

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS



Trabajo de Suficiencia Profesional

“Implementación del Sistema Primario de Calibración de Medidores de Caudal de Líquidos por el Método de Pesada Estática, bajo el esquema de la ISO 17025:2017”

**Para obtener el Título Profesional de
Ingeniero Físico**

**ELABORADO POR:
Camilo Ernesto León Huaca**

**ASESOR:
Dr. Abel Aurelio Gutarra Espinoza**

**LIMA - PERÚ
2024**

Citar / How to cite	León Huaca [1]
Referencia/Reference Estilo/Style IEEE	[1] C. León Huaca, " <i>Implementación del Sistema Primario de Calibración de Medidores de Caudal de Líquidos por el Método de Pesada Estática, bajo el esquema de la ISO 17025:2017</i> ", [Trabajo de Suficiencia Profesional]. Lima (Perú). Universidad Nacional de Ingeniería. 2024.

Citar / How to cite	(León Huaca, 2024)
Referencia/Reference Estilo/Style APA(7ma Ed.)	León Huaca, C (2024) " <i>Implementación del Sistema Primario de Calibración de Medidores de Caudal de Líquidos por el Método de Pesada Estática, bajo el esquema de la ISO 17025:2017</i> ", [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.

Dedicatoria

*A mis padres, a mi amada esposa Jeny,
a mis hermanos, sobrinos, cuñados, a mi abuelo político Don Eloy,
a la memoria de mi querida suegra Elizabeth
y en especial a mi hijo Gerardito,
quien ha sido la principal inspiración
para la realización del presente trabajo.*

Agradecimientos

Como todo en la vida, si bien el mérito puede llevar un nombre y apellido, uno nunca lo consigue enteramente solo, es por ello que quiero agradecer primeramente al Dr. Abel Gutarra, cuyos consejos, exigencia y guía, sobre todo en mis años de estudiante en la Facultad de Ciencias de la UNI, y ahora como mi asesor, han sido de suma influencia en mi quehacer profesional.

Muchas gracias al Director de Metrología del INACAL, Ing. José Dajes, quien fue el artífice de la creación y posterior visión a largo plazo del Laboratorio de Flujo de Líquidos del INACAL.

Mi especial gratitud al Ing. Adriel Arredondo y a todo el equipo del laboratorio conformado por Walter Gervacio, Nikko Meza y Efrain Parra, cuyas opiniones técnicas, sumado a la experiencia conjunta, sirvieron de soporte al presente trabajo. Al Lic. Donny Taipe y a la Lic. Luz Cori por el buen resultado que obtuvimos en la Comparación internacional SIM.M.D-S7 de Densidad de Líquidos (cuyo trabajo se encuentra actualmente en Draft B) y que servirá de soporte en la trazabilidad de nuestro laboratorio. En ese sentido, agradezco al Ing. Abed Morales por sus conocimientos, confianza y respaldo en mi paso por el Laboratorio de Volumen y Densidad de INACAL, así también al Lic. Aldo Quiroga, Responsable del Equipo de Metrología Científica e Industrial.

No puedo dejar de agradecer a la Dra. Elsa Batista, experta técnica del IPQ de Portugal, por su calidad profesional demostrada en el Peer Review. De la misma manera, reconocer al Dr. John Wright, por su mentoría durante mi pasantía técnica en el Division de Flujo del NIST de Estados Unidos, lo cual significó un gran paso en mi carrera y fundamental para la realización del presente trabajo.

Finalmente, quiero expresar mi profunda gratitud a mi mamá María Elena Huaca Olivera, mi papá Gerardo León Borja, a ambos por guiarme con su inmensa sabiduría, ejemplo y paciencia; y a mi esposa Jeny Rodríguez Guevara por su inmenso amor, por no dejar de creer en mi capacidad y brindarme siempre su apoyo incondicional. Gracias por estar siempre conmigo.

Resumen

El presente trabajo explica la implementación de la norma ISO/IEC 17025:2017 en el Sistema de Pesada estática para la calibración de medidores de caudal de líquidos en el Laboratorio de Flujo de Líquidos del INACAL, que sirvió de base para pasar con éxito la Revisión Par llevada a cabo por una reconocida experta del EURAMET, lo que se plasmó en la renovación de la competencia técnica del laboratorio ante el Sistema Interamericano de Metrología (SIM). Se desarrolla el enfoque de los mecanismos de aseguramiento de los resultados empleado por el laboratorio, en conjunto con los diversos aspectos técnicos, desde el equipamiento, hasta las comprobaciones intermedias de instrumentos. Adicionalmente, se estableció el modelo matemático y posterior implementación de las ecuaciones que rigen el error en calibración de las magnitudes de caudal másico y caudal volumétrico de líquidos con la proposición del modelo estándar de incertidumbre de la GUM y su validación numérica mediante el método de Monte Carlo. Al respecto, se presenta un análisis detallado del impacto de las magnitudes involucradas según las condiciones de medición y la respuesta del medidor calibrado. Finalmente, se completa el esquema con una mejor definición de la trazabilidad de la densidad del agua (la cual es empleada como líquido de trabajo) y la caracterización del sistema de desviación de caudal.

Palabras clave: caudalímetro, calibración, pesada estática, ISO/IEC 17025

Abstract

This report explains the implementation of the ISO/IEC 17025:2017 standard in the Static Weighing System for the calibration of liquid flow meters at the INACAL Liquid Flow Laboratory, which served as the basis for successfully passing the Peer Review carried out by a recognized EURAMET expert, which resulted in the renewal of the laboratory's technical competence before the Inter-American Metrology System (SIM). The approach to the results assurance mechanisms used by the laboratory is developed, in conjunction with the various technical aspects, from equipment to intermediate instrument checks. In addition, the mathematical model and subsequent implementation of the equations that govern the error in calibration of the magnitudes of mass flow and volumetric flow of liquids were developed with the proposal of the standard uncertainty model of the GUM and its numerical validation using the Monte Carlo Method. In this regard, a detailed analysis of the impact of the magnitudes involved is presented according to the measurement conditions and the response of the calibrated meter. Finally, the scheme is completed with a better definition of the traceability of the density of water (which is used as the working liquid) and the characterization of the flow diversion system.

Keywords: flow meter, calibration, static weighing, ISO/IEC 17025

Introducción

El Laboratorio de Flujo de Líquidos de la Dirección de Metrología del Instituto Nacional de Calidad – INACAL es el laboratorio de referencia nacional y representa la más alta jerarquía en trazabilidad metrológica para los medidores de caudal de líquidos en las diversas áreas industriales y de servicios en el país.

Para asegurar el nivel de más alta exactitud, el laboratorio cuenta con un sistema patrón primario para la medición de caudal de líquidos, basado en el método de pesada estática. Mediante este método se determina el caudal de referencia para la calibración de caudalímetros como la masa (o volumen) de líquido que es desviado hacia un sistema de recolección durante un intervalo de tiempo dado y en condiciones de flujo estable y continuo.

Como parte del proceso de reconocimiento de la capacidad de medición y calibración (CMC) del sistema desarrollado en INACAL ante la Oficina Internacional de Pesas y Medidas - BIPM, se realizó la implementación del sistema conforme a la norma ISO 17025:2017, juntamente se llevaron a cabo la caracterización, el desarrollo del análisis de incertidumbre, la hoja de cálculo de servicio y la validación final del sistema.

Finalmente, en el año 2022 el sistema fue evaluado en el intervalo de medición de 150 kg/h hasta 130 000 kg/h mediante una peer review por una reconocida experta técnica de nivel internacional del Instituto Português da Qualidade – IPQ , de Portugal.

Tabla de Contenido

Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	vii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Definiciones	1
1.1.1 Definiciones generales de metrología	1
1.1.2 Definiciones relacionadas con la magnitud de caudal	3
1.1.3 Definiciones relacionadas con el instrumento a calibrar	4
1.1.4 Definiciones relacionadas con el método de calibración	5
1.2 Identificación del problema	5
1.3 Antecedentes	6
1.3.1 Reseña de la Dirección de Metrología del INACAL	6
1.3.2 Mediciones de caudal de líquidos a nivel internacional	7
1.4 Objetivos del estudio	8
1.4.1 Objetivo general	8
1.4.2 Objetivos específicos	8
Capítulo II. Fundamento teórico	10
2.1 Medidores de caudal de líquidos	10
2.1.1 Medidores de caudal de turbina	10
2.1.2 Medidores electromagnéticos	12
2.1.3 Medidores ultrasónicos de tiempo de tránsito	13
2.1.4 Medidores de efecto Coriolis	15
2.1.5 Medidores de Vortex	17

2.2	Calibración de caudalímetros mediante el método de pesada estática con desviador	18
2.2.1	Fundamento del método	19
2.2.2	El sistema de pesada estática con desviador	20
2.2.3	Modelo matemático para el caudal másico y la masa totalizada	21
2.2.4	Modelo matemático para el caudal volumétrico y el volumen totalizado	22
2.3	Caracterización del sistema de desviación	23
2.3.1	Modelo matemático del error de conteo Δt	23
2.3.2	Incertidumbre del error de conteo	24
2.4	Requisitos técnicos de la norma ISO/IEC 17025:2017	24
2.4.1	Personal	25
2.4.2	Instalaciones y condiciones ambientales	26
2.4.3	Equipamiento	27
2.4.4	Trazabilidad metrológica	29
2.4.5	Selección, verificación y validación de métodos	30
2.4.6	Registros técnicos	30
2.4.7	Informe de Resultados	30
2.5	Aseguramiento de la validez de los resultados	32
2.5.1	Comprobación operativa de los equipos de medición	33
2.5.2	Detección de valores atípicos	33
2.5.3	Comprobaciones intermedias de los patrones de trabajo	35
2.5.4	Revisión de resultados informados	36
2.5.5	Comparación intra laboratorio	36
2.5.6	Comparaciones internacionales	37
2.5.7	Repetición de las mediciones	38
2.5.8	Empleo de instrumentos testigo	39
Capítulo III.	Desarrollo del procedimiento de calibración	40
3.1	Campo de aplicación	40
3.2	Instrumentos de medición y equipamiento	40
3.2.1	Medición de masa	40
3.2.2	Medición del tiempo	40
3.2.3	Medición de temperatura	41

3.2.4	Medición de presión en la línea	41
3.2.5	Instrumentos de adquisición de datos	42
3.2.6	Medición de condiciones ambientales	42
3.2.7	Medidores testigo	42
3.2.8	Sistema de desviación	42
3.2.9	Elementos de soporte	43
3.3	Condiciones de calibración	44
3.4	Acondicionamiento del sistema de medición	45
3.4.1	Acondicionamiento del caudalímetro	45
3.4.2	Acondicionamiento de la línea de medición	45
3.4.3	Acondicionamiento del sistema de adquisición	46
3.5	Procedimiento de calibración	48
Capítulo IV.	Estimación de la incertidumbre de medición	50
4.1	Incertidumbre de medición estándar y expandida	50
4.2	Determinación del error e incertidumbre para una serie de repeticiones	51
4.3	Incertidumbre del error en caudal másico	51
4.3.1	Incertidumbre en el error	51
4.3.2	Coeficientes de sensibilidad	52
4.4	Incertidumbre del error en masa	55
4.4.1	Incertidumbre en el error	55
4.4.2	Coeficientes de sensibilidad	56
4.5	Incertidumbre del error en caudal volumétrico	58
4.5.1	Incertidumbre en el error	58
4.5.2	Coeficientes de sensibilidad	59
4.6	Incertidumbre del error en volumen	63
4.6.1	Incertidumbre en el error	63
4.6.2	Coeficientes de sensibilidad	63
4.7	Aportes por magnitud de influencia	67
4.7.1	Indicación de la masa recolectada	67
4.7.2	Tiempo contabilizado por el sistema de medición	69
4.7.3	Efecto del divisor	70

4.7.4	Temperatura del agua en la línea de medición	71
4.7.5	Temperatura del agua en el recipiente de pesaje	73
4.7.6	Densidad del agua	75
4.7.7	Presión del agua en la línea de medición	76
4.7.8	Humedad relativa en el laboratorio	78
4.7.9	Presión atmosférica	80
4.7.10	Temperatura del laboratorio	82
4.7.11	Densidad de las pesas	83
4.7.12	Proceso de medición	84
4.7.13	Item de calibración (MUT)	84
Capítulo V.	Resultados y discusiones	86
5.1	Caracterización del desviador	86
5.1.1	Caracterización del desviador en la Línea N° 1	86
5.1.2	Caracterización del desviador en la Línea N° 2	88
5.2	Validación de la plantilla de cálculo	88
5.2.1	Diseño de la plantilla	89
5.2.2	Seguridad y protección	90
5.2.3	Especificaciones matemáticas y revisión del código	91
5.2.4	Funcionalidad	92
5.2.5	Cálculo numérico	94
5.3	Calibración de medidores de caudal	94
5.3.1	Calibración en Caudal másico y Masa	94
5.3.2	Calibración en Caudal volumétrico y Volumen	103
5.3.3	Mecanismos aplicados para el aseguramiento de la validez de los resultados	113
5.3.4	Análisis de las contribuciones a la incertidumbre	115
5.3.5	Validación empleando el Método de Monte Carlo	120
5.4	Evaluación para el Quality System Task Force - SIM	123
Conclusiones		126
Recomendaciones		128
Referencias bibliográficas		129

Anexos	132
------------------	-----

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2.1: Ckecklist de revisión de rutina para el banco de ensayo	33
Tabla 2.2: Valores umbrales para aplicación del Criterio de Chauvenet	35
Tabla 3.1: Toberas empleadas en la Línea N°1	43
Tabla 3.2: Toberas empleadas en la Línea N°2	43
Tabla 3.3: Condiciones que se deben cumplir durante la calibración de caudalímetros	44
Tabla 5.1: Caracterización del desviador con la tobera B-CH-01.	86
Tabla 5.2: Caracterización del desviador con la tobera B-CH-02.	87
Tabla 5.3: Caracterización del desviador con la tobera B-CH-03.	87
Tabla 5.4: Caracterización del desviador con la tobera B-G-01.	88
Tabla 5.5: Caracterización del desviador con la tobera B-G-02.	88
Tabla 5.6: Caracterización del desviador con la tobera B-G-03.	88
Tabla 5.7: Componentes de la plantilla empleada en la calibración de caudalímetros	90
Tabla 5.8: Información del caudalímetro N° 1	94
Tabla 5.9: Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 4500 kg/h	95
Tabla 5.10: Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 1000 kg/h	95
Tabla 5.11: Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 300 kg/h	95
Tabla 5.12: Resultado general de la calibración del caudalímetro N° 1	96
Tabla 5.13: Presupuesto de incertidumbre del caudalímetro N° 1 en Q_m a 4500 kg/h	97
Tabla 5.14: Presupuesto de incertidumbre del caudalímetro N° 1 en M a 4500 kg/h	100
Tabla 5.15: Información del caudalímetro N° 2	103
Tabla 5.16: Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 90 000 L/h	104
Tabla 5.17: Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 25 000 L/h	104
Tabla 5.18: Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 15 000 L/h	104

Tabla 5.19: Resultado general de la calibración del caudalímetro N° 2	104
Tabla 5.20: Presupuesto de incertidumbre del caudalímetro N° 2 en Q_v a 90 000 L/h	105
Tabla 5.21: Presupuesto de incertidumbre del caudalímetro N° 2 en V a 90 000 L/h	109
Tabla 5.22: Detección de valores atípicos para 4500 kg/h, donde $Ratio = 1.54$	113
Tabla 5.23: Detección de valores atípicos para 1000 kg/h, donde $Ratio = 1.54$	113
Tabla 5.24: Detección de valores atípicos para 300 kg/h, donde $Ratio = 1.38$	113
Tabla 5.25: Resultados del medidor testigo LFL 03 010	114
Tabla 5.26: Resultados del medidor testigo LFL 03 004	114
Tabla 5.27: Aporte a la incertidumbre en la calibración en Q_m del caudalímetro N° 1	115
Tabla 5.28: Aporte a la incertidumbre en la calibración en M del caudalímetro N° 1	117
Tabla 5.29: Aporte a la incertidumbre en la calibración en Q_v del caudalímetro N° 2	118
Tabla 5.30: Aporte a la incertidumbre en la calibración en V del caudalímetro N° 2	119
Tabla 5.31: Simulación por MMC para el caudalímetro N° 2 en Q_v a 90 000 L/h	121

Lista de figuras

	Pág.
2.1 Esquema del principio de medición de un medidor de turbina	11
2.2 Esquema del principio de medición de un medidor electromagnético.	12
2.3 Esquema del principio de medición de un medidor de ultrasonido	14
2.4 Esquema de un medidor de caudal ultrasónico multi cordón	15
2.5 Comportamiento del fluido en el interior de un medidor de efecto coriolis	16
2.6 Esquema de la estructura de un medidor de coriolis.	16
2.7 Señales en los puntos de entrada y salida de un medidor de efecto coriolis	17
2.8 Esquema del principio de medición de un medidor de vortex	18
2.9 Sistema de pesada estática para la calibración de caudalímetros	19
2.10 Comportamiento del caudal con el tiempo durante el proceso de calibración	20
2.11 El área principal de medición del Laboratorio de Flujo de Líquidos	27
2.12 El cuarto de bombas del Laboratorio de Flujo de Líquidos	28
2.13 Esquema de trazabilidad del Laboratorio de Flujo de Líquidos del INACAL	29
2.14 Representación gráfica del criterio de Chauvenet.	34
2.15 Diagrama para proceso de comparación intra laboratorio	37
2.16 Diagrama típico de un proceso de comparación internacional en metrología	38
3.1 Contadores y osciloscopios del sistema de pesada estática LFL	41
3.2 Medidor testigo de efecto coriolis, identificado como LFL 03 004	43
3.3 Sistema de desviación de la Línea N° 1	44
3.4 Anillos de conexión a tierra instalados en el caudalímetro	46
3.5 Interfaz gráfica para adquisición de datos del Sistema de pesada estática	47
5.1 Caracterización del desviador con las toberas de la Línea N° 1.	87
5.2 Caracterización del desviador con las toberas de la Línea N° 2	89
5.3 Ejemplo de protección de hojas de la plantilla Excel	91

5.4	Ejemplo de lista de variables comprendidas en la plantilla	92
5.5	Escritura de formulas en la plantilla	92
5.6	Unidades de medida asociadas a cada cálculo realizado	93
5.7	Muestra del empleo de tablas en la plantilla de cálculo	93
5.8	Tabla definida bajo el nombre de "Toberas"	93
5.9	Componentes de incertidumbre en la calibración en Q_m del caudalímetro N° 1	116
5.10	Componentes de incertidumbre en la calibración en M del caudalímetro N° 1	117
5.11	Componentes de incertidumbre en la calibración en Q_v del caudalímetro N° 2	119
5.12	Componentes de incertidumbre en la calibración en V del caudalímetro N° 2	120
5.13	Histograma de la Simulación por el MMC con $n = 100$	122
5.14	Histograma de la Simulación por el MMC con $n = 10\,000$	122
5.15	Histograma de la Simulación por el MMC con $n = 1\,000\,000$	122
5.16	Portada del informe del Peer Review realizado al LFL-INACAL en el año 2022	123
5.17	Certificado de aprobación otorgado por el SIM al LFL-INACAL	125

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Definiciones

En esta sección se mencionan las principales definiciones y conceptos relacionados con la magnitud de caudal y líquidos y la calibración de estos instrumentos.

1.1.1 *Definiciones generales de metrología*

Estas definiciones son las indicadas en el Vocabulario Internacional de metrología - VIM (JCGM, 2008c).

1.1.1.1 Magnitud. Es la propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia.

1.1.1.2 Calibración. Se define como la operación que, bajo condiciones especificadas, establece en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medición asociadas obtenidas a partir de los patrones de medición, 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 medición a partir de una indicación.

Es importante tener en cuenta que una calibración no es un "ajuste" de un sistema o instrumento de medición. Es decir, no debe ser interpretado como una operación de arreglo, configuración o modificación técnica del instrumento.

1.1.1.3 Trazabilidad metrológica. Es la propiedad de un resultado de medición, por la cual, dicho resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada

de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medición.

Las referencias pueden ser patrones internacionales o nacionales (ISO, 1991). Esta definición de trazabilidad metrológica requiere una jerarquía de calibración establecida, es decir, cada referencia o patrón es trazable a uno de mejor exactitud y menor incertidumbre.

1.1.1.4 Corrección. Es la compensación de un efecto sistemático estimado. La compensación puede tomar diferentes formas, tales como la adición de un valor o la multiplicación por un factor, o bien puede deducirse de una tabla.

1.1.1.5 Compatibilidad metrológica de resultados de medición. Es la propiedad de un conjunto de resultados de medición de un mensurando específico, tal que el valor absoluto de la diferencia de cualquier par de valores medidos a partir de dos resultados de medición distintos, sea inferior a un cierto múltiplo seleccionado de la incertidumbre estándar de esta diferencia.

1.1.1.6 Modelo de medición. Es la relación matemática entre todas las magnitudes conocidas que intervienen en una medición.

Una forma general del modelo de medición es la ecuación $f(Y, X_1, X_2, \dots, X_N) = 0$, donde Y , la magnitud de salida del modelo de medición, es el mensurando, cuyo valor debe deducirse a partir de la información sobre las magnitudes de entrada en el modelo de medición $X_1, \dots, X_n$.

1.1.1.7 Indicación. Es el valor proporcionado por un instrumento o sistema de medición. Una indicación puede presentarse en forma visual o acústica, o puede transferirse a otro dispositivo. Frecuentemente viene dada por la posición de una aguja en un cuadrante para salidas analógicas, por un número visualizado o impreso para salidas digitales, por un código para salidas codificadas, o por un valor asignado para medidas materializadas.

1.1.1.8 Error máximo permitido. Es el valor extremo del error de medición, con respecto a un valor de referencia conocido, permitido por especificaciones o reglamentaciones, para una medición, instrumento o sistema de medición dado.

1.1.2 Definiciones relacionadas con la magnitud de caudal

Las siguientes definiciones corresponden al Vocabulario para la Medición de Flujo en Conductos Cerrados, en la norma ISO 4006 (ISO, 1991).

1.1.2.1 Caudal. También llamado razón de flujo (flow rate), es definido como el cociente de la cantidad de fluido que pasa a través de una sección transversal de un conducto y el tiempo que le toma a esta magnitud pasar a través de esta sección.

1.1.2.2 Caudal másico. Caudal en el cual la magnitud del fluido está expresado como masa.

1.1.2.3 Caudal volumétrico. Caudal en el cual la magnitud del fluido está expresado como volumen.

1.1.2.4 Caudal medio. Valor medio del caudal en un periodo de tiempo.

1.1.2.5 Distribución de velocidad. Patrones de los vectores axiales de las velocidades locales de fluido en una sección transversal del conductor.

1.1.2.6 Perfil de flujo. Representación gráfica de la distribución de velocidad.

1.1.2.7 Distribución de velocidad completamente desarrollada. Distribución de velocidades que, una vez alcanzada, no varía de una sección transversal de un flujo de fluido a otra. Generalmente se logra al final de un tramo recto suficientemente largo de conducto.

1.1.2.8 Distribución regular de velocidad. Distribución de velocidades que se acerque lo suficiente a una distribución de velocidades completamente desarrollada para permitir una medición precisa del caudal a realizar.

1.1.2.9 Flujo estacionario. Flujo en el que parámetros como velocidad, presión, densidad y temperatura no varían lo suficiente con el tiempo como para afectar la exactitud requerida de la medición.

Los flujos estacionarios observados en conductos son en la práctica flujos en los que estos parámetros varían en el tiempo alrededor de valores medios independientes del tiempo; en realidad se trata de "flujos medios constantes".

1.1.3 Definiciones relacionadas con el instrumento a calibrar

Las siguientes definiciones corresponden al Vocabulario para la Medición de Flujo en Conductos Cerrados, en la norma ISO 4006 (ISO, 1991)

1.1.3.1 Caudalímetro. Dispositivo de medición de flujo el cual indica el caudal medido.

1.1.3.2 Tubo del medidor. Sección de conducto especialmente fabricada que se ajusta en todos los aspectos a las especificaciones de una norma e incorpora un dispositivo de medición de flujo.

1.1.3.3 Rango de caudal. También llamado, intervalo de caudal. Es aquel definido por el caudal máximo y el caudal mínimo, en el cual las insdicaciones del dispositivo o instrumento de medición no deben estar sujetas a un error más grande que el error máximo permitido.

1.1.3.4 Caudal máximo. Es el valor de caudal correspondiente al límite superior del rango de caudal. Es el valor más alto del caudal para el cual el dispositivo es requerido que suministre, durante un intervalo de tiempo limitado o predeterminado, información no sujeta a un error más grande que el error máximo permitido.

Esto se interpreta como el valor máximo de caudal cuyo error de indicación debe ser menor que el error máximo permitido asociado.

1.1.3.5 Caudal mínimo. Valor de caudal correspondiente al límite más bajo del rango de caudal.

1.1.4 Definiciones relacionadas con el método de calibración

Las siguientes definiciones corresponden al Vocabulario para la Medición de Flujo en Conductos Cerrados, en la norma ISO 4006 (ISO, 1991)

1.1.4.1 Método de pesada. Método de medición, generalmente aplicable a líquidos, en el que el flujo del fluido es dirigido de forma intermitente o continua a un tanque o recipiente de pesaje colocado en una máquina de pesar. El caudal se obtiene midiendo la masa de fluido que se recoge en un tiempo medido.

1.1.4.2 Pesada estática. Método de pesaje en el que la masa neta del fluido colectado se descuenta de la tara y del peso bruto determinados respectivamente antes y después de que el fluido haya sido desviado durante un intervalo de tiempo medido al tanque de pesaje.

1.1.4.3 Pesada dinámica. Método de pesaje en el que la masa neta del fluido colectado se descuenta de las mediciones de pesaje realizadas mientras el flujo de fluido se dirige al tanque de pesaje.

1.1.4.4 Desviador. Dispositivo que dirige el flujo hacia un tanque de pesaje (o un tanque volumétrico) o hacia su derivación (bypass) sin alterar el caudal en el circuito.

1.2 Identificación del problema

Como parte del mantenimiento internacional de su sistema de calidad, el Laboratorio de Flujo de Líquidos (LFL) de INACAL es evaluado cada 5 años ante el Quality System Task Force - QSTF ¹ para renovar su reconocimiento de competencia técnica en su sistema de gestión de calidad, basado en la norma ISO 17025.

En el año 2021, el LFL se trazó la meta obtener el reconocimiento formal de sus Capacidades

¹<https://sim-metrologia.org/about-us/structure/quality-system-task-force-qstf/>

de Medición y Calibración² (CMC, por su acrónimo en inglés) ante el BIPM en la calibración de caudalímetros empleando el método de mayor exactitud conocido hasta la fecha, que es el método de pesada estática con desviador.

Para lograrlo, primeramente se debían redefinir aspectos del sistema de gestión y de carácter técnico del LFL, alineados a una norma vigente, la ISO 17025:2017, para que puedan ser incluidos en la evaluación del QSTF del año 2022.

El principal reto a superar consistía en trabajar en la elaboración de la documentación que comprendiese el análisis del modelo matemático que describiera las ecuaciones de error e incertidumbre asociada a la medición, tanto para caudal másico, caudal volumétrico, la masa y el volumen registrados por un caudalímetro.

Adicionalmente, se debía trabajar en la creación de una nueva plantilla (hoja de cálculo) para el servicio de calibración, que incorpore los cambios establecidos en los documentos previamente mencionados, asimismo, esta debía ser funcional, de fácil actualización y a prueba de fallas.

Finalmente, era requerido redefinir el modelo de aseguramiento de validez de los resultados, la documentación técnica, la trazabilidad metrológica y la caracterización del desviador de flujo, que es una de las componentes clave en el sistema.

1.3 Antecedentes

1.3.1 Reseña de la Dirección de Metrología del INACAL

En 1862 se establece en el Perú el Sistema métrico decimal. Luego en 1869, con el Presidente José Balta se crea la Comisión de Verificación de Patrones de Pesas y Medidas la que en 1891 sería reemplazada por la Comisión Central de Pesas y Medidas . En 1875 el Congreso de la República aprueba la Convención del Metro y establece su reglamento.

En el año 1970, bajo el régimen militar se crea el Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas (ITINTEC) bajo el D.L. 171, en la cual se indica que una de sus funciones es la de realizar control de calidad, transferencia tecnológica y metrología. Posteriormente,

²<https://www.bipm.org/documents/20126/43742162/CIPM-MRA-G-13.pdf>

sus funciones se extenderían a la fiscalización de productos envasados, así como la facultad de ejercer sanción.

Para 1983, se establece el Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú, basado en el Sistema Internacional (SI), y correspondería al ITINTEC, bajo este nuevo sistema, el desarrollo del Servicio Nacional de Metrología (SNM).

En el año 1992, mediante D.L. 25818 se declara la disolución y liquidación del ITINTEC. En noviembre de 1992, mediante D.L. 25868 se crea el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI) la cual tuvo como funciones principales la protección de derechos de los consumidores, la promoción del mercado, la protección de la propiedad intelectual en todas sus formas y la honesta competencia. Bajo esta institución, continuaría el Servicio Nacional de Metrología brindando soporte a la industria nacional.

En la primera década del año 2010, con apoyo del Instituto Nacional de Metrología de la República Federal de Alemania, Physikalisch - Technische Bundesanstalt (PTB), se mejora el sistema de medición para la verificación y aprobación de modelo de medidores de agua y se implementa por primera vez el sistema de calibración de caudalímetros bajo los métodos de pesada estática y comparación, siendo el primero de ellos el sistema primario para esta magnitud.

En el año 2015, mediante Ley N.º 30224 se crea el Sistema Nacional de Calidad y el Instituto Nacional de Calidad - INACAL, teniendo como parte de sus competencias la acreditación, la normalización y la metrología. Con este último, se transfiere el SNM a INACAL, cambiando de nombre a la Dirección de Metrología.

1.3.2 Mediciones de caudal de líquidos a nivel internacional

El National Institute of Standards and Technology- NIST posee un sistema de medición de flujo mediante el método de pesada estática con desviador (conocido como gravimetric / flying - start - finish) el cual emplea agua potable como líquido de trabajo (Shinder and Marfenko, 2006). El sistema que realiza el pesaje consiste de una gran comparadora que alberga pesas patrón que brindan directamente el valor de masa de referencia a las mediciones. Su sistema presenta un diseño de divisor unidireccional que, según el propio instituto, tiene una corrección de tiempo igual a cero. El alcance de medición que ofrece con este sistema va desde 40 L/min hasta 1600 L/min con un nivel de incertidumbre del 0,03 %.

El Instituto Nacional de Metrología de la República Federal de Alemania, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) tiene en su sistema de alta exactitud que emplea el método de pesada estática con desviador. Su capacidad de medición ³ va desde 0,3 m³/h hasta 2100 m³/h y con un nivel de incertidumbre del 0,02 %.

El Centro Nacional de Metrología de México - CENAM tiene en su sistema de alta exactitud que emplea el método de pesada estática con desviador. Su capacidad de medición ⁴ va desde 40 L/min hasta 4300 L/min y con un nivel de incertidumbre del 0,038 % . Usualmente el PTB funciona como laboratorio piloto para las comparaciones internacionales entre los laboratorios más avanzados del mundo, y en ocasiones sirve de soporte como referencia para las regiones emergentes.

Tanto el NIST como el PTB son los dos laboratorios de referencia más avanzados con los que INACAL mantiene contacto en la magnitud de flujo de líquidos. El CENAM de México es el laboratorio de referencia más cercano para la región sudamericana y centroamericana para diversas magnitudes de medición y es el único hasta la fecha con CMC en flujo de líquidos registrada en el BIPM junto con el NIST y el NRC de Canadá, a nivel de todo América.

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1 Objetivo general

Consolidar el sistema de gestión del laboratorio de flujo de líquidos para sustentar las capacidades de medición y calibración ante el BIPM.

1.4.2 Objetivos específicos

- 1) Establecer y documentar un nuevo instructivo para el análisis y cálculo de incertidumbre en la calibración de caudalímetros, incluyendo la evaluación del aporte de incertidumbre cada magnitud de entrada, que respalde el procedimiento de calibración de caudalímetros.
- 2) Elaborar una nueva hoja de cálculo (plantilla) del servicio de calibración de caudalímetros,

³<https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-15/ag-152.html>

⁴<https://www.cenam.mx/calibracion/cmc.aspx?idcserv=339>

de fácil actualización y comprobada robustez, incorporando el nuevo modelo de cálculo de incertidumbre.

- 3) Establecer y documentar los mecanismos de aseguramiento de validez de los resultados del laboratorio.
- 4) Establecer y documentar el nuevo método de realizar las comprobaciones intermedias de los instrumentos de medición involucrados en la calibración de caudalímetros.
- 5) Reforzar la línea de trazabilidad metrológica y requisitos del sistema de pesada estática.
- 6) Caracterizar el sistema de divisor de flujo de líquido del sistema de pesada estática incorporando un modelo para su incertidumbre.

Capítulo II. Fundamento teórico

2.1 Medidores de caudal de líquidos

El medir el caudal o flujo de líquidos ha sido un desafío constante para los fabricantes de medidores para lograr satisfacer las necesidades de medición de los usuarios tanto por la exactitud como por la facilidad y versatilidad de su uso. En la presente sección se menciona una serie de tipos de medidores de caudal de líquidos más conocidos en la industria, los cuales pueden ser calibrados por el LFL-INACAL.

2.1.1 Medidores de caudal de turbina

Estos medidores cuentan con un rotor giratorio montado sobre cojinetes dentro de una carcasa. El rotor tiene palas similares a las de una hélice, y gira cuando el agua u otro fluido pasa sobre él. La fuerza de la corriente hace girar el rotor. El caudal es proporcional a la velocidad de rotación del rotor. Se utilizan múltiples métodos para detectar la velocidad del rotor, entre ellos, un sensor eléctrico y un eje mecánico (Yoder, 2023).

Los medidores de caudal de turbina difieren entre sí en el diseño, por ejemplo existen los formados por paletas y otros formados por una hélice.

En estos medidores de caudal el rotor que gira lo hace de manera proporcional al caudal. Medir el flujo de esta manera requiere la capacidad de detectar qué tan rápido gira el rotor. Actualmente, este tipo de medidores hacen uso de un sensor de captación con un imán y un conductor giratorio o una bobina inductiva. Con ello es posible contar el número de rotaciones de un rotor de turbina (ver figura 2.1).

En el contexto económico actual, los medidores con esta tecnología están volviendo a ganar popularidad debido a su precio, buena calidad en medición de medios y altos caudales y sobre todo

por las continuas mejoras tecnológicas de parte de sus fabricantes.

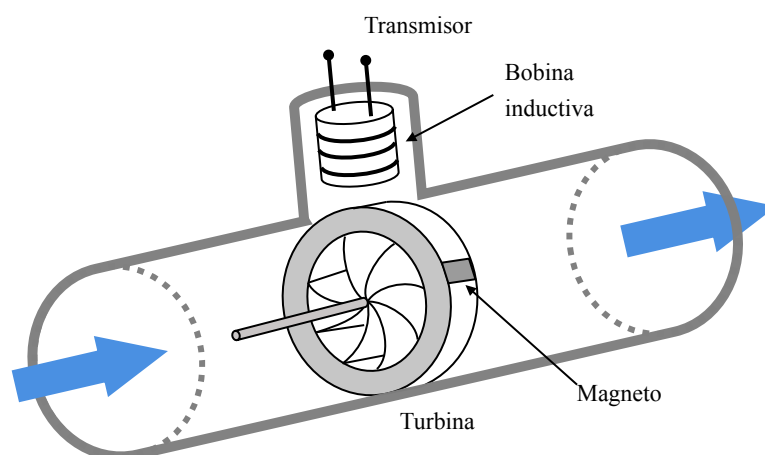
Los medidores de caudal de turbina pueden ser diseñados tanto para uso en la medición de caudal de líquidos como de gas, ya que por su principio de funcionamiento, no es necesario cambiar el medidor de caudal cuando el fluido a medir cambia.

El masivo de uso de este tipo de medidores está respaldado por organismos de aprobación tales como la International Standards Organization (ISO), la American Water Works Association (AWWA) y la American Gas Association (AGA) (Yoder, 2023). En el Perú, los medidores de agua (los cuales miden volumen) están basados en esta tecnología y son los que tienen mayor cantidad de aprobaciones de modelo u homologación, y como consecuencia, mayor uso en el mercado nacional.

Desafortunadamente, este tipo de medidores no son muy estables en términos metrológicos. Su desempeño también es sensible a las variaciones de viscosidad del fluido que miden así como a las perturbaciones de flujo.

Figura 2.1

Esquema del principio de medición de un medidor de turbina



Nota. Cuando el fluido atraviesa el medidor de caudal, hace girar una turbina y por cada giro que realiza, el magneto interactúa con la bobina y se genera una señal de pulso, la cual es interpretada como volumen. Conociendo el tiempo que tarda en dar una vuelta a un caudal establecido, el fabricante determina el valor nominal de caudal asociado.

2.1.2 Medidores electromagnéticos

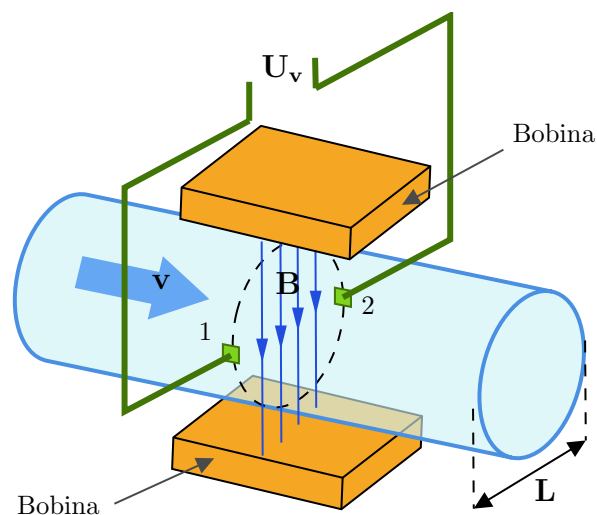
De acuerdo a la definición de la ISO 20456:2017 (ISO, 2017), un medidor de caudal del tipo electromagnético crea un campo magnético perpendicular a la dirección del flujo, permitiendo que el caudal sea deducido del voltaje inducido U_v producido por el movimiento de un fluido conductor a través de un campo magnético.

Como se observa en la figura 2.2 el campo magnético es colocado con respecto a un tubo alineado al medidor tal que el camino del líquido conductor, fluyendo en el tubo del medidor, es normal al campo magnético. De acuerdo con la Ley de Faraday, el movimiento del líquido a través del campo magnético induce un voltaje, U_v , en el líquido en un camino mutuamente normal al campo y a la dirección del movimiento del líquido.

Al colocar electrodos en contacto con el líquido en monturas aisladas o usando electrodos aislados con acoplamiento del tipo capacitancia en el tubo del medidor en un plano diametral normal al campo magnético, un voltaje proporcional a la velocidad del flujo es producido el cual puede ser procesado por un transmisor.

Figura 2.2

Esquema del principio de medición de un medidor electromagnético.



Nota. Dos bobinas generan un campo magnético B , perpendicular a la dirección de la velocidad del fluido v que viaja a través de un tubo de sección circular de diámetro L . Los iones positivos y negativos desvían su trayectoria hacia los electrodos 1 y 2, induciendo un campo, manifestándose en la diferencia de potencial U_v , cuya intensidad es proporcional a la velocidad v y al caudal del fluido Q .

Los medidores basados en este principio son capaces de medir el flujo en cualquiera de los dos sentidos a través del tubo del medidor.

Este tipo de medidores mide flujo volumétrico y también puede medir el volumen totalizado en un periodo de tiempo.

Entre las principales ventajas de este tipo de instrumentos está la nula obstrucción al flujo, lo que lo hace adecuado para diversos tipos de líquidos, incluyendo aquellos que tienen suspensiones. Esto involucra que la pérdida de presión a través del medidor es baja, es decir, solo se debe a la longitud de la tubería del propio medidor. Además pueden ser usados de manera bidireccional, y la salida es de carácter lineal (Hayward, 1979).

Sin embargo, por su principio de medición, el líquido tiene que tener cierta conductividad, esto lo hace inaplicable en caso se quiera medir caudal empleando agua ultrapura. Actualmente, este tipo de medidores solo requieren valores mínimos de conductividad del orden de $5 \mu\text{S cm}^{-1}$ para poder medir adecuadamente ⁵.

2.1.3 Medidores ultrasónicos de tiempo de tránsito

Existen dos tipos de medidores en el mercado: los de Efecto Doppler y los de Tiempo de tránsito. Este último será tratado con detalle por ser el tipo de medidor ultrasónico más comercial en el Perú.

Los medidores de caudal de tiempo de tránsito están provistos de un emisor y un receptor. El emisor envía una señal ultrasónica, en ángulo, a través de la tubería y mide el tiempo que demora la señal en viajar de un lado de la tubería al otro. Cuando el haz ultrasónico viaja con el flujo este viaja más rápido que cuando viaja en contra del flujo (ver Figura 2.3).

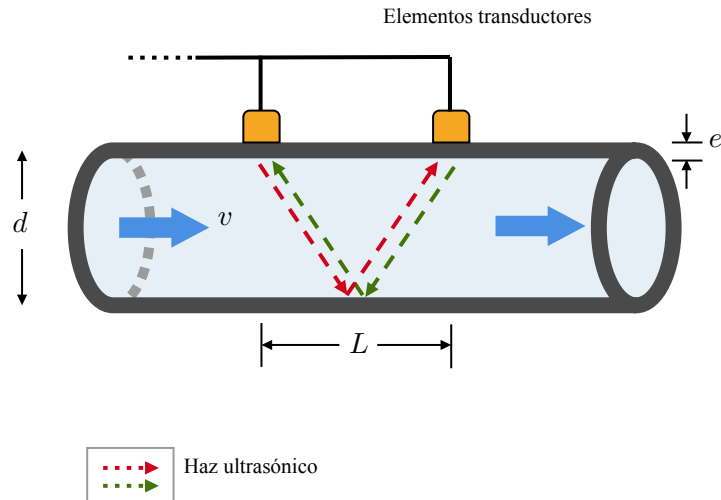
El medidor de flujo ultrasónico determina el tiempo que tarda cada haz ultrasónico que viaja en ambas direcciones, para ello, los transductores alternan su función como emisor y receptor en la misma longitud de recorrido.

La diferencia entre estos dos tiempos es proporcional al caudal. En realidad, los medidores ultrasónicos miden la velocidad de flujo, y dependiendo del diámetro de tubería d donde están

⁵Como en el caso de los medidores Promag 300 de la marca Endress + Hauser.

Figura 2.3

Esquema del principio de medición de un medidor de ultrasonido



Nota. El medidor ultrasónico determina el caudal, basado en el tiempo de viaje de dos señales, una que viaja con el flujo (trayectoria en rojo) y opuesta a flujo (trayectoria en verde), a través de una porción de tubería de longitud L . Cuando el medidor es del tipo Clamp-on, se debe tener en cuenta el tiempo de viaje a través de la pared de la tubería de espesor e .

localizados, indicaran un valor específico de caudal (Hayward, 1979). Se debe tener presente que la velocidad de flujo que mide el medidor de ultrasonido es la velocidad a través de un diámetro, lo que no es igual a una velocidad media en la tubería, producto de una ponderación de velocidades del perfil de flujo. Es por esta razón que para obtener una medición más exacta de la velocidad media existe un diseño multi cordón, donde cada cordón mide la velocidad del fluido para una zona específica de la sección transversal de la tubería. (ver Figura 2.4)

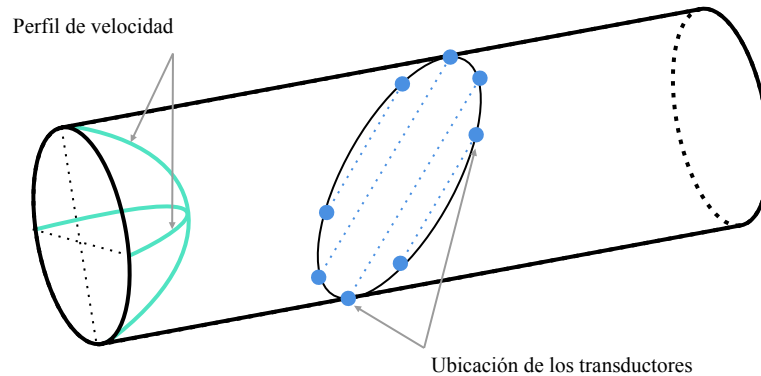
Debido a que las ondas ultrasónicas viajan libremente a través de las paredes, se pueden tener los transductores insertados en el cuerpo del medidor de caudal que luego es instalado en la línea de flujo (medidores de inserción o Built-in) o, por otro lado, colocar los transductores (fijados o pegados) durante el tiempo de medición, en la pared externa de la tubería de la línea de de flujo (medidores de fijación externa o Clamped-on).

Los medidores Clamped-on tienen la ventaja de que evita que se tenga que desarmar la línea de tubería para insertar el medidor, sin embargo, este tipo de medidor es menos exacto que los del tipo Built-in.

Los medidores de flujo ultrasónico de tiempo de tránsito se utilizan principalmente para líquidos limpios (Yoder, 2023).

Figura 2.4

Esquema de un medidor de caudal ultrasónico multi cordón



Nota. En este tipo de medidor, la disposición de los transductores es tal que permite determinar las diversas velocidades del perfil de flujo para poder promediarlas de manera ponderada y obtener la velocidad media del fluido en la tubería.

2.1.4 Medidores de efecto Coriolis

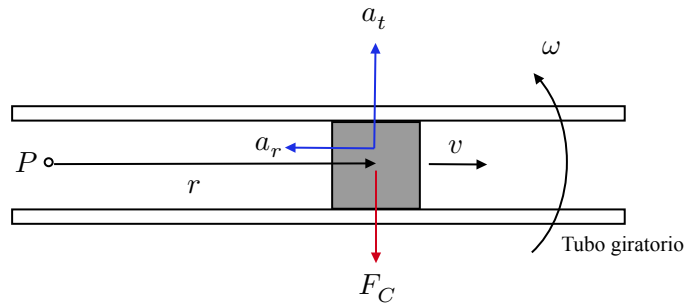
Los medidores de flujo del tipo Coriolis corresponden a uno de los desarrollos de caudalímetros más importantes y sus aplicaciones están ganando mayor terreno en diversas áreas de la industria y su relevancia ha sido reconocida por diversos organismos asesores tanto nacionales como internacionales (Baker, 2000).

Los medidores de flujo Coriolis operan bajo el principio en el cual se generan fuerzas de inercia siempre que una partícula en un cuerpo en rotación se mueve relativamente a este en una dirección hacia o alejándose del punto de rotación. Esta fuerza de inercia se denomina fuerza de Coriolis F_C (ver Figura 2.5). En los medidores de flujo Coriolis comerciales, no se utiliza la medición directa de la fuerza de Coriolis en tubos giratorios. En cambio, la medición se realiza comúnmente a través de tubos vibratorios, ya que la vibración contiene una cierta forma de movimiento rotacional (ISO, 2015).

De acuerdo con la Figura 2.6, la tubería interna del medidor por donde viaja el fluido, la cual tiene forma curva, está colocada fijamente en la de entrada y salida. Con un mecanismo de accionamiento de vibración ubicado en el medio, el tubo de flujo se excita a un movimiento sinusoidal continuo. Los sensores 1 y 2 ubicados en la entrada y salida, respectivamente, detectan este movimiento. Idealmente, cuando hay ausencia de flujo, el movimiento sinusoidal en las posiciones 1 y 2 están en fase.

Figura 2.5

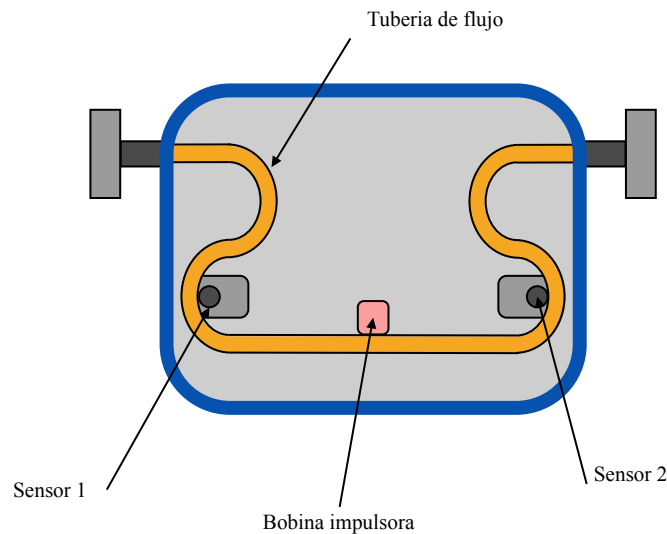
Comportamiento del fluido en el interior de un medidor de efecto coriolis



Nota. Un diferencial de masa de fluido, en una posición r que se mueve a velocidad v respecto a un sistema de referencia inercial y dentro de un tubo que presenta un giro de velocidad angular ω , experimenta una aceleración que tiene una componente radial a_r y una tangencial a_t . La fuerza F_C es sobre el tubo corresponde en magnitud a esta componente a_t .

Figura 2.6

Esquema de la estructura de un medidor de coriolis.



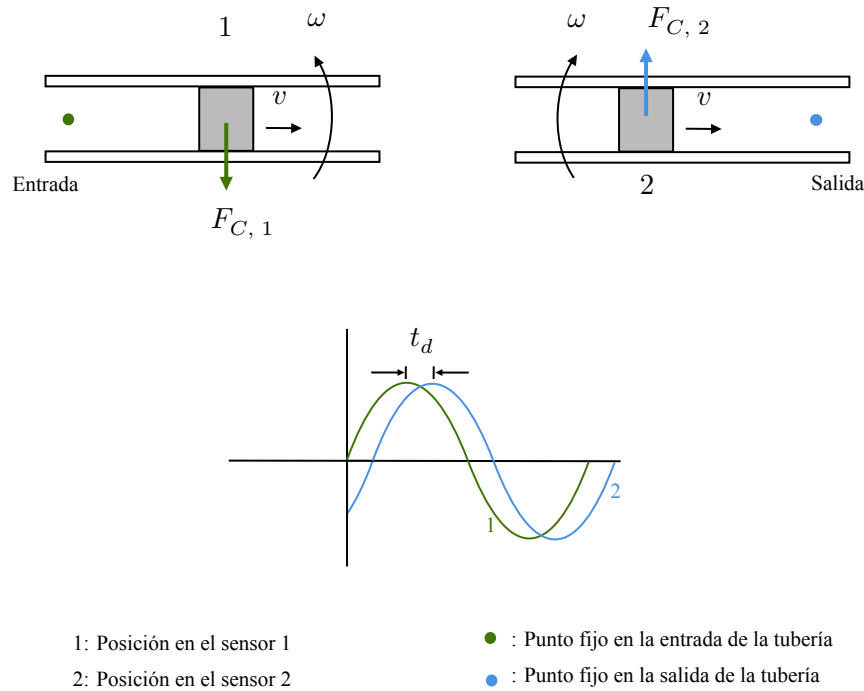
Nota. Consiste básicamente en un tubo curvado con una bobina impulsora, que genera un movimiento sinusoidal. Para detectar el movimiento tanto en las zonas cercanas a la entrada y salida, se disponen de dos sensores.

Cuando el flujo ocurre a través del caudalímetro (ver Figura 2.7), las fuerzas de coriolis son generadas en las porciones de la entrada y la salida debido a la velocidad del fluido v y a las componentes rotacionales ω del flujo de partículas en la entrada y salida. Sin embargo, las fuerzas de coriolis resultantes en las porciones de la entrada y salida son opuestas una a la otra debido a que las componentes rotaciones también lo son (ISO, 2015). Por lo tanto, los movimientos sinusoidales en

los puntos 1 y 2 ya no se encuentran en fase. El flujo másico a través de la tubería está en proporción directa al tiempo t_d de desfase entre estas dos señales sinusoidales. El flujo másico está en proporción directa al tiempo de desfase t_d entre estas dos señales.

Figura 2.7

Señales en los puntos de entrada y salida de un medidor de efecto coriolis



Nota. Las imágenes superiores muestran las zonas entrada y salida de la tubería, las interacciones que ocurren allí y como las señales sinusoidales generadas en los puntos 1 y 2 está relacionadas mediante el tiempo de desfase t_d .

2.1.5 Medidores de Vortex

Los medidores de caudal del tipo Vortex tienen una tecnología diferente a las mencionadas previamente, esto principalmente debido a que estos penetran en el flujo, aunque en un modo limitado. Por ejemplo, los medidores ultrasónicos y electromagnéticos tienen poco impacto en alterar el perfil de flujo.

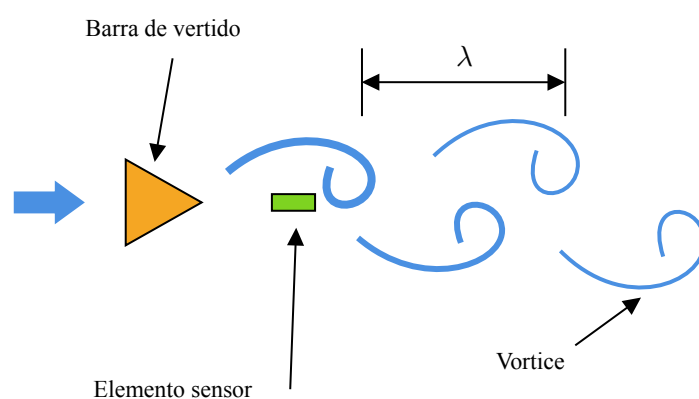
Los medidores vortex funcionan por medio de una barra de vertido suspendida en la corriente de flujo. Esta barra es un objeto ancho y plano, a menudo hecho de metal el cual genera vórtices en el flujo (vórtices de Karman), que son detectados por un sensor en uno o ambos lados de la tubería.

El medidor de flujo cuenta la cantidad de vórtices, y este número es proporcional al caudal (Yoder, 2023).

Un punto a favor e interesante de este tipo de caudalímetros es su versatilidad para poder medir caudal de líquidos, gas y vapores, es el único en su tipo, aunque su exactitud no es tan alta como la del tipo coriolis. Por otro lado, una de sus desventajas es la caída de presión que produce debido a la barra de vertido así como la afectación de la medición cuando existe un flujo pulsante.

Figura 2.8

Esquema del principio de medición de un medidor de vortex



2.2 Calibración de caudalímetros mediante el método de pesada estática con desviador

Realizando una interpretación estricta del VIM (JCGM, 2008c), la calibración de un instrumento de medición tiene por objetivo asociar a sus valores de lectura o indicación (bien sea analógica o digital) un valor de error (o corrección) con su respectiva incertidumbre de medición, derivada del uso de un patrón o referencia de medida.

En la calibración de medidores de caudal de líquidos, para obtener una alta exactitud, la determinación del error (o del factor de corrección) del medidor bajo prueba, se realiza a través del método de pesada estática con desviador. El error se podría dar en unidades de masa, volumen, caudal másico o caudal volumétrico. Sin embargo, la manera más útil de representar el error para esta magnitud es mediante un error relativo, expresado de manera porcentual. Esto ayuda en la simplificación de resultados de calibración y es recomendable emplearla para demostrar la capacidades de medición y calibración de un laboratorio, tal como se hace a nivel internacional y

de acuerdo a lo señalado en el Protocolo de Revisión de CMC en medición de Flujo (CCM-WGFF, 2014).

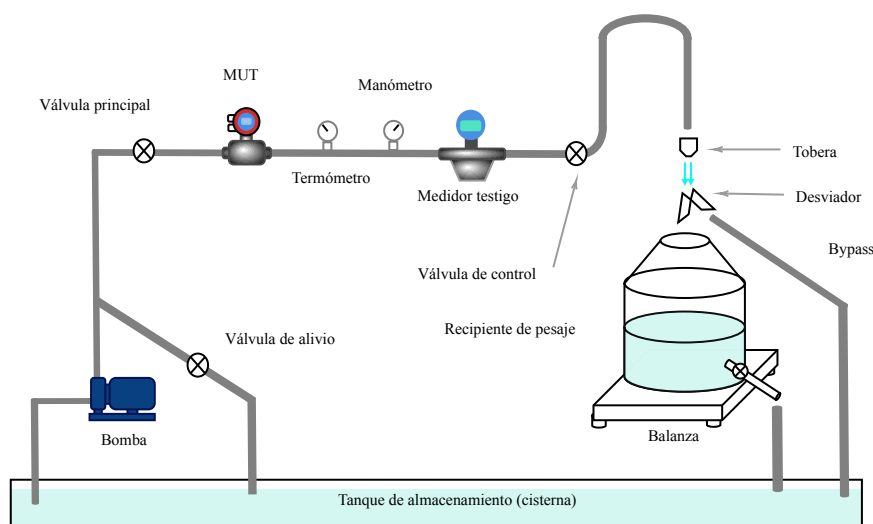
2.2.1 Fundamento del método

El método de pesada estática con desviador⁶ consiste en la comparación de la indicación de lectura de caudal másico o caudal volumétrico del medidor bajo prueba (MUT) ⁷ con respecto a un valor de referencia determinado por el sistema de pesada estática que presenta un desviador de flujo.

El valor del caudal de referencia se obtiene a partir de la recolección y pesaje de una determinada cantidad de agua que pasa a través del MUT en un intervalo de tiempo t . La recolección del líquido se realiza mediante la desviación del flujo hacia el recipiente de pesaje y el posterior retorno a su cauce pre establecido, por lo que el flujo en todo momento se mantiene constante y estable (ver figura 2.9).

Figura 2.9

Sistema de pesada estática para la calibración de caudalímetros



Un aspecto importante a considerar en este método, tiene que ver con el hecho de que el tiempo t' es el tiempo corregido del tiempo medido t contabilizado por el sistema de desviación.

⁶Conocido como gravimetric / flying - start - finish

⁷Por su acrónimo en inglés: Meter under test.

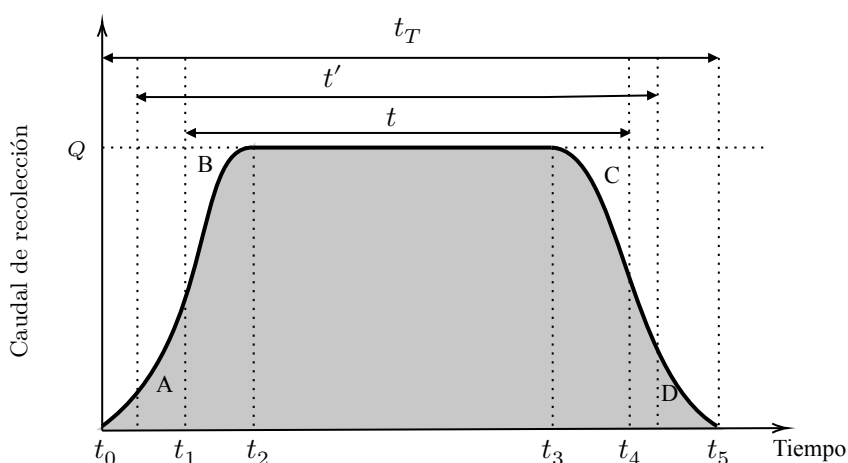
Esto se aprecia mejor observando la Figura 2.10, donde la curva comprendida entre t_0 y t_2 indica el aumento del caudal de recolección debido al movimiento del divisor que permite el vertido del líquido en el tanque de pesaje. La curva comprendidas entre t_3 y t_5 indica el decremento del caudal de colección debido al movimiento del divisor para direccionar el flujo hacia el bypass.

Los tiempos t_1 y t_4 indican los instantes de inicio y fin de medición del tiempo t y, los tiempos t_0 y t_5 indican el tiempo total t_T desde el inicio de movimiento de apertura del desviador hasta su cerrado completo.

Debido a la histéresis en el movimiento de ida y vuelta del pistón neumático que mueve el divisor y a la acción propia del caudal de líquido, existe una ligera simetría entre las zonas A y B con C y D. El área sombreada representa la masa recolectada (o volumen recolectado) según el caudal sea másico o volumétrico.

Figura 2.10

Comportamiento del caudal con el tiempo durante el proceso de calibración



Nota. En el tiempo t_0 inicia la recolección y en el tiempo t_5 finaliza. En los instantes t_1 y t_4 el desviador de flujo está a mitad de trayecto. Entre los tiempos t_2 y t_3 el caudal es estable. El área sombreada bajo la curva corresponde a la masa (o volumen) recolectado en la medición. El tiempo t' es el tiempo t corregido mediante caracterización.

2.2.2 El sistema de pesada estática con desviador

El sistema de pesada estática del Laboratorio de Flujo de Líquidos del INACAL (ver Figura 2.9) comprende 3 partes fundamentales:

- **Sistema de generación de flujo:** Comprende el tanque de almacenamiento (cisterna), el sistema de bombeo y el sistema de control de flujo que acciona las válvulas de regulación de caudal. Esto permite que se genere un caudal constante y estable que alimenta a la línea de medición.
- **Sección de tuberías:** El sistema de tuberías produce las condiciones necesarias para la formación del perfil adecuado de velocidad del flujo del líquido. La sección de tubería en la zona *upstream*⁸ tiene un diámetro nominal igual al del medidor y su longitud tiene un valor mínimo de 10 veces este diámetro. Adicionalmente, se tiene instalado en la línea un termómetro y un manómetro junto con al menos un medidor (del tipo coriolis o electromagnético) como medidor testigo.
- **Sistema gravimétrico de referencia:** Comprende la balanza de gran capacidad, un recipiente de pesaje, el sistema de desviación del flujo que incluye un desviador, una tobera (intercambiable según la magnitud del caudal) y un bypass. Todo esto accionado mediante un controlador que además registra el tiempo de colección de líquido.

2.2.3 Modelo matemático para el caudal másico y la masa totalizada

El caudal másico de referencia Q_m , obtenido mediante el sistema de pesada estática se establece mediante la ecuación 2.1 (ver el Anexo 1 para observar su deducción).

$$Q_m = \frac{m}{t'} \cdot \frac{\rho_w(\rho_b - \rho_a)}{\rho_b(\rho_w - \rho_a)} \quad (2.1)$$

La masa totalizada de referencia, M , que pasa durante el ensayo en un tiempo t , obtenida mediante el sistema de pesada estática, se establece mediante la ecuación 2.2.

$$M = Q_m \cdot t = \frac{t}{t'} \cdot m \cdot \frac{\rho_w(\rho_b - \rho_a)}{\rho_b(\rho_w - \rho_a)}, \quad (2.2)$$

donde:

⁸El término *Upstream* (o aguas arriba) se emplea para describir la sección de espacio anterior al punto de entrada del medidor de caudal. Por otro lado, el término *Downstream* (o aguas abajo) se emplea para el espacio posterior al punto de salida del medidor.

- m : es la indicación de la balanza, corregida (por certificado de calibración) que corresponde a la masa de líquido recolectado. En este caso es producto de diferencia de indicaciones entre una lectura final corregida m_f y una lectura inicial corregida m_i , es decir: $m = m_f - m_i$.
- t' : es el tiempo asociado al caudal Q_m y es un valor corregido de t . Su valor es igual a $t + \Delta t$, donde t es el tiempo contabilizado por el sistema de medición y Δt es el tiempo obtenido por la caracterización del diversor (ver Figura 2.10).
- ρ_w : es la densidad del líquido (agua) recolectada en el recipiente de pesaje, a una temperatura T_{w2} . Ver Anexo 2.1 para su definición.
- ρ_b : es la densidad de las pesas empleadas para la calibración de la balanza.
- ρ_a : es la densidad del aire en el laboratorio en el periodo en el que se hacen las mediciones. Ver Anexo 2.2 para la determinación de la densidad del aire .

2.2.4 Modelo matemático para el caudal volumétrico y el volumen totalizado

El caudal volumétrico Q_v se establece mediante la ecuación 2.3.

$$Q_v = \theta_1 \theta_2 \frac{Q_m}{\rho_w} = \theta_1 \theta_2 \frac{m}{t'} \cdot \frac{(\rho_b - \rho_a)}{\rho_b (\rho_w - \rho_a)} \quad (2.3)$$

El volumen totalizado V que pasa durante el ensayo en un tiempo t se establece mediante la ecuación 2.4.

$$V = Q_v \cdot t = \theta_1 \theta_2 \frac{t}{t'} \cdot m \cdot \frac{(\rho_b - \rho_a)}{\rho_b (\rho_w - \rho_a)}, \quad (2.4)$$

donde:

$$\theta_1 = 1 + \alpha_w \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \quad (2.5)$$

$$\theta_2 = 1 - \kappa_w \cdot p_{w1}$$

$$\alpha_w = (-0,1176 \cdot T_{w1}^2 + 15,846 \cdot T_{w1} - 62,677) \times 10^{-6} \quad (2.6)$$

- α_w : es el coeficiente de expansión térmica cúbica del agua, expresado en $^{\circ}\text{C}^{-1}$, basado en la simplificación según EURAMET en su Guía No. 21 (EURAMET, 2024).
- κ_w : es la compresibilidad del agua. El valor medio dentro del rango de temperatura de calibración (entre 15°C y 35°C) es de $4,6 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$.
- T_{w1} : es la temperatura del agua en la línea de tubería del banco.
- T_{w2} : es la temperatura del agua depositada en el recipiente de pesaje.
- p_{w1} : es la presión manométrica en la línea de medición del banco de calibración.
- p_a : es la presión atmosférica.

2.3 Caracterización del sistema de desviación

2.3.1 Modelo matemático del error de conteo Δt

Para realizar la caracterización del divisor se emplea el Método 1 indicado en el Anexo A.1 en la norma *ISO 4185:1980 - Measurement of liquid flow in closed conduits — Weighing method* (ISO, 1980) para la determinación del error de conteo asociado al desviador Δt expresada por la ecuación 2.7.

$$\Delta t = \frac{t}{n-1} \left\{ \frac{q}{q'} \times \frac{\sum_1^n \Delta m_i / \sum_1^n t_i}{(m_1 - m_0)/t} - 1 \right\}, \quad (2.7)$$

donde

- $(m_1 - m_0)/t$: es el caudal determinado por el procedimiento normal de medición, donde m_0 y m_1 son valores de masas reales al inicio y al final del llenado.
- $\sum_1^n \Delta m_i / \sum_1^n t_i$: es el caudal determinado por totalización de la masa y tiempo de n corridas sucesivas de determinación de caudal.
- q y q' : son los caudales medidos de la manera estándar y producto de n repeticiones cortas respectivamente. Ambas realizadas por un dispositivo de medición de caudal independiente.

2.3.2 Incertidumbre del error de conteo

La incertidumbre estándar relativa asociada, $u(\Delta t)/\Delta t$ obtenida, está expresada por la ecuación 2.8.

$$\left(\frac{u(\Delta t)}{\Delta t}\right)^2 = \left[\frac{2z+1}{z}\right]^2 \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2 + \left[\frac{z+1}{z}\right]^2 \times \left[\left(\frac{u(q)}{q}\right)^2 + \left(\frac{u(q')}{q'}\right)^2 + \left(\frac{u(x)}{x}\right)^2 + \left(\frac{u(y)}{y}\right)^2 + \left(\frac{u(g)}{g}\right)^2\right] \quad (2.8)$$

donde

$$z = \frac{q}{q'} \times \frac{\sum_1^n \Delta m_i / \sum_1^n t_i}{(m_1 - m_0)/t} - 1 \quad (2.9)$$

$$x = \sum_1^n \Delta m_i \quad (2.10)$$

$$y = \sum_1^n t_i \quad (2.11)$$

$$g = m_1 - m_0 \quad (2.12)$$

2.4 Requisitos técnicos de la norma ISO/IEC 17025:2017

La norma ISO 17025 (ISO/IEC, 2017) es el documento guía que indica los requisitos a seguir por un laboratorio de calibración o ensayo que desee implementar un sistema de gestión basado en la competencia técnica y asegure que brinda un resultado válido y confiable.

Se debe tener en cuenta que para un Instituto Nacional de Metrología (INM) como lo es la Dirección de Metrología de INACAL, la demostración de cumplimiento de la norma ISO 17025 es a través de Revisiones Par a cargo de un experto reconocido de un INM de igual o mejor capacidad que el INACAL.

En la presente sección se hace una revisión de los aspectos técnicos que el laboratorio cumple y/o ha implementado con el fin de demostrar su competencia técnica, acorde a la norma ISO 17025:2017.

Se debe señalar que los puntos referidos al Aseguramiento de la Validez de los Resultados (parte 7.7 de la ISO 17025) y Evaluación de la Incertidumbre (parte 7.6) son tratados en la sección 2.5 y Capítulo IV respectivamente.

2.4.1 Personal

En la sección de Personal (parte 6.2), hay dos aspectos a resaltar, la primera comprende los requisitos de competencia, lo que incluye la educación, calificación, formación, conocimiento técnico, habilidades y experiencia para realizar la actividad en laboratorio (requisito 6.2.2) y; la segunda comprende la demostración de la competencia del personal para realizar las actividades de calibración, revisión técnica y firma de documentos (requisito 6.2.3), formalizado mediante una autorización (requisito 6.2.6).

Se debe tener presente que la competencia no solo implica que el personal sepa hacer su trabajo, sino que pueda tomar decisiones en caso de desviaciones que puedan ocurrir en cualquier situación vinculada a sus actividades (requisito 6.2.3).

En cumplimiento de esta cláusula por parte del LFL, se puede mencionar que:

- El reclutamiento de personal se realiza mediante convocatoria abierta al público mediante el área de Recursos Humanos, basado en el perfil de educación y experiencia establecido por el LFL.
- El personal del LFL comprende a tres metrólogos con formación en ingeniería mecánica, ingeniería física e ingeniería electrónica y dos con formación técnica en instrumentación electrónica y mecánica industrial.
- El personal más antiguo del LFL tiene más de 20 años de experiencia en metrología y el más joven tiene 5 años de experiencia.
- El responsable de laboratorio y el responsable alterno del laboratorio son a su vez expertos técnicos registrados ante el ente nacional de acreditación, es decir, la Dirección de Acreditación del INACAL.

- El personal del LFL tiene formación en la interpretación e implementación de la norma ISO 17025:2017.
- Se cuenta con 4 metrologos autorizados para la calibración de caudalímetros mediante el método de pesada estática con desviador.
- El responsable del laboratorio tiene registrado entrenamiento en la magnitud de Flujo de Líquidos en el Centro Nacional de Metrología de CENAM.
- El responsable alternativo de laboratorio tiene registrado entrenamiento en el NIST de Estados Unidos en las magnitudes de Volumen de líquidos y Densidad.
- El responsable del laboratorio y el responsable alternativo son los autorizados a firmar los certificados de calibración que emite el LFL.
- El proceso de entrenamiento en una magnitud dura alrededor de dos meses, para luego pasar a desarrollar actividades supervisadas y finalmente realizar actividades de calibración de manera independiente.
- El sustento de autorización de personal comprende el registro de entrenamiento y evaluación. Esta última está basada en la ejecución de una calibración y obtener resultados estadísticamente iguales a los obtenidos por un metrologo de mayor experiencia del LFL.

2.4.2 Instalaciones y condiciones ambientales

En la sección de Instalaciones y condiciones ambientales (parte 6.3) se puede mencionar lo siguiente:

- El laboratorio cuenta con un área total de 80 m², exclusivo para actividades del LFL (ver figura 2.11).
- El laboratorio es cerrado y con condiciones de temperatura y humedad controladas, las cuales son registradas y continuamente monitoreadas.
- El laboratorio cuenta con un sistema de drenaje en caso de fuga de líquido.
- El acceso al laboratorio es solamente para personal autorizado del LFL.

- Se cuenta con dos cisternas subterráneas, una de 45 m³ y 7 m³.
- El laboratorio cuenta con un cuarto de bombas para el funcionamiento de los tres bancos de ensayo, incluyendo el sistema de pesada estática con desviador (ver figura 2.12).

Figura 2.11

El área principal de medición del Laboratorio de Flujo de Líquidos



2.4.3 Equipamiento

En la sección de Equipamiento (parte 6.4) se puede mencionar lo siguiente:

- La Dirección de Metrología del INACAL cuenta con el procedimiento PE-DM-08 que incluye la manipulación, transporte, almacenamiento, uso y mantenimiento planificado del equipamiento (requisito 6.4.3).
- Los requisitos de cada equipo son identificados por el LFL a fin de que cumplan los resultados esperados. Esto se realiza mediante un cuadro de especificaciones elaborado por el LFL donde se detalla el nivel de error máximo permitido, clase de exactitud de los instrumentos de medición (requisito 6.4.4).

Figura 2.12

El cuarto de bombas del Laboratorio de Flujo de Líquidos



- En el caso de equipamiento tales como bombas de agua, tuberías o bridas, estos están en función de las características de los medidores de caudal que se calibran, tales como el diámetro nominal, el tipo de conexión, la presión máxima de entrada a soportar y el caudal máximo de trabajo (requisito 6.4.5).
- Los patrones empleados en el LFL son calibrados anualmente. Para su planificación y seguimiento del cumplimiento, se cuenta con Programa de calibración (requisito 6.4.7). Todos los instrumentos y patrones del LFL son calibrados por los diversos laboratorios del INACAL.
- Cuando un equipo del LFL es calibrado, se le asigna un sticker donde se indica el número de certificado de calibración y la fecha en la que se realizó. Además se le colcoa un sticker que muestra el mes y año de la próxima calibración (requisito 6.4.8).
- El LFL cuenta con un programa de comprobaciones internas. Este tipo de actividades están destinadas a poder asegurar que el instrumento de medición continua midiendo de manera aceptable . Si bien este tipo de actividades se programa para ser ejecutadas una vez al año, no significa que no se pueda realizar en cualquier momento en el que existan motivos para sospechar de un desempeño fuera de especificación (requisito 6.4.10).
- Cuando se detecta que un patrón de trabajo presenta alguna desviación y este no puede ser

reemplazado oportunamente por uno de similares características, se solicita postergar al área encargada la postergación de los servicios de calibración que requieran su uso. Se evalúa la situación del equipo defectuoso para la aplicación del mantenimiento correctivo (requisito 6.4.9).

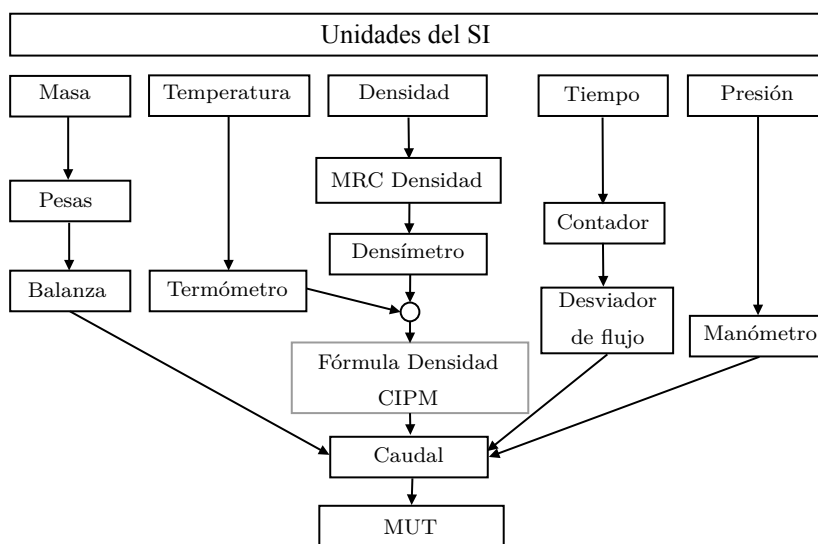
2.4.4 Trazabilidad metrológica

En la sección de Equipamiento (parte 6.5) se puede mencionar que el LFL se asegura la trazabilidad de sus resultados de medición al Sistema Internacional de Unidades (SI) mediante la calibración de sus patrones realizado por laboratorios competentes en la norma ISO 17025 (requisito 6.5.2, literal a) como en el caso de INACAL y en el caso del CENAM de México, del cual se tiene el Material de Referencia Certificado (MRC) de densidad, su competencia en la norma ISO 17034 es reconocida (requisito 6.5.2, literal b).

En la figura 2.13 se tiene el esquema de trazabilidad para la calibración de medidores de caudal donde se aprecia que todas las magnitudes involucradas tienen una fuente de trazabilidad directa al SI.

Figura 2.13

Esquema de trazabilidad del Laboratorio de Flujo de Líquidos del INACAL



Nota. Imagen adaptada del esquema de trazabilidad indicado en la publicación web: *Dynamic effects on the traceability of fluid flow measurements*, en la website del PTB (www.ptb.de).

2.4.5 Selección, verificación y validación de métodos

El LFL tiene registrada una lista de documentos externos, que comprende métodos, procedimientos y documentación de soporte, tales como instrucciones, normas, manuales y datos de referencia pertinentes a las actividades de laboratorio. Los documentos y la lista correspondiente se mantienen en una unidad de intranet disponible para todo el personal de los laboratorios de la Dirección de Metrología. La lista de documentos externos se revisa de manera bimestral para realizar las actualizaciones en caso algún documento externo haya sido modificado o anulado.

El método de pesada estática con desviador para calibración de caudalímetros es un método que es normalizado ya que está especificado en la norma ISO 4185 ISO, 1980. Lo concerniente a la implementación del método con los cambios propuestos en el presente informe es tratado en el Capítulo V.

2.4.6 Registros técnicos

El sistema de gestión del LFL tienen las siguientes disposiciones:

- En cualquier actividad que involucre medición, tal como calibración, comprobación interna, etc, las lecturas obtenidas de los instrumentos de medición empleados deben ser registrados.
- Se registra la fecha de ejecución y el personal que llevó a cabo la actividad.
- Las observaciones acerca del MUT y sus condiciones de calibración son registradas.
- Se registra la información de los instrumentos de medición y patrones empleados. Esto permite realizar cálculos correctos y trazables al SI.
- Cada formato de plantilla que es llenado con la información y datos de medición obtenido en un servicio de calibración es conservado en un espacio de memoria vía intranet de INACAL.

2.4.7 Informe de Resultados

En esta parte (7.8) de la norma ISO 17025, se tienen las siguientes directivas respecto a la emisión de los certificados de calibración:

- Los resultados de la calibración de caudalímetros son reportados en un certificado de calibración.
- Se emite solo un certificado de calibración por instrumento calibrado.
- Los certificados de calibración son firmados electrónicamente, indicándose el nombre de los firmantes.
- Los certificados de calibración son revisados dos veces (ver 2.5.4) antes de su emisión.
- Los certificados de calibración emitidos son almacenados en formato PDF en la unidad central de archivos del INACAL.

Respecto al contenido del Certificado de calibración (requisito 7.8.2) se tiene como parte de las prácticas del LFL:

- Los documentos de servicio de calibración de caudalímetros con los resultados son emitidos con el nombre de Certificados de calibración.
- En el certificado se indica el nombre del INACAL, con el logo de la institución incluido, además se menciona la dirección del LFL, donde se lleva a cabo la calibración de caudalímetros.
- Cada certificado de calibración tiene una identificación única cuya codificación lleva la sigla del laboratorio (LFL), una numeración correlativa y el año de emisión (con sus 4 dígitos) del certificado.
- Cada página del certificado tiene numeración arábica y el estilo precisa su posición relativa a la cantidad de páginas del documento.
- En el certificado se indica el nombre o razón social de la empresa solicitante o propietaria del caudalímetro.
- En el certificado se indica el método empleado en la calibración. Usualmente es una norma ISO.
- Para la identificación del ítem de calibración, es decir, el MUT, se registra el número de serie grabado por el fabricante en su superficie. En caso el MUT esté compuesto de diversas partes, también se registran e informan sus números de serie en el certificado. No se registran como números de serie aquellas grabaciones que no son de fábrica.

- Como parte de la trazabilidad de la información se registra el modelo de caudalímetro y el nombre del fabricante.
- En caso de ambigüedad o duda en el reconocimiento del nombre o modelo, siempre se consulta el manual del fabricante.
- En caso se encuentre alguna observación en el estado físico, los accesorios o configuración del MUT, estos son registrados.
- En el certificado se registra la fecha o fechas de ejecución de la calibración. La fecha de emisión corresponde a la fecha registrada en la segunda firma electrónica.
- Los resultados y las condiciones de calibración son declarados con sus respectivas unidades de medición o de manera adimensional cuando es especificado.
- En el certificado se indica la trazabilidad de los patrones que definen el mensurando.
- Los resultados de calibración son declarados con sus respectivas incertidumbres expandidas.
- Junto con los resultados, se reporta (en caso aplique) los errores máximos permitidos (EMP) especificados por el fabricante o en su defecto, por la norma de diseño del MUT.
- Las condiciones ambientales y del líquido de trabajo son reportadas en el certificado.

2.5 Aseguramiento de la validez de los resultados

Cuando se habla de los resultados que pueda brindar un laboratorio, no basta con tener trazabilidad metrológica (que es lo que principalmente los usuarios observan) o ser obtenidos con instrumentos sofisticados y personal competente. Un punto crítico para los resultados es asegurar su validez. En la versión del año 2005 de la norma ISO 17025 para este tema se hablaba de “aseguramiento de la calidad de los resultados”, sin embargo, el término “calidad” tenía un carácter ambiguo debido a que su significado comprende un amplio espectro de conformidad. Por otro lado, al hablar de “validez”, se tienen dos resultados posibles: es válido o no es válido.

Con el objetivo de asegurar la validez de los resultados de las mediciones, el laboratorio de Flujo de Líquidos del INACAL ha implementado 8 mecanismos que abarcan todo el proceso de calibración desde el encendido del sistema (banco de ensayo) hasta la emisión del certificado de calibración.

2.5.1 Comprobación operativa de los equipos de medición

Esta comprobación se realiza cada vez que se ejecuta un servicio de calibración y se emplea el checklist de la tabla 2.1.

Con el fin de asegurar la validez de los resultados de calibración y/o medición en la rutina diaria de trabajo, se tiene establecido una serie de acciones y condiciones para cada servicio en el LFL, que comprende:

- La comprobación funcional de los instrumentos y equipamiento del ensayo y medición.
- La comprobación de conectividades eléctricas.
- La comprobación de la vigencia de trazabilidad e idoneidad de los patrones de trabajo.

Tabla 2.1

Checklist de revisión de rutina para el banco de ensayo

Condición	Observación
Hermeticidad de conexiones en el banco de calibración	✓
Lecturas legibles y coherentes de los instrumentos de medición	✓
Instrumentos de medición calibrados	✓
Patrón de referencia (MVP, caudalímetro o balanza) operativo	✓
Balanza nivelada y sin obstáculos físicos	✓
Llaves y válvulas operativas	✓
Conexiones a tierra colocadas	✓
Instrumentos de adquisición de señales operativos	✓
Contador de señales operativo	✓
Caudal, presión de entrada y temperatura del agua adecuadas	✓
Banco de ensayo sin presencia de vibraciones	✓

2.5.2 Detección de valores atípicos

La detección de valores atípicos se realiza cada vez que se ejecuta un servicio de calibración.

Cuando producto de una calibración, se obtienen una serie de resultados de mediciones de un

mensurando, se debe tener presente que alguno de ellos podría ser un resultado aparentemente atípico, es decir, que se encuentre alejado de los otros.

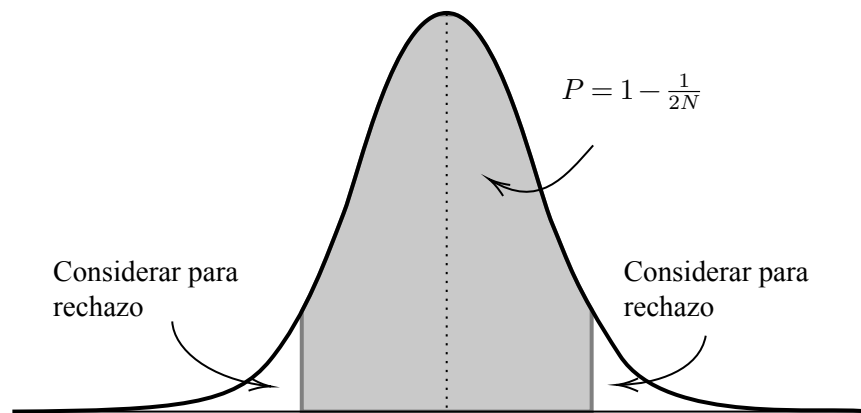
Para poder incluir o descartar este resultado, se requiere de algún método, cuyo criterio de decisión de carácter estadístico pueda resolver este problema.

Un método el cual ha alcanzado una aceptación relativamente amplia es el Criterio de Chauvenet, el cual define una dispersión aceptable (desde un punto de vista probabilístico) alrededor del valor medio de una muestra dada de N mediciones de la misma población (Coleman and Steele, 2009).

El criterio especifica que todos los puntos deberían ser retenidos si caen dentro de la banda alrededor del valor medio que corresponde a una probabilidad de $1 - 1/2N$. Dicho en otras palabras, podemos decir que los puntos a considerar para ser rechazados si la probabilidad de obtener su desviación del valor medio es menor a $1/2N$. Esto se muestra gráficamente en la figura 2.14.

Figura 2.14

Representación gráfica del criterio de Chauvenet.



El cálculo se realiza de la siguiente manera y debe aplicarse una sola vez al conjunto de datos.:

- Para cada una de las N mediciones se calcula el valor de $|(X_i - \bar{X})/s_X|$, donde s_X es la desviación estándar de la muestra y $\bar{X}$ es la media de la muestra.
- Según el valor de N se escogerá un valor de $|\Delta X_{max}/s_X|$ de la Tabla 2.2.
- Las mediciones de una muestra N cuyos valores de $|(X_i - \bar{X})/s_X|$ calculados son mayores al Ratio de la tabla, son considerados valores atípicos.

Tabla 2.2*Valores umbrales para aplicación del Criterio de Chauvenet*

Número de lecturas N	Ratio $ \Delta X_{max}/s_X $
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
8	1,87
9	1,91
10	1,96
15	2,13
20	2,24
25	2,33
50	2,57
100	2,81

2.5.3 Comprobaciones intermedias de los patrones de trabajo

Los instrumentos de medición que sirven como patrones de trabajo, empleados por el LFL son sometidos a comprobaciones intermedias, las cuales por defecto son realizadas de manera periódica, lo que no excluye que se puedan realizar cada vez que sea necesario.

El documento asignado según el sistema de calidad del INACAL para la planificación de este mecanismo de aseguramiento es el F-DM-13 “Programa anual de calibración, verificaciones intermedias, caracterización de instrumentos y equipos de medición”.

Las comprobaciones intermedias tienen un periodo anual, ejecutándose idealmente cerca a la mitad del periodo de calibración.

En el Anexo 3 se muestran los criterios adoptados para la comprobación intermedia de los instrumentos del laboratorio, indicado en el Instructivo para la comprobación intermedia de los instrumentos del laboratorio de Flujo de Líquidos, IT-LFL-001.

2.5.4 *Revisión de resultados informados*

Este tipo de actividad se realiza cada vez que se emite un certificado o informe de calibración, verificación o informe técnico.

Esto corresponde a las dos revisiones correspondientes a las aprobaciones (y sus respectivas firmas) del documento, realizadas por el responsable de laboratorio (o su alterno) y el responsable de área. La primera revisión y firma de aprobación por parte del responsable del laboratorio va enfocada en los detalles técnicos como la información del instrumento, la trazabilidad metrológica de los patrones de medición empleados y los resultados de calibración; es decir, aspectos de fondo en el certificado de calibración.

La segunda revisión y firma de aprobación por parte del responsable de área van mayormente dirigidas a asuntos de forma del certificado de calibración tales como la coherencia y claridad de la información presentada y el cumplimiento de la normativa o reglamentación (en caso aplique) entre otros.

2.5.5 *Comparación intra laboratorio*

Esta actividad se realiza cuando se requiera brindar autorización a nuevo personal para que pueda realizar calibraciones, además sirve para hacer seguimiento de la competencia del personal.

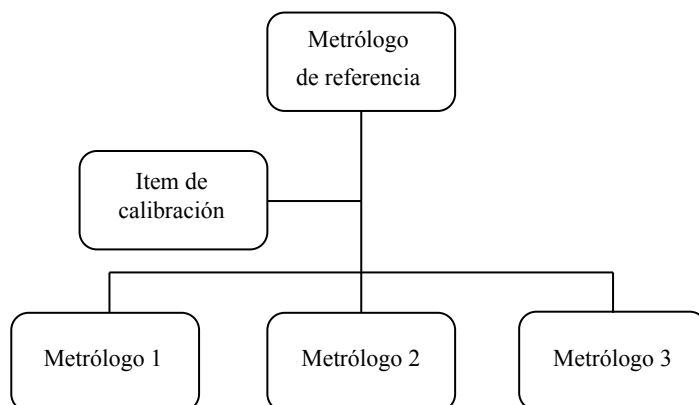
Una manera de asegurar los resultados es la organización de comparaciones intra-laboratorios. Esta comparación evalúa el desempeño del metrólogo en un procedimiento de calibración y/o medición. Para ello se realizará una comparación entre los resultados de medición obtenidos por el técnico metrólogo a evaluar y los resultados obtenidos por un metrólogo más experimentado, también llamado metrólogo de referencia (ver figura 2.15).

Se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Esta comparación debe ser realizada para cada procedimiento de calibración establecido.
- El responsable del LFL (o a quien este designe) elegirá el ítem de calibración a emplear en la comparación.

Figura 2.15

Diagrama para proceso de comparación intra laboratorio



2.5.6 Comparaciones internacionales

Estos eventos son llevados a cabo cada vez que sea informado por el BIPM o el Sistema Interamericano de Metrología - SIM. Usualmente el periodo puede variar entre 4 y 10 años, dependiendo de la magnitud, del alcance de medición a evaluar, el tipo y tamaño de instrumento de medición asignado para tal fin, entre otros.

Esta comparación resulta útil para garantizar el adecuado desempeño del laboratorio. Para ello, el LFL, como representante del Perú a través de INACAL, participa en estas comparaciones organizadas por el BIPM a través del SIM.

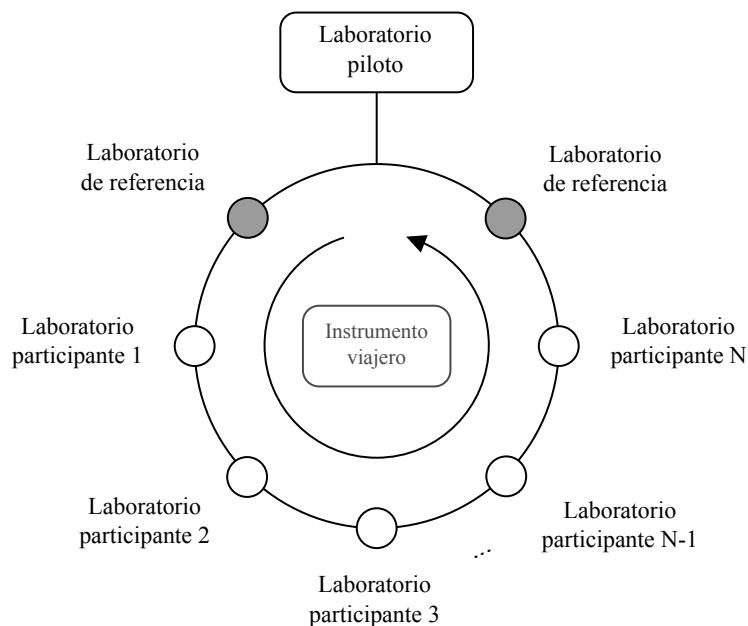
Es importante recordar que en estas comparaciones solamente participa cada instituto nacional de metrología (INM) o laboratorio designado (solo se admite un representante en la magnitud por país) en la región que involucra la comparación.

En la figura 2.16 se muestra el esquema típico de organización de una comparación de este nivel, la cual es liderada por un INM designado como Laboratorio Piloto. Adicionalmente, se cuenta con un INM que proporciona el instrumento de medición (item de calibración o instrumento viajero) y el valor de referencia contra el cual se compararán los resultados de cada INM o laboratorio participante.

El indicador mayormente empleado para calificar el desempeño de un laboratorio en una comparación internacional es índice de compatibilidad, representado mediante el error normalizado, E_n .

Figura 2.16

Diagrama típico de un proceso de comparación internacional en metrología



En el Anexo 4 se muestra el Reporte final de los resultados de la última comparación internacional en la que participó el laboratorio de Flujo de Líquidos del INACAL en la calibración de un medidor de caudal.

2.5.7 Repetición de las mediciones

Esto se realiza por lo menos 2 veces cada año, por procedimiento de calibración.

Una manera adicional de asegurar los resultados durante el año es la repetición de la calibración con el ítem de calibración de un cliente o propio del LFL, empleando el mismo método de calibración.

Esta comparación evalúa la repetibilidad y/o reproducibilidad. Para ello se realiza una comparación entre los resultados de medición obtenidos por el metrólogo en un valor nominal y una repetición de la calibración realizada posteriormente en el mismo valor por parte del mismo metrólogo. Este se puede realizar en uno o más valores nominales calibrados.

2.5.8 Empleo de instrumentos testigo

Un mecanismo muy útil para poder asegurar la validez de los resultados y para detectar alguna posible desviación o anomalía crítica en el sistema de pesada estática es el empleo de instrumentos testigo.

El principal inconveniente para este tipo de mecanismo es que conlleva el costo de compra, calibración y mantenimiento de los testigos que son empleados. Por esta razón, muchos laboratorios no pueden permitirse el contar con uno.

Un instrumento testigo que ha sido calibrado en reiteradas veces cuenta con la ventaja de tener un historial y por ende ofrecer datos que permitan establecer límites de control para analizar la estabilidad de la propia línea de medición.

El LFL cuenta con un medidor de caudal del tipo electromagnético y uno del tipo coriolis instalados permanentemente en la línea del sistema de medición.

Capítulo III. Desarrollo del procedimiento de calibración

3.1 Campo de aplicación

Este procedimiento aplica para la calibración de medidores de flujo de tipo electromagnético, ultrasónico, coriolis, vortex, turbina, entre otros.

Las calibraciones se pueden realizar en unidades de caudal volumétrico, caudal másico, volumen y masa, en el siguiente intervalo de medición: de 150 kg/h o 150 L/h a 130 000 kg/h ó 130 000 L/h con una presión de operación máxima de 4 bar.

3.2 Instrumentos de medición y equipamiento

Para realizar la calibración se requiere utilizar el banco de pruebas LFL-08-014 ubicado en el Laboratorio de Flujo de Líquidos, el cual tiene los siguientes equipos e instrumentos de medición:

3.2.1 Medición de masa

- Una balanza electrónica (con código de identificación LFL 01 002) con intervalo de indicación de 0 kg a 2000 kg, resolución de 0,1 kg; de clase de exactitud III y calibrado hasta 2000 kg.
- Una balanza electrónica (con código de identificación LFL 01 003) con intervalo de indicación de 0 kg a 600 kg, resolución de 0,001 kg y de clase de exactitud II y calibrado hasta 500 kg.

3.2.2 Medición del tiempo

El laboratorio cuenta con:

- Cinco contadores universales de tiempo y frecuencia con códigos de identificación: LFL 004 001, LFL 004 002, LFL 004 003, LFL 004 011 y LFL 004 012. Estos instrumentos son utilizados para la medición del tiempo y para el conteo de pulsos.
- Un osciloscopio (LFL 08 013) para la visualización de los pulsos.
- Seis sensores de proximidad, tres en cada uno de los dos desviadores de flujo.

Figura 3.1

Contadores y osciloscopios del sistema de pesada estática LFL



3.2.3 Medición de temperatura

- Un termómetro (LFL 06 008), utilizado para medir la temperatura del agua de la línea de ensayo, con una resolución de 0,01 °C
- Un termómetro (LVD 07 068) para medir la temperatura en el tanque (recipiente de pesaje), con una resolución de 0,001 °C

3.2.4 Medición de presión en la línea

Un transductor de presión (LFL 07 007), para la medición de presión en la línea de medición, con una resolución de 0,01 bar

3.2.5 Instrumentos de adquisición de datos

- Un módulo DAQ (LFL 04 005) para la adquisición de datos de temperatura, presión y caudal de los instrumentos pertenecientes sistema de pesada estática.
- Una computadora portátil en la que se ejecute el programa estructurado con el Software LabVIEW para el monitoreo y la adquisición de datos en tiempo real de toda la instrumentación involucrada en el sistema de pesada estática.

3.2.6 Medición de condiciones ambientales

Un barotermohigrómetro (LFL 06 018), utilizado para medir las condiciones ambientales de calibración: temperatura, presión y humedad relativa.

3.2.7 Medidores testigo

- Un medidor de flujo tipo Coriolis, con código de identificación LFL 03 004 (figura 3.2), el cual tiene un diámetro nominal de 80 mm, caudal máximo de medición de hasta 180 000 kg/h y calibrado hasta 128 000 kg/h aproximadamente.
- Un medidor de flujo tipo electromagnético (LFL 03 010) con diámetro nominal de 25 mm, caudal máximo de medición de hasta 18 000 L/h y calibrado hasta 8 000 L/h aproximadamente.

3.2.8 Sistema de desviación

Se tiene un conjunto de 6 toberas intercambiables, a ser empleadas en la Línea N° 1, correspondiente a la balanza de 600 kg (ver Tabla N° 3.1 y figura 3.3) y en la Línea N° 2, correspondiente a la balanza de 2000 kg (ver Tabla N° 3.2)

Figura 3.2

Medidor testigo de efecto coriolis, identificado como LFL 03 004



Tabla 3.1

Toberas empleadas en la Línea N°1

Código de identificación	Intervalo de medición asociado
B-CH-01	De 70 L/h a 300 L/h
B-CH-02	De 300 L/h a 2000 L/h
B-CH-03	De 2000 L/h a 9000 L/h

Tabla 3.2

Toberas empleadas en la Línea N°2

Código de identificación	Intervalo de medición asociado
B-G-01	De 9000 L/h a 15 000 L/h
B-G-02	De 15 000 L/h a 80 000 L/h
B-G-03	De 80 000 L/h a 125 000 L/h

3.2.9 Elementos de soporte

- Dos tanques de recolección de agua con capacidades de 2500 L y 600 L, cada una colocada en su respectiva balanza.
- Un sistema de bombeo compuesto por 3 electrobombas y sus respectivos variadores de frecuencia.

Figura 3.3

Sistema de desviación de la Línea N° 1



3.3 Condiciones de calibración

Para la ejecución de la calibración de caudalímetros, se deben cumplir las condiciones indicadas en la Tabla 3.3 tanto para el ambiente de calibración y el caudalímetro a calibrar.

Tabla 3.3

Condiciones que se deben cumplir durante la calibración de caudalímetros

Magnitud de influencia	Condición
Temperatura del agua	De 15 °C a 30 °C
Temperatura del aire	De 15 °C a 30 °C
Variación máxima de la temperatura del aire	2 °C
Diferencia máxima entre la temperatura del aire y el agua	5 °C
Humedad relativa del aire	De 50 % a 80 %
Presión ambiental	De 860 hPa a 1060 hPa

Se deben tener las siguientes consideraciones al momento de realizar la calibración:

- El orden de ejecución desde el caudal más grande hasta el más pequeño. Esto debido a que al

tener el error máximo permisible (EMP) más pequeño en caudales altos que en bajos, se puede detectar alguna anomalía en el medidor de caudal.

- La tubería debe tener el mismo diámetro nominal del medidor a calibrar. En el caso de los medidores ultrasónicos del tipo clamp-on, el diámetro nominal de la tubería a emplear debe ser el indicado por el solicitante de la calibración. El LFL antes de proceder a la instalación de tuberías, siempre verifica mediante el manual del fabricante que el diámetro solicitado forma parte de sus especificaciones.
- Es importante conocer la norma de diseño de la brida del caudalímetro para poder adaptar la tubería que posea el mismo diseño. El LFL usa tuberías con bridas diseñadas bajo la norma ISO.

3.4 Acondicionamiento del sistema de medición

3.4.1 Acondicionamiento del caudalímetro

- Los medidores de flujo son almacenados antes y después de su calibración en un lugar seguro dentro del Laboratorio de Flujo de Líquidos.
- Los medidores son protegidos de la exposición de los golpes, vibraciones, humedad y polvo, además de todo aquello que sea recomendado por el manual del fabricante.
- La manipulación de los medidores en cuanto a su instalación mecánica y eléctrica se realiza según lo indicado en el manual de instrucciones del fabricante.
- Todo medidor de flujo electromagnético debe ser instalado con su par de anillos de puesta a tierra en caso de utilizarse tubería no conductora. Los anillos deben conectarse a la bornera de tierra del medidor de flujo o a la carcasa y a su vez a la conexión del pozo de tierra del Laboratorio de Flujo de Líquidos, como se muestra en la Figura 3.4

3.4.2 Acondicionamiento de la línea de medición

Se deben tener las siguientes consideraciones al momento de realizar la calibración:

Figura 3.4

Anillos de conexión a tierra instalados en el caudalímetro



Nota. Unos anillos metálicos conductores son instalados a ambos lados del medidor cuando las tuberías a emplear son de material no conductor. (Imagen cortesía de SIEMENS AG)

- Se seleccionan las bombas de agua a emplear. Se enciende la bomba que genere el caudal más alto a calibrar.
- Mediante el medidor testigo se comprueba la estabilidad del caudal.
- La ausencia de aire es importante en toda la línea de medición, por lo que se deben abrir y cerrar las válvulas de la línea de medición para evitar la presencia de aire atrapado.
- Se realiza la comprobación operativa de los equipos de acuerdo a lo establecido en 2.5.1.

3.4.3 Acondicionamiento del sistema de adquisición

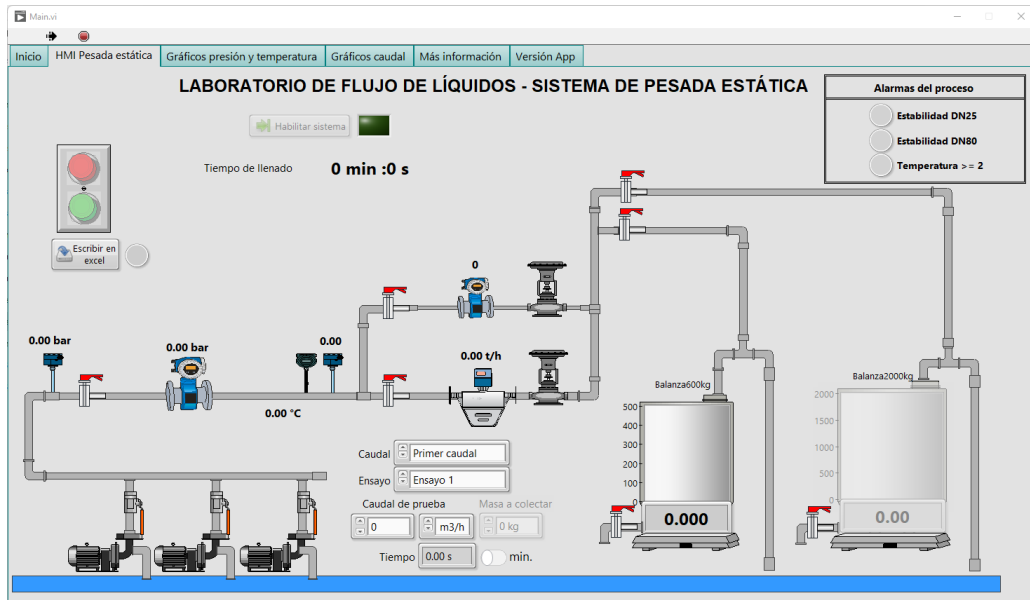
Para el acondicionamiento del sistema de medición se deben seguir las siguientes acciones: condiciones:

- Los componentes del sistema de pesada estática a utilizar deben estar encendidos y conectados: la balanza, los variadores de frecuencia de las bombas de agua (en stand by), módulo de adquisición de señales analógicas (DAQ) para luego ejecutar el aplicativo en LabVIEW instalado en la computadora asignada.
- Iniciar el software desarrollado en LabVIEW de nombre “LAB FLUJO DE

LIQUIDOS-INACAL LFL”, en el cual se seleccionará la balanza y la plantilla en Excel a utilizar durante la calibración (ver Figura 3.5).

Figura 3.5

Interfaz gráfica para adquisición de datos del Sistema de pesada estática



- Empleando el software se procede a abrir una de las válvulas proporcionales, encender una de las bombas y realizar la purga de aire de 2 a 5 minutos. Luego cerrar la línea número 1 (bypass de 25 mm) y abrir al 100 % la válvula proporcional de la línea 2 (100 mm) y realizar la purga hasta asegurar que no quede aire en las líneas. La eficacia de la purga (es decir, la ausencia de aire en el fluido) se puede verificar a través del visor de vidrio y de la manguera conectada en la válvula esférica ubicada aguas arriba de la línea 1.
- Conforme se realiza la purga, verificar la ausencia de fugas mediante una inspección visual en todas las conexiones, sobre todo en los extremos bridados del medidor a calibrar. No se tolerará fugas que se encuentren a partir de la zona downstream del medidor bajo prueba.
- Regular el punto de mayor caudal a calibrar y dejar circular el agua por lo menos 10 min para la ambientación del sistema de medición y del medidor a calibrar.
- Realizar la configuración y programación de los contadores universales de acuerdo al instructivo IT-LFL-005 para el conteo de pulsos y el tiempo que dure la colección de agua durante el ensayo. Se debe tener presente que la regulación del caudal se realiza aumentando o

disminuyendo la frecuencia de los variadores de frecuencia para una apertura determinada de la válvula de regulación de flujo o viceversa.

- Encender y dejar calentar la balanza a utilizar. Llenar el tanque de pesada hasta el valor máximo en el que fue calibrado la balanza a utilizar, luego accionar la válvula de descarga para vaciar el agua. El intervalo de tiempo de estabilización que se considera para realizar la lectura adecuada de ambas balanzas es entre 30 s y 60 s.
- Se aprovechará el tiempo de llenado para registrar mediante el aplicativo desarrollado en LabVIEW, los valores de caudal del medidor patrón testigo y calcular la estabilidad del flujo.

3.5 Procedimiento de calibración

Los pasos (en resumen) que se siguen para la calibración de un caudalímetro por el método de pesada estática empleando un desviador se indican en la siguiente lista:

1. Previo al inicio de la calibración, se debe realizar el acondicionamiento y preparación del sistema de medición.
2. Empezar la calibración por el caudal más alto solicitado por el cliente.
3. Para iniciar la medición, pulsar el botón de encendido de la caja de mando para accionar el movimiento del pistón neumático que origina el movimiento del desviador sobre su eje, dicho movimiento corta el haz de luz de uno de los sensores de proximidad que está enfocado al centro del perfil de flujo que sale de la tobera, provocando que este emita un impulso eléctrico que da inicio al conteo de pulsos del MUT, al conteo de pulsos del Medidor Patrón Testigo y al conteo del tiempo de prueba en los contadores universales.

Nota: En caso el cliente haya solicitado la calibración en unidad de caudal y por medio de lectura de display, registrar el caudal indicado por el MUT durante el tiempo de llenado del tanque de pesada.

4. Para finalizar la medición, pulsar el botón de apagado de la caja de mando para detener la recolección de agua en el tanque.
5. Registrar (o dejar que el software registre) en la hoja de cálculo el tiempo que duró la prueba (indicado en el contador universal configurado), la cantidad de pulsos contabilizados por el

MUT y por el Medidor Patrón Testigo (indicado en el contador universal configurado), las condiciones ambientales y cuando se haya estabilizado la indicación de la masa final de la balanza.

6. Descargar el tanque de pesada accionando manualmente la válvula de descarga.
7. Repetir los pasos 2 al 6 por lo menos dos veces más para evaluar la repetibilidad de la medición.
8. Regular el caudal correspondiente al siguiente punto de calibración, realizar la purga del sistema y repetir los siguientes pasos hasta completar todos los puntos de calibración solicitados.

Capítulo IV. Estimación de la incertidumbre de medición

4.1 Incertidumbre de medición estándar y expandida

Para todo proceso de medición, siempre existe asociada un incertidumbre. De acuerdo con la Guía de Incertidumbre de la Medición (JCGM, 2008b), los aportes de incertidumbre pueden ser del tipo A o del tipo B, y deben ser claramente indicados cuando se establezca el presupuesto de incertidumbre y cada uno asociado con su respectiva distribución de probabilidad.

Para una variable dependiente $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ que está en función de N variables independientes y cuando la no linealidad de f no es significativa, la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ es la raíz cuadrada positiva de su varianza $u_c^2(y)$, donde la varianza es expresada mediante la ecuación 4.1.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \bigg|_{X_i=x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (4.1)$$

donde $y, x_1, x_2, \dots, x_N$ son las esperanzas matemáticas de $Y, X_1, X_2, \dots, X_N$ respectivamente. También se define el coeficiente de sensibilidad c_i :

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial X_i} \bigg|_{X_i=x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \bigg|_{x_1, x_2, \dots, x_N}$$

Nota: tal como lo indica la expresión, después de que la fórmula de cada coeficiente de sensibilidad es determinada, esta debe ser evaluada en los valores promedio de cada variable $X_1, X_2, \dots, X_N$.

Para el presente procedimiento, la incertidumbre expandida se reporta con un factor de cobertura $k = 2$ (para un 95 % de cobertura del intervalo de distribución) y se expresa mediante la ecuación 4.2.

$$U_c(y) = 2 \cdot u_c(y) \quad (4.2)$$

4.2 Determinación del error e incertidumbre para una serie de repeticiones

Para una serie de mediciones de un mensurando e , que tiene una distribución de probabilidad normal, para definir el error general E se tiene un error sistemático, representado por la media $\bar{e}$ de una serie de n mediciones, y un error aleatorio, definido por δe , por lo que el error E se define como:

$$E = \bar{e} + \delta e$$

Por lo que la incertidumbre estandar asociada a E , es decir, $u(E)$ está expresada por la ecuación 4.3.

$$u^2(E) = u^2(\bar{e}) + u^2(e), \quad (4.3)$$

donde el término $u(\bar{e})$ queda expresado por la desviación estandar experimental de la media (ver ecuación 4.4).

$$u(\bar{e}) = \frac{s(e)}{\sqrt{n}} \quad (4.4)$$

4.3 Incertidumbre del error en caudal másico

4.3.1 Incertidumbre en el error

Se tiene la ecuación 4.5 que define el error para una corrida:

$$e_{qm} = \frac{Q_{m_MUT} - Q_m}{Q_m}, \quad (4.5)$$

donde Q_{m_MUT} es el caudal medio indicado por el MUT en una corrida y Q_m es el caudal másico definido por la ecuación (2.1).

Por lo que la incertidumbre para el error promedio resultante E_{qm} producto de una serie de n corridas, está expresada por:

$$u^2(E_{qm}) = u^2(e_{qm}) + u^2(\bar{e}_{qm}),$$

donde $\bar{e}_{qm}$: es el valor promedio de e_{qm} correspondiente a n corridas.

La incertidumbre de E_{qm} queda en la siguiente forma:

$$u^2(E_{qm}) = \frac{1}{Q_m^2} u^2(Q_{m_MUT}) + \frac{Q_{m_MUT}^2}{Q_m^4} u^2(Q_m) + u^2(\bar{e}_{qm}), \quad (4.6)$$

donde la incertidumbre para $\bar{e}_{qm}$ está expresa por la ecuación 4.7.

$$u(\bar{e}_{qm}) = \frac{s(e_{qm})}{\sqrt{n}} \quad (4.7)$$

$s(e_{qm})$ es la desviación estándar de n resultados de error.

4.3.2 Coeficientes de sensibilidad

Por las relaciones encontradas en la subsección 2.2.3 se puede apreciar que el caudal másico Q_m está en función de un conjunto de variables independientes:

$$Q_m = Q_m(m_f, m_i, t, \Delta t, \rho_w(T_{w2}, p_a, \xi, \delta \rho_w), \rho_a(T_a, h_r, p_a), \rho_b)$$

Con estas ecuaciones y el desarrollo indicado en el Anexo 1.3.1 obtenemos los coeficientes de sensibilidad, que van de la ecuación 4.8 a la ecuación 4.19.

- El coeficiente de sensibilidad c_{1q_m} asociado a m_f es:

$$c_{1q_m} = \frac{Q_{m_MUT}}{Q_m} \left(\frac{1}{m} \right) \quad (4.8)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{2q_m} asociado a m_i es:

$$c_{2q_m} = -\frac{Q_{m_MUT}}{Q_m} \left(\frac{1}{m} \right) \quad (4.9)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{3q_m} asociado a t es:

$$c_{3q_m} = -\frac{Q_{m_MUT}}{Q_m} \left(\frac{1}{t'} \right) \quad (4.10)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{4q_m} asociado a Δt es:

$$c_{4q_m} = -\frac{Q_{m_MUT}}{Q_m} \left(\frac{1}{t'} \right) \quad (4.11)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{5q_m} asociado a T_{w2} es:

$$c_{5q_m} = \frac{Q_{m_MUT}}{Q_m} \left[\left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} \right] \quad (4.12)$$

donde

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} = & F_{comp} \cdot \left(\frac{-a_{5w}}{a_{3w}} \right) \left\{ \frac{2(T_{w2} + a_{1w})(T_{w2} + a_{2w})}{T_{w2} + a_{4w}} \right. \\ & \left. + (T_{w2} + a_{1w})^2 \cdot \left[\frac{1}{T_{w2} + a_{4w}} - \frac{T_{w2} + a_{2w}}{(T_{w2} + a_{4w})^2} \right] \right\} \\ & + F_w \cdot (k_1 + 2k_2 T_{w2})(p_a - p_{std}) \end{aligned}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{6q_m} para T_a es:

$$c_{6q_m} = \frac{Q_{m_MUT}}{Q_m} \left[\left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} \right] \quad (4.13)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} = \frac{-\rho_a - 5,49 \times 10^{-4} \cdot h_r \cdot \exp(0,061T_a)}{273,15 + T_a}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{7q_m} asociado a h_r es:

$$c_{7q_m} = \frac{Q_{m_MUT}}{Q_m} \left[\left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} \right] \quad (4.14)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} = \frac{-0,009 \cdot \exp(0,061T_a)}{273,15 + T_a}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{8q_m} asociado a p_a es:

$$c_{8q_m} = \frac{Q_{m_MUT}}{Q_m} \left[\left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} + \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} \right] \quad (4.15)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} = \frac{0,34848 \times 10^{-2}}{273,15 + T_a}$$

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} = (k_0 + k_1 T_{w2} + k_2 T_{w2}^2) \cdot F_w$$

La formula de F_w está definida en la ecuación 2.2 del Anexo 2.1.

- El coeficiente de sensibilidad c_{9q_m} para ρ_b es:

$$c_{9q_m} = \frac{Q_{m_MUT}}{Q_m} \left(\frac{1}{\rho_b - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b} \right) \quad (4.16)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{10q_m} para ξ y $\delta \rho_w$ es:

$$c_{10q_m} = \frac{Q_{m_MUT}}{Q_m} \left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \quad (4.17)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{11q_m} para Q_{m_MUT} es:

$$c_{11q_m} = \frac{1}{Q_m} \quad (4.18)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{12q_m} para $\bar{e}_{qm}$ es:

$$c_{12q_m} = 1 \quad (4.19)$$

4.4 Incertidumbre del error en masa

4.4.1 Incertidumbre en el error

Se tiene la siguiente relación que define el error en el flujo de masa para una corrida:

$$e_M = \frac{M_{MUT} - M}{M}, \quad (4.20)$$

donde M_{MUT} es la masa total que pasa a través del MUT en una corrida y M es la masa totalizada de referencia, definida por la ecuación (2.2). Por lo que la incertidumbre para el error resultante E_M , producto de una serie de n corridas, está expresada por:

$$u^2(E_M) = u^2(e_M) + u^2(\bar{e}_M),$$

donde $\bar{e}_M$: es el valor promedio de e_M , correspondiente a n corridas.

La incertidumbre queda en la siguiente forma:

$$u^2(E_M) = \frac{1}{M^2} u^2(M_{MUT}) + \frac{M_{MUT}^2}{M^4} u^2(M) + u^2(\bar{e}_M), \quad (4.21)$$

donde la incertidumbre para $\bar{e}_M$ está expresada por la ecuación 4.22.

$$u(\bar{e}_M) = \frac{s(e_M)}{\sqrt{n}} \quad (4.22)$$

$s(e_M)$ es la desviación estándar de n resultados de error.

4.4.2 Coeficientes de sensibilidad

Por las relaciones encontradas en la subsección 2.2.3 se puede apreciar que la masa M está en función de un conjunto de variables independientes:

$$M = M(m(m_f, m_i), t, \Delta t, \rho_w(T_{w2}, p_a, \xi, \delta\rho_w), \rho_a(T_a, h_r, p_a), \rho_b)$$

Con estas relaciones y el desarrollo indicado en la subsección 1.3.2 obtenemos los coeficientes de sensibilidad, que van de la ecuación 4.23 a la ecuación 4.34.

- El coeficiente de sensibilidad c_{1M} asociado a m_f es:

$$c_{1M} = \frac{M_{MUT}}{M} \left(\frac{1}{m} \right) \quad (4.23)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{2M} asociado a m_i es:

$$c_{2M} = -\frac{M_{MUT}}{M} \left(\frac{1}{m} \right) \quad (4.24)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{3M} asociado a t es:

$$c_{3M} = \frac{M_{MUT}}{M^2} \left(\Delta t \cdot \frac{Q_m}{t'} \right) \quad (4.25)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{4M} asociado a Δt es:

$$c_{4M} = -\frac{M_{MUT}}{M^2} \left(t \cdot \frac{Q_m}{t'} \right) \quad (4.26)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{5M} asociado a T_{w2} es:

$$c_{5M} = t \cdot \frac{M_{MUT}}{M^2} \left[Q_m \left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} \right] \quad (4.27)$$

donde

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} = & F_{comp} \cdot \left(\frac{-a_{5w}}{a_{3w}} \right) \left\{ \frac{2(T_{w2} + a_{1w})(T_{w2} + a_{2w})}{T_{w2} + a_{4w}} \right. \\ & \left. + (T_{w2} + a_{1w})^2 \cdot \left[\frac{1}{T_{w2} + a_{4w}} - \frac{T_{w2} + a_{2w}}{(T_{w2} + a_{4w})^2} \right] \right\} \\ & + F_w \cdot (k_1 + 2k_2 T_{w2})(p_a - p_{std})\end{aligned}$$

La formula de F_w está definida en la ecuación 2.2 del Anexo 2.1.

- El coeficiente de sensibilidad c_{6M} asociado a T_a es:

$$c_{6M} = t \cdot \frac{M_{MUT}}{M^2} \left[Q_m \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} \right], \quad (4.28)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} = \frac{-\rho_a - 5,49 \times 10^{-4} \cdot h_r \cdot \exp(0,061T_a)}{273,15 + T_a}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{7M} asociado a h_r es:

$$c_{7M} = t \cdot \frac{M_{MUT}}{M^2} \left[Q_m \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} \right], \quad (4.29)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} = \frac{-0,009 \cdot \exp(0,061T_a)}{273,15 + T_a}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{8M} asociado a p_a es:

$$c_{8M} = t \cdot \frac{M_{MUT} Q_m}{M^2} \left[\left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} + \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} \right], \quad (4.30)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} = \frac{0,34848 \times 10^{-2}}{273,15 + T_a}$$

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} = (k_0 + k_1 T_{w2} + k_2 T_{w2}^2) \cdot F_w$$

La formula de F_w está definida en la ecuación 2.2 del Anexo 2.1.

- El coeficiente de sensibilidad c_{9M} para ρ_b es:

$$c_{9M} = t \cdot \frac{M_{MUT} Q_m}{M^2} \left(\frac{1}{\rho_b - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b} \right) \quad (4.31)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{10M} para ξ y $\delta \rho_w$ es:

$$c_{10M} = t \cdot \frac{M_{MUT} Q_m}{M^2} \left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \quad (4.32)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{11M} para M_{MUT} es:

$$c_{11M} = \frac{1}{M} \quad (4.33)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{12M} para $\bar{e}_{qm}$ es:

$$c_{12M} = 1 \quad (4.34)$$

4.5 Incertidumbre del error en caudal volumétrico

4.5.1 Incertidumbre en el error

Se tiene la siguiente relación que define el error para una corrida:

$$e_{qv} = \frac{Q_{v_MUT} - Q_v}{Q_v}, \quad (4.35)$$

donde Q_{m_MUT} es el caudal medio indicado por el MUT en una corrida y Q_m es el caudal másico defino por la ecuación (2.3).

Por lo que la incertidumbre para el error resultante E_{qv} , producto de una serie de n mediciones, está expresada por:

$$u^2(E_{qv}) = u^2(e_{qv}) + u^2(\bar{e}_{qv}),$$

donde $\bar{e}_{qv}$: es el valor promedio de e_{qv} para n corridas.

La cual queda en la siguiente forma:

$$u^2(E_{qv}) = \frac{1}{Q_v^2} u^2(Q_{v_MUT}) + \frac{Q_{v_MUT}^2}{Q_v^4} u^2(Q_v) + u^2(\bar{e}_{qv}), \quad (4.36)$$

donde

$$u(\bar{e}_{qv}) = \frac{s(e_{qv})}{\sqrt{n}} \quad (4.37)$$

$s(e_{qv})$ es la desviación estándar de n resultados de error.

4.5.2 Coeficientes de sensibilidad

Por las relaciones encontradas en la subsección 2.2.4 se puede apreciar que el caudal volumétrico Q_v está en función de un conjunto de variables independientes:

$$Q_v = Q_v(m_f, m_i, t, \Delta t, \rho_w(T_{w2}, p_a, \xi, \delta \rho_w), \rho_a(T_a, h_r, p_a), \rho_b, \theta_1(T_{w1}, T_{w2}), \theta_2(p_{w1}))$$

Con estas relaciones y el desarrollo indicado en la subsección 1.3.3 obtenemos los coeficientes de sensibilidad, que van de la ecuación 4.38 a la ecuación 4.51.

- El coeficiente de sensibilidad c_{1q_v} asociado a m_f es:

$$c_{1q_v} = \frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \left(\frac{1}{m} \right) \quad (4.38)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{2q_v} asociado a m_i es:

$$c_{2q_v} = -\frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \left(\frac{1}{m} \right) \quad (4.39)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{3q_v} asociado a t es:

$$c_{3q_v} = -\frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \left(\frac{1}{t'} \right) \quad (4.40)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{4q_v} asociado a Δt es:

$$c_{4q_v} = -\frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \left(\frac{1}{t'} \right) \quad (4.41)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{5q_v} asociado a T_{w2} es:

$$c_{5q_v} = \frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \left[\frac{1}{\theta_1} \frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w2}} - \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} \right], \quad (4.42)$$

donde

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w2}} = -\alpha_w$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} = & F_{comp} \cdot \left(\frac{-a_{5w}}{a_{3w}} \right) \left\{ \frac{2(T_{w2} + a_{1w})(T_{w2} + a_{2w})}{T_{w2} + a_{4w}} \right. \\ & \left. + (T_{w2} + a_{1w})^2 \cdot \left[\frac{1}{T_{w2} + a_{4w}} - \frac{T_{w2} + a_{2w}}{(T_{w2} + a_{4w})^2} \right] \right\} \\ & + F_w \cdot (k_1 + 2k_2 T_{w2})(p_a - p_{std}) \end{aligned}$$

La formula de F_w está definida en la ecuación 2.2 del Anexo 2.1.

- El coeficiente de sensibilidad c_{6q_v} asociado a T_{w1} es:

$$c_{6q_v} = \frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \cdot \frac{1}{\theta_1} \cdot \left[\alpha_w + (T_{w1} - T_{w2}) \frac{\partial \alpha_w}{\partial T_{w1}} \right], \quad (4.43)$$

donde

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial T_{w1}} = (-0,2352 \cdot T_{w1} + 15,846) \times 10^{-6}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{7q_v} asociado a p_{w1} es:

$$c_{7q_v} = -\frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \cdot \frac{\kappa_w}{\theta_2} \quad (4.44)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{8q_v} asociado a T_a es:

$$c_{8q_v} = \frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial T_a}, \quad (4.45)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} = \frac{-\rho_a - 5,49 \times 10^{-4} \cdot h_r \cdot \exp(0,061T_a)}{273,15 + T_a}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{9q_v} asociado a h_r es:

$$c_{9q_v} = \frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial h_r}, \quad (4.46)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} = \frac{-0,009 \cdot \exp(0,061T_a)}{273,15 + T_a}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{10q_v} asociado a p_a es:

$$c_{10q_v} = \frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \left[\left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} - \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} \right] \quad (4.47)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} = \frac{0,34848 \times 10^{-2}}{273,15 + T_a}$$

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} = (k_0 + k_1 T_{w2} + k_2 T_{w2}^2) \cdot F_w$$

La formula de F_w está definida en la ecuación 2.2 del Anexo 2.1.

- El coeficiente de sensibilidad c_{11q_v} para ρ_b es:

$$c_{11q_v} = \frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \left(\frac{1}{\rho_b - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b} \right) \quad (4.48)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{12q_v} para ξ y $\delta \rho_w$ es:

$$c_{12q_v} = \frac{Q_{v_MUT}}{Q_v} \left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \quad (4.49)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{13q_v} para Q_{v_MUT} es:

$$c_{13q_v} = \frac{1}{Q_v} \quad (4.50)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{14q_v} para $\bar{e}_{qv}$ es:

$$c_{14q_v} = 1 \quad (4.51)$$

4.6 Incertidumbre del error en volumen

4.6.1 Incertidumbre en el error

Se tiene la siguiente relación que define el error para una corrida:

$$e_V = \frac{V_{MUT} - V}{V}, \quad (4.52)$$

donde M_{MUT} es la masa total que pasa a través del MUT en una corrida y M es la masa totalizada de referencia, definida por la ecuación (2.4). Por lo que la incertidumbre para el error resultante E_v , producto de una serie de n mediciones, está expresada por:

$$u^2(E_v) = u^2(e_v) + u^2(\bar{e}_v),$$

donde $\bar{e}_v$: es el valor promedio de e_v para n corridas.

La incertidumbre queda en la siguiente forma:

$$u^2(E_V) = \frac{1}{V^2} u(V_{MUT}) + \frac{V_{MUT}^2}{V^4} u^2(V) + u^2(\bar{e}_v), \quad (4.53)$$

donde la incertidumbre para $\bar{e}_v$ está expresada por la ecuación 4.54

$$u(\bar{e}_v) = \frac{s(e_v)}{\sqrt{n}} \quad (4.54)$$

$s(e_v)$ es la desviación estándar de n resultados de error.

4.6.2 Coeficientes de sensibilidad

Por las relaciones encontradas en la subsección 2.2.4 se puede apreciar que el volumen V está en función de un conjunto de variables independientes:

$$V = V(m(m_f, m_i), t, \Delta t, \rho_w(T_{w2}, p_a, \xi, \delta \rho_w), \rho_a(T_a, h_r, p_a), \rho_b, \theta_1(T_{w1}, T_{w2}), \theta_2(p_{w1}))$$

Con estas relaciones y el desarrollo indicado en la subsección 1.3.4 obtenemos los coeficientes de sensibilidad, que van de la ecuación 4.55 a la ecuación 4.68.

- El coeficiente de sensibilidad c_{1v} asociado a m_f es:

$$c_{1v} = \frac{V_{MUT}}{V} \left(\frac{1}{m} \right) \quad (4.55)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{2v} asociado a m_i es:

$$c_{2v} = -\frac{V_{MUT}}{V} \left(\frac{1}{m} \right) \quad (4.56)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{3v} asociado a t es:

$$c_{3v} = \frac{V_{MUT}}{V^2} \left(\Delta t \cdot \frac{Q_v}{t'} \right) \quad (4.57)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{4v} asociado a Δt es:

$$c_{4v} = -\frac{V_{MUT}}{V^2} \left(t \cdot \frac{Q_v}{t'} \right) \quad (4.58)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{5v} asociado a T_{w2} es:

$$c_{5v} = t \cdot \frac{V_{MUT}}{V^2} \cdot Q_v \left[\frac{1}{\theta_1} \frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w2}} - \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} \right], \quad (4.59)$$

donde

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w2}} = -\alpha_w,$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} = & F_{comp} \cdot \left(\frac{-a_{5w}}{a_{3w}} \right) \left\{ \frac{2(T_{w2} + a_{1w})(T_{w2} + a_{2w})}{T_{w2} + a_{4w}} \right. \\ & \left. + (T_{w2} + a_{1w})^2 \cdot \left[\frac{1}{T_{w2} + a_{4w}} - \frac{T_{w2} + a_{2w}}{(T_{w2} + a_{4w})^2} \right] \right\} \\ & + F_w \cdot (k_1 + 2k_2 T_{w2})(p_a - p_{std})\end{aligned}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{6v} asociado a T_{w1} es:

$$c_{6v} = t \cdot \frac{V_{MUT}}{V^2} \cdot \frac{Q_v \alpha_w}{\theta_1} \quad (4.60)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{7v} asociado a p_{w1} es:

$$c_{7v} = -t \cdot \frac{V_{MUT}}{V^2} \cdot \frac{Q_v \kappa_w}{\theta_2} \quad (4.61)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{8v} asociado a T_a es:

$$c_{8v} = t \cdot \frac{V_{MUT}}{V^2} \cdot \left[Q_v \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} \right], \quad (4.62)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} = \frac{-\rho_a - 5,49 \times 10^{-4} \cdot h_r \cdot \exp(0,061 T_a)}{273,15 + T_a}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{9v} asociado a h_r es:

$$c_{9v} = t \cdot \frac{V_{MUT}}{V^2} \cdot \left[Q_v \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} \right], \quad (4.63)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} = \frac{-0,009 \cdot \exp(0,061 T_a)}{273,15 + T_a}$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{10v} asociado a p_a es:

$$c_{10v} = t \cdot \frac{V_{MUT} Q_v}{V^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} - \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} \right], \quad (4.64)$$

donde

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} = \frac{0,34848 \times 10^{-2}}{273,15 + T_a},$$

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} = (k_0 + k_1 T_{w2} + k_2 T_{w2}^2) \cdot F_w$$

La formula de F_w está definida en la ecuación 2.2 del Anexo 2.1.

- El coeficiente de sensibilidad c_{11v} para ρ_b es:

$$c_{11v} = t \cdot \frac{V_{MUT} Q_v}{V^2} \cdot \left(\frac{1}{\rho_b - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b} \right) \quad (4.65)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{12v} para ξ y $\delta \rho_w$ es:

$$c_{12v} = t \cdot \frac{V_{MUT} Q_v}{V^2} \left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \quad (4.66)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{13v} para V_{MUT} es:

$$c_{13v} = \frac{1}{V} \quad (4.67)$$

- El coeficiente de sensibilidad c_{14v} para δe_v es:

$$c_{14v} = 1 \quad (4.68)$$

4.7 Aportes por magnitud de influencia

4.7.1 Indicación de la masa recolectada

El aporte a la incertidumbre debido a la masa m del líquido recolectado tiene diversas componentes que se describirán a continuación.

4.7.1.1 Lectura de la balanza con carga y sin carga. Como la masa del volumen vertido por el sistema es estimada como una diferencia de masa, es decir, la diferencia de masa del recipiente de pesaje con el líquido (con carga) y el recipiente de pesaje sin el líquido vertido (sin carga), las contribuciones de incertidumbre en ambas condiciones son estimadas como las incertidumbres estándar en las respectivas lecturas de la balanza a emplear para la calibración del medidor de caudal.

Las lecturas de la balanza tienen una distribución de probabilidad normal cuya incertidumbre estándar debe ser obtenida de su certificado de calibración.

Usualmente, cuando una balanza es calibrada, en su certificado de calibración se contempla la influencia de la repetibilidad, excentricidad e histéresis, por lo que no se consideraría necesario volver a colocar estas componentes en el presupuesto de incertidumbre, salvo exista justificación técnica.

De acuerdo a lo indicado por la EURAMET, 2015, la expresión para la determinación del valor de incertidumbre estándar del error $u(E_{m_x})$ asociado a la masa m_x tienen la siguiente forma:

$$u(E_{m_x}) = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 m_x^2}$$

donde α y β son las constantes propias asignadas para la balanza, producto de su calibración.

Se deben obtener incertidumbres tanto para la masa inicial (sin carga) m_i y la masa final m_f (con carga) propias del sistema de pesada estática, es decir:

$$\begin{aligned} u(E_{m_i}) &= \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 m_i^2} \\ u(E_{m_f}) &= \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 m_f^2} \end{aligned} \tag{4.69}$$

4.7.1.2 Resolución de lectura de la balanza. El aporte de incertidumbre u_{Res} debido a la resolución $R(m_x)$ de la lectura m_x de la balanza es:

$$u_{Res}(m_x) = \frac{R(m_x)}{2\sqrt{3}}$$

Se deben obtener incertidumbres tanto para la masa inicial (sin carga) m_i y la masa final m_f (con carga) propias del sistema de pesada estática, es decir:

$$\begin{aligned} u_{Res}(m_i) &= \frac{R(m_i)}{2\sqrt{3}} \\ u_{Res}(m_f) &= \frac{R(m_f)}{2\sqrt{3}} \end{aligned} \tag{4.70}$$

4.7.1.3 Deriva de la balanza. El comportamiento histórico a largo plazo o deriva de la balanza y su respectivo aporte de incertidumbre tiene que ser tomado en cuenta ya que, por la frecuencia de uso, toda balanza sufre un desgaste o envejecimiento.

Esto se hace analizando al menos los tres (03) últimos certificados de calibración de la balanza y obteniendo la diferencia máxima $D(m_f)$ de los valores de masa corregidos para m_f entre certificados consecutivos.

Si tenemos p certificados de calibración, la deriva sería:

$$D(m_f) = \max\{|m_f(x+1) - m_f(x)| : x = 1, \dots, p-1\},$$

por lo que incertidumbre estándar $u_D(m)$ tiene una distribución de probabilidad rectangular y está expresada por:

$$u_D(m) = \frac{D(m_f)}{\sqrt{3}} \tag{4.71}$$

4.7.1.4 Pérdidas y variabilidades. En el proceso de medición de masa de un líquido en un recipiente abierto, se considera las pérdidas por posibles salpicaduras en el proceso de vertido y

las variabilidades u oscilaciones en la lectura de la balanza. El valor asociado que combina ambas influencias se determina experimentalmente y corresponde a la variación máxima $var(m_f)$ que se esperaría obtener en la lectura de la masa final m_f durante la calibración. Por lo tanto, la incertidumbre asociada $u_{var}(m)$ es como sigue:

$$u_{var}(m) = \frac{var(m_f)}{\sqrt{3}} \quad (4.72)$$

4.7.2 *Tiempo contabilizado por el sistema de medición*

El aporte a la incertidumbre debido a la medición del tiempo t tiene diversas componentes que se describirán a continuación.

4.7.2.1 Certificado de calibración. La incertidumbre asociada debido a la calibración del contador de tiempo es obtenida de su más reciente certificado.

Para fines prácticos, la incertidumbre a emplear será el valor máximo obtenido de todos los p valores de tiempo calibrados, el cual se expresará como $u_{cert}(t)$.

Teniendo esto en cuenta y el hecho de que la incertidumbre estándar del certificado u_{cert} es igual a la mitad de la incertidumbre expandida U_{cert} , resulta:

$$U_{cert}(t) = \max\{U_{cert}(t(x)) : x = 1, \dots, p\}$$

$$u(t) = \frac{U_{cert}(t)}{2} \quad (4.73)$$

4.7.2.2 Resolución de lectura del contador de tiempo. El empleado en el laboratorio es de indicación digital, por lo que el aporte de incertidumbre $u_{Res}(t)$ debido a la resolución $R(t)$ de la lectura t es:

$$u_{Res}(t) = \frac{R(t)}{2\sqrt{3}} \quad (4.74)$$

4.7.2.3 Deriva del contador de tiempo. El comportamiento histórico a largo plazo o deriva del contador de tiempo y su respectivo aporte de incertidumbre tiene que ser tomado en cuenta ya que, por la frecuencia de uso.

Esto se hace analizando al menos los tres (03) últimos certificados de calibración del contador y obteniendo la diferencia máxima $D(t)$ de los valores corregidos para t entre certificados consecutivos.

Si tenemos p certificados de calibración, la deriva sería:

$$D(t) = \max\{|t(x+1) - t(x)| : x = 1, \dots, p-1\}$$

Su incertidumbre estándar $u_D(t)$ tiene una distribución de probabilidad rectangular y está expresada por:

$$u_D(t) = \frac{D(t)}{\sqrt{3}} \quad (4.75)$$

4.7.2.4 Detector láser. El detector láser que detecta el movimiento del diversor da la señal para el inicio y final del conteo del tiempo de recolección tiene una variación máxima estimada Δt_{laser} , cuyo aporte de incertidumbre es:

$$u(\Delta t_{laser}) = \frac{\Delta t_{laser}}{\sqrt{3}} \quad (4.76)$$

4.7.3 Efecto del diversor

Al caracterizar un diversor, se realiza la determinación de Δt y su respectiva incertidumbre estándar $u(\Delta t)$ en 3 caudales representativos Q_a , Q_b y Q_c (donde $Q_a < Q_b < Q_c$) de modo que cubra el intervalo de medición de caudal deseado. Producto de la caracterización se tiene asociado a cada uno de los 3 caudales la respectiva incertidumbre estándar de Δt del diversor, representados por $u_{\Delta t}(Q_a)$, $u_{\Delta t}(Q_b)$ y $u_{\Delta t}(Q_c)$ y correspondientes a Q_a , Q_b y Q_c respectivamente.

Para hallar la incertidumbre en un valor de caudal Q_x tal que $Q_a \leq Q_x \leq Q_c$ se realiza una

interpolación polinomial de grado 2 y se obtienen los coeficientes c_2 , c_1 y c_0 con lo que se tiene:

$$u_{\Delta t}(Q_x) = c_2 Q_x^2 + c_1 Q_x + c_0 \quad (4.77)$$

4.7.4 Temperatura del agua en la línea de medición

El aporte a la incertidumbre debido a la temperatura del líquido en la línea de medición T_{w1} tiene diversas componentes que se describirán a continuación.

4.7.4.1 Certificado de calibración. La incertidumbre asociada debido a su calibración es obtenida de su más reciente certificado.

Para fines prácticos, la incertidumbre a emplear será el valor máximo obtenido de todos los p valores de temperatura calibrados, el cual se expresará como $u_{cert}(T_{w1})$.

Teniendo esto en cuenta y el hecho de que la incertidumbre estándar del certificado u_{cert} es igual a la mitad de la incertidumbre expandida U_{cert} , resulta:

$$U_{cert}(T_{w1}) = \max\{U_{cert}(T_{w1}(x)) : x = 1, \dots, p\}$$

$$u(T_{w1}) = \frac{U_{cert}(T_{w1})}{2} \quad (4.78)$$

4.7.4.2 Resolución de lectura del termómetro. El termómetro empleado en el laboratorio es de indicación digital, por lo que el aporte de incertidumbre $u_{Res}(T_{w1})$ debido a la resolución $R(T_{w1})$ de la lectura T_{w1} es:

$$u_{Res}(T_{w1}) = \frac{R(T_{w1})}{2\sqrt{3}} \quad (4.79)$$

4.7.4.3 Deriva del termómetro. El comportamiento histórico a largo plazo o deriva del termómetro y su respectivo aporte de incertidumbre tiene que ser tomado en cuenta ya que, por la

frecuencia de uso, todo termómetro sufre un desgaste o envejecimiento.

Esto se hace analizando al menos los tres (03) últimos certificados de calibración del termómetro y obteniendo la diferencia máxima $D(T_{w1})$ de los valores corregidos para T_{w1} entre certificados consecutivos.

Si tenemos p certificados de calibración, la deriva sería:

$$D(T_{w1}) = \max\{|T_{w1}(x+1) - T_{w1}(x)| : x = 1, \dots, p-1\}$$

Su incertidumbre estándar $u_D(T_{w1})$ tiene una distribución de probabilidad rectangular y está expresada por:

$$u_D(T_{w1}) = \frac{D(T_{w1})}{\sqrt{3}} \quad (4.80)$$

4.7.4.4 Gradiente espacial. La temperatura T_{w1} que se mide en el línea de medición es realizado en una ubicación cercana al punto de salida del medidor bajo test (MUT). Por lo que la diferencia en la temperatura del agua tomada en cualquier lugar espacial de este volumen respecto a esta localización central debe ser tomada en cuenta para la incertidumbre del valor de T_{w1} .

El aporte de incertidumbre estándar $u_{grad}(T_{w1})$ debido al gradiente de temperatura se obtiene considerando la diferencia entre T_{w1} y la temperatura del agua en la salida de la línea, es decir, T_{w2} .

$$u_{grad}(T_{w1}) = \frac{|T_{w2} - T_{w1}|}{2\sqrt{3}} \quad (4.81)$$

4.7.4.5 Diferencia respecto a la temperatura del aire. Debido a que la tubería está expuesta al aire del ambiente del laboratorio de temperatura T_a , se puede considerar la diferencia entre esta temperatura y la del agua como una componente adicional de incertidumbre estándar.

$$u_{dif-T_0}(T_{w1}) = \frac{|T_{w1} - T_a|}{2\sqrt{3}} \quad (4.82)$$

4.7.4.6 Cambio temporal. La variación temporal de la temperatura T_{w1} en el punto de medición de la línea genera un aportante de incertidumbre $u_{temp}(T_{w1})$, el cual puede ser expresado en función de la diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado en la calibración.

Estos dos valores se obtienen de los promedios obtenidos en cada ensayo. Recordando que en una calibración del medidor bajo test (MUT) se realizan p ensayos, la incertidumbre se puede expresar como:

$$\min(T_{w1}) = \min\{|T_{w1}(x)| : x = 1, \dots, p\}$$

$$\max(T_{w1}) = \max\{|T_{w1}(x)| : x = 1, \dots, p\}$$

$$u_{temp}(T_{w1}) = \frac{|\max(T_{w1}) - \min(T_{w1})|}{2\sqrt{3}} \quad (4.83)$$

4.7.5 Temperatura del agua en el recipiente de pesaje

El aporte a la incertidumbre debido a la temperatura del líquido recolectado en el recipiente de pesaje T_{w2} tiene diversas componentes que se describirán a continuación.

4.7.5.1 Certificado de calibración. La incertidumbre asociada debido a su calibración es obtenida de su más reciente certificado.

Para fines prácticos, la incertidumbre a emplear será el valor máximo obtenido de todos los p valores de temperatura calibrados, el cual se expresará como $u_{cert}(T_{w2})$.

Teniendo esto en cuenta y el hecho de que la incertidumbre estándar del certificado u_{cert} es igual a la mitad de la incertidumbre expandida U_{cert} , resulta:

$$U_{cert}(T_{w2}) = \max\{U_{cert}(T_{w2}(x)) : x = 1, \dots, p\}$$

$$u(T_{w2}) = \frac{U_{cert}(T_{w2})}{2} \quad (4.84)$$

4.7.5.2 Resolución de lectura del termómetro. El termómetro empleado en el laboratorio es de indicación digital, por lo que el aporte de incertidumbre $u_{Res}(T_{w2})$ debido a la resolución $R(T_{w2})$ de la lectura T_{w2} es:

$$u_{Res}(T_{w2}) = \frac{R(T_{w2})}{2\sqrt{3}} \quad (4.85)$$

4.7.5.3 Deriva del termómetro. El comportamiento histórico a largo plazo o deriva del termómetro y su respectivo aporte de incertidumbre tiene que ser tomado en cuenta ya que, por la frecuencia de uso, todo termómetro sufre un desgaste o envejecimiento.

Esto se hace analizando al menos los tres (03) últimos certificados de calibración del termómetro y obteniendo la diferencia máxima $D(T_{w2})$ de los valores corregidos para T_{w2} entre certificados consecutivos.

Si tenemos p certificados de calibración, la deriva sería:

$$D(T_{w2}) = \max\{|T_{w2}(x+1) - T_{w2}(x)| : x = 1, \dots, p-1\}$$

Su incertidumbre estándar $u_D(T_{w2})$ tiene una distribución de probabilidad rectangular y está expresada por:

$$u_D(T_{w2}) = \frac{D(T_{w2})}{\sqrt{3}} \quad (4.86)$$

4.7.5.4 Gradiente espacial. La temperatura T_{w2} que se mide en el recipiente de pesaje es realizado en el centro geométrico del volumen de agua. Por lo que la diferencia en la temperatura del agua tomada en cualquier lugar espacial de este volumen respecto a esta localización central debe ser tomada en cuenta para la incertidumbre del valor de T_{w2} .

El aporte de incertidumbre estándar $u_{grad}(T_{w2})$ debido al gradiente de temperatura se obtiene considerando la diferencia máxima $D_{grad}(T_{w2})$ que se puede tener en las condiciones de medición. Este valor es experimental y determinado por el propio laboratorio.

$$u_{grad}(T_{w2}) = \frac{D_{grad}(T_{w2})}{\sqrt{3}} \quad (4.87)$$

4.7.5.5 Diferencia respecto a la temperatura del aire. Debido a que el volumen de agua recolectado está expuesto al aire del ambiente del laboratorio de temperatura T_a , se puede considerar la diferencia entre esta temperatura y la del agua como una componente adicional de incertidumbre estándar.

$$u_{dif-T_0}(T_{w2}) = \frac{|T_{w2} - T_a|}{2\sqrt{3}} \quad (4.88)$$

4.7.6 Densidad del agua

La densidad del agua es realizada mediante el empleo de un densímetro de principio oscilatorio de la marca Anton Paar, modelo DM5000, en el cual se coloca una muestra del agua obtenida de la cisterna de almacenamiento.

Para realizar la medición de densidad apropiadamente, este instrumento es ajustado empleando un material de referencia certificado (MRC) de densidad de agua, o en su defecto agua ultrapura, la cual es producida en las mismas condiciones que el MRC.

Producto de este ajuste se tiene una variación máxima típica en el laboratorio, lo cual indica un semi ancho máximo a de distribución rectangular, expresado por $a(\delta\rho_w)$, con una incertidumbre expresada como sigue:

$$u(\delta\rho_w) = \frac{a(\delta\rho_w)}{\sqrt{3}} \quad (4.89)$$

Producto de la medición de la densidad del agua potable, se tiene un valor de corrección ξ y

una variación máxima esperada en su medición la cual es expresada como un semi ancho máximo a de distribución rectangular, es decir, $a(\xi)$ y cuya incertidumbre es:

$$u(\xi) = \frac{a(\xi)}{\sqrt{3}} \quad (4.90)$$

4.7.7 Presión del agua en la línea de medición

El aporte a la incertidumbre debido a la presión manométrica del líquido en la línea de medición p_{w1} tiene diversas componentes. Estas se describirán a continuación:

4.7.7.1 Certificado de calibración. La incertidumbre asociada debido a su calibración es obtenida de su más reciente certificado.

Para fines prácticos, la incertidumbre a emplear será el valor máximo obtenido de todos los p valores de presión calibrados, el cual se expresará como $u_{cert}(p_{w1})$.

Teniendo esto en cuenta y el hecho de que la incertidumbre estándar del certificado u_{cert} es igual a la mitad de la incertidumbre expandida U_{cert} , resulta:

$$U_{cert}(p_{w1}) = \max\{U_{cert}(p_{w1}(x)) : x = 1, \dots, p\}$$

$$u(p_{w1}) = \frac{U_{cert}(p_{w1})}{2} \quad (4.91)$$

4.7.7.2 Resolución de lectura del manómetro. El manómetro empleado en el laboratorio es de indicación digital, por lo que el aporte de incertidumbre $u_{Res}(p_{w1})$ debido a la resolución $R(p_{w1})$ de la lectura p_{w1} es:

$$u_{Res}(p_{w1}) = \frac{R(p_{w1})}{2\sqrt{3}} \quad (4.92)$$

4.7.7.3 Deriva del manómetro. El comportamiento histórico a largo plazo o deriva del manómetro y su respectivo aporte de incertidumbre tiene que ser tomado en cuenta ya que, por la frecuencia de uso, todo manómetro sufre un desgaste o envejecimiento.

Esto se hace analizando al menos los tres (03) últimos certificados de calibración del manómetro y obteniendo la diferencia máxima $D(p_{w1})$ de los valores corregidos para p_{w1} entre certificados consecutivos.

Si tenemos p certificados de calibración, la deriva sería:

$$D(p_{w1}) = \max\{|p_{w1}(x+1) - p_{w1}(x)| : x = 1, \dots, p-1\}$$

Su incertidumbre estándar $u_D(p_{w1})$ tiene una distribución de probabilidad rectangular y está expresada por:

$$u_D(p_{w1}) = \frac{D(p_{w1})}{\sqrt{3}} \quad (4.93)$$

4.7.7.4 Cambio temporal. La variación temporal de la presión p_{w1} en el punto de medición de la línea constituye un aportante de incertidumbre $u_{temp}(p_{w1})$, el cual puede ser expresado en función de la diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado en la calibración.

Estos dos valores se obtienen de los promedios obtenidos en cada ensayo. Recordando que en una calibración del medidor bajo test (MUT) se realizan p ensayos, la incertidumbre se puede expresar como:

$$\min(p_{w1}) = \min\{|p_{w1}(x)| : x = 1, \dots, p\}$$

$$\max(p_{w1}) = \max\{|p_{w1}(x)| : x = 1, \dots, p\}$$

$$u_{temp}(p_{w1}) = \frac{|\max(p_{w1}) - \min(p_{w1})|}{2\sqrt{3}} \quad (4.94)$$

4.7.7.5 Pérdida de presión en el MUT. Cuando el flujo de líquido viaja a través del MUT, existe una natural pérdida de presión, es decir, la presión a la salida de este (downstream) es menor que en su entrada (upstream); y es debido a la resistencia propia del conducto interno o cavidad por donde pasa el líquido en su viaje, y depende de factores tales como la geometría interna, el principio de medición, el diámetro nominal del medidor, el tamaño del caudal, entre otros.

Esta pérdida de presión no se mide directamente en el sistema pero se puede cuantificar su efecto usando la información que brinda el fabricante sobre la pérdida de presión y asumiendo una distribución de probabilidad rectangular.

Considérese Δp_{loss} la pérdida de presión típica para un medidor de caudal de un diámetro nominal determinado y que opera con agua potable como líquido de trabajo, la incertidumbre asociada $u(\Delta p_{loss})$ está definida por:

$$u(\Delta p_{loss}) = \frac{\Delta p_{loss}}{2\sqrt{3}} \quad (4.95)$$

4.7.8 Humedad relativa en el laboratorio

El aporte a la incertidumbre debido a la humedad relativa h_r tiene diversas componentes que se describirán a continuación.

4.7.8.1 Certificado de calibración. La incertidumbre asociada debido a su calibración es obtenida de su más reciente certificado.

Para fines prácticos, la incertidumbre a emplear será el valor máximo obtenido de todos los p valores de humedad relativa calibrados, el cual se expresará como $u_{cert}(h_r)$.

Teniendo esto en cuenta y el hecho de que la incertidumbre estándar del certificado u_{cert} es igual a la mitad de la incertidumbre expandida U_{cert} , resulta:

$$U_{cert}(h_r) = \max\{U_{cert}(h_r(x)) : x = 1, \dots, p\}$$

$$u(h_r) = \frac{U_{cert}(h_r)}{2} \quad (4.96)$$

4.7.8.2 Resolución de lectura del higrómetro. El higrómetro empleado en el laboratorio es de indicación digital, por lo que el aporte de incertidumbre $u_{Res}(h_r)$ debido a la resolución $R(h_r)$ de la lectura h_r es:

$$u_{Res}(h_r) = \frac{R(h_r)}{2\sqrt{3}} \quad (4.97)$$

4.7.8.3 Deriva del higrómetro. El comportamiento histórico a largo plazo o deriva del higrómetro y su respectivo aporte de incertidumbre tiene que ser tomado en cuenta ya que, por la frecuencia de uso, todo higrómetro sufre un desgaste o envejecimiento.

Esto se hace analizando al menos los tres (03) últimos certificados de calibración del higrómetro y obteniendo la diferencia máxima $D(h_r)$ de los valores corregidos para h_r entre certificados consecutivos.

Si tenemos p certificados de calibración, la deriva sería:

$$D(h_r) = \max\{|h_r(x+1) - h_r(x)| : x = 1, \dots, p-1\}$$

Su incertidumbre estándar $u_D(h_r)$ tiene una distribución de probabilidad rectangular y está expresada por:

$$u_D(h_r) = \frac{D(h_r)}{\sqrt{3}} \quad (4.98)$$

4.7.8.4 Cambio temporal. La variación temporal de la humedad relativa h_r genera un aporte de incertidumbre $u_{temp}(h_r)$, el cual puede ser expresado en función de la diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado en la calibración.

Estos dos valores se obtienen de los promedios obtenidos en cada ensayo. Recordando que en una calibración del medidor bajo test (MUT) se realizan p ensayos, la incertidumbre se puede expresar como:

$$\min(h_r) = \min\{|h_r(x)| : x = 1, \dots, p\}$$

$$\max(h_r) = \max\{|h_r(x)| : x = 1, \dots, p\}$$

$$u_{temp}(h_r) = \frac{|\max(h_r) - \min(h_r)|}{2\sqrt{3}} \quad (4.99)$$

4.7.9 Presión atmosférica

El aporte a la incertidumbre debido a la presión del aire p_a tiene diversas componentes que se describirán a continuación.

4.7.9.1 Certificado de calibración. La incertidumbre asociada debido a su calibración es obtenida de su más reciente certificado.

Para fines prácticos, la incertidumbre a emplear será el valor máximo obtenido de todos los p valores de presión del aire calibrados, el cual se expresará como $u_{cert}(p_a)$.

Teniendo esto en cuenta y el hecho de que la incertidumbre estándar del certificado u_{cert} es igual a la mitad de la incertidumbre expandida U_{cert} , resulta:

$$U_{cert}(p_a) = \max\{U_{cert}(p_a(x)) : x = 1, \dots, p\}$$

$$u(p_a) = \frac{U_{cert}(p_a)}{2} \quad (4.100)$$

4.7.9.2 Resolución de lectura del barómetro. El barómetro empleado en el laboratorio es de indicación digital, por lo que el aporte de incertidumbre $u_{Res}(p_a)$ debido a la resolución $R(p_a)$ de la lectura p_a es:

$$u_{Res}(p_a) = \frac{R(p_a)}{2\sqrt{3}} \quad (4.101)$$

4.7.9.3 Deriva del barómetro. El comportamiento histórico a largo plazo o deriva del barómetro y su respectivo aporte de incertidumbre tiene que ser tomado en cuenta ya que, por la frecuencia de uso, todo barómetro sufre un desgaste o envejecimiento.

Esto se hace analizando al menos los tres (03) últimos certificados de calibración del barómetro y obteniendo la diferencia máxima $D(p_a)$ de los valores corregidos p_a entre certificados consecutivos.

Si tenemos p certificados de calibración, la deriva sería:

$$D(p_a) = \max\{|p_a(x+1) - p_a(x)| : x = 1, \dots, p-1\}$$

Su incertidumbre estándar $u_D(p_a)$ tiene una distribución de probabilidad rectangular y está expresada por:

$$u_D(p_a) = \frac{D(p_a)}{\sqrt{3}} \quad (4.102)$$

4.7.9.4 Cambio temporal. La variación temporal de la presión del aire p_a genera un aporte de incertidumbre $u_{temp}(p_a)$, el cual puede ser expresado en función de la diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado en la calibración.

Estos dos valores se obtienen de los promedios obtenidos en cada ensayo. Recordando que en una calibración del medidor bajo test (MUT) se realizan p ensayos, la incertidumbre se puede expresar como:

$$\min(p_a) = \min\{|p_a(x)| : x = 1, \dots, p\}$$

$$\max(p_a) = \max\{|p_a(x)| : x = 1, \dots, p\}$$

$$u_{temp}(p_a) = \frac{|\max(p_a) - \min(p_a)|}{2\sqrt{3}} \quad (4.103)$$

4.7.10 Temperatura del laboratorio

El aporte a la incertidumbre debido a la temperatura del aire T_a tiene diversas componentes que se describirán a continuación.

4.7.10.1 Certificado de calibración. La incertidumbre asociada debido a su calibración es obtenida de su más reciente certificado.

Para fines prácticos, la incertidumbre a emplear será el valor máximo obtenido de todos los p valores de temperatura calibrados, el cual se expresará como $u_{cert}(T_a)$.

Teniendo esto en cuenta y el hecho de que la incertidumbre estándar del certificado u_{cert} es igual a la mitad de la incertidumbre expandida U_{cert} , resulta:

$$U_{cert}(T_a) = \max\{U_{cert}(T_a(x)) : x = 1, \dots, p\}$$

$$u(T_a) = \frac{U_{cert}(T_a)}{2} \quad (4.104)$$

4.7.10.2 Resolución de lectura del termómetro. El termómetro empleado en el laboratorio es de indicación digital, por lo que el aporte de incertidumbre $u_{Res}(T_a)$ debido a la resolución $R(T_a)$ de la lectura T_a es:

$$u_{Res}(T_a) = \frac{R(T_a)}{2\sqrt{3}} \quad (4.105)$$

4.7.10.3 Deriva del termómetro. El comportamiento histórico a largo plazo o deriva del termómetro y su respectivo aporte de incertidumbre tiene que ser tomado en cuenta ya que, por la frecuencia de uso, todo termómetro sufre un desgaste o envejecimiento.

Esto se hace analizando al menos los tres (03) últimos certificados de calibración del termómetro y obteniendo la diferencia máxima $D(T_a)$ de los valores (corregidos) T_a entre certificados consecutivos.

Si tenemos p certificados de calibración, la deriva sería:

$$D(T_a) = \max\{|T_a(x+1) - T_a(x)| : x = 1, \dots, p-1\}$$

Su incertidumbre estándar $u_D(T_a)$ tiene una distribución de probabilidad rectangular y está expresada por:

$$u_D(T_a) = \frac{D(T_a)}{\sqrt{3}} \quad (4.106)$$

4.7.10.4 Cambio temporal. La variación temporal de la temperatura T_a genera un aportante de incertidumbre $u_{temp}(T_a)$, el cual puede ser expresado en función de la diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado en la calibración.

Estos dos valores se obtienen de los promedios obtenidos en cada ensayo. Recordando que en una calibración del medidor bajo test (MUT) se realizan p ensayos, la incertidumbre se puede expresar como:

$$\min(T_a) = \min\{|T_a(x)| : x = 1, \dots, p\}$$

$$\max(T_a) = \max\{|T_a(x)| : x = 1, \dots, p\}$$

$$u_{temp}(T_a) = \frac{|\max(T_a) - \min(T_a)|}{2\sqrt{3}} \quad (4.107)$$

4.7.11 Densidad de las pesas

La incertidumbre asociada debido a su calibración es obtenida de su más reciente certificado.

Teniendo esto en cuenta y el hecho de que la incertidumbre estándar del certificado u_{cert} es igual a la mitad de la incertidumbre expandida U_{cert} , resulta:

$$u(\rho_b) = \frac{U_{cert}(\rho_b)}{2} \quad (4.108)$$

4.7.12 Proceso de medición

La incertidumbre debido al proceso de medición es aquella representada por el error estándar o también llamado desviación estándar de la media.(Hughes and Hase).

Para los errores en Q_m , M , Q_v y V han sido determinados los errores estandar en las ecuaciones (4.7), (4.22), (4.37) y (4.54) respectivamente.

4.7.13 Item de calibración (MUT)

4.7.13.1 Repetibilidad de las lecturas (caudal). Esto podrá aplicarse solamente al caudal másico Q_m y al caudal volumétrico Q_v .

Cuando el medidor de caudal muestra en tiempo real los caudales sea mediante su propio display o a través de transmisión de datos a un dispositivo externo receptor, la incertidumbre estándar asociada a la calibración corresponderá a la desviación estándar ponderada s_R de una serie de k corridas o ensayos, cada una con n_j lecturas de caudal está representada por la ecuación (4.109).

$$u_{Rep} = s_R \quad (4.109)$$

donde:

$$s_R^2 = \sum_{j=1}^k \left(\frac{n_j - 1}{n_T - k} \right) s_j^2 \quad (4.110)$$

n_j : es el tamaño de la j -ésima corrida .

n_T : es el tamaño de la muestra total de las k corridas o ensayos, es decir, $n_T = \sum n_j$.

s_j^2 : es la varianza muestral de la j -ésima corrida .

4.7.13.2 Resolución del MUT. El aporte de incertidumbre $u_{Res}(MUT)$ debido a la resolución de la lectura del MUT , indicada por $R(MUT)$, para el caso en el que el medidor de caudal muestra en tiempo real los caudales, es:

$$u_{Res}(MUT) = \frac{R(MUT)}{2\sqrt{3}} \quad (4.111)$$

Nota: Para calibración de caudal másico Q_m o volumétrico Q_v por el método de recolección de tren de pulsos cuadrados, así como en la calibración de masa M y volumen V se empleará la incertidumbre asociada al pulso al inicio y otra al pulso final registrado.

Capítulo V. Resultados y discusiones

5.1 Caracterización del desviador

El sistema del Laboratorio de Líquidos cuenta actualmente con tres toberas asociadas a la Línea N° 1 y tres toberas asociadas a la Línea N° 2, tal como está especificado en la sección 3.2.8.

La caracterización para determinar el error del conteo de tiempo Δt y la incertidumbre estándar asociada $u(\Delta t)$ se encuentran desarrolladas en las ecuaciones 2.7 y 2.8, respectivamente.

5.1.1 Caracterización del desviador en la Línea N° 1

La caracterización del desviador de la Línea N° 1 se realizó en tres caudales en cada una de sus tres toberas, tal como se indica en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3 y mostradas gráficamente en las Figuras 5.1a, 5.1b y 5.1c.

Tabla 5.1

Caracterización del desviador con la tobera B-CH-01.

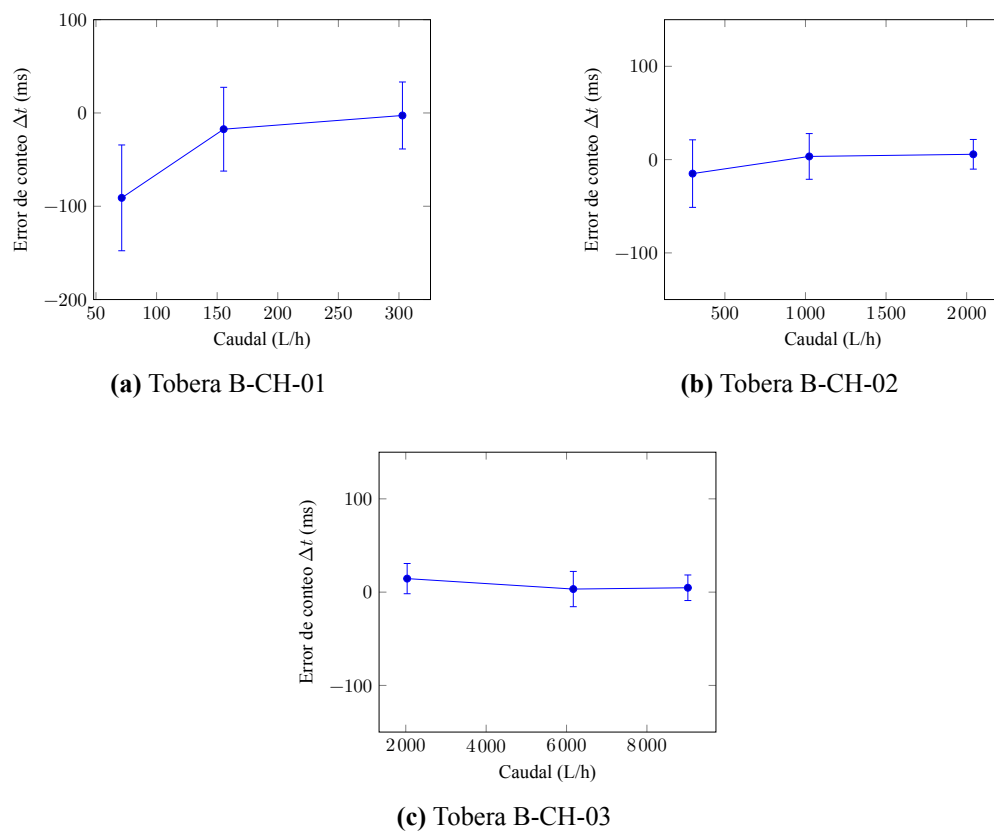
Caudal (L/h)	Δt (ms)	$u(\Delta t)$ (ms)
71,24	-91,0	56,7
155,37	-17,4	44,9
302,87	-2,7	35,9

Tabla 5.2*Caracterización del desviador con la tobera B-CH-02.*

Caudal (L/h)	Δt (ms)	$u(\Delta t)$ (ms)
299,55	-15,0	36,2
1023,35	3,4	24,5
2041,37	5,7	15,9

Tabla 5.3*Caracterización del desviador con la tobera B-CH-03.*

Caudal (L/h)	Δt (ms)	$u(\Delta t)$ (ms)
2034,45	14,5	16,2
6168,00	3,3	18,9
9018,68	4,7	13,7

Figura 5.1*Caracterización del desviador con las toberas de la Línea N° 1.*

5.1.2 Caracterización del desviador en la Línea N° 2

La caracterización del desviador de la Línea N° 2 se realizó en tres caudales en cada una de sus tres toberas, tal como se indica en las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6 y mostradas gráficamente en las Figuras 5.2a, 5.2b y 5.2c.

Tabla 5.4

Caracterización del desviador con la tobera B-G-01.

Caudal (L/h)	Δt (ms)	$u(\Delta t)$ (ms)
9054,67	2,7	22,2
12 221,67	10,2	41,7
15 141,29	1,2	49,7

Tabla 5.5

Caracterización del desviador con la tobera B-G-02.

Caudal (L/h)	Δt (ms)	$u(\Delta t)$ (ms)
16 136,38	-4,3	40,2
50 112,06	-10,0	8,8
79 911,15	-9,7	5,7

Tabla 5.6

Caracterización del desviador con la tobera B-G-03.

Caudal (L/h)	Δt (ms)	$u(\Delta t)$ (ms)
79 960,29	-4,7	6,0
100 147,85	-8,5	4,4
124 893,85	-11,3	6,5

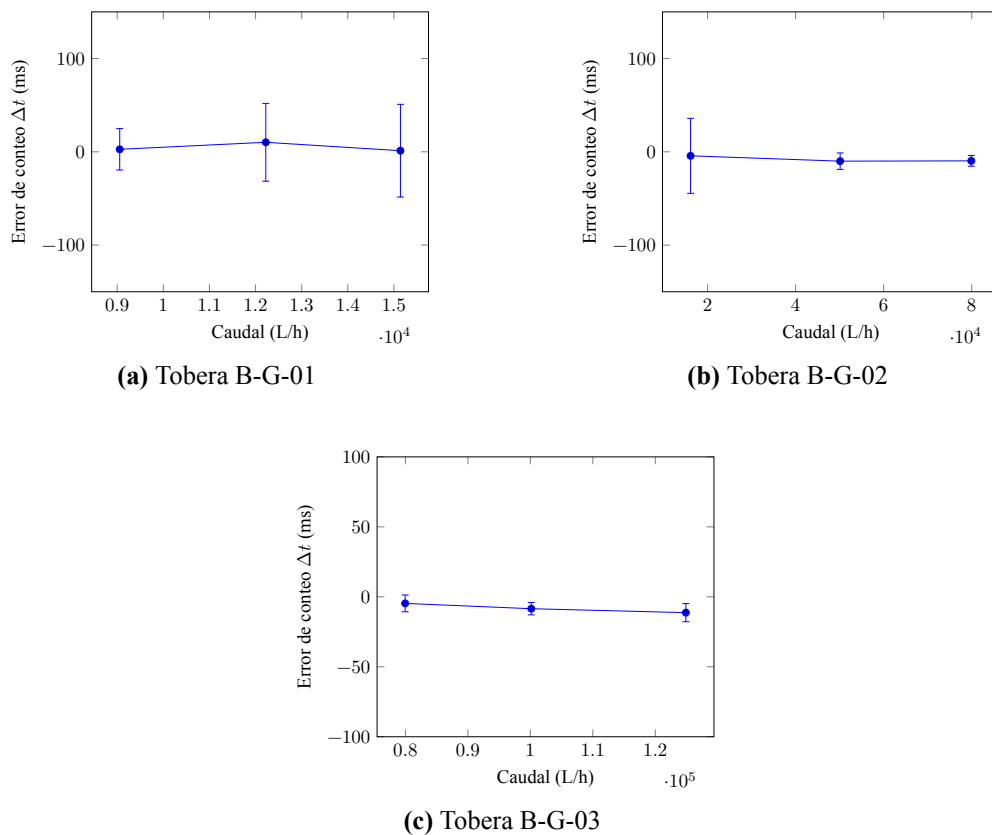
5.2 Validación de la plantilla de cálculo

La herramienta creada por el LFL y empleada para el cálculo de errores y estimación de la incertidumbre está desarrollada en Microsoft Excel. Se eligió este software por los siguientes motivos:

- Es el software comercial más difundido en el manejo, gestión y análisis de datos.
- Su plataforma visual permite la manipulación sencilla de información.

Figura 5.2

Caracterización del desviador con las toberas de la Línea N° 2



- Para el manejo básico de ingreso de datos no requiere mayor experiencia de parte del usuario.
- Permite la implementación y el rastreo rápido de fórmulas.
- Permite apreciar las etapas del procesamiento de información.
- Es el software estándar adoptado por la Dirección de Metrología de INACAL.

A continuación se hace una breve descripción de algunas características de la plantilla empleada y su versatilidad para poder lidiar con todos los casos posibles de calibración que van llegando como solicitud de servicio al LFL-INACAL.

5.2.1 Diseño de la plantilla

La plantilla de cálculo, consta de 24 pestañas, cuyas características están definidas en la tabla

Tabla 5.7*Componentes de la plantilla empleada en la calibración de caudalímetros*

Nombre de la hoja	Cantidad	Función
Registro	1	Registro de datos del ítem de calibración y configuración de opciones de calibración
Primer ensayo - Séptimo ensayo	7	Registrar datos adquiridos por los instrumentos de medición por caudal ensayado
Calculo1 - Calculo7	7	Procesar la información de Primer ensayo - Séptimo ensayo
Instrumentos	1	Alojar la información global de trazabilidad de todos los patrones e instrumentos de medición
Datos	1	Mostrar la información resumida del ítem de calibración
Patrones	1	Mostrar la lista de los patrones a declarar en el certificado de calibración
F corr densidad agua	1	Muestra los valores de corrección de densidad del agua en laboratorio
Constantes	1	Alojar las tablas de caracterización del desviador y constantes de la fórmula de densidad del agua
Impresión	1	Alojar el resumen de los resultados, para impresión en certificado
Tabla y Lista	2	Indicar parámetros de control para la hoja excel
C.amb	1	Mostrar el resumen de las condiciones ambientales en toda la calibración

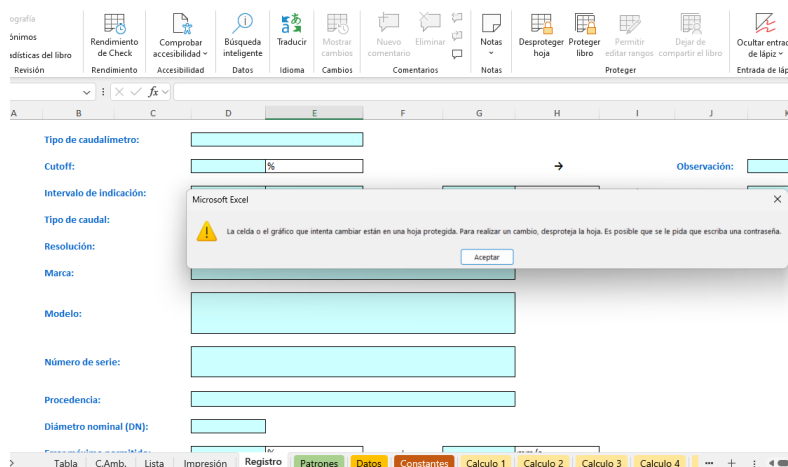
A continuación veremos los aspectos más importantes que se han considerado en la validación de la hoja de cálculo.

5.2.2 Seguridad y protección

Respecto a este punto, cada pestaña u hoja donde se procesa información está bloqueada y algunas en las cuales se ingresa información solo tienen celdas desbloqueadas. Además, luego de culminada la medición, el archivo es cifrado con contraseña, para evitar posteriores alteraciones.

Figura 5.3

Ejemplo de protección de hojas de la plantilla Excel



5.2.3 Especificaciones matemáticas y revisión del código

Cada una de las ecuaciones que lleva a la determinación de Q_m , Q_v , M y V están indicados en el Instructivo para la determinación de la Incertidumbre en la calibración de caudalímetros IT-LFL-006 así como en el presente trabajo.

Para eliminar casi totalmente el riesgo de fallar en la redacción de las fórmulas, se asignaron a las celdas involucradas el nombre exacto de las variables definidas en el instructivo, lo cual a la vez resultó de ayuda para facilitar la inspección en ecuaciones de gran tamaño. En ese sentido, en la figura 5.4 se puede apreciar que en la plantilla se crearon variables locales (por pestaña) y variables globales (para toda la plantilla).

Por ejemplo, la variable ρ_a es identificada en la plantilla como rho_a y corresponde a la densidad del aire; esta es una variable de carácter local definida para cada una de las pestañas desde Calculo 1 hasta Calculo 7.

Por otro lado, las variables globales son aquellas constantes que puede ser invocada por cualquier pestaña de la plantilla. Por ejemplo la celda rho_b correspondiente a la densidad de las pesas ρ_b es la misma sin importar en que hoja se estén realizando los cálculos. En toda la plantilla se puede apreciar la manera en como se redactan las fórmulas y la claridad que brindan para su comparación con su fuente documentaria. Una muestra de ello se observa en la figura 5.5.

Teniendo en cuenta que se trabaja con magnitudes físicas que presentan unidades de medida, estas han sido escritas para cada cálculo realizado, lo que facilita el seguimiento y su coherencia con

Figura 5.4

Ejemplo de lista de variables comprendidas en la plantilla

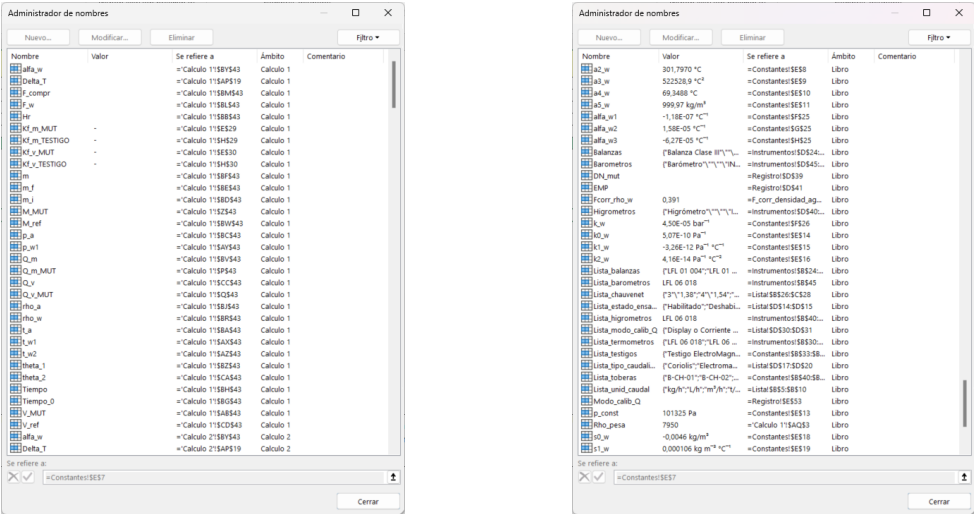
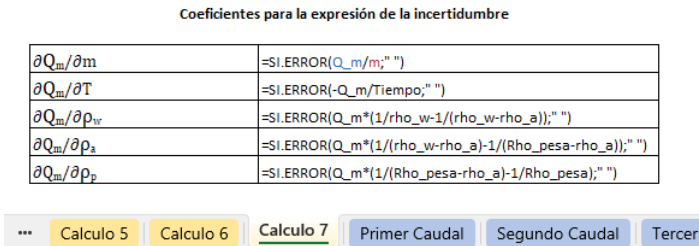


Figura 5.5

Escritura de formulas en la plantilla



lo indicado en su documentación de respaldo. En la figura 5.6 se aprecia la claridad con la que cada variable presenta su respectiva unidad de medida.

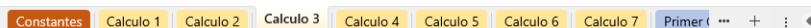
5.2.4 Funcionalidad

Un ejemplo de fncionalidad y capacidad de síntesis y orden en la información tiene que ver con las tablas. Debido a que se trabajan con tablas que agrupan información de cada instrumento y de la caracterización de alguna componente del sistema de pesada estática, y de las cuales se tiene que extraer información para ser sometida a cálculo, se asignó a cada una de ellas un nombre y ambito de uso (local o global). Su facilidad de uso es apreciado en la figura 5.7 donde se hace empleo de la tabla

Figura 5.6

Unidades de medida asociadas a cada cálculo realizado

$\partial Q_v / \partial m$	0,01 m ³ /(h kg)	$\partial Q_v / \partial \theta_1$	0,3 m ³ /h	$\partial \theta_2 / \partial t_{w1}$	2,50E-04 °C ⁻¹
$\partial Q_v / \partial T$	-1,8E+00 m ³ /h ²	$\partial Q_v / \partial \theta_2$	0,3 m ³ /h	$\partial \theta_2 / \partial t_{w2}$	-2,40E-04 °C ⁻¹
$\partial Q_v / \partial \rho_{wv}$	-0,000305 m ³ /(h kg)				
$\partial Q_v / \partial \rho_a$	0,000267 m ³ /(h kg)	$\partial \alpha_{wv} / \partial t_{w1}$	1,04159E-05	$\partial \theta_2 / \partial p_{w1}$	4,50E-05 bar ⁻¹
$\partial Q_v / \partial p_p$	5,6E-09 m ³ /(h kg)				



”Toberas” (ver fig 5.8) la cual agrupa las caracterizaciones realizadas a las 6 toberas que se emplea en el sistema de presión estática.

Se revisó de que cada función empleada en la plantilla sea funcional y acorde a los propósitos del laboratorio. En ese sentido, cada etapa del procesamiento esta bien definida y separada visualmente de las otras etapas. Al realizar la auditoría de formulas se puede apreciar esto.

Figura 5.7

Muestra del empleo de tablas en la plantilla de cálculo

Carácterística de las toberas	
=Constantes!\$R\$39	
=SI.ERROR(INDICE(Toberas;COINCIDIR(K61;Lista_toberas;0);COINCIDIR(\$S\$60;Toberas_caract;0));" ")	
=SI.ERROR(INDICE(Toberas;COINCIDIR(K62;Lista_toberas;0);COINCIDIR(\$S\$60;Toberas_caract;0));" ")	
=SI.ERROR(INDICE(Toberas;COINCIDIR(K63;Lista_toberas;0);COINCIDIR(\$S\$60;Toberas_caract;0));" ")	
=SI.ERROR(INDICE(Toberas;COINCIDIR(K64;Lista_toberas;0);COINCIDIR(\$S\$60;Toberas_caract;0));" ")	
=SI.ERROR(INDICE(Toberas;COINCIDIR(K65;Lista_toberas;0);COINCIDIR(\$S\$60;Toberas_caract;0));" ")	
=SI.ERROR(INDICE(Toberas;COINCIDIR(K66;Lista_toberas;0);COINCIDIR(\$S\$60;Toberas_caract;0));" ")	
=SI.ERROR(INDICE(Toberas;COINCIDIR(K67;Lista_toberas;0);COINCIDIR(\$S\$60;Toberas_caract;0));" ")	



Figura 5.8

Tabla definida bajo el nombre de ”Toberas”

Taberas		fx		LFL08 054															
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T		
Alcance																			
Tiempos Δt del divisor																			
Código	Qm	Qmax	Qa	Δt_a	U(Y) a	Qb	Δt_b	U(Y) b	Qc	Δt_c	U(Y) c	aY			U(Y)				
	Qm	Qmax	Qa	Δt_a	U(Y) a	Qb	Δt_b	U(Y) b	Qc	Δt_c	U(Y) c	a2	a1	a0	a2u	a1u	a0u		
LFL08 054	300L/h	2000L/h	289.55L/h	-91.0ms	115.4ms	85.37L/h	-17.4ms	89.0ms	302.21L/h	-2.1ms	11.8ms	-1.3E-03	1.6E+01	-1.3E+03	6.8E-04	-4.4E-01	1.6E+02		
LFL08 049	300L/h	2000L/h	289.55L/h	-15.0ms	72.4ms	923.36L/h	3.4ms	43.0ms	2041.37L/h	5.7ms	31.8ms	-1.3E-05	4.3E-02	-2.7E+01	8.9E-06	-4.4E-02	8.9E+01		
LFL08 050	2000L/h	9000L/h	2034.45L/h	14.5ms	32.4ms	6186.00L/h	3.3ms	37.8ms	9016.88L/h	4.7ms	27.4ms	4.8E-07	-6.9E-03	2.8E+01	-7.1E-07	7.1E-03	2.1E+01		
LFL08 051	9000L/h	16000L/h	3664.17L/h	2.7ms	44.4ms	12251.67L/h	10.5ms	83.4ms	16311.25L/h	13.5ms	59.4ms	-3.1E-07	2.3E-03	-1.3E+02	-1.1E-05	3.3E-02	-1.1E+02		
LFL08 052	16000L/h	80000L/h	16136.38L/h	-4.3ms	80.4ms	50112.06L/h	-10.0ms	17.6ms	73911.16L/h	-3.7ms	11.4ms	2.8E-05	-3.9E-04	6.8E-01	2.8E-08	-3.8E-03	1.3E+02		
LFL08 053	80000L/h	130000L/h	179960.29L/h	-4.7ms	12.0ms	100947.85L/h	-8.5ms	8.8ms	104893.85L/h	-11.3ms	13.0ms	1.7E-09	-4.3E-04	2.4E+01	7.3E-09	-1.5E-03	8.3E+01		
C.Amb. Lista Impresión Registro Patrones Datos Constantes Cálculo 1 Cálculo 2 Cálculo 3 Cálculo 4 Cálculo 5 ... + - < >																			

5.2.5 Cálculo numérico

En este punto se revisó que cada uno de los datos indicado en tablas coincida exactamente con lo indicado en sus reportes, certificados o informes de calibración asociados. Para poder analizar la coincidencia numérica y robustez de los cálculos, sobre todo para brindar validez a los resultados, se empleó una simulación por el Método de Monte Carlo (ver sección 5.3.5).

5.3 Calibración de medidores de caudal

5.3.1 Calibración en Caudal másico y Masa

Se cuenta con un ítem de calibración que pertenece a un cliente del INACAL, el cual, para propósito de este trabajo, será identificado como caudalímetro N° 1. Las características del instrumento de medición se indican en a tabla 5.8.

Tabla 5.8

Información del caudalímetro N° 1

Característica	Observación
Tipo de caudalímetro	Caudalímetro de efecto coriolis
Intervalo de indicación	De 0 kg/h a 27 200 kg/h
Resolución del indicador	0,0001 kg/h
Marca	Emerson
Modelo del transmisor	2700R12ABASZCS
Modelo del sensor	CMF100M329N2BAS2ZZ
Diámetro nominal (mm)	25
Caudal máximo	6000 kg/h
Frecuencia máxima	5000 Hz
k-factor	3000 pulsos/kg

El medidor de caudal a calibrar, por su tecnología, puede medir caudal másico y la masa, por lo que para el análisis se han realizado mediciones para ambas magnitudes en 3 valores nominales de caudal, con 3 a 4 ensayos o corridas por cada uno de ellos. Por su caudal máximo, este caudalímetro fue calibrado en la Línea N° 1 del banco de medición.

Los resultados se muestran en las tablas 5.9, 5.10 y 5.11. Como muestra del desarrollo del presupuesto

y estimación de incertidumbre de la medición, se tiene la la tabla 5.13 en donde se realizó el análisis para el caudal másico de 4500 kg/h. Adicionalmente, se tiene la tabla 5.14 para la calibración en masa del caudalímetro másico al mismo valor de caudal nominal de 4500 kg/h. En la tabla 5.12 se resume el resultado general de la calibración del caudalímetro N° 1 para los 3 caudales ensayados, en donde se aprecia el valor del caudal de referencia (el caudal real) para cada uno así como los errores porcentuales en caudal y masa con sus respectivas incertidumbres expandidas.

Tabla 5.9

Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 4500 kg/h

Caudal de referencia (kg/h)	Error en el Caudal másico del MUT (%)	Masa de referencia (kg)	Error en Masa del MUT (%)
4532,41	0,021	302,67	0,021
4531,09	0,022	302,55	0,022
4531,50	0,022	302,97	0,022
4531,73	0,024	302,55	0,024

Tabla 5.10

Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 1000 kg/h

Caudal de referencia (kg/h)	Error en el Caudal másico del MUT (%)	Masa de referencia (kg)	Error en Masa del MUT (%)
1018,14	-0,13	101,92	-0,13
1016,29	-0,11	101,78	-0,12
1015,18	-0,10	101,63	-0,10
1014,24	-0,09	101,54	-0,09

Tabla 5.11

Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 300 kg/h

Caudal de referencia (kg/h)	Error en el Caudal másico del MUT (%)	Masa de referencia (kg)	Error en Masa del MUT (%)
303,66	-0,08	50,65	-0,08
303,52	-0,07	50,63	-0,07
303,15	-0,01	50,56	-0,01

Tabla 5.12*Resultado general de la calibración del caudalímetro N° 1*

Caudal de referencia (kg/h)	Error en el Caudal másico del MUT (%)	Incertidumbre expandida (%)	Error en Masa del MUT (%)	Incertidumbre expandida (%)
4531,68	0,02	0,02	0,02	0,02
1015,95	-0,11	0,03	-0,11	0,03
303,44	-0,05	0,06	-0,05	0,06

Tabla 5.13

Presupuesto de incertidumbre del caudalímetro N° 1 en Q_m a 4500 kg/h

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Temperatura del aire							
Resolución del termómetro	0 °C	0,05 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,03 °C	$-3,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-1,1 \times 10^{-7}$
Certificado de calibración del termómetro	22,7 °C	0,22 °C	Normal	2	0,11 °C	$-3,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-4,2 \times 10^{-7}$
Deriva del termómetro	0 °C	0,32 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,18 °C	$-3,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-7,1 \times 10^{-7}$
Cambio temporal durante la medición	0 °C	0,15 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,09 °C	$-3,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-3,4 \times 10^{-7}$
Presión del aire							
Resolución del barómetro	0 hPa	5 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	2,9 Pa	$1,0 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$	$3,0 \times 10^{-8}$
Certificado de calibración del barómetro	22,7 hPa	30 Pa	Normal	2	15,0 Pa	$1,0 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$	$1,6 \times 10^{-7}$
Deriva del barómetro	0 hPa	100 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	57,7 Pa	$1,0 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$	$6,0 \times 10^{-7}$
Cambio temporal	0 hPa	0,0 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0 Pa	$1,0 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$	0,0
Humedad del aire							
Resolución del higrómetro	0 % h.r.	0,1 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,03 % h.r.	$-1,5 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-3,1 \times 10^{-9}$
Certificado de calibración del higrómetro	62,7 % h.r.	1,6 % h.r.	Normal	2	0,80 % h.r.	$-1,5 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-8,5 \times 10^{-8}$
Deriva del higrómetro	0 % h.r.	4,5 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	2,60 % h.r.	$-1,5 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-2,8 \times 10^{-7}$
Cambio temporal	0 % h.r.	0,003 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0017 % h.r.	$-1,5 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-1,9 \times 10^{-10}$
Masa / Balanza							
Resolución de la balanza (sin carga)	0 kg	0,0005 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,000 29 kg	$-0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$-9,5 \times 10^{-7}$

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.13 – Continúa de la página anterior

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Resolución de la balanza (con carga)	0 kg	0,0005 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,000 29 kg	$0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$9,5 \times 10^{-7}$
Masa del líquido con carga m_i	49,58 kg	0,0137 kg	Normal	2	0,006 84 kg	$-0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$-2,3 \times 10^{-5}$
Masa del líquido con carga m_f	351,96 kg	0,0148 kg	Normal	2	0,007 39 kg	$0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$2,4 \times 10^{-5}$
Variabilidades en la medición	0 kg	0,003 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,001 44 kg	$0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$4,8 \times 10^{-6}$
Deriva histórica de la balanza	0 kg	0,007 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,004 07 kg	$0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$1,3 \times 10^{-5}$
Patrón de masa (pesas)							
Densidad de las pesas	7950 kg/m ³	140 kg/m ³	Normal	2	70 kg/m ³	$1,8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	$1,3 \times 10^{-6}$
Temperatura del agua en el recipiente de pesaje							
Resolución del termómetro	0 °C	0,0005 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,000 29 °C	$2,71 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	$7,8 \times 10^{-11}$
Certificado de calibración del termómetro	22,5 °C	0,02 °C	Normal	2	0,011 °C	$2,71 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	$3,0 \times 10^{-9}$
Deriva del termómetro	0 °C	0,01 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,006 °C	$2,71 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	$1,6 \times 10^{-9}$
Gradiente espacial en el recipiente	0 °C	0,50 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,289 °C	$2,71 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	$7,8 \times 10^{-8}$
Diferencia respecto a la temperatura del aire	0 °C	0,12 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,070 °C	$2,71 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	$1,9 \times 10^{-8}$
Medición del tiempo							
Resolución del contador de tiempo	0 h	$1,4 \times 10^{-8} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$8,0 \times 10^{-9} \text{ h}$	$-1,5 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-1,2 \times 10^{-7}$
Certificado de calibración del contador	0,0668 h	$2,8 \times 10^{-8} \text{ h}$	Normal	2	$1,4 \times 10^{-8} \text{ h}$	$-1,5 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-2,1 \times 10^{-7}$
Detector láser	0 h	$2,8 \times 10^{-6} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$1,6 \times 10^{-6} \text{ h}$	$-1,5 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-2,4 \times 10^{-5}$
Deriva del contador	0 h	$2,8 \times 10^{-8} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$1,6 \times 10^{-8} \text{ h}$	$-1,5 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-2,4 \times 10^{-7}$

Tabla 5.13 – Continúa de la página anterior

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Efecto del desviador							
Error de conteo Δt	$1,6 \times 10^{-6} \text{ h}$	$1,1 \times 10^{-5} \text{ h}$	Normal	2	$5,4 \times 10^{-6} \text{ h}$	$-1,5 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-8,0 \times 10^{-5}$
Densidad del agua							
Factor de corrección	$0,39 \text{ kg/m}^3$	$0,05 \text{ kg/m}^3$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$0,029 \text{ kg/m}^3$	$-1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$	$-3,4 \times 10^{-8}$
Densímetro de tipo oscilatorio	$998,05 \text{ kg/m}^3$	$0,05 \text{ kg/m}^3$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$0,029 \text{ kg/m}^3$	$-1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$	$-3,4 \times 10^{-8}$
Medidor de caudal bajo test (MUT)							
Repetibilidad de las lecturas	0 kg/h	0 kg/h	Normal	2	0 kg/h	$2,2 \times 10^{-4} \text{ h/kg}$	0
Resolución del medidor	0 kg/h	$0,009\,98 \text{ kg/h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$0,0058 \text{ kg/h}$	$2,2 \times 10^{-4} \text{ h/kg}$	$1,3 \times 10^{-6}$
Proceso de medición							
Repetibilidad del error de medición	0	$1,02 \times 10^{-5}$	Normal	$\sqrt{4}$	$5,11 \times 10^{-6}$	1	$5,11 \times 10^{-6}$
Error relativo E_{qm} :	0,02 %					$u(E_{qm}) :$	0,000 09
						$U(E_{qm}) :$	0,018 %

Tabla 5.14

Presupuesto de incertidumbre del caudalímetro N° 1 en M a 4500 kg/h

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Temperatura del aire							
Resolución del termómetro	0 °C	0,05 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,03 °C	$-3,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-1,1 \times 10^{-7}$
Certificado de calibración del termómetro	22,7 °C	0,22 °C	Normal	2	0,11 °C	$-3,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-4,2 \times 10^{-7}$
Deriva del termómetro	0 °C	0,32 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,18 °C	$-3,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-7,1 \times 10^{-7}$
Cambio temporal durante la medición	0 °C	0,15 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,09 °C	$-3,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-3,4 \times 10^{-7}$
Presión del aire							
Resolución del barómetro	0 hPa	5 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	2,9 Pa	$1,0 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$	$3,0 \times 10^{-8}$
Certificado de calibración del barómetro	22,7 hPa	30 Pa	Normal	2	15,0 Pa	$1,0 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$	$1,6 \times 10^{-7}$
Deriva del barómetro	0 hPa	100 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	57,7 Pa	$1,0 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$	$6,0 \times 10^{-7}$
Cambio temporal	0 hPa	0,0 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0 Pa	$1,0 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$	0,0
Humedad del aire							
Resolución del higrómetro	0 % h.r.	0,1 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,03 % h.r.	$-1,5 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-3,1 \times 10^{-9}$
Certificado de calibración del higrómetro	62,7 % h.r.	1,6 % h.r.	Normal	2	0,80 % h.r.	$-1,5 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-8,5 \times 10^{-8}$
Deriva del higrómetro	0 % h.r.	4,5 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	2,60 % h.r.	$-1,5 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-2,8 \times 10^{-7}$
Cambio temporal	0 % h.r.	0,003 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0017 % h.r.	$-1,5 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-1,9 \times 10^{-10}$
Masa / Balanza							
Resolución de la balanza (sin carga)	0 kg	0,0005 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,000 29 kg	$-0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$-9,5 \times 10^{-7}$

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.14 – Continúa de la página anterior

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Resolución de la balanza (con carga)	0 kg	0,0005 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,000 29 kg	$0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$9,5 \times 10^{-7}$
Masa del líquido con carga m_i	49,58 kg	0,0137 kg	Normal	2	0,006 84 kg	$-0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$-2,3 \times 10^{-5}$
Masa del líquido con carga m_f	351,96 kg	0,0148 kg	Normal	2	0,007 39 kg	$0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$2,4 \times 10^{-5}$
Variabilidades en la medición	0 kg	0,003 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,001 44 kg	$0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$4,8 \times 10^{-6}$
Deriva histórica de la balanza	0 kg	0,007 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,004 07 kg	$0,0033 \text{ kg}^{-1}$	$1,3 \times 10^{-5}$
Patrón de masa (pesas)							
Densidad de las pesas	7950 kg/m ³	140 kg/m ³	Normal	2	70 kg/m ³	$1,8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	$1,3 \times 10^{-6}$
Temperatura del agua en el recipiente de pesaje							
Resolución del termómetro	0 °C	0,0005 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,000 29 °C	$2,71 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	$7,8 \times 10^{-11}$
Certificado de calibración del termómetro	22,5 °C	0,02 °C	Normal	2	0,011 °C	$2,71 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	$3,0 \times 10^{-9}$
Deriva del termómetro	0 °C	0,01 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,006 °C	$2,71 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	$1,6 \times 10^{-9}$
Gradiente espacial en el recipiente	0 °C	0,50 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,289 °C	$2,71 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	$7,8 \times 10^{-8}$
Diferencia respecto a la temperatura del aire	0 °C	0,12 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,070 °C	$2,71 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	$1,9 \times 10^{-8}$
Medición del tiempo							
Resolución del contador de tiempo	0 h	$1,4 \times 10^{-8} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$8,0 \times 10^{-9} \text{ h}$	$3,7 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$	$3,0 \times 10^{-12}$
Certificado de calibración del contador	0,0668 h	$2,8 \times 10^{-8} \text{ h}$	Normal	2	$1,4 \times 10^{-8} \text{ h}$	$3,7 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$	$5,1 \times 10^{-12}$
Detector láser	0 h	$2,8 \times 10^{-6} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$1,6 \times 10^{-6} \text{ h}$	$3,7 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$	$5,9 \times 10^{-10}$
Deriva del contador	0 h	$2,8 \times 10^{-8} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$1,6 \times 10^{-8} \text{ h}$	$3,7 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$	$5,9 \times 10^{-12}$

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.14 – Continúa de la página anterior

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Efecto del desviador							
Error de conteo Δt	$1,6 \times 10^{-6}$ h	$1,1 \times 10^{-5}$ h	Normal	2	$5,4 \times 10^{-6}$ h	$-1,5 \times 10^1$ h ⁻¹	$-8,0 \times 10^{-5}$
Densidad del agua							
Factor de corrección	0,39 kg/m ³	0,05 kg/m ³	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,029 kg/m ³	$-1,2 \times 10^{-6}$ m ³ /kg	$-3,4 \times 10^{-8}$
Densímetro de tipo oscilatorio	998,05 kg/m ³	0,05 kg/m ³	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,029 kg/m ³	$-1,2 \times 10^{-6}$ m ³ /kg	$-3,4 \times 10^{-8}$
Medidor de caudal bajo test (MUT)							
Resolución del medidor (inicio)	0 kg	0,000 33 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,000 19 kg	$3,3 \times 10^{-3}$ /kg	$6,4 \times 10^{-7}$
Resolución del medidor (final)	0 kg	0,000 33 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,000 19 kg	$3,3 \times 10^{-10}$ /kg	$6,4 \times 10^{-7}$
Proceso de medición							
Repetibilidad del error de medición	0	$1,02 \times 10^{-5}$	Normal	$\sqrt{4}$	$5,11 \times 10^{-6}$	1	$5,11 \times 10^{-6}$
						$u(E_M) :$	0,000 09
Error relativo $E_M :$	0,02 %					$U(E_M) :$	0,018 %

5.3.2 Calibración en Caudal volumétrico y Volumen

Para la determinación del caudal volumétrico y el volumen, se tiene un caudalímetro que pertenece a un cliente del INACAL, el cual, para propósito de este trabajo, será identificado como caudalímetro N° 2. Las características del instrumento de medición se indican en la tabla 5.15.

Tabla 5.15

Información del caudalímetro N° 2

Característica	Observación
Tipo de caudalímetro	Electromagnético
Intervalo de indicación	De 1500 L/h a 100 000 L/h
Resolución del indicador	10 L/h
Marca	Siemens
Modelo del transmisor	SITRANS F M MAGFLO MAG5000
Modelo del sensor	SITRANS F M MAG 5100W
Diámetro nominal (mm)	80
Caudal máximo	100 000 L/h
Frecuencia máxima	5000 Hz
k-factor	180 pulsos/L

El caudalímetro N° 2 puede medir caudal volumétrico y volumen, por lo que para el análisis se han realizado mediciones para ambas magnitudes en 3 valores nominales de caudal, con 3 ensayos o corridas por cada uno de ellos. Este instrumento fue calibrado en la Línea N° 2 del banco de medición. A diferencia del caudalímetro N° 1, el cual fue calibrado enteramente usando la salida de pulsos del instrumento, el caudalímetro N° 2 emplea la salida de corriente para indicar en tiempo real el caudal instantáneo y, la salida de pulsos para contabilizar el volumen.

Los resultados se muestran en las tablas 5.16, 5.17 y 5.18. Como muestra del desarrollo del presupuesto y estimación de incertidumbre de la medición, se tiene la tabla 5.20 en donde se realizó el análisis para el caudal másico de 90 000 L/h. Adicionalmente, se tiene la tabla 5.21 para la calibración en volumen del caudalímetro volumétrico al mismo valor de caudal nominal de 90 000 L/h.

En la tabla 5.19 se resume el resultado general de la calibración del caudalímetro N° 2 para los 3 caudales ensayados, en donde se aprecia el valor del caudal de referencia (el caudal real) para cada uno así como los errores en caudal y volumen con sus respectivas incertidumbres expandidas.

Tabla 5.16*Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 90 000 L/h*

Caudal de referencia (L/h)	Tamaño de muestra en caudal	Error en el Caudal volumétrico del MUT (%)	Volumen de referencia (L)	Error en Volumen del MUT (%)
90 317,3	19	-0,79	1721,63	-0,77
90 307,9	19	-0,69	1708,92	-0,68
90 344,0	15	-0,70	1743,62	-0,71

Tabla 5.17*Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 25 000 L/h*

Caudal de referencia (L/h)	Tamaño de muestra en caudal	Error en el Caudal volumétrico del MUT (%)	Volumen de referencia (L)	Error en Volumen del MUT (%)
25 177,8	39	-0,80	1677,9	-0,81
25 186,8	37	-0,82	1535,8	-0,82
25 182,9	37	-0,85	1583,7	-0,83

Tabla 5.18*Resultado de ensayos en la calibración en el caudal de 15 000 L/h*

Caudal de referencia (L/h)	Tamaño de muestra en caudal	Error en el Caudal volumétrico del MUT (%)	Volumen de referencia (L)	Error en Volumen del MUT (%)
15 216,4	61	-0,79	1721,63	-0,86
15 218,7	61	-0,81	1708,92	-0,82
15 224,4	51	-0,80	1743,62	-0,85

Tabla 5.19*Resultado general de la calibración del caudalímetro N° 2*

Caudal de referencia (L/h)	Error en el Caudal volumétrico del MUT (%)	Incertidumbre expandida (%)	Error en volumen del MUT (%)	Incertidumbre expandida (%)
90 323,1	-0,73	0,27	-0,72	0,07
25 182,5	-0,82	0,33	-0,82	0,05
15 219,8	-0,80	0,98	-0,84	0,06

Tabla 5.20

Presupuesto de incertidumbre del caudalímetro N° 2 en Q_v a 90 000 L/h

Magnitud X_i	Estimado x_i	Mitad del ancho de distribución a	Distribución de probabilidad $P(x_i)$	Divisor k	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficiente de sensibilidad c_i	Contribución a la incertidumbre $u(y_i)$
Temperatura del aire							
Resolución del termómetro	0 °C	0,05 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,03 °C	$-3,7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-1,1 \times 10^{-7}$
Certificado de calibración del termómetro	25,5 °C	0,22 °C	Normal	2	0,11 °C	$-3,7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-4,1 \times 10^{-7}$
Deriva del termómetro	0 °C	0,32 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,18 °C	$-3,7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-6,9 \times 10^{-7}$
Cambio temporal durante la medición	0 °C	0,25 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,14 °C	$-3,7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-5,4 \times 10^{-7}$
Presión del aire							
Resolución del barómetro	0 hPa	5,0 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	2,9 Pa	$9,6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$2,8 \times 10^{-8}$
Certificado de calibración del barómetro	990,1 hPa	30,0 Pa	Normal	2	15,0 Pa	$9,6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$1,4 \times 10^{-7}$
Deriva del barómetro	0 hPa	100,0 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	57,7 Pa	$9,6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$5,5 \times 10^{-7}$
Cambio temporal	0 hPa	34,7 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	20,0 Pa	$9,6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$1,9 \times 10^{-7}$
Humedad del aire							
Resolución del higrómetro	0 % h.r.	0,1 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,03 % h.r.	$-1,2 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-3,5 \times 10^{-9}$
Certificado de calibración del higrómetro	58,5 % h.r.	1,6 % h.r.	Normal	2	0,80 % h.r.	$-1,2 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-9,8 \times 10^{-8}$
Deriva del higrómetro	0 % h.r.	4,5 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	2,60 % h.r.	$-1,2 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-3,2 \times 10^{-7}$
Cambio temporal	0 % h.r.	0,1 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,04 % h.r.	$-1,2 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-5,4 \times 10^{-9}$
Masa / Balanza							
Resolución de la balanza (sin carga)	0 kg	0,05 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,029 kg	$-5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$-1,7 \times 10^{-5}$

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.20 – Continúa de la página anterior

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Resolución de la balanza (con carga)	0 kg	0,05 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,029 kg	$5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-5}$
Masa del líquido con carga m_i	179,6 kg	0,21 kg	Normal	2	0,11 kg	$-5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$-6,1 \times 10^{-5}$
Masa del líquido con carga m_f	1897,7 kg	0,44 kg	Normal	2	0,22 kg	$-5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$-1,3 \times 10^{-4}$
Variabilidades en la medición	0 kg	0,05 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,03 kg	$5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-5}$
Deriva histórica de la balanza	0 kg	0,40 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,23 kg	$5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$1,3 \times 10^{-4}$
Patrón de masa (pesas)							
Densidad de las pesas	7100 kg/m ³	600 kg/m ³	Normal	2	300 kg/m ³	$2,3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	$6,8 \times 10^{-6}$
Temperatura del agua en el recipiente de pesaje							
Resolución del termómetro	0 °C	0,001 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0003 °C	$-2,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-8,5 \times 10^{-10}$
Certificado de calibración del termómetro	26,0 °C	0,02 °C	Normal	2	0,011 °C	$-2,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-3,2 \times 10^{-8}$
Deriva del termómetro	0 °C	0,01 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0058 °C	$-2,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-1,7 \times 10^{-8}$
Gradiente espacial en el recipiente	0 °C	0,5 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,29 °C	$-2,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-8,5 \times 10^{-7}$
Diferencia respecto a la temperatura del aire	0 °C	0,24 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,14 °C	$-2,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-4,2 \times 10^{-7}$
Medición del tiempo							
Resolución del contador de tiempo	0 h	$1,4 \times 10^{-8} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$8,0 \times 10^{-9} \text{ h}$	$-5,2 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-4,2 \times 10^{-7}$
Certificado de calibración del contador	0,0191 h	$2,8 \times 10^{-8} \text{ h}$	Normal	2	$1,4 \times 10^{-8} \text{ h}$	$-5,2 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-7,2 \times 10^{-7}$
Detector láser	0 h	$2,8 \times 10^{-6} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$1,6 \times 10^{-6} \text{ h}$	$-5,2 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-8,3 \times 10^{-5}$
Deriva del contador	0 h	$2,8 \times 10^{-8} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$1,6 \times 10^{-8} \text{ h}$	$-5,2 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-8,3 \times 10^{-7}$

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.20 – Continúa de la página anterior

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Efecto del desviador							
Error de conteo Δt	$-1,88 \times 10^{-6} \text{ h}$	$2,7 \times 10^{-6} \text{ h}$	Normal	2	$1,34 \times 10^{-6} \text{ h}$	$-5,2 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-7,0 \times 10^{-5}$
Densidad del agua							
Factor de corrección	0,39 kg/m ³	0,05 kg/m ³	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,029 kg/m ³	$-1,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$	$-3,3 \times 10^{-5}$
Densímetro de tipo oscilatorio	997,2 kg/m ³	0,05 kg/m ³	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,029 kg/m ³	$-1,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$	$-3,3 \times 10^{-5}$
Temperatura del agua en la tubería							
Resolución del termómetro	0 °C	0,005 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0029 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$7,7 \times 10^{-7}$
Certificado de calibración del termómetro	26,0 °C	0,02 °C	Normal	2	0,010 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$2,7 \times 10^{-6}$
Deriva del termómetro	0 °C	0,06 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,034 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$9,1 \times 10^{-6}$
Cambio temporal durante la medición	0 °C	0,28 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,16 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$4,3 \times 10^{-5}$
Gradiente espacial	0 °C	0,01 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,006 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$1,6 \times 10^{-6}$
Diferencia respecto a la temperatura del aire	0 °C	0,25 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,15 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$3,9 \times 10^{-5}$
Presión de entrada en la tubería							
Resolución del manómetro	0 bar	0,005 bar	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0029 bar	$4,47 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	$1,3 \times 10^{-7}$
Certificado de calibración del manómetro	1,74 bar	0,010 bar	Normal	2	0,0050 bar	$4,47 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	$2,2 \times 10^{-7}$
Deriva del manómetro	0 bar	0,060 bar	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,035 bar	$4,47 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	$1,5 \times 10^{-6}$
Cambio temporal	0 bar	0,013 bar	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0075 bar	$4,47 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	$3,3 \times 10^{-7}$
Gradiente espacial	0 bar	0,065 bar	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,037 bar	$4,47 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-6}$

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.20 – Continúa de la página anterior

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Medidor de caudal bajo test (MUT)							
Repetibilidad de las lecturas	0 m ³ /h	0,23 m ³ /h	Normal	2	0,12 m ³ /h	$1,1 \times 10^{-2}$ h/m ³	$1,3 \times 10^{-3}$
Resolución del medidor	0 m ³ /h	0,005 m ³ /h	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0029 m ³ /h	$1,1 \times 10^{-2}$ h/m ³	$3,2 \times 10^{-5}$
Proceso de medición							
Repetibilidad del error de medición	0	0,000 53	Normal	2	0,000 31	1	$3,1 \times 10^{-4}$
						$u(E_{qv}) :$	0,0013
Error relativo E_{qv} :						$U(E_{qv}) :$	0,27 %

Tabla 5.21

Presupuesto de incertidumbre del caudalímetro N° 2 en V a 90 000 L/h

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Temperatura del aire							
Resolución del termómetro	0 °C	0,05 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,03 °C	$-3,7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-1,1 \times 10^{-7}$
Certificado de calibración del termómetro	25,5 °C	0,22 °C	Normal	2	0,11 °C	$-3,7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-4,1 \times 10^{-7}$
Deriva del termómetro	0 °C	0,32 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,18 °C	$-3,7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-6,9 \times 10^{-7}$
Cambio temporal durante la medición	0 °C	0,25 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,14 °C	$-3,7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-5,4 \times 10^{-7}$
Presión del aire							
Resolución del barómetro	0 hPa	5,0 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	2,9 Pa	$9,6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$2,8 \times 10^{-8}$
Certificado de calibración del barómetro	990,1 hPa	30,0 Pa	Normal	2	15,0 Pa	$9,6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$1,4 \times 10^{-7}$
Deriva del barómetro	0 hPa	100,0 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	57,7 Pa	$9,6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$5,5 \times 10^{-7}$
Cambio temporal	0 hPa	34,7 Pa	Rectangular	$\sqrt{3}$	20,0 Pa	$9,6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$1,9 \times 10^{-7}$
Humedad del aire							
Resolución del higrómetro	0 % h.r.	0,1 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,03 % h.r.	$-1,2 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-3,5 \times 10^{-9}$
Certificado de calibración del higrómetro	58,5 % h.r.	1,6 % h.r.	Normal	2	0,80 % h.r.	$-1,2 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-9,8 \times 10^{-8}$
Deriva del higrómetro	0 % h.r.	4,5 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	2,60 % h.r.	$-1,2 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-3,2 \times 10^{-7}$
Cambio temporal	0 % h.r.	0,1 % h.r.	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,04 % h.r.	$-1,2 \times 10^{-7} / \% \text{ h.r.}$	$-5,4 \times 10^{-9}$
Masa / Balanza							
Resolución de la balanza (sin carga)	0 kg	0,05 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,029 kg	$-5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$-1,7 \times 10^{-5}$

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.21 – Continúa de la página anterior

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Resolución de la balanza (con carga)	0 kg	0,05 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,029 kg	$5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-5}$
Masa del líquido con carga m_i	179,6 kg	0,21 kg	Normal	2	0,11 kg	$-5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$-6,1 \times 10^{-5}$
Masa del líquido con carga m_f	1897,7 kg	0,44 kg	Normal	2	0,22 kg	$-5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$-1,3 \times 10^{-4}$
Variabilidades en la medición	0 kg	0,05 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,03 kg	$5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-5}$
Deriva histórica de la balanza	0 kg	0,40 kg	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,23 kg	$5,8 \times 10^{-4} \text{ kg}^{-1}$	$1,3 \times 10^{-4}$
Patrón de masa (pesas)							
Densidad de las pesas	7100 kg/m ³	600 kg/m ³	Normal	2	300 kg/m ³	$2,3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$	$6,8 \times 10^{-6}$
Temperatura del agua en el recipiente de pesaje							
Resolución del termómetro	0 °C	0,001 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0003 °C	$-2,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-8,5 \times 10^{-10}$
Certificado de calibración del termómetro	26,0 °C	0,02 °C	Normal	2	0,011 °C	$-2,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-3,2 \times 10^{-8}$
Deriva del termómetro	0 °C	0,01 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0058 °C	$-2,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-1,7 \times 10^{-8}$
Gradiente espacial en el recipiente	0 °C	0,5 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,29 °C	$-2,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-8,5 \times 10^{-7}$
Diferencia respecto a la temperatura del aire	0 °C	0,24 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,14 °C	$-2,9 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	$-4,2 \times 10^{-7}$
Medición del tiempo							
Resolución del contador de tiempo	0 h	$1,4 \times 10^{-8} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$8,0 \times 10^{-9} \text{ h}$	$-5,1 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$	$-4,1 \times 10^{-11}$
Certificado de calibración del contador	0,0191 h	$2,8 \times 10^{-8} \text{ h}$	Normal	2	$1,4 \times 10^{-8} \text{ h}$	$-5,1 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$	$-7,1 \times 10^{-11}$
Detector láser	0 h	$2,8 \times 10^{-6} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$1,6 \times 10^{-6} \text{ h}$	$-5,1 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$	$-8,2 \times 10^{-9}$
Deriva del contador	0 h	$2,8 \times 10^{-8} \text{ h}$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$1,6 \times 10^{-8} \text{ h}$	$-5,1 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$	$-8,2 \times 10^{-11}$

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.21 – Continúa de la página anterior

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Efecto del desviador							
Error de conteo Δt	$-1,88 \times 10^{-6} \text{ h}$	$2,7 \times 10^{-6} \text{ h}$	Normal	2	$1,34 \times 10^{-6} \text{ h}$	$-5,2 \times 10^1 \text{ h}^{-1}$	$-7,0 \times 10^{-5}$
Densidad del agua							
Factor de corrección	0,39 kg/m ³	0,05 kg/m ³	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,029 kg/m ³	$-1,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$	$-2,9 \times 10^{-5}$
Densímetro de tipo oscilatorio	997,2 kg/m ³	0,05 kg/m ³	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,029 kg/m ³	$-1,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$	$-2,9 \times 10^{-5}$
Temperatura del agua en la tubería							
Resolución del termómetro	0 °C	0,005 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0029 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$7,7 \times 10^{-7}$
Certificado de calibración del termómetro	26,0 °C	0,02 °C	Normal	2	0,010 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$2,7 \times 10^{-6}$
Deriva del termómetro	0 °C	0,06 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,034 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$9,1 \times 10^{-6}$
Cambio temporal durante la medición	0 °C	0,28 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,16 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$4,3 \times 10^{-5}$
Gradiente espacial	0 °C	0,01 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,006 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$1,6 \times 10^{-6}$
Diferencia respecto a la temperatura del aire	0 °C	0,25 °C	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,15 °C	$2,68 \times 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$	$3,9 \times 10^{-5}$
Presión de entrada en la tubería							
Resolución del manómetro	0 bar	0,005 bar	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0029 bar	$4,47 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	$1,3 \times 10^{-7}$
Certificado de calibración del manómetro	1,74 bar	0,010 bar	Normal	2	0,0050 bar	$4,47 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	$2,2 \times 10^{-7}$
Deriva del manómetro	0 bar	0,060 bar	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,035 bar	$4,47 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	$1,5 \times 10^{-6}$
Cambio temporal	0 bar	0,013 bar	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,0075 bar	$4,47 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	$3,3 \times 10^{-7}$
Gradiente espacial	0 bar	0,065 bar	Rectangular	$\sqrt{3}$	0,037 bar	$4,47 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	$1,7 \times 10^{-6}$

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.21 – Continúa de la página anterior

Magnitud	Estimado	Mitad del ancho de distribución	Distribución de probabilidad	Divisor	Incertidumbre estándar	Coefficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre
X_i	x_i	a	$P(x_i)$	k	$u(x_i)$	c_i	$u(y_i)$
Medidor de caudal bajo test (MUT)							
Resolución del medidor (inicio)	0 m ³	$5,6 \times 10^{-6}$ m ³	Rectangular	$\sqrt{3}$	$3,2 \times 10^{-6}$ m ³	$5,8 \times 10^{-1}$ /m ³	$1,9 \times 10^{-6}$
Resolución del medidor (final)	0 m ³	$5,6 \times 10^{-6}$ m ³	Rectangular	$\sqrt{3}$	$3,2 \times 10^{-6}$ m ³	$5,8 \times 10^{-1}$ /m ³	$1,9 \times 10^{-6}$
Proceso de medición							
Repetibilidad del error de medición	0	0,000 45	Normal	2	0,000 26	1	$2,6 \times 10^{-4}$
						$u(E_v) :$	0,000 34
Error relativo $E_v :$	-0,72 %					$U(E_v) :$	0,069 %

5.3.3 Mecanismos aplicados para el aseguramiento de la validez de los resultados

5.3.3.1 Detección de valores atípicos. En esta sección se muestra la aplicación del Criterio de Chauvenet (ver sección 2.5.2) a un conjunto de mediciones para la calibración del medidor de caudal N° 1, en sus 3 caudales calibrados. De acuerdo con la tabla 5.22, 5.23 y 5.24 se aprecia que no se han detectado valores atípicos, por lo que ninguna de las mediciones es descartada. Situación similar sucede con el Caudalímetro N°2.

Tabla 5.22

Detección de valores atípicos para 4500 kg/h, donde Ratio = 1.54

Caudal de referencia (kg/h)	Error en el Caudal másico del MUT (%)	$ (X_i - \bar{X}) / s_X $	¿Es valor atípico?
4532,41	0,021	1,07	No
4531,09	0,022	0,03	No
4531,50	0,022	0,24	No
4531,73	0,024	1,34	No

Tabla 5.23

Detección de valores atípicos para 1000 kg/h, donde Ratio = 1.54

Caudal de referencia (kg/h)	Error en el Caudal másico del MUT (%)	$ (X_i - \bar{X}) / s_X $	¿Es valor atípico?
1018,14	-0,13	1,34	No
1016,29	-0,11	0,12	No
1015,18	-0,10	0,48	No
1014,24	-0,09	0,98	No

Tabla 5.24

Detección de valores atípicos para 300 kg/h, donde Ratio = 1.38

Caudal de referencia (kg/h)	Error en el Caudal másico del MUT (%)	$ (X_i - \bar{X}) / s_X $	¿Es valor atípico?
303,66	-0,08	0,72	No
303,52	-0,07	0,42	No
303,15	-0,01	1,14	No

5.3.3.2 Empleo de medidores de caudal testigos. Como parte de un mecanismo de aseguramiento de la validez de los resultados, en la calibración de los caudalímetros N° 1 y N° 2 se contaron con dos medidores testigo (mencionados en la sección 3.2.7).

El medidor testigo LFL 03 010 fue empleado en la calibración del caudalímetro N° 1 y sus resultados se muestran en la tabla 5.25. El medidor testigo LFL 03 004 fue empleado en la calibración del caudalímetro N° 2 y sus resultados se muestran en la tabla 5.26.

En cada tabla se puede apreciar que para cada testigo que se compararon sus errores e incertidumbres determinadas en la calibración del MUT con el error indicado en su respectivo certificado de calibración y su respectiva incertidumbre (producto de un análisis histórico).

El error normalizado E_n obtenido para cada testigo es menor a 1, lo que indica que cada medidor testigo aún se comportan dentro de lo esperado, es decir, el sistema de medición se mantiene estable y por ende, asegura que las mediciones realizadas durante la calibración del MUT sean válidas.

Tabla 5.25

Resultados del medidor testigo LFL 03 010

Caudal de referencia (kg/h)	Error en el ensayo (%)	Incertidumbre asociada (%)	Error según certificado (%)	Incertidumbre del testigo (%)	E_n
4531,68	0,02	0,11	-0,10	0,86	0,1
1015,95	-0,06	0,17	-0,02	0,87	0,0
303,44	-0,01	0,28	-0,06	0,90	0,1

Tabla 5.26

Resultados del medidor testigo LFL 03 004

Caudal de referencia (kg/h)	Error en el ensayo (%)	Incertidumbre asociada (%)	Error según certificado (%)	Incertidumbre del testigo (%)	E_n
90 323,1	-0,02	0,08	-0,06	0,13	0,2
25 182,5	-0,07	0,08	-0,07	0,13	0,0
15 219,8	-0,11	0,08	-0,10	0,13	0,1

5.3.4 Análisis de las contribuciones a la incertidumbre

En la calibración del caudalímetro N° 1 se determinó el porcentaje de influencia por magnitud en la incertidumbre para los caudales calibrados, para el error en la magnitud de caudal másico (tabla 5.27) y la de masa (tabla 5.28).

Las magnitudes de influencia más significativas o de mayor contribución a la incertidumbre en la calibración de caudal másico son las relacionadas con la masa /balanza, la medición del tiempo, el efecto del desviador y el proceso de medición (la repetibilidad de la medición) (ver figura 5.9) .

En la medición de tiempo, se observa que su contribución decrece con el caudal básicamente por que su coeficiente de sensibilidad es inversamente proporcional al tiempo de medición y porque en el ensayo los tiempos medidos en caudales bajos fueron mayores que para los caudales altos. Comportamiento similar se observa en el efecto del desviador de manera amplificada porque que la incertidumbre asociada al Δt del desviador es mayor que al asociado a la medición del tiempo.

Tabla 5.27

Aporte a la incertidumbre en la calibración en Q_m del caudalímetro N° 1

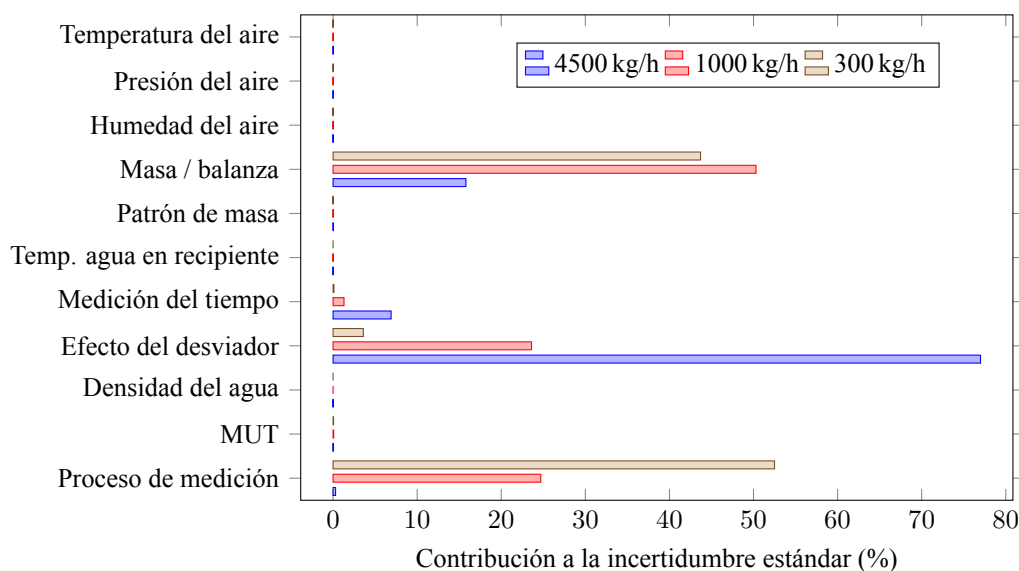
Magnitud	Contribución a la incertidumbre por caudal (%)		
	4500 kg/h	1000 kg/h	300 kg/h
Temperatura del aire	0,010	0,0046	0,0007
Presión del aire	$4,6 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	4×10^{-4}
Humedad del aire	$1,0 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$7,5 \times 10^{-5}$
Masa / balanza	15,8	50,3	43,7
Patrón de masa (pesas)	0,020	0,008	0,0017
Temperatura del agua en el recipiente de pesaje	$7,8 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-5}$	$8,3 \times 10^{-6}$
Medición del tiempo	6,9	1,3	0,1
Efecto del desviador	77,0	23,6	3,6
Densidad del agua	$2,7 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-6}$
Medidor de caudal bajo test (MUT)	0,019	0,07	0,06
Proceso de medición (repetibilidad)	0,3	24,7	52,5

En el proceso de medición, se aprecia que su contribución disminuye conforme aumenta el caudal, esto se debe a que la variabilidad de los errores obtenidos se comportaron de esa misma manera. La diferencia de proporción en la contribución entre estas 3 variabilidades afecta la relación entre las

contribuciones tanto en la medición del tiempo como en el efecto del desviador y la masa.

Figura 5.9

Componentes de incertidumbre en la calibración en Q_m del caudalímetro N° 1



En el análisis de las contribuciones a la incertidumbre en el error de la Masa de la tabla 5.28, las magnitudes y comportamientos de las magnitudes de influencia son similares a los del caudal másico a excepción de la medición del tiempo (ver figura 5.10) cuyo efecto se reduce dramáticamente debido a que solo se evalúa masa recolectada.

En la calibración del caudalímetro N° 2 se determinó el porcentaje correspondiente a cada magnitud de influencia en la incertidumbre para cada uno de los caudales calibrados, tanto para el error en la magnitud de caudal volumétrico (tabla 5.29) y la de masa (tabla 5.30).

La principal y predominante contribución a la incertidumbre en el error de caudal volumétrico en los 3 caudales evaluados corresponde al propio medidor de caudal bajo ensayo MUT (ver figura 5.11), esto se explica por el hecho de que la medición de caudal del MUT es realizada tomando sus lecturas instantáneas de caudal (a diferencia del caudalímetro N° 1 que solo fue calibrado por conteo de pulsos y que por lo tanto no se podía mostrar variabilidad de lecturas de caudal en tiempo real), por lo que sus variabilidad fue predominante sobre las demás contribuciones.

Tabla 5.28*Aporte a la incertidumbre en la calibración en M del caudalímetro N° 1*

Magnitud	Contribución a la incertidumbre por caudal (%)		
	4500 kg/h	1000 kg/h	300 kg/h
Temperatura del aire	0,010	0,0047	0,0007
Presión del aire	$4,9 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	4×10^{-4}
Humedad del aire	$1,1 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-4}$	$7,5 \times 10^{-5}$
Masa / balanza	16,9	51,0	43,8
Patrón de masa (pesas)	0,021	0,009	0,0017
Temperatura del agua en el recipiente de pesaje	$8,4 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-5}$	$8,4 \times 10^{-6}$
Medición del tiempo	$4,5 \times 10^{-9}$	$9,1 \times 10^{-11}$	$6,7 \times 10^{-13}$
Efecto del desviador	82,7	23,9	3,6
Densidad del agua	$2,9 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-6}$
Medidor de caudal bajo test (MUT)	0,010	0,036	0,029
Proceso de medición (repetibilidad)	0,3	25,0	52,5

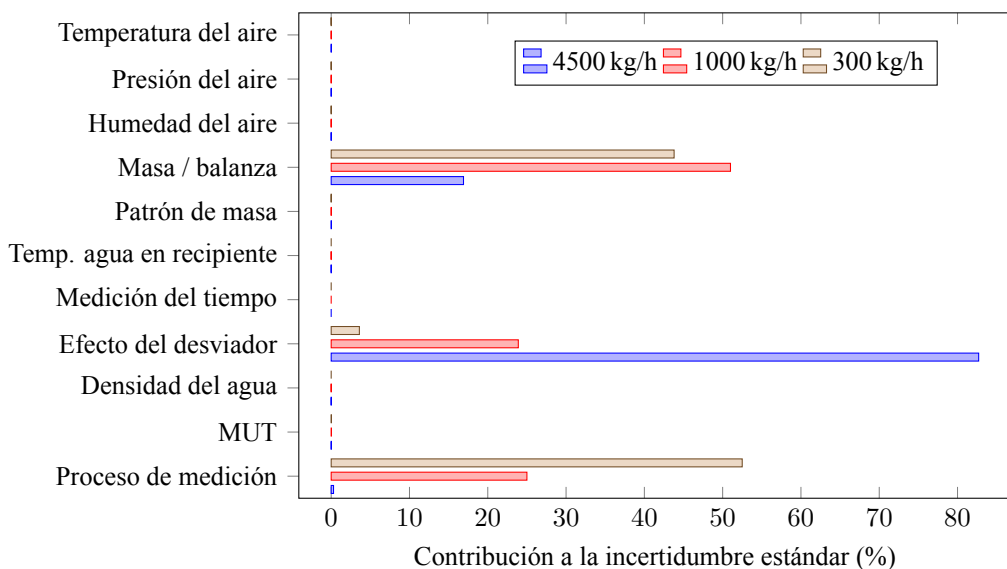
Figura 5.10*Componentes de incertidumbre en la calibración en M del caudalímetro N° 1*

Tabla 5.29*Aporte a la incertidumbre en la calibración en Q_v del caudalímetro N° 2*

Magnitud	Contribución a la incertidumbre por caudal (%)		
	90 000 L/h	25 000 L/h	15 000 L/h
Temperatura del aire	$5,2 \times 10^{-5}$	$3,2 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-6}$
Presión del aire	$2,0 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-6}$
Humedad del aire	$6,1 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-6}$	$4,6 \times 10^{-7}$
Masa / balanza	2,13	1,62	0,21
Patrón de masa (pesas)	0,0025	0,0017	0,000 19
Temperatura del agua en el recipiente de pesaje	5×10^{-5}	$4,1 \times 10^{-5}$	$5,7 \times 10^{-6}$
Medición del tiempo	0,39	0,024	0,0011
Efecto del desviador	0,27	0,60	0,057
Densidad del agua	0,12	0,08	0,009
Temperatura en la tubería	0,19	0,11	0,025
Presión en la tubería	3×10^{-4}	$9,3 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5}$
Medidor de caudal bajo test (MUT)	91,68	96,81	99,68
Proceso de medición (repetibilidad)	5,22	0,75	0,02

Por otro lado, cuando se analiza solamente las contribuciones a la incertidumbre en el error de volumen (ver 5.12), el efecto de predominancia del MUT desaparece ya que la medición del volumen es por medio del conteo de pulsos y su incertidumbre es muy pequeña.

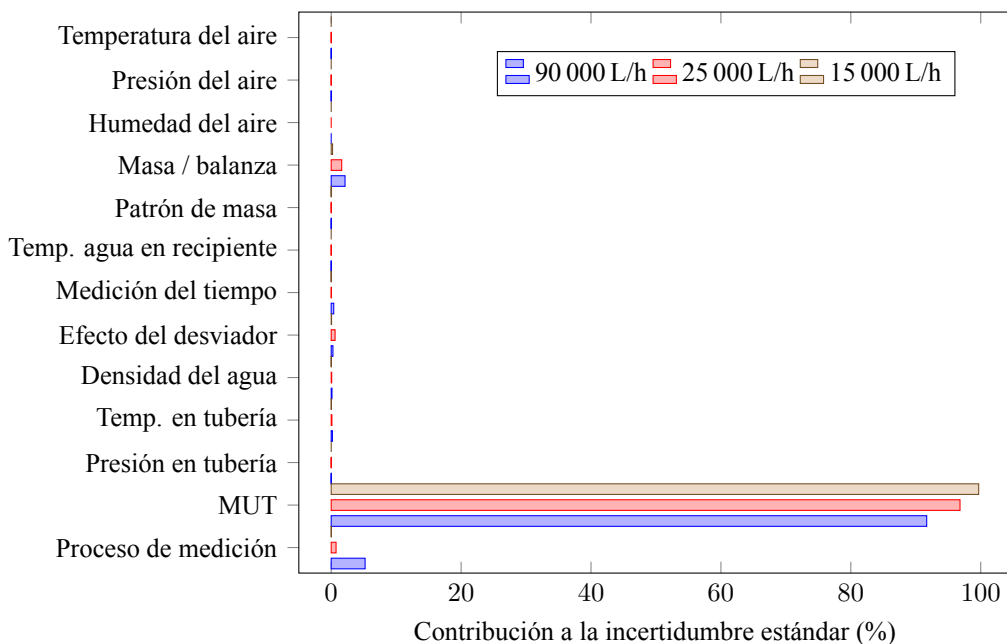
La gran contribución porcentual de la masa se respalda por el hecho de que su coeficiente de sensibilidad esté entre los de mayor peso, eso con el valor de incertidumbre de la balanza en valores altos.

El efecto del desviador adquiere una mayor notoriedad, debido a que su error implica un error en la masa y esto afecta directamente el volumen.

Al hablarse de Volumen, la cual se obtiene a través de la densidad del agua y estando relacionada con la temperatura en la tubería, explican su notoriedad, aunque en menor grado, en el presupuesto de incertidumbre.

Figura 5.11

Componentes de incertidumbre en la calibración en Q_v del caudalímetro N° 2

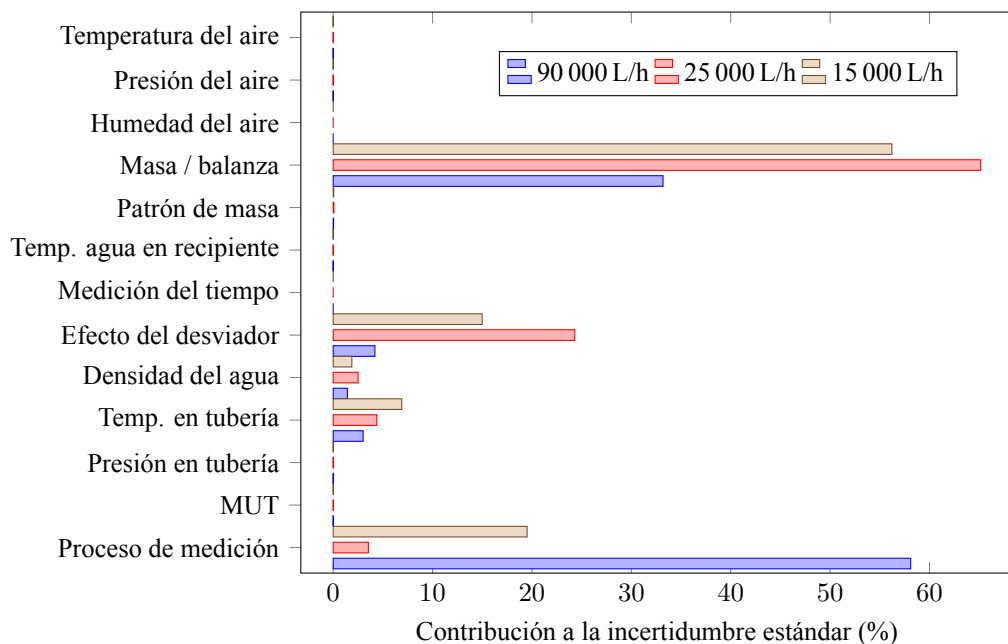
**Tabla 5.30**

Aporte a la incertidumbre en la calibración en V del caudalímetro N° 2

Magnitud	Contribución a la incertidumbre por caudal (%)		
	90 000 L/h	25 000 L/h	15 000 L/h
Temperatura del aire	$8,1 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$7,5 \times 10^{-4}$
Presión del aire	$3,1 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-4}$
Humedad del aire	$6,1 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-6}$	$4,6 \times 10^{-7}$
Masa / balanza	32,19	65,15	56,22
Patrón de masa (pesas)	0,040	0,069	0,052
Temperatura del agua en el recipiente de pesaje	$7,8 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$
Medición del tiempo	$5,8 \times 10^{-8}$	$7,5 \times 10^{-10}$	$3,7 \times 10^{-11}$
Efecto del desviador	4,20	24,31	15,42
Densidad del agua	1,43	2,51	1,88
Temperatura en la tubería	3,01	4,39	6,90
Presión en la tubería	$4,6 \times 10^{-3}$	$3,7 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-3}$
Medidor de caudal bajo test (MUT)	0,006	0,012	0,010
Proceso de medición (repetibilidad)	58,11	3,54	19,51

Figura 5.12

Componentes de incertidumbre en la calibración en V del caudalímetro N° 2



5.3.5 Validación empleando el Método de Monte Carlo

Como método de validación de resultados adicional a lo mencionado en el presente trabajo, se hace el uso del Método de Monte Carlo para la expresión de la Incertidumbre (JCGM, 2008a).

Este tipo de determinación de incertidumbre es alternativo al método estándar, además brinda la facilidad de poder realizar simulaciones con grandes tamaños de muestra cuando se tienen definidas las funciones de distribución de las variables involucradas. En esta etapa se muestra la simulación realizada para el caudal Q_v de 90 000 L/h del caudalímetro N° 2. Las figuras 5.13, 5.14 y 5.15 presentan los histogramas obtenidos con tamaños de muestra de 100, 10 mil y un millón de valores respectivamente y en ellos se puede ver su convergencia hacia los valores de error e incertidumbre calculados mediante el método estándar de estimación de incertidumbre, conforme se incrementa el número de muestras, llegando a generar un error normalizado de $E_n = 0,008$ y con $p - value = 1$, suficiente para aceptar una hipótesis nula H_0 , según la prueba de Shapiro-Wilk (con un nivel de significancia de 0,05) de que la variable generada tiene distribución normal. El código empleado para la ejecución de las simulaciones está indicado en detalle en el Anexo 5.

Tabla 5.31*Simulación por MMC para el caudalímetro N° 2 en Q_v a 90 000 L/h*

Magnitud	Valores obtenidos en n muestras						
	$n=3$	$n=10$	$n=100$	$n=1000$	$n=10\,000$	$n=100\,000$	$n=1\,000\,000$
T_a (°C)	25,35	25,41	25,441	25,476	25,475	25,477	25,478
p_a (Pa)	98 976,716	99 021,911	99 030,464	99 010,763	99 013,475	99 014,286	99 014,013
h_r (%)	57,487	59,796	58,496	58,444	58,575	58,525	58,53
m (kg)	1718,113	1718,117	1718,117	1718,117	1718,117	1718,117	1718,117
ρ_b (kg/m ³)	7315,831	6926,844	7130,399	7102,977	7101,673	7099,604	7100,088
T_{w2} (°C)	26,083	25,953	25,997	25,964	25,968	25,965	25,966
Δt (h)	$-2,39 \times 10^{-6}$	$-2,29 \times 10^{-6}$	$-1,84 \times 10^{-6}$	$-1,87 \times 10^{-6}$	$-1,89 \times 10^{-6}$	$-1,88 \times 10^{-6}$	$-1,88 \times 10^{-6}$
t' (h)	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
ρ_w (kg/m ³)	997,162	997,164	997,168	997,182	997,181	997,181	997,181
T_{w1} (°C)	26,004	25,935	25,964	25,989	25,987	25,987	25,987
p_{w1} (bar)	1,701	1,728	1,744	1,743	1,742	1,743	1,743
ρ_a (kg/m ³)	1,147	1,147	1,147	1,147	1,147	1,147	1,147
Q_{v_MUT} (m ³ /h)	89,635	89,635	89,651	89,67	89,667	89,667	89,667
Q_v (m ³ /h)	90,321	90,327	90,323	90,323	90,323	90,323	90,323
E_{qv} (%)	-0,759	-0,766	-0,744	-0,723	-0,727	-0,726	-0,727
U (%)	0,096	0,195	0,245	0,251	0,262	0,258	0,259

Figura 5.13

Histograma de la Simulación por el MMC con $n = 100$

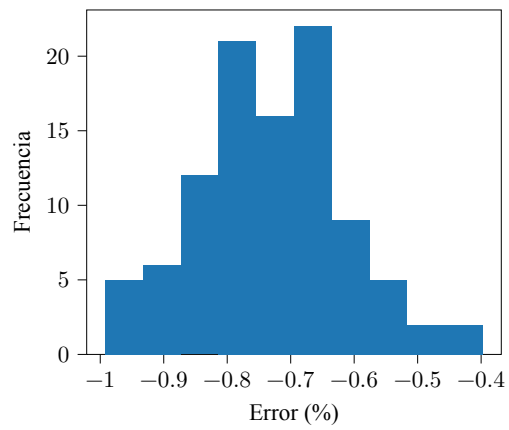


Figura 5.14

Histograma de la Simulación por el MMC con $n = 10\,000$

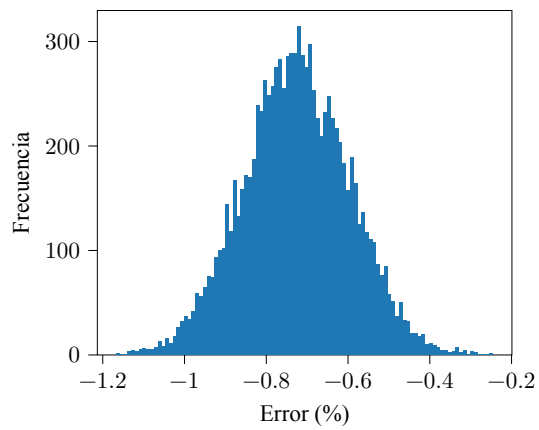
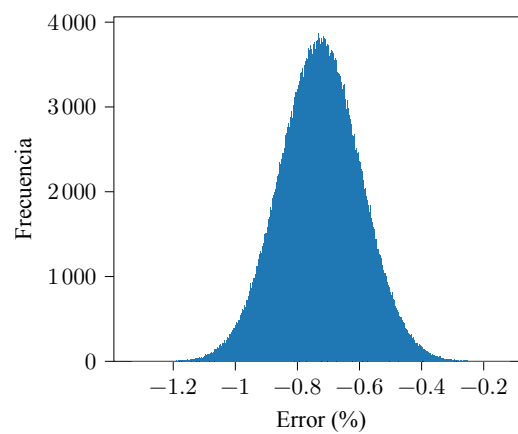


Figura 5.15

Histograma de la Simulación por el MMC con $n = 1\,000\,000$



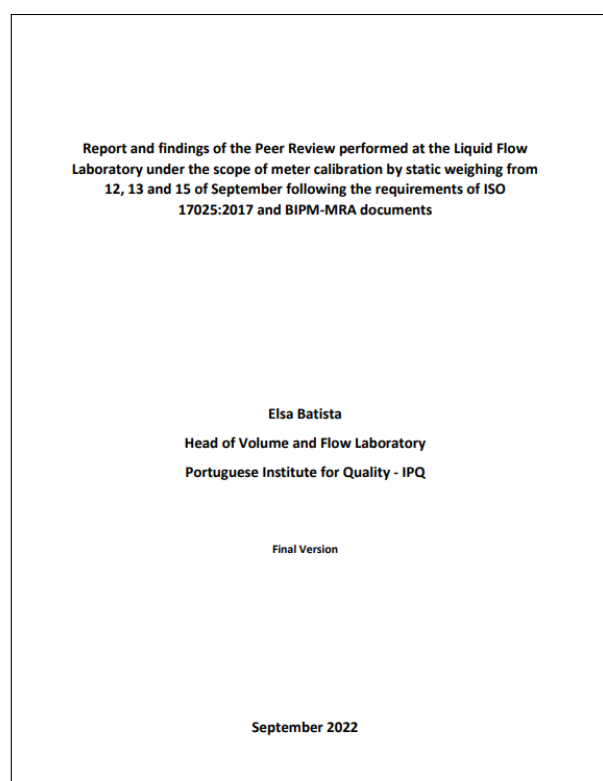
5.4 Evaluación para el Quality System Task Force - SIM

Para la ejecución de una Peer Review, el LFL eligió a la Dra. Elsa Batista debido a su conocimiento y experiencia en el campo de la medición de volumen y flujo de líquidos. Además de ser Directora del laboratorio de Volumen y Flujo del Instituto Português da Qualidade – IPQ⁹, ha sido también presidenta del Comité Técnico de Flujo (TC-F) del EURAMET¹⁰ de la cual ha coordinado 17 proyectos¹¹ y es miembro de la Red Europea de Metrología para Gases de Energía y Manufactura Avanzada.

Durante la Peer Review realizada por la experta técnica Elsa Batista, se emitió un reporte, cuya hoja de presentación se muestra en la Figura 5.16

Figura 5.16

Portada del informe del Peer Review realizado al LFL-INACAL en el año 2022



⁹El cual es el Instituto Nacional de Metrología de Portugal

¹⁰Acrónimo de European Association of National Metrology Institutes

¹¹<https://www.euramet.org/contact-search/detail/person/elsa-batista>

En el comentario final del reporte se destacó la capacidad técnica del laboratorio:

“It was verified that the personnel of the LFL had the necessary competence to perform calibrations in liquid flow. The laboratories had the necessary conditions, facilities, methods, traceability and equipment to develop the work according to the evaluated procedures. The uncertainty calculation, reporting of results and method validation was correctly performed and all data records were available, but some were incomplete. In general, all requirements of ISO 17025:2017 were compiled but there were some non-conformities and recommendations identified ...”

Al respecto, se identificaron cinco no conformidades de las cuales una comprende al área que maneja la gestión de calidad de la Dirección de Metrología, tres están referidas a actualización de registros y una de carácter técnico que ya fue levantada mediante documentación.

Adicionalmente, en el reporte se destacó el conocimiento del personal:

“During this peer review all the interview staff cooperated in a very friendly way with the accessor. The LFL team is very organized and had excellent knowledge of the flow calibration techniques. The quality staff also presented very good knowledge of all ISO requirements and are motivated to improve the quality system. The traceability of all equipment was assured by INACAL calibration laboratories.”

En las conclusiones se destaca el cumplimiento de la norma ISO 17025:2017:

“INACAL Liquid flow laboratory fulfils all the requirements to submit a new CMCs for calibration of liquid meters under static weighing method from 10 t/h to 130 t/h, since it had a good performance in BIPM comparison SIM.M.FF-S9 and the quality system follows ISO 17025:2017.”

Luego del Peer Review y revisión de la documentación por parte del QSTF, el Sistema Interamericano de Metrología (SIM) emitió el Certificado de Aprobación al Laboratorio de Flujo de Líquidos (ver figura 5.17), el cual tiene una vigencia desde Noviembre de 2022 a Noviembre de 2027.

Figura 5.17

Certificado de aprobación otorgado por el SIM al LFL-INACAL



Conclusiones

Se estableció un marco metodológico para la realización de las comprobaciones intermedias de los instrumentos de medición involucrados en la calibración de medidores de flujo. Ello brinda mayor libertad para el monitoreo del buen desempeño metrológico de un instrumento con los propios patrones del laboratorio, sin tener que recurrir a un proveedor externo.

El conocimiento exacto y preciso de la densidad del agua por parte del laboratorio demostró tener un papel fundamental en la definición de caudal volumétrico y volumen en flujo, reflejado en su aporte a la incertidumbre, lo cual brinda a los usuarios que dependen de estas magnitudes una mejor confianza en sus mediciones.

A pesar de contar con la restricción en el conocimiento de la curva de histeris del mecanismo del desviador sistema de pesada estática, su efecto en la medición del tiempo pudo ser caracterizado mediante su error e incertidumbre, para luego determinar que tiene un impacto significativo en las calibraciones de caudalímetros del tipo másico y volumétrico.

Se logró establecer un modelo matemático detallado, adecuado a las condiciones del laboratorio, que contempla la determinación de errores e incertidumbre en la calibración de caudalímetros mediante el método de pesada estática, basado en el enfoque estándar indicado por la GUM del BIPM, para las magnitudes de caudal másico, caudal volumétrico, la masa y el volumen en flujo, permitiendo un análisis detallado de los grados de impacto o influencia de las magnitudes involucradas. Esto genera un punto de partida para establecer mejoras en puntos clave como el mecanismo del desviador, el sistema de medición de masa y/o en el propio proceso de medición, entre otros.

Se diseñó una plantilla de servicio, la cual es organizada y trazable completamente al modelo matemático, brindando robustez y confianza en los servicios de calibración. La implementación del

Método de Monte Carlo para la propagación de la incertidumbre como método alternativo para la verificación del modelo propuesto fue fundamental en su validación numérica, esto soportado por las nuevas plataformas y procesamiento en la nube que permiten un ahorro significativo de recursos y tiempo. Adicionalmente, se documentó el mecanismo de aseguramiento de la validez de los resultados empleados por el laboratorio y se demostró su utilidad en servicio al emplear medidores de caudal testigos.

El conocimiento detallado del fenómeno a medir (para brindar un servicio de calibración) y de su organizada implementación, basado en un enfoque de sistema de gestión con un estándar de referencia, realza y mejora la capacidad del INACAL para brindar confianza a la industria y a la sociedad. Toda esta labor fue reconocida mediante el QSTF del BIPM.

Recomendaciones

El modelo presentado puede ser implementado para diferentes intervalos de medición no contemplados en el presente trabajo, es decir, desde la calibración de medidores de microcaudales tales como bombas de infusión, así como a grandes caudales con medidores de diámetros nominales mayores a 200 mm.

El apostar por una trazabilidad directa a unas masas de referencia en laboratorio, en lugar de una balanza, en conjunto con un sistema de desviación de error cero mejora significativamente las incertidumbres de calibración en este tipo de instrumentos. Se tendría que realizar un balance de costo beneficio debido a la gran inversión que esta representa.

Referencias bibliográficas

- Baker, R. C. (2000). *Flow measurement handbook: Industrial designs, operating principles, performance, and applications*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511471100>
- Batista, E., & Paton, R. (2018). The selection of water property formulae for volume and flow calibration and measurement. *Metrologia*, 55(5), 731. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aadbdc>
- CCM Working Group on Fluid Flow - BIPM. (2014). *Review Protocol for Fluid Flow Calibration and Measurement Capabilities (CMCs) Draft B* (tech. rep.). <https://www.bipm.org/documents/20126/44756334/ccm-wgff-protocol.pdf/3e80d2a2-ccf8-5b57-a86b-b13f543860e3>
- Coleman, H., & Steele, W. (2009). *Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470485682>
- European Association of National Metrology Institutes. (2015). *Calibration Guide No. 18 - Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments*. Version 4.0. https://www.euramet.org/Media/docs/Publications/calguides/I-CAL-GUI-018_Calibration_Guide_No._18_web.pdf
- European Association of National Metrology Institutes. (2024). *Calibration Guide No. 21 - guidelines on the calibration of standard capacity measures using the volumetric method*. Version 3.0. <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines>
- Frahm, E., Arias, R., Maldonado, M., Vargas, J., Mendoza, J. J., Arredondo, A., & Silvosa, M. A. (2024). Supplementary comparison SIM.M.FF-S9.2016 for water flow measurement. *Metrologia*, 61(1A), 07001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/61/1A/07001>
- Hayward, A. (1979). *Flowmeters: A basic guide and source-book for users*. Macmillan Education UK. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-03379-9>
- Hughes, I., & Hase, T. (2010). *Measurements and their uncertainties: A practical guide to modern error analysis*. Oxford University Press.

- International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission (IEC). (2017). *ISO/IEC 17025:2017 - General requirements for the competence of testing and calibration laboratories* (3rd, tech. rep.). <https://www.iso.org/standard/66912.html>
- International Organization of Legal Metrology. (2004). *Recommendation R111-1: Weights of Classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3 - Part 1: Metrological and Technical Requirements* (2004(E)).
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 10790:2015 - Measurement of Fluid flow in closed conduits — guidance to the selection, installation and use of coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements)* (3rd ed., tech. rep.). <https://www.iso.org/standard/57407.html>
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 20456:2017 - Measurement of Fluid flow in closed conduits — guidance for the use of electromagnetic flowmeters for conductive liquids* (1st ed., tech. rep.). <https://www.iso.org/standard/68092.html>
- International Organization for Standardization. (1991). *ISO 4006:1991 - Measurement of Fluid flow in closed conduits — vocabulary and symbols* (2nd ed., tech. rep.). <https://www.iso.org/standard/9681.html>
- International Organization for Standardization. (1980). *ISO 4185:1980 - Measurement of liquid flow in closed conduits — Weighing method* (1st ed., tech. rep.). <https://www.iso.org/standard/9959.html>
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2008a). *Evaluation of Measurement Data — Supplement 1 to the “Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement” — Propagation of Distributions using a Monte Carlo Method* [JCGM 101:2008]. <https://doi.org/10.59161/JCGM101-2008>
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2008b). *Evaluation of Measurement Data: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (1st ed.) [JCGM 100:2008]. <https://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2008c). *International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)* (3rd ed.). https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf/f0e1ad45-d337-bbeb-53a6-15fe649d0ff1
- Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1987). *Fluid Mechanics: Volume 6 (Course of Theoretical Physics)* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

- Shinder, I. I., & Marfenko, I. V. (2006). *NIST measurement services: NIST calibration services for water flowmeters water flow calibration facility*. Special Publication (NIST SP). <https://doi.org/10.6028/nist.sp.250-73>
- Tanaka, M., Girard, G., Davis, R., Peuto, A., & Bignell, N. (2001). Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports. *Metrologia*, 38(4), 301. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/38/4/3>
- Yoder, J. (2023). *Conventional Flowmeters: Volume II* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003130024>

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Modelo matemático del caudal másico	1
Anexo 2: Modelo matemático de la densidad del agua y la densidad del aire	10
Anexo 3: Comprobaciones intermedias de los instrumentos de la línea de medición	14
Anexo 4: Informe de comparación internacional SIM.M.FF-S9.2016	23
Anexo 5: Código Python para la Simulación de la calibración por el Método de Monte Carlo	28

Anexo 1. Modelo matemático del caudal másico

A continuación se presentan el modelo de conservación del caudal másico y la deducción de la misma mediante la medición de la masa empleando un sistema de pesaje (balanza) con las correcciones respectivas.

1.1 Determinación de la fórmula del caudal másico

La descripción matemática del estado de movimiento de un fluido es efectuado por medio de las funciones las cuales dan la distribución de velocidad de un fluido $\vec{v}$ y cualquiera de las dos magnitudes pertenecientes al fluido, es decir, la densidad ρ o la presión p .

Para la determinación de la ecuación de la continuidad que indica la conservación de la masa, consideramos un volumen de espacio V_o (también llamado volumen de control), la masa de fluido en este volumen es $\int \rho dV$, donde ρ es la densidad del fluido y la integración es realizada sobre el volumen V_o . La masa de fluido que fluye por unidad de tiempo a través de un elemento $d\vec{f}$ de superficie que envuelve a este volumen es $\rho\vec{v} \cdot d\vec{f}$, donde la magnitud de $d\vec{f}$ es igual al área de elemento de superficie y su dirección es normal a esta. Aquí se observa que $\rho\vec{v} \cdot d\vec{f}$ tendrá un valor positivo cuando el fluido fluya afuera del volumen y negativo si fluye hacia dentro del volumen (Landau and Lifshitz, 1987).

La masa total de fluido que fluye fuera del volumen V_o por unidad de tiempo es

$$\oint \rho\vec{v} \cdot d\vec{f}$$

En esta ecuación, la integración es realizada sobre el total de la superficie cerrada que rodea al volumen en cuestión.

A continuación, el decremento por unidad de tiempo de la masa de fluido en el volumen V_o puede ser escrito como

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV$$

Igualando las dos expresiones tenemos

$$-\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{f} = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV$$

Cuando existen entradas y salidas definidas adecuadamente, como en el caso de una línea de tubería sólida y fija del sistema de pesada estática, se tiene

$$Q_{mE} - Q_{mS} = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV,$$

donde Q_{mE} corresponde al caudal másico en la entrada de la tubería del volumen de control V_o y Q_{mS} es el caudal en la salida de dicho volumen, es decir, punto de salida de la tubería.

El término de la derecha indica la razón de cambio en masa dentro del volumen de control V_o . En el caso del sistema de pesada estática, este volumen está definido por la sección de tubería o línea de instalación entre el medidor de caudal bajo prueba (MUT) y la salida al divisor.

Teniendo en cuenta que para el volumen de control, la línea de tubería tiene un máximo de 10 m de longitud, un diámetro de 1" y la variación temporal de la temperatura del fluido puede llegar a 0,5 °C durante el tiempo de medición, produce como resultado que la razón de cambio de masa en este volumen de control tenga un valor relativo entre el 0,0001% y el 0,002%. Por lo que, para propósitos del procedimiento de calibración, en términos prácticos, tenemos:

$$Q_{mE} = Q_{mS}$$

1.2 Determinación de la masa

Todo objeto, en estado de reposo, experimenta una fuerza debida a la gravedad y adicionalmente, una fuerza de empuje, debido a que está inmerso en un medio que es el aire, esta diferencia produce lo que se llama la masa aparente del objeto

Empleando esta premisa, se realizará la deducción de la fórmula de la masa asociada a un

fluido, en este caso, el agua.

Se tiene una masa de agua, de masa m_w , de volumen V_w y densidad ρ_w , inmerso en un ambiente de densidad del aire ρ_a . La fuerza resultante, F_R , que experimenta esta masa de agua es la diferencia entre la fuerza debida a la gravedad g y el empuje del aire, es decir

$$F_R = m_w \cdot g - \rho_a \cdot V_w \cdot g$$

Imaginemos que existe una pesa de masa m_b , de volumen V_b y de densidad ρ_b , inmerso en el mismo ambiente de densidad ρ_a y que produce exactamente la misma fuerza resultante F_R , entonces tenemos

$$F_R = m_b \cdot g - \rho_a \cdot V_b \cdot g$$

Empleando ambas relaciones y eliminando el valor de g , resulta en lo siguiente

$$m_w - \rho_a \cdot V_w = m_b - \rho_a \cdot V_b$$

Teniendo en cuenta que $V_w = m_w / \rho_w$ y que $V_b = m_b / \rho_b$, tenemos

$$m_w \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}\right) = m_b \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_b}\right)$$

Reordenando, obtenemos la fórmula para la masa del agua:

$$m_w = m_b \cdot \frac{\rho_w (\rho_b - \rho_a)}{\rho_b (\rho_w - \rho_a)} \quad (1.1)$$

Se observa que la masa real del agua, m_w esta en funcion de su densidad, la densidad de las pesas, la densidad del aire y de la masa real de la pesa (o conjunto de pesas).

La masa m_b debe ser entendida como el valor real correspondiente a la lectura que reporta una balanza cuando se coloca esta pesa en su platillo.

El caudal másico Q_m es estimado como la masa m_w que pasa durante un tiempo t' , con lo que obtenemos la siguiente fórmula matemática:

$$Q_m = \frac{m}{t'} \cdot \frac{\rho_w(\rho_b - \rho_a)}{\rho_b(\rho_w - \rho_a)} \quad (1.2)$$

1.3 Derivadas parciales de las magnitudes de medición

En esta sección se desarrolla el cálculo de las derivadas parciales necesarias para determinar los coeficientes de sensibilidad indicados en el capítulo IV

1.3.1 Derivadas parciales en caudal másico

Las derivadas parciales obtenidas para Q_m con respecto a cada variable son desarrolladas desde la ecuación 1.3 hasta la ecuación 1.11

$$\frac{\partial Q_m}{\partial m} = \frac{\partial Q_m}{\partial m_f} = -\frac{\partial Q_m}{\partial m_i} = \frac{Q_m}{m} \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t'} = \frac{\partial Q_m}{\partial t} = \frac{\partial Q_m}{\partial \Delta t} = -\frac{Q_m}{t'} \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial \rho_w} = Q_m \left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial T_{w2}} = \frac{\partial Q_m}{\partial \rho_w} \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} = Q_m \left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial \rho_a} = Q_m \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial T_a} = \frac{\partial Q_m}{\partial \rho_a} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} = Q_m \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial h_r} = \frac{\partial Q_m}{\partial \rho_a} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} = Q_m \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dQ_m}{dp_a} &= \frac{\partial Q_m}{\partial \rho_w} \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} + \frac{\partial Q_m}{\partial \rho_a} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} \\
&= Q_m \left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} + Q_m \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial p_a}
\end{aligned} \tag{1.10}$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial \rho_b} = Q_m \left(\frac{1}{\rho_b - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b} \right) \tag{1.11}$$

Las derivadas parciales para las variables $\rho_w(T_{w2}, p_a)$ y $\rho_a(T_a, h_r, p_a)$ son desarrolladas en el Anexo 2.1.

1.3.2 Derivadas parciales en la masa

Las derivadas parciales obtenidas para M con respecto a cada variable son desarrolladas desde la ecuación 1.12 hasta la ecuación 1.21.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\Delta t \cdot \frac{\partial Q_m}{\partial t'} \tag{1.12}$$

$$\frac{\partial M}{\partial \Delta t} = t \cdot \frac{\partial Q_m}{\partial t'} \tag{1.13}$$

$$\frac{\partial M}{\partial m} = \frac{\partial M}{\partial m_f} = -\frac{\partial M}{\partial m_i} = t \cdot \frac{\partial Q_m}{\partial m} \tag{1.14}$$

$$\frac{\partial M}{\partial \rho_w} = t \cdot \frac{\partial Q_m}{\partial \rho_w} \tag{1.15}$$

$$\frac{\partial M}{\partial T_{w2}} = t \cdot \frac{\partial Q_m}{\partial T_{w2}} \tag{1.16}$$

$$\frac{\partial M}{\partial \rho_a} = t \cdot \frac{\partial Q_m}{\partial \rho_a} \quad (1.17)$$

$$\frac{\partial M}{\partial T_a} = t \cdot \frac{\partial Q_m}{\partial T_a} \quad (1.18)$$

$$\frac{\partial M}{\partial h_r} = t \cdot \frac{\partial Q_m}{\partial h_r} \quad (1.19)$$

$$\frac{dM}{dp_a} = t \cdot \frac{dQ_m}{dp_a} \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \rho_b} = t \cdot \frac{\partial Q_m}{\partial \rho_b} \quad (1.21)$$

1.3.3 Derivadas parciales en caudal volumétrico

Las derivadas parciales obtenidas para Q_v con respecto a cada variable son desarrolladas desde la ecuación 1.22 hasta la ecuación 1.33.

A continuación se muestran las derivadas parciales calculadas:

$$\frac{\partial Q_v}{\partial m} = \frac{\partial Q_v}{\partial m_f} = -\frac{\partial Q_v}{\partial m_i} = \frac{Q_v}{m} \quad (1.22)$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t'} = \frac{\partial Q_v}{\partial t} = \frac{\partial Q_v}{\partial \Delta t} = -\frac{Q_v}{t'} \quad (1.23)$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \theta_1} = \frac{Q_v}{\theta_1} \quad (1.24)$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \theta_2} = \frac{Q_v}{\theta_2} \quad (1.25)$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \rho_w} = -Q_v \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \quad (1.26)$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \rho_a} = Q_v \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial \rho_b} = Q_v \left(\frac{1}{\rho_b - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b} \right) \quad (1.28)$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial T_{w1}} = \frac{\partial Q_v}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w1}} = \frac{Q_v}{\theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w1}} \quad (1.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{dQ_v}{dT_{w2}} &= \frac{\partial Q_v}{\partial \rho_w} \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} + \frac{\partial Q_v}{\partial \theta_1} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w2}} \\ &= -Q_v \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} + \frac{Q_v}{\theta_1} \frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w2}} \\ &= Q_v \left[\frac{1}{\theta_1} \frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w2}} - \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial T_{w2}} \right] \end{aligned} \quad (1.30)$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial T_a} = \frac{\partial Q_v}{\partial \rho_a} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} = Q_v \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} \quad (1.31)$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial h_r} = \frac{\partial Q_v}{\partial \rho_a} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} = Q_v \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} \quad (1.32)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dQ_v}{dp_a} &= \frac{\partial Q_v}{\partial \rho_w} \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} + \frac{\partial Q_v}{\partial \rho_a} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} \\
&= -Q_v \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} + Q_v \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} - \frac{1}{\rho_b - \rho_a} \right) \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial p_a}
\end{aligned} \tag{1.33}$$

Las derivadas parciales para θ_1 y θ_2 son calculadas usando (2.5) y son las siguientes:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w1}} &= \alpha_w + (T_{w1} - T_{w2}) \frac{\partial \alpha_w}{\partial T_{w1}} \\
\frac{\partial \theta_1}{\partial T_{w2}} &= -\alpha_w \\
\frac{\partial \theta_2}{\partial p_{w1}} &= -\kappa_w
\end{aligned} \tag{1.34}$$

Las derivadas parciales para las variables $\rho_w(T_{w2}, p_a)$ y $\rho_a(T_a, h_r, p_a)$ son desarrolladas en el Anexo 2.1.

1.3.4 Derivadas parciales en volumen

Las derivadas parciales obtenidas para V con respecto a cada variable son desarrolladas desde la ecuación 1.35 hasta la ecuación 1.48.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\Delta t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial t'} \tag{1.35}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \Delta t} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial t'} \tag{1.36}$$

$$\frac{\partial V}{\partial m} = \frac{\partial V}{\partial m_f} = -\frac{\partial V}{\partial m_i} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial m} \tag{1.37}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \theta_1} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial \theta_1} \tag{1.38}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \theta_2} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial \theta_2} \quad (1.39)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho_w} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial \rho_w} \quad (1.40)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho_a} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial \rho_a} \quad (1.41)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho_b} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial \rho_b} \quad (1.42)$$

$$\frac{dV}{dT_{w2}} = t \cdot \frac{dQ_v}{dT_{w2}} \quad (1.43)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T_{w1}} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial T_{w1}} \quad (1.44)$$

$$\frac{\partial V}{\partial p_{w1}} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial p_{w1}} \quad (1.45)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T_a} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial T_a} \quad (1.46)$$

$$\frac{\partial V}{\partial h_r} = t \cdot \frac{\partial Q_v}{\partial h_r} \quad (1.47)$$

$$\frac{dV}{dp_a} = t \cdot \frac{dQ_v}{dp_a} \quad (1.48)$$

Anexo 2. Modelo matemático de la densidad del agua y la densidad del aire

2.1 Densidad del agua

El líquido empleado en el método de pesada estática es agua potable, y para determinar su densidad se ha empleado una aproximación, es decir, usando la Fórmula de Densidad del CIPM (Tanaka et al., 2001) más un factor de corrección (una constante) ξ (estimada de manera empírica por el Laboratorio de Flujo de Líquidos de Inacal). La determinación de la densidad del agua ρ_w es expresada como una función de su temperatura T_a y de la presión atmosférica p_a :

$$\rho_w = (F_w + F_{ad}) \times F_{comp} + \xi + \delta\rho_w \quad (2.1)$$

donde la fórmula base F_w está expresada por:

$$F_w = a_{5w} \left[1 - \frac{(T_w + a_{1w})^2 (T_w + a_{2w})}{a_{3w} (T_w + a_{4w})} \right] \quad (2.2)$$

$$a_{1w} = 3,983\,035\,^{\circ}\text{C}$$

$$a_{2w} = 301,797\,^{\circ}\text{C}$$

$$a_{3w} = 522\,528,9\,^{\circ}\text{C}^2$$

$$a_{4w} = 69,348\,81\,^{\circ}\text{C}$$

$$a_{5w} = 999,972\,\text{kg m}^{-3}$$

T_w : es el valor de la temperatura del agua, en $^{\circ}\text{C}$, en el cual $15\,^{\circ}\text{C} \leq T_w \leq 30\,^{\circ}\text{C}$

ξ : factor de corrección aplicado a la fórmula del CIPM para obtener el valor de la densidad del agua potable empleada en el sistema. Su valor aproximado es de $0,38 \text{ kg m}^{-3}$ y con un semi ancho de distribución rectangular de $0,05 \text{ kg m}^{-3}$. Su conductividad es de $510 \mu\text{S cm}^{-1} \pm 20 \mu\text{S cm}^{-1}$

$\delta\rho_w$: es el mensurando que indica la diferencia de la densidad del Material de Referencia Certificado (MRC) de agua respecto a la fórmula de densidad del agua a emplear. Su esperanza matemática es cero, pero tiene un semi ancho de distribución rectangular de $0,05 \text{ kg m}^{-3}$

El factor de corrección por aire disuelto F_{ad} se obtiene de

$$F_{ad} = s_0 + s_1 T_w$$

donde

$$s_0 = -4,912 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-3}$$

$$s_1 = 0,106 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

El factor de compresibilidad F_{comp} , a una presión del aire p_a y temperatura del agua T_w , se establece como

$$F_{\text{comp}} = [1 + (k_0 + k_1 T_w + k_2 T_w^2) (p_a - p_{std})] \quad (2.3)$$

donde

$$p_{std} = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$k_0 = 50,74 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$$

$$k_1 = -0,326 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$k_2 = 0,004\,16 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Considerando que el factor de corrección por aire disuelto no afecta significativamente su densidad para los propósitos del procedimiento de calibración debido a que el agua se encuentra

almacenada y en reposo en una gran cisterna (reservorio), la ecuación de densidad del agua será simplificada a:

$$\rho_w = F_w \times F_{comp} + \xi + \delta\rho_w \quad (2.4)$$

Las derivadas parciales para la densidad del agua, obtenidas de las ecuaciones (2.2), (2.3) y (2.4) son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_w}{\partial T_w} = & F_{comp} \cdot \left(\frac{-a_{5w}}{a_{3w}} \right) \left\{ \frac{2(T_w + a_{1w})(T_w + a_{2w})}{T_w + a_{4w}} \right. \\ & \left. + (T_w + a_{1w})^2 \cdot \left[\frac{1}{T_w + a_{4w}} - \frac{T_w + a_{2w}}{(T_w + a_{4w})^2} \right] \right\} \\ & + F_w \cdot (k_1 + 2k_2 T_w)(p_a - p_{std}) \\ \frac{\partial \rho_w}{\partial p_a} = & (k_0 + k_1 T_w + k_2 T_w^2) \cdot F_w \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.2 Densidad del aire

Según la Recomendación R111-1 (OIML, 2004) se puede estimar la densidad del aire ρ_a con una fórmula simplificada en su versión exponencial y cuya incertidumbre servirá para los propósitos del procedimiento de calibración indicados en este trabajo.

$$\rho_a = \frac{0,34848 \times 10^{-2} p_a - 0,009 h_r \cdot \exp(0,061 T_a)}{273,15 + T_a} \quad (2.6)$$

donde

p_a : es la presión atmosférica, en Pa

h_r : es la humedad relativa, expresada de manera porcentual

T_a : es la temperatura del aire, en °C

La fórmula ofrece una buena exactitud para el siguiente rango de valores:

$$600\text{hPa} \leq p_a \leq 1100\text{hPa}$$

$$20\% \leq h_a \leq 80\%$$

$$15^\circ\text{C} \leq T_a \leq 30^\circ\text{C}$$

Las derivadas parciales para la densidad del aire, respecto a la presión p_a , temperatura T_a y humedad relativa h_r , obtenidas de la ecuación (2.6)son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho_a}{\partial p_a} &= \frac{0,34848 \times 10^{-2}}{273,15 + T_a} \\ \frac{\partial \rho_a}{\partial T_a} &= \frac{-\rho_a - 5,49 \times 10^{-4} \cdot h_r \cdot \exp(0,061T_a)}{273,15 + T_a} \\ \frac{\partial \rho_a}{\partial h_r} &= \frac{-0,009 \cdot \exp(0,061T_a)}{273,15 + T_a}\end{aligned}\tag{2.7}$$

Anexo 3. Comprobaciones intermedias de los instrumentos de la línea de medición

3.1 Condiciones generales

Se tienen las siguientes condiciones:

- El proceso de comprobación intermedia de un instrumento de medición es realizado por lo menos una vez dentro del periodo de tiempo comprendido entre dos calibraciones consecutivas.
- Para cada tipo de instrumento o grupo de instrumentos se tiene un criterio específico y cuantitativo de comprobación intermedia.
- En todos los casos, luego de la comprobación intermedia, no se realizará ningún ajuste al instrumento de medición.
- Aunque en algunos casos se aplique la metodología de medición de un procedimiento de calibración, una comprobación intermedia no es una calibración.
- En caso se use en los cálculos la deriva asociada a un instrumento, está deberá estar basada en al menos tres últimos certificados de calibración. En caso un instrumento solo tenga dos certificados de calibración, se empleará la deriva obtenida de estos dos documentos.

3.2 Comprobación intermedia de balanzas

3.2.1 Requisitos

- Para la comprobación intermedia de balanzas Clase II o Clase III se utilizarán pesas calibradas de la clase de exactitud M_2 .

- Revisar que las incertidumbres expandidas de las pesas sean menores que las de la balanza a verificar, según el valor de indicación de esta.
- La comprobación consistirá en realizar un ensayo de pesaje ascendente en el rango de un 30 % y 80 % de la capacidad máxima de la balanza.
- Considerar el tiempo mínimo de aclimatación de la balanza de 30 min, salvo su manual u otra especificación indique otro valor.
- Considera el tiempo de aclimatación mínimo de las pesas a emplear.
- Se deben tomar las lecturas de la balanza cuando estas se ha estabilizado por completo.

3.2.2 *Proceso de comprobación intermedia*

- Liberar la balanza de cualquier carga. El platillo o plataforma debe encontrarse vacía.
- Agregar la carga hasta un valor del 30 % de la capacidad máxima de la balanza. Anotar la lectura y condiciones ambientales.
- Añadir carga hasta alcanzar un valor entre el 60 % y el 80 % de la capacidad máxima de la balanza. Anotar la lectura y condiciones ambientales.
- Retirar la carga.

3.2.3 *Criterio de aceptación*

Para que la comprobación sea considerada satisfactoria, se debe cumplir la condición de la formula 3.1 en cada valor ensayado de la balanza:

$$\frac{|L_p - L_I|}{2 \times \sqrt{\left(\frac{U_I}{2}\right)^2 + u^2(\delta_I) + \left(\frac{U_P}{2}\right)^2 + u^2(\delta_P)}} \leq 1 \quad (3.1)$$

donde

L_p : es el valor real combinado de la masa de las pesas de referencia.

L_I : es la lectura corregida (por certificado de calibración) de la balanza.

U_P : es la incertidumbre expandida (por certificado de calibración) asociada a la combinación de pesas de referencia empleadas.

U_I : es la incertidumbre expandida asociada a la balanza, indicada en su certificado de calibración.

$u(\delta_P)$: es la incertidumbre estándar asociada a la deriva de las pesas.

$u(\delta_I)$: es la incertidumbre estándar asociada a la deriva de la balanza.

3.3 Comprobación intermedia de termómetros de inmersión

3.3.1 Requisitos

- La comprobación se realizará mediante comparación directa con un termómetro calibrado de mejor o igual resolución y con mejor o igual incertidumbre expandida (según certificado de calibración). Este último proporcionará el valor de referencia.
- El valor de temperatura en la cual se realizará la comprobación debe estar dentro del intervalo delimitado por su certificado de calibración.
- La comprobación puede realizarse en el LFL o en un ambiente que presente condiciones ambientales iguales o mejores.
- En caso el termómetro a evaluar pueda ser desmontado de su lugar de trabajo, se colocará en un recipiente de agua junto al termómetro de referencia. Ambos extremos de las sondas deberán estar superadas a lo mucho 2 cm. El agua previamente debe permanecer estable con una variación espacial (respecto al centro del recipiente) menor a $\pm 0,5$ °C.
- En caso el termómetro haya sido calibrado en “Intensidad de corriente”, se hará la conversión a unidades de temperatura para realizar la comprobación.

3.3.2 Proceso de comprobación

- Llenar el recipiente (o tubería) con agua. Comprobar con el termómetro de referencia que el líquido alcanzó la estabilidad térmica deseada.
- Para el valor a comprobar: registrar la lectura del termómetro de referencia y del termómetro a comprobar cada 60 segundos hasta completar un mínimo de 08 mediciones.

3.3.3 Criterio de aceptación

Para que la comprobación sea considerada satisfactoria, se debe cumplir la condición de la formula 3.2

$$\frac{|L_P - L_I|}{2 \times \sqrt{\left(\frac{U_I}{2}\right)^2 + u^2(\delta_I) + \left(\frac{U_P}{2}\right)^2 + u^2(\delta_P) + u^2(\delta_E) + u^2(\delta_A)}} \leq 1 \quad (3.2)$$

donde

L_P : es la lectura corregida (por certificado de calibración) del termómetro de referencia.

L_I : es la lectura corregida (por certificado de calibración) del termómetro a evaluar.

U_P : es la incertidumbre expandida asociada al termómetro de referencia, indicada en su certificado de calibración.

U_I : es la incertidumbre expandida asociada al termómetro a evaluar, indicada en su certificado de calibración.

$u(\delta_P)$: es la incertidumbre estándar asociada a la deriva del termómetro de referencia.

$u(\delta_I)$: es la incertidumbre estándar asociada a la deriva del termómetro a evaluar.

$u(\delta_E)$: es la incertidumbre estándar asociada a la estabilidad temporal (o espacial) del medio, en caso sea muy notoria la variabilidad.

$u(\delta_A)$: es la incertidumbre estándar asociada al ajuste de la curva en la conversión entre intensidad de corriente y temperatura, para termómetros que sean usados o calibrados en intensidad de corriente.

3.4 Comprobación intermedia de manómetros

3.4.1 Requisitos

- La comprobación intermedia se realizará mediante comparación directa empleando un manómetro calibrado de mejor o igual incertidumbre expandida. Este último proporcionará el valor de referencia.
- Para los manómetros empleado en ensayos de presión estática y presión del agua (ver NMP 005-2:2018), su comprobación intermedia será realizada en 16 bar o 32 bar.
- La comprobación intermedia en los manómetros que son empleados en mediciones de caudal y volumen se realizarán en 1 bar o 4 bar.
- La comprobación en 1 bar se realizará empleando el tanque elevado.
- La comprobación en valores mayores o iguales a 4 bar, se realizará empleando la bomba de agua.

3.4.2 Proceso de comprobación

- Instalar el manómetro a comprobar en línea con el manómetro de referencia.
- Comprobar que no existen fugas en el sistema instalado.
- Elevar la presión del agua de manera gradual hasta el valor más pequeño de presión a evaluar. Mantenerlo por un minuto. Anotar la lectura cada 10 s.
- Aumentar la presión hasta el segundo valor de presión. Mantenerlo por un minuto. Anotar la lectura cada 10 s.

3.4.3 Criterio de aceptación

Para que la comprobación sea considerada satisfactoria, se debe cumplir la condición de la formula 3.3

$$\frac{|L_p - L_I|}{2 \times \sqrt{\left(\frac{U_I}{2}\right)^2 + u^2(\delta_I) + \left(\frac{U_P}{2}\right)^2 + u^2(\delta_P)}} \leq 1 \quad (3.3)$$

donde

L_p : es la lectura corregida (por certificado de calibración) del manómetro de referencia.

L_I : es la lectura corregida (por certificado de calibración) del manómetro a evaluar.

U_P : es la incertidumbre expandida asociada al manómetro de referencia, indicada en su certificado de calibración.

U_I : es la incertidumbre expandida asociada al manómetro a evaluar, indicada en su certificado de calibración.

$u(\delta_P)$: es la incertidumbre estándar asociada a la deriva del manómetro de referencia.

$u(\delta_I)$: es la incertidumbre estándar asociada a la deriva del manómetro a evaluar.

3.5 Comprobación intermedia de medidores de caudal

3.5.1 Requisitos

- La comprobación de los medidores de flujo se realizará en dos valores de caudal (volumétricos o másicos): el valor mínimo y máximo del intervalo calibrado.
- La comprobación se realizará mediante el método de pesada estática para los medidores que se usan como patrones de referencia en la línea de diámetro nominal DN100 y para los medidores másicos de Coriolis.

- Para todos los demás medidores será suficiente comprobarlos por el método de comparación directa, usando para ello los medidores de referencia. De ser necesario, se pueden utilizar también el método de pesada.

3.5.2 *Proceso de comprobación*

Se seguirá lo establecido en el PC-LFL-001 “Procedimiento para la calibración de medidores de agua y medidores de líquidos (método de pesada y comparación directa)”.

3.5.3 *Criterio de aceptación*

Para que la comprobación sea considerada satisfactoria, se debe cumplir la condición de la formula 3.4

$$\frac{|\varepsilon_p - \varepsilon_I|}{2 \times \sqrt{\left(\frac{U_I}{2}\right)^2 + u^2(\delta_I) + \left(\frac{U_P}{2}\right)^2 + u^2(\delta_P)}} \leq 1 \quad (3.4)$$

donde

ε_p : es la lectura corregida (por certificado de calibración) del caudalímetro de referencia.

ε_I : es la lectura corregida (por certificado de calibración) del caudalímetro a evaluar.

U_P : es la incertidumbre expandida asociada al caudalímetro de referencia, indicada en su certificado de calibración.

U_I : es la incertidumbre expandida asociada al caudalímetro a evaluar, indicada en su certificado de calibración.

$u(\delta_P)$: es la incertidumbre estándar asociada a la deriva del caudalímetro de referencia.

$u(\delta_I)$: es la incertidumbre estándar asociada a la deriva del caudalímetro a evaluar.

3.6 Comprobación de la conductividad del agua

- La comprobación de la conductividad del agua empleada en los bancos de medición debe ser realizada de manera mensual.
- Para ello se empleará un medidor de conductividad: conductímetros.
- En la DM-INACAL se cuentan con conductímetros disponibles, operativos y con trazabilidad metrológica tanto en el Laboratorio de Volumen y Densidad (LVD) como en el Laboratorio de Metrología Química (LMQ).
- La comprobación intermedia se realizará tomando muestras de un volumen mínimo de 200 ml del agua y se medirá su conductividad.
- Cada muestra de agua deberá ser tomada directamente de cada uno de los bancos de prueba donde se realizan pruebas de errores.

3.6.1 Criterio de aceptación

Se tiene la siguiente condición que debe ser cumplida para el valor ensayado para que la comprobación sea considerada satisfactoria:

$$C_{min} \leq C_w \leq C_{max} \quad (3.5)$$

donde

C_w : es la conductividad medida.

C_{min} : es la conductividad mínima requerida para el agua, su valor es de $5 \mu\text{S cm}^{-1}$ (a 15°C), la cual es importante especialmente para la calibración de medidores de caudal del tipo electromagnético.

C_{max} : es la conductividad máxima esperada, cuyo valor es igual a $800 \mu\text{S cm}^{-1}$ (a 15°C) para agua potable de buena calidad, de acuerdo a Batista and Paton, 2018

3.7 Comprobación intermedia de la densidad del agua

3.7.1 Requisitos

- Se debe contar con un densímetro del tipo oscilatorio. El Laboratorio de Volumen y Densidad (LVD) cuenta con uno operativo y con trazabilidad metrológica, empleando un material de referencia certificado.
- El densímetro debe prenderse por lo menos 1 hora antes de uso o el tiempo que se indique en su manual para el calentamiento del equipo.
- Se debe contar con una muestra de 50 mL de agua ultra pura, proporcionada por el LMQ, una muestra de 50 mL de agua destilada, proporcionada por el LVD y una muestra de 50 mL de agua obtenida de del sistema de alimentación del LFL. Las muestras deben permanecer cerca del densímetro al menos una hora para alcanzar el equilibrio térmico con el ambiente.
- Emplear el agua destilada para enjuagar el sistema interno del densímetro y realizar su ajuste empleando el agua ultra pura.
- Verificar la lectura del densímetro empleando el agua destilada. Ver el manual de usuario para más información sobre su verificación. Anotar la lectura.
- Hacer correr parte del agua a evaluar a través del densímetro, evitando que se formen burbujas.
- Medir la densidad de la muestra de agua a evaluar. Renovar el agua de la muestra y realizar dos mediciones adicionales.
- Obtener el valor promedio de las tres mediciones obtenidas.

3.7.2 Criterio de aceptación

Se tiene la siguiente condición que debe ser cumplida para el valor ensayado para que la comprobación sea considerada satisfactoria:

$$\frac{|\varepsilon_p - \varepsilon_I|}{2 \times \sqrt{\left(\frac{U_I}{2}\right)^2 + u^2(\delta_I) + \left(\frac{U_P}{2}\right)^2 + u^2(\delta_P)}} \leq 1 \quad (3.6)$$

Anexo 4. Informe de comparación internacional

SIM.M.FF-S9.2016

La Comparación suplementaria SIM.M.FF-S9.2016 se llevó a cabo desde el año 2016 hasta el 2019, en donde participaron los institutos metrológicos nacionales y/o laboratorios designados de Chile, Perú, Bolivia y Argentina. Los laboratorios piloto designados fueron el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania y el Centro Nacional de Metrología (CENAM) de México, quienes proporcionaron el valor de referencia.

Para la comparación se emplearon dos tipos de medidores de flujo: uno de turbina y otro del tipo coriolis, en el alcance de indicación desde 10 m³/h hasta 130 m³/h, con una temperatura del fluido de 20 °C.

En el proceso de comparación, se indica que los resultados asociados al medidor de turbina no son adecuados para la comparación y el respaldo de la CMC de los laboratorios participantes, esto debido a su sensibilidad a condiciones de flujo distorsionado.

Los resultados con el medidor del tipo coriolis mostraron que los resultados de INACAL tienen un error normalizado (normalized degree of equivalence) $E_n < 1$ para los caudales 10 t/h, 30 t/h, 60 t/h, 100 t/h y 130 t/h. En la página 35 de 68 del informe se indica que para 10 t/h se tiene un resultado no concluyente, pero esto no significa que el resultado sea inválido; solo indica que el ratio de la incertidumbre del laboratorio respecto a la referencia es un poco alta.

El informe final actualmente ya se encuentra publicado en la web de BIPM desde enero de 2024 (Frahm et al., 2024).



Final report

SIM.M.FF-S9.2016

Water flow: 10 m³/h ... 130 m³/h

Pilot laboratory #1:	PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt Department of Liquid Flow Bundesallee 100 D-38116 Braunschweig Germany
Pilot laboratory #2:	CENAM Centro Nacional de Metrología Dirección de Metrología de Flujo y Volumen km 4.5 carretera a los Cués El Marqués, Querétaro Mexico, 76246
Coordinator	Carl Felix Wolff - PTB Phone: +49- (0)531 - 592 8211 Email: carl.f.wolff@ptb.de
Participants	PTB - Enrico Frahm CENAM - Roberto Arias Romero, Manuel Maldonado CISA, Chile - Jeny Vargas Angel IBMETRO, Bolivia - Juan José Mendoza Aguirre INACAL, Perú - Adriel Arredondo INTI, Argentina - Marcelo Alejandro Silvosa
Authorship	Enrico Frahm - PTB Phone: +49 (0)531 - 592 1333 Email: enrico.frahm@ptb.de Roberto Arias Romero - CENAM Phone: +52 - 442 - 211 0571 Email: mmaldona@cenam.mx, rarias@cenam.mx

Braunschweig, 20.12.2023

8.3.2 Comparison results of participating laboratories

Laboratory results

Table 30: Relative measurement error x_i (%) of Coriolis_Mass at participating laboratories – temperature corrected mean values of day #1 and day #2, comparison reference value $SCRV_{Cor}$ and $U(SCRV_{Cor})$

Flowrate	CISA	INACAL	IBMETRO	INTI	$SCRV_{Cor}$	$U(SCRV_{Cor})$ $k = 2$
t/h	%	%	%	%	%	%
10	-0.194	-0.348	-0.154	-0.137	0.007	0.100
30	-0.101	-0.120	-0.143	-0.073	-0.033	0.088
60	-0.075	0.040	-0.160	-0.004	-0.021	0.057
100	-0.064	0.059	-0.157	0.439	-0.022	0.053
130		0.072		0.338	-0.014	0.050

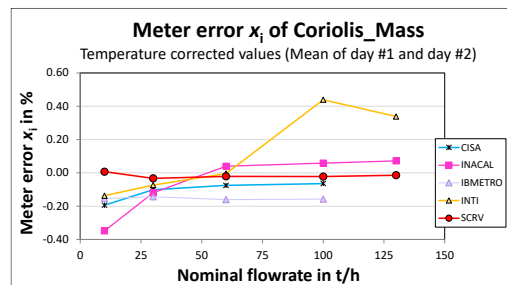


Figure 42: Relative measurement error x_i of Coriolis_Mass at participating laboratories - temperature corrected mean values of day #1 and day #2

The E_N values of participating laboratories are summarized in Table 31 and Figure 43. Beside two calibrations, all laboratories complied with the E_N criteria of < 1.2 . Only at the flowrates of 100 t/h and 130 t/h this critical value.

Table 31: Summary of E_N -values of participating laboratories for Coriolis_Mass transfer meter - ^{a)} represents E_N – values at warning level between 1.00 and 1.20, ^{b)} represents E_N -values > 1.20

Flowrate	CISA	INACAL	IBMETRO	INTI
t/h	-	-	-	-
10	0.82	0.91	0.81	0.77
30	0.33	0.47	0.63	0.25
60	0.31	0.47	1.03 ^{a)}	0.11
100	0.24	0.65	1.04 ^{a)}	1.96 ^{b)}
130		0.72		1.50 ^{b)}

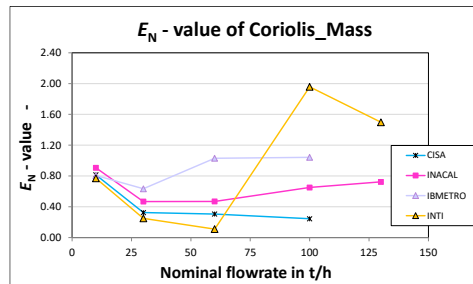


Figure 43: Summarized E_N -values of participating laboratories for Coriolis_Mass transfer meter

Conclusive tests of comparison results $u_{\text{comp}}/u_{\text{base}}$

Based on [3], for a conclusive proof of participant results and an agreement with the $SCR_{V_{\text{Cor}}}$, the comparison uncertainty ratio $u_{\text{comp}}/u_{\text{base}}$ should be < 2 . The results for participating laboratories are summarized in Table 32 and Figure 44.

Beside one calibration, all results complied with this limit. For the final purpose of this SC the uncertainties u_{comp} of Coriolis_Mass were sufficiently low enough. Finally, the meter was suitable for a confirmation of the declared CMC values.

Table 32: Summarized results of conclusive proof $u_{\text{comp}}/u_{\text{base}}$ of participating laboratories for Coriolis_Mass transfer meter - ^{c)} represents inconclusive data

Flowrate t/h	CISA	INACAL	IBMETRO	INTI
10	1.12	4.88 ^{c)}	1.41	2.00
30	0.79	1.91	1.13	1.66
60	0.50	1.16	0.71	1.76
100	0.44	1.09	0.64	0.93
130		1.02		0.95

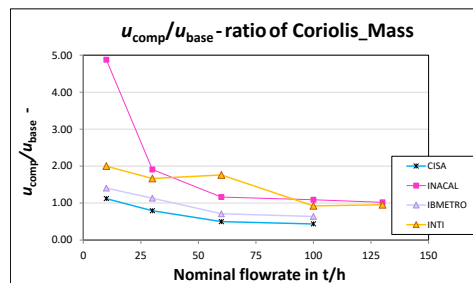


Figure 44: Summarized results of conclusive proof $u_{\text{comp}}/u_{\text{base}}$ of participated laboratories for Coriolis_Mass transfer meter

INACAL - laboratory (Peru)

Beside the flowrate of 10 t/h, for mass calibration this comparison supported the declared base uncertainties of the participant (Table 34). The calibrations with Coriolis meter were not suitable for a confirmation of the declared CMC at the flowrate of 10 t/h, because the ratio of u_{comp}/u_{base} was > 2 .

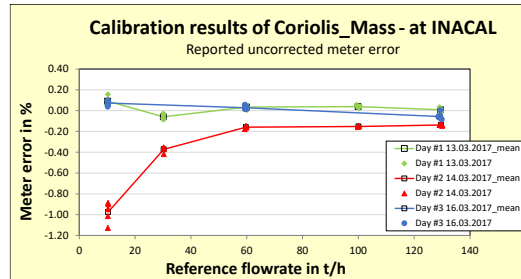


Figure 47: Calibration results of INACAL for Coriolis_Mass transfer meter – reported uncorrected meter error e_m

Table 34: Comparison decision table for INACAL laboratory (Coriolis_Mass transfer meter), where x_i is the temperature corrected meter error (mean of day #1 and day#2) - ^{c)} represents inconclusive data

INACAL / Peru							
Nominal flowrate	Relative measurement error	Expanded laboratory uncertainty	Expanded measurement uncertainty	Degree of equivalence	Normalized degree of equivalence	u_{comp}/u_{base}	CMC decision status
	x_i	$U_{base,i}$ ($k = 2$)	$U(x_i)$ ($k = 2$)	d_i	$E_{N,i}$		
t/h	%	%	%	-	-	-	
10	-0.348	0.076	0.378	-0.355	0.91	4.88 ^{c)}	inconclusive
30	-0.120	0.076	0.164	-0.087	0.47	1.91	acceptable
60	0.040	0.076	0.117	0.061	0.47	1.16	acceptable
100	0.059	0.076	0.113	0.081	0.65	1.09	acceptable
130	0.072	0.076	0.109	0.087	0.72	1.02	acceptable

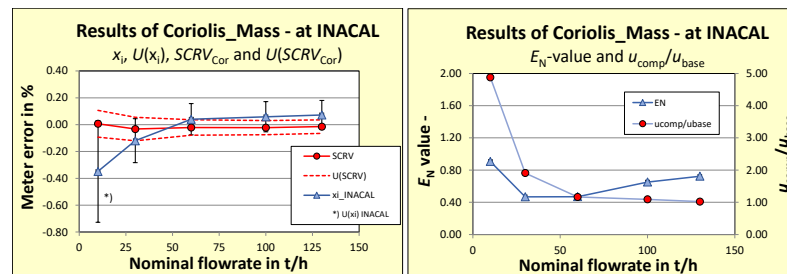


Figure 48: Comparison results of INACAL laboratory for Coriolis_Mass transfer meter

Anexo 5. Código Python para la Simulación de la calibración por el Método de Monte Carlo

Para la realización la simulación para la estimación de incertidumbre por el método de Monte Carlo se desarrolló el código Python mediante la plataforma Colaboratory (COLAB) de Google, la cual permite la ejecución del mismo en sus servidores alojados en la nube. Esto hizo posible la elección del tamaño de muestra de hasta un millón de datos por variable. Líneas abajo se presenta el código elaborado que incluye desde a lectura del archivo excel que contiene las magnitudes de entrada con sus incertidumbres hasta la generación de la tabla que contiene los resultados según el tamaño de muestra N .

```
# MCM aplicada al Caudal

import numpy as np
import IPython.display as display
from matplotlib import pyplot as plt
import io
import base64
```

```
import pandas as pd
df = pd.read_excel('/content/Libro_Qv_90000Lh_colabMMC.xlsx')
print(df)
```

```
# Temperatura del aire

#Se detallan las componentes de T_a
```

```

def T_a_form(T_a0,Hw_Res,Hw_Cert,Hw_Deri,Hw_Camb_t,N): #en °C

    Delta1_T_a=np.random.uniform(-Hw_Res,Hw_Res,N) #°C
    Delta2_T_a=np.random.normal(0,Hw_Cert/2,N) #°C
    Delta3_T_a=np.random.uniform(-Hw_Deri,Hw_Deri,N) #°C
    Delta4_T_a=np.random.uniform(-Hw_Camb_t,Hw_Camb_t,N) #°C

    T_a = T_a0 + Delta1_T_a + Delta2_T_a + Delta3_T_a + Delta4_T_a

    return T_a

```

Presión del aire

#Se detallan las componentes de p_a

```

def p_a_form(p_a0,Hw_Res,Hw_Cert,Hw_Deri,Hw_Camb_t,N): #en hPa

    Delta1_p_a=np.random.uniform(-Hw_Res,Hw_Res,N) #°C
    Delta2_p_a=np.random.normal(0,Hw_Cert/2,N) #°C
    Delta3_p_a=np.random.uniform(-Hw_Deri,Hw_Deri,N) #°C
    Delta4_p_a=np.random.uniform(-Hw_Camb_t,Hw_Camb_t,N) #°C

    p_a = p_a0 + Delta1_p_a + Delta2_p_a + Delta3_p_a
           + Delta4_p_a # Pa

    return p_a

```

Humedad relativa

#Se detallan las componentes de h_r

```

def h_r_form(h_r0,Hw_Res,Hw_Cert,Hw_Deri,Hw_Camb_t,N): #en %Hr

```

```

Delta1_h_r=np.random.uniform(-Hw_Res,Hw_Res,N) # %Hr
Delta2_h_r=np.random.normal(0,Hw_Cert/2,N) # %Hr
Delta3_h_r=np.random.uniform(-Hw_Deri,Hw_Deri,N) # %Hr
Delta4_h_r=np.random.uniform(-Hw_Camb_t,Hw_Camb_t,N) # %Hr

h_r = h_r0 + Delta1_h_r + Delta2_h_r + Delta3_h_r
      + Delta4_h_r #en %Hr

return h_r

```

```

# Masa

#Se detallan las componentes de m
def m_form(m_0,Hw_Res_mass_i,Hw_Res_mass_f,Hw_mass_i,
           Hw_mass_f,Hw_variab,Hw_Deri,N): #en % kg

Hw_Res_mass_i=0.001 # % kg
Hw_Res_mass_f=0.001 # % kg
Hw_mass_i=0.005 # % kg
Hw_mass_f=0.005 # % kg
Hw_variab=0.003 # % kg
Hw_Deri=0.005 # % kg

Delta1_m=np.random.uniform(-Hw_Res_mass_i,Hw_Res_mass_i,N) # kg
Delta2_m=np.random.uniform(-Hw_Res_mass_f,Hw_Res_mass_f,N) # kg
Delta3_m=np.random.normal(0,Hw_mass_i/2,N) # kg
Delta4_m=np.random.normal(0,Hw_mass_f/2,N) # kg
Delta5_m=np.random.uniform(-Hw_variab,Hw_variab,N) # kg
Delta6_m=np.random.uniform(-Hw_Deri,Hw_Deri,N) # kg

```

```

m = m_0 + Delta1_m + Delta2_m + Delta3_m + Delta4_m
      + Delta5_m + Delta6_m
return m

```

Densidad de las pesas

```

def rho_b_form(rho_b_0,Hw_rho_b,N):# kg/m³

Delta_rho_b=np.random.uniform(-Hw_rho_b,Hw_rho_b,N)
rho_b= rho_b_0 + Delta_rho_b
return rho_b

```

Temperatura del agua en el recipiente de pesaje

#Se detallan las componentes de T_w2

```

def T_w2_form(T_w2_0,Hw_Res,Hw_Cert,Hw_Deri,Hw_grad,
Hw_dif-Ta_Tw2,N): #en °C

Delta1_T_w2=np.random.uniform(-Hw_Res,Hw_Res,N) #°C
Delta2_T_w2=np.random.normal(0,Hw_Cert/2,N) #°C
Delta3_T_w2=np.random.uniform(-Hw_Deri,Hw_Deri,N) #°C
Delta4_T_w2=np.random.uniform(-Hw_grad,Hw_grad,N) #°C
Delta5_T_w2=np.random.uniform(-Hw_dif-Ta_Tw2,Hw_dif-Ta_Tw2,N) #°C

T_w2 = T_w2_0 + Delta1_T_w2 + Delta2_T_w2 + Delta3_T_w2
      + Delta4_T_w2 + Delta5_T_w2

return T_w2

```

```
# Tiempo
```

```
def t_form(t_0,Hw_Res,Hw_Cert,Hw_detec_laser,Hw_deriv,N): # en h
```

```
    Delta1_t=np.random.uniform(-Hw_Res,Hw_Res,N) # en h
```

```
    Delta2_t=np.random.normal(0,Hw_Cert/2,N) # en h
```

```
    Delta3_t=np.random.uniform(-Hw_detec_laser,Hw_detec_laser,N) #en h
```

```
    Delta4_t=np.random.uniform(-Hw_deriv,Hw_deriv,N) # en h
```

```
    t = t_0 + Delta1_t + Delta2_t + Delta3_t + Delta4_t
```

```
    return t
```

```
# Error del conteo de tiempo
```

```
def Desv_t_form(Delta_t0,Hw_Desv_t,N):# en h
```

```
    Delta_Desv_t=np.random.normal(0,Hw_Desv_t/2,N) # en h
```

```
    Desv_t = Delta_t0 + Delta_Desv_t
```

```
    return Desv_t
```

```
# Densidad del agua
```

```
def rho_w_form(T_w,p_a,F_corr,N): # kg/m³
```

```
    a_1w=-3.983035 #°C
```

```
    a_2w=301.797 #°C
```

```
    a_3w=522528.9 #°C²
```

```
    a_4w=69.34881 #°C
```

```
    a_5w=999.972 #kg/m³
```

```
    F_w=a_5w*(1-pow(T_w+a_1w,2)*(T_w+a_2w)/(a_3w*(T_w+a_4w)))
```



```

p_std=101325 #Pa
k_0=50.74*pow(10,-11) #Pa-1
k_1=-0.326*pow(10,-11) #Pa-1°C-1
k_2=0.00416*pow(10,-11) #Pa-1°C-1

F_comp=1+(k_0+k_1*T_w+k_2*pow(T_w,2))*(p_a-p_std)

Hw_Fcorr=0.05 # kg/m3
Hw_densim=0.05 # kg/m3
Delta_Fcorr=np.random.uniform(-Hw_Fcorr,Hw_Fcorr,N) #kg/m3
Delta_densim=np.random.uniform(-Hw_densim,Hw_densim,N) #kg/m3
rho_w = F_w*F_comp + F_corr + Delta_Fcorr
        + Delta_densim
return rho_w

```

```

# Temperatura del agua en la tubería

#Se detallan las componentes de T_w1
def T_w1_form(T_w1_0,Hw_Res,Hw_Cert,Hw_Deri,
              Hw_camb,Hw_grad,Hw_dif-Ta_Tw1,N): #en °C

    Delta1_T_w1=np.random.uniform(-Hw_Res,Hw_Res,N) #°C
    Delta2_T_w1=np.random.normal(0,Hw_Cert/2,N) #°C
    Delta3_T_w1=np.random.uniform(-Hw_Deri,Hw_Deri,N) #°C
    Delta4_T_w1=np.random.uniform(-Hw_grad,Hw_grad,N) #°C
    Delta5_T_w1=np.random.uniform(-Hw_dif-Ta_Tw1,
                                   Hw_dif-Ta_Tw1,N) #°C
    Delta6_T_w1=np.random.uniform(-Hw_camb,Hw_camb,N) #°C

    T_w1 = T_w1_0 + Delta1_T_w1 + Delta2_T_w1 + Delta3_T_w1
            + Delta4_T_w1 + Delta5_T_w1 + Delta6_T_w1

```

```
return T_w1
```

```
# Presión del agua en la tubería
```

```
#Se detallan las componentes de p_w1
```

```
def p_w1_form(p_w1_0,Hw_Res,Hw_Cert,Hw_Deri,  
              Hw_Camb_t,Hw_grad,N):#en bar
```

```
Delta1_p_w1=np.random.uniform(-Hw_Res,Hw_Res,N) #bar
```

```
Delta2_p_w1=np.random.normal(0,Hw_Cert/2,N) #bar
```

```
Delta3_p_w1=np.random.uniform(-Hw_Deri,Hw_Deri,N) #bar
```

```
Delta4_p_w1=np.random.uniform(-Hw_Camb_t,Hw_Camb_t,N) #bar
```

```
Delta5_p_w1=np.random.uniform(-Hw_grad,Hw_grad,N) #bar
```

```
p_w1 = p_w1_0 + Delta1_p_w1 + Delta2_p_w1 + Delta3_p_w1  
        + Delta4_p_w1 + Delta5_p_w1
```

```
return p_w1
```

```
# Medidor bajo test (MUT)
```

```
def MUT_form(MUT_0,desv_st_Q,Hw_resol_MUT,N):
```

```
    Hw_repet_lect_Q=desv_st_Q # kg/h o L/h
```

```
    Delta_1_MUT=np.random.normal(0,Hw_repet_lect_Q/2,N) # kg/h
```

```
    Delta_2_MUT=np.random.uniform(-Hw_resol_MUT,Hw_resol_MUT,N) # kg/h
```

```
    MUT = MUT_0+Delta_1_MUT + Delta_2_MUT
```

```
    return MUT
```

```
# Densidad del aire
```

```
import math
```

```
def rho_a_form(T_a,p_a,h_r,N):#T_w en °C, p_a en Pa , h_r en %

    e_vect=np.full(N,np.e)

    rho_a=(0.34848*pow(10,-2)*p_a-0.009*h_r
           *e_vect**(0.061*T_a))/(273.15+T_a)

    return rho_a
```

```
# Ecuaciones de cálculo de magnitudes
```

```
#Formula para el caudal volumétrico Qv
```

```
def Q_v_form(theta_1,theta_2,m,t,t_prime,rho_w,rho_b,rho_a):

    Q_v=theta_1*theta_2*(m/t_prime)*(rho_b-rho_a)

        /(rho_b*(rho_w-rho_a))

    return Q_v
```

```
#Fórmula para theta_1
```

```
def theta_1_form(T_w1,T_w2):

    #alpha_w=1.5*pow(10,-4) # 1/°C o 1/K

    alpha_w=(-0.1176*pow(T_w1,2)+15.846*T_w1-62.677)*pow(10,-6)

        # 1/°C o 1/K

    theta_1=1+alpha_w*(T_w1-T_w2)

    return theta_1
```

```
#Fórmula para theta_2
```

```
def theta_2_form(p_w1): #donde p_w1 esta en bar

    kappa_w=4.6*pow(10,-5) # 1/bar

    theta_2=1-kappa_w*p_w1

    return theta_2
```

```
def error_form(X_MUT,X_ref):

    error=(X_MUT-X_ref)/X_ref*100
```

```
return error
```

```
R_df = pd.DataFrame(index=range(20), columns=range(7))
N_vect=[3,10,100,1000,10000,100000, 1000000]

for j in range(7):
    N=N_vect[j]
    R_df.iloc[0,j]=N

    T_a=T_a_form(*df.iloc[0, 1:6],N) #°C
    R_df.iloc[1,j]=round(np.mean(T_a),3)

    p_a=p_a_form(*df.iloc[1, 1:6],N) #Pa
    R_df.iloc[2,j]=round(np.mean(p_a),3)

    h_r=h_r_form(*df.iloc[2, 1:6],N) # %Hr
    R_df.iloc[3,j]=round(np.mean(h_r),3)

    m=m_form(*df.iloc[3, 1:8],N) #kg
    R_df.iloc[4,j]=round(np.mean(m),3)

    rho_b=rho_b_form(*df.iloc[4, 1:3],N) #kg/m3
    R_df.iloc[5,j]=round(np.mean(rho_b),3)

    T_w2= T_w2_form(*df.iloc[5, 1:7],N) #°C
    R_df.iloc[6,j]=round(np.mean(T_w2),3)

    t=t_form(*df.iloc[6, 1:6],N) #h
    R_df.iloc[7,j]=round(np.mean(t),4)

    Desv_t=Desv_t_form(*df.iloc[7, 1:3],N) #h
    R_df.iloc[8,j]=format(np.mean(Desv_t),'.3g')
```

```

rho_w=rho_w_form(T_w2,p_a,df.iloc[8,3],N) #kg/m3
R_df.iloc[9,j]=round(np.mean(rho_w),3)

T_w1=T_w1_form(*df.iloc[9, 1:8],N) #°C
R_df.iloc[10,j]=round(np.mean(T_w1),3)

p_w1=p_w1_form(*df.iloc[10, 1:7],N) #bar
R_df.iloc[11,j]=round(np.mean(p_w1),3)

MUT=MUT_form(*df.iloc[11, 1:4],N) #m3/h
R_df.iloc[12,j]=round(np.mean(MUT),3)

theta_1=theta_1_form(T_w1,T_w2)
R_df.iloc[13,j]=round(np.mean(theta_1),3)

theta_2=theta_2_form(p_w1)
R_df.iloc[14,j]=round(np.mean(theta_2),3)

t_prime=t+Desv_t
R_df.iloc[15,j]=round(np.mean(t_prime),3)

rho_a=rho_a_form(T_a,p_a,h_r,N)
R_df.iloc[16,j]=round(np.mean(rho_a),3)

Q_v=Q_v_form(theta_1,theta_2,m,t,t_prime,rho_w,rho_b,rho_a)
R_df.iloc[17,j]=round(np.mean(Q_v),3)

error=error_form(MUT,Q_v)
R_df.iloc[18,j]=round(np.mean(error),3)
R_df.iloc[19,j]=round(2*np.std(error),3)

```

```
print(R_df)
```

```
from scipy import stats

# Aplicar la prueba de Shapiro-Wilk
statistic, p_value = stats.shapiro(error)

# Imprimir los resultados
print('Estadístico:', statistic)
print('Valor p:', p_value)

# Interpretar el valor p
alpha = 0.05 # Nivel de significancia
if p_value > alpha:
    print('Se acepta la hipótesis nula H_0')
else:
    print('Se rechaza la hipótesis nula H0')
```