el laboratorio de calibración, se realizaron 5 corridas para ser tomadas como muestra representativa de las lecturas, en las cuales se mantuvo el flujo y se realizó una apertura y cierre de válvulas para completar de esa forma las corridas

necesarias para el procedimiento. Durante cada una de las corridas realizadas, se debe tomar nota de los parámetros presentes en el circuito de calibración, como la densidad registrada tanto en el medidor patrón como en el medidor a calibrar; se registró la presión y la temperatura en cada corrida, obteniendo una tabla como la que se muestra a continuación:

# de corrida	Medidor patron [kg]	Medidor a calibrar [kg]	Densidad medidor patron [kg/m3]	Densidad medidor a calibrar [kg/m3]	Temperatura [°C]	Presión [kPa]
1	500.3847	500.3741	997.94	997.90	21	57.2
2	501.0283	501.0082	997.93	997.88	21	57.2
3	500.2234	500.1285	997.94	997.89	21	57.2
4	500.9283	500.8423	997.92	997.89	21	57.2
5	500.1924	500.0292	997.94	997.90	21	57.2

Tabla 2 Toma de lecturas

4.11 Cálculo de los resultados obtenidos

Para realizar estos cálculos se empleó una hoja de Excel que facilita dichas operaciones donde se obtuvieron los siguientes resultados respecto al error encontrando (para mayor información respecto al cálculo generado consultar anexo A):

# de corrida	Medidor patron corregido [kg]	Medidor a calibrar [kg]	MF adimensional	Error encontrado [%]
1	500.0645	500.3741	0.999381	0.06
2	500.7076	501.0082	0.999400	0.06
3	499.9033	500.1285	0.999550	0.05
4	500.6077	500.8423	0.999532	0.05
5	499.8723	500.0292	0.999686	0.03

Tabla 3 Cálculos realizados

Obteniendo el promedio de los errores ($\bar{E}_r$) encontrados durante la prueba se tiene lo siguiente:

$$\bar{E}_r = 0.05\% \quad (4)$$

Máximo error tolerado

De los datos proporcionados por el cliente, se buscó dentro del manual del fabricante las características del medidor a calibrar, con el fin de determinar el rumbo de la calibración con respecto al máximo error tolerado del equipo.

Mass flow and volume flow (liquid)	
Promass 83F:	
■ ±0.05% o.r. (PremiumCal, for mass flow)	
■ ±0.10% o.r.	
Promass 80F:	
■ ±0.10% o.r. (optional)	
■ ±0.15% o.r.	

Figura 27. Manual del fabricante máximo error tolerado⁴³

Se consultó en el manual del fabricante, encontrando que el máximo error tolerable es de $\pm 0.1\%$, al comparar este error con el obtenido durante la prueba, se pudo observar que el error encontrado tiene un valor positivo de 0.05% por lo que el medidor aún no requeriría un ajuste; en caso contrario, si el error se encontrara fuera del intervalo especificado por el fabricante se consultaría con el cliente respecto a la realización de un ajuste al medidor.

Así mismo se obtuvo el valor de la repetibilidad (*Repet*), cuyo valor se muestra a continuación:

$$Repet = 0.012\% \quad (5)$$

De igual forma, se consultó en el manual del fabricante respecto al intervalo aceptable de repetibilidad, obteniendo lo siguiente:

Repeatability	Design fundamentals → 17. o.r. = of reading
	Mass flow and volume flow (liquids)
	Promass 83F:
	■ ±0.025% o.r. (PremiumCal, for mass flow)
	■ ±0.05% o.r.

Figura 28. Manual del fabricante valores de repetibilidad⁴⁴

⁴³ Endress + Hauser. (2009). *Proline Promass 80F, 83F*. pag.15 Editorial: E+H de <https://goo.su/0AcqO>

⁴⁴ Endress + Hauser. (2009). *Proline Promass 80F, 83F*. pag.16 Editorial: E+H de <https://goo.su/0AcqO>

Al realizar la comparación del valor obtenido al término de la prueba y el valor indicado en su documentación técnica, se observó que el medidor también cumple con los parámetros brindados por el fabricante, de esta forma, procediendo a evaluar los siguientes flujos solicitados por el cliente.

Una vez obtenido el error y la repetibilidad se evaluó la incertidumbre asociada obteniendo el siguiente valor para la incertidumbre expandida U (para mayor información respecto al cálculo generado consultar anexo B).

Obteniendo que la incertidumbre expandida U y la que se reportó en el certificado es:

$$U = 0.051\% \quad (6)$$

4.12 Evaluación de los flujos subsecuentes.

Al término de la evaluación del flujo de trabajo, se procedió a evaluar el flujo inferior y el superior, especificados por el cliente en un principio, llevando a cabo la correspondiente toma de lecturas para cada una de las 5 corridas, tanto en el flujo bajo como en el alto, registrando valores de totalizados, densidad, presión y temperatura, encontrando que el medidor estaba dentro de los parámetros aceptados por el laboratorio y el fabricante.

4.13 Etiquetado señalizador de calibración.

Una vez se han concluido las pruebas, el equipo de calibración procedió a generar su correspondiente etiqueta que informa acerca de la calibración del medidor, con la finalidad de que el cliente cuente con una identificación rápida de la prueba realizada.

4.14 Carga de configuraciones al término de la calibración.

Posteriormente se devolvieron las configuraciones iniciales al instrumento, asegurándose de que volvió a contener la parametrización con la que se recibió, teniendo especial atención en cuanto a las unidades, así como reestablecer los totalizados con los que fue recibido, factor de calibración, el cual, en este servicio no se vio modificado debido a que se encontró el medidor dentro de especificaciones y tolerancias de error. Finalmente, se generó nuevamente un respaldo de las configuraciones como documentación del servicio.

4.15 Desmontaje eléctrico del instrumento en el circuito de calibración.

Por lo tanto, al asegurarse que se cuenta con el respaldo de configuraciones del instrumento, se procedió con el desmontaje eléctrico cuidando de desenergizar primero las clavijas conectadas a un voltaje de 127 V, una vez se realizó dicho paso, se retiraron los cables de alimentación del cabezal, tanto del patrón como del instrumento a calibrar, finalmente, retirando la alimentación de los instrumentos indicadores de presión y

temperatura. Al término de la desconexión de 127 V se procedió con la desconexión del variador y la bomba centrífuga, es decir, el equipo cuyo voltaje de trabajo es 220 V.

4.16 Desmontaje mecánico del instrumento en el circuito de calibración.

Por otro lado, el personal de calibración realizó el desmontaje mecánico del circuito de calibración, retirando, todos los componentes, comenzando por el instrumento del cliente, el cual ya cuenta con su respectivo etiquetado, drenando de forma adecuada el agua al interior de la tubería, evitando en todo momento la generación de condiciones inseguras, como charcos de agua o herramienta y material tirados que pudieran propiciar algún accidente para el personal de calibración o personal de las instalaciones de planta. Asegurando que el área de trabajo queda limpia y seca, para resguardar el material y retirarlo de las instalaciones.

4.17 Entrega del instrumento al cliente.

En conjunto con el cliente, se hace una revisión física del instrumento detallando que se entrega en las mismas condiciones en las que fue recibido, esta revisión sirve para poder asegurarle al cliente que no existe alguna imperfección en el medidor al momento de la conclusión del servicio.

4.18 Generación del reporte que avale el servicio.

Finalmente se entregó para conocimiento del cliente un reporte de servicio en donde se describieron las actividades mencionadas, colocando de forma clara aspectos tales como:

- Número de solicitud
- Dirección y contacto del cliente
- Tipo de servicio, para este caso calibración.
- Datos del equipo a calibrar como: Modelo, Número de serie, Ubicación en planta y TAG.
- En caso de así requerirlo, observación en cuanto al montaje en planta.
- Apartado de actividades realizadas, incluyendo evidencia fotográfica.
- Conclusiones, detallando el estado del equipo calibrado.
- Bitácora de tiempo.

REPORTE DE SERVICIO

Página 1 de 1

dd-mm-aa

Solicitud:

Compañía:

Planta:

Dirección:

Responsable:

Tel:

mail:

SERVICIO SOLICITADO

☐ Comisionamiento ☐ Reparacion ☐ Asesoría ☐ Calibración ☐ Diagnostico ☐ Garantía

Descripción: Calibración de 1 instrumentos de flujo.

DATOS DE LOS EQUIPOS y DATOS DEL PROCESO

Flujo:

Modelo	No. Serie	TAG	Ubicación

INSTALACIÓN MECÁNICA Conforme a manual: ☒ Si ☐ No

Recomendaciones ó requerimientos:

Sin comentarios.

CONDICIONES INICIALES

ACTIVIDADES REALIZADAS

CONCLUSIONES

ESTADO DEL SERVICIO.

☒ Trabajo terminado

☐ Espera refacciones

☐ Espera información del

☐ Espera información de la

☐ Necesaria una visita mas

Resumen de tiempo

Fecha	Tiempo de trabajo			Tiempo de Traslado			
	Llegada	Salida	Total, horas	Origen	Destino	Total, Horas	Km
2024-01-09	09:00	17:00	8	NA	NA	NA	NA

Figura 29. Ejemplo de reporte de servicio

4.19 Generación del certificado de calibración.

A continuación, se muestra el ejemplo del certificado generado de la calibración.

Certificado de Calibración				
Num. Acreditación	FL-18			
Cliente:				
Domicilio:				
Ciudad:				
Estado :				
Instrumento Calibrado				
	Modelo	Serie	Marca	Tag
Transmisor				
Sensor				
Tipo de Instrumento	Coriolis	Resolución (kg)	0.0001	
Descripción del Instrumento				
Fecha de Recepción	Fecha Calibración	Fecha de Emisión		
Fluido empleado en la calibración	Método de Medida Empleado			
Agua	Comparación Estática (Arranque y Paro)			
Instrumento Patrón				
Modelo				
Serie				
Marca				
Tag				
Fecha Calibración				
Certificado				
Incertidumbre de medida (%MF)				
Intervalo de				
Medida:				
Trazabilidad metrológica				
Condiciones Ambientales				
Temperatura Ambiente °C	35.9 ± 0.50	Humedad relativa %	47.7 ± 1.5	
Presión Atmosférica kPa	101.4 ± 0.059			
Calibró:				Autorizó:

Figura 30. Ejemplo de certificado de calibración

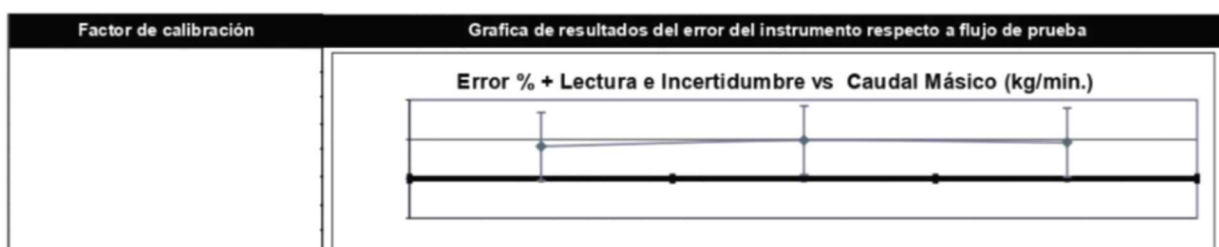
Num. 2023

Resultados de la calibración en flujo másico

Flujo Másico (kg /min)	Flujo Másico (kg /s)	Masa Patrón (kg)	Masa del I.B.C. (kg)	Temperatura (°C)	Factor del Medidor MF	Error de Medida	Repetibilidad	Incertidumbre de medida U ±
---------------------------	----------------------------	---------------------	----------------------------	---------------------	-----------------------------	--------------------	---------------	-----------------------------------

NO REQUIRO AJUSTE

RESULTADOS DE CALIBRACION



Observaciones y evidencia de la calibración

Los puntos de calibración se definen a solicitud del cliente.



Figura 31. Ejemplo de certificado de calibración

Num. '2023

Determinación del mensurando

La calibración se realiza por medio de comparación directa entre la indicación del medidor patrón y el medidor I.B.C. Por determinación dinámica, Donde el mensurando:

$$FM = \frac{M_{mm}}{M_m}$$

FM= Factor del medidor

Mmm = Masa indicada por el patrón corregida por trazabilidad metrológica

Mm = Masa indicada por el IBC

El error relativo se obtiene de acuerdo a la siguiente formula

$$e[\%] = \frac{M_m - M_{mm}}{M_{mm}} * 100$$

Declaraciones Generales sobre la calibración:

Laboratorio acreditado por emA.A.C. con acreditación no. FL-18, cumpliendo los requisitos de la norma ISO/IEC 17025- Vigente. Vigente a partir de 2011-10-27.

Emplea el método por comparación estática o dinámica con un medidor maestro tipo Coriolis para realizar la calibración de medidores de flujo.

El patrón viajero con C.E. de 0.05% de la lectura, se encuentra calibrado en un intervalo de medida de los resultados descritos en este certificado de calibración se obtuvieron usando el procedimiento por el método de comparación estática (arranque y paro) teniendo trazabilidad al Patrón Nacional de flujo para líquidos, CENAM. La calibración esta documentada bajo el Certificado

Procedimiento resumido:

Se realiza la comparación, utilizando como patrón un medidor másico tipo Coriolis calibrado en flujo másico utilizando distintos fluidos de calibración. Se hace pasar flujo a través del patrón y del instrumento bajo calibración de manera simultánea para acondicionar los instrumentos durante unos minutos, se realizan ajuste de cero y posteriormente se inician 5 corridas por medio de arranques y paros, evaluando 3 puntos, distribuidos en el intervalo de medida o solicitados por el cliente. Se comparan los totalizados obtenidos con sus correcciones, posteriormente se determinan el error de medida, incertidumbre expandida de medición y el Factor del Medidor.

Declaración sobre incertidumbre:

La incertidumbre expandida U, esta representada en porcentaje del Factor del Medidor y estimada con base a un factor de cobertura $k = 2$. Esto corresponde a un nivel de confianza del 95.45 %, aproximadamente. Los cálculos para estimar la incertidumbre expandida U, se apegan estrictamente a la Norma NMX-CH-140-IMNC-2002.

Notas:

- 1.- El archivo con los datos de calibración está disponible para su consulta
- 2.- Los valores promedio reportados en la tabla(pag.1) están referidos a la densidad, temperatura y presión de prueba, del ítem descrito.
- 3.- En caso de mantenimiento del medidor o cambio del elemento secundario se recomienda la recalibración del medidor.
- 4.- El presente certificado solo ampara las mediciones en las condiciones ambientales, en las que se realizó la calibración.
- 5.- Los resultados emitidos corresponden a las lecturas obtenidas por el I.B.C. descrito en la pág. 1 del presente certificado
- 6.- Este certificado tiene validez únicamente en forma íntegra y original.
- 7.- La incertidumbre expresada en este informe no incluye posibles cambios causados por deriva a largo plazo en la respuesta del equipo. Estos deben ser determinados individualmente por el usuario, con base en los datos históricos del equipo.
- 8.- Los resultados solo están relacionados al ÍTEM descrito en este certificado.
- 9.- Este Certificado cumple con los conceptos establecidos en la NOM-008-SCFI -2002
- 10.- Los datos de contacto del cliente:
- 11.- Lugar de calibración Instalaciones del Cliente
- 12.- Los periodos de recalibración son responsabilidad del usuario y dependen de la aplicación.
- 13.- Los resultados solo están relacionados a flujo de líquidos.
- 14.- Este certificado no ampara otras características diferentes a las descritas en este documento.
- 15.- Es responsabilidad del usuario el recalibrar el instrumento en intervalos apropiados
- 16.- Este certificado tiene validez únicamente en forma íntegra y original.
- 17.- I.B.C. - Instrumento bajo Calibración

Fin del Documento.

Figura 32. Ejemplo de certificado de calibración

4.20 Entrega de documentos al cliente.

Carta de trazabilidad

Una carta de trazabilidad de un resultado de medición específico o del valor de un patrón es un diagrama que muestra la relación de calibraciones o comparaciones entre este resultado y las referencias determinadas.⁴⁵

Se le entregó una carta de trazabilidad al cliente tal como se muestra en el ejemplo a continuación.

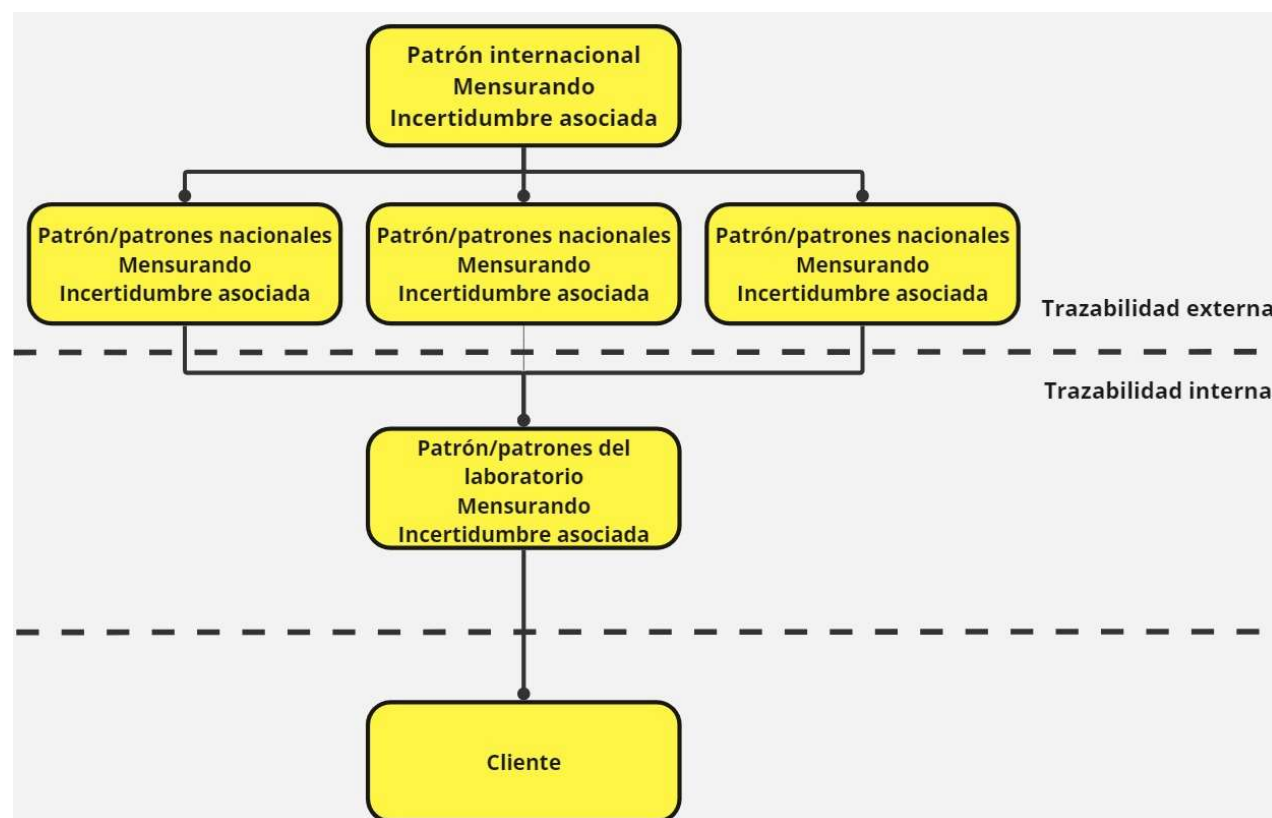


Figura 33. Ejemplo de carta de trazabilidad

⁴⁵ Arias Romero R., Arvizu Torres M., Et. All. (diciembre de 2005). *ELABORACIÓN DE CARTAS DE TRAZABILIDAD EN EL CENAM*. El Marqués, Querétaro, México. Editorial: CENAM.

Certificado de calibración del instrumento patrón.

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

**CENAM**
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

Certificado de Calibración
CALIBRATION CERTIFICATE

Hoja 1/3

Cliente:
Customer

Instrumento:
Instrument

Marca:
Brand name

Modelo:
Model

No. de serie:
Serial number

No. de identificación:
ID number

Lugar donde se efectuó la calibración:
Place where the calibration was carried out

No. de certificado: / *Certificate number*

No. de servicio: / *Service Number*

Fecha de emisión: / *Date of issue*

Fecha de calibración: / *Calibration date*

Responsable de la calibración: / *Calibrated by*

Aprobó: / *Approved by*

Notas: / *[Notes]*

- Es responsabilidad del usuario establecer la fecha de una nueva calibración del instrumento. El tiempo de validez de los resultados contenidos en este certificado depende tanto de las características del instrumento calibrado como de las prácticas para su manejo y uso. *[The user is responsible for establishing re-calibration periods, based on the characteristics of the instrument and the conditions of handling and use.]*
- No es recomendable la reproducción parcial de este certificado, ya que puede dar lugar a interpretaciones equivocadas de sus resultados. *[Partial reproduction may lead to misleading interpretations]*
- Este certificado se emite de manera electrónica. La versión oficial puede ser consultada en el domicilio electrónico <http://www.cenam.mx/transparencia/certificados.aspx> con la contraseña entregada a la empresa identificada como "Cliente". Aún sin contar con esta contraseña, los datos del equipo calibrado pueden obtenerse en el mismo portal con el número de certificado. *[This is an electronic certificate. The official version may be obtained at the website <http://www.cenam.mx/transparencia/certificados.aspx>, using the password provided to the customer identified at the top of this page. Identification information for the instrument calibrated may be obtained at the same site without the need of a password.]*

km 4 5 Carretera a Los Cués
El Marqués, Qro., C.P. 76246, México.

+52 (442) 211-0500

servtec@cenam.mx

Figura 34. Ejemplo de certificado de patrón de flujo másico

Acreditación



Figura 35. Ejemplo de Acreditación por parte de la EMA.

CMC, Capacidad de medición y calibración.



ANEXO A

CUMPLIENDO LA MISIÓN DE SERVIR
A MÉXICO Y A NUESTROS CLIENTES

Tabla de expresión de las Capacidades de Medición y Calibración (CMC) de un laboratorio de calibración acreditado

ACREDITACIÓN

FL-18

Fecha de emisión:
Revisión:

I	II	III	IV	V	VI
Magnitud/ Instrumento	Método de medida	Intervalo de medida	Condición de medición	Incertidumbre expandida de medida	Patrón de referencia usado en calibración.
Flujo másico líquido FM (Factor del medidor) / Medidor de flujo tipo Coriolis, Vortex y ultrasónico intrusivos o no intrusivos	Comparación estática con medidor maestro	0.050 kg /min a 10993 kg/min	Tipo de fluido: Agua, Hidrocarburo de líquido y líquidos diferentes al agua Temperatura de línea: (10 a 40°C) Presión: (0 a 1 MPa) Diámetro del Sistema de medición: (4 a 350 mm)	0.056% a 0.064% relativa al mensurando	Medidor Maestro Marca: Endress + Hauser Modelo: 8A5B04 Número de serie: P317E20200 U = 0.050 % MF CENAM

Figura 36. Ejemplo de Capacidad de medición y calibración emitido por la EMA

5. Resultados

Como parte de los resultados obtenidos de las actividades realizadas, se generó un certificado de calibración para una solicitud presentada por el cliente, en el cual se le proporcionan datos de suma relevancia respecto a su medidor, como por ejemplo: el mensurando, el error presentado, la repetibilidad y la incertidumbre evaluando el flujo de trabajo del instrumento y proporcionando un intervalo en el que se analiza el comportamiento de su medidor, además se informó acerca de las características encontradas para esas condiciones, señalando en este caso, que el medidor se encuentra dentro de las características de diseño, indicadas por el fabricante, se comunicaron al cliente dichos resultados, quien indicó que al cumplir con las características del fabricante se da cumplimiento a las especificaciones solicitadas por su proceso, de igual forma es importante para el usuario contar con el certificado, debido a que en un periodo anterior se había llevado a cabo una calibración, esta información es de mucha utilidad, debido a que ahora cuentan con información a través de los periodos de calibración la cual puede indicar un comportamiento del medidor a través del tiempo, mostrando parámetros como el incremento del error o el comportamiento de la repetibilidad.

Conclusiones:

En conclusión, este trabajo describió de forma detallada el proceso de calibración de un medidor de flujo tipo Coriolis, mediante un método de comparación directa y utilizando un procedimiento estático para flujo másico. Además, brindó un panorama general respecto a la metrología involucrada en un servicio de calibración, el cual, en conjunto con los órganos gubernamentales o privados y basándose en la normatividad vigente, asegura un servicio imparcial, confiable y transparente.

Se destacó la importancia de contar con personal altamente capacitado para realizar tareas como la calibración. Es decir, se requiere una formación académica como ingeniero y una capacitación continua para comprender los principales conceptos involucrados, las normativas, el vocabulario técnico, los cálculos presentes, las instalaciones mecánicas, las instalaciones eléctricas y la instrumentación necesaria para llevar a cabo una calibración conforme a los procedimientos establecidos.

Es fundamental conocer el principio de funcionamiento de los medidores másicos tipo Coriolis, ya que, de esta forma, el personal responsable de la ejecución del servicio está consciente de los requisitos para asegurar la correcta instalación del medidor en el banco de calibración, así como de las posibles fallas que el sensor podría presentar, brindando soluciones adecuadas.

Posteriormente a la calibración, el cliente pudo conocer el comportamiento de su equipo, lo que impactó positivamente en su proceso de fabricación. Este impacto se reflejó directamente en los costos, ya que, al conocer la exactitud de su medidor, el cliente pudo reducir las mermas producidas, dado que ahora tiene claro el error del medidor y la incertidumbre asociada. Estos aspectos son fundamentales para evitar la fabricación de productos defectuosos. Además, se aseguró la trazabilidad con patrones en su proceso, lo que brindó confiabilidad en los resultados.

Por lo anterior, y dada la experiencia laboral, se puede entender que realizar una calibración periódica, como la descrita en este trabajo, debería considerarse una inversión en el proceso, en lugar de un gasto.

Bibliografía:

- Centro Nacional de Metrología, (06 de junio de 2023). Acerca del CENAM, ¿Quiénes somos?. Gobierno de México. Recuperado del 29-01-2024.
- Lizardi Nieto V.J., González Rojano N., (10 de mayo de 2016). Mundo Nano, Vol. 9, No. 16, p.p. 169
- Lopez Avilés M. y Gómez Dantés O. (1988). El sistema Internacional de Unidades. Vol. 30. No. 6, p.p. 906-907.
- Lazos Martinez, R. y Pezet Sandoval F. (2008). ¿Qué tan Nuevo es el Nuevo Vocabulario Internacional de Metrología?. Santiago de Querétaro, México. Simposio de Metrología.
- Sáez Pueyo C. (11 de junio de 1986). NORMA Oficial Mexicana de Metrología NOM-Z-55-1986 Metrología-Vocabulario de Términos Fundamentales y Generales. Ciudad de México. Diario Oficial de la Federación.
- Metrólogos Asociados (julio de 2005). Imagen calibración. Zapotlán El Grande, Jalisco, México.
- Laurila, H. (27 de noviembre de 2019). Ilustración de cadena de trazabilidad. Recuperado de: <https://goo.su/OzeJ0>
- Metrología y sus aplicaciones NMX-Z-055-IMNC
- Instituto Mexicano de Normalización y Certificación. (2009). Vocabulario Internacional de metrología-Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM). IMNC
- Metrólogos Asociados (julio de 2005). Imagen principio de arquímedes. Zapotlán El Grande, Jalisco, México.
- Metrólogos Asociados (julio de 2005). Métodos de:Medición, Prueba y Calibración. Zapotlán El Grande, Jalisco, México.
- Piña, P. (01 de abril de 2020). Medidor de flujo electromagnético. Recuperado de: <https://0grados.com/sensor-de-flujo-electromagnetico/>
- Carbonó de la Rosa, M. E. y Aislañt Antolines, I. A., (2010), Diseño y Construcción de un sensor de flujo tipo turbina para flujo no uniforme. 1ra edición, Bucaramanga, Ed. Universidad Pontificia Bolivariana Escuela de Ingeniería y Administración.
- Villajulca, J.C. (14 de octubre de 2009). Medidor A Turbina. Recuperado de: <https://instrumentacionycontrol.net/flujo-medidores-de-area-variable-magneticos-turbina-vortice-y-flujo-total/>
- Endress + Hauser, (2006), La Guía de Mantenimiento: Medición de Caudal, España, Editorial: Endress + Hauser, pag. 42, 40, 44.
- García D. (8 de enero de 2024). Medición de Líquidos y Gases: 4 Tipos de Medidores de Flujo para Petróleo y Gas.
- Entidad Mexicana de Acreditación, Página Principal de la EMA. Recuperado del 31-01-2024 de https://www.ema.org.mx/portal_v3/index.php/que-es-ema#arribaEma
- Angel Moreno, J. (15, 16 y 17 de Junio del 2005). Metodología para el cálculo de incertidumbre. Querétaro, México. Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica.
- Vazquez Espinosa I. (2016). Estudio del empleo de Medidores de flujo másico por efecto Coriolis, instalados en la C.T. Francisco Pérez Ríos [Tesis de Licenciatura, Universidad

Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

- Milo A. (24 de agosto de 2023). Efecto Coriolis: qué es y cómo afecta a la duración de los vuelos. National Geographic en Español de <https://goo.su/1QCj6Mr>
- Reher García O. (2023). Sección Esquemática del sensor. [Figura 1]. Recuperado de <https://goo.su/l735uvT>
- Endress + Hauser. (2009). The Coriolis Flow Measuring Principle. Youtube <https://goo.su/stiXNq>
- Vazquez Espinosa I. (2016). Estudio del empleo de Medidores de flujo másico por efecto Coriolis, instalados en la C.T. Francisco Pérez Ríos [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.
- Comité de Metrología del Instituto de la Ingeniería de España. (Diciembre 2019). La Metrología también existe. España. Editorial: Centro Español de Metrología.

Anexos:

Anexo A Cálculos para obtener error y repetibilidad.

Para realizar estos cálculos se empleó una hoja de Excel que facilita dichas operaciones donde:

Corrección a la masa del patrón:

De los certificados de calibración correspondientes al patrón, se realiza una corrección, empleando su factor de calibración por lo que queda:

# de corrida	Medidor patrón [kg]	Factor de calibración	Medidor patrón corregido [kg]
1	500.3847	0.99936	500.0645
2	501.0283	0.99936	500.7076
3	500.2234	0.99936	499.9033
4	500.9283	0.99936	500.6077
5	500.1924	0.99936	499.8723

Tabla 4

Factor del medidor (MF) es el mensurando de esta calibración, por lo que su expresión matemática queda de la siguiente manera, siendo este un parámetro adimensional:

$$MF = \frac{masa_{mp} F_{cal}}{masa_{mc}} \quad (7)$$

Donde:

$masa_{mp}$ es el valor del totalizado del medidor patrón corregida.

$masa_{mc}$ es el valor del totalizado del medidor a calibrar.

Calculando para la primera corrida usando la Ecuación (6):

$$MF = \frac{500.0645}{500.3741}$$

$$MF = 0.99936$$

Por lo cual la tabla queda de la siguiente manera:

# de corrida	Medidor patron corregido [kg]	Medidor a calibrar [kg]	MF adimensional
1	500.0645	500.3741	0.999381
2	500.7076	501.0082	0.999400
3	499.9033	500.1285	0.999550
4	500.6077	500.8423	0.999532
5	499.8723	500.0292	0.999686

Tabla 5

Obteniendo el promedio de los MF se tiene que el valor del parámetro para la primera corrida es:

$$\overline{MF} = 0.99951 \quad (8)$$

Posteriormente se realiza el cálculo del error relativo ($\%E_r$), este parámetro se calcula de la siguiente manera:

$$\%E_r = \left| \frac{masa_{mc} - masa_{mp}}{masa_{mp}} \right| * 100 \quad (9)$$

Sustituyendo valores en la Ecuación (8):

$$\%E_r = \left| \frac{500.3741 - 500.0645}{500.0645} \right| * 100 = 0.06$$

$$\%E_r = 0.06$$

Obteniendo la tabla que se muestra a continuación:

# de corrida	Medidor patron corregido [kg]	Medidor a calibrar [kg]	MF adimensional	Error encontrado [%]
1	500.0645	500.3741	0.999381	0.06
2	500.7076	501.0082	0.999400	0.06
3	499.9033	500.1285	0.999550	0.05
4	500.6077	500.8423	0.999532	0.05
5	499.8723	500.0292	0.999686	0.03

Tabla 6

Obteniendo el promedio de los errores encontrados durante la prueba se tiene lo siguiente:

$$\bar{E}_r = \frac{\sum_{i=1}^n Er_i}{n} \quad (10)$$

Sustituyendo los valores en la Ecuación (9)

$$\bar{E}_r = \frac{0.06 + 0.06 + 0.05 + 0.05 + 0.03}{5} = 0.05\%$$

$$\bar{E}_r = 0.05\%$$

De igual forma, la hoja de cálculo realiza el manejo de datos apropiado para la obtención de la desviación estándar del mensurando, la cual se calcula con la siguiente expresión para una muestra:

$$s(q) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n - 1}} \quad (11)$$

Donde:

n es el número de mediciones.

q_i Se refiere a los resultados obtenidos.

$\bar{q}$ Se refiere al promedio de los resultados obtenidos.

Organizando la información de la siguiente manera:

# de corrida	MF adimensional	Error encontrado [%]
1	0.999381	0.06
2	0.999400	0.06
3	0.999550	0.05
4	0.999532	0.05
5	0.999686	0.03

Tabla 7

Donde n = 5

Se realiza el cálculo del MF promedio ($\overline{MF}$):

$$\overline{MF} = \frac{0.999381 + 0.999400 + 0.999550 + 0.999532 + 0.999686}{5}$$

$$\overline{MF} = 0.999510$$

# de corrida	MF Adimensional x_i	Error encontrado [%]	MF Promedio $\bar{x}$	$(q_i - \bar{q})$	$(q_i - \bar{q})^2$
1	0.999381	0.06	0.999510	-0.000129	1.65284E-08
2	0.999400	0.06	0.999510	-0.000110	1.20209E-08
3	0.999550	0.05	0.999510	0.000040	1.59173E-09
4	0.999532	0.05	0.999510	0.000022	4.78188E-10
5	0.999686	0.03	0.999510	0.000176	3.11306E-08

Tabla 8

Tomando la parte de la raíz y el término del numerador en la Ecuación (10) y sustituyendo valores:

$$\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 = 6.17498E - 08$$

Finalmente sustituyendo los valores obtenidos para la Ecuación (10):

$$s(q) = \sqrt{\frac{6.17498E - 08}{5 - 1}}$$

$$\therefore s(q) = 0.000124248$$

Finalmente calculando el valor de la repetibilidad (*Repet*):

$$Repet = s(q) * 100 \quad (12)$$

Sustituyendo valores en la Ecuación (11):

$$Repet = 0.000124248 = 0.012\%$$

Anexo B Tabla de cálculo de incertidumbres.

Para la evaluación de la contribución de la incertidumbre tipo A, una vez se realizó el cálculo de la desviación estándar empleando la Ecuación (10) define la Incertidumbre estándar $u(x_i)$ de una magnitud de entrada X_i mediante la siguiente ecuación:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

Donde:

x_i Se refiere al mejor estimado de X_i

Para la evaluación de la contribución de la incertidumbre tipo B con una distribución rectangular se cuenta con la siguiente expresión:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{12}} \quad (14)$$

Donde:

a para este caso de estudio se utiliza como el valor obtenido de la información documental.

Posteriormente se calcula el valor para la incertidumbre combinada, de un mensurando Y , conocida también como la ley de propagación de la incertidumbre, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i * u(x_i)]^2} \quad (15)$$

Donde:

$u_c(y)$ es la incertidumbre estándar combinada de ambos tipos de incertidumbres tanto tipo A como Tipo B.

c_i es el coeficiente de sensibilidad.

Estos coeficientes de sensibilidad se pueden obtener a partir de una relación funcional. Si el modelo matemático para el mensurando $Y = f(X_1 + X_2, \dots, X_N)$ describe la influencia de la magnitud de entrada X_i suficientemente bien mediante una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad c_i se calcula por la derivada parcial de f con respecto a X_i :

$$c_i = \left. \frac{\partial f(X_1, \dots, X_N)}{\partial X_i} \right|_{X_1=x_1 \dots X_N=x_N} \quad (16)$$

Por cuestiones de privacidad se supone el siguiente ejemplo de modelo matemático para el mensurando de flujo el cual cuenta con los parámetros que contribuyen a la incertidumbre:

$$MF = \frac{masa_{mp} F_{cal}}{masa_{mc}} + Repet \quad (17)$$

De lo anterior el coeficiente de sensibilidad para cada una de las contribuciones de la incertidumbre queda de la siguiente manera:

1.- Para el coeficiente de sensibilidad de la contribución de la incertidumbre debida a la repetibilidad de la prueba c_1 :

$$c_1 = \frac{\partial(MF)}{\partial Repet} = 1 \quad (18)$$

2.- Para el coeficiente de sensibilidad de la contribución de la incertidumbre debida al factor de calibración del medidor patrón c_2 :

$$c_2 = \frac{\partial(MF)}{\partial F_{cal}} = \frac{masa_{mp}}{masa_{mc}} \quad (19)$$

3.- Para el coeficiente de sensibilidad de la contribución de la incertidumbre debida al valor del totalizado de la masa del medidor patrón c_3 :

$$c_3 = \frac{\partial(MF)}{\partial F_{cal}} = \frac{F_{cal}}{masa_{mc}} \quad (20)$$

4.- Para el coeficiente de sensibilidad de la contribución de la incertidumbre debida al valor del totalizado de la masa del medidor a calibrar c_4 :

$$c_4 = \frac{\partial(MF)}{\partial F_{cal}} = -\frac{masa_{mp} F_{cal}}{(masa_{mc})^2} \quad (21)$$

Finalmente se calcula la Incertidumbre expandida U emplando la siguiente expresión:

$$U = u_c * K \quad (22)$$

Donde:

u_c es el valor de la incertidumbre combinada.

K es el factor de cobertura, cuyo valor empleado por el laboratorio de calibración es 2.

Tabla de Cálculo de Incertidumbres

Analizando para cada magnitud de entrada empezando por la repetibilidad:

Se sabe que la contribución debida a la repetibilidad de la prueba es una contribución de tipo A por lo que empleando la Ecuación (10) y la Ecuación (12) se obtiene lo siguiente:

$$s(q) = 0.000124248;$$

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

$$u(x_1) = \frac{0.000124248}{\sqrt{5}}$$

$$\therefore u(x_1) = 5.556539 * 10^{-5}$$

De la Ecuación (17), sabemos que su coeficiente de sensibilidad tiene el valor de 1 por lo cual al realizar la operación $[c_1 * u(x_1)]^2$ para el cálculo de la incertidumbre combinada se tiene:

$$[c_1 * u(x_1)]^2 = [1 * 5.556539 * 10^{-5}]^2$$

$$= [5.556539 * 10^{-5}]^2$$

$$[c_1 * u(x_1)]^2 = 3.08749 * 10^{-5}$$

Analizando para la magnitud de entrada debido al factor de calibración:

Se sabe que la contribución debida al factor de calibración del medidor patrón es una contribución de tipo B o documental, la cual involucra parámetros descritos en el certificado de calibración como el Meter Factor precargado, la deriva del instrumento, una estabilidad del cero y su curva de ajuste, por lo que de la bibliografía el valor obtenido su contribución de incertidumbre para este caso es de 0.000250400.

$$u(x_2) = 0.0002504$$

Empleando la Ecuación (18) y la Tabla 3 se obtienen los valores promedio de los totalizados del medidor patrón y el medidor a calibrar se tiene para el coeficiente de sensibilidad:

$$c_2 = \frac{\overline{masa}_{mp}}{\overline{masa}_{mc}} = \frac{500.23108 [kg]}{500.47646 [kg]} = 0.9995097$$

Para lo cual al realizar la operación $[c_2 * u(x_2)]^2$ de la incertidumbre combinada se tiene:

$$[c_2 * u(x_2)]^2 = [0.9995097 * 0.0002504]^2$$

$$= [0.000250277]^2$$

$$[c_2 * u(x_2)]^2 = 6.26385 * 10^{-5}$$

Por último se realiza el cálculo para la magnitud de entrada debido a la resolución de los instrumentos comenzando por el instrumento patrón:

De igual forma esta contribución es de tipo B o documental, con una distribución de probabilidad de tipo rectangular por lo que haciendo uso de la Ecuación (13) y sabiendo

que el instrumento presenta una resolución de 0.0001 [kg] se le asigna al parámetro a este valor, quedando la expresión matemática de la siguiente manera:

$$u(x_3) = \frac{0.0001}{\sqrt{12}} = 2.886751 * 10^{-5} [kg]$$

Posteriormente se calcula el coeficiente de sensibilidad debido a esta contribución haciendo uso de la Ecuación (19), sabiendo que el factor de calibración F_{cal} tiene un valor de 0.99936 y el promedio de la masa reportada por el instrumento a calibrar es de 500.47646 [kg], sustituyendo estos valores:

$$\begin{aligned} c_3 &= \frac{\partial(MF)}{\partial F_{cal}} = \frac{F_{cal}}{\overline{masa}_{mc}} \\ &= \frac{0.99936}{500.47646 [kg]} \\ c_3 &= 0.001996817 \left[\frac{1}{kg} \right] \end{aligned}$$

Para lo cual al realizar la operación $[c_3 * u(x_3)]^2$ de la incertidumbre combinada se tiene:

$$\begin{aligned} [c_3 * u(x_3)]^2 &= \left(0.001996817 \left[\frac{1}{kg} \right] * 2.886751 * 10^{-5} [kg] \right)^2 \\ &= \left(0.001996817 \left[\frac{1}{kg} \right] * 2.886751 * 10^{-5} [kg] \right)^2 \\ &= (5.76431 * 10^{-8})^2 \\ [c_3 * u(x_3)]^2 &= 3.32273 * 10^{-1} \end{aligned}$$

Realizando el procedimiento anterior para la resolución de del instrumento a calibrar:

$$u(x_4) = \frac{0.0001}{\sqrt{12}} = 2.886751 * 10^{-5} [kg]$$

Posteriormente se calcula el coeficiente de sensibilidad debido a esta contribución haciendo uso de la Ecuación (20) sabiendo que el factor de calibración F_{cal} tiene un valor de 0.99936, el promedio de la masa reportada por el medidor a calibrar es de 500.47646 [kg] y el promedio de la masa reportada por el medidor patrón es de 500.23108 [kg] sustituyendo estos valores:

$$c_4 = \frac{\partial(MF)}{\partial F_{cal}} = - \frac{masa_{mp} F_{cal}}{(masa_{mc})^2}$$

$$= -\frac{500.23108 [kg] 0.99936}{(500.47646 [kg])^2}$$

$$c_4 = -0.001995838 \left[\frac{1}{kg} \right]$$

Para lo cual al realizar la operación $[c_4 * u(x_4)]^2$ de la incertidumbre combinada se tiene:

$$\begin{aligned} [c_4 * u(x_4)]^2 &= \left(-0.001995838 \left[\frac{1}{kg} \right] * 2.886751 * 10^{-5} [kg] \right)^2 \\ &= (-5.76149 * 10^{-8})^2 \\ [c_4 * u(x_4)]^2 &= 3.31947 * 10^{-1} \end{aligned}$$

Finalmente empleando la Ecuación (16) se calcula la incertidumbre combinada:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i * u(x_i)]^2}$$

Calculando la sumatoria:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [c_i * u(x_i)]^2 &= [c_1 * u(x_1)]^2 + [c_2 * u(x_2)]^2 + [c_3 * u(x_3)]^2 + [c_4 * u(x_4)]^2 \\ \sum_{i=1}^n [c_i * u(x_i)]^2 &= 3.08749 * 10^{-5} + 6.26385 * 10^{-5} + 3.32273 * 10^{-15} + 3.31947 * 10^{-15} \\ \sum_{i=1}^n [c_i * u(x_i)]^2 &= 6.5726 * 10^{-8} \end{aligned}$$

Sustituyendo el valor de la sumatoria en la ecuación de la incertidumbre combinada:

$$\begin{aligned} u_c(y) &= \sqrt{6.5726 * 10^{-8}} \\ \therefore u_c(y) &= 0.00025637 \end{aligned}$$

Finalmente utilizando la Ecuación (21) y sustituyendo los valores obtenidos:

$$\begin{aligned} U &= u_c * K \\ U &= 0.00025637 * 2 \\ U &= 0.00051274 \end{aligned}$$

Expresando en porcentaje:

$$\therefore U = 0.051\%$$

Organizando lo anterior en tablas se tiene:

N°	Magnitud de entrada	Valor	Unidades	Simbolo	Fuente de información
1	Repetibilidad (s)	0.000124248	[1]	Dispersión de indicaciones	s/(n ^{0.5})
				s	5.55652E-05
2	Factor de calibración	0.9994	[1]		0.000250400
			Certificado de calibración	MFmm	
			Deriva (Viene de estudio)	6 mm	
			Estabilidad del cero	ξmm	
			Curva de ajuste	CA	
3	Masa Patrón (Mmm)	500.2310671	kg	Res mm	2.88675E-05
				Fabricante	0.0001
4	Resolución IBC (Rm)	500.47646	kg	Resm	2.88675E-05
				Fabricante	0.0001

Figura 37. TCI generada.

tipo de distribución	Incertidumbre estandar u(xi)	Coefficiente de sensibilidad ci	u(xi) * ci	[u(xi)*ci] ²
Tipo A	5.55652E-05	1	5.55652E-05	3.08749E-09
Tipo B	0.000250400	0.999509681	0.000250277	6.26385E-08
Tipo B	2.88675E-05	0.001996817	5.76431E-08	3.32273E-15
Tipo B	2.88675E-05	-0.001995838	-5.76149E-08	3.31947E-15

Figura 38. TCI generada segunda parte