

VALIDACION DEL METODO DE CALIBRACION DE MEDIDORES DE VOLUMEN DE
GAS PARA EL BANCO GMP25 DE LA CORPORACION CDT DE GAS

JOSÉ OLIVEIRO MELÉNDEZ PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2025

VALIDACION DEL METODO DE CALIBRACION DE MEDIDORES DE VOLUMEN DE
GAS PARA EL BANCO GMP25 DE LA CORPORACION CDT DE GAS

JOSÉ OLIVEIRO MELÉNDEZ PÉREZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TUTOR

ING. JHON ALEJANDRO ANGULO

DIRECTOR

ING. JORGE LUIS CHACÓN VELASCO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2025

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. GENERALIDADES.....	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
3. OBJETIVOS	18
3.1. OBJETIVO GENERAL	18
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
4. MARCO TEÓRICO.....	19
4.1. GAS METER PROVER (GMP 25)	19
4.2. PRUEBAS DE VALIDACIÓN	20
4.2.1. Pruebas de precisión.....	20
4.2.2. Pruebas de veracidad	20
4.2.3. Estimación de incertidumbre	21
4.2.4. Evaluación de posibles factores influyentes	21
4.2.5. Estudio de factores influyentes.....	22
4.3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN	22
4.4. MODELADO DE VOLUMEN DE GAS	23
4.4.1. Flujo de sustancia	23
4.4.2. Condiciones de referencia.....	23
4.4.3. Modelo de gas ideal	24
4.5. LOS MEDIDORES DE GAS.....	25
4.5.1. Parámetros de desempeño de medidores	25
4.5.2. Clasificación de los medidores de cantidad de gas.....	26
4.6. ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD	27
4.7. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA).....	30

4.8.	EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO	32
4.9.	TEST DE YOUTDEN Y STEINER.....	33
4.10.	PROCESO DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE	34
4.10.1.	Definición del mensurando.....	34
4.10.2.	Determinación de magnitudes de entrada y fuentes de variabilidad	35
4.10.3.	Creación del modelo de medición	35
4.10.4.	Medición.....	36
4.10.5.	Cuantificación de las fuentes de variabilidad.....	37
4.10.6.	Cálculo del resultado de la medición.....	38
4.10.7.	Estimación de la incertidumbre	38
5.	METODOLOGÍA.....	40
5.1.	PRUEBAS DE PRECISIÓN	43
5.2.	PRUEBAS DE VERACIDAD	46
5.3.	TEST DE YOUTDEN Y STEINER.....	47
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	51
6.1.	RESULTADOS DE PRECISIÓN	51
6.2.	ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA).....	55
6.3.	ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE Y DETERMINACIÓN DE CMC.....	56
6.4.	RESULTADOS DE VERACIDAD	59
6.5.	RESULTADOS DEL TEST DE YOUTDEN Y STEINER	64
6.6.	RECOMENDACIONES	68
7.	CONCLUSIONES.....	70
	BIBLIOGRAFÍA.....	72

LISTA DE CUADROS

pág.

Cuadro 1. Valores críticos h y k con nivel de significancia 1%.	30
Cuadro 2. Distribución de niveles en los experimentos del test de Youden y Steiner. .	33
Cuadro 3. Parámetros de evaluación empleados en la validación del método.....	42
Cuadro 4. Caudales de prueba y número de repeticiones.....	43
Cuadro 5. Volúmenes de prueba para un medidor tipo diafragma.	43
Cuadro 6. Medidor bajo prueba MUT1.	44
Cuadro 7. Medidor bajo prueba MUT2.	44
Cuadro 8. Medidor patrón.....	45
Cuadro 9. Calibraciones de las pruebas r&R y ANOVA.	46
Cuadro 10. Medidor bajo prueba MUT3	46
Cuadro 11. Calibraciones de referencia.....	47
Cuadro 12. Parámetros empleados en la evaluación de factores influyentes.	48
Cuadro 13. Resultados de estadístico h de MUT1.	51
Cuadro 14. Resultados de estadístico k de MUT1.	52
Cuadro 15. Resultados de estadístico h de MUT2.	53
Cuadro 16. Resultados de estadístico k de MUT2.	53
Cuadro 17. Incertidumbres por repetibilidad y reproducibilidad calculadas	55
Cuadro 18. Análisis de varianza de los resultados obtenidos MUT1.	55
Cuadro 19. Análisis de varianza de los resultados obtenidos MUT2.	56
Cuadro 20. CMC del GMP25 en el rango 0.5 m ³ /h a 1 m ³ /h	57
Cuadro 21. CMC del GMP25 en el rango 1 m ³ /h a 25 m ³ /h	58
Cuadro 22. Resultados de la comparación para el MUT1.	60
Cuadro 23. Resultados de la comparación para el MUT2.	61
Cuadro 24. Resultados de la comparación para el MUT3.	62
Cuadro 25. Resultados del Test de Youden y Steirner (valores en %).	65
Cuadro 26. Efectos combinación factorial de los parámetros para caudal de 0.5 m ³ /h. 66	

Cuadro 27. Efectos combinación factorial de los parámetros para caudal de 1.25 m ³ /h.	66
Cuadro 28. Efectos combinación factorial de los parámetros para caudal de 2.5 m ³ /h.	67
Cuadro 29. Orden de sensibilidad de los efectos analizados.	68

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Organigrama de CDT de gas.....	14
Figura 2. Procedimiento técnico de calibración.	16
Figura 3. Banco GMP25.	19
Figura 4. Secuencia experimental del proceso de validación.	41
Figura 5. Gráfico de la prueba con estadístico h de MUT1.....	51
Figura 6. Gráfico de la prueba con estadístico k de MUT1.....	52
Figura 7. Gráfico de la prueba con estadístico h de MUT2.....	53
Figura 8. Gráfico de la prueba con estadístico k de MUT2.....	54
Figura 9. Resultados de calibración obtenidos para el MUT1.	60
Figura 10. Resultados de calibración obtenidos para el MUT2.	61
Figura 11. Resultados de calibración obtenidos para el MUT3.....	63

LISTA DE ANEXOS

Los Anexos están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Anexo A. Informe de precisión intermedia.

Anexo B. CMC.

Anexo C. Informe de veracidad.

Anexo D. Informe de factores influyentes.

Anexo E. Informe de validación.

Anexo F. Seguimiento de la implementación del método.

GLOSARIO

Nota. Las definiciones han sido tomadas de BIPM (2012).

Calibración. Operación que, bajo condiciones específicas, en un primer paso, establece una relación entre los valores de las magnitudes con incertidumbres de medición proporcionados por los patrones de medición y las indicaciones correspondientes con incertidumbres de medición asociadas, y, en un segundo paso, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medición a partir de una indicación.

Exactitud de medida. Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero.

Incertidumbre de medición. Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando.

Magnitud. Propiedad que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia.

Medición. Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que puedan atribuirse a una magnitud.

Mensurando. Magnitud que se desea medir.

Metrología. Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones.

Patrón de medición. Realización de la definición de una magnitud dada, tomado como referencia.

Resultado de una medición. Conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

Trazabilidad metrológica. Propiedad del resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida.

Validación. verificación, donde los requisitos especificados sean adecuados para el uso previsto.

Valor convencional de una magnitud. Valor asignado a una magnitud, mediante un acuerdo, para un determinado propósito.

Valor verdadero de una magnitud. Valor de una magnitud compatible con la definición de la magnitud.

Verificación. Aportación de evidencia objetiva de que un elemento satisface requerimientos específicos.

RESUMEN

TÍTULO: VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE VOLUMEN DE GAS PARA EL BANCO GMP25 DE LA CORPORACIÓN CDT DE GAS*

AUTOR: JOSÉ OLIVEIRO MELÉNDEZ PÉREZ**

PALABRAS CLAVE: VALIDACIÓN, CALIBRACIÓN, METROLOGÍA, TRAZABILIDAD, EXACTITUD.

DESCRIPCIÓN:

En el presente proyecto se realizó la validación del banco GMP25 con el objetivo de garantizar la exactitud en los procesos de calibración de la Corporación CDT del gas y cumplir con la NTC-ISO/IEC 17025.

Para realizar esta validación se planearon cuatro pruebas: precisión, veracidad, estimación de la incertidumbre, y la evaluación y estudio de factores influyentes.

Las pruebas se llevaron a cabo mediante la ejecución y documentación continua de calibraciones que permiten caracterizar, mediante parámetros específicos para cada prueba, el cumplimiento de los requisitos normativos para la correcta validación del banco y su respectiva trazabilidad.

Todo este proceso de calibraciones fue apoyado por la Herramienta de Análisis de Datos, diseñada anteriormente por la empresa la cual permite procesar la información de manera eficiente y controlada.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. Ingeniero Mecánico. Tutor: Jhon Alejandro Angulo. Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: VALIDATION OF THE GAS VOLUME MEASURERS CALIBRATION METHOD FOR THE GMP25 BENCH OF THE CDT DE GAS CORPORATION*

AUTHOR: JOSÉ OLIVEIRO MELÉNDEZ PÉREZ**

KEY WORDS: VALIDATION, CALIBRATION, METROLOGY, TRACEABILITY, ACCURACY.

DESCRIPTION:

This project validated the GMP25 bench to ensure accuracy in the calibration processes of the CDT de Gas Corporation and comply with NTC-ISO/IEC 17025.

This validation was planed with four tests: the precision test, the veracity test, the uncertainty estimation and the evaluation and study of influencing factors.

All these tests are performed with the continuous execution and documentation of calibrations that allow for characterization by specific parameters. Specific to each test, compliance with regulatory requirements for proper bench validation and traceability was ensured.

This entire calibration process was supported by the Data Analysis Tool, previously designed by the company, which allows for efficient and controlled processing of information.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Jorge Luis Chacón Velasco, Mechanical Engineer. Tutor: Jhon Alejandro Angulo, Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

La validación de los métodos de calibración es un requisito fundamental que asegura la calidad de mediciones en laboratorios que se encuentran acreditados bajo la norma ISO/IEC 17025. En este trabajo se presenta el proceso de validación del banco GMP25, el cual es usado para calibración de medidores de volumen de gas, esta validación permite demostrar la calidad de los resultados generados mediante este banco de calibración.

El procedimiento técnico de calibración de medidores de volumen de gas establece las etapas necesarias para garantizar la trazabilidad metrológica, estimar la incertidumbre y verificar la conformidad del equipo bajo prueba.

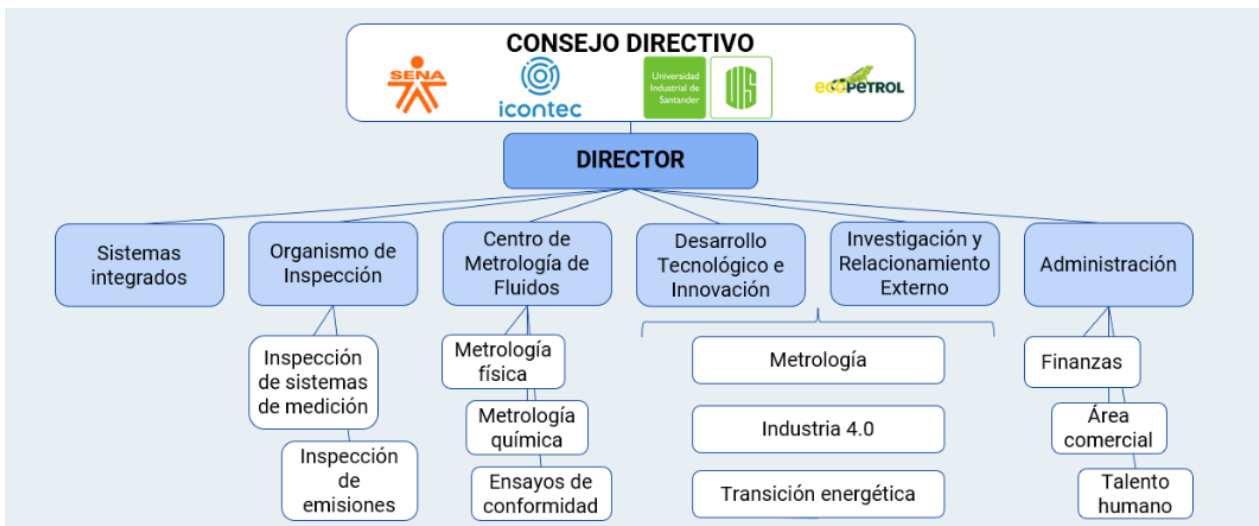
Esta validación en últimas no solo mejora la competencia técnica del CDT de gas, sino que adicionalmente asegura que el servicio de calibración ofrecido cumpla con los estándares nacionales, aumentando la confianza de los clientes y de los organismos de control en los resultados obtenidos.

1. GENERALIDADES

El Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas es una institución sin ánimo de lucro, autónoma e independiente, la cual cuenta con un reconocimiento como centro de desarrollo tecnológico por MINCIENCIAS (resolución 0334 de 2018 de Colciencias). El CDT de gas fue creado en 1999, y en toda su historia no ha contado con inversores constantes como gremios o instituciones. Por lo cual el CDT de gas optó por realizar actividades secundarias que le permitieran generar excedentes los cuales son invertidos para proyectos de investigación, desarrollo tecnológico y/o innovación (I+D+i), las cuales son las actividades nucleares de un CDT. Entre las actividades secundarias que realizan para permitir ser sostenibles se encuentran la prestación de servicios científicos y tecnológicos, formación de personal para la investigación, asesoría y consultoría (García, 2020).

Para tener un panorama más grande de todo lo que comprende el CDT de gas se presenta el organigrama de la empresa:

Figura 1. Organigrama de CDT de gas.

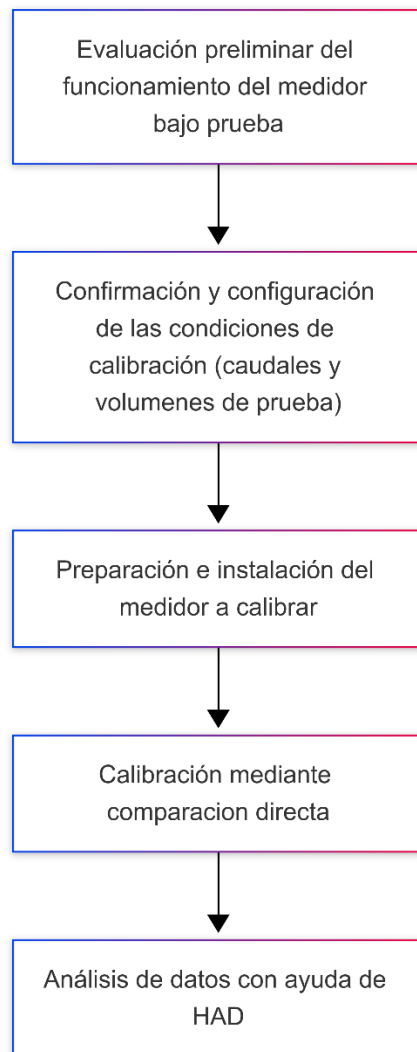


Fuente: García (2020).

Dentro de estas actividades secundarias se encuentra el Centro de Metrología de Fluidos (CMF) el cual dentro de sus actividades para aportar a la sostenibilidad del CDT de gas se encuentra la calibración y comprobación de diferentes equipos como lo son medidores de temperatura (RTD, termocupla), generadores de temperatura, medidores de presión y medidores de volumen de gas, para estos procesos un aspecto importante es tener acreditación antes ONAC con la norma ISO-17025 de este modo se tiene una mayor confianza por parte de los clientes, se presenta una mayor competitividad del laboratorio y no se presentan limitación legales en sectores regulados.

Por lo tanto, la validación del método de calibración es fundamental en la empresa ya que permite demostrar ante el ente acreditador como la precisión y exactitud del proceso realizado cumplen criterios normativos y el cómo afectan diferentes factores en los resultados de medición. En esta ocasión el enfoque será en el procedimiento técnico de calibración de medidores de volumen de gas el cual cuenta con el siguiente proceso:

Figura 2. Procedimiento técnico de calibración.



Fuente: Elaboración propia

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Corporación CDT de GAS, en su compromiso por mejorar la calidad y confiabilidad de sus procesos de calibración, ha implementado el banco de calibración de medidores de gas tipo diafragma y rotativos en bajos y medios caudales GMP25. Esta iniciativa busca garantizar que los procesos de calibración se realicen conforme a los estándares establecidos en la NTC-ISO/IEC 17025 (United Nations Industrial Development Organization, 2009), asegurando así la exactitud, trazabilidad y validez de las mediciones.

La ausencia de una validación formal podría generar impactos técnicos (resultados de calibración inexactos o no trazables) y económicos (inconformidad por parte de clientes o entes reguladores) afectando así la competitividad del laboratorio.

En este contexto, la validación del GMP25 es fundamental para cumplir con los estándares de exactitud requeridos. Esta evaluación permite identificar desviaciones, analizar causas y proponer acciones correctivas, garantizando que la operación del banco este dentro de los parámetros exigidos por la normativa internacional.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Validar el método de calibración de medidores de volumen de gas para el banco GMP25 de la corporación CDT de gas utilizando herramientas estadísticas de acuerdo con los procedimientos internos establecidos en el CDT del gas, con el fin de garantizar la exactitud en los procesos de calibración de la corporación y cumplir con los requisitos de la NTC-ISO/IEC 17025:2017.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar informe de precisión intermedia del método de calibración de medidores de volumen de gas para el banco GMP25 de la corporación CDT de gas, mediante análisis de repetibilidad y reproducibilidad.
- Elaborar informe veracidad del método de calibración de medidores de volumen de gas para el banco GMP25 de la corporación CDT de gas, mediante el análisis de la comparabilidad entre los resultados de calibración obtenidos en el laboratorio del CDT del gas.
- Elaborar informe de factores influyentes del método de calibración de medidores de volumen de gas para el banco GMP25 de la corporación CDT de gas, empleando el test de Youden y Steiner.
- Confirmar el cumplimiento de los requerimientos del método de calibración de medidores de volumen de gas para el banco GMP25 de la corporación CDT de gas, durante procesos de calibración en laboratorio según norma ISO/IEC 17025
- Establecer recomendaciones que aseguren la trazabilidad y confiabilidad de las mediciones realizadas en el banco GMP25, garantizando el cumplimiento de normativas internacionales como la ISO/IEC 17025.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. GAS METER PROVER (GMP 25)

El GMP 25 es un banco de calibración diseñado para la verificación de medidores de gas tipo diafragma y rotativo, el cual tiene un rango de calibración de $0.5-25 \text{ m}^3/h$, a continuación, se observará el banco GMP 25 desde una vista isométrica que permite observar la estructura y los componentes principales.

Figura 3. Banco GMP25.



Fuente: Foto tomada de GMP25 en CDT de GAS

El banco está equipado con:

1. Un medidor de gas tipo Rotativo: TRIPLE G16.
2. Dos transmisores de presión absoluta modelo: EJA510E.

3. Tres transmisores de presión diferencial, dos modelos 616C-1 y un modelo 607-3
4. Cuatro detectores de temperatura resistivos con transmisor (RTD) modelo R3T185L384-4-00-45-T-450.
5. Un Termohigrómetro para temperatura y humedad relativa modelo HMP60M00A1A3B0.
6. Blower
7. Un plenum.
8. Ordenador portátil para interfaz Gráfica de usuario (HMI).

4.2. PRUEBAS DE VALIDACIÓN

Al momento de trabajar con un método de calibración no normalizado deben realizarse las siguientes pruebas:

4.2.1. Pruebas de precisión. La precisión de los resultados del método de calibración se investiga por medio de un diseño de experimentos con un factor por modelo de efectos aleatorio, que se conoce informalmente en el CDT del gas como “pruebas r&R”. (ASTM International, 2023)

El cálculo de las incertidumbres de repetibilidad y reproducibilidad está basado en los lineamientos de la norma NTC 3529-2, los cuales se complementan con un Análisis de Varianza (ANOVA) para el diseño con modelos de efecto aleatorios. (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

Se investigan la presencia de valores atípicos evaluando la consistencia de los datos, tanto intra-nivel como inter-nivel, utilizando los estadísticos h y k de Mandel.

4.2.2. Pruebas de veracidad. El termino de “Veracidad” se refiere al grado de concordancia entre la media aritmética de un gran número de resultados y el valor verdadero o aceptado como referencia.

El valor verdadero no se conoce exactamente nunca, pero es posible contar con un valor de referencia aceptado y la veracidad puede analizarse comparando este valor de referencia aceptado con los resultados obtenidos por el método de medición. La veracidad se expresa normalmente en términos de sesgo o desviación.

Las medidas de interés de la veracidad son el sesgo del método de medición y el sesgo de laboratorio.

4.2.3. Estimación de incertidumbre. Dentro del proceso de validación del método de calibración, es necesario realizar el modelado del mensurando, y el análisis de las diferentes fuentes de incertidumbre del proceso de medición, acorde con lo establecido en la ISO/IEC Guide 98-2008 (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008).

En todas las pruebas del proceso de validación debe reportarse la incertidumbre estimada, para este caso, este análisis debe conducir al establecimiento de las “mejores capacidades de medición” del método con lo cual se determina la capacidad de medición y calibración (CMC) (Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025, 2005).

La CMC se presenta como la menor incertidumbre que puede reportar un laboratorio con un banco de calibración en un rango específico.

4.2.4. Evaluación de posibles factores influyentes. La validación de un método no normalizado requiere la evaluación del efecto de posibles factores influyentes, además de la realización de diseños de experimentos para obtener las conclusiones pertinentes.

Para optimizar el número de experimentos realizados durante el proceso de validación, se lleva a cabo primero una evaluación de posibles factores influyentes y luego se estudian detalladamente solo aquellos factores que la evaluación indique que merecen profundización.

La evaluación de posibles factores influyentes se realiza a través del test Youden y Steiner (Norma Técnica Colombiana NTC 2062-2, 2008) que consiste en un diseño de experimentos Plackett-Burman aplicado a la evaluación de métodos de medición.

Para métodos no normalizados se deben identificar los factores que podrían afectar de manera más drástica el desempeño del método. Algunos posibles factores son temperatura, metrólogos, estabilidad, homogeneidad y rango de aplicación. Se deben completar por lo menos 7 factores para poder aplicar el test, en caso de no alcanzar este número de factores se incluyen factores que no tienen influencia sobre el método.

4.2.5. Estudio de factores influyentes. La conclusión del test de Youden y Steiner, indica que tan significativos son los factores que se evaluaron. En caso de encontrar efectos que afecten significativamente la medición es necesario investigar puntualmente para determinar si es necesario incluir una fuente de incertidumbre adicional por el factor en cuestión o si el método debe ser modificado para evitar la influencia del factor influyente. Estos estudios se realizan por medio de diseños de experimentos con un factor, cuyas conclusiones se alcanzan usando el análisis de varianza (ANOVA).

En caso de que el factor influyente ya haya sido tenido en cuenta en la ejecución de pruebas de precisión, no es necesario repetir la experimentación, y si ya se ha realizado el análisis de datos atípicos, este es válido para identificar, y posiblemente descartar los datos atípicos.

4.3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

La norma ISO/IEC 17025 especifica que los métodos de medición deben ser apropiados para la finalidad requerida, por lo cual se establecen los requerimientos de la calibración. Entre los requerimientos de calibración se encuentran las siguientes actividades (United Nations Industrial Development Organization, 2009), (Eurachem, 2014):

- Declaración del intervalo requerido de medición.
- Especificación de los ítems de calibración.

- Identificación de patrones o materiales de referencia necesarios, si aplica.
- Descripción de la aplicación prevista del método.
- Determinación de la incertidumbre objetivo de los resultados del ensayo o calibración, si aplica.
- Identificación de factores que requieren control especial, si aplica.

4.4. MODELADO DE VOLUMEN DE GAS

4.4.1. Flujo de sustancia. El flujo de una fase líquida o gaseosa en movimiento se reporta indicando la cantidad de sustancia que pasa por un tiempo sobre una unidad de tiempo y se puede expresar de dos maneras.

- Flujo masico:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (1)$$

- Flujo volumétrico:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

El caudal o flujo volumétrico varia con la presión, temperatura y composición mientras que el flujo masico no.

4.4.2. Condiciones de referencia. Para conocer la cantidad de sustancia es necesario reportar los valores de volumen y caudal a unas condiciones de presión y temperatura llamadas condiciones de referencia.

Para determinar el valor de volumen de gas en las condiciones de referencia, es necesario conocer matemáticamente la dependencia de volumen específico, presión y temperatura.

4.4.3. Modelo de gas ideal. Es la ecuación más sencilla que describe el comportamiento de los gases.

Es un modelo que aplica únicamente a presiones que se aproximan a 0 y temperaturas que se aproximan a infinito.

Sin embargo, el modelo sirve como una buena aproximación para presiones baja y temperaturas altas. El modelo es el siguiente (Çengel & Boles, 2015):

- Volumen de gas ideal (usando moles)

$$V^{ig} = \frac{nRT}{P} \quad (3)$$

$$R \text{ Constante molar de gas ideal } (8.3144 \frac{J}{mol * K})$$

También se puede presentar la misma expresión en términos masicos en la cual el modelo que lo define es el siguiente:

$$V^{ig} = \frac{mR'T}{P} \quad (4)$$

$$R' \text{ Constante especifica para cada gas}$$

A través de la ecuación (3) se puede realizar una conversión del volumen de gas a condiciones de referencia con la siguiente ecuación:

$$V_r^{ig} = V_m^{ig} \frac{P_m * T_r}{P_r * T_m} \quad (5)$$

En donde los subíndices m y r significan valores medidos y valores de referencia respectivamente.

4.5. LOS MEDIDORES DE GAS

4.5.1. Parámetros de desempeño de medidores

Resolución: Mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación correspondiente.

Coefficiente de descarga: Relación entre el caudal real y un caudal teórico o ideal a través de ciertos dispositivos.

Meter factor: Un factor de corrección adimensional usado en la industria de los hidrocarburos. Se determina dividiendo la indicación dada por un patrón de volumen sobre el volumen total reportado por el medidor.

Factor K: Factor que se utiliza con algunos medidores con la salida de indicación digital, para señalar cuantos pulsos equivalen a una unidad de volumen.

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

Error máximo permisible (EMP): Valor extremo del error de medida, con respecto a un valor de referencia conocido, permitido por especificaciones o reglamentaciones.

Intervalo de medición: Conjunto de los valores de magnitud de una misma naturaleza que un instrumento dado puede medir con una incertidumbre específica.

Caudal mínimo: Caudal más bajo en el cual se requiere que el medidor de gas opere dentro de los límites de su error máximo permisible.

Caudal máximo: Caudal más alto en el cual se requiere que el medidor de gas opere dentro de los límites de su error máximo permisible.

Caudal de transición: Caudal que ocurre entre el caudal mínimo y máximo que divide el intervalo de caudales en dos zonas, cada una caracterizada por su propio EMP.

Clases de exactitud: Los medidores de gas pueden dividirse en tres clases de exactitud: 0.5, 1 y 1.5 siendo 0.5 la más exacta y 1.5 la menos exacta.

Relación máximo-mínimo: Es el cociente entre los valores máximo y mínimo que un medidor puede medir con una incertidumbre instrumental especificada.

4.5.2. Clasificación de los medidores de cantidad de gas. Dependiendo del método empleado por el medidor para obtener el volumen de gas se puede clasificar en dos tipos, medidores de desplazamiento positivo y medidores inferenciales.

Los medidores de desplazamiento positivo pasan el gas por compartimientos con volúmenes conocidos y contabilizan la cantidad de veces que el flujo llena los compartimientos, mientras que los medidores inferenciales usan la medición de otros parámetros relacionados con el volumen para posteriormente mediante ecuaciones determinar este volumen con los parámetros medidos.

En este proyecto nos centraremos en los medidores tipo diafragma y rotativos ya que son los que permite calibrar el banco GMP25, ambos medidores están categorizados como medidores de desplazamiento positivo.

Algunos casos de medidores inferenciales son los medidores de turbina, ultrasónicos, diferenciales y de Coriolis.

MEDIDORES TIPO DIAFRAGMA. Los medidores tipo diafragma son los más utilizados para la medición de gas residencial.

Aprovecha la presión del gas para llenar y vaciar ciertos compartimientos de volumen conocidos y el movimiento se transfiere al indicador.

Unas válvulas deslizantes abren y cierran diferentes vías posibilitando el ciclo de movimiento de los compartimientos. Se requiere más de dos cámaras para que el medidor pueda trabajar sin energía externa. Por lo general llegan a tener 4 cámaras. Se llama volumen cíclico al volumen que corresponde a un ciclo de trabajo.

MEDIDORES TIPO ROTATIVO. Los medidores rotativos son muy utilizados para la medición de gas natural.

Los rotores en forma de 8 son movidos debido al paso de gas, los rotores crean cámaras de volumen conocidos en las que atrapa el gas y con esto se determina la cantidad de gas que paso.

4.6. ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD

El análisis de repetibilidad y reproducibilidad investiga la presencia de valores atípicos evaluando la consistencia de los datos intra-nivel e inter-nivel, utilizando estadísticos h y k de los cuales h representa la reproducibilidad del sistema de medición, esto quiere decir que evalúa si el sistema de medición es consistente cuando se cambia el nivel lo cual en nuestro caso equivale a cambiar de metrólogo. Mientras que el estadístico k representa la repetibilidad del sistema, esto quiere decir que evalúa la consistencia entre las mediciones realizadas en el mismo nivel lo cual significa que son realizadas por el mismo metrólogo.

Tanto para la repetibilidad como para la reproducibilidad son factores con una incertidumbre asociada, y el hecho de que sus valores coincidan o sean cercanos implica que los efectos por cambio de nivel no son significativos ya que la incertidumbre asociada al cambio de operador es atribuida en gran medida a la incertidumbre que se presenta por realizar una nueva medición.

En un caso en el que se están efectuando el mismo número de replicas para cada prueba de cada operador se pueden calcular los estadísticos h y k del siguiente modo (Corporación CDT de Gas, 2024).

- Promedio de resultados de cada prueba:

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{pi}}{n} \quad (6)$$

\bar{x}_p Promedio de los resultados de un operador

x_{pi} Resultado individual

n Numero de replicas

- Desviación estándar de los resultados de cada prueba:

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_j)^2}{n - 1}} \quad (7)$$

- Promedio de los promedios de resultados:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{j=1}^p \bar{x}_j}{p} \quad (8)$$

p Numero de niveles(metrologos)

- Sesgo de los promedios:

$$d_j = \bar{x}_j - \bar{\bar{x}} \quad (9)$$

- Desviación estándar de los promedios:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p d_j^2}{p - 1}} \quad (10)$$

- Incertidumbre asociada a repetibilidad:

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p s_j^2}{p}} \quad (11)$$

- Incertidumbre asociada a reproducibilidad:

$$S_R = \max \left(S_r, \sqrt{S_x^2 + \frac{(n - 1)S_r^2}{n}} \right) \quad (12)$$

Los valores de incertidumbre nos permiten tener una comparación del cambio que se genera en la desviación debido a la presencia de un cambio de operador, encontrar valores de incertidumbre iguales permite observar que no hubo cambio en la incertidumbre debido al cambio de metrólogo.

- Estadístico de consistencia h (Corporación CDT de Gas, 2024):

$$h_j = \frac{d_j}{S_x} \quad (13)$$

- Estadístico de consistencia k (Corporación CDT de Gas, 2024):

$$k_j = \frac{S_j}{S_r} \quad (14)$$

El estadístico h para reproducibilidad determina si los resultados obtenidos de un operador difieren de la media global mientras que el estadístico k de repetibilidad determina si la variación de los resultados de un operador difiere de la variación global, por esto este valor no puede ser menor que 0 ya que es una relación de desviaciones, las cuales son positivas.

Estos valores de h y k serán comparados con valores h y k críticos, los estadísticos deben ser menores que sus valores críticos para determinar que los datos son válidos para el cálculo de las incertidumbres de repetibilidad y reproducibilidad.

En caso contrario se debe evaluar cual fue el motivo de la variación del dato inválido, entre los posibles causales están que el operador no haya entendido o seguido el método de calibración, que los detalles del método de medición sean incorrectos, que existan problemas en la calibración de los equipos, que haya problemas con el funcionamiento de los equipos o que existan factores influyentes que no han sido tenidos en cuenta (Corporación CDT de Gas, 2024).

Tras investigar la causa se debe tomar una de las siguientes decisiones (Corporación CDT de Gas, 2024):

- Repetir el experimento de esa reproducción.
- Excluir del análisis los datos de esa reproducción.
- Dejar los datos para analizarlos.

En cada uno de los casos se debe reportar lo que se hizo y en caso de tomar la decisión de eliminar o volver a medir se realizara nuevamente los cálculos de S_T y S_R (Corporación CDT de Gas, 2024).

Los valores críticos para h y k se pueden obtener de la siguiente Cuadro:

Cuadro 1. Valores críticos h y k con nivel de significancia 1%.

p	h	k									
		n									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	
3	1,15	1,71	1,64	1,58	1,53	1,49	1,46	1,43	1,41	1,39	
4	1,49	1,91	1,77	1,67	1,60	1,55	1,51	1,48	1,45	1,43	
5	1,72	2,05	1,85	1,73	1,65	1,59	1,55	1,51	1,48	1,46	
6	1,87	2,14	1,90	1,77	1,68	1,62	1,57	1,53	1,50	1,47	
7	1,98	2,20	1,94	1,79	1,70	1,63	1,58	1,54	1,51	1,48	
8	2,06	2,25	1,97	1,81	1,71	1,65	1,59	1,55	1,52	1,49	
9	2,13	2,29	1,99	1,82	1,73	1,66	1,60	1,56	1,53	1,50	
10	2,18	2,32	2,00	1,84	1,74	1,66	1,61	1,57	1,53	1,50	
11	2,22	2,34	2,01	1,85	1,74	1,67	1,62	1,57	1,54	1,51	
12	2,25	2,36	2,02	1,85	1,75	1,68	1,62	1,58	1,54	1,51	
13	2,27	2,38	2,03	1,86	1,76	1,68	1,63	1,58	1,55	1,52	
14	2,30	2,39	2,04	1,87	1,76	1,69	1,63	1,58	1,55	1,52	
15	2,32	2,41	2,05	1,87	1,76	1,69	1,63	1,59	1,55	1,52	
16	2,33	2,42	2,05	1,88	1,77	1,69	1,63	1,59	1,55	1,52	
17	2,35	2,44	2,06	1,88	1,77	1,69	1,64	1,59	1,55	1,52	
18	2,36	2,44	2,06	1,88	1,77	1,70	1,64	1,59	1,56	1,52	
19	2,37	2,44	2,07	1,89	1,78	1,70	1,64	1,59	1,56	1,53	
20	2,39	2,45	2,07	1,89	1,78	1,70	1,64	1,60	1,56	1,53	
21	2,39	2,46	2,07	1,89	1,78	1,70	1,64	1,60	1,56	1,53	
22	2,40	2,46	2,08	1,90	1,78	1,70	1,65	1,60	1,56	1,53	
23	2,41	2,47	2,08	1,90	1,78	1,71	1,65	1,60	1,56	1,53	
24	2,42	2,47	2,08	1,90	1,79	1,71	1,65	1,60	1,56	1,53	
25	2,42	2,47	2,08	1,90	1,79	1,71	1,65	1,60	1,56	1,53	
26	2,43	2,48	2,09	1,90	1,79	1,71	1,65	1,60	1,56	1,53	
27	2,44	2,48	2,09	1,90	1,79	1,71	1,65	1,60	1,56	1,53	
28	2,44	2,49	2,09	1,91	1,79	1,71	1,65	1,60	1,57	1,53	
29	2,45	2,49	2,09	1,91	1,79	1,71	1,65	1,60	1,57	1,53	
30	2,45	2,49	2,10	1,91	1,79	1,71	1,65	1,61	1,57	1,53	

Fuente: Corporación CDT de gas (2024).

4.7. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

El análisis de varianza ANOVA sirve para identificar y cuantificar efectos aleatorios en una medición los cual nos sirve como método de confirmación que respalda la nuestra hipótesis de que no existen efectos apreciables al cambiar el metrólogo.

En este análisis se contrasta la hipótesis nula de que las medidas de varios conjuntos de datos son iguales sobre la hipótesis alternativa de que por lo menos uno de los conjuntos difiere de los demás en cuanto a su valor esperado (Corporación CDT de Gas, 2016).

En este caso los grupos de los que se habla es el cambio de metrólogo en las mediciones y lo que se comparara es el estadístico F el cual se calcula de la siguiente manera (Corporación CDT de Gas, 2024), (Corporación CDT de Gas, 2016):

- Cuadrado medio entre grupos:

$$Sa^2 = n * S_j^2 \quad (15)$$

S_j Tomado de ecuación (7).

Cuadrado medio dentro de los grupos:

$$Sb^2 = \frac{\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n \frac{(x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}}{p} \quad (16)$$

- Estadístico F:

$$F = \frac{Sa^2}{Sb^2} \quad (17)$$

El estadístico F representa que relación hay entre una desviación entre grupos en la cual se compara los resultados promedios de cada operador con un promedio general mientras que la desviación dentro de los grupos compara cada uno de las repeticiones de un operador con la media de los resultados de ese operador, realizando el proceso para cada uno de los operadores.

El valor F_{crit} corresponde al valor crítico superior de la distribución f de dos colas con $(p - 1)$ grados de libertad en el numerador y $p(n - 1)$ grados de libertad en el denominador. Un nivel de significancia recomendado para esta prueba es 0,05.

4.8. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

Para la prueba de veracidad se realiza una evaluación de desempeño de la cual se puede realizar una o más de las siguientes pruebas: Comparación contra un material de referencia, comparación de la medición de un material de referencia con la obtenida usando otro método de medición u obtenida por otro laboratorio acreditado y participación en una comparación interlaboratorio.

Debido a que el CDT del gas es una empresa que ya cuenta con otros métodos de calibración acreditados se optara por comparar la medición del material de referencia con el método del GMP25 con la medición de otros métodos ya validados dentro del laboratorio.

En este caso lo que se debe evaluar es el estadístico E_n el cual es una relación entre la diferencia de los resultados medidos por ambos métodos de calibración y la incertidumbre combinada de ambos participantes.

El estadístico E_n se calcula de la siguiente forma (Corporación CDT de Gas, 2024):

- Error normalizado:

$$E_n = \frac{X - Y}{\sqrt{U_X^2 + U_Y^2}} \quad (18)$$

X Resultados de GMP25.

Y Resultados de calibración de referencia.

U_X^2 Incertidumbre de GMP25.

U_Y^2 Incertidumbre de calibración de referencia.

Si se encuentra que el valor absoluto de E_n es menor o igual a 1 se puede inferir que la diferencia de los resultados es debido a la suma de las incertidumbres de ambos resultados.

4.9. TEST DE YOUTEN Y STEINER

El objetivo del test de Youden y Steiner es el de determinar la influencia de las variaciones de varios parámetros para esto se escogen 7 parámetros que se estiman que tengan un impacto considerable sobre los resultados de medición como lo podría ser temperatura, estabilidad, rango de aplicación y metrólogo.

Este test permite evaluar el efecto de 7 variables con 8 experimentos, por lo cual para cada parámetro se analiza a través de un valor alto (A, B, ..., G) y otro bajo (a, b, ... ,g) y los experimentos o análisis que se realizan presentan una combinación de parámetros que son determinados por el cuadro 2.

Cuadro 2. Distribución de niveles en los experimentos del test de Youden y Steiner.

Valor de la Variable	Análisis							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A,a	A	A	A	A	a	a	a	a
B,b	B	B	b	b	B	B	b	b
C,c	C	c	C	c	C	c	C	c
D,d	D	d	D	d	d	D	d	D
E,e	E	e	e	E	E	e	e	E
F,f	F	f	f	F	f	F	F	f
G,g	G	G	g	g	g	g	G	G
Resultados	s	t	u	v	w	x	y	z

Fuente: Corporación CDT de gas (2024).

Para analizar estos datos es necesario determinar la media de los cuatro análisis con la variable a analizar más alta, que serían (s, t, u, v) con respecto al valor de la variable A y la que tienen el valor de la variable a analizar más baja que serían (w, x, y, z) con respecto al valor de la variable a.

Estableciendo valores de variables A y a cómo (Corporación CDT de Gas, 2024):

- Media de resultados con efecto A.

$$\frac{(s + t + u + v)}{4} = A \quad (19)$$

- Media de resultados con efecto a.

$$\frac{(w + x + y + z)}{4} = a \quad (20)$$

Calculando estas variables para los efectos desde la a hasta la g y realizando comparaciones del valor alto con el valor bajo con lo cual se obtendrán las siguientes comparaciones posibles.

(A-a), (B-b), (C-c), (D-d), (E-e), (F-f), (G-g)

Para determinar si un parámetro es influyente debe cumplir que la diferencia entre el valor alto y el valor bajo sea mayor que $\sqrt{2} * s$, siendo s la incertidumbre de medición. En caso contrario se puede concluir que el parámetro que se analizó no es influyente en los resultados entregados (Corporación CDT de Gas, 2024).

4.10. PROCESO DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE

El método GUM aprovecha simplificaciones para poder aproximar la distribución de probabilidad del mensurando. Funciona muy bien en problemas de medición sencillos, y en aquellos en los cuales la linealización es una buena alternativa de representación del modelo y no hay fuentes de variabilidad con distribuciones diferentes a la normal que dominen en el aporte a la incertidumbre del mensurando. Para realizar la estimación de incertidumbre con este método se deben seguir con los pasos que se detallaran a continuación (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008).

4.10.1. Definición del mensurando. El mensurando es la magnitud que se desea cuantificar.

Una adecuada definición del mensurando puede necesitar afirmaciones acerca de las condiciones en que se obtiene o calcula su valor como por ejemplo presión, temperatura y/o tiempo.

4.10.2. Determinación de magnitudes de entrada y fuentes de variabilidad. Se determinan las magnitudes de entrada que deben ser cuantificadas para poder calcular el valor del mensurando. Esto depende tanto del método de medición que se vaya a utilizar como del mensurando.

Para cada magnitud de entrada deben determinarse las fuentes de variabilidad cuya influencia se puede estimar. Las fuentes de variabilidad son las diferentes causas que pueden ocasionar que el valor de una magnitud de entrada varíe, tratando de incluir todas las fuentes incluso las que desvíen las magnitudes de entrada levemente.

Cada fuente de variabilidad debe ser registrada con sus respectivos parámetros asociados o estimados, sin embargo, usualmente el proceso para obtener una magnitud de entrada a través de las fuentes de variabilidad es una suma simple de la cual la única que presenta una media diferente de 0 es la fuente de variabilidad asociada a la medición, en este caso la media será la media de los valores medidos y las demás fuentes aportaran solo incertidumbre al resultado de la magnitud.

Únicamente deben considerarse las fuentes de variabilidad que afecten magnitudes de entrada declaradas. Esto debido a que las magnitudes de entrada son las que propagan la incertidumbre hacia el mensurando, esto evita incluir fuentes de variabilidad que no afecten al mensurando.

4.10.3. Creación del modelo de medición. En esta etapa no basta solo con reconocer que magnitudes afectan el mensurando sino de qué manera afectan.

Es fundamental que el modelo de medición sea adecuado ya que de esto depende que el resultado de medición sea correcto y que la incertidumbre estimada del mensurando esté bien calculada.

En la mayoría de los casos una revisión del estado del arte permite encontrar un modelo adecuado para el mensurando que se desea medir con la siguiente estructura.

- Modelo del mensurando:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (21)$$

X_1, X_2, \dots, X_N *Magnitudes de entrada.*

Toda fuente de variabilidad debe quedar representada en solo una fuente de magnitud en el modelo de medición de este modo se evita introducir fuentes de incertidumbre que no existen o duplicadas.

4.10.4. Medición. Es importante realizar varias réplicas de las mediciones, incluyendo las mediciones de las magnitudes de entrada. De otra manera no sería posible estimar la incertidumbre en condición de repetibilidad. Además de que errores en la medición pasarían desapercibidos al no tener referencia otros valores de referencia.

Es recomendable realizar como mínimo 3 repeticiones en cualquier proceso de medición asegurando que el promedio no dependa de un valor anómalo y cumpliendo con normas internacionales (ISO/GUM) para evaluar la incertidumbre experimental.

4.10.5. Cuantificación de las fuentes de variabilidad. Esta etapa consiste en representar adecuadamente las fuentes de variabilidad por medio de distribuciones de probabilidad. El proceso que se realiza es teniendo información de los parámetros de las fuentes de variabilidad y su tipo de distribución se estima una incertidumbre asociada a cada fuente de variabilidad, en el caso de la media como se mencionó anteriormente todos tienen valor de 0 exceptuando por la fuente de variabilidad de medición el cual tendrá media igual a la media de las mediciones (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008).

Entre las fuentes de variabilidad se pueden encontrar de dos tipos, tipo A y tipo B de la cuales las tipo A son fuentes de variabilidad se obtienen experimentalmente mientras que las tipo B son fuentes de variabilidad que no se obtienen experimentalmente como es el caso de incertidumbres de repetibilidad dadas por fabricantes o institutos de calibración externos.

Entre las fuentes de variabilidad tipo A lo más común es que cuenten con una distribución de probabilidad t la cual presenta un número específico de datos obtenidos experimentalmente (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008).

- Incertidumbre en distribución t-student.

$$u(X_{i,a}) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (22)$$

S Desviación estandar de los resultados.

n Numero de resultados.

En el caso de las fuentes de variabilidad tipo B tienen diferentes distribuciones de probabilidad asociada por lo cual se mencionarán los cálculos para determinar la incertidumbre asociada a los tipos de distribución de probabilidad más usados (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008).

- Incertidumbre en distribución continua uniforme:

$$u(X_{i,b}) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \quad (23)$$

a_+ Valor máximo

a_- Valor mínimo

- Incertidumbre en distribución triangular:

$$u(X_{i,b}) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{24}} \quad (24)$$

4.10.6. Cálculo del resultado de la medición. Para el cálculo de los resultados se presentan dos maneras.

Primera manera: En este primer método lo que se hace es reemplazar en el modelo de medición los valores promedio de cada una de las magnitudes de entrada medidas experimentalmente.

Segunda manera: Este caso solo puede aplicarse si en cada medición se tomaron datos de todas las magnitudes de entrada, en cada replica se calcula el resultado de medición usando el modelo de medición para posteriormente promediar los resultados de medición de cada replica.

4.10.7. Estimación de la incertidumbre. La incertidumbre estándar $u_c(y)$ del mensurando Y se estima a partir de las incertidumbres $u(x_i)$ de las magnitudes de entrada X_i y del modelo de medición $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ con la siguiente expresión (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008):

- Incertidumbre estándar del mensurando:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (25)$$

$u(x_i)$ Incertidumbre de la magnitud de entrada

Esta incertidumbre representa la duda que se tiene acerca del resultado obtenido, este valor se tomara con 2 cifras significativas.

Este proceso se realiza del mismo modo para estimar la incertidumbre de las magnitudes de entrada a partir de la incertidumbre de las fuentes de variabilidad. En este caso ya que el modelo para determinar las magnitudes de entrada a partir de las fuentes de variabilidad es una suma simple, las derivadas de la magnitud con respecto a las fuentes siempre será igual a 1 por lo cual se simplifica la ecuación del siguiente modo (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008):

- Incertidumbre de una magnitud de entrada:

$$u(x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^N u^2(x_{i,j})} \quad (26)$$

$u(x_{i,j})$ Incertidumbre de una fuente de variabilidad.

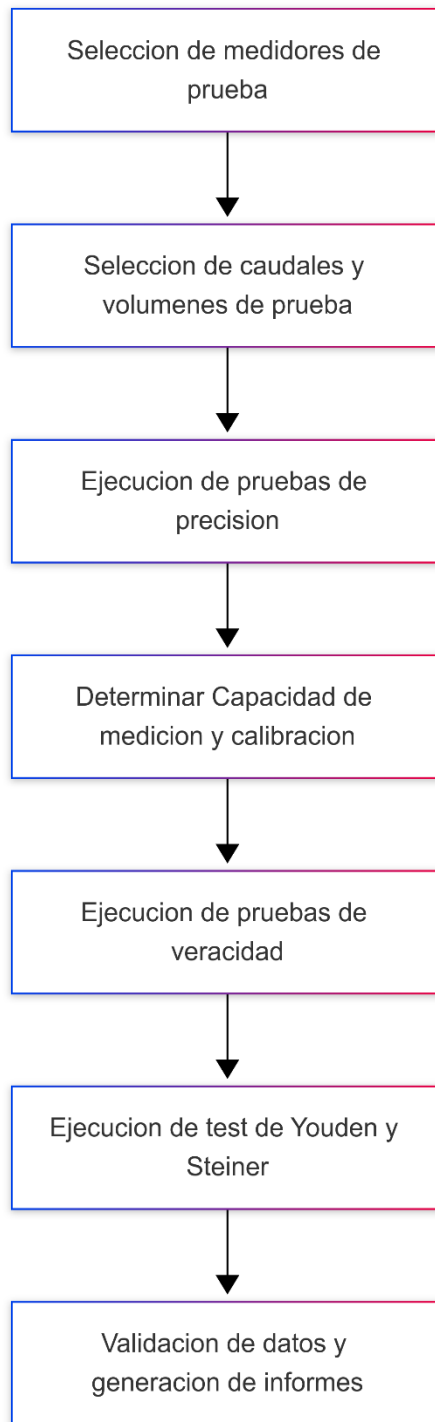
5. METODOLOGÍA

El proceso usado para la validación mostrado en la figura 4 consiste en la ejecución secuencial de pruebas destinadas a verificar si la exactitud de las mediciones obtenidas de calibraciones cumple con los requisitos establecidos por la normativa vigente.

Se priorizó el uso de medidores representativos para los rangos de operación del GMP25, con el fin de que la validación refleje rangos y tecnologías características del banco.

Los parámetros que se evalúan se presentan en el cuadro 2 con sus respectivos criterios de aceptación.

Figura 4. Secuencia experimental del proceso de validación.



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3. Parámetros de evaluación empleados en la validación del método.

Parámetro	Característica	Criterio de aceptación	Condición de prueba	Normativa
Precisión	Repetibilidad	$k \leq k_{crit}$	3 réplicas por metrologo en cada prueba	NTC 3529-2
	Reproducibilidad	$h \leq h_{crit}$	3 metrologos efectuando pruebas	
	ANOVA	$f \leq f_{crit}$	Datos de pruebas "r&R"	JCGM 100:2008
Veracidad	Números En, Comparación con otro método	$ En \leq 1$	Calibración de 3 equipos de medición (diafragma y rotativos) en 4, 6 y 2 puntos respectivamente, en dos bancos de calibración alternos y un laboratorio externo.	ISO 13528:2022
Factores influyentes	Test de Youden y Steiner	$ X - x \leq \sqrt{2}S$	7 variables analizadas, 8 pruebas efectuadas.	ASTM E691-23

Fuente: Adaptado de Corporación CDT de Gas (2016).

El número de puntos a tener en cuenta en cada calibración está especificado en el procedimiento técnico de calibración del CDT de gas, adicionalmente se encuentra el número de repeticiones mínimas que se deben realizar para cada punto de medición.

Cuadro 4. Caudales de prueba y número de repeticiones.

TECNOLOGÍA	CAUDALES DE PRUEBA								Nº mínimo de Repeticiones
	Q _{mín}	0,05	0,10	0,20	0,25	0,40	0,70	Q _{máx}	
		Q _{má}	Q _{má}	Q _{má}	Q _{má}	Q _{má}	Q _{má}		
		x	x	x	x	x	x		
DIAFRAGMA	X			X				X	3
ROTATIVO	X	X	X		X	X	X	X	3

Fuente: Corporación CDT de Gas (2022).

En cuanto al volumen de prueba, se recomienda que cada punto de calibración tenga una duración mínima de tres minutos como se especifica en el método de calibración permitiendo así estabilizar el sistema y mejorando la repetibilidad estadística.

Para el caso de medidores de gas tipo diafragma el volumen de prueba mínimo se establece en la siguiente Cuadro:

Cuadro 5. Volúmenes de prueba para un medidor tipo diafragma.

Q _{máx}	Designación	Vol a Q _{mín} *	Vol a 0,2 Q _{máx}	Vol a Q _{máx}
m ³ /hr	n	m ³	m ³	m ³
2,5	G1.6	0,02	0,1	0,2
4	G2.5	0,02	0,1	0,2
6	G4	0,03	0,1	0,3
10	G6	0,03	0,2	0,5
16	G10	0,15	0,3	0,9
25	G16	0,15	0,45	1,3

Fuente: Corporación CDT de Gas (2022).

5.1. PRUEBAS DE PRECISIÓN

Para las pruebas de precisión se usarán dos medidores rotativos seleccionados por su alta estabilidad de lectura lo que optimiza la estimación de repetibilidad y reproducibilidad.

Cuadro 6. Medidor bajo prueba MUT1.

Tipo:	Rotativo	
Fabricante:	Flow Meter Group	
Referencia:	FMR-M20	
ID:	MUT1	
Alcance:	0,16 m ³ /h a 10 m ³ /h en condiciones estándar.	


Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 7. Medidor bajo prueba MUT2.

Tipo:	Rotativo	
Fabricante:	Dresser	
Referencia:	IMR-RM REF G16 ANSI 150	
ID:	MUT2	
Alcance:	0,5 m ³ /h a 25 m ³ /h en condiciones estándar.	

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 8. Medidor patrón.

Tipo:	Rotativo	
Fabricante:	Precisión gas measurement	
Referencia:	TRIPLE G16	
ID:	MM	
Alcance:	0,5 m ³ /h a 25 m ³ /h en condiciones estándar.	

Fuente: Elaboración propia.

El MUT1 presenta un rango de 0.16-10 m^3/h y el Q_t se encuentra en el caudal 1 m^3/h , por lo cual el rango de linealidad del equipo es de 1 a 10 m^3/h , cubriendo la mayor parte del rango del patrón de referencia. El MUT2 presenta un rango de 0.5-25 m^3/h y el Q_t se encuentra en el caudal 2.5 m^3/h , por lo cual el rango de alta linealidad del equipo es de 2.5 a 25 m^3/h . Este último permite evaluar puntos altos de caudal no alcanzados por el MUT1, asegurando cobertura total del rango operativo del banco.

Por lo cual se harán 3 réplicas con 3 diferentes metrólogos de las siguientes calibraciones:

Cuadro 9. Calibraciones de las pruebas r&R y ANOVA.

ID	Tipo	Banco	Caudal [m^3 / h]	Volumen [m^3]	Repeticiones
MUT2	Rotativo	GMP 25	17,5	0,875	6
			25	1,25	6
MUT1	Rotativo	GMP 25	0,5	0,025	6
			1,25	0,0625	6
			2,5	0,125	6
			4	0,2	6
			6,25	0,3125	6
			10	0,5	6

Fuente: Elaboración propia.

5.2. PRUEBAS DE VERACIDAD

En este caso se tomarán los mismos puntos que se trabajaron en las pruebas de precisión y adicionalmente se usara un medidor tipo diafragma (MUT 3), elegido para incorporar un medidor de tecnología distinta que permita contrastar su comportamiento con los rotativos.

Cuadro 10. Medidor bajo prueba MUT3

Tipo:	Diafragma	
Fabricante:	Shinagawa	
Referencia:	DS-2.5 A-T	
ID:	MUT3	
Alcance:	0.16 m³/h a 2.5 m³/h en condiciones estándar.	

Fuente: Elaboración propia.

Las calibraciones que se realizaran y su respectiva referencia para realizar la comparación y realizar las pruebas de desempeño son las siguientes:

Cuadro 11. Calibraciones de referencia.

ID	Tipo	Banco/Laboratorio externo	Caudal [m ³ /h]	Volumen [m ³]	Repeticiones
MUT3	Diafragma	Campana gasométrica	0,5	0,1	6
			1,25	0,2	6
			1,75	0,2	6
			2,5	0,2	6
MUT2	Rotativo	BAC	17,5	0,875	6
			25	1,25	6
MUT1	Rotativo	VSL	0,5	0,025	6
			1,25	0,0625	6
			2,5	0,125	6
			4	0,2	6
			6,25	0,3125	6
			10	0,5	6

Fuente: Elaboración propia.

5.3. TEST DE YODEN Y STEINER

Este ensayo evaluara factores influyentes bajo condiciones controladas, de acuerdo a los parámetros establecidos en el cuadro 12:

Cuadro 12. Parámetros empleados en la evaluación de factores influyentes.

Designación	Parámetro	Condición Nominal Valor alto (X)	Variación Valor bajo (x)	Efecto estimado	Observaciones
A/a	Metrólogo.	Metrólogo.	Metrólogo junior.	Medio	Se evalúa el efecto en el cambio de metrólogo para incluir efectos de r&R.
B/b	Estabilización de caudales.	5 repeticiones por punto de medición.	3 repeticiones por punto de medición.	Medio	Se evalúa el efecto de la cantidad de repeticiones sobre los resultados.
C/c	Secuencia de calibración.	Descendente.	Ascendente.	Despreciable	Se evalúa el efecto de la secuencia de calibración, la cual no debe afectar la medición.
D/d	Posición del medidor.	Posición 1.	Posición 3.	Bajo	Se evalúa el efecto de la posición del medidor al realizar la calibración de

					un medidor específico, este medidor pasa de la primera a la tercera posición.
E/e	Instalación de MUT.	Buena alineación y fugas mínimas.	Mala alineación y fugas considerables.	Medio	Se evalúa el efecto de la condición del montaje del MUT realizando una mala alineación y no apretando completamente el acople.
F/f	Personas presentes en el área.	Solo el metrólogo en el área de calibración durante el tiempo de la prueba.	2 personas en el área de calibración durante el tiempo de la prueba.	Bajo	Se evalúa el efecto de estar con más metrólogos en el laboratorio durante calibraciones de bajos y medios caudales.
G/g	Ruido por otros equipos.	El banco es el único funcionando en el área.	Se encuentra en uso el	Bajo	Se evalúa el efecto de un equipo en funcionamiento

			banco de pistones.		o cercano al banco, en este caso el banco de pistones es el más cercano.
--	--	--	--------------------	--	--

Fuente: Elaboración propia.

Se realizarán los 8 casos que se presentan en el cuadro 1 realizando 6 repeticiones para cada caso y se trabajara en el Qmin del medidor patrón ($0.5 \text{ m}^3/h$).

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. RESULTADOS DE PRECISIÓN

De acuerdo a la ejecución del diseño de experimentos, los parámetros n (número de réplicas) y p (niveles de reproducibilidad) presentaron los siguientes valores: $p=3$ y $n=3$, para los cuales los valores críticos fueron $h=1,15$ y $k=1,64$.

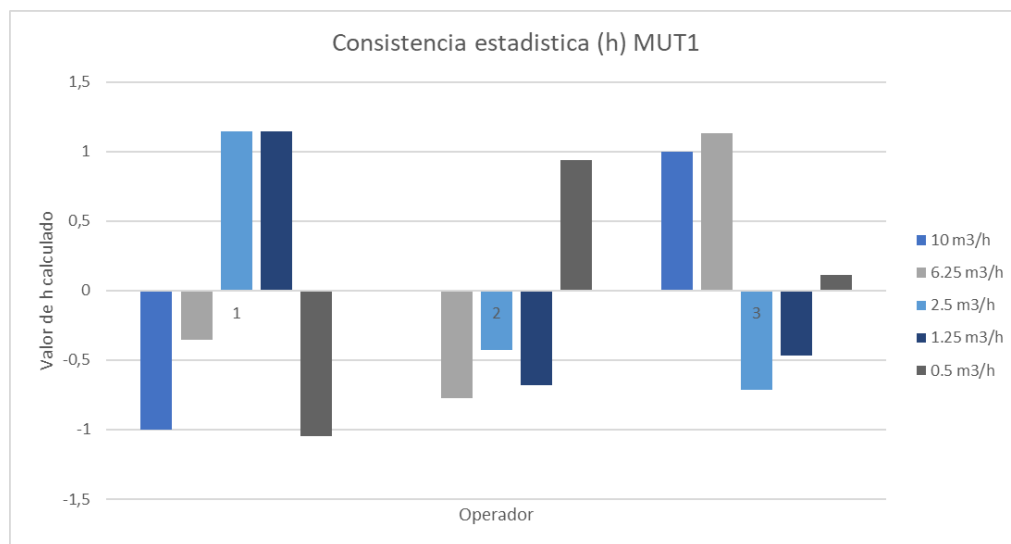
A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de consistencia para h y k del MUT1 y MUT2.

Cuadro 13. Resultados de estadístico h de MUT1.

Operador	Caudal [m^3/h]				
	10	6,25	2,5	1,25	0,5
1	-1,000	-0,353	1,143	1,148	-1,050
2	0,000	-0,776	-0,430	-0,679	0,941
3	1,000	1,129	-0,713	-0,470	0,110

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Gráfico de la prueba con estadístico h de MUT1.



Fuente: Elaboración propia.

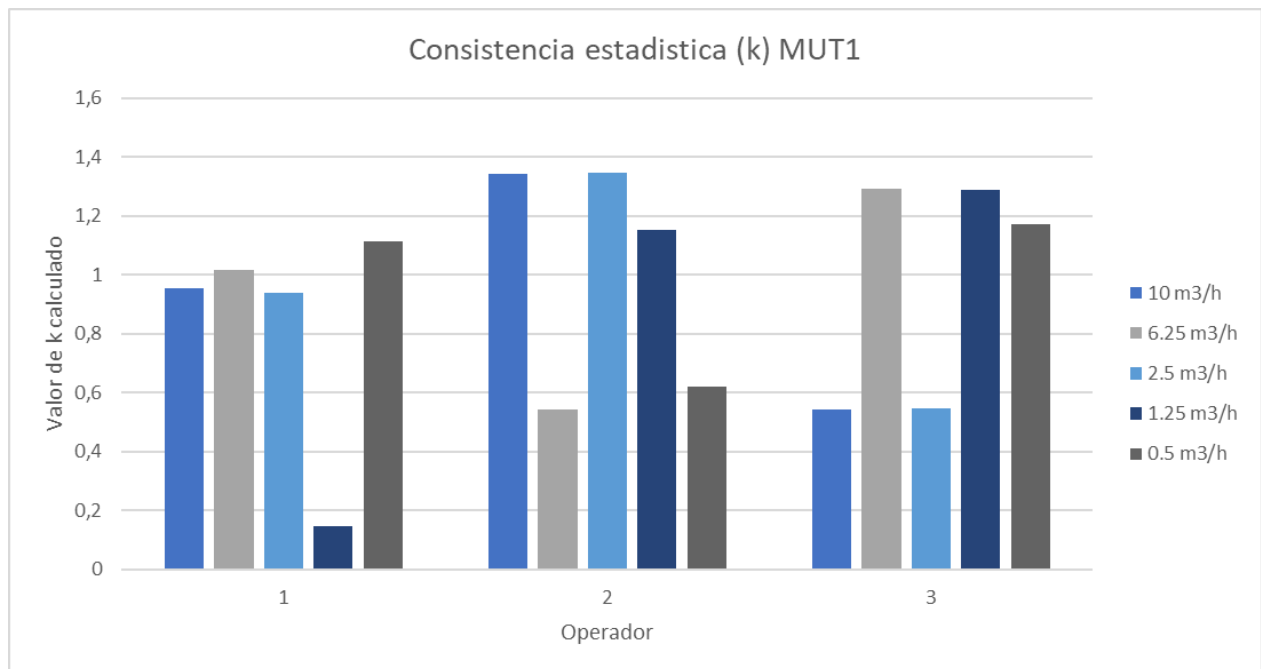
Como se observa en la figura 5 el metrólogo 1 es el que presenta los resultados que más difieren con respecto a la media de todos los metrólogos al trabajar con el MUT1 teniendo valores mayores que 1 en 4 de los 5 caudales.

Cuadro 14. Resultados de estadístico k de MUT1.

Operador	Caudal [m^3/h]				
	10	6,25	2,5	1,25	0,5
1	0,953	1,017	0,940	0,148	1,114
2	1,342	0,544	1,347	1,151	0,619
3	0,541	1,292	0,548	1,286	1,173

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Gráfico de la prueba con estadístico k de MUT1.



Fuente: Elaboración propia.

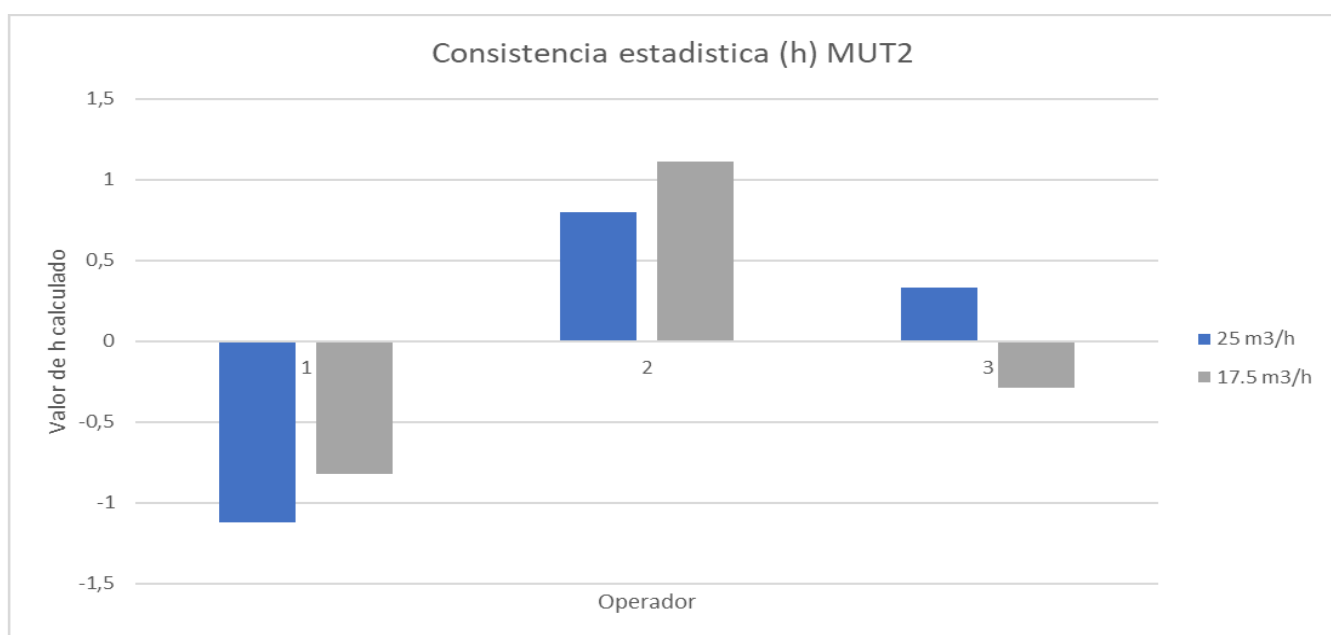
En la figura 6 se aprecia que los metrólogos 2 y 3 presentaron la mayor dispersión en sus resultados cuando realizaron la calibración con el medidor en prueba (MUT1). Esto se evidencia porque en tres de los cinco caudales evaluados, el estadístico k superó el valor de 1,1.

Cuadro 15. Resultados de estadístico h de MUT2.

Operador	Caudal [m^3/h]	
	25	17,5
1	-1,123	-0,825
2	0,795	1,112
3	0,328	-0,287

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Gráfico de la prueba con estadístico h de MUT2.



Fuente: Elaboración propia.

Con este segundo medidor se presentan sesgos considerables del operador 1 y 2 en 25 m³/h y 17,5 m³/h respectivamente.

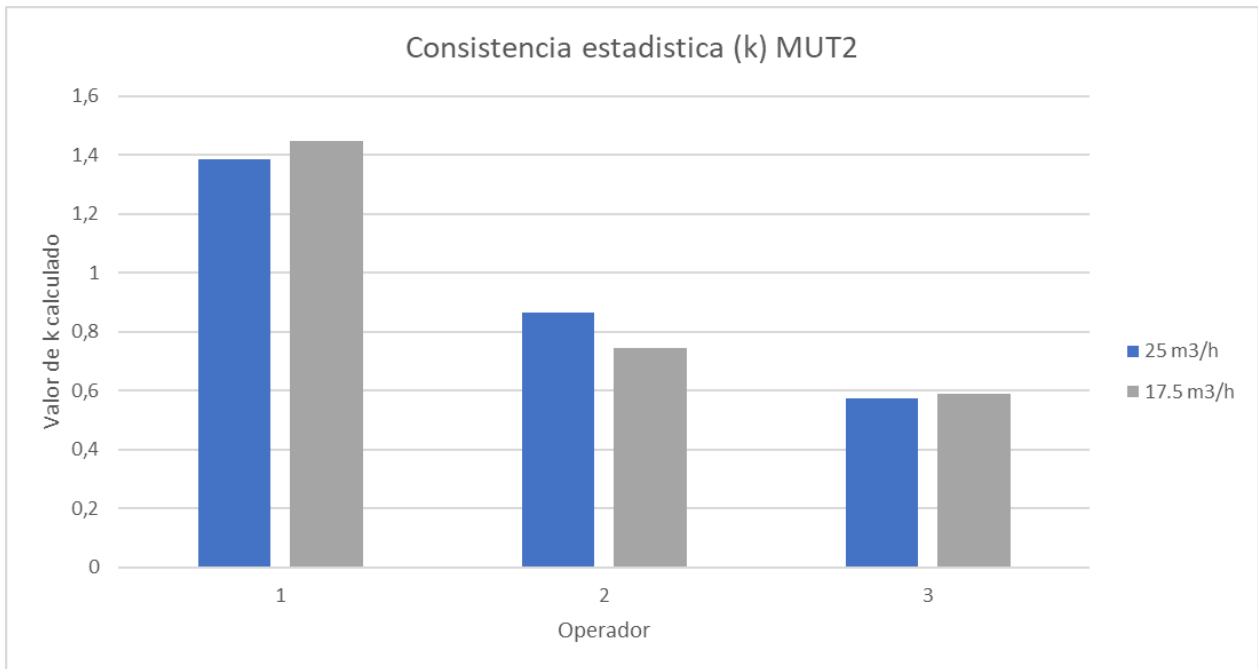
Cuadro 16. Resultados de estadístico k de MUT2.

Operador	Caudal [m^3/h]	
	25	17,5
1	1,386	1,448
2	0,866	0,746

3	0,575	0,589
---	-------	-------

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Gráfico de la prueba con estadístico k de MUT2.



Fuente: Elaboración propia.

Con este medidor el operador 1 presentó una desviación de sus resultados considerablemente alta con respecto a los otros operadores.

Para todos los tratamientos considerados, los estadísticos de h y k fueron menores que los valores críticos correspondientes a los valores n y p. Esto permite concluir que en la ejecución del diseño de experimentos llevado a cabo para determinar las incertidumbres de repetibilidad y reproducibilidad **no se presentaron experimentos inconsistentes**, y por consiguiente **todos los datos son válidos para el cálculo de dichas incertidumbres**, sin embargo, se presentaron valores muy cercanos al valor crítico, lo cual evidencia la presencia de variabilidad significativa.

Las incertidumbres calculadas por repetibilidad y reproducibilidad para cada uno de los caudales de aire evaluados para el MUT1 y MUT2 se presentan en el cuadro 17. Particularmente, se obtuvo el mismo valor para ambas incertidumbres en 4 de los 7

puntos evaluados, permitiendo identificar que en estos puntos no hubo un efecto apreciable por el cambio de metrólogo y toda la incertidumbre es atribuible a la repetibilidad.

Cuadro 17. Incertidumbres por repetibilidad y reproducibilidad calculadas

Tipo de incertidumbre	Caudal nominal[m ³ /h]						
	MUT2		MUT1				
	25	17,5	10	6,25	2,5	1,25	0,5
Repetibilidad	0,0105	0,0084	0,0105	0,0247	0,0145	0,0179	0,0303
Reproducibilidad	0,0107	0,0084	0,0107	0,0247	0,0145	0,0179	0,0339

Fuente: Elaboración propia.

6.2. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

Con los datos que se consideran validos de acuerdo a las pruebas de r&R se realizó el ANOVA del cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 18. Análisis de varianza de los resultados obtenidos MUT1.

	Caudal [m ³ / h]				
	10	6,25	2,5	1,25	0,5
<i>S_j</i>	0,006	0,005	0,008	0,006	0,023
<i>S_a²</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002
<i>S_b²</i>	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001
F	1,088	0,110	0,977	0,382	1,774
F crítico	5,143	5,143	5,143	5,143	5,143
Conclusión	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 19. Análisis de varianza de los resultados obtenidos MUT2.

	Caudal [m^3/h]	
	25	17,5
S_j	0,006	0,003
Sa^2	0,000	0,000
Sb^2	0,000	0,000
F	1,129	0,410
F crítico	5,143	5,143
Conclusión	Aceptado	Aceptado

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los factores calculados con los valores críticos de F, se concluye que en la mayoría de los puntos **no existe evidencia significativa de que el cambio de metrólogo afecte la incertidumbre del nivel**, ya que F es mucho menor a F crítico. El análisis de la varianza permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de varios conjuntos de datos son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que por la menos uno de los conjuntos difiere de los demás en cuanto a su valor esperado.

Este análisis permite identificar a su vez (considerando que las calibraciones se realizan en descenso), que los puntos en los cuales el efecto del metrólogo es apreciable fueron los primeros en ejecutarse (25 m^3/h y 10 m^3/h). Esto puede deberse principalmente al tiempo de puesta en régimen, entendido como el tiempo que transcurre hasta que los elementos de flujo del banco de calibración (incluyendo patrones) y el medidor bajo prueba alcanzan estabilidad térmica con el medio, razón por la cual debería tenerse cuidado en este aspecto durante un proceso de calibración, otro punto apreciable es en el Q_{min} y esto puede deberse a que esta caudal se encuentra en la zona de no linealidad del MM y del MUT.

6.3. ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE Y DETERMINACIÓN DE CMC

A partir de los cálculos realizados y resumidos en las Cuadros 20 y 21, se obtuvo la estimación de la incertidumbre combinada para cada rango de caudal evaluado usando el método GUM. Posteriormente, mediante la aplicación de un factor de cobertura $k=2$, se determinó la incertidumbre expandida, la cual asegura un nivel de confianza aproximado del 95 %.

Cuadro 20. CMC del GMP25 en el rango 0.5 m³/h a 1 m³/h

Intervalo	Fuente de incertidumbre	Incertidumbre original		Distribución	Incertidumbre estándar $u(x_i)$		Coeficiente de sensibilidad		Incertidumbre $u(y)$
		Valor	Unidades		Valor	Unidades	Valor	Unidades	
0,5 m ³ .h a 1 m ³ .h	Temperatura Patrón	20,375	°C	-	1,20E-01	°C	3,41E-01	%E/°C	4,08E-02
	Clase	0,200	°C	Rectangular	1,15E-01	°C	1,0	Adimensional	-
	Resolución	0,010	°C	Rectangular	2,89E-03	°C	1,0	Adimensional	-
	Deriva	0,067	°C	Rectangular	1,93E-02	°C	1,0	Adimensional	-
	Prof. Inmersión	0,050	°C	Normal, k	2,50E-02	°C	1,0	Adimensional	-
	Temperatura Instrumento	19,900	°C	-	1,20E-01	°C	-3,41E-01	%E/°C	4,09E-02
	Repetibilidad	0,011	°C	Normal	4,49E-03	°C	1,0	Adimensional	-
	Clase	0,200	°C	Rectangular	1,15E-01	°C	1,0	Adimensional	-
	Resolución	0,010	°C	Rectangular	2,89E-03	°C	1,0	Adimensional	-
	Deriva	0,067	°C	Rectangular	1,93E-02	°C	1,0	Adimensional	-
	Prof. Inmersión	0,050	°C	Normal, k	2,50E-02	°C	1,0	Adimensional	-
	Presión Patrón	904,061	hPa	-	4,68E-01	hPa	-1,11E-01	%E/hPa	5,18E-02
	Repetibilidad	0,084	hPa	Normal	3,45E-02	hPa	1,0	Adimensional	-
	Clase	0,800	hPa	Rectangular	4,62E-01	hPa	1,0	Adimensional	-
	Resolución	0,010	hPa	Rectangular	2,89E-03	hPa	1,0	Adimensional	-
	Deriva	0,240	hPa	Rectangular	6,93E-02	hPa	1,0	Adimensional	-
	Presión Instrumento	903,969	hPa	-	4,68E-01	hPa	1,11E-01	%E/hPa	5,18E-02
	Repetibilidad	0,086	hPa	Normal	3,50E-02	hPa	1,0	Adimensional	-
	Clase	0,800	hPa	Rectangular	4,62E-01	hPa	1,0	Adimensional	-
	Resolución	0,010	hPa	Rectangular	2,89E-03	hPa	1,0	Adimensional	-
	Deriva	0,240	hPa	Rectangular	6,93E-02	hPa	1,0	Adimensional	-
	Error del Patrón	-0,578	%	-	1,64E-01	%	1,01E+00	%E/%e	1,65E-01
	Repetibilidad	0,007	%	Normal	2,86E-03	%	1,0	Adimensional	-
	Calibración	0,307	%	Normal, k	1,56E-01	%	1,0	Adimensional	-
	Residuo Interpolación	0,035	%	Normal, k=1	3,48E-02	%	1,0	Adimensional	-
	Deriva	0,125	%	Rectangular	3,62E-02	%	1,0	Adimensional	-
	lumen registrado por Patrón	0,025	m ³	-	5,86E-06	m ³	-4,02E+03	%E/lmm	2,35E-02
	Resolución	0,00002	m ³	Rectangular	5,86E-06	m ³	1,0	Adimensional	-
	Error de Medición	0,032	%	-	1,71E-02	%	1,00E+00	%E	1,71E-02
	Repetibilidad	0,042	%	Normal	1,71E-02	%	1,0	Adimensional	-
Incertidumbre combinada									0,19
Grados efectivos de libertad									382
Factor de cobertura									2,0
Incertidumbre expandida U									0,38

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 21. CMC del GMP25 en el rango 1 m³/h a 25 m³/h

Intervalo	Fuente de incertidumbre	Incertidumbre original		Distribución	Incertidumbre estándar u(x)		Coeficiente de sensibilidad		Incertidumbre u(y)
		Valor	Unidades		Valor	Unidades	Valor	Unidades	
1 m ³ .h a 25 m ³ .h	Temperatura Patrón	20,227	°C	-	1,20E-01	°C	3,42E-01	%E/°C	4,10E-02
	Repetibilidad	0,008	°C	Normal	3,39E-03	°C	1,0	Adimensional	-
	Clase	0,200	°C	Rectangular	1,15E-01	°C	1,0	Adimensional	-
	Resolución	0,010	°C	Rectangular	2,89E-03	°C	1,0	Adimensional	-
	Deriva	0,067	°C	Rectangular	1,93E-02	°C	1,0	Adimensional	-
	Prof. Inmersión	0,050	°C	Normal, k	2,50E-02	°C	1,0	Adimensional	-
	Temperatura Instrumento	19,819	°C	-	1,20E-01	°C	-3,42E-01	%E/°C	4,10E-02
	Repetibilidad	0,013	°C	Normal	5,17E-03	°C	1,0	Adimensional	-
	Clase	0,200	°C	Rectangular	1,15E-01	°C	1,0	Adimensional	-
	Resolución	0,010	°C	Rectangular	2,89E-03	°C	1,0	Adimensional	-
	Deriva	0,067	°C	Rectangular	1,93E-02	°C	1,0	Adimensional	-
	Prof. Inmersión	0,050	°C	Normal, k	2,50E-02	°C	1,0	Adimensional	-
	Presión Patrón	902,610	hPa	-	4,72E-01	hPa	-1,11E-01	%E/hPa	5,25E-02
	Repetibilidad	0,166	hPa	Normal	6,76E-02	hPa	1,0	Adimensional	-
	Clase	0,800	hPa	Rectangular	4,62E-01	hPa	1,0	Adimensional	-
	Resolución	0,010	hPa	Rectangular	2,89E-03	hPa	1,0	Adimensional	-
	Deriva	0,240	hPa	Rectangular	6,93E-02	hPa	1,0	Adimensional	-
	Presión Instrumento	902,508	hPa	-	4,71E-01	hPa	1,11E-01	%E/hPa	5,24E-02
	Repetibilidad	0,158	hPa	Normal	6,44E-02	hPa	1,0	Adimensional	-
	Clase	0,800	hPa	Rectangular	4,62E-01	hPa	1,0	Adimensional	-
	Resolución	0,010	hPa	Rectangular	2,89E-03	hPa	1,0	Adimensional	-
	Deriva	0,240	hPa	Rectangular	6,93E-02	hPa	1,0	Adimensional	-
	Error del Patrón	-0,060	%	-	1,23E-01	%	1,00E+00	%E/%e	1,23E-01
	Repetibilidad	0,000	%	Normal	0,00E+00	%	1,0	Adimensional	-
	Calibración	0,220	%	Normal, k	1,12E-01	%	1,0	Adimensional	-
	Residuo Interpolación	0,035	%	Normal, k=1	3,48E-02	%	1,0	Adimensional	-
	Deriva	0,125	%	Rectangular	3,62E-02	%	1,0	Adimensional	-
	lumen registrado por Patrón	0,062	m ³	-	5,86E-06	m ³	-1,61E+03	%E/Vmm	9,43E-03
	Resolución	0,00002	m ³	Rectangular	5,86E-06	m ³	1,0	Adimensional	-
	Error de Medición	0,328	%	-	7,35E-03	%	1,00E+00	%E	7,35E-03
Repetibilidad	0,018	%	Normal	7,35E-03	%	1,0	Adimensional	-	
Incertidumbre combinada									0,16
Grados efectivos de libertad									444
Factor de cobertura									2,0
Incertidumbre expandida U									0,31

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que, en los caudales bajos, la incertidumbre presenta valores relativamente más altos, debido principalmente a la incertidumbre de calibración del patrón y de la variabilidad asociada a la estabilización del flujo. En contraste, para los

caudales medios y altos, la incertidumbre es menor, reflejando una mejor estabilidad del sistema de medida.

Con base en estos valores, se procedió a establecer la Capacidad de Medición y Calibración (CMC) del GMP25. La CMC determinada fue de **0,38% en el rango de $0.5 \text{ m}^3/\text{h} - 1 \text{ m}^3/\text{h}$** cómo se observa en el cuadro 20 y de **0,31% en el rango de $1 \text{ m}^3/\text{h} - 25 \text{ m}^3/\text{h}$** cómo se observa en el cuadro 21. Aunque estos valores son conservadores y garantizan confiabilidad en los servicios de calibración, en ciertos puntos se encuentran relativamente altos en comparación con lo esperado (habitualmente un tercio del error máximo permitido, EMP). Esto sugiere que aún existen oportunidades de mejora, especialmente en el control de las fuentes de variabilidad de tipo instrumental y en la calibración del patrón a caudales bajos.

6.4. RESULTADOS DE VERACIDAD

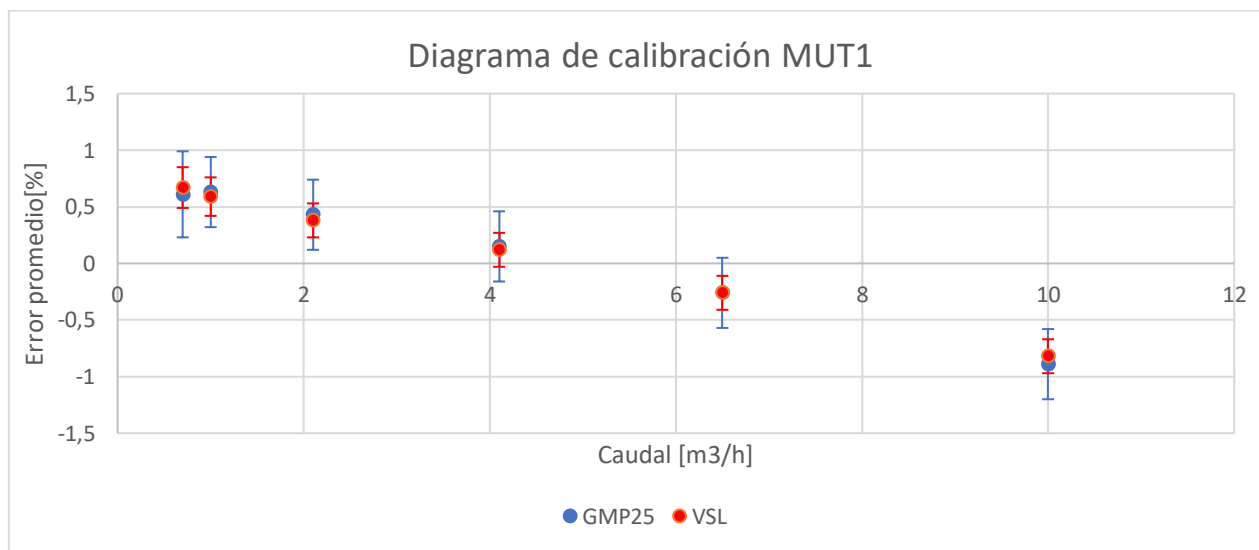
Las curvas de calibración obtenidas para los tres medidores de volumen se observan en la Figura 5, 6 y 7, siendo los puntos en rojo los reportados empleando el patrón del de referencia, y los puntos en azul los reportados empleando los patrones del GMP25. Las Cuadros 13, 14 y 15 muestran los resultados de E_n , todos menores a uno (1), mediante lo cual se puede afirmar que la comparación fue exitosa y que sus mediciones son comparables, según los criterios de evaluación de resultados mencionados anteriormente.

Cuadro 22. Resultados de la comparación para el MUT1.

Caudal	X	Y	Ux	Uy	En	DESEMPEÑO
[m³/h]	[%]	[%]	[%]	[%]		
10	-0,89	-0,82	0,31	0,15	-0,21	Satisfactorio
6,5	-0,26	-0,26	0,31	0,15	0,01	Satisfactorio
4,1	0,15	0,12	0,31	0,15	0,10	Satisfactorio
2,1	0,43	0,38	0,31	0,15	0,14	Satisfactorio
1	0,63	0,59	0,31	0,17	0,11	Satisfactorio
0,7	0,61	0,67	0,38	0,18	-0,15	Satisfactorio

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Resultados de calibración obtenidos para el MUT1.



Fuente: Elaboración propia.

Las calibraciones realizadas con este medidor muestran una concordancia elevada respecto a nuestra referencia, la cual corresponde a una calibración efectuada por el Instituto Nacional de Metrología de los Países Bajos (VSL). Esto se puede observar

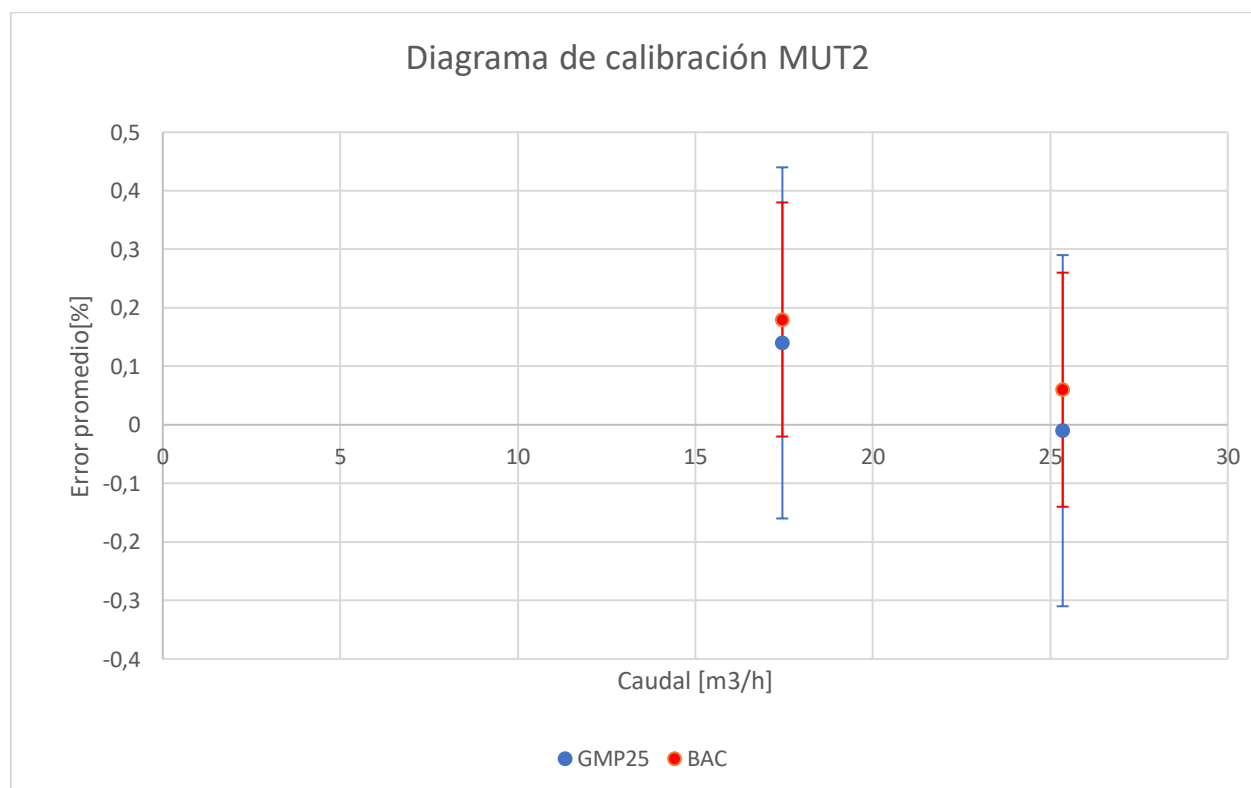
debido al valor de error normalizado tan bajo el cual en todo el rango de calibración se encuentra por debajo de 0.22, esta prueba permite afirmar que el GMP25 tiene una buena trazabilidad metrológica internacional, ya que sus mediciones se encuentran alineadas con un instituto nacional de referencia. Por tanto se puede afirmar que en este rango los resultados obtenidos son confiables y comparables con un laboratorio acreditado de alto nivel.

Cuadro 23. Resultados de la comparación para el MUT2.

Caudal	X	Y	Ux	Uy	En	DESEMPEÑO
[m³/h]	[%]	[%]	[%]	[%]		
25,35	-0,01	0,06	0,30	0,20	-0,18	Satisfactorio
17,45	0,14	0,18	0,30	0,20	-0,10	Satisfactorio

Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Resultados de calibración obtenidos para el MUT2.



Fuente: Elaboración propia.

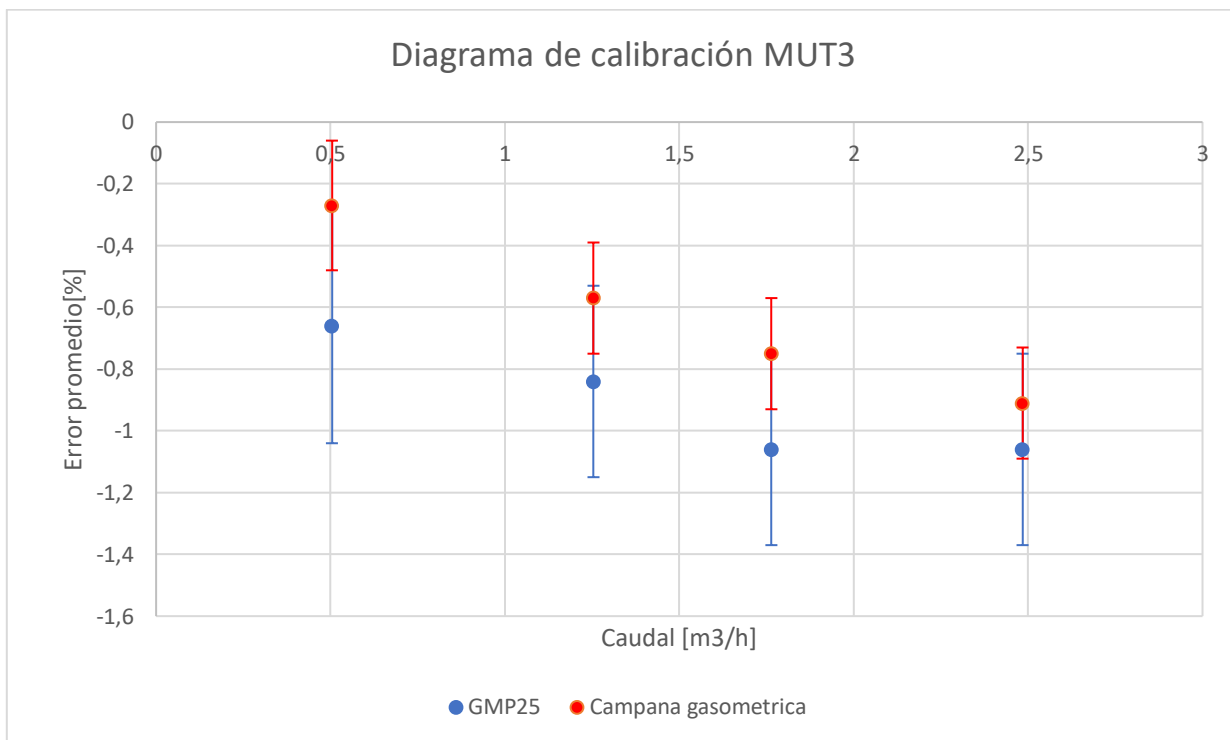
Al igual que el MUT1 el MUT2 presenta errores normalizados bastante bajos en este caso tomando como referencia el BAC se observa que hay buena exactitud comparando esta tecnología y estas referencias, en gran medida porque el patrón fue calibrado con el BAC el cual presenta alta trazabilidad metrológica.

Cuadro 24. Resultados de la comparación para el MUT3.

Caudal	X	Y	Ux	Uy	En	DESEMPEÑO
[m ³ /h]	[%]	[%]	[%]	[%]		
2,484	-1,06	-0,91	0,31	0,18	-0,42	Satisfactorio
1,764	-1,06	-0,75	0,31	0,18	-0,86	Satisfactorio
1,254	-0,84	-0,57	0,31	0,18	-0,76	Satisfactorio
0,504	-0,66	-0,27	0,38	0,21	-0,88	Satisfactorio

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Resultados de calibración obtenidos para el MUT3.



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los medidores de diafragma, se observaron valores de error normalizado relativamente altos en comparación con los demás medidores. La principal causa de este comportamiento es que dichos medidores son equipos de diseño más básico y, por lo tanto, presentan menor estabilidad en sus resultados. Además, existe una diferencia en la cadena de trazabilidad: mientras la campana gasométrica se calibra con un patrón longitudinal, el BAC se calibra directamente en el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), lo que introduce pequeñas discrepancias atribuibles al método de referencia utilizado en cada caso.

A pesar de estas diferencias, se confirmó la exactitud de las mediciones entre todos los bancos de calibración en los rangos analizados, dado que los valores de error normalizado resultaron menores a uno (1) en la totalidad del rango de calibración para los tres medidores bajo prueba (MUT1, MUT2 y MUT3). Esto valida la incertidumbre expandida estimada en cada resultado, en coherencia con lo establecido en la GUM (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008) sobre la definición de incertidumbre expandida.

En consecuencia, puede concluirse que el banco de calibración del CDT de Gas presenta un desempeño técnicamente aceptable, es competente en el servicio de calibración de medidores de volumen de gas y asegura la trazabilidad metrológica al SI de los resultados obtenidos.

6.5. RESULTADOS DEL TEST DE YOUTDEN Y STEINER

Con base en la matriz de Youden y Steiner para evaluar factores influyentes, se procedió a realizar las ocho pruebas, determinando así los errores de medición para cada una de ellas (s, t, u, v, w, x, y, z).

Cuadro 25. Resultados del Test de Youden y Steirner (valores en %)

RESULTADO	s	t	u	v	w	x	y	z
Q = 0,5 m ³ /h	-0,56	-0,45	-0,59	-0,40	-0,37	-0,55	-0,44	-0,45
Q = 1,25 m ³ /h	-0,64	-0,53	-0,70	-0,46	-0,46	-0,70	-0,45	-0,61
Q = 2,5 m ³ /h	-1,05	-1,08	-1,13	-1,05	-0,92	-1,23	-0,89	-1,10

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la influencia de las variaciones de cada parámetro en el resultado final, el promedio de los cuatro valores correspondientes a letras mayúsculas (condiciones nominales – Valor alto X) es comparado con el promedio de los cuatro valores correspondientes a letras minúsculas (variaciones – Valor bajo x). Entre mayor sea esta diferencia, mayor es la influencia de este parámetro en el método de calibración.

Como criterio de aceptación del método, se considera que la diferencia entre el valor alto y el valor bajo sea inferior a $\sqrt{2}$ de la desviación estándar de la precisión del método S (García, 2025) (desviación estándar de los resultados de la combinación factorial s). En este caso, estos valores corresponden a la incertidumbre típica de calibración reportada para cada punto de caudal en la réplica con mejores condiciones (prueba s) de la combinación factorial 1 (Condición nominal).

Así, el criterio de aceptación es $|X-x| < \sqrt{2} * S$, siendo $S_1=0,38\%$, $S_2=0,31\%$ y $S_3=0,31\%$, para los caudales 0.5 m³/h; 1.25 m³/h y 2.5 m³/h, respectivamente. Los efectos de cada parámetro fueron determinados y son presentados en las Cuadros 19, 20 y 21 para cada caudal analizado (los valores se encuentran en %).

Cuadro 26. Efectos combinación factorial de los parámetros para caudal de 0.5 m³/h.

Q = 0,5 m ³ /h					$\sqrt{2S}$
Asign.	Efecto	Valor Alto	Valor Bajo	Diferencias	0,5374
J	A	-0,50	-0,45	0,05	NO SENSIBLE
K	B	-0,48	-0,47	0,01	NO SENSIBLE
L	C	-0,49	-0,46	-0,03	NO SENSIBLE
M	D	-0,54	-0,42	-0,12	NO SENSIBLE
N	E	-0,45	-0,51	0,06	NO SENSIBLE
O	F	-0,49	-0,47	-0,02	NO SENSIBLE
P	G	-0,48	-0,48	0,00	NO SENSIBLE

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 27. Efectos combinación factorial de los parámetros para caudal de 1.25 m³/h.

Q = 1,25 m ³ /h					$\sqrt{2S}$
Asign.	Efecto	Valor Alto	Valor Bajo	Diferencias	0,4384
J	A	-0,58	-0,56	-0,03	NO SENSIBLE
K	B	-0,58	-0,56	-0,03	NO SENSIBLE
L	C	-0,56	-0,58	0,01	NO SENSIBLE
M	D	-0,66	-0,48	-0,19	NO SENSIBLE
N	E	-0,54	-0,60	0,05	NO SENSIBLE
O	F	-0,56	-0,58	0,01	NO SENSIBLE
P	G	-0,56	-0,58	0,02	NO SENSIBLE

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 28. Efectos combinación factorial de los parámetros para caudal de 2.5 m³/h.

Q = 2,5 m ³ /h					$\sqrt{2S}$
Asign.	Efecto	Valor Alto	Valor Bajo	Diferencias	0,4384
J	A	-1,08	-1,04	-0,04	NO SENSIBLE
K	B	-1,07	-1,04	-0,03	NO SENSIBLE
L	C	-1,00	-1,12	0,12	NO SENSIBLE
M	D	-1,13	-0,99	-0,14	NO SENSIBLE
N	E	-1,03	-1,08	0,05	NO SENSIBLE
O	F	-1,06	-1,06	0,00	NO SENSIBLE
P	G	-1,03	-1,08	0,05	NO SENSIBLE

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en las Cuadros 26, 27 y 28 **ningún efecto analizado tiene una influencia significativa en el método de calibración** (los efectos analizados se encuentran en el cuadro 12). Sin embargo, se aprecia que el efecto que presenta mayor diferencia es la posición del medidor, la causa más probable es debido a que la presión absoluta se calcula a través de la presión absoluta inicial menos los diferenciales de presión de cada uno de los medidores anteriores, diferenciales los cuales pueden no presentar una exactitud deseada para este proceso.

Adicionalmente a modo de comparación se presenta una Cuadro en la cual se observa cuáles son los efectos a los cuales son más sensibles el método, esto a través del promedio de las diferencias presentadas en las Cuadros anteriores y de las cuales la posición 1 indica el efecto que genera mayor influencia en los resultados del método.

Cuadro 29. Orden de sensibilidad de los efectos analizados.

EFEECTO	PARÁMETRO	ORDEN SENS.
D	Posición	1
E	Instalación	2
C	Secuencia de calibración	3
A	Metrólogo	4
G	Equipo externo en uso	5
B	Repeticiones	6
F	Personas presentes	7

Fuente: Elaboración propia.

Se recomienda el uso de diferenciales de presión con menor rango, estos presentarán una exactitud mayor y no se estaría sobredimensionando la toma de presión diferencial que en las pruebas realizadas no llegó a ser mayor de 1.5 hPa incluso en casos de mala instalación. Adicionalmente, se recomienda realizar la instalación de la mejor manera reduciendo las fugas presentes al mínimo en la medida de lo posible.

En general, para calibraciones de medidores tipo diafragma con caudal máximo de hasta 25 m³/h, la absorción de presión no debe superar los 3.3 hPa. Por lo cual los transmisores de presión diferencial recomendados son transmisores de 0 – 5 hPa con una exactitud de 0.5% FS (UNE, 2018).

6.6. RECOMENDACIONES

- Cambiar los transmisores de presión diferencial por unos que delimiten de forma más adecuada el rango de medición requerido, preferiblemente que tengan rango de medición de 0 hPa – 5 hPa, con una exactitud de 0.5% FS.

- Gestionar un ensayo de aptitud interlaboratorio para el banco GMP25.
- Realizar calibración del patrón en los caudales de 0,5m³/h a 2,5 m³/h en campana gasométrica para disminuir la incertidumbre asociada a la incertidumbre de calibración.
- Rediseñar el banco de tal modo que se realicen calibraciones a succión, lo cual da un mejor comportamiento en la prueba de hermeticidad y disminuye el calentamiento que se presenta.

7. CONCLUSIONES

- Las consistencias estadísticas obtenidas evidencian repetibilidad y reproducibilidad en el proceso de calibración de medidores de volumen de gas, reflejando confiabilidad de los resultados de calibración, a lo cual posteriormente un análisis de varianza permitió identificar que la afectación del nivel de incertidumbre del método por parte del metrólogo es despreciable al presentarse valores de F menores a 1.78 siendo F crítico 5.14.
- A partir de los estadísticos de desempeño denominados números En empleados en la evaluación de veracidad, se demuestra la comparabilidad entre los resultados obtenidos por los bancos de calibración del CDT de GAS (BAC, Campana gasométrica y GMP250) y certificado de calibración VSL, presentando en todos los casos un error normalizado menor a 0.88 validando la incertidumbre expandida asociada a cada resultado. De esta forma, se asegura la estrategia de trazabilidad al SI de los resultados obtenidos en las calibraciones de volumen de gas por parte del CDT de GAS, dentro del intervalo analizado.
- La evaluación de los factores influyentes permitió identificar que el método no es sensible de manera significativa a ninguno de los parámetros analizados que se mencionan en el cuadro 12 presentando valores de $|X-x| < 0.19$ mientras que el límite permisible se encuentra en el rango de 0.4384 - 0.5374 dependiendo del caudal analizado.
- Se realizó la confirmación del cumplimiento de los requerimientos del método, esta se presenta en el Anexo F tomando como referencia los parámetros que se encuentran en Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), (2003).
- Se recomienda usar transmisores de presión diferencial con una exactitud de 0.025 hPa, gestionar un ensayo de aptitud, realizar calibración del patrón del GMP25 en

rango de 0,5m³/h a 2,5 m³/h en campana gasométrica y rediseñar el banco para trabajar a succión.

- Las pruebas presentadas en este proyecto permiten validar el método de calibración de medidores de volumen de gas descrito en el procedimiento técnico de operación, en el intervalo comprendido entre 0.5 m³/h y 25 m³/h para el banco GMP25 reforzando la confiabilidad y competitividad del laboratorio, asegurando resultados precisos y trazables que cumplen con estándares internacionales, ampliando de este modo la oferta de servicios con mayor respaldo técnico.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM International. (2023, abril 6). ASTM E691-23: Standard practice for conducting an interlaboratory study to determine the precision of a test method.

<https://www.astm.org/e691-23.html>

BIPM. (2012). International vocabulary of metrology: Basic and general concepts and associated terms (VIM) (3rd ed., 2008 version with minor corrections). Bureau International des Poids et Mesures.

Corporación CDT de Gas. (2016). Informe de validación de la implementación del método de calibración para el área volumen de gas en campo empleando el GMP250.

Corporación CDT de Gas. (2022). Procedimiento técnico de calibración de medidores de volumen de gas.

Corporación CDT de Gas. (2024). Manual de procedimientos generales.

Eurachem. (2014). The fitness for purpose of analytical methods: A laboratory guide to method validation and related topics (2nd ed.).

García, C. (2020). Reseña histórica del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

<https://www.cdtdegas.com/index.php/nosotros/quienes-somos>

García, L. (2025). Documentación y evaluación del banco BLR25 para la calibración de medidores de volumen de gas (Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana).

Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos (2ª ed.).

México: McGraw-Hill.

Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, INPAC, IUPAP, OIML). (2008). ISO/IEC Guide 98-3:2008 - Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.

Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025. (2005, octubre 26). Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.

Norma Técnica Colombiana NTC 2062-2. (2008). Estadística. Vocabulario y símbolos. Parte 2: Estadística aplicada (Norma equivalente a ISO 3534-2:2006).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). (2003). Messgeräte für Gas. Gaszähler: Prüfung von Volumengaszählern mit Luft bei Atmosphärendruck (Tomo 29).

UNE. (2018). UNE-EN 1359: Contadores de gas. Contadores de volumen de gas de membranas deformables. Asociación Española de Normalización.

United Nations Industrial Development Organization. (2009). Complying with ISO 17025: A practical guidebook for meeting the requirements of laboratory accreditation schemes based on ISO 17025:2005 or equivalent national standards.

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Termodinámica* (8.^a ed.). McGraw-Hill Education.