

**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE
FLUJO DE GAS, EMPLEANDO LA CAMPANA GASOMÉTRICA DEL CENTRO
DE METROLOGÍA DE FLUIDOS DE LA CORPORACIÓN CDT DE GAS**

ANDRÉS FELIPE RODRÍGUEZ CARREÑO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2019

**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE
FLUJO DE GAS, EMPLEANDO LA CAMPANA GASOMÉTRICA DEL CENTRO
DE METROLOGÍA DE FLUIDOS DE LA CORPORACIÓN CDT DE GAS**

ANDRÉS FELIPE RODRÍGUEZ CARREÑO

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ

MSc. Ingeniería Mecánica

Codirector:

JOSE AUGUSTO FUENTES OSORIO

MSc. En Ingeniería Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

A Dios por ser mi fortaleza y gestor de mis proyectos.
A mi nona Amparo y mi nono Alberto por su inmenso amor y acompañamiento
desde mi primer día de formación.
A mis padres por su amor, apoyo incondicional y valores inculcados.
A mis hermanas por la compañía y alegría siempre brindada.
A mis tíos Lidy, Diana y Oscar, por el sentido de familia y ejemplo como seres
humanos y profesionales.
A mi novia por hacer parte de mi día a día y hacer de esta última etapa la más
especial de mi carrera.
A mis amigos y compañeros por la constante motivación.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por la formación ética y profesional de la más alta calidad.

A la Corporación CDT de GAS por el conocimiento, experiencia, y confianza brindada, especialmente por parte del Ing. Jose Augusto Fuentes.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. JUSTIFICACIÓN	25
2. OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GENERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3. METODOLOGÍA	29
4. PATRÓN PRIMARIO TIPO CAMPANA GASOMÉTRICA	31
4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	31
4.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN Y CALIBRACIÓN	33
4.3 MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DEL ERROR RELATIVO AL VOLUMEN DE GAS MEDIDO	34
4.4 MODELO MATEMÁTICO PARA LE CÁLCULO DEL VOLUMEN DE GAS DEL PATRÓN TIPO CAMPANA GASOMÉTRICA	39
4.5 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE ENCINTADO (STRAPPING) Y DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE CINEMÁTICA <i>k_{bell}</i>	41
5. MODELOS MATEMÁTICOS PROPUESTOS PARA EVALUAR LAS SUPOSICIONES IMPLEMENTADAS ACTUALMENTE EN LOS PROCESOS DE CALIBRACIÓN DE VOLUMEN DE GAS DE LA CORPORACIÓN CDT DE GAS .	43
5.1 MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN ACUMULADO	43
5.2 MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DE DENSIDADES	45
5.3 MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN DE GAS OCUPADO POR LA PELÍCULA DE ACEITE	49

6. CUANTIFICACIÓN DE LAS SUPOSICIONES TERMODINÁMICAS ACTUALES	55
6.1 ANÁLISIS DE ERROR DE MEDICIÓN	56
6.2 ANÁLISIS DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE	60
7. DESARROLLO DE PLANTILLA PARA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL ERROR DE MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS.....	65
7.1 MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DEL ERROR RELATIVO AL VOLUMEN DE GAS MEDIDO	65
7.2 ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL ERROR DE MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS.	67
7.2.1 Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre.	67
7.2.2 Clasificación, cuantificación y reducción (Incertidumbre Estándar) de las fuentes de incertidumbre.	71
7.2.3 Combinación y propagación de incertidumbre	78
7.2.3.1 Coeficientes de sensibilidad.....	79
7.2.4 Confiabilidad (Incertidumbre expandida)	84
7.2.3.2 Factor de cobertura (K)	84
7.2.3.3 Grados de libertad.	85
7.2.3.4 Grados de libertad efectivos	85
7.2.4 Contribución.....	87
7.3 VALIDACIÓN DEL MÉTODO GUM POR MEDIO DE LA SIMULACIÓN MONTE CARLO.....	87
8. VALIDACIÓN DEL MEJOR DESEMPEÑO DE LA CAMPANA GASOMÉTRICA Y DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN	93
8.1 VALIDACIÓN CON MEDIDOR TIPO ROTATIVO	94
8.2 Validación con medidor tipo cámara húmeda	97
8.3 Validación con medidor tipo elemento de flujo laminar	99
9. OPORTUNIDADES DE MEJORA EN LA OPERACIÓN DEL PATRÓN TIPO CAMPANA GASOMÉTRICA.....	102
10. CONCLUSIONES	106

BIBLIOGRAFÍA.....	109
ANEXOS	112

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Errores máximos permisibles actuales de diferentes tecnologías para medición de flujo de gas.	24
Tabla 2 Incertidumbre estándar ($k=1$) de diferentes patrones primarios alrededor del mundo.	26
Tabla 3 Error en función del diámetro de pozo seco (upa %).	54
Tabla 4 Variación del error en función de cada suposición.	59
Tabla 5. Contribución de cada suposición en la incertidumbre actual.	63
Tabla 6. Promedios y valores máximos y mínimos de la contribución en la incertidumbre actual de cada suposición.	64
Tabla 7. Fuentes de incertidumbre asociadas al error de medición (mensurando).	74
Tabla 8. Fuentes de incertidumbre asociadas al volumen colectado por el patrón.	75
Tabla 9. Fuentes de incertidumbre asociadas a la constante cinemática de la campana.	76
Tabla 10. Fuentes de incertidumbre asociadas a la densidad del fluido de calibración.	77
Tabla 11. Fuentes de incertidumbre asociadas al volumen acumulado.	78
Tabla 12 Nivel de confianza en función de los grados de libertad efectivos.	86
Tabla 13. Comparación de las densidades e incertidumbres asociadas, obtenidas por el método GUM y Monte Carlo.	90
Tabla 14. Comparación del volumen colectado por el patrón y el volumen acumulado e incertidumbre asociada, obtenidos por el método GUM y método Monte Carlo.	90

Tabla 15. Comparación del error e incertidumbre asociada obtenidos por el método GUM y Monte Carlo.	91
Tabla 16. Comparación de resultados de calibración de medidor tipo rotativo con incertidumbre subestimada.	94
Tabla 17. Comparación de resultados de calibración de medidor tipo cámara húmeda con incertidumbre real.	97
Tabla 18. Comparación de resultados de calibración de medidor tipo elemento de flujo laminar con incertidumbre real.	100
Tabla 19. Contribución en la incertidumbre de las densidades.	103
Tabla 20. Contribución en la incertidumbre de todas las variables involucradas.	104
Tabla 21. Unidades fundamentales.	114
Tabla 22. Unidades adicionales aceptadas.	114
Tabla 23. Diámetro exterior de la campana D_{bell}	122
Tabla 24. Diámetro interno del tanque D_{tank}	125
Tabla 25. Variación del nivel de aceite.	125
Tabla 26. Generación de pulsos a diferentes velocidades de giro.	128

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Campana gasométrica del Centro de metrología de fluidos de la Corporación CDT de GAS.	32
Figura 2. Componentes internos y externos de la Campana Gasométrica.	33
Figura 3. Representación esquemática de la Campana gasométrica.	35
Figura 4. Geometría interna de la campana gasométrica.	40
Figura 5. Esquema para cálculo de volumen remanente	44
Figura 6. Representación amplificada de la película de aceite adherida a la campana gasométrica.....	50
Figura 7. Curva de calibración de medidor tipo rotativo.	60
Figura 8. Diagrama de contribuciones máximas en la incertidumbre actual.	64
Figura 9. Diagrama Ishikawa para el Error.	67
Figura 10. Diagrama Ishikawa para el volumen colectado por el patrón.....	68
Figura 11. Diagrama Ishikawa para la constante cinemática de la campana.	69
Figura 12. Diagrama Ishikawa para la densidad del fluido de calibración.....	70
Figura 13. Diagrama Ishikawa para las propiedades termodinámicas involucradas.....	71
Figura 14. Diagrama Ishikawa para el volumen acumulado.	71
Figura 15. Interfaz gráfica GUI del software Matlab, para el caudal mínimo [2,66 dm ³ /min] del medidor tipo rotativo en prueba.	92
Figura 16. Comparación de curvas de calibración de medidor tipo rotativo.....	96
Figura 17. Comparación de curvas de calibración, para bajos caudales, de medidor tipo rotativo.	96
Figura 18. Comparación de curvas de calibración de medidor tipo cámara húmeda.....	98

Figura 19. Comparación de curvas de calibración, para bajos caudales, de medidor tipo cámara húmeda.	99
Figura 20. Comparación de curvas de calibración de medidor tipo elemento de flujo laminar.....	101
Figura 21. Estructura jerárquica de patrones metrológicos.....	115
Figura 22. Curva del índice de desempeño de un medidor de caudal.	116
Figura 23. Concepto de repetibilidad y exactitud.	118
Figura 24. Medición del diámetro exterior de la campana D_{Bell}	122
Figura 25. Función diámetro de la campana $f(x) = D_{Bell}$ (pulsos)	123
Figura 26. Medición del diámetro del tanque D_{tank}	124
Figura 27. Función nivel de aceite $f(x) = \Delta Nivel$ (pulsos)	126
Figura 28. Sistema generador de pulsos.	127
Figura 29. Bloques de OPTO control	131
Figura 30. Esquema del sistema de control y adquisición de datos del patrón tipo campana gasométrica.....	132
Figura 31. Datos almacenados por medio del software Microsoft Excel.....	133
Figura 32. Condiciones ambientales.....	134
Figura 33. Datos y cálculos para el medidor bajo prueba MUT	134
Figura 34. Datos y cálculos para el patrón tipo campana gasométrica.....	135
Figura 35. Cálculo de mensurando e incertidumbre asociada	136
Figura 36. Contribución de las fuentes de incertidumbre.....	136

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Calculo de error relativo.	34
Ecuación 2. Volumen convencionalmente verdadero transferido al medidor bajo prueba.....	36
Ecuación 3. Modelo matemático actual para el cálculo del error relativo al volumen de gas medido.	38
Ecuación 4. Volumen desplazado por la campana gasométrica.....	40
Ecuación 5. Constante cinemática de la campana gasométrica.	42
Ecuación 6. Volumen remanente en el sistema.	45
Ecuación 7. Modelo para cálculo de la densidad del fluido de calibración.....	46
Ecuación 8. Masa molar de aire húmedo.....	46
Ecuación 9. Factor de compresibilidad para un gas real.	48
Ecuación 10. Error que genera la película de aceite relativo al volumen colectado por la campana.	52
Ecuación 11. Cálculo de error incluyendo los efectos dados por la variación de la presión y temperatura en el patrón.	57
Ecuación 12. Cálculo de error incluyendo los efectos de la humedad del fluido de calibración.....	58
Ecuación 13. Cálculo de error incluyendo efecto de la película de aceite adherida a la campana gasométrica.	58
Ecuación 14. Cálculo de error incluyendo todos los efectos previamente analizados.....	59
Ecuación 15. Incertidumbre generada por la acumulación de volumen.....	61
Ecuación 16. Incertidumbre generada por la humedad en el fluido de calibración.....	61

Ecuación 17. Incertidumbre generada por la película de aceite presente en el volumen colectado por la campana.	62
Ecuación 18. Modelo matemático para el cálculo de error relativo al volumen de gas medido, tras las consideraciones planteadas. (mensurando).	66
Ecuación 19. Expresión para incertidumbre combinada.	79
Ecuación 20. Expresión para los coeficientes de sensibilidad.	79
Ecuación 21. Expresión para incertidumbre expandida.	84
Ecuación 22. Expresión para los grados de libertad efectivos.	86
Ecuación 23. Expresión para la contribución de las fuentes de incertidumbre.	87
Ecuación 24. Incertidumbre asociada al error de medición por el método Monte Carlo.	89

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Marco teórico de metrología.....	112
Anexo B. Calibración de campana gasométrica por el método de encintado (strapping).....	120
Anexo C. Adquisición de datos e interfaz gráfica de plantilla propuesta de calibración.....	129

GLOSARIO

Definiciones dadas por el vocabulario internacional de medidas (VIM).

- **CLASE DE EXACTITUD:** clase de instrumentos de medición que cumplen ciertos requisitos metrológicos, previstos para mantener los errores dentro de límites especificados.

Nota: una clase de exactitud generalmente se indica mediante un número o símbolo adoptado por convención y que se denomina índice de clase.

- **EXACTITUD DE MEDIDA:** proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando

Notas: 1) El concepto “exactitud de medida” no es una magnitud y no se expresa numéricamente. Se dice que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de medida; 2) El término “exactitud de medida” no debe utilizarse en lugar de veracidad de medida, al igual que el término “precisión de medida” tampoco debe utilizarse en lugar de “exactitud de medida”, ya que esta última incluye ambos conceptos.

- **FACTOR DE COBERTURA:** número mayor que uno por el que se multiplica una incertidumbre típica combinada para obtener una incertidumbre expandida

Nota: habitualmente se utiliza el símbolo k para el factor de cobertura.

- **INCERTIDUMBRE DE MEDIDA:** parámetro asociado con el resultado de una medición, que caracteriza a la dispersión de los valores que en forma razonable se le podrían atribuir a la magnitud por medir.

Notas: 1) El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar (o un múltiplo de ella), o la semi longitud de un intervalo que tenga un nivel de

confianza determinado; 2) En general, la incertidumbre de la medición comprende muchos componentes. La distribución estadística de los resultados de series de mediciones se puede usar para evaluar algunos de estos componentes, que se pueden caracterizar mediante desviaciones estándar experimentales. Los otros componentes, que también se pueden caracterizar mediante desviaciones estándar, se evalúan a partir de distribuciones de probabilidad supuestas, basadas en la experiencia o en otra información; 3) Se entiende que el resultado de la medición es la mejor estimación del valor de la magnitud por medir, y que todos los componentes de la incertidumbre, incluyendo los ocasionados por efectos sistemáticos, tales como los componentes asociados con correcciones y con patrones de referencia, contribuyen a la dispersión.

- **MENSURANDO:** magnitud particular sujeta a medición
Nota: la medición, incluyendo el sistema de medida y las condiciones bajo las cuales se realiza ésta, podría alterar el fenómeno, cuerpo o sustancia, de tal forma que la magnitud bajo medición difiriera del mensurando. En este caso sería necesario efectuar la corrección apropiada.
- **PATRÓN DE MEDICIÓN:** medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o más valores de una magnitud que sirva como referencia.
- **PATRÓN PRIMARIO:** patrón que es designado o ampliamente reconocido como poseedor de las más altas cualidades metrológicas, y cuyo valor se acepta sin referenciarlo a otros patrones de la misma magnitud.
Nota: El concepto de patrón primario es igualmente válido para magnitudes básicas y para magnitudes derivadas de ellas.

- **PATRÓN SECUNDARIO:** patrón cuyo valor se asigna mediante comparación con un patrón de la misma magnitud.
- **PATRÓN DE REFERENCIA:** patrón que generalmente posee la máxima calidad metrológica que le permite en un sitio dado, a partir del cual se derivan las mediciones hechas en dicho lugar.
- **PATRÓN DE TRABAJO:** patrón que se utiliza rutinariamente para calibrar o comprobar instrumentos de medición.
Notas: 1) Un patrón de trabajo generalmente se calibra contra un patrón de referencia; 2) Se denomina patrón de comprobación un patrón de trabajo que se utiliza rutinariamente para asegurar que las mediciones se efectúan correctamente.
- **PATRÓN DE TRANSFERENCIA:** patrón que se utiliza como medio para comparar patrones.
Nota: Cuando el medio de transferencia no está calibrado se denomina dispositivo de transferencia.
- **TRAZABILIDAD:** propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón, en virtud de la cual ese resultado se puede relacionar con referencias estipuladas, generalmente patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones que tengan todas incertidumbres determinadas.
Notas: 1) El concepto se expresa a menudo mediante el adjetivo trazable; 2) La cadena ininterrumpida de comparaciones se llama cadena de trazabilidad.
- **UNIDADES DE MEDIDA:** una magnitud en particular, definida y adoptada por convención, con la cual se comparan otras magnitudes de la misma naturaleza, con el propósito de expresar sus cantidades en relación con esa magnitud.

RESUMEN

TÍTULO: MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE GAS, EMPLEANDO LA CAMPANA GASOMÉTRICA DEL CENTRO DE METROLOGÍA DE FLUIDOS DE LA CORPORACIÓN CDT DE GAS*.

AUTOR: Andrés Felipe Rodríguez Carreño**

PALABRAS CLAVE: Campana gasométrica, calibración, flujo de gas, incertidumbre.

DESCRIPCIÓN:

En el presente documento se lleva a cabo un estudio del patrón primario tipo campana gasométrica con el que cuenta el Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas (CDT), con el propósito de mejorar su desempeño y cualidades metrológicas, que permita brindar a la industria del gas una mayor confiabilidad en el control de procesos, facturación y desarrollo tecnológico. Dicho estudio se enfoca principalmente en el modelo matemático implementado actualmente en los procesos de calibración de volumen de gas, para el cual se desarrolla un análisis a través de la cuantificación en términos de variación del mensurando (error relativo de medición) y en términos de la incertidumbre asociada, del impacto de tres suposiciones fundamentales establecidas en él: 1) acumulación en el balance de masa despreciable, 2) fracción molar de vapor de agua despreciable en el fluido de calibración (aire atmosférico) y, 3) efecto despreciable de la película de líquido sellante adherida a la campana. Posteriormente, las mencionadas suposiciones son eliminadas por medio de la definición de un nuevo modelo matemático, incorporado a una herramienta informática para estimación de incertidumbre relativa a la medición de volumen de gas. Los resultados obtenidos con el modelo y la herramienta propuesta, en conjunto con resultados obtenidos por laboratorios internacionales, señalan mejor trazabilidad, permitiendo afianzar la calidad de los servicios de la corporación, y plasmando la base para afrontar futuros retos tecnológicos en cuanto a reducción de incertidumbre de medición, que impulse la productividad y competitividad del sector.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jaid Eduardo Quiroga Méndez, Ingeniero mecánico. Codirector: Jose Augusto Fuentes Osorio, Ingeniero mecánico.

ABSTRACT

TITLE: IMPROVEMENT OF THE CALIBRATION PROCESS OF GAS FLOW METERS, USING THE BELL PROVER OF THE METROLOGY CENTER OF FLUIDS OF THE CDT DE GAS CORPORATION*.

AUTHOR: Andrés Felipe Rodríguez Carreño**

KEYWORDS: Bell Prover, calibration, gas flow, uncertainty.

DESCRIPTION:

In this document, a study of the primary bell prover -type pattern is carried out, belonging to the Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas (CDT), with the purpose of improving its performance and metrological qualities, making it possible to provide the gas industry greater reliability in process control, billing and technological development. This study focuses mainly on the mathematical model currently implemented in gas volume calibration processes, for which an analysis is developed through quantification in terms of variation of the measured (relative error of measurement) and in terms of the associated uncertainty, of the impact of three fundamental assumptions established in it: 1) negligible accumulation in the mass balance, 2) mole fraction of negligible water vapor in the calibration fluid (atmospheric air) and 3) negligible effect of the sealant liquid adhered to the bell. Subsequently, the aforementioned assumptions are eliminated by means of the definition of a new mathematical model incorporated into a computer tool for estimation of uncertainty relative to the measurement of gas volume. The results obtained with the model and the proposed tool, together with results obtained at international laboratories, indicate better traceability, allowing the quality of the services of the corporation to be strengthened, and forming the basis for facing future technological challenges in terms of reducing uncertainty of measurement, that boost the productivity and competitiveness of the gas sector.

* Bachelor project

** Faculty of Physical-mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director: Jaid Eduardo Quiroga Méndez, Mechanical Engineer. Co-Director: Jose Augusto Fuentes Osorio, Mechanical Engineer

INTRODUCCIÓN

Las mediciones a través de la historia han trazado el desarrollo de la humanidad, permitiendo cuantificar desde las propiedades físicas y químicas más elementales de la materia, hasta el más complejo de los fenómenos al que se le puede atribuir un mensurando, por tal razón, la calidad y confiabilidad de lo medido ha sido objeto de riguroso estudio.

“Una correcta medición, definida desde la menor incertidumbre posible, representa para todo tipo de industria un impacto directo en la calidad de los productos o servicios brindados, que desde luego se asocia directamente con la sostenibilidad de esta”¹. Tal realidad la representa ampliamente las mediciones de flujo de gas, requeridas en el control de procesos, en la industria de facturación o en investigación y desarrollo tecnológico, donde las repercusiones van desde económicas hasta en salubridad y medio ambiente en todas sus proporciones.

Ante los crecientes requerimientos metrológicos, la corporación CDT de GAS a lo largo de los últimos 20 años, ha contribuido al desarrollo tecnológico nacional de la industria del gas, mediante la prestación de servicios tecnológicos de calibración de medidores de bajo y alto caudal volumétrico, la construcción de equipos de medición e integración de sistema de medición de volumen y calidad de gas, asesorías, inspecciones y proyectos de investigación, teniendo como columna vertebral, la metrología para garantizar altos niveles de confianza.

¹ REYES, Jorge y ANTOLÍNEZ, David. ¿Qué son y cómo se estima la mejor capacidad de medida y la capacidad de medida y calibración? Revista Meta & Flu, Separadores gas - líquido supersónicos. 2012, nro. 6, pp. 6-15.

Desde el año 2000, en conjunto con centros de investigación internacionales, se han estado desarrollando proyectos de infraestructura para la calibración de medidores de flujo de bajo caudal ($0,016 \text{ m}^3 / \text{h}$ a $6000 \text{ m}^3 / \text{h}$), orientados a garantizar exactitud en las mediciones para procesos de transferencia de custodia y contrato de propiedad.

Uno de los patrones primarios que ha sido desarrollado y que ha evolucionado en el tiempo, a través de la ejecución de los proyectos de infraestructura dentro de la corporación, acreditados por el ONAC (Organismo Nacional de Acreditación de Colombia), es el tipo campana gasométrica, que cuenta con trazabilidad a unidades del Sistema Internacional. Este patrón primario opera como medidor de volumen por desplazamiento positivo en el alcance entre $0.016 \text{ m}^3/\text{h}$ y $25 \text{ m}^3/\text{h}$ con incertidumbre de aproximadamente 0,15% relativa al volumen medido. Estas características han permitido durante dos décadas realizar calibraciones de patrones secundarios y patrones de trabajo para la industria en Colombia de diversas tecnologías (véase Tabla 1.), y por lo tanto, diseminar la trazabilidad de medidas de volumen del Sistema Internacional con adecuados niveles de incertidumbre.

Teniendo en cuenta la importancia resaltada de la medición de flujo de gas y la misión de la corporación CDT de GAS de impulsar la productividad y competitividad de la industria, en este trabajo de investigación se desarrolla un estudio riguroso al patrón primario tipo campana gasométrica que busca mejorar el desempeño metrológico y la capacidad operativa de éste.

Tabla 1. Errores máximos permisibles actuales de diferentes tecnologías para medición de flujo de gas. ²

Tecnología	Intervalo de medición				REF
	Qmin≤Q<Qt		Qt≤Q≤Qmax		
	Nuevo	Servicio	Nuevo	Servicio	
Diafragma	±3%	-6%, +3%	±1,5%	±3%	NTC 2728[6]
	±3%	±6%	±1,5%	±3%	OIML 137-1[7]
	±2%	±2%	±1%	±1%	ANSI B109.1[8]
					ANSI B109.2[9]
Rotativo	±1%	±1%	*	*	ANSI B109.3[10]
Turbina	±1,5%	±1,5 %	±1%	±1%	AGA 7[11]
	±2%	±2%	±1%	±1%	ISO 9951[12]
Másico	*	±1,5%	*	±1%	AGA 11[13]
Ultrasónico	±1,4%	±1,4%	±1%	±1%	AGA 9[14]

Fuente: COVELLI, Germán José. Facilidades tecnológicas para brindar trazabilidad a las mediciones de gases en Colombia. *Revista Met & Flu, Perspectiva de análisis tecnológico a la calidad del gas natural*. 2010, nro. 2, pp. 55.

² Tecnologías como cámaras húmedas, caudalímetros y flujómetros no fueron presentadas en la tabla, debido a que estas generalmente tienen como referencia los límites estipulados por los fabricantes

1. JUSTIFICACIÓN

La capacidad de medición ha estado siempre asociada al progreso de todo tipo de disciplina, más aún la correcta interpretación de sus resultados, donde la incertidumbre se convierte en el elemento fundamental de apreciación y análisis. En este contexto, una baja incertidumbre refleja una mayor confiabilidad, que representa una mayor calidad del resultado, lo que ciertamente requiere la corporación CDT de GAS en sus patrones primarios reconocidos como referencia de las más altas cualidades metrológicas, para sus servicios de calibración de medidores de flujo de gases.

El laboratorio de calibración de la Corporación CDT de GAS posee una serie de patrones primarios de diversos intervalos de medición y tecnologías, entre los que se encuentra el patrón primario tipo campana gasométrica que cuenta con incertidumbre típicas relativas al volumen de gas medido, aceptadas actualmente en la industria nacional, de entre 0,12% y 0,25%, acreditadas bajo la norma ISO/IEC 17025³ y reconocida por el Organismo Nacional de Acreditación (ONAC). Sin embargo, debido al crecimiento de la industria del gas y al desarrollo de nuevas tecnologías como magnéticas y ultrasónicas, con errores permisibles de medición menores al 0,5%, se hace necesario que la corporación CDT de GAS adapte sus procesos a las tecnologías emergentes y a dichos requerimientos futuros, como lo han realizado diferentes laboratorios internacionales con sus patrones primarios (véase Tabla 2).

³ Señala que la capacidad de medición y calibración (CMC) del patrón, no debe exceder la tercera parte del valor máximo permisible (EMP), aplicable a la clase de los medidores de flujo: $CMC \leq \frac{1}{3}EMP$.

Tabla 2 Incertidumbre estándar (k=1) de diferentes patrones primarios alrededor del mundo.

Facilities used during the key comparison CCM.FF-K6.

Participant	Type of primary standard	Standard uncertainty (%)
NIST (United States)	34 L and 677 L PVTt	0.025
PTB (Germany)	CFV working standards	0.04
	Positive displacement working standard	0.059 to 0.076
KRISS (Korea)	Bell prover	0.065
NMIJ (Japan)	Gravimetric	0.05
	PVTt	0.075 to 0.1
NMIA (Australia)	Bell prover	0.08
CENAM (Mexico)	Bell prover	0.075

Fuente: CHOI, Hae Man, *et al.* Uncertainty evaluation procedure and intercomparison of bell provers as a calibration system for gas Flow meters. *Revista Flow Measurement and Instrumentation*. 2010, nro. 21, pp. 488-496.

Teniendo en cuenta lo anterior, y el cubrimiento de los futuros retos tecnológicos, se propone inicialmente realizar un diagnóstico del estado actual de la campana gasométrica, por medio de un estudio detallado del modelo matemático para estimación del error e incertidumbre asociada y de su comportamiento operacional, para posteriormente plantear estrategias de mejora que permitan disminuir la incertidumbre de medición, que se evidencien en los resultados de calibración de medidores de flujo comparados con patrones internacionales para así lograr afianzar la calidad de los servicios de la corporación y desde luego el posicionamiento como referencia metrológica en la industria nacional e internacional.

.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Mejorar el proceso de calibración de medidores de volumen y/o caudal de gas con el patrón primario tipo Campana Gasométrica de la corporación CDT de GAS, reduciendo la incertidumbre y así contribuir en la misión de la universidad al impulsar la productividad y competitividad de empresas del sector del gas y metrología industrial de fluidos de la Comunidad Andina.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar el efecto que tienen las diferentes suposiciones termodinámicas consideradas en el modelo matemático de calibración actual descrito en la Ecuación 3., a partir de análisis de contribución en la incertidumbre del error del medidor de flujo bajo prueba:
 - Presión, temperatura constante durante todo el proceso de calibración.
 - Aire atmosférico asumido como aire seco (fluido de calibración).
 - Película de líquido sellante (Shell Tellus Oils DO 10) adherida a la campana gasométrica, despreciable en el cálculo del volumen de gas recolectado.
- Proponer un nuevo modelo matemático para estimar el error del medidor bajo prueba y su incertidumbre asociada, teniendo en cuenta el análisis previo de contribución de las diferentes suposiciones termodinámicas consideradas en el modelo actual.

- Validar el mejor desempeño de la campana y del proceso de calibración propuesto en este proyecto a través de la comparación de los resultados de la campana con los obtenidos en un laboratorio internacional.
- Identificar y proponer oportunidades de mejora en la operación del patrón tipo campana gasométrica, tomando como criterio la disminución de la contribución en la incertidumbre de las variables involucradas.

3. METODOLOGÍA

- El primer paso de la metodología adoptada, incluye un análisis conceptual del patrón tipo campana gasométrica que aborda la evaluación de su principio de operación, los modelos matemáticos de cada magnitud involucrada y las suposiciones implementadas para lograr ecuaciones prácticas para la cuantificación del mensurando.
- Se procede a cuantificar individualmente cada una de estas suposiciones, por medio del impacto en el modelo matemático actual para cálculo de error relativo al volumen de gas medido y a través de un análisis de incertidumbre asociada. Para posteriormente unificar tales efectos y determinar el impacto en la incertidumbre combinada de todo el proceso.
- A partir de la cuantificación de las suposiciones y los efectos considerables de ellas, se define un nuevo modelo matemático para el cálculo del error relativo al volumen de gas medido, que permita lograr un resultado más cercano al convencionalmente verdadero. Posteriormente, se desarrolla una herramienta para cálculo de resultados de medición y estimación de incertidumbre asociada al modelo definido, por medio del método de propagación GUM, el cual es validado por el método de simulación computacional, Monte Carlo.
- Tras la herramienta desarrollada, se realizaron tres (3) calibraciones de medidores de flujo de gas, de tres tecnologías diferentes y con certificado de calibración elaborados por laboratorios internacionales con reconocimiento de la comunidad científica. Estos tres resultados son utilizados como valores de referencia para comparar los resultados obtenidos entre el modelo matemático

actual y el modelo propuesto, en términos de sesgo de mensurando e incertidumbre.

- Finalmente se realiza un análisis de los resultados obtenidos con la nueva herramienta y a partir de las contribuciones de las fuentes involucradas en la estimación de incertidumbre, se proponen oportunidades de mejora que busquen mejorar la capacidad operativa y desempeño metrológico del banco de calibración.

4. PATRÓN PRIMARIO TIPO CAMPANA GASOMÉTRICA

Teniendo en cuenta que el objetivo del estudio es brindar propuestas de mejora al patrón primario tipo campana gasométrica propiedad de CDT de GAS, a continuación, se pondrá en contexto al lector, por medio de la descripción del patrón, su principio de operación y calibración, los modelos matemáticos involucrados y las suposiciones establecidas en ellos.

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La campana gasométrica es un dispositivo tipo desplazamiento positivo de acumulación de volumen de gas, usado como patrón primario para calibración de diferentes tipos de medidores de volumen y caudal de gas, como los tipos diafragmas, rotativos, rotámetros, placas de orificio, turbina, Vortex, másico térmico, elemento de flujo laminar, boquillas sónicas, entre otros.

La capacidad de estos patrones primarios varía según el fabricante o el alcance que se requiera (desde 5 L hasta 2000 L), para el caso de la campana gasométrica Brooks modelo 1092A, con la que cuenta el Centro de metrología de fluidos de la Corporación CDT de GAS (véase Figura 1), es de 300 L, calibrada por el método encintado (en inglés “strapping”), descrito en el ...numeral 3.5... y ...Anexo B...., y con el cual se logran incertidumbres cercanas a 0,05% relativo al volumen total de la campana.

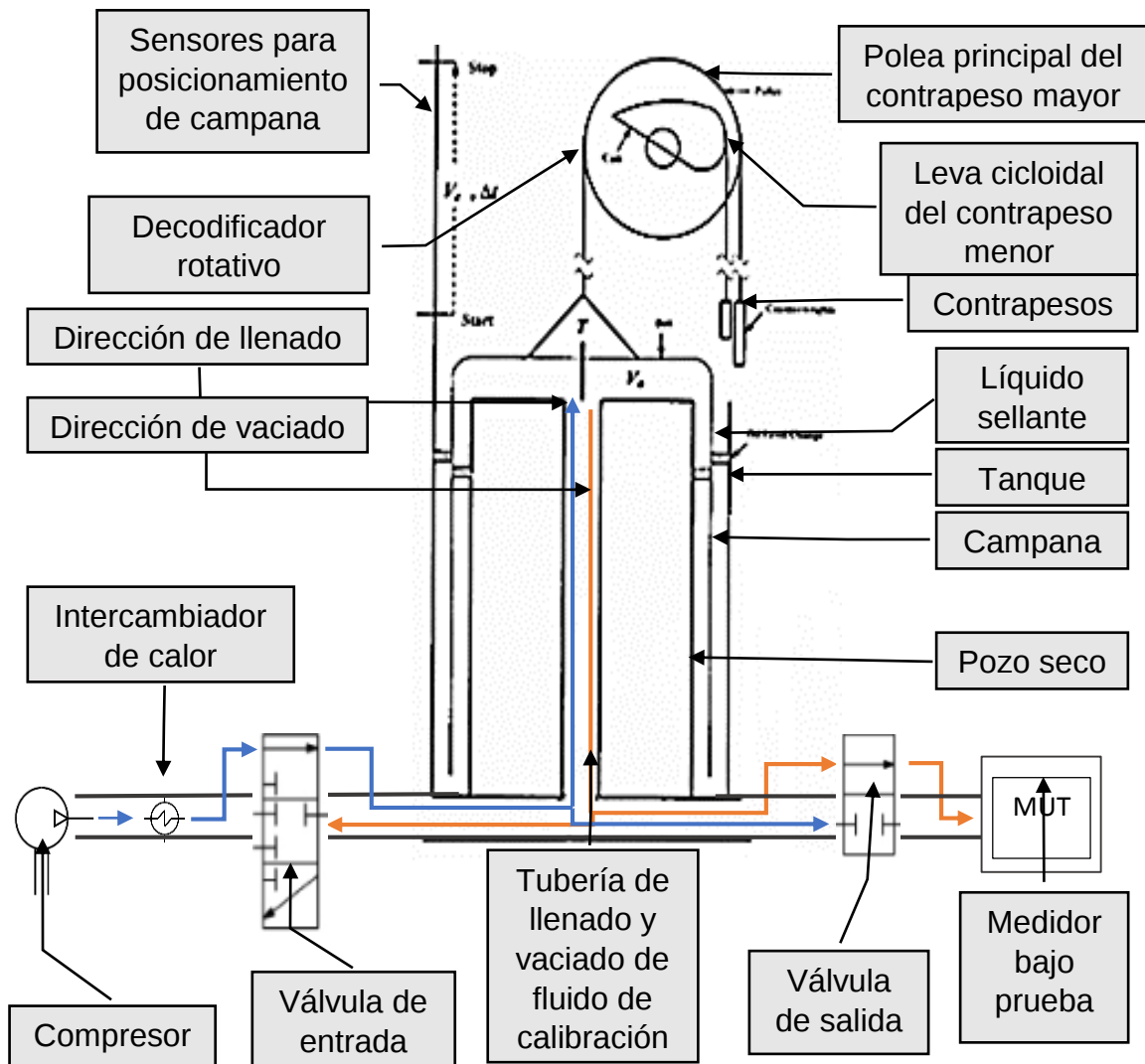
Figura 1. Campana gasométrica del Centro de metrología de fluidos de la Corporación CDT de GAS.



Fuente: CORPORACIÓN CDT DE GAS. Procedimiento Técnico de operación de la campana gasométrica (PTO-005).

El sistema consiste en un recinto de doble pared, compuesto por un tanque que rodea un pozo seco (véase Figura 2). Tal volumen anular formado, es llenado casi por completo con un líquido sellante donde se mueve un tanque invertido, llamado campana, suspendido por dos contrapesos que mantienen la presión constante en ella. El mayor contrapeso se encarga de ajustar el peso de la campana, mientras el menor, suspendido en una leva cicloidal, balancea la flotabilidad cuando la campana es sumergida en el líquido sellante, cuyo objetivo es evitar que el gas entre o salga de la campana, exceptuando a través de la tubería que sale a través del pozo seco. La campana se ubica concéntrica al tanque, a través de tres rodillos montados en su parte superior y tres más en su parte inferior.

Figura 2. Componentes internos y externos de la Campana Gasométrica.



Fuente: Basada en Campana gasométrica del Instituto Nacional de estándares y tecnología (NIST por sus siglas en inglés).

4.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN Y CALIBRACIÓN

Después de realizar el respectivo montaje y garantizar su hermeticidad (véase Figura 2), el proceso de calibración comienza con el suministro de aire atmosférico hacia un intercambiador de calor, que posteriormente ingresa a la campana,

haciéndola ascender tras el accionamiento de la posición correspondiente de la válvula de entrada hasta llenar el volumen especificado, mientras la válvula de salida se encuentra en su posición normalmente cerrada. Posteriormente, las dos válvulas cambian su posición y la campana empieza a descender, suministrando el aire almacenado al medidor bajo prueba (MUT por sus siglas en inglés “Meter Under Test”) a un caudal volumétrico previamente ajustado, por medio de un juego de válvulas de regulación aguas debajo de éste.

La calibración consiste en la comparación directa entre el volumen colectado en la campana (calculado geométricamente) y el volumen registrado por el MUT a las mismas condiciones termodinámicas. El mensurando del proceso de calibración es el error relativo al volumen de gas medido y está dado por la siguiente expresión:

Ecuación 1 Cálculo de error relativo.

$$Err = \left[\frac{V_m - V_{mt}}{V_{mt}} \right] \cdot 100$$

Donde:

$Err[\%]$ = Error asociado a medidores de flujo.

$V_m[dm^3]$ = Volumen registrado por el medidor bajo prueba.

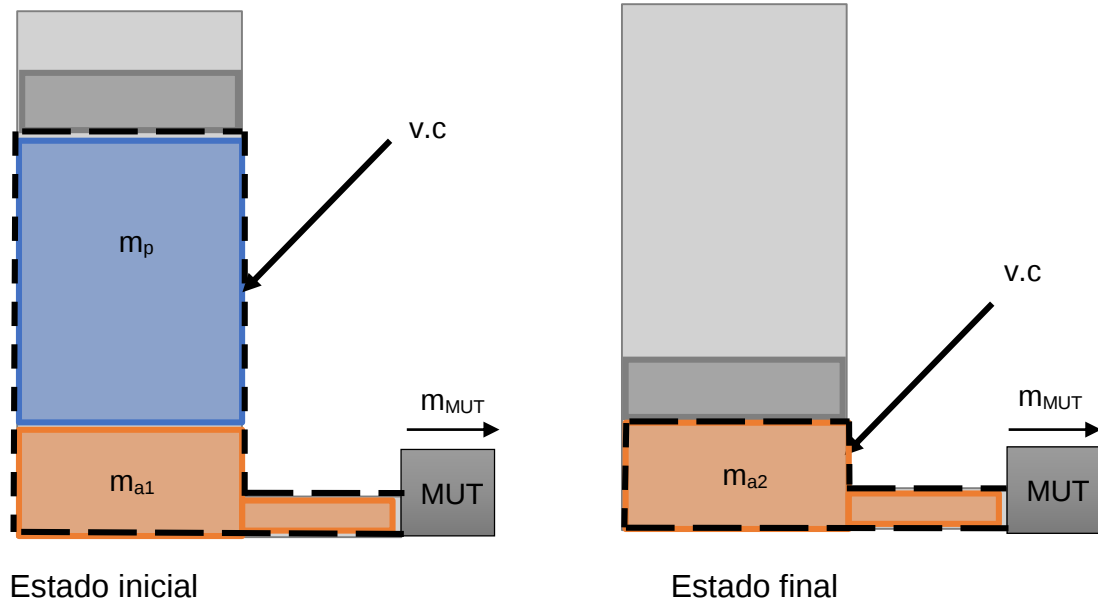
$V_{mt}[dm^3]$ = Volumen definido como convencionalmente verdadero y registrado por el patrón tipo campana gasométrica.

4.3 MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DEL ERROR RELATIVO AL VOLUMEN DE GAS MEDIDO

El patrón tipo campana gasométrica puede ser representado como un sistema cilindro embolo de régimen transitorio en el que su volumen de control está delimitado por una frontera móvil y la entrada del medidor bajo prueba (véase Figura

3). El estado inicial se compone por una masa de aire atmosférico colectada por la campana, denotada como m_p , y la masa remanente del sistema (masa desde la posición final de la campana hasta el medidor bajo prueba, incluyendo su masa original y todas las conexiones del montaje), denotada como m_{a1} , a ciertas condiciones iniciales de temperatura Tp_1 , presión absoluta Pp_1 y humedad relativa ϕp_1 . Tras descender la campana en un tiempo t , se evacúa del volumen de control, una cantidad de masa m_{MUT} hacia el medidor bajo prueba, mientras la masa remanente varía sus propiedades termodinámicas hasta un estado final (Tp_2 , Pp_2 , ϕp_2).

Figura 3. Representación esquemática de la Campana gasométrica.



Aplicando la ecuación de continuidad al volumen de control establecido, se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot dV + \int_A \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = (m_2 - m_1) + m_i \cdot \cos(180^\circ) + m_e \cdot \cos(0^\circ) = 0$$

Definiendo las masas involucradas en el balance:

$$m_1 = m_p + m_{a1}$$

$$m_2 = m_{a2}$$

$$m_i = 0$$

$$m_e = m_{MUT;t} + m_f$$

Donde:

$m_1[Kg]$ = Masa en un estado inicial.

$m_2[Kg]$ = Masa en un estado final.

$m_{a1}[Kg]$ = Masa remanente en el volumen de control a condiciones iniciales.

$m_{a2}[Kg]$ = Masa remanente en el volumen de control a condiciones finales.

$m_p[Kg]$ = Masa colectada por el patrón.

$m_e[Kg]$ = Masa que egresa del volumen de control.

$m_i[Kg]$ = Masa que ingresa al volumen de control.

$m_{MUT;t}[Kg]$ = Masa convencionalmente verdadera transferida al medidor bajo prueba.

$m_f[Kg]$ = Masa de fuga.

Despejando para $m_{MUT;t}$:

$$m_{MUT;t} = m_p - [m_{a2} - m_{a1}]$$

Nota: La masa de fuga de aire m_f , es evaluada mediante una prueba de hermeticidad, para garantizar que su efecto es despreciable.

Definiendo la masa en función del volumen de aire, se obtiene:

Ecuación 2 Volumen convencionalmente verdadero transferido al medidor bajo prueba.

$$V_{mt} \cdot \rho_m = V_p \cdot \rho_{p1} - V_a \cdot [\rho_{p2} - \rho_{p1}]$$

Donde:

$V_a[dm^3]$ = Volumen remanente en el volumen de control.

$V_{mt}[dm^3]$ = Volumen convencionalmente verdadero transferido al medidor bajo prueba.

$V_p[dm^3]$ = Volumen colectado por el patrón.

$\rho_m \left[\frac{Kg}{dm^3} \right]$ = Densidad promedio en el medidor bajo prueba.

$\rho_{p1} \left[\frac{Kg}{dm^3} \right]$ = Densidad inicial en el patrón.

$\rho_{p2} \left[\frac{Kg}{dm^3} \right]$ = Densidad final en el patrón.

Debido a que los requisitos de incertidumbres en el año 2000 eran menos estrictos con respecto a los actuales, la corporación CDT de Gas decidió realizar ciertas simplificaciones a la Ecuación 2, con el fin de facilitar su implementación. Las consideraciones establecidas fueron las siguientes:

- El primer término $V_p \cdot \rho_{p1}$ hace referencia a la masa colectada por el patrón, donde su densidad ρ_{p1} , está dada por la temperatura y presión promedio del aire en la campana gasométrica durante el desplazamiento del volumen colectado V_p , asumiendo que las condiciones termodinámicas iniciales (tiempo=0) no adquieren variaciones significativas durante el proceso. Por lo tanto $\rho_{p1} = \rho_p$.
- El segundo termino $V_a \cdot [\rho_{p2} - \rho_{p1}]$ hace referencia a los efectos por almacenamiento en el volumen remanente de las tuberías de conexión, volumen original en el medidor, el volumen de tara del patrón y el de las conexiones para las tomas de presión. Si la densidad del gas en el volumen V_a se incrementa a partir del valor inicial (debido a la disminución de la temperatura o al aumento de la presión), entonces la masa de gas neto acumulado en la tubería de conexión

y el volumen remanente de la campana, se incrementa. Para el modelo matemático actual de la corporación CDT de GAS, el efecto por acumulación o almacenamiento no tiene impacto significativo, pues consideran estables las condiciones termodinámicas (presión, temperatura, humedad relativa), durante el proceso de calibración.

- El fluido de calibración (aire atmosférico), es asumido como gas ideal (es decir, el factor de compresibilidad es igual a la unidad) debido a las condiciones de bajas presiones y temperaturas cercana a la temperatura ambiente y despreciando el efecto de la fracción molar de vapor de agua, en la masa molar del fluido.
- El volumen colectado por el patrón V_p desprecia el volumen ocupado por la película de aceite adherida a pared interna y externa de la campana gasométrica al momento de llenado.

Implementando las suposiciones establecidas a la Ecuación 2. y definiendo las densidades del patrón y medidor bajo prueba por medio de la ecuación de gas ideal, se reemplaza en la Ecuación 1. para obtener el modelo matemático utilizado actualmente en los procesos de calibración con campana gasométrica de la Corporación CDT de GAS.

Ecuación 3 Modelo matemático actual para el cálculo del error relativo al volumen de gas medido.

$$Err[\%] = \left[\left(\frac{V_m}{V_p \cdot \frac{\rho_p}{\rho_m}} \right) - 1 \right] \cdot 100 = \left[\left(\frac{V_m}{V_p} \cdot \left(\frac{P_m \cdot (T_p + 273,15)}{P_p \cdot (T_m + 273,15)} \right) \right) - 1 \right] \cdot 100$$

Donde:

$\rho_m \left[\frac{Kg}{dm^3} \right]$ = Densidad promedio en el medidor bajo prueba.

$\rho_p \left[\frac{Kg}{dm^3} \right]$ = Densidad promedio en el patrón tipo campana gasométrica.

$P_m [mbar]$ = Presión promedio del medidor bajo prueba.

$P_p [mbar]$ = Presión promedio del patrón.

$T_m [^{\circ}C]$ = Temperatura promedio del medidor bajo prueba.

$T_p [^{\circ}C]$ = Temperatura promedio del patrón.

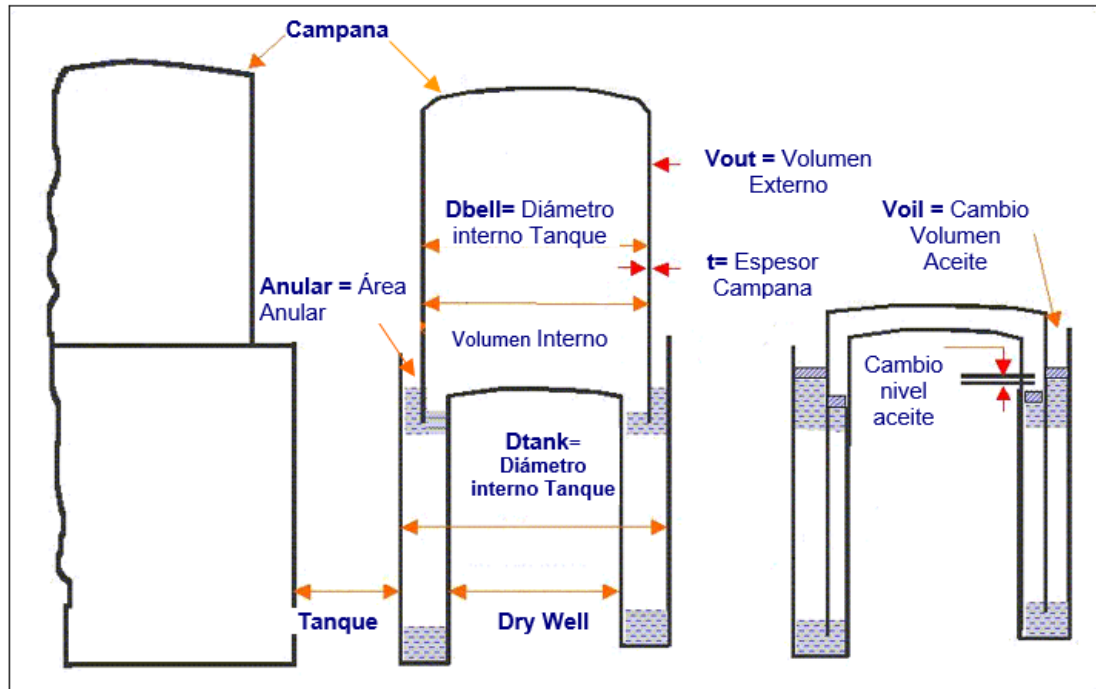
$V_m [dm^3]$ = Volumen registrado por el medidor bajo prueba.

$V_p [dm^3]$ = Volumen colectado por el patrón tipo campana gasométrica.

4.4 MODELO MATEMÁTICO PARA LE CÁLCULO DEL VOLUMEN DE GAS DEL PATRÓN TIPO CAMPANA GASOMÉTRICA

El cálculo del volumen desplazado por la campana es determinado de manera similar al de un cilindro, donde se requiere el diámetro interno y la altura a la cual se encuentra. El diámetro es determinado mediante mediciones dimensionales por un proceso estándar denominado encintado (o “strapping”) que se describe en el ...numeral 3.5... y ...Anexo B... La altura es determinada a partir de relaciones geométricas entre la medición del ángulo barrido por una polea (medida con un decodificador rotatorio), con la distancia lineal recorrida por la campana unida por un cable que se encuentra montado sobre dicha polea como se puede observar en la ...Figura 2... Adicionalmente debe tenerse en cuenta que el nivel de líquido sellante varía en la medida en que la campana se sumerge en él, afectando levemente el volumen efectivo medido (véase Figura 4)

Figura 4. Geometría interna de la campana gasométrica.



Fuente: CORPORACIÓN CDT DE GAS. Manual de instructivos I-012. Calibración de la campana gasométrica por el método dimensional.

El volumen efectivo desplazado o colectado por la campana (denotando V_p), puede obtenerse mediante la integración del área de la campana a lo largo de un desplazamiento definido.

Ecuación 4 Volumen desplazado por la campana gasométrica.

$$v_p = \left(\int_{p_{ini}}^{p_{fin}} \left(k_{bell} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot f(dbell)^2 \right) dpulsos \right) - \frac{\pi}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot (dtank^2 - dbell^2) \cdot f(\Delta nivel)$$

$$f(dbell) = 0,00043536 \cdot k_{bell} \cdot pulsos + 787,4199$$

$$f(\Delta nivel) = 0,01907 \cdot k_{bell} \cdot [p_{fin} - p_{ini}]$$

Donde:

$v_p [dm^3]$ = Volumen colectado por el patrón (campana).

$dbell$ [mm] = Diámetro exterior promedio de la campana

$dtank$ [mm] = Diámetro interno del tanque a la altura del nivel de líquido sellante.

$k_{bell} \left[\frac{mm}{pulsos} \right]$ = Constante cinemática de la campana.

$pini$ = Número de pulsos registrado por el sistema al inicio de la calibración, definen la posición inicial del patrón en el momento de la calibración.

$pfin$ = Número de pulsos registrado por el sistema al final de la calibración, definen la posición final del patrón en el momento de la calibración.

$f(dbell)$ = Diámetro externo de la campana en función del desplazamiento vertical del patrón (Desplazamiento vertical = $k_{bell} \cdot pulsos$).

$f(\Delta nivel)$ = Nivel del líquido sellante en función del desplazamiento vertical del patrón (Desplazamiento vertical = $k_{bell} \cdot pulsos$), evaluado de la posición inicial a la posición final.

4.5 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE ENCINTADO (STRAPPING) Y DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE CINEMÁTICA k_{bell}

El método dimensional de encintado (Strapping), consiste en la determinación del volumen interno mediante la caracterización geométrica de la campana, determinando las dimensiones de la polea principal, polea conducida y el cable de sujeción. El procedimiento se ajusta a lo descrito en diferentes normas⁴ y recomendaciones dadas por el NIST⁵ (Instituto Nacional de estándares y tecnología). En el Anexo B se desarrolla la plantilla de calibración para el patrón tipo Campana gasométrica por el método de encintado.

⁴ ANSI B109.1. Diaphragm Type Gas Displacement Meters (Under 500 Cubic Feet Per Hour Capacity).

ANSI B109.2. Diaphragm Type Gas Displacement Meters (500 Cubic Feet Per Hour Capacity and Over).

A.G.A. GAS MEASUREMENT MANUAL Meter Proving – Parte 12, Sección 12.1.

⁵ NIST Special Publication 250 – 49. NIST MEASUREMENT SERVICES: NIST Calibration Services for Gas Flow Meters. Piston Prover and Bell Prover Gas Flow Facilities.

Como resultado final se obtiene una constante cinemática del movimiento de la campana (K_{Bell} del patrón), encargada de relacionar el desplazamiento vertical con los pulsos emitidos por el codificador electrónico rotativo (enconder), que se encuentra acoplado al eje de la polea pequeña “Conducida” la cual por medio de contacto con la polea principal “conductora”, transmite el movimiento de desplazamiento del patrón.

Por medio de relaciones cinemáticas, se desarrolla el siguiente modelo matemático para la constante K_{Bell} .

Ecuación 5 Constante cinemática de la campana gasométrica.

$$k_{bell} = \frac{\pi \cdot D_{pp}}{pulsos_{rev}} \cdot \left[1 + \frac{D_c}{D_{pg}} \right]$$

Donde:

$k_{bell} \left[\frac{mm}{pulsos} \right]$ = Constante cinemática de la campana.

$D_{pp}[mm]$ = Diámetro de polea pequeña.

$D_{pg}[mm]$ = Diámetro de polea grande.

$D_c[mm]$ = Diámetro del cable.

5. MODELOS MATEMÁTICOS PROPUESTOS PARA EVALUAR LAS SUPOSICIONES IMPLEMENTADAS ACTUALMENTE EN LOS PROCESOS DE CALIBRACIÓN DE VOLUMEN DE GAS DE LA CORPORACIÓN CDT DE GAS

En el capítulo anterior se describió el modelo matemático actual que se utiliza para realizar mediciones de volumen de gas con la campana gasométrica, el cual se basa en una serie de suposiciones. Para evaluar dichas suposiciones, en este estudio se definen una serie de modelos matemáticos que permiten evidenciar el impacto de cada una en los resultados de medición. A continuación, se describen los modelos matemáticos para:

- Estimar el termino (despreciado) de volumen remanente relacionado con el termino V_a de la Ecuación 2.
- Estimar las densidades involucradas en el modelo de la Ecuación 2, considerando el fluido de calibración como gas real y teniendo en cuenta el efecto de la fracción molar de vapor de agua en la masa molar total.
- Calcular la variación en el volumen colectado por el patrón tipo campana gasométrica, generado por la adhesión de la película del aceite utilizado como liquido sellante en sus superficies.

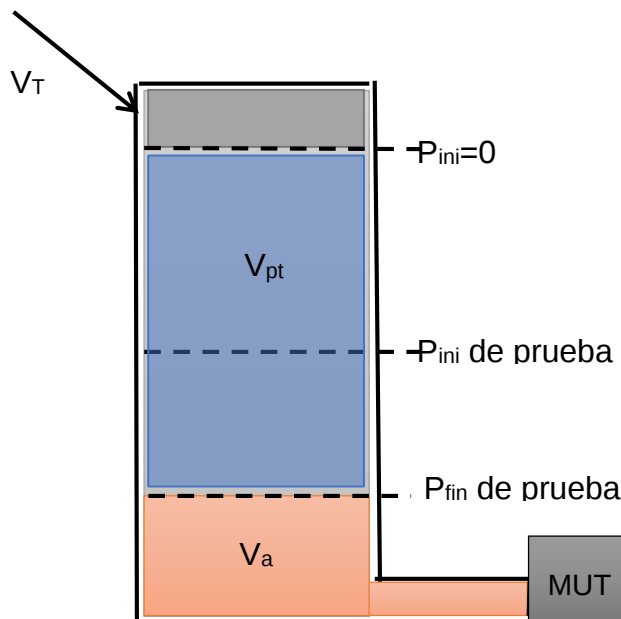
5.1 MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN ACUMULADO

La acumulación en el proceso de calibración, impacta directamente en la diferencia entre la cantidad de masa que pasa a través del medidor bajo prueba y la masa colectada por el patrón, éste está compuesto por dos términos (véase segundo término de la Ecuación 2.). El primero indica el volumen remanente V_a , presente entre la posición final de la campana y el medidor bajo prueba (incluyendo todas las

conexiones), y el segundo hace referencia al cambio en la densidad del gas presente ($\rho_{p2} - \rho_{p1}$), condicionado por el cambio de las condiciones termodinámicas (temperatura, presión y humedad) durante el descenso de la campana (o ascenso si es el tipo de operación).

El siguiente modelo matemático se enfocará en el volumen remanente V_a , partiendo de la calibración dimensional de la campana gasométrica y los modelos matemáticos descritos en el ...numeral 3-4 y 3-5...

Figura 5. Esquema para cálculo de volumen remanente



Se calcula el volumen de la campana gasométrica V_{pt} a partir de su posición más alta, determinada en el método de encintado (strapping), hasta la posición donde finaliza la prueba, como se visualiza en la ...Figura 5...

$$p_{ini} = 0$$

$$V_{pt} = \left(\int_0^{p_{fin}} \left(k_{bell} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot f(dbell)^2 \right) dpulsos \right) - \frac{\pi}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot (dtank^2 - dbell^2) \cdot f(\Delta nivel)$$

$$f(dbell) = 0,00043536 \cdot k_{bell} \cdot pulsos + 787,4199$$

$$f(\Delta nivel) = 0,01907 \cdot k_{bell} \cdot p_{fin}$$

Estimando el volumen total de la campana V_t (dado por el strapping) y añadiendo un volumen de gas aproximado presente en las conexiones. La expresión para el cálculo del volumen remanente está dada por:

Ecuación 6 Volumen remanente en el sistema.

$$V_a = V_T - V_{pt}$$

Donde:

$V_{pt} [dm^3]$ = Volumen colectado por un patrón a partir de cero pulsos.

$V_T [dm^3]$ = Volumen total estimado del patrón hasta medidor bajo prueba, incluyendo conexiones.

$V_a [dm^3]$ = Volumen remanente del sistema.

Nota: El volumen total, denotado como V_t , puede variar según la instalación en cada prueba, pues éste depende del montaje y requerimientos de calibración de cada medidor bajo prueba.

5.2 MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DE DENSIDADES

Dado que la densidad no es una magnitud medida directamente para el proceso de calibración de flujo de gas del Laboratorio de Metrología de la Corporación CDT de

GAS, se desarrolla un modelo matemático⁶ para el cálculo de todas las densidades involucradas en función de las condiciones termodinámicas experimentales de temperatura, presión y humedad.

A partir de la ecuación de estado para el aire como gas real, y despejando para la densidad, se obtiene:

Ecuación 7 Modelo para cálculo de la densidad del fluido de calibración.

$$\rho = \frac{P \cdot M}{Z \cdot R \cdot T}$$

Donde:

$M \left[\frac{Kg}{mol} \right]$ = Masa molar de aire.

$P [Pa]$ = Presión del aire.

$R \left[\frac{J}{mol \cdot K} \right]$ = 8,3141 : Constante universal de los gases ideales

$T_K [K]$ = Temperatura del aire en unidades Kelvin.

Z = Factor de compresibilidad.

Para definir la masa molar M , se tendrá en cuenta la fracción de vapor de agua que se encuentra en el fluido de calibración que emplea la Corporación CDT de GAS (aire atmosférico).

Ecuación 8 Masa molar de aire húmedo.

$$M = M_a \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$$

⁶ A. Picard, R S Davis, M Gläser and K. Fujii, "Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)", Metrologia 45 (2008), 149-155.
METROLOGÍA 18, 33-40 (1982) P. Giacomo., "Equation for the determination of the density of moist air"

Donde:

x_v = Fracción molar de vapor de agua en aire húmedo.

$M_a \left[\frac{Kg}{mol} \right] = 0,02896$: Masa molar de aire seco

$M_v \left[\frac{Kg}{mol} \right] = 0,018015$: Masa molar del agua

La fracción de vapor de agua está dada por la humedad relativa del fluido y se define como:

$$x_v = \phi \cdot x_{sv}$$

$$x_{sv} = f \cdot \frac{P_{sv}}{P}$$

Donde:

f = Factor de fugacidad

$P [Pa]$ = presión del aire.

$P_{sv}[Pa]$ = presión de vapor saturado

x_{sv} = Fracción molar del vapor de agua en aire húmedo saturado.

ϕ = Humedad relativa.

El factor de fugacidad y la presión de vapor están en función de la temperatura, y están dados por:

Factor de fugacidad:

$$f = \alpha + \beta \cdot P + \gamma \cdot T^2$$

$$\alpha = 1,00062$$

$$\beta = 3,14 \cdot 10^{-8} \left[\frac{1}{Pa} \right]$$

$$\gamma = 5,6 \cdot 10^{-7} \left[\frac{1}{K^2} \right]$$

Donde:

$T [^{\circ}C]$ = temperatura del aire en grados Celsius.

Presión de vapor saturado:

$$P_{sv} = e^{\left(A \cdot T_K^2 + B \cdot T_K + C + \frac{D}{T_K}\right)}$$

$$A = 1,2378847 \cdot 10^{-5} \left[\frac{1}{K^2} \right]$$

$$B = -1,9121316 \cdot 10^{-2} \left[\frac{1}{K} \right]$$

$$C = 33,94$$

$$D = -6343,1645 [K]$$

Donde:

$T_K [K]$ = Temperatura del aire en grados Kelvin

El fator de compresibilidad para un gas real está dado por la siguiente expresión:

Ecuación 9 Factor de compresibilidad para un gas real.

$$z = 1 - \frac{P}{T_K} \cdot [a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + (b_0 + b_1 \cdot T) \cdot x_v^2] + \frac{P^2}{T^2} \cdot (d + e \cdot x_v^2)$$

$$a_0 = 1,58123 \cdot 10^{-6} \left[\frac{K}{Pa} \right]$$

$$a_1 = -2,9331 \cdot 10^{-8} \left[\frac{1}{Pa} \right]$$

$$a_2 = 1,1043 \cdot 10^{-10} \left[\frac{1}{K \cdot Pa} \right]$$

$$b_0 = 5,707 \cdot 10^{-6} \left[\frac{K}{Pa} \right]$$

$$b_1 = -2,051 \cdot 10^{-8} \left[\frac{1}{Pa} \right]$$

$$c_0 = 1,9898 \cdot 10^{-4} \left[\frac{K}{Pa} \right]$$

$$c_1 = -2,376 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{Pa} \right]$$

$$d_0 = 1,83 \cdot 10^{-11} [K^2 \cdot Pa^2]$$

$$e = -7,65 \cdot 10^{-9} [K^2 \cdot Pa^2]$$

Donde:

$P [Pa]$ = Presión del aire.

$T_K [K]$ = Temperatura del aire en grados Kelvin.

$T [°C]$ = Temperatura del aire en grados Celsius.

x_v = Fracción molar de vapor de agua en aire húmedo.

5.3 MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DEL VOLUMEN DE GAS OCUPADO POR LA PELÍCULA DE ACEITE

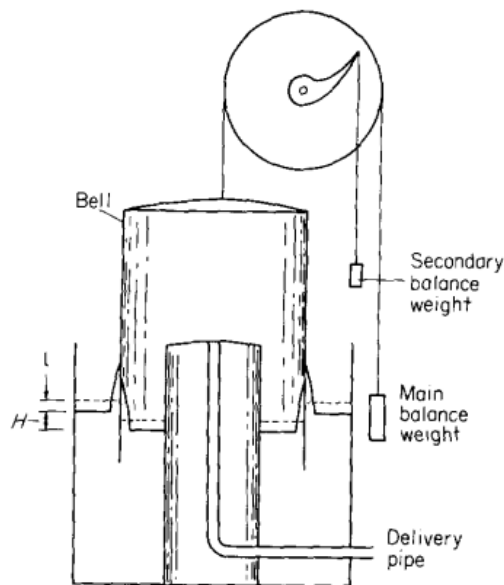
Los diferentes institutos de metrología alrededor del mundo han realizado diversos estudios sobre cada una de las fuentes de incertidumbre atribuidas a la medición de volumen de gas, con el fin de comparar el rendimiento de sus patrones para así brindar trazabilidad en sus procesos. El efecto de la película de aceite en el cálculo del volumen desplazado por la campana gasométrica, es una de las fuentes de incertidumbre que ha sido objeto de análisis a lo largo de los años, como se puede evidenciar en los reportes avalados por la Asociación Europea de Institutos Nacionales de Metrología (EURAMET por sus siglas en inglés)⁷

La adherencia de aceite es la misma tanto al interior como al exterior de la campana, sin embargo, cuando estas áreas son suficientemente diferentes, la reducción del

⁷ EURAMET. Inter – comparation in the gas flow range from 1 m³/h to 250 m³/h with sonic nozzles. Final report – Draft Project No. 1396. 2018, noviembre 2. pp. 30-31.

nivel de aceite puede generar una inconsistencia en el modelo matemático de la ...Ecuación 2... La transferencia de aceite ocurre entre el interior y el exterior de la campana para balancear esta inconsistencia y es allí donde aparece un error sistemático, que, al ser negativo, indicaría que el volumen recolectado es menor al calculado con las dimensiones de la campana y el cambio en el nivel de aceite tras la inmersión. Otro de los aspectos en los que podría tener impacto la película de aceite adherida, es en el peso efectivo de la campana y en el balance de fuerzas de ella, sin embargo, tal incremento será asumido como despreciable en base a los estudios realizados y no será objeto de análisis.

Figura 6. Representación ampliada de la película de aceite adherida a la campana gasométrica.



Fuente: SMITH, A. J. W., The Effect of Oil Films on the Performance of Bell Provers, Int. J. Mech. Sci., 18, 135-143 1976

El siguiente modelo matemático⁸ se basa en el estudio realizado por Smith, A. J. W y el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Brunel, Uxbridge,

⁸ SMITH, A. J. W., The Effect of Oil Films on the Performance of Bell Provers, Int. J. Mech. Sci., 18, 135-143 1976.

Middlesex, Inglaterra, en el que evalúa el efecto de la película de aceite en el desempeño de las campanas gasométricas. Para determinar el máximo error posible, se desarrolla el modelo para las condiciones críticas de operación: volumen y caudal máximo permisible para la campana gasométrica.

Distancia máxima desplazada de la campana:

$$h = k_{bell} \cdot (p_{fin} - p_{ini})$$

Diámetro de pozo seco:

$$dps = 2 \cdot dbell - dtank$$

Tiempo de desplazamiento de la campana:

$$t = \frac{V_{PT}}{Q_{max}}$$

Velocidad máxima de desplazamiento de la campana:

$$U = \frac{h}{t}$$

Volumen de líquido sellante adherido a la campana:

$$V_L = \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot 10^6} \cdot \sqrt{\frac{\nu \cdot U}{g}} \cdot h \cdot dbell$$

Área anular interior de la campana:

$$S_i = \frac{\pi}{4} \cdot (dbell^2 - dps^2)$$

Área anular exterior de la campana:

$$S_0 = \frac{\pi}{4} \cdot (dtank^2 - dbell^2)$$

Criterio de diseño para campanas gasométricas: $S_0 > C$

$$C = S_i \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{b}{dbell}\right)$$

Cambio neto en el volumen de gas de la campana:

$$V_G = V_L \cdot \left(\frac{C - S_0}{S_i + S_0}\right)$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se obtiene la siguiente expresión para calcular el error relativo al volumen colectado por la campana

Ecuación 10 Error que genera la película de aceite relativo al volumen colectado por la campana.

$$u_{pa} = \frac{V_G}{V_t + V_G} \cdot 100 [\%]$$

Donde:

b [mm] = Espesor de la campana

C [mm²] = Criterio para diseño de campanas gasométricas.

$dbell$ [mm] = Diámetro exterior promedio de la campana.

dps [mm] = Diámetro del pozo seco.

$dtank$ [mm] = Diámetro interno del tanque a la altura del nivel de líquido sellante.

u_{pa} [%] = Error asociada a la película de aceite en el volumen de patrón.

g [$\frac{mm}{seg^2}$] = Aceleración de la gravedad.

h [mm] = Distancia máxima desplazada de la campana.

k_{bell} [$\frac{mm}{pulsos}$] = Constante cinemática de la campana.

$pini$ = Número de pulsos registrado por el sistema al inicio de la calibración = 0 pulsos.

$pfin$ = Número de pulsos máximos registrado por el sistema al final de la calibración, para el volumen máximo de la campana.

$Q_{max} \left[\frac{dm^3}{seg} \right]$ = Caudal máximo de operación de la campana gasométrica.

$S_i \text{ mm}^2$ = Área anular interior de la campana.

$S_o [\text{mm}^2]$ = Área anular exterior de la campana.

$t [seg]$ = Tiempo de desplazamiento de la campana para el volumen y caudal máximo.

$U \left[\frac{mm^3}{seg} \right]$ = Velocidad máxima de desplazamiento de la campana.

$V_L [dm^3]$ = Volumen de líquido sellante adherido a la campana.

$V_G [dm^3]$ = Cambio neto en el volumen de gas de la campana.

$\nu \left[\frac{mm^2}{seg} \right]$ = Viscosidad dinámica del líquido sellante.

$V_t [dm^3]$ = Volumen máximo permisible de la campana, dado por el método de encintado (strapping).

El modelo anterior se desarrolló para las condiciones críticas de la campana gasométrica de la Corporación CDT de GAS, por lo tanto, los datos estimados son una constante relativa al volumen del patrón colectado en cada prueba. En la siguiente tabla se puede visualizar los resultados obtenidos por medio del software EES⁹:

⁹ Engineering Equation Solver. Educational version distributed by McGraw-Hill

Tabla 3 Error en función del diámetro de pozo seco (upa %).

	dps [mm]	u_{pa} [%]	V_G [dm ³]	S₀ [mm ²]	C [mm ²]
Run 1	671,7	0,00115	0,00348	125820	133044
Run 2	681,7	-0,00057	-0,00172	125820	122394
Run 3	691,7	-0,00247	-0,00748	125820	111587
Run 4	701,7	-0,00458	-0,01388	125820	100622
Run 5	711,7	-0,00694	-0,02103	125820	89500
Run 6	721,7	-0,00960	-0,02909	125820	78220
Run 7	731,7	-0,01262	-0,03822	125820	66783
Run 8	741,7	-0,01606	-0,04865	125820	55189
Run 9	751,7	-0,02003	-0,06068	125820	43437
Run 10	761,7	-0,02466	-0,07470	125820	31528
Run 11	771,7	-0,03013	-0,09124	125820	19461

El efecto de la película de líquido sellante (Shell Tellus Oils DO 10) adherida a la campana gasométrica se manifiesta en el cambio del volumen disponible para ocupar por el gas en calibración. Tal efecto es mitigado por la campana gasométrica con la que cuenta la corporación CDT de GAS, gracias a su diseño, específicamente en cuanto al dimensionamiento del pozo seco, donde se ha garantizado que el área anular horizontal externa de la campana sea mayor en la menor proporción al área anular interna, para así satisfacer el criterio de diseño establecido por Smith: $S_0 > C$, como se visualiza en la Tabla 3

6. CUANTIFICACIÓN DE LAS SUPOSICIONES TERMODINÁMICAS ACTUALES

La corporación CDT de GAS lleva a cabo la estimación de la incertidumbre asociada al error de medición de las diferentes magnitudes, a través del método de propagación GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement)¹⁰, haciendo uso de plantillas en Microsoft Excel para cada proceso. A continuación, se cuantificarán los siguientes efectos, despreciados actualmente para el modelo matemático de calibración de medidores de flujo de gas:

- Efecto de la variación de propiedades termodinámicas (presión y temperatura) durante el proceso de calibración (consideración **I.** y **II.** del ...numeral 3.3...).
- Efecto de la humedad en el fluido de calibración (consideración **III.** Del ...numeral 3.3...).
- Efecto de la película de líquido sellante (Shell Tellus Oils DO 10) adherida a la campana gasométrica (consideración **IV.** Del ...numeral 3.3...).

La cuantificación se abordará desde dos aspectos: cálculo de error de medición y estimación de incertidumbre asociada a éste, desarrollando una plantilla de cálculo por medio del software EES¹¹ y de su herramienta para análisis de incertidumbre, utilizando los datos obtenidos de la calibración de un medidor tipo rotativo FMG (Flow Meter Group), serie MG 20 (cámara derecha) para el intervalo de operación de 0,16 [m³/h] – 10 [m³//h] (2,66 [dm³/min] – 166.66 [dm³/min]).

¹⁰ BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML “Guide to the expression of Uncertainty on measurement” Reimpresa en 1995.

¹¹ Engineering Equation Solver. Educational version distributed by McGraw-Hill

Método de propagación GUM

Las diferentes organizaciones internacionales de metrología en cabeza de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), reconocen como referencia fundamental para la estimación de la incertidumbre al método basado en la ley de propagación GUM. Este método se basa en identificar todas las posibles fuentes de incertidumbre, con base al juicio científico y experiencia del metrologo, sobre un modelo matemático establecido para describir un mensurando, estimando para cada una un valor y una función de probabilidad asociada. Tales valores son expresados con el mismo nivel de confianza, reduciéndolos individualmente a incertidumbres estándar que posteriormente son combinadas, linealizando el método por medio de derivadas parciales sobre los mejores estimados de cada variable de entrada, que determinan a su vez los coeficientes de sensibilidad. Finalmente se estima la incertidumbre expandida asociado al resultado de medición tras obtener los grados de libertad y el factor de cobertura.

6.1 ANÁLISIS DE ERROR DE MEDICIÓN

El análisis en cuanto a error de medición se llevará a cabo cuantificando el impacto individual de cada suposición en él y posteriormente el impacto global, realizando una comparación entre el modelo de error actual (Ecuación 3.) y los siguientes modelos matemáticos propuestos para el cálculo de error relativo al volumen de gas medido. Las magnitudes involucradas serán determinadas a partir de los modelos descritos en el ...capítulo 3 y capítulo 4....

Ecuación 11 Cálculo de error incluyendo los efectos dados por la variación de la presión y temperatura en el patrón.

$$Err_{Va} = \left[\frac{V_m}{\frac{V_p \cdot \rho_{ap1}}{\rho_{am}} - \frac{V_a \cdot (\rho_{ap2} - \rho_{ap1})}{\rho_{am}}} - 1 \right] \cdot 100$$

Donde:

$Err_{Va} [\%]$ = Error asociado a medidores de flujo incluyendo efectos dados por la variación de la presión y temperatura en el patrón.

$V_a [dm^3]$ = Volumen remanente en el volumen de control. (Ecuación 6.)

$V_m [dm^3]$ = Volumen real registrado por el medidor bajo prueba.

$V_p [dm^3]$ = Volumen colectado por el patrón. (Ecuación 4.)

$\rho_{am} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$ = Densidad promedio de aire seco en el medidor bajo prueba. (Ecuación 7, para una fracción molar de vapor de agua $x_v = 0$)

$\rho_{ap1} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$ = Densidad inicial de aire seco en el patrón. (Ecuación 7, para una fracción molar de vapor de agua $x_v = 0$)

$\rho_{ap2} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$ = Densidad final de aire seco en el patrón. (Ecuación 7, para una fracción molar de vapor de agua $x_v = 0$)

Los efectos dados por la variación de presión y temperatura durante el proceso de calibración fueron incluidos tanto en el término referente a la acumulación como en el término del volumen colectado por el patrón, donde se tiene en cuenta la densidad inicial ρ_{ap1} para un tiempo $t=0$ y no la promedio.

Ecuación 12 Cálculo de error incluyendo los efectos de la humedad del fluido de calibración.

$$Err_{hr} = \left[\frac{V_m}{\frac{V_p \cdot \rho_{hrp}}{\rho_{hrm}}} - 1 \right] \cdot 100$$

Donde:

$Err_{hr} [\%]$ = Error asociado a medidores de flujo incluyendo efecto de la humedad en el fluido de calibración.

$V_m [dm^3]$ = Volumen real registrado por el medidor bajo prueba.

$V_p [dm^3]$ = Volumen colectado por el patrón. (Ecuación 4.)

$\rho_{hrm} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$ = Densidad promedio de aire húmedo en el medidor bajo prueba. (Ecuación 7 para una fracción molar de vapor de agua $x_v \neq 0$)

$\rho_{hrp} \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$ = Densidad promedio de aire húmedo en el patrón. (Ecuación 7, para una fracción molar de vapor de agua $x_v \neq 0$)

El efecto de la humedad podría ser más significativo para un modelo como el de la Ecuación 11., pues las moles de vapor de agua tendrían un impacto también en el término de la acumulación, el cual no es añadido, ya que el objetivo es analizar cada consideración individualmente como ya se mencionó.

Ecuación 13. Cálculo de error incluyendo efecto de la película de aceite adherida a la campana gasométrica.

$$Err_{pa} = \left[\frac{V_m}{\frac{(V_p + \frac{u_{pa}}{100} \cdot V_p) \cdot \rho_{ap}}{\rho_{am}}} - 1 \right] \cdot 100$$

Donde:

$Err_{pa} [\%]$ = Error asociado a medidores de flujo incluyendo efeto de la película de aceite formada en la campana.

$V_m [dm^3]$ = Volumen real registrado por el medidor bajo prueba.

$u_{pa} [\%]$ = Error que genera la película de aceite relativo al volumen colectado por la campana. (Ecuación 10.)

$\rho_{am} \left[\frac{Kg}{dm^3} \right]$ = Densidad promedio de aire seco en el medidor bajo prueba. (Ecuación 7., para una fracción molar de vapor de agua $x_v = 0$)

$\rho_{ap} \left[\frac{Kg}{dm^3} \right]$ = Densidad promedio de aire seco en el patrón. (Ecuación 7., para una fracción molar de vapor de agua $x_v = 0$)

Ecuación 14. Cálculo de error incluyendo todos los efectos previamente analizados.

$$Err_{corr} = \left[\frac{\frac{V_m}{(V_p + \frac{u_{pa}}{100} \cdot V_p) \cdot \rho_{hrp1}} - \frac{V_a \cdot (\rho_{hrp2} - \rho_{hrp1})}{\rho_{hrm}}}{\rho_{hrm}} - 1 \right] \cdot 100$$

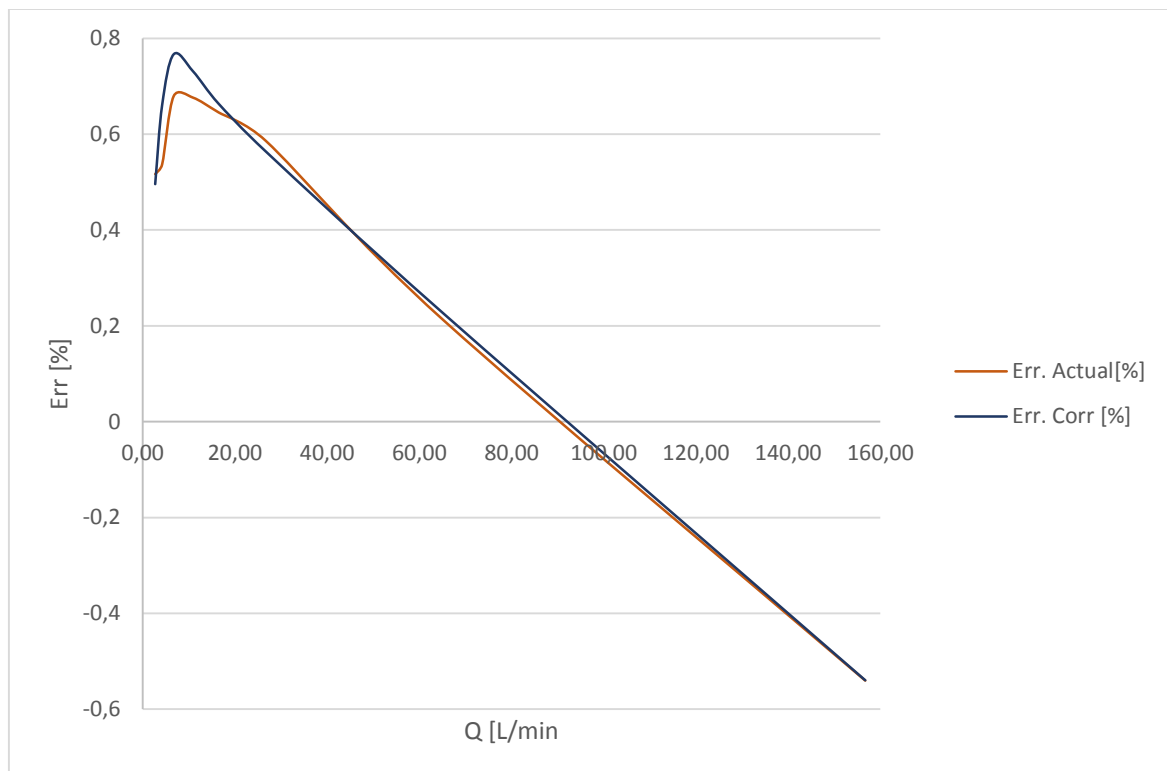
Los errores obtenidos se visualizan en la siguiente tabla y curva de calibración.

Tabla 4 Variación del error en función de cada suposición.

Q [dm3/min]	Err_Actual [%]	Δ ErrVa [%]	Δ ErrRH [%]	Δ ErrPa [%]	Δ ErrCorr [%]
2,72	0,517	-0,042	-0,001	0,002	-0,021
4,23	0,537	-0,019	-0,003	0,002	0,124
6,72	0,679	0,028	0,000	0,002	0,088
10,91	0,676	0,037	0,002	0,002	0,055
16,49	0,645	-0,005	-0,002	0,002	0,018
26,66	0,586	-0,004	-0,003	0,002	-0,022
65,43	0,210	0,004	-0,005	0,002	0,014
156,73	-0,540	0,005	-0,006	0,002	0,000

Q [dm ³ /min]	Err_Actual [%]	Δ ErrVa [%]	Δ ErrRH [%]	Δ ErrPa [%]	Δ ErrCorr [%]
Promedio		0,001	-0,002	0,002	0,032
Desvest		0,025	0,002	0,000	0,053

Figura 7. Curva de calibración de medidor tipo rotativo.



6.2 ANÁLISIS DE ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE

El análisis en cuanto a estimación de incertidumbre se llevará a cabo por medio de la contribución individual de cada suposición en la incertidumbre de la magnitud implicada y la contribución en la incertidumbre global del modelo matemático actual de cálculo de error relativo al volumen de gas medido (Ecuación 1.). Posteriormente, se compararán las incertidumbres añadidas con las incertidumbres estimadas actualmente.

Nota: las magnitudes involucradas son las mismas definidas en los modelos matemáticos del ...numeral 5.1...

Ecuación 15. Incertidumbre generada por la acumulación de volumen.

$$u_{va} = \frac{V_a \cdot (\rho_{ap2} - \rho_{ap1})}{\rho_{am}}$$

Coeficiente de sensibilidad:

$$\frac{\partial v_a}{\partial v_p} = 1$$

La incertidumbre generada por la acumulación es la generada por el segundo término de la Ecuación 2., y tiene implicaciones en el volumen colectado por el patrón.

Ecuación 16. Incertidumbre generada por la humedad en el fluido de calibración.

$$u_c = C_{hrp} - C_{ap}$$

Donde:

$$C_{hrp} = \frac{\rho_{hrp}}{\rho_{hrm}}$$

$$C_{ap} = \frac{\rho_{ap}}{\rho_{am}}$$

Coeficiente de sensibilidad:

$$\frac{\partial hr}{\partial C} = 1$$

La incertidumbre generada por la humedad en el fluido de calibración se manifiesta en la corrección termodinámica proveniente del balance de masa inicial del sistema (Ecuación 2).

Ecuación 17. Incertidumbre generada por la película de aceite presente en el volumen colectado por la campana.

$$u_{pa} = \frac{u_{pa}}{100} \cdot V_p$$

Coeficiente de sensibilidad:

$$\frac{\partial pa}{\partial v_p} = 1$$

La incertidumbre generada por la película de aceite presente en la campana es determinada por modelo descrito en ...el numeral 4.3..., y tiene implicación directa en el cálculo del volumen colectado por el patrón.

Los resultados obtenidos se visualizarán en las tablas y gráficas siguientes:

Donde:

Q: Caudal de prueba.

Sup: Supocisión.

Va: Suposición referente al volumen acumulado.

HR: Suposición referente a la Humedad relativa del fluido de calibración.

Pa: Supocisión referente a la película de aceite.

C: Contribución en la corrección termodinámica.

Vp: Contribución en el volumen colectado por el patrón.

Err: Contribución en el error relativo al volumen de gas medido.

U_Corr: Incertidumbre corregida.

U_Act: Incertidumbre actual.

U_Inc: Incremento en la incertidumbre

Tabla 5. Contribución de cada suposición en la incertidumbre actual.

Q [dm3/min]	Sup	Contribución			U_Corr [%]
		C	Vp	Err	
2,72	Va	N/A	74,77 %	13,56%	0,083
	HR	0,02 %	N/A	0,01%	
	Pa	N/A	0,49 %	0,09%	
4,23	Va	N/A	2,42 %	0,13%	0,077
	HR	0,16 %	N/A	0,14%	
	Pa	N/A	1,91 %	0,10%	

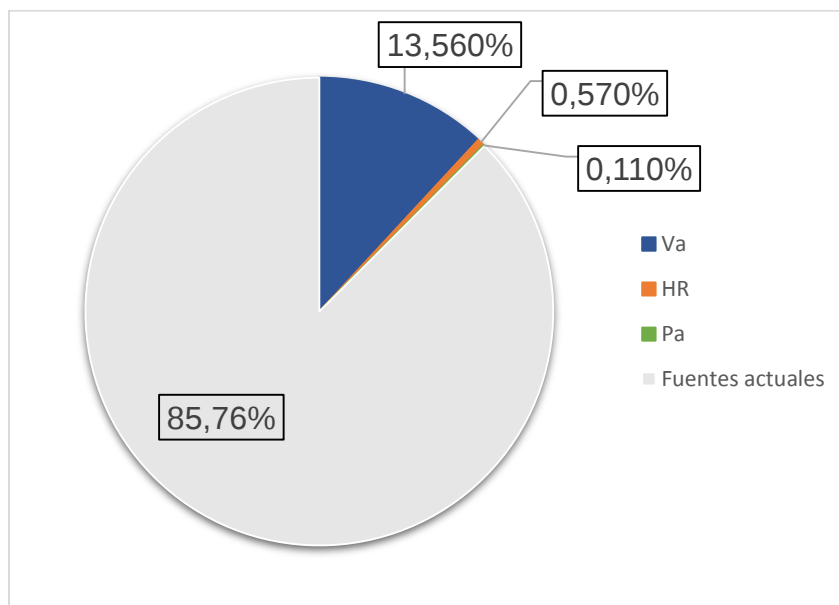
Q [dm3/min]	Sup	Contribución			U_Corr [%]
		C	Vp	Err	
6,70	Va	N/A	59,30 %	7,17%	0,080
	HR	0,00 %	N/A	0,00%	
	Pa	N/A	0,80 %	0,10%	
10,91	Va	N/A	73,21 %	11,61%	0,082
	HR	0,07 %	N/A	0,05%	
	Pa	N/A	0,58 %	0,09%	
16,49	Va	N/A	2,12 %	0,09%	0,076
	HR	0,10 %	N/A	0,09%	
	Pa	N/A	2,59 %	0,11%	
26,63	Va	N/A	8,63 %	0,35%	0,076
	HR	0,15 %	N/A	0,13%	
	Pa	N/A	2,63 %	0,11%	
65,44	Va	N/A	1,12 %	0,04%	0,076
	HR	0,44 %	N/A	0,40%	
	Pa	N/A	3,04 %	0,11%	
156,71	Va	N/A	1,39 %	0,05%	0,076
	HR	0,64 %	N/A	0,57%	
	Pa	N/A	3,03 %	0,11%	

Promedio	0,078%
-----------------	---------------

Tabla 6. Promedios y valores máximos y mínimos de la contribución en la incertidumbre actual de cada suposición.

Suposición	Contribución promedio	Valor máx	Valor mín
Va	4.125%	13.560%	0.040%
HR	0.174%	0.570%	0.000%
Pa	0.103%	0.110%	0.090%
Fuentes actuales	99.956%		

Figura 8. Diagrama de contribuciones máximas en la incertidumbre actual.



7. DESARROLLO DE PLANTILLA PARA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL ERROR DE MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS

A partir de la cuantificación previa de las diferentes suposiciones atribuidas al cálculo del error de medición de flujo de gas y a la contribución que éstas tienen como fuentes de incertidumbre, se plantea un nuevo modelo matemático enfocado a una mayor confiabilidad de medida. Posteriormente, con base a dicho modelo, se desarrolla una plantilla de cálculo para estimación de incertidumbre, siguiendo los lineamientos del método basado en la propagación GUM a través del software Microsoft Excel y lenguaje de programación Visual Basic, que posteriormente será validada por el método Monte Carlo basado en simulación computacional.

7.1 MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DEL ERROR RELATIVO AL VOLUMEN DE GAS MEDIDO

Con base a la cuantificación del impacto individual de cada suposición implementada en el modelo actual para el cálculo de error relativo al volumen de gas medido (Ecuación 3.), realizado en el Capítulo 5, se determinaron las siguientes consideraciones:

- El efecto en cuánto a error que tiene la película de aceite es de alrededor de 0,02 %, valor que es constante para todo el intervalo de calibración. En lo referente al análisis de incertidumbre tiene una contribución en ella despreciable, del 0,103%, por lo tanto, no será tomada en cuenta para el nuevo modelo matemático propuesto.
- El efecto de las variaciones de presión y temperatura durante el proceso de calibración, manifestado en la acumulación de volumen de gas, tiene un impacto en el error desde -0.042% hasta 0.037 %, lo que si bien no

significativo, sí lo es en términos de desviación e impacto en la incertidumbre, pues alcanza contribuciones desde 0,04% a 13, 56%. Por lo tanto, será tenido en cuenta para el modelo matemático propuesto.

- El impacto referente a la humedad en el fluido de calibración, en términos de error tiene un impacto despreciable de entre -0.006% a 0,002%, sin embargo, la contribución en cuanto a incertidumbre varía desde el 0% al 0,57%, lo que puede llegar a tener implicaciones cuando las condiciones de humedad no son controladas, por lo tanto, se decide incluir en el modelo propuesto.

Ecuación 18. Modelo matemático para el cálculo de error relativo al volumen de gas medido, tras las consideraciones planteadas. (mensurando).

$$Err = \left[\frac{V_m}{\frac{V_p \cdot \rho_{p1}}{\rho_m} - \frac{V_a \cdot (\rho_{p2} - \rho_{p1})}{\rho_m}} - 1 \right] \cdot 100$$

Donde:

$Err[\%]$ = Error asociado a medidores de flujo (mensurando).

$V_a[dm^3]$ = Volumen acumulado en el volumen de control.

$V_m[dm^3]$ = Volumen real registrado por el medidor bajo prueba.

$V_p[dm^3]$ = Volumen colectado por el patrón.

$\rho_m \left[\frac{Kg}{dm^3} \right]$ = Densidad promedio de aire húmedo en el medidor bajo prueba.

$\rho_{p1} \left[\frac{Kg}{dm^3} \right]$ = Densidad inicial de aire húmedo en el patrón.

$\rho_{p2} \left[\frac{Kg}{dm^3} \right]$ = Densidad final de aire húmedo en el patrón.

7.2 ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL ERROR DE MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS.

7.2.1 Identificación y organización de las fuentes de incertidumbre. A partir del modelo matemático establecido (Ecuación 18), se identifican las magnitudes de entrada y todas las posibles fuentes incertidumbre tanto de cada una de ellas como del mismo mensurando, desglosando cada variable en las magnitudes que a su vez las definen. Posteriormente se organizan y se establecen relaciones causa efecto dentro del proceso de medición por medio de diagramas Ishikawa o también llamados diagramas de espina de pescado.

Figura 9. Diagrama Ishikawa para el Error.

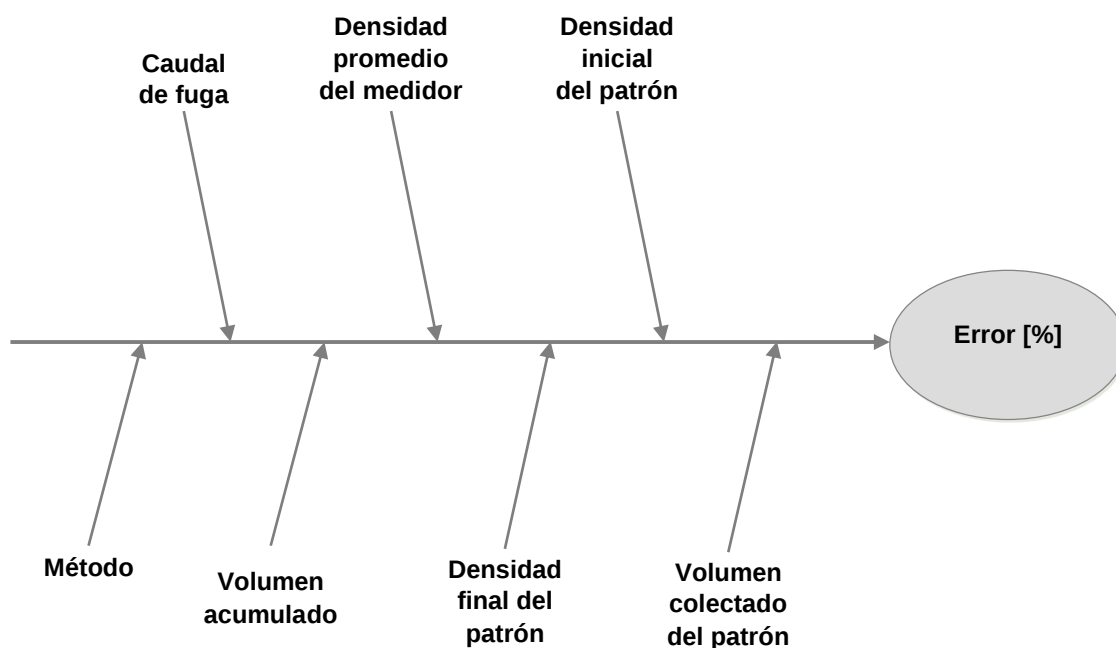


Figura 10. Diagrama Ishikawa para el volumen colectado por el patrón.

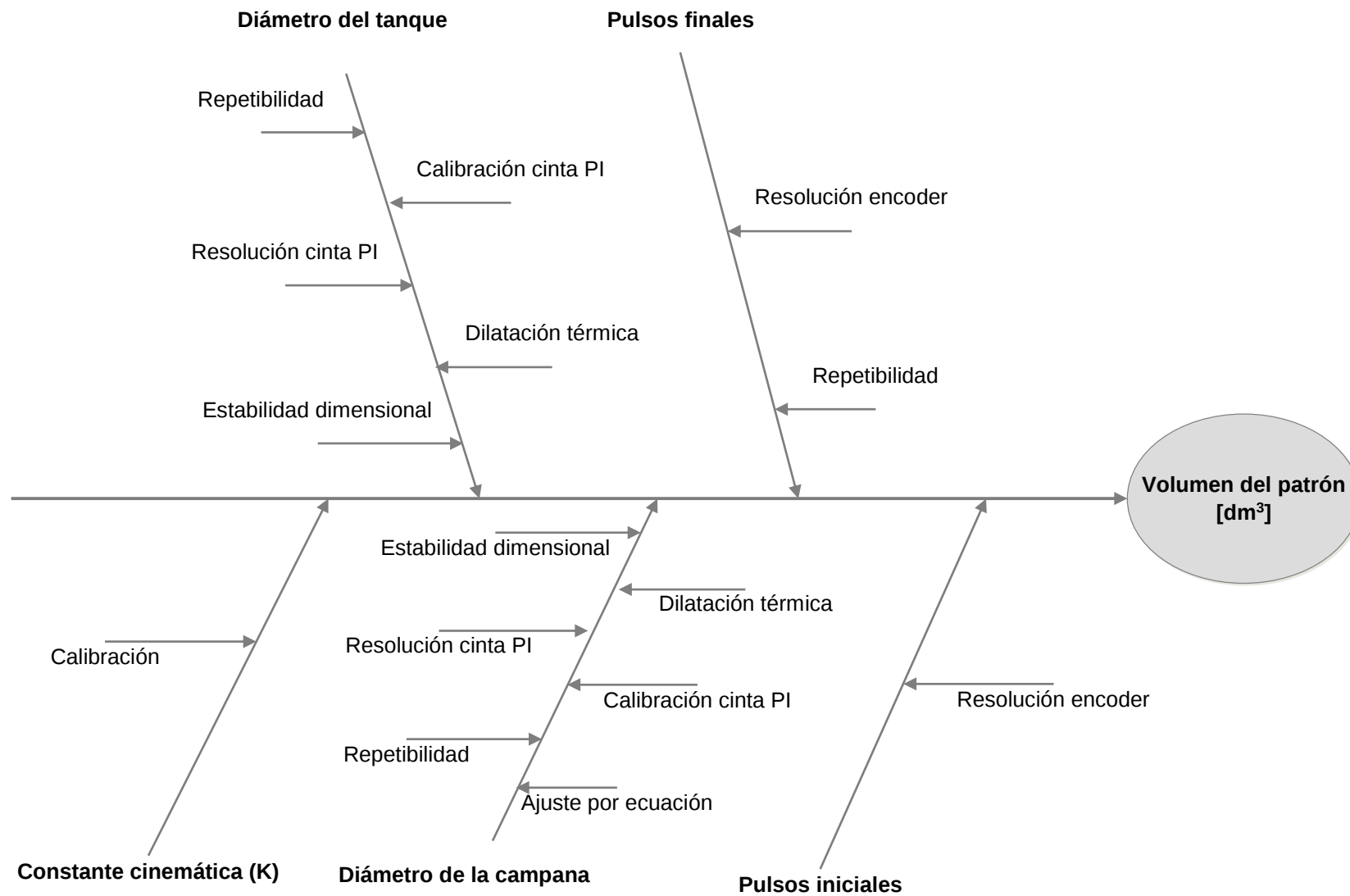


Figura 11. Diagrama Ishikawa para la constante cinemática de la campana.

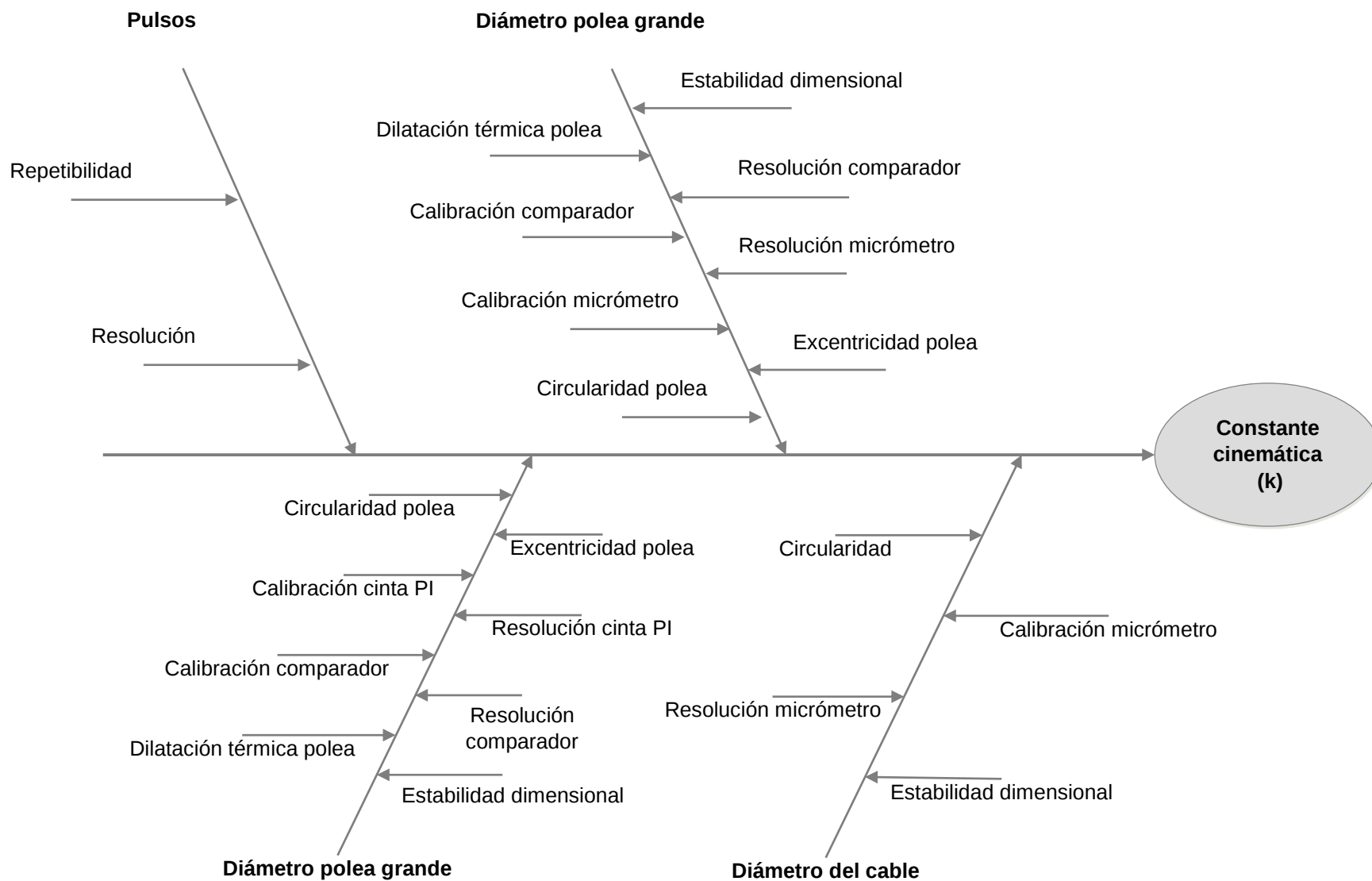


Figura 12. Diagrama Ishikawa para la densidad del fluido de calibración.

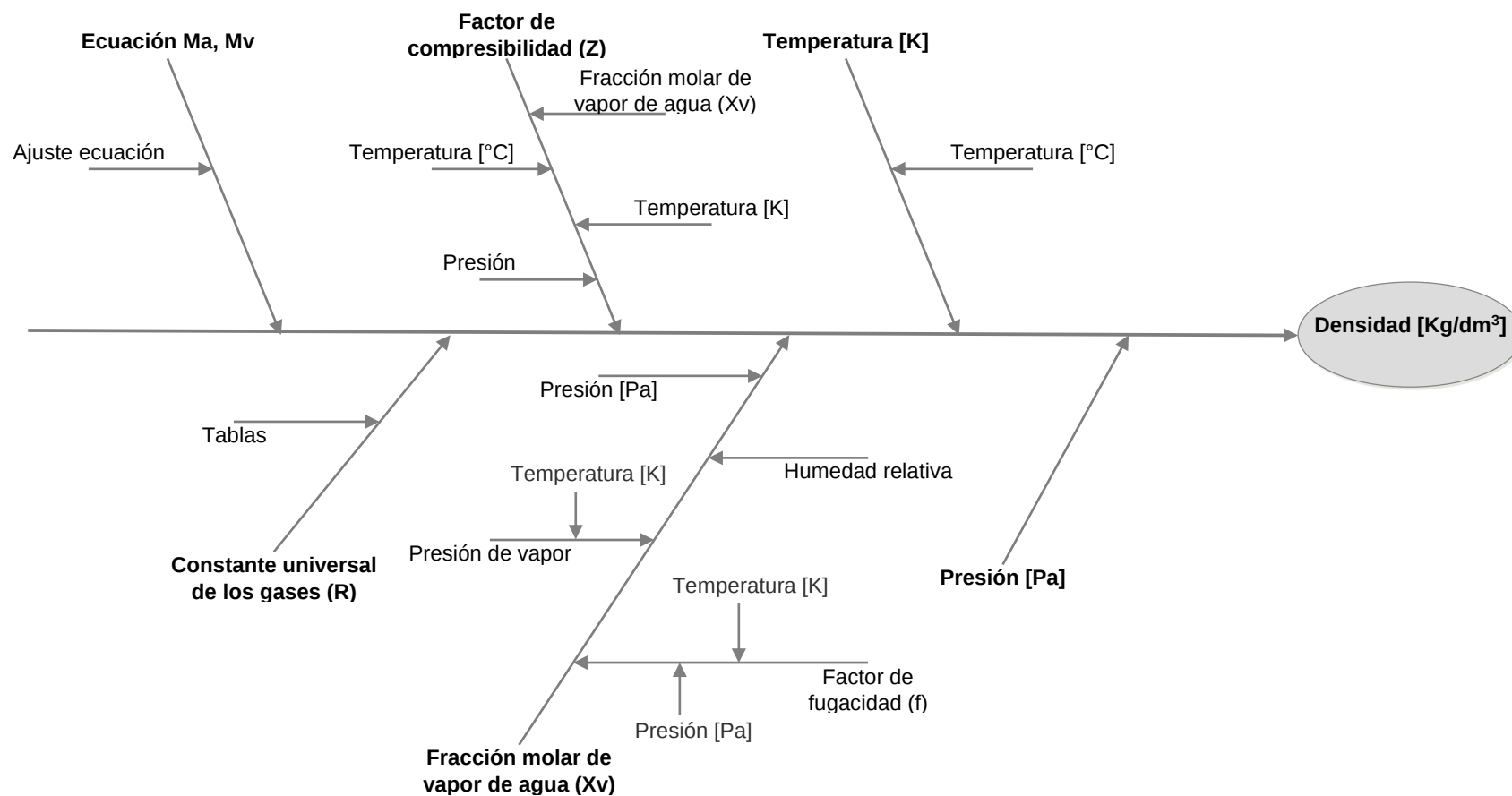


Figura 13. Diagrama Ishikawa para las propiedades termodinámicas involucradas.

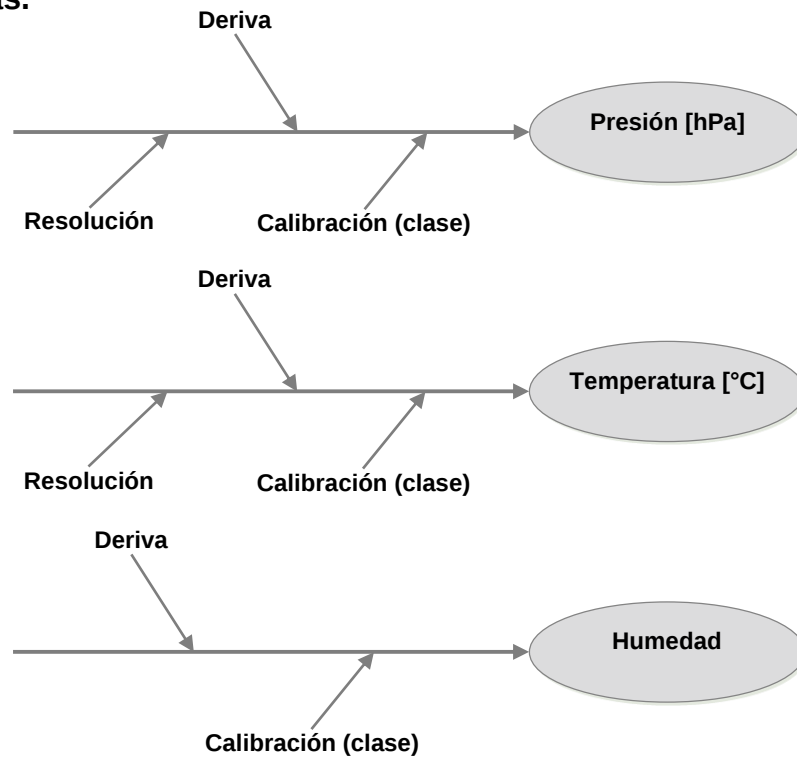
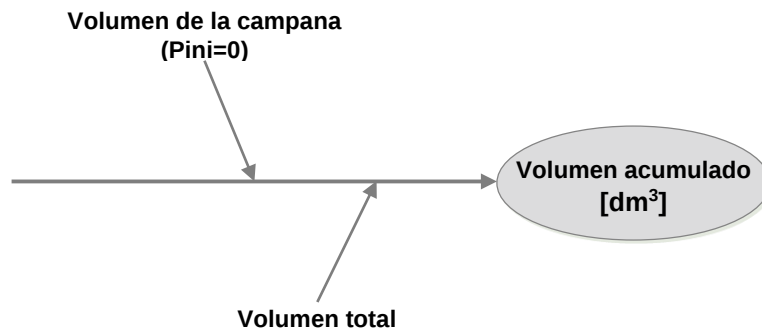


Figura 14. Diagrama Ishikawa para el volumen acumulado.



7.2.2 Clasificación, cuantificación y reducción (Incertidumbre Estándar) de las fuentes de incertidumbre. Según el método de evaluación, las fuentes de incertidumbre se clasifican en dos categorías:

- Tipo A

La evaluación de este tipo de incertidumbre hace referencia a los casos en los cuales el mejor estimado de medición de una magnitud de entrada (x_i) es el resultado del promedio o media aritmética ($\bar{q}$) de “ n ” observaciones independientes (q_j) que se han obtenido en las mismas condiciones de medición. La incertidumbre estándar de la evaluación tipo A ($u(x_i)$) se expresa por medio de la desviación estándar ($s[q]$) y el número de mediciones (n).

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n q_j$$

$$s[q] = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2}$$

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

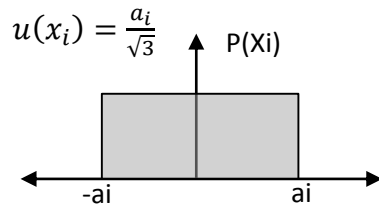
- Tipo B

La evaluación tipo B se emplea para las magnitudes de entrada (x_i) cuyo mejor estimado no proviene del promedio o media aritmética de observaciones independientes. Su incertidumbre se estima con base a información disponible sobre la magnitud, como especificaciones técnicas, normas, certificados de calibración, estudios previos, conocimientos del conjunto de medición o experiencia.

Para que las fuentes de incertidumbre puedan ser comparadas y combinadas, es necesario asegurar que la evaluación tipo B obtenga un nivel de confianza muy próximo al 68% que abarca la evaluación “tipo A” por medio de la desviación estándar de la magnitud medida.

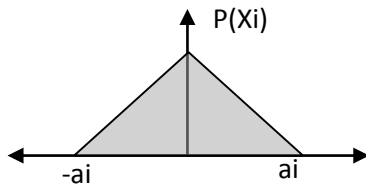
La reducción a incertidumbre estándar ($u(x_i)$) de cada fuente de incertidumbre se expresa según la distribución de probabilidad de cada una de ellas (PDF: Probability distribution function) de la siguiente manera:

- Distribución de probabilidad Rectangular:



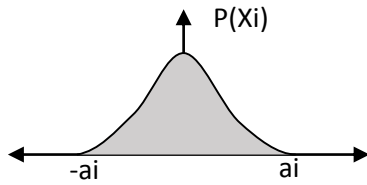
Rango: $(x_i - a_i)$ y $(x_i + a_i)$

- Distribución de probabilidad Triangular:



$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{6}}$$

- Distribución de probabilidad Normal:



$$u(x_i) = \frac{U}{k}$$

U: Incertidumbre expandida.

K: Factor de cobertura.

Nota: Las fuentes de incertidumbre tipo A. de cada magnitud de entrada (temperatura, presión, humedad), serán tenidas en cuenta en la repetibilidad final del mensurando, pues la correlación existente entre ellas generaría una sobre estimación de incertidumbre

Tabla 7. Fuentes de incertidumbre asociadas al error de medición (mensurando).

Descripción	Fuente de incertidumbre	Tipo	Distribución	Formula
Combinación del mensurando u_{c_Err}	Volumen colectado del patrón	B	Normal	$u_c(x_i)$
	Densidad inicial del patrón	B	Normal	$u_c(x_i)$
	Densidad final del patrón	B	Normal	$u_c(x_i)$
	Densidad promedio del medidor	B	Normal	$u_c(x_i)$
	Volumen acumulado	B	Normal	$u_c(x_i)$
	Caudal de fuga	B	Normal	$u(x_i) = \frac{\%Q_f}{\sqrt{12}}$
	Método	B	Normal	$u(x_i) = u_{met}$

Descripción	Fuente de incertidumbre	Tipo	Distribución	Formula
Repetibilidad del mensurando $u_{\text{Std_Err}}$	Repetibilidad	A	Normal	$u(x_i) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}}$

Tabla 8. Fuentes de incertidumbre asociadas al volumen colectado por el patrón.

Descripción	Fuente de incertidumbre	Tipo	Distribución	Formula
Pulsos iniciales u_{Pini}	Resolución enconder	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
Pulsos finales u_{Pfin}	Repetibilidad	A	Normal	$u(x_i) = \frac{s(q)}{\sqrt{21}}$
	Resolución enconder	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
Diámetro de la campana u_{Db}	Estabilidad dimensional	B	Triangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{24}}$
	Dilatación térmica	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$
	Resolución cinta PI	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
	Calibración cinta PI	B	Normal K=2	$u(x_i) = \frac{U}{2}$
	Repetibilidad	A	Normal	$u(x_i) = \frac{s(q)}{\sqrt{15}}$
	Ajuste por ecuación	B	Triangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{6}}$
Diámetro del tanque u_{Dt}	Estabilidad dimensional	B	Triangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{24}}$
	Dilatación térmica	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$
	Resolución cinta PI	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
	Calibración cinta PI	B	Normal K=2	$u(x_i) = \frac{U}{2}$

Descripción	Fuente de incertidumbre	Tipo	Distribución	Formula
	Repetibilidad	A	Normal	$u(x_i) = \frac{s(q)}{\sqrt{5}}$
Constante cinemática u_K	Calibración (Strapping)	B	Normal Kp	$u(x_i) = \frac{U}{K}$

Tabla 9. Fuentes de incertidumbre asociadas a la constante cinemática de la campana.

Descripción	Fuente de incertidumbre	Tipo	Distribución	Formula
Diámetro del cable u_{Dc}	Circularidad	A	Normal K=1	$u(x_i) = s(q)$
	Calibración micrómetro	B	Normal K=2	$u(x_i) = \frac{U}{2}$
	Resolución micrómetro	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
	Estabilidad dimensional	B	Triangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{24}}$
Diámetro polea pequeña u_{Dpp}	Circularidad polea	A	Normal K=1	$u(x_i) = s(q)$
	Excentricidad polea	A	Triangular	$u(x_i) = \frac{s(q)}{\sqrt{6}}$
	Calibración micrómetro	B	Normal K=2	$u(x_i) = \frac{U}{2}$
	Resolución micrómetro	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$
	Calibración comparador	B	Normal K=2	$u(x_i) = \frac{U}{2}$
	Resolución comparador	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$
	Dilatación térmica	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$
	Estabilidad dimensional	B	Triangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{24}}$

Descripción	Fuente de incertidumbre	Tipo	Distribución	Formula
Diámetro polea grande u_{Dpg}	Circularidad polea	A	Normal K=1	$u(x_i) = s(q)$
	Excentricidad polea	A	Triangular	$u(x_i) = \frac{s(q)}{\sqrt{6}}$
	Calibración cinta PI	B	Normal K=2	$u(x_i) = \frac{U}{2}$
	Resolución cinta PI	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
	Calibración comparador	B	Normal K=2	$u(x_i) = \frac{U}{2}$
	Resolución comparador	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
	Dilatación térmica	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$
	Estabilidad dimensional	B	Triangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{24}}$
Pulsos u_{pulsos}	Repetibilidad	A	Normal K=1	$u(x_i) = \frac{s(q)}{\sqrt{21}}$
	Resolución	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$

Tabla 10. Fuentes de incertidumbre asociadas a la densidad del fluido de calibración.

Descripción	Fuente de incertidumbre	Tipo	Distribución	Formula
Presión u_p	Calibración (clase)	B	Normal K=2	$u(x_i) = \frac{U}{2}$
	Deriva	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
	Resolución	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
Temperatura u_T	Calibración (clase)	B	Normal K=2	$u(x_i) = \frac{U}{2}$
	Deriva	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$

Descripción	Fuente de incertidumbre	Tipo	Distribución	Formula
	Resolución	B	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
Humedad relativa u_{HR}	Calibración (clase)	B	Normal K=2	$u(x_i) = \frac{U}{2}$
	Deriva	A	Rectangular	$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{12}}$
Constante Universal de los gases(R) u_R	Tablas	B	Normal K=1	$u(x_i) = U$
Ecuación Ma, Mv u_{ec}	Ajuste de ecuación	B	Normal K=1	$u(x_i) = U$

Nota: La misma clasificación, cuantificación y reducción de las fuentes de incertidumbre, aplican para todas las densidades involucradas en el modelo (inicial del patrón, final de patrón, promedio del medidor bajo prueba).

Tabla 11. Fuentes de incertidumbre asociadas al volumen acumulado.

Descripción	Fuente de incertidumbre	Tipo	Distribución	Formula
Volumen del patrón u_{vpt}	Volumen de la campana desde pulsos iniciales = 0 a pulsos finales de la prueba	B	Normal Kpt	$u(x_i) = \frac{s(q)}{\sqrt{21}}$
Volumen total u_{vt}	Estimación	A	Normal K=1	$u(x_i) = U$

7.2.3 Combinación y propagación de incertidumbre La incertidumbre combinada de cada variable de entrada se obtiene por medio de la incertidumbre estándar de cada fuente y sus respectivos coeficientes de sensibilidad. Así se irán propagando las combinaciones de cada magnitud hasta obtener la incertidumbre combinada del mensurando.

Ecuación 19. Expresión para incertidumbre combinada.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [C_i \cdot u(x_i)]^2}$$

7.2.3.1 Coeficientes de sensibilidad Los coeficientes de sensibilidad son el parámetro que cuantifica la sensibilidad de cada variable de entrada a cada una de sus fuentes y el efecto que estas tienen en el mensurando. Son determinados por la razón de cambio de la magnitud de salida “y” con respecto a la entrada “x”, por medio de la derivada parcial del modelo matemático que las relaciona.

Ecuación 20. Expresión para los coeficientes de sensibilidad.

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}$$

A continuación, se expresarán los coeficientes de sensibilidad para cada magnitud involucrada en el modelo:

- Volumen del patrón

$$A = 0,0004354$$

$$B = 787,42$$

$$c_i K_{bell} = \frac{1}{4 \cdot 10^6} \cdot \left(\pi \cdot \left[\frac{1907 \cdot (dbell^2 - dtank^2) \cdot (pfin - pini)}{100000} + \frac{K_{bell} \cdot \left(\frac{A \cdot B \cdot [pfin^2 - pini^2] + 2 \cdot A^2 \cdot K_{bell} \cdot [pfin^3 - pini^3]}{3} \right)}{B^2 \cdot (pfin - pini) + \frac{A^2 \cdot K_{bell} \cdot [pfin^3 - pini^3]}{3} + A \cdot B \cdot K_{bell} \cdot [pfin^2 - pini^2]} \right] + \right)$$

$$c_i D_{bell} = \frac{1907 \cdot dbell \cdot K_{bell} \cdot \pi \cdot (pfin - pini)}{2 \cdot 10^{11}}$$

$$c_i D_{tank} = \frac{-1907 \cdot dtank \cdot K_{bell} \cdot \pi \cdot (pfin - pini)}{2 \cdot 10^{11}}$$

$$c_i pfin = \frac{-\pi \cdot \left[\frac{1907 \cdot K_{bell} \cdot (dbell^2 - dtank^2)}{100000} + K_{bell} \cdot (A^2 \cdot K_{bell}^2 \cdot pini^2 + 2 \cdot A \cdot B \cdot K_{bell} \cdot pini + B^2) \right]}{4 \cdot 10^6}$$

$$c_i pini = \frac{\pi \cdot \left[\frac{1907 \cdot K_{bell} \cdot (dbell^2 - dtank^2)}{100000} + K_{bell} \cdot \left(\frac{A^2 \cdot K_{bell}^2 \cdot pfin^2 +}{2 \cdot A \cdot B \cdot K_{bell} \cdot pfin + B^2} \right) \right]}{4 \cdot 10^6}$$

- Densidad

$$\frac{\partial T_K}{\partial T} = 1$$

$$\frac{\partial f}{\partial T} = 2 \cdot T \cdot \gamma$$

$$\frac{\partial f}{\partial p} = \beta$$

$$\frac{\partial x_v}{\partial P} = \frac{-P_{sv} \cdot f \cdot \phi}{P^2}$$

$$\frac{\partial x_v}{\partial HR} = \frac{P_{sv} \cdot f}{P}$$

$$\frac{\partial x_v}{\partial f} = \frac{P_{sv} \cdot \phi}{P}$$

$$\frac{\partial x_v}{\partial p_v} = \frac{f \cdot \phi}{P}$$

$$\frac{\partial p_{Sv}}{\partial T_K} = e^{\left[C + A \cdot T_K^2 + \frac{D}{T_K} + B \cdot T_K \right]} \cdot \left[B - \frac{D}{T_K^2} + 2 \cdot A \cdot T_K \right]$$

$$\frac{\partial z}{\partial T_K} = \frac{P \cdot [a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + (b_0 + b_1 \cdot T) \cdot x_v + (c_0 + c_1 \cdot T)]}{T_K^2} - \frac{2 \cdot P^2 \cdot [e \cdot x_v^2 + d_0]}{T_K^3}$$

$$\frac{\partial z}{\partial x_v} = \frac{2 \cdot P^2 \cdot x_v \cdot e}{T_K^2} - \frac{P \cdot [(b_0 + b_1 \cdot T) + 2 \cdot x_v \cdot (c_0 + c_1 \cdot T)]}{T_K}$$

$$\frac{\partial z}{\partial T} = \frac{-P \cdot [c_1 \cdot x_v^2 + b_1 \cdot x_v + a_1 + 2 \cdot T \cdot a_2]}{T_K}$$

$$\frac{\partial z}{\partial p} = \frac{2 \cdot P \cdot [e \cdot x_v^2 + d_0]}{T_K^2} - \left[\frac{a_0 + T \cdot a_1 + T^2 \cdot a_2 + x_v \cdot (b_0 + T \cdot b_1) + x_v^2 \cdot (c_0 + c_1 \cdot T)}{T_K} \right]$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial R} = \frac{-M_a \cdot P \cdot \left[x_v \cdot \left(\frac{M_v}{M_a} - 1 \right) + 1 \right]}{R^2 \cdot T_K \cdot Z}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial T_K} = \frac{-M_a \cdot P \cdot \left[x_v \cdot \left(\frac{M_v}{M_a} - 1 \right) + 1 \right]}{R \cdot T_K \cdot Z}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_v} = \frac{M_a \cdot P \cdot \left[\frac{M_v}{M_a} - 1 \right]}{R \cdot T_K \cdot Z}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial z} = \frac{-M_a \cdot P \cdot \left[x_v \cdot \left(\frac{M_v}{M_a} - 1 \right) + 1 \right]}{R \cdot T_K \cdot Z^2}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{M_a \cdot \left[x_v \cdot \left(\frac{M_v}{M_a} - 1 \right) + 1 \right]}{R \cdot T_K \cdot Z}$$

- Presión

$$C_iP = \frac{\partial \rho}{\partial p} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_v} \cdot \frac{\partial x_v}{\partial p} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_v} \cdot \frac{\partial x_v}{\partial f} \cdot \frac{\partial f}{\partial p} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial p} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial x_v} \cdot \frac{\partial x_v}{\partial p} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial x_v} \cdot \frac{\partial x_v}{\partial f} \cdot \frac{\partial f}{\partial p} \right)$$

- Temperatura

$$C_iT = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T_K} \cdot \frac{\partial T_K}{\partial T} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_v} \cdot \frac{\partial x_v}{\partial p_{sv}} \cdot \frac{\partial p_{sv}}{\partial T_K} \cdot \frac{\partial T_K}{\partial T} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_v} \cdot \frac{\partial x_v}{\partial f} \cdot \frac{\partial f}{\partial T} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial T_K} \cdot \frac{\partial T_K}{\partial T} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial T} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial x_v} \cdot \frac{\partial x_v}{\partial p_{sv}} \cdot \frac{\partial p_{sv}}{\partial T_K} \cdot \frac{\partial T_K}{\partial T} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial x_v} \cdot \frac{\partial x_v}{\partial f} \cdot \frac{\partial f}{\partial T} \right)$$

- Humedad relativa

$$C_iHR = \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_v} \cdot \frac{\partial x_v}{\partial HR} \right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial x_v} \cdot \frac{\partial x_v}{\partial HR} \right)$$

- Constante Universal de los Gases Ideales

$$C_iR = \frac{\partial \rho}{\partial R}$$

- Ajuste de ecuación

$$C_iEc = 1$$

Nota: la correlación entre variables de entrada es despreciable en el modelo desarrollado por Smith

- Volumen acumulado

$$CiVa = 1$$

- Error

$$Ci_{vp} = \frac{-100 \cdot V_m \cdot \rho_{p1}}{\rho_m \cdot \left[\frac{V_a \cdot [\rho_{p1} - \rho_{p2}]}{\rho_m} + \frac{V_p \cdot \rho_{p1}}{\rho_m} \right]^2}$$

$$Ci_{va} = \frac{-100 \cdot V_m \cdot [\rho_{p1} - \rho_{p2}]}{\rho_m \cdot \left[\frac{V_a \cdot [\rho_{p1} - \rho_{p2}]}{\rho_m} + \frac{V_p \cdot \rho_{p1}}{\rho_m} \right]^2}$$

$$Ci_{p;m} = \frac{100 \cdot V_m \cdot \left[\frac{V_a \cdot (\rho_{p1} - \rho_{p2})}{\rho_m^2} + \frac{V_p \cdot \rho_{p1}}{\rho_m^2} \right]}{\left[\frac{V_a \cdot [\rho_{p1} - \rho_{p2}]}{\rho_m} + \frac{V_p \cdot \rho_{p1}}{\rho_m} \right]^2}$$

$$Ci_{p;p1} = \frac{-100 \cdot V_m \cdot \left[\frac{V_a}{\rho_m} + \frac{V_p}{\rho_m} \right]}{\left[\frac{V_a \cdot [\rho_{p1} - \rho_{p2}]}{\rho_m} + \frac{V_p \cdot \rho_{p1}}{\rho_m} \right]^2}$$

$$Ci_{p;p2} = \frac{100 \cdot V_a \cdot V_m}{\rho_m \cdot \left[\frac{V_a \cdot [\rho_{p1} - \rho_{p2}]}{\rho_m} + \frac{V_p \cdot \rho_{p1}}{\rho_m} \right]^2}$$

$$CiQfuga = 1$$

$$CiMétodo = 1$$

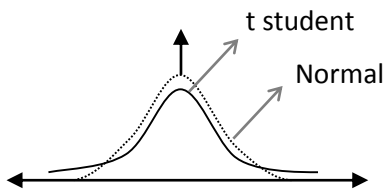
$$CiRepetibilidad = 1$$

7.2.4 Confiabilidad (Incertidumbre expandida) La incertidumbre estándar combinada tiene un nivel de confianza de aproximadamente el 68%, lo que hace necesario ampliar el porcentaje de cobertura de la distribución de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando. Tal ampliación se denomina incertidumbre expandida “U” y se obtiene a través del factor de cobertura “K” que corresponde al nivel de confianza requerido y a un conocimiento detallado de la distribución de probabilidad del mensurando.

Ecuación 21. Expresión para incertidumbre expandida.

$$U = K \cdot u_c(y)$$

7.2.3.2 Factor de cobertura (K) Teniendo en cuenta que el mejor estimado de las variables medidas es obtenido del promedio de un número finito de “n” mediciones, la distribución “t student” caracteriza el resultado de medición y su incertidumbre combinada de manera acertada y confiable, incluyendo las limitantes propias del uso de muestras pequeñas.



$$U = t_p(v) \cdot u_c(y)$$

El factor “ $t_p(v)$ ” representa los límites del intervalo correspondiente al nivel de confianza “p” de la distribución “t student” para “v” grados de libertad.

7.2.3.3 Grados de libertad. Son el concepto que implica aumentar los valores de incertidumbre, cuando fueron obtenidos con base en informaciones limitadas¹²

- Para evaluación tipo A de incertidumbre

Para el tipo de evaluación de incertidumbre tipo A, los grados de libertad equivalen al número de mediciones “n” que se utilizaron para calcular el mejor estimado de medición menos uno.

$$v_i = n - 1$$

- Para evaluación tipo B de incertidumbre

Para el tipo de evaluación de incertidumbre tipo B, los grados de libertad dependen de la incertidumbre estándar de cada fuente $u(x_i)$ y del nivel de confianza o duda que se tiene sobre ella “ $\Delta u(x_i)$ ”. Se determinan por medio de la siguiente expresión:

$$v_i = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2}$$

Nota: para una confiabilidad próxima al 100%, el valor de v_i tiende al infinito, por lo tanto, para efectos de cálculo se usa un valor mayor o igual a 50 (equivalente a un 90% de confiabilidad).

7.2.3.4 Grados de libertad efectivos Los grados de libertad efectivos de cada variable “ V_{eff} ” se obtienen a partir de la contribución de cada fuente “ $C_i u(x_i)$ ” y la incertidumbre combinada “ $u_c(y)$ ”, propagándose hasta el mensurando.

¹² La incertidumbre expandida y los grados de libertad: un análisis comparativo entre el método recomendado por la GUM y métodos simplificados. CENAM (Centro nacional de metrología de México).

Ecuación 22. Expresión para los grados de libertad efectivos.

$$V_{eff} = \frac{[u_c(y)]^4}{\sum \frac{[C_i u(x_i)]^4}{v_i}}$$

Con los grados de libertad efectivos determinados y un nivel de confianza deseado, se procede a calcular el factor de cobertura mediante tablas de distribución “t” o herramientas computacionales.

Tabla 12 Nivel de confianza en función de los grados de libertad efectivos.

Grados de libertad	Nivel de Confianza %					
ν	68,27	90	95	95,45	99	99,73
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,77
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96

Fuente: CDT Virtual.

- Densidad inicial del patrón

$$V_{eff\rho;p1} = \frac{uc_{\rho;p1}^4}{\frac{(ci_{rhp1} \cdot urh_1)^4}{V_{efrh1}} + \frac{(ci_{Tp1} \cdot uT_{p1})^4}{V_{efTp1}} + \frac{(ci_{Pp1} \cdot uP_{p1})^4}{V_{efPp1}} + \frac{(ci_{Rp1} \cdot uR)^4}{V_{efR}} + \frac{(ci_{ec} \cdot uec)^4}{V_{efec}}}$$

- Densidad final del patrón

$$V_{eff\rho;p2} = \frac{uc_{\rho;p2}^4}{\frac{(ci_{rhp2} \cdot urh_2)^4}{V_{efrh2}} + \frac{(ci_{Tp2} \cdot uT_{p2})^4}{V_{efTp2}} + \frac{(ci_{Pp2} \cdot uP_{p2})^4}{V_{efPp2}} + \frac{(ci_{Rp2} \cdot uR)^4}{V_{efR}} + \frac{(ci_{ec} \cdot uec)^4}{V_{efec}}}$$

- Densidad promedio del medidor

$$V_{eff\rho;m} = \frac{uc_{\rho;m}^4}{\frac{(ci_{rh} \cdot urh)^4}{V_{effrh}} + \frac{(ci_{Tm} \cdot u_{Tm})^4}{V_{effTm}} + \frac{(ci_{Pm} \cdot u_{Pm})^4}{V_{effPm}} + \frac{(ci_{Rm} \cdot u_R)^4}{V_{effR}} + \frac{(ci_{ec} \cdot u_{ec})^4}{V_{effec}}}$$

- Error

$$V_{effErr} = \frac{uc_{Err}^4}{\frac{(uy_{\rho;p1})^4}{V_{eff\rho;p1}} + \frac{(uy_{\rho;p2})^4}{V_{eff\rho;p2}} + \frac{(uy_{\rho;m})^4}{V_{eff\rho;m}} + \frac{(uy_{Vp})^4}{V_{effVp}} + \frac{(uy_{Va})^4}{V_{effVa}} + \frac{(u_{SEV})^4}{n-1} + \frac{(u_{Met})^4}{V_{effMet}} + \frac{(u_{Fuga})^4}{V_{effFuga}}}$$

7.2.4 Contribución Se determina la contribución de cada variable y las respectivas fuentes de incertidumbre en la incertidumbre combinada del mensurando.

Ecuación 23. Expresión para la contribución de las fuentes de incertidumbre.

$$Cont = \frac{u(y)^2}{u_c E_{rr}^2}$$

Nota: Los subíndices denotan los ya mencionados en los modelos matemáticos y procedimiento para estimación de incertidumbre.

7.3 VALIDACIÓN DEL MÉTODO GUM POR MEDIO DE LA SIMULACIÓN MONTE CARLO

El cálculo de la incertidumbre a través del método GUM está basado en la ley de propagación, llevando implícitas diversas suposiciones que pueden alterar el verdadero comportamiento del mesurando. Este método representa las distribuciones de probabilidad del mesurando de forma normal, lo que, para muchas situaciones, puede reflejar un error significativo en la estimación de la incertidumbre,

por lo cual se validará realizando una comparación con el método Monte Carlo simulado en el software Matlab. Para la validación del método se realizó la calibración de un medidor tipo rotativo FMG (Flow Meter Group), serie MG 20 (cámara derecha) para el intervalo de operación de 0,16 [m³/h] – 10 [m³/h] (2,66 [dm³/min] – 166.66 [dm³/min]).

El método Montecarlo al igual que el método GUM inicia con la definición del mensurando, la determinación del modelo físico y matemático, y la identificación y organización de las fuentes de incertidumbre. Posteriormente, a diferencia del método por propagación, la cuantificación de las fuentes de incertidumbre se realiza a través de la generación aleatoria de un conjunto de valores para las magnitudes de entrada, con base en la función de probabilidad que éstas posean; obteniendo así una simulación de los posibles resultados de medición que proporcionará el mejor estimado tras el promedio de los valores obtenidos de cada iteración para finalmente obtener la incertidumbre correspondiente a la desviación estándar asociada al método.

La generación aleatoria de conjunto de valores en función de las diferentes distribuciones de probabilidad atribuidas a cada incertidumbre se dio por medio de las siguientes ecuaciones.

x = Magnitud de entrada

u = Fuente de incertidumbre típica

it = Número de iteraciones (10^6)

$rand(it,1)$ = Función en el software Matlab que genera una matriz aleatoria uniformemente distribuida de it iteraciones de columnas por 1 fila.

- Distribución de probabilidad rectangular:

$$iu = -u + 2 \cdot u \cdot rand(it,1)$$

- Distribución de probabilidad triangular:

$$iu = -u + u \cdot rand(it, 1) + u \cdot rand(it, 1)$$

- Distribución de probabilidad normal:

$$iu = u \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln(rand(it, 1))} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot rand(it, 1))$$

- Combinación de incertidumbres

$$uc = x + \sum_{i=0}^n iu$$

- Mejor estimado

$$\widehat{xu} = \frac{1}{it} \cdot \sum_{i=1}^{it} xu_i$$

Ecuación 24. Incertidumbre asociada al error de medición por el método Monte Carlo.

$$u(\widehat{xu}) = \sqrt{\frac{1}{it - 1} \cdot \sum_{i=1}^{it} (xu_i - \widehat{xu})^2}$$

Los datos obtenidos por el método GUM fueron los obtenidos por la plantilla desarrollada en Excel y los obtenidos por el método Monte Carlo por medio del software Matlab y la interfaz gráfica de usuario GUI. Las tablas a continuación muestran los resultados comparativos obtenidos tanto del error (casilla superior) e incertidumbre (casilla inferior) para el rango de caudal de operación.

Tabla 13. Comparación de las densidades e incertidumbres asociadas, obtenidas por el método GUM y Monte Carlo.

Q [dm³/min]	Densidad inicial del patrón [Kg/m³]		Densidad final del patrón [Kg/m³]		Densidad promedio del medidor [Kg/m³]	
	GUM	MC	GUM	MC	GUM	MC
2,72	1,077	1,077	1,077	1,077	1,077	1,077
	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	7,0,E-04	7,0,E-04
4,23	1,076	1,076	1,077	1,077	1,076	1,076
	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	7,0,E-04	7,0,E-04
6,72	1,076	1,076	1,077	1,077	1,077	1,077
	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	7,0,E-04	7,0,E-04
10,91	1,077	1,077	1,078	1,078	1,078	1,078
	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	7,0,E-04	7,0,E-04
16,49	1,079	1,079	1,080	1,080	1,079	1,079
	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	7,0,E-04	7,0,E-04
26,66	1,078	1,078	1,077	1,077	1,077	1,077
	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	7,0,E-04	7,0,E-04
65,43	1,078	1,078	1,078	1,078	1,077	1,077
	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	7,0,E-04	7,0,E-04
156,73	1,078	1,078	1,078	1,078	1,076	1,076
	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	6,9,E-04	7,0,E-04	7,0,E-04

Tabla 14. Comparación del volumen colectado por el patrón y el volumen acumulado e incertidumbre asociada, obtenidos por el método GUM y método Monte Carlo.

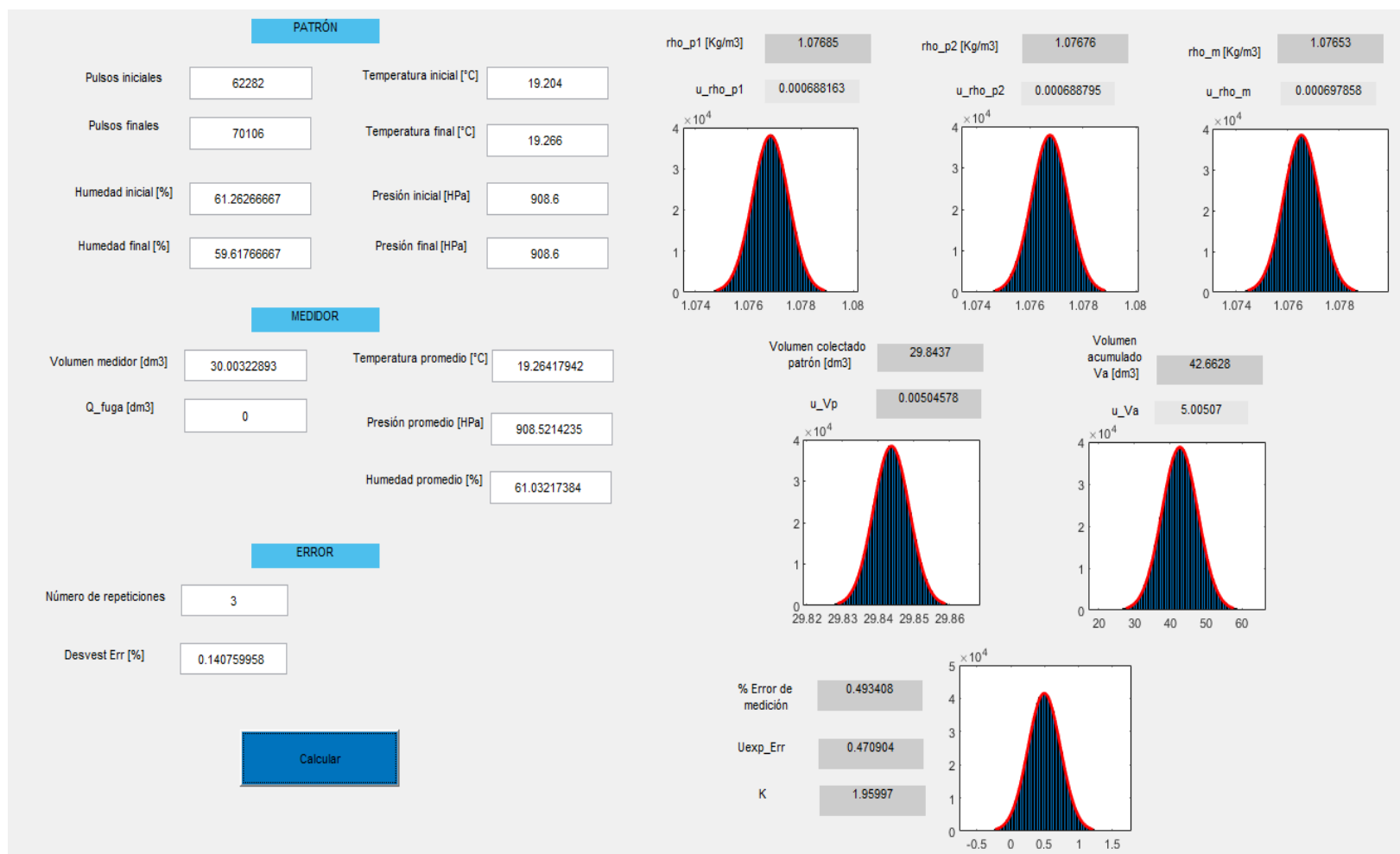
Q [dm³/min]	Volumen del patrón [dm³]		Volumen acumulado [dm³]	
	GUM	MC	GUM	MC
2,72	29,844	29,844	42,662	42,663
	5,2,E-03	5,0,E-03	5,0,E+00	5,0,E+00
4,23	29,834	29,834	42,672	42,678
	5,2,E-03	5,0,E-03	5,0,E+00	5,0,E+00
6,72	29,798	29,798	42,708	42,711
	5,2,E-03	5,0,E-03	5,0,E+00	5,0,E+00
10,91	34,770	34,770	43,460	43,459

Q [dm ³ /min]	Volumen del patrón [dm ³]		Volumen acumulado [dm ³]	
	GUM	MC	GUM	MC
	5,8,E-03	5,6,E-03	5,0,E+00	5,0,E+00
16,49	54,626	54,626	46,493	46,481
	8,2,E-03	8,1,E-03	5,0,E+00	5,0,E+00
26,66	79,505	79,505	50,225	50,222
	1,1,E-02	1,1,E-02	5,0,E+00	5,0,E+00
65,43	204,434	204,433	68,324	68,318
	2,8,E-02	2,8,E-02	5,0,E+00	5,0,E+00
156,73	205,859	205,859	66,895	66,891
	2,8,E-02	2,8,E-02	5,0,E+00	5,0,E+00

Tabla 15. Comparación del error e incertidumbre asociada obtenidos por el método GUM y Monte Carlo.

Q [dm ³ /min]	Err [%]		Factor de cobertura (K)		Δ Err [%]
	GUM	MC	GUM	MC	
2,72	0,493	0,493			-2,E-04
	4,2,E-01	4,7,E-01	1,99	1,96	-5,2,E-02
4,23	0,661	0,659			2,E-03
	4,2,E-01	4,8,E-01	1,99	1,96	-5,5,E-02
6,72	0,764	0,765			-2,E-04
	4,0,E-01	4,3,E-01	1,97	1,96	-3,1,E-02
10,91	0,729	0,730			-6,E-04
	3,6,E-01	3,7,E-01	1,96	1,96	-8,6,E-03
16,49	0,662	0,661			5,E-04
	3,0,E-01	3,2,E-01	1,97	1,96	-2,1,E-02
26,66	0,562	0,562			-2,E-04
	2,7,E-01	2,9,E-01	1,97	1,96	-1,9,E-02
65,43	0,222	0,222			2,E-04
	2,3,E-01	2,6,E-01	1,98	1,96	-2,3,E-02
156,73	-0,542	-0,542			2,E-05
	2,3,E-01	2,4,E-01	1,97	1,96	-1,7,E-02

Figura 15. Interfaz gráfica GUI del software Matlab, para el caudal mínimo [2,66 dm³ /min] del medidor tipo rotativo en prueba.



8. VALIDACIÓN DEL MEJOR DESEMPEÑO DE LA CAMPANA GASOMÉTRICA Y DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN

Para la validación del mejor desempeño de la campana gasométrica, se realizó la calibración de un medidor tipo rotativo, un medidor tipo cámara húmeda y un medidor tipo elemento de flujo laminar, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con la plantilla actualmente incorporada en la corporación CDT de GAS y la plantilla propuesta desarrollada a lo largo del proyecto.

El método de calibración consistió en la comparación directa del volumen indicado por el patrón en análisis (campana gasométrica), referido a condiciones del medidor, y el volumen indicado por el medidor a calibrar, de acuerdo a los lineamientos descritos en el Reglamento de Prueba del PTB (instituto nacional de Metrología de la República Federal de Alemania) Tomo 29, 2003. Para las calibraciones fueron utilizados instrumentos para medición de las magnitudes de influencia, cuya trazabilidad al SI es garantizada a través de calibraciones realizadas de acuerdo con el programa de Aseguramiento Metrológico.

Los tres tipos de medidores fueron seleccionados con tecnologías diferentes, con el objetivo de brindar resultados de calibración que abarquen tanto el mayor rango de caudal de operación del patrón tipo campana gasométrica, como las posibles disparidades que se pudieran presentar en el desempeño de ésta.

Otro de los aspectos que fue tenido en cuenta para la selección de los diferentes medidores, fue la trazabilidad internacional que brindan los certificados de calibración con los que cuenta el medidor tipo rotativo (certificación del Instituto de Metrología Holandesa, VSL) y el elemento de flujo laminar (certificación del Organismo de acreditación Alemana, GmbH).

8.1 VALIDACIÓN CON MEDIDOR TIPO ROTATIVO

- Fabricante: FMG (Flow Meter Group).
- Modelo: serie MG 20.
- Intervalo de operación para cámara derecha (calibrado): 0,16 [m³/h] – 10 [m³/h] (2,66 [dm³/min] – 166.66 [dm³/min]).
- Certificado de calibración: Instituto de Metrología Holandés (VSL).

Tabla 16. Comparación de resultados de calibración de medidor tipo rotativo con incertidumbre subestimada.

Tabla 16-A.

Actual						
Caudal Promedio	Volumen de Prueba	Error Promedio	Desvest	± U Sub	± U Real	k
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[%]	[%]	[%]	--
2,72	30,00	0,537	0,260	0,561	0,685	3,18
4,23	30,00	0,551	0,057	0,224	0,348	2,10
6,72	30,00	0,698	0,097	0,221	0,345	2,09
10,91	35,00	0,647	0,117	0,224	0,348	2,26
16,49	55,00	0,665	0,066	0,222	0,346	2,09
26,66	80,00	0,608	0,055	0,185	0,309	2,01
65,43	205,00	0,251	0,041	0,208	0,332	2,09
156,73	205,00	-0,392	0,026	0,185	0,309	2,04

Tabla 16-B.

Propuesta					
Caudal Promedio	Volumen de Prueba	Error Promedio	Desvest	± U	k
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[%]	[%]	--
2,72	30,00	0,493	0,141	0,419	1,99
4,23	30,00	0,661	0,146	0,424	1,99
6,72	30,00	0,764	0,103	0,403	1,97
10,91	35,00	0,729	0,048	0,358	1,96

Propuesta					
Caudal Promedio	Volumen de Prueba	Error Promedio	Desvest	$\pm U$	k
16,49	55,00	0,662	0,073	0,304	1,97
26,66	80,00	0,562	0,066	0,271	1,97
65,43	205,00	0,222	0,069	0,235	1,98
156,73	205,00	-0,542	0,057	0,227	1,97

Tabla 16-C.

Comparación					
Caudal Promedio	Volumen de Prueba	Δ Error	Δ Desvest	$\Delta \pm U$	Δk
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[%]	[%]	--
2,72	30,00	-0,044	-0,119	-0,266	-1,19
4,23	30,00	0,109	0,088	0,077	-0,11
6,72	30,00	0,067	0,006	0,058	-0,12
10,91	35,00	0,082	-0,069	0,011	-0,30
16,49	55,00	-0,003	0,007	-0,042	-0,12
26,66	80,00	-0,046	0,012	-0,038	-0,04
65,43	205,00	-0,029	0,028	-0,097	-0,12
156,73	205,00	-0,150	0,030	-0,081	-0,07
	Promedio	-0,002	-0,002	-0,047	-0,259

Figura 16. Comparación de curvas de calibración de medidor tipo rotativo.

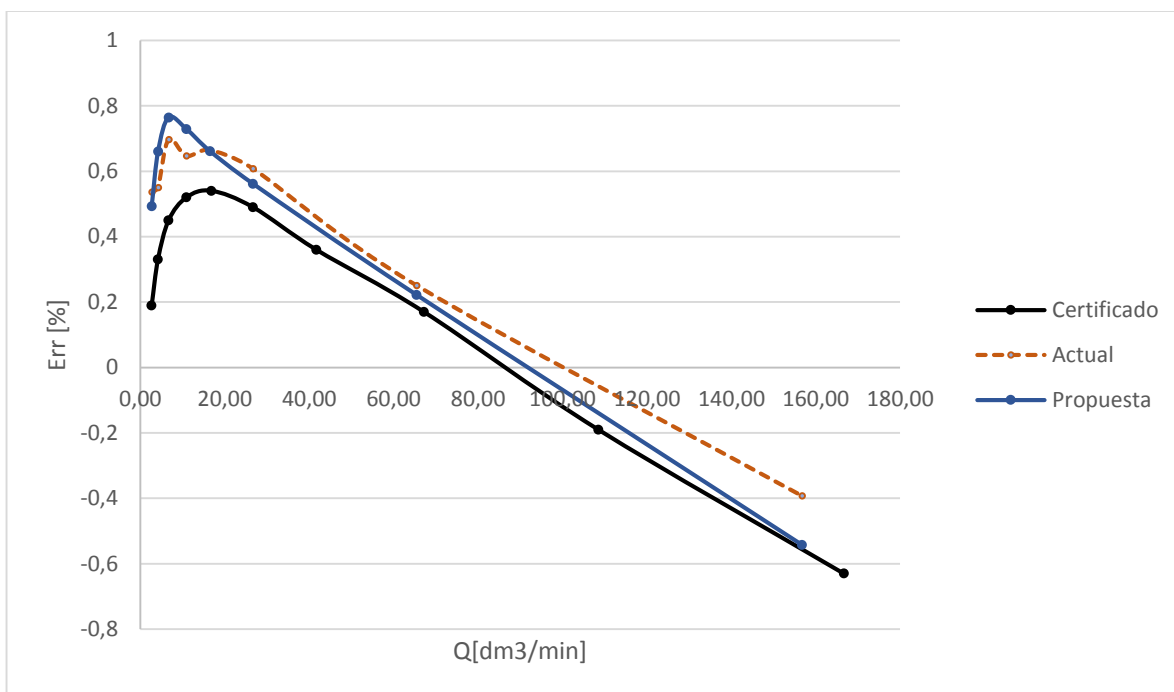
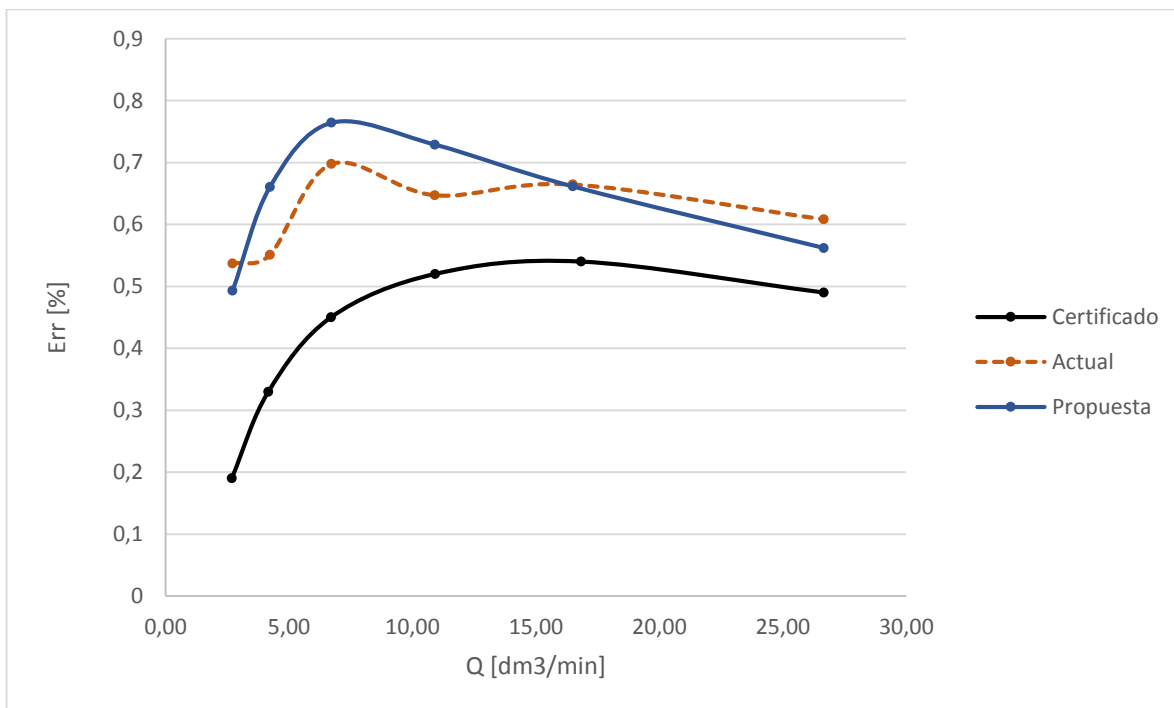


Figura 17. Comparación de curvas de calibración, para bajos caudales, de medidor tipo rotativo.



8.2 Validación con medidor tipo cámara húmeda

- Fabricante: CDT de GAS.
- Modelo: CH50-BP-D.
- Intervalo de operación (calibrado): 2,40 [dm³/min] – 270,60 [dm³/min]).
- Certificado de calibración: CDT de GAS.

Tabla 17 Comparación de resultados de calibración de medidor tipo cámara húmeda con incertidumbre real.

Tabla 17-A.

Actual						
Caudal Promedio	Volumen de Prueba	Error Promedio	Desvest	± U Sub	± U Real	k
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[%]	[%]	[%]	--
2,40	150,00	0,266	0,029	0,205	0,329	2,05
6,40	150,00	0,261	0,013	0,175	0,299	2,00
25,84	150,00	0,469	0,068	0,175	0,299	2,02
105,72	250,00	0,236	0,047	0,207	0,331	2,09
225,04	250,00	-1,253	0,146	0,290	0,414	2,26
232,44	250,00	-1,268	0,081	0,203	0,327	2,06

Tabla 17-B.

Propuesta					
Caudal Promedio	Volumen de Prueba	Error Promedio	Desvest	± U	k
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[%]	[%]	--
2,40	150,00	0,275	0,078	0,250	1,98
6,40	150,00	0,342	0,168	0,334	2,20
25,84	150,00	0,386	0,085	0,253	1,99
105,72	250,00	0,141	0,081	0,233	1,99
225,04	250,00	-1,376	0,092	0,237	2,01
232,44	250,00	-1,400	0,100	0,243	2,03

Tabla 17-C.

Comparación					
Caudal Promedio	Volumen de Prueba	Δ Error	Δ Desvest	$\Delta \pm U$	Δk
[dm ³ /min]	[dm ³]	[%]	[%]	[%]	--
2,72	30,00	0,008	0,049	-0,079	-0,067
4,23	30,00	0,081	0,155	0,035	0,201
6,72	30,00	-0,083	0,017	-0,046	-0,027
10,91	35,00	-0,095	0,034	-0,098	-0,093
16,49	55,00	-0,123	-0,053	-0,177	-0,249
26,66	80,00	-0,132	0,019	-0,084	-0,027
	Promedio	-0,057	0,037	-0,075	-0,04

Figura 18. Comparación de curvas de calibración de medidor tipo cámara húmeda.

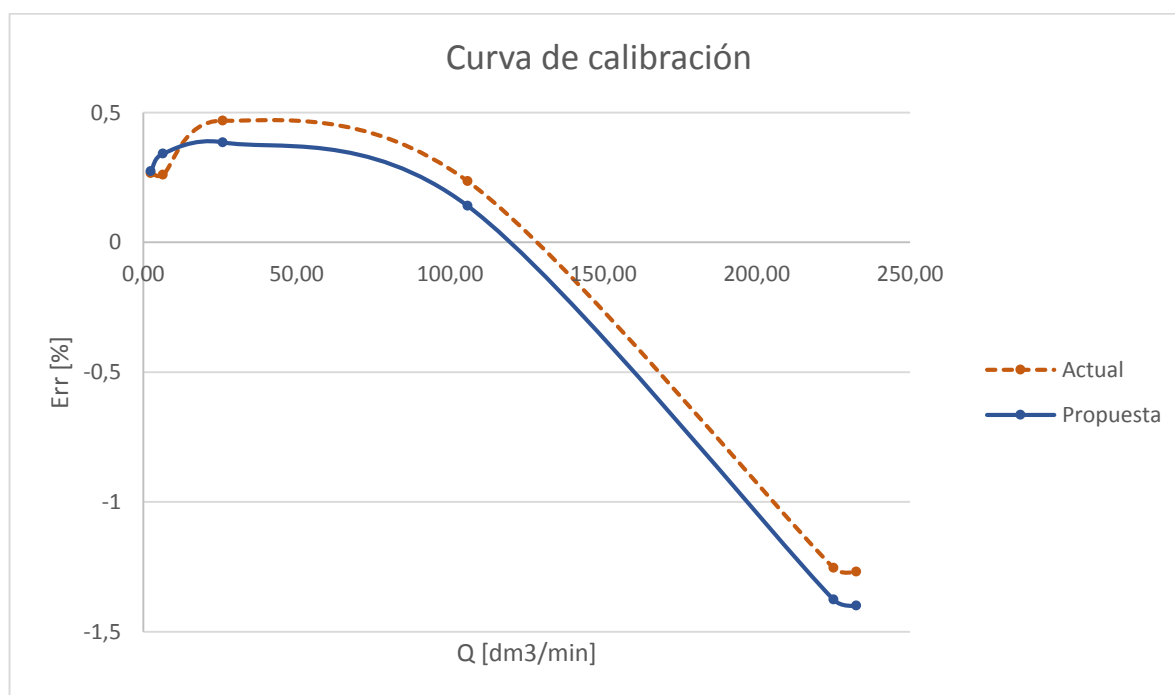
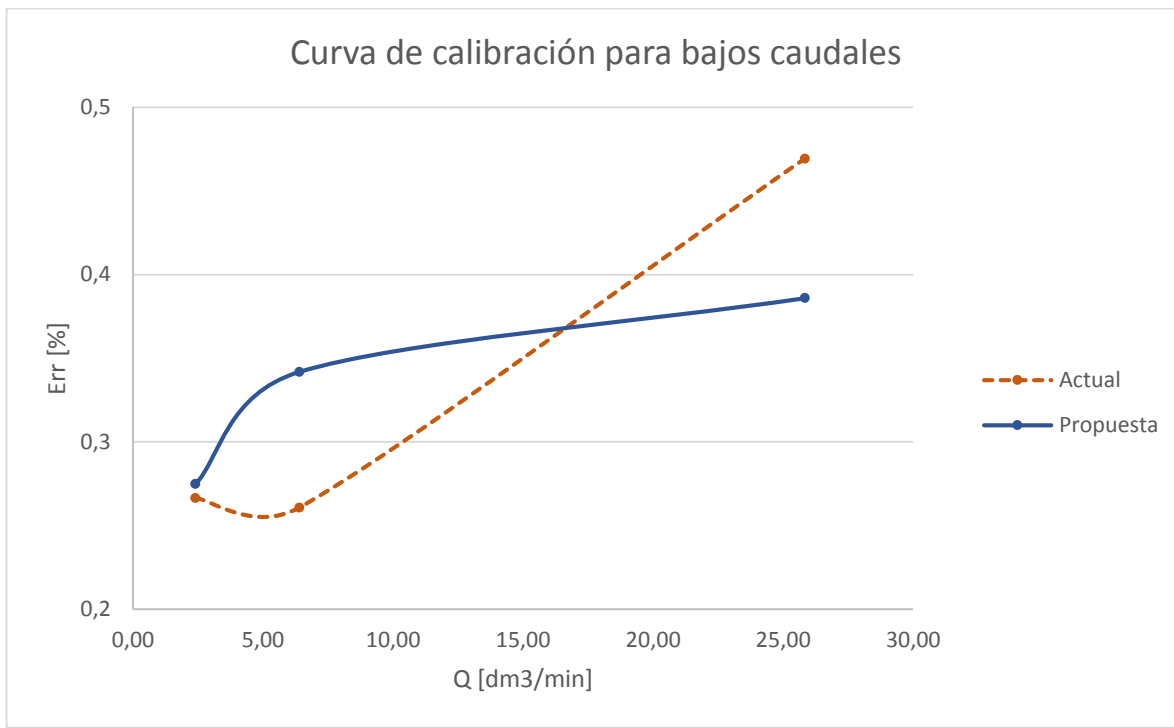


Figura 19. Comparación de curvas de calibración, para bajos caudales, de medidor tipo cámara húmeda.



8.3 Validación con medidor tipo elemento de flujo laminar

- Fabricante: HST Hyperschall - Strömungstechnik GmbH.
- Modelo: LFE-LDS-AL-10.00-10-170.
- Intervalo de operación (calibrado): 1,1 [dm³/min] – 11 [dm³/min]).
- Certificado de calibración: Organismo de acreditación Alemana (GmbH).

Tabla 18 Comparación de resultados de calibración de medidor tipo elemento de flujo laminar con incertidumbre real.

Tabla 18-A.

Actual				
Caudal Promedio	Error Promedio	$\pm U$ Sub	$\pm U$ Real	k
[dm ³ /min]	[%]	[%]	[%]	--
0,92	0,258	0,004	0,128	2,18
2,03	0,162	0,009	0,133	2,45
2,95	0,139	0,007	0,131	2,06
4,04	0,093	0,017	0,141	2,36
5,13	-0,280	0,028	0,152	2,31
5,92	-0,378	0,018	0,142	2,23
6,93	-0,234	0,024	0,148	2,31
8,06	-0,115	0,063	0,187	2,45
9,14	-0,149	0,068	0,192	2,31
10,59	-0,298	0,081	0,205	2,31

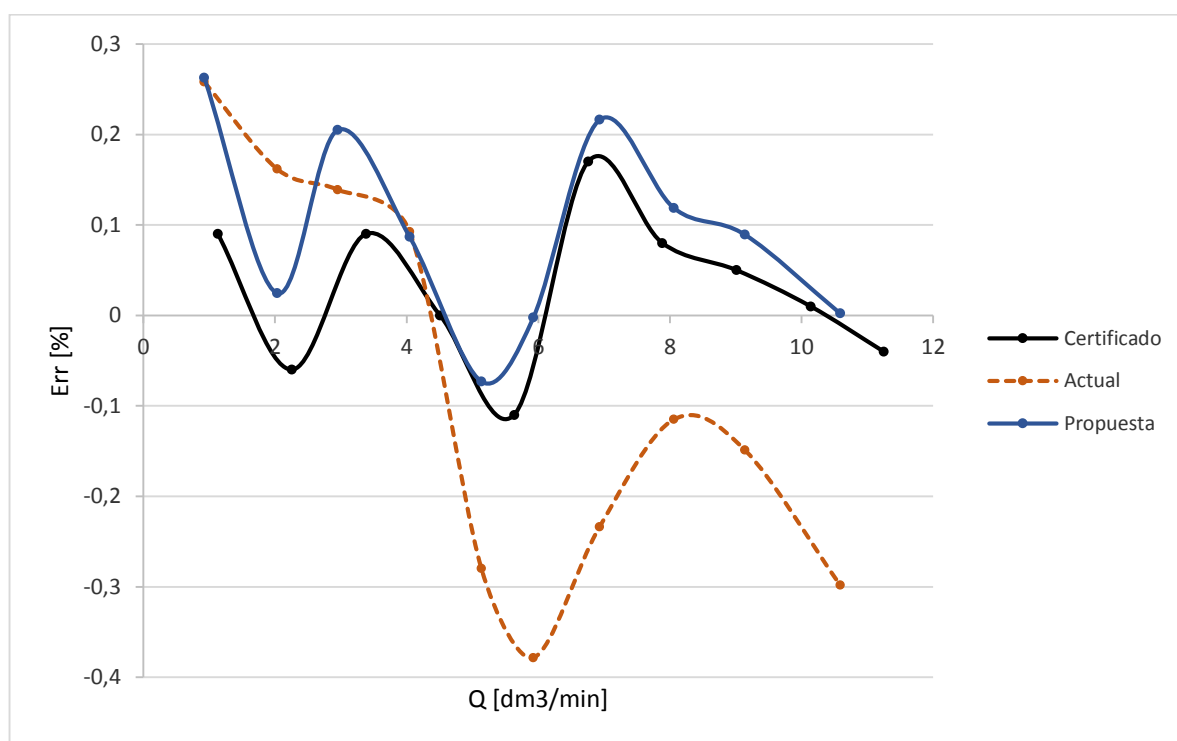
Tabla 18-B.

Propuesta			
Caudal Promedio	Error Promedio	$\pm U$	k
[dm ³ /min]	[%]	[%]	--
0,92	0,263	0,095	1,96
2,03	0,025	0,008	1,96
2,95	0,205	0,046	1,96
4,04	0,087	0,028	1,96
5,13	-0,073	0,015	1,96
5,92	-0,002	0,013	1,96
6,93	0,216	0,037	1,96
8,06	0,119	0,035	1,96
9,14	0,089	0,028	1,96
10,59	0,002	0,003	1,96

Tabla 18-C.

Comparación			
Caudal Promedio	Δ Error	$\Delta \pm U$	Δk
[dm ³ /min]	[%]	[%]	--
0,92	0,005	-0,033	-0,22
2,03	-0,137	-0,125	-0,48
2,95	0,066	-0,085	-0,09
4,04	-0,006	-0,113	-0,40
5,13	0,207	-0,138	-0,34
5,92	0,376	-0,129	-0,27
6,93	0,450	-0,111	-0,34
8,06	0,234	-0,152	-0,48
9,14	0,238	-0,164	-0,34
10,59	0,300	-0,202	-0,34
Promedio	0,173	-0,125	-0,33

Figura 20. Comparación de curvas de calibración de medidor tipo elemento de flujo laminar.



9. OPORTUNIDADES DE MEJORA EN LA OPERACIÓN DEL PATRÓN TIPO CAMPANA GASOMÉTRICA

Los acelerados crecimientos de la tecnología en cuando a equipos de medición, demandan cada vez mayor exactitud, por tal razón, reducir la incertidumbre de los patrones de calibración, es fundamental para el progreso de toda industria. A lo largo de este proyecto se buscó estimar la incertidumbre real del proceso de calibración de medidores de flujo de gas empleando la campana gasométrica, con la intención de reducirla por medio de la implementación en el modelo matemático, teniendo en cuenta las consideraciones omitidas en el modelo matemático actualmente implementado.

A partir de la herramienta propuesta se realiza un nuevo análisis de contribución en la incertidumbre relativa al volumen gas medido, que permita plantear oportunidades de mejora, ahora enfocándose en implementaciones físicas, que en siguientes estudios se analizarán desde el impacto y viabilidad económica, para posteriormente llevar a cabo su implementación, validación, documentación y acreditación con el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC).

Por medio de los resultados obtenidos de la calibración de los medidores tipo rotativo, cámara húmeda y elemento de flujo laminar, se determinó que la mayor fuente de incertidumbre se presenta en las densidades involucradas en el modelo cuando la calibración es repetible. A continuación, se utilizan los datos obtenidos de la calibración del medidor tipo rotativo serie MG 20 (cámara derecha), para exponer la contribución de cada densidad y sus magnitudes medibles de entrada (humedad, presión, temperatura) en la incertidumbre asociada al error de medición. Posteriormente se exponen la contribución a partir de las magnitudes medibles

involucradas en todo el proceso. Incluyendo el método de encintado (strapping) con el que se determinó la constante cinemática de la campana gasométrica.

Tabla 19 Contribución en la incertidumbre de las densidades.

	Contribución en el Error [%]									
	Caudal [dm3/min]									
Parametro	2,72	4,23	6,72	10,91	16,49	26,66	65,43	156,73	Prom	Desves t
Dens MM1	54,91	54,38	59,07	63,31	59,46	57,94	51,44	53,10	56,70%	3,92%
HRMM_1	18,54	18,53	20,08	21,70	20,25	19,40	17,17	17,80	19,18%	1,47%
TMM_1	5,21	5,25	5,61	5,90	5,64	5,52	4,93	5,09	5,39%	0,33%
PMM_1	30,11	29,57	32,27	34,50	32,45	31,91	28,35	29,20	31,05%	2,06%
Dens MM2	19,04	18,81	20,46	19,50	12,57	8,69	3,23	3,19	13,19%	7,35%
HRMM_2	6,47	6,43	6,94	6,66	4,29	2,91	1,08	1,07	4,48%	2,51%
TMM_2	1,80	1,78	1,93	1,82	1,19	0,83	0,31	0,31	1,25%	0,69%
PMM_2	10,42	10,24	11,20	10,65	6,86	4,78	1,78	1,76	7,21%	4,01%
Dens MUT	9,56	9,44	10,20	12,75	17,82	22,38	29,76	31,21	17,89%	8,98%
HRMUT	3,17	3,18	3,38	4,24	5,96	7,35	9,80	10,33	5,93%	2,95%
TMUT	1,01	1,00	1,08	1,33	1,88	2,39	3,17	3,33	1,90%	0,96%
PMUT	5,20	5,09	5,55	6,94	9,65	12,22	16,24	16,98	9,73%	4,91%

Tabla 20 Contribución en la incertidumbre de todas las variables involucradas.

<u>Error = 0,4933±0,2089 [%]</u>		
dbell = 787,6±0,02853 [mm]	$\partial \text{Error} / \partial \text{dbell} = -0,004886$	0,00 %
Dc = 3,145±0,004431 [mm]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Dc} = -0,1649$	0,00 %
Dpg = 606±0,006467 [mm]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Dpg} = 0,0008559$	0,00 %
Dpp = 49,83±0,006545 [mm]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Dpp} = -2,016$	0,40 %
dtank = 883,4±0,1175 [mm]	$\partial \text{Error} / \partial \text{dtank} = 0,00548$	0,00 %
Ec = 0±0,00009495 [Kg/m ³]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Ec} = 0,03824$	0,00 %
Met = 0±0,02 [%]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Met} = 1$	0,92 %
pfin = 70106±0,7872 [Pulsos]	$\partial \text{Error} / \partial \text{pfin} = -0,01284$	0,23 %
pini = 62282±0,2887 [Pulsos]	$\partial \text{Error} / \partial \text{pini} = 0,01284$	0,03 %
pinit = 0±0,2887 [Pulsos]	$\partial \text{Error} / \partial \text{pinit} = -0,000001046$	0,00 %
Pm = 908,5±0,4316 [millibar]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Pm} = 0,1113$	5,28 %
Pp1 = 908,6±0,4275 [millibar]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Pp1} = -0,2703$	30,59 %
Pp2 = 908,6±0,4275 [millibar]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Pp2} = 0,159$	10,59 %
pulsos _{rev} = 20000±0,7872 [Pulsos]	$\partial \text{Error} / \partial \text{pulsos}_{\text{rev}} = 0,005023$	0,04 %
R = 8,315±0,0000084 [J*mol ⁻¹ *K ⁻¹]	$\partial \text{Error} / \partial \text{R} = 6,520\text{E-}14$	0,00 %
Rep = 0±0,08127 [%]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Rep} = 1$	15,13 %
rh = 61,03±4,006 [%]	$\partial \text{Error} / \partial \text{rh} = -0,009355$	3,22 %
rh1 = 61,26±4,006 [%]	$\partial \text{Error} / \partial \text{rh1} = 0,02264$	18,84 %
rh2 = 59,62±4,006 [%]	$\partial \text{Error} / \partial \text{rh2} = -0,01337$	6,57 %
Tm = 19,26±0,05575 [°C]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Tm} = -0,3802$	1,03 %
Tp1 = 19,2±0,05205 [°C]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Tp1} = 0,9238$	5,30 %
Tp2 = 19,27±0,05205 [°C]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Tp2} = -0,5422$	1,82 %
Vt = 310±5 [L]	$\partial \text{Error} / \partial \text{Vt} = -0,0002744$	0,00 %

- Los resultados obtenidos señalan que la humedad presente en el fluido de calibración tiene un promedio de contribución total del 30% en la incertidumbre relativa al volumen de gas medido, teniendo en cuenta que afecta a todas las magnitudes involucradas en el modelo matemático. Por tal razón, utilizar como fluido de calibración aire seco reduciría la incertidumbre de manera considerable, para lo cual se recomendaría un sistema de secado considerando que el volumen de la campana gasométrica es significativo.
- La mayor contribución a la incertidumbre la genera las presiones involucradas en el modelo matemático (alrededor del 48%), especialmente la presión en la campana gasométrica al inicio de cada repetición de calibración (alrededor del 31%), por tal razón, se requiere de un estudio detallado de la instrumentación empleada para su medición y de su adquisición y corrección respectiva. Así mismo, se debe garantizar las menores variaciones durante el proceso, que

puedan ser causadas por fluctuaciones o aceleraciones indeseadas de la campana durante el descenso, para lo cual se recomienda revisar la tensión de las cuerdas de sujeción, peso efectivo de la campana, contrapesos y demás elementos mecánicos involucrados en el balance de fuerzas.

- Las temperaturas involucradas durante el proceso de calibración contribuyen en la incertidumbre en un promedio del 8,7%, que, si bien están condicionadas por las variaciones de presión y humedad, también pueden ser afectadas por intercambios de calor no deseados; por lo tanto, el estudio de aislante térmicos en la tubería o incluso en la misma campana, se requeriría para lograr disminuir la incertidumbre, especialmente para los caudales más cercanos al caudal mínimo de operación.
- La medición de la distancia representa en la incertidumbre un 0,3%, dada por el conteo de pulsos del decodificador rotativo (encoder), que, si bien no es una fuente crítica de incertidumbre, podría mitigarse por medio de un interferómetro que cuente con mejores cualidades metrológicas.
- La única magnitud considerable en la contribución de la incertidumbre, diferente a propiedades termodinámicas del fluido de calibración, al método o repetibilidad; es el diámetro de la polea pequeña del sistema, la cual representa para la determinación de la constante cinemática de la campana un 91,5% de la incertidumbre de ella, que, para la incertidumbre combinada, representa el 0,4%. Esta incertidumbre se da en su mayor medida a la elipticidad con la que cuenta, por lo tanto, podría mitigarse si es incluido en el modelo matemático tal efecto.

10. CONCLUSIONES

- A partir de la cuantificación y combinación de las suposiciones consideradas en el modelo matemático de calibración actual descrito en la Ecuación 3, se concluye que hay una subestimación considerable en la incertidumbre de hasta un 0,124% relativo al volumen de gas medido, la cual está dada en mayor proporción por la variación de presión y temperatura presentes en el volumen remanente del sistema, lo que contribuye a la incertidumbre combinada hasta en un 13,56 % (véase Figura 8.). Tal efecto se evidencia para caudales por debajo de 10 [dm³ /min], donde las variaciones están expuestas a periodos de tiempo de calibración prolongados (véase Figura 7.). Por tal razón, el término referente al volumen acumulado fue incluido en el modelo matemático propuesto.
- Cuando las variaciones de presión y temperatura no son significativas en el volumen acumulado, la variación en términos de error no es perceptible, debido que los impactos individuales de las suposiciones involucradas se ven contrarrestados, especialmente entre el efecto de la película de aceite y la humedad en el fluido de calibración. (Véase Tabla 4.)
- El efecto de la humedad en el fluido de calibración se ve reflejado en caudales por encima de 20 [dm³ /min], donde pequeñas variaciones de humedad pueden tener un impacto significativo en el mensurando, contribuyendo a la incertidumbre hasta en un 0,57% (véase Tabla 5.). Por tal razón, se incluye en el modelo matemático propuesto.
- Los resultados obtenidos tras desarrollar el modelo matemático para cuantificar el impacto de la película de líquido sellante (Shell Tellus Oils DO 10) adherida a la campana gasométrica, indicaron un error sistemático despreciable del 0,002%

relativo al volumen colectado por el patrón que representa una contribución en términos de incertidumbre de hasta 0,110%. Por tal razón no fue incluida en el modelo matemático propuesto. (Véase Tabla 3)

- Se diseñó una herramienta para estimación de incertidumbre por el método de propagación GUM, en el software Microsoft Excel con lenguaje de programación Visual Basic, basado en el modelo matemático propuesto (Ecuación 18). Los resultados obtenidos fueron validados por el método de simulación computacional desarrollado en el software Matlab con interfaz gráfica de usuario GUI, con base a los lineamientos reconocidos por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM). Se concluye que las suposiciones implícitas en el método GUM referentes a las distribuciones de probabilidades atribuidas a las diferentes fuentes, indican en cuanto al cálculo del mejor estimado del error, diferencias promedio despreciables de 0,00015 %, sin embargo, en cuanto a estimación de incertidumbre para ciertos intervalos de calibración, podría tener impacto, pues presentan variaciones desde 0,0086% a 0,03 % relativas al volumen de gas medido, manifestadas mayormente en el cálculo del volumen del patrón. (Véase Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15.)
- La validación del mejor desempeño de la campana gasométrica y del proceso de calibración, utilizando el medidor tipo rotativo y el medidor tipo cámara húmeda, señala que, para los caudales bajos, menores a 15 [dm³/min], los errores si bien incrementan, se comportan de manera estable y comparables frente a las curvas de calibración certificadas, debido a que se implementó en el modelo matemático el efecto de la variación de la presión y temperatura en el volumen remanente del sistema. En cuanto a los caudales mayores a 10 [dm³/min], los errores disminuyen acercándose a las curvas de calibración certificadas, pues los efectos por los cambios de humedad en el fluido de calibración son corregidos en el modelo propuesto. (véase Figura 16 y Figura 18).

- La validación del mejor desempeño de la campana gasométrica y del proceso de calibración utilizando el medidor tipo elemento de flujo laminar, señala la importancia de incluir en el modelo matemático el efecto generado por la humedad en los medidores sensibles a ella. El modelo matemático propuesto corrigió tal impacto, acercando en gran proporción la curva de calibración obtenida con la campana gasométrica con la obtenida en el certificado internacional (véase Figura 20).
- En términos de incertidumbre, el modelo propuesto quitó la subestimación producto de las suposiciones involucradas en el modelo actualmente implementado en la corporación, y logró reducirla en promedio en 0,047 % para el medidor tipo rotativo (véase Tabla 16-C), en 0,075 % para el medidor tipo cámara húmeda (véase Tabla 17-C), y en 0,125 % para el medidor tipo elemento de flujo laminar (véase Tabla 18-C).
- Para futuros estudios se buscará reducir la incertidumbre a partir de la implementación de mejoras físicas en el sistema, que busquen reducir la incertidumbre, primordialmente la asociada a la humedad que representa un 30% de ésta y a la presión que representa el 48%. (Véase Tabla 19 y Tabla 20).

BIBLIOGRAFÍA

BENKOVA Miroslava, *et al.* Bell Prover - Calibration and Monitoring of Time Stability. Revista *Journal of Metrology Society of India*. 2011, vol. 26, nro. 3, pp. 165-171.

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA CENAM. [sitio web]. Querétaro, México. Disponible en: <https://www.cenam.mx>

CHOI, Hae Man, *et al.* Uncertainty evaluation procedure and intercomparison of bell provers as a calibration system for gas Flow meters. *Revista Flow Measurement and Instrumentation*. 2010, nro. 21, pp. 488-496.

COVELLI, Germán José. Facilidades tecnológicas para brindar trazabilidad a las mediciones de gases en Colombia. *Revista Met & Flu, Perspectiva de análisis tecnológico a la calidad del gas natural*. 2010, nro. 2, pp. 53-61.

FLOW METER GROUP. Folleto: Rotatory meter series FMR.

GARCÍA S., Carlos E. y DUEÑAS M., Diego F. Validación de la estimación de incertidumbre en el patrón primario campana gasométrica del CDT de GAS, usando método Monte Carlo. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas. Piedecuesta, Colombia; 2012.

LAWRENCE H, Allen. FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF ROTARY METERS. Dresser Inc. Houston, Estados Unidos.

LAZOS MARTÍNEZ, Rubén J. Metrología como soporte a los sistemas de gestión en la industria. *Revista Met & Flu, Reduciendo las emisiones de metano en la*

industria del petróleo y del gas para alcanzar beneficios económicos, operacionales y medioambientales. 2011, nro. 5, pp. 18-24.

LIU, Yiping, *et al.* The residual oil film adhering to the rough inner wall of bell prover. En International Flow Measurement Conference FLOMEKO (26-29, septiembre, 2016; Sydney, Australia). Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai, P.R. China.

MALDONADO R., José M y GERVACIO S., Juan Carlos. Calibración del patrón de flujo de gas por el método de desplazamiento. En: Simposio de Metrología (25-27, octubre, 2004; Querétaro, México). Centro Nacional de Metrología, División Flujo y Volumen, Dirección de Metrología Mecánica; 2004.

MAZUR V., Rak A y SHCHUPAK, I. Discrete dynamic bell type instrument of combined work principle for the calibration of gas meters. En: International Congress of Metrology (17; 2015; Kiev, Ucrania). Kiev, Ucrania; EDP Sciences; 2015.

OCHOA, Carlos. Patrón nacional de Flujo volumétrico de Gas. Instituto Nacional de Calidad. Lima, Perú. Mayo 20, 2016.

PÉREZ, Carlos Andrés y FUENTES Jose Augusto. Optimización Metrológica de los Sistemas de Medición de Gas Natural, tipo transferencia de custodia. *Revista Met & Flu, Optimización Metrológica de los Sistemas de Medición de Gas Natural, tipo transferencia de custodia*. 2012, nro. 7, pp. 46-54.

REYES, Jorge y ANTOLÍNEZ, David. ¿Qué son y cómo se estima la mejor capacidad de medida y la capacidad de medida y calibración ?. *Revista Met & Flu, Separadores gas - líquido supersónicos*. 2012, nro. 6, pp. 6-15.

REYES VALDÉS, Jorge Andrés y TAPIA CARREÑO, Raúl Humberto. Patrón primario tipo pistón para medición de bajos caudales y volúmenes de gas, automatización y puesta en operación. Trabajo de grado Ingeniero electrónico e Ingeniero mecánico. Bucaramanga; Universidad Industrial de Santander. Facultad físico-mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica y Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones; 2006.

RUEGG, Fillmer C. Dynamics of the Bell Prover, II. *Revista Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1990, vol. 95. nro. 1, enero-febrero, pp. 15-31.

SCHWARZ, Frederick C. Fundamental principles of rotary displacement meters. Badger / Instromet, LLC. Houston, Estados Unidos.

TETRATEC INSTRUMENTS. Operation Manual. LFE-LDS Flow Element.

VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA (VIM). Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados; primera edición en español, 2008. Francia, ISO, 1993.

WRIGHT John D. y MATTINGLY George E. NIST Calibration services for gas flow meters. Piston prover and Bell prover gas Flow facilities. Estados Unidos, National Institute of Standards and Technology Special Publication 250-49, 47 páginas, Agosto 1998.

ANEXOS

Anexo A. Marco teórico de metrología

METROLOGÍA Y ANTECEDENTES

Hablar de medición es referirse a una comparación, desde el elemento más sencillo hasta el fenómeno más complejo, con base a una referencia. Sus antecedentes se remontan al inicio de la humanidad, donde diferentes perspectivas como “mucho-poco”, “rápido-lento”, “lejos-cerca”, caracterizaban el mundo de entonces. Aún en la actualidad dichas nociones son empleadas cotidianamente en diferentes contextos, sin embargo, su subjetividad no permite validarlas. Es allí donde nace la metrología, definida como: “ciencia de las mediciones y sus aplicaciones, incluyendo todos los aspectos teóricos y prácticos de las mismas, cualesquiera que sean su incertidumbre de medida y su campo de aplicación”¹³.

El sistema antropométrico, se podría decir que fue el primer sistema de medición adoptado por la humanidad, el cual se basaba en el cuerpo como patrón, dando origen a las primeras unidades como el pie, el dedo, la palma y el codo, con sus respectivas equivalencias, que desde luego, por la gran diversidad humana, impedían una homogeneidad reproducible, además de grandes restricciones a la ciencia, desarrollo de tecnología y apertura económica, pues dichos patrones se limitaban a magnitudes longitudinales.

Tal situación llevó a la evolución de la metrología, influenciada de manera determinante por diferentes disciplinas, desde corrientes filosóficas, como la

¹³ VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA (VIM). Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados; primera edición en español, 2008. Francia, ISO, 1993.

descripción del universo en términos de sustancias fundamentales por Tales de Mileto, hasta el planteamiento de diferentes leyes y teorías físicas como la ley de gravitación universal por Issac Newton, o el desarrollo de modelos matemáticos como el de los logaritmos por John Napier, éste último permitiendo la construcción de la primera regla deslizante.

- **Organización metrológica**

A lo largo de la historia, las mediciones han sido objeto de riguroso estudio, buscando a través de diferentes métodos y medios, garantizar uniformidad y exactitud aceptada de manera cada vez más general. El mundo globalizado e interdependiente de hoy, ha requerido de diferentes instituciones internacionales, nacionales y regionales de metrología, para desarrollar dicha labor, garantizando la normalización de las mediciones mediante trazabilidad.

Ante tal necesidad de orden y coordinación global metrológica, el Tratado del Metro (20 de mayo de 1875) da origen a la BIPM (del francés: Bureau International des Poids et Mesures – Oficina Internacional de Pesas y Medidas), regulada por la Conferencia General de Pesas y Medidas (*CGPM*), quienes establecen el Sistema Internacional de Unidades SI, basado en el sistema métrico decimal, con la correspondiente adopción de los patrones y técnicas de medición.

El SI se basa en siete unidades fundamentales (Tabla 21), independientes entre sí y que definen unidades derivadas tras su combinación. A su vez, sin ser del mismo, acepta una serie de unidades adicionales (Tabla 22) para su uso simultaneo.

Tabla 21. Unidades fundamentales.

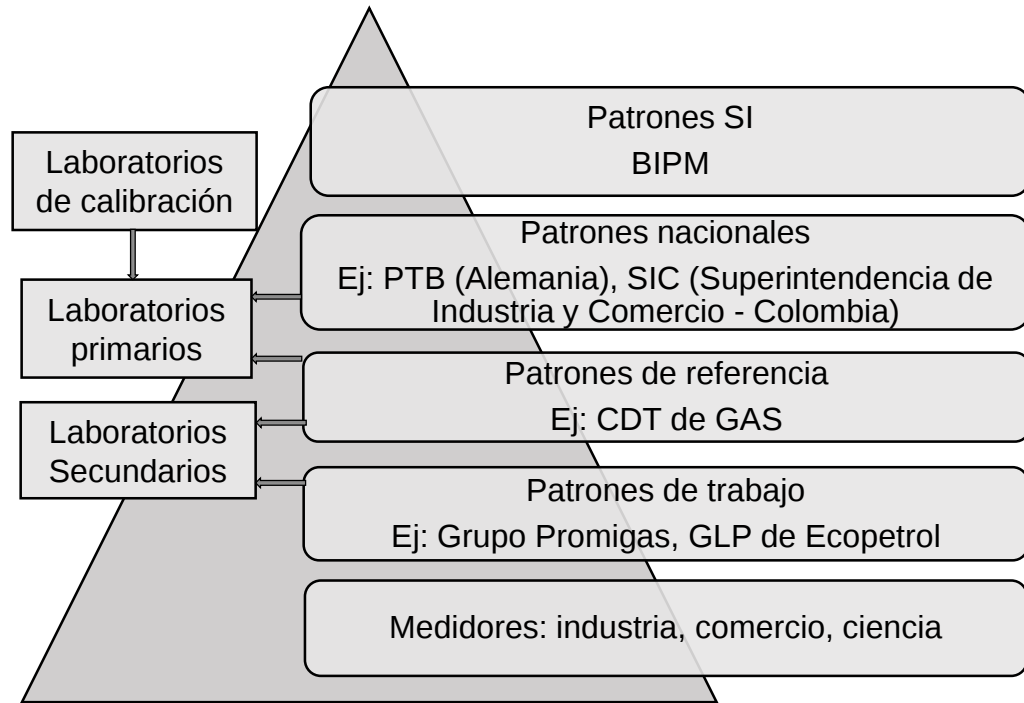
Magnitud	Unidad	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	Kg
Tiempo	segundo	s
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	Mol
Corriente eléctrica	ampere	A
Intensidad luminosa	candela	cd

Tabla 22. Unidades adicionales aceptadas.

Nombre	Símbolo	Valor en unidades SI
Minuto	min	60 s
Hora	h	3600 s
Día	d	86400 s
Grado	°	$(\pi/180)$ rad
Minuto	'	$(\pi/10\ 800)$ rad
Segundo	''	$(\pi/648\ 000)$ rad
Litro	L, l	10^{-3} m ³
Tonelada	t	10 ³ kg
Neper	Np	1
Bel	B	$(1/2) \ln 10$ (Np)

La trazabilidad juega un papel fundamental en la metrología, pues a través de incertidumbres definidas, relaciona toda medición en una cadena de comparaciones ininterrumpidas con los diferentes patrones nacionales e internacionales acreditados y organizados de forma jerárquica (Figura 21).

Figura 21. Estructura jerárquica de patrones metrológicos.



Como ya se mencionó, la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), se encarga de la regulación mundial de metrología, operando los patrones del Sistema Internacional (SI) y asegurando la uniformidad de medidas y trazabilidad al mismo. Estos son seguidos por los patrones nacionales, custodiados por Laboratorios Nacionales, valga la redundancia, asociados a entidades regionales, responsables de diseminar las unidades del SI a los laboratorios acreditados de calibración de sus respectivos países. Estos laboratorios a través de patrones de referencia primarios y secundarios se encargan de brindar trazabilidad nacional e internacional a patrones de trabajo.

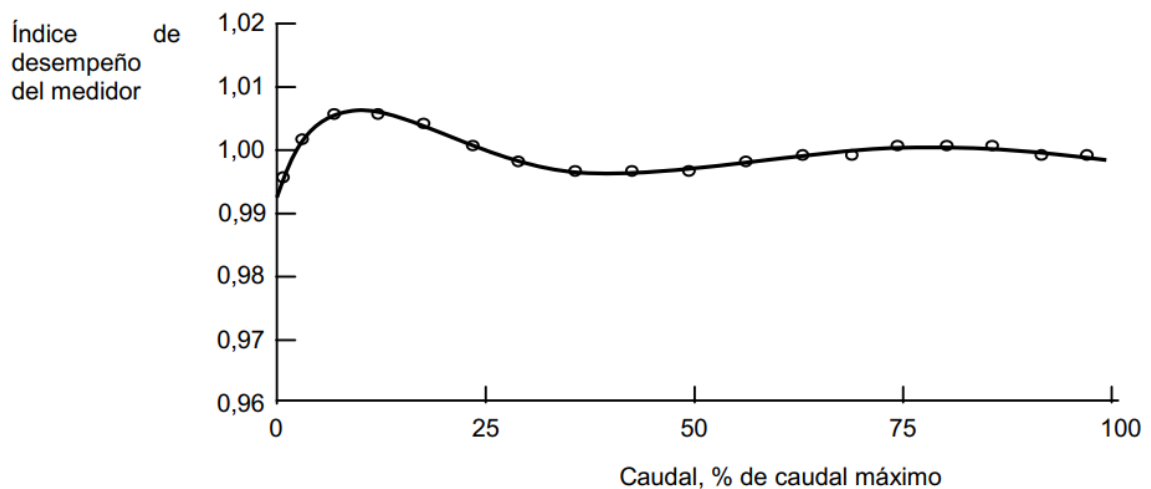
En la base de la estructura jerárquica de patrones metrológicos, se encuentran todo tipo de medidores de cualquier campo, certificados por patrones de trabajo, donde se evalúa su funcionamiento y calidad.

- **Calibración de flujo de fluidos**

La calibración es la operación más importante en el campo de la metrología, pues determina la seguridad y nivel de confianza que un elemento o sistema de medición ofrece, a través de la relación entre los valores de las magnitudes que indica el mismo y los valores determinados por patrones de clase de exactitud mayor.

Dicha comparación se representa a través de curvas de desempeño o también llamadas curvas características o de calibración, en las que se observa el comportamiento de un medidor respecto a la variación de alguna magnitud, que para el caso de fluidos puede ser el número de Reynolds, velocidad o caudal.

Figura 22. Curva del índice de desempeño de un medidor de caudal.



Fuente: CDT Virtual: Metrología básica

PROPIEDADES DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

La caracterización de los diferentes instrumentos o sistemas de medición es fundamental para su empleo y calibración, pues señala su condición bien sea de fabrica o de uso, determina su calidad y proporciona su posible aplicación, pues no

siempre las más altas cualidades metrológicas se requieren. A continuación, se definirán las propiedades más importantes para dicho fin.

- **Incertidumbre**

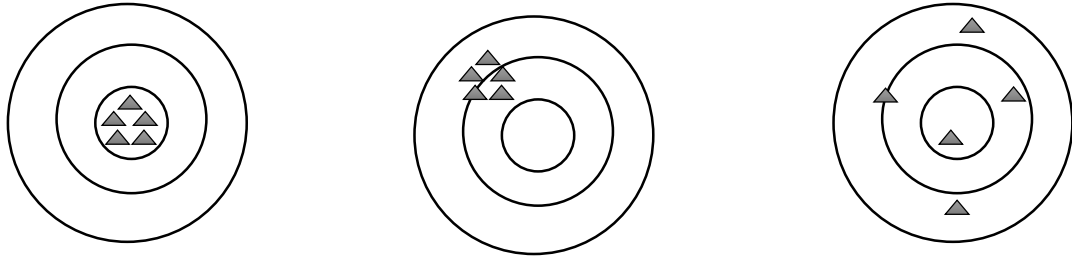
La incertidumbre es quizá la propiedad más importante de un instrumento o sistema de medición, expresa la exactitud o inexactitud de éste, determinando el rango de confiabilidad y calidad de la medición, tras una adecuada calibración que proporcione trazabilidad.

El termino exactitud, cabe resaltar que no cuantifica un parámetro, pues es un término cualitativo, a diferencia de la incertidumbre que puede estimarse tras un estimado del error. Este parámetro debe ir acompañado de un nivel de confianza, representado en un factor de cobertura, debido a que es determinada tras algoritmos matemáticos basados en probabilidades que varían en el tiempo.

- **Repetibilidad**

La repetibilidad de un instrumento o sistema de medición hace referencia a su capacidad para entregar el mismo resultado tras una serie de mediciones continuas. Este parámetro va ligado al concepto de exactitud, pues si ésta es alta, significa que su respetabilidad también lo es, no así al contrario, pues no siempre una alta repetibilidad representa una alta exactitud. (Figura 23).

Figura 23. Concepto de repetibilidad y exactitud.



- a) *Alta exactitud, alta repetibilidad*
- b) *Alta repetibilidad, baja exactitud*
- c) *Baja repetibilidad, baja exactitud*

- **Reproducibilidad**

La reproducibilidad de un instrumento o sistema de medición hace referencia a su capacidad para entregar el mismo resultado tras una serie de mediciones en instantes y condiciones diferentes. Este parámetro es fundamental para definir las condiciones de operación, pues determina que tan sensible es el instrumento o sistema a la variación de éstas.

- **Resolución**

Los instrumentos de medición proporcionan diferentes tipos de indicaciones del mensurando, donde la menor diferencia perceptible entre ellas determina la resolución. Este parámetro es independiente de la exactitud, pues solo determina la cantidad de cifras decimales capaces de visualizarse, sin dar noción de la confiabilidad de éstas; a su vez cabe diferenciarla de la sensibilidad, ligada al comportamiento de la medición tras la alteración del estímulo.

- **Deriva**

Los programas de calibración continuas se requieren en gran parte a la deriva de los instrumentos de medición, que representa la variación de las características metrológicas a lo largo del tiempo. De esta manera no solo se conoce el estado actual del medidor, sino su posible desempeño futuro tras su uso.

Anexo B. Calibración de campana gasométrica por el método de encintado (strapping).

INCERTIDUMBRE ESTIMADA DE LA CALIBRACIÓN

La Incertidumbre en las mediciones (U) es la incertidumbre combinada multiplicada por un factor de cobertura (k) con lo cual se logra un nivel de confianza de aproximadamente el 95%. Los valores se reportan individualmente para cada resultado.

CONDICIONES DEL CUARTO DE CALIBRACIÓN

Temperatura del cuarto de ensayos	20 °C ± 1°C
Humedad relativa del cuarto de ensayos	50 % ± 10%
Presión barométrica promedio	905 mbar ± 5 mbar

INSTRUMENTOS UTILIZADOS, TRAZABILIDAD

- CINTA PI, marca Pi-Tape, serie 100615120
Rango 300 – 900 mm. Certificado N° 1001779037.
PRECISION METROLOGY – EEUU.
- MICRÓMETRO DE PROFUNDIDAD, marca Mitutoyo, serie 311479
Rango 0 – 150 mm. Certificado N° LML-0717-15.
EQUIPOS Y CONTROLES INDUSTRIALES S.A – Colombia.
- REGLA METÁLICA, marca Mitutoyo, Serie N/P
Rango 0 – 1000 mm. Certificado N° LML-0104-15.
EQUIPOS Y CONTROLES INDUSTRIALES S.A – Colombia.

- VERIFICADOR DE INTERIORES (COMPARADOR), marca Mitutoyo, serie EUP004 (523174)
Rango 0 a 1 mm. Certificado No. LML-1949-15
EQUIPOS Y CONTROLES INDUSTRIALES S.A – Colombia.
- MICRÓMETRO DE EXTERIORES, marca Mitutoyo, serie 47074671
Rango 0 – 25 mm. Certificado N° LML-1827-15.
EQUIPOS Y CONTROLES INDUSTRIALES S.A – Colombia.
- MICRÓMETRO DE EXTERIORES, marca Mitutoyo, serie 03083076.
Rango 0 – 150 mm. Certificado N° LML-1098-14.
EQUIPOS Y CONTROLES INDUSTRIALES S.A – Colombia.

RESULTADOS OBTENIDOS

- **Diámetro exterior promedio de la campana $D_{Bell} = 787,56 \pm 0,15$ mm ($k = 1,98$)**

La campana se dividió en 15 planos uniformemente espaciados. El diámetro se midió 8 veces en cada plano, comenzando desde una distancia de 75 mm del borde superior hasta la parte inferior (750 mm).

Figura 24 Medición del diámetro exterior de la campana D_{Bell} .

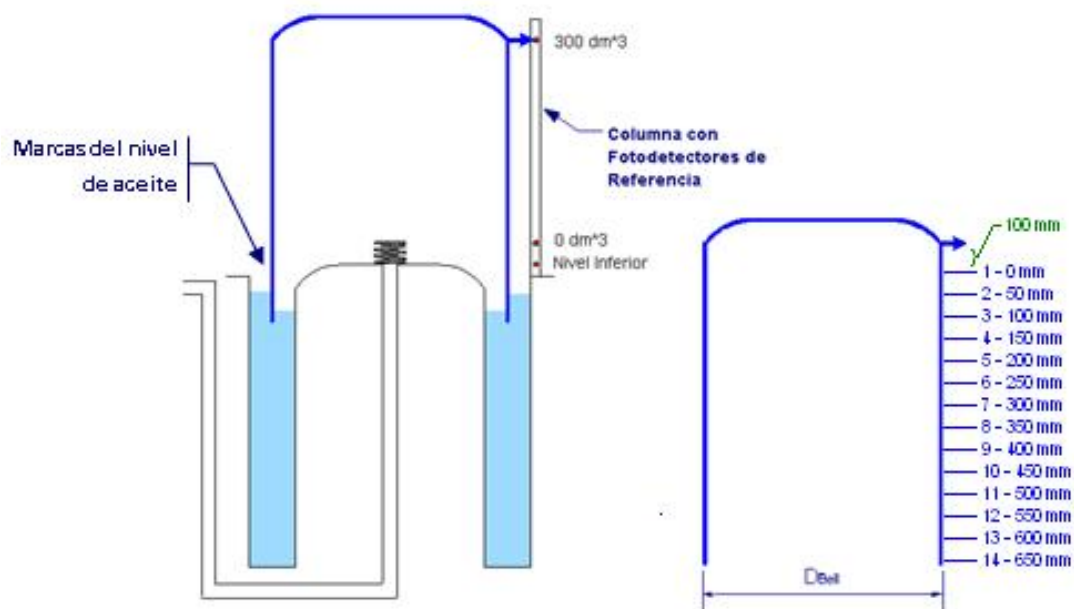


Tabla 23 Diámetro exterior de la campana D_{bell}

Nivel #	Dist. Borde Superior (mm)	D_{Bell} Promedio (mm)	Incertidumbre U (mm)	k
00	75	787,68	$\pm 0,02$	2,03
01	100	787,66	$\pm 0,05$	2,23
02	150	787,67	$\pm 0,05$	2,23
03	200	787,64	$\pm 0,03$	2,12
04	250	787,62	$\pm 0,03$	2,13
05	300	787,58	$\pm 0,04$	2,18
06	350	787,57	$\pm 0,03$	2,08
07	400	787,56	$\pm 0,05$	2,26
08	450	787,55	$\pm 0,06$	2,31
09	500	787,51	$\pm 0,04$	2,18
10	550	787,48	$\pm 0,03$	2,14
11	600	787,48	$\pm 0,05$	2,23
12	650	787,44	$\pm 0,05$	2,26

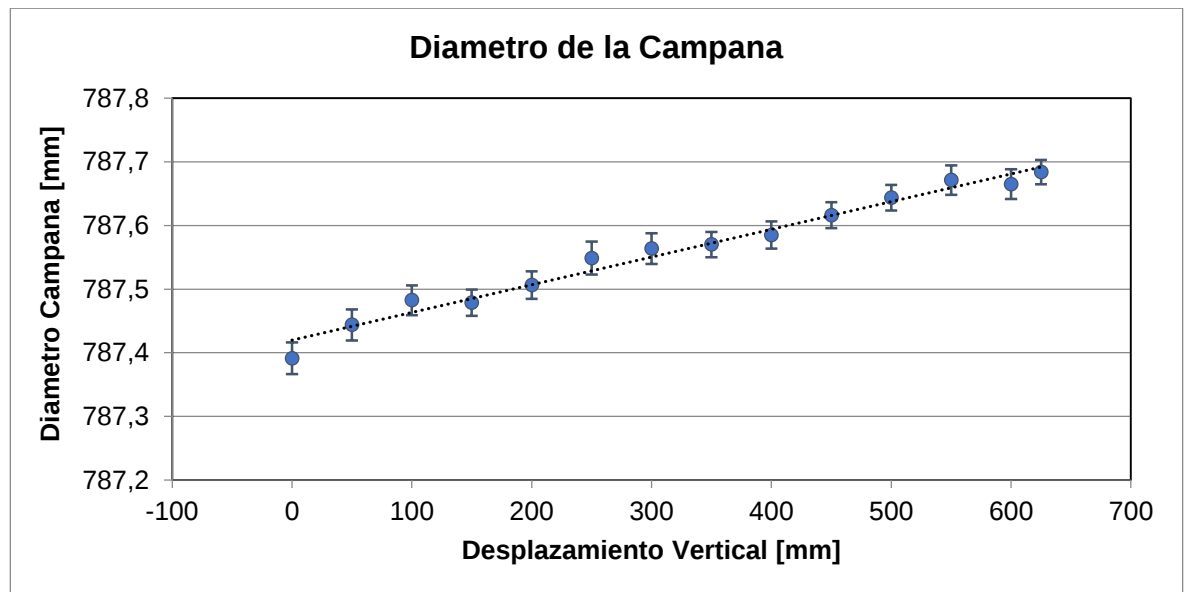
Nivel #	Dist. Borde Superior (mm)	D _{Bell} Promedio (mm)	Incertidumbre U (mm)	k
13	700	787,39	± 0,06	2,26

Función diámetro campana $f(x) = D_{bell}(pulsos)$:

Una vez determinado el diámetro externo de la campana a diferentes niveles, se estableció una función que se ajustará a los datos obtenidos en función de su desplazamiento. De esta manera se corregiría la desviación de la cilindridad de la campana (máximo desvío de la cilindridad: 0,04%).

Aplicando la función, se puede obtener el valor corregido del diámetro a cada diferencial de desplazamiento; si adicionalmente se integra la función respecto al desplazamiento, se obtiene el volumen entre dos puntos cualesquiera de operación del patrón (ver Figura 25).

Figura 25 Función diámetro de la campana $f(x) = D_{Bell}$ (pulsos)



La función que mejor se ajusta es de tipo lineal, a continuación, se presenta la ecuación obtenida, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,98$. Teniendo en cuenta que la distancia vertical desplazada se define mediante el producto entre los pulsos registrados y la constante K_{Bell} , tenemos:

$$f(x) = D_{Bell}(\text{pulsos}) = 4,3536 \cdot 10^{-4} (K_{Bell} \cdot \text{pulsos}) + 787,4199$$

- **Diámetro interno del tanque $D_{\text{tank}} = 883,43 \pm 0,23 \text{ mm}$ ($k=1,98$)**

El diámetro del tanque fue medido dentro del intervalo de variación del nivel de aceite en las posiciones extremas (0 dm³ y 300 dm³).

Figura 26 Medición del diámetro del tanque D_{tank}

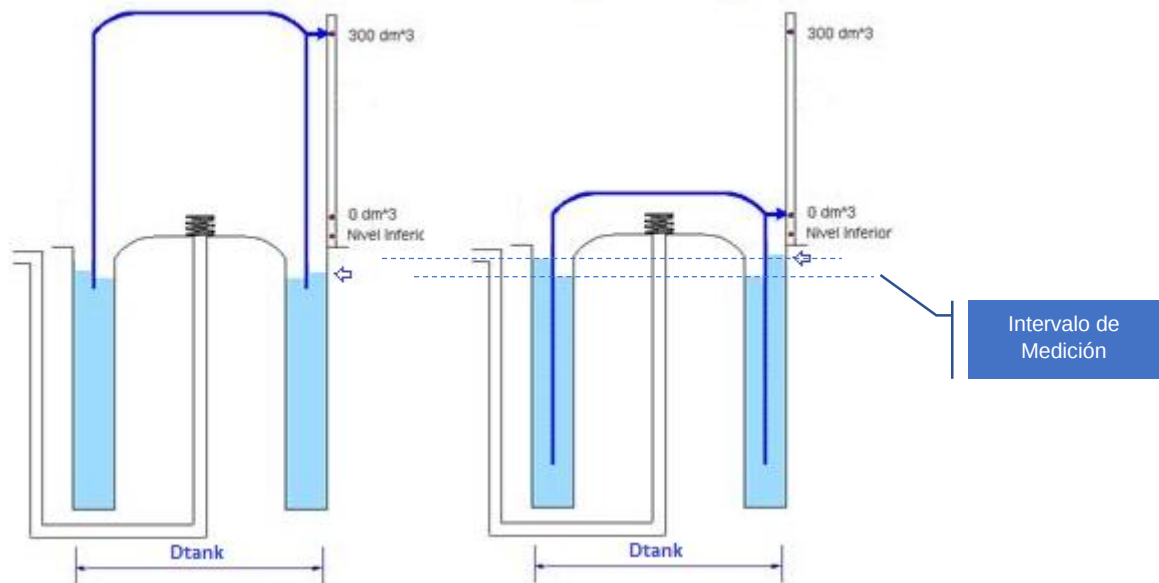


Tabla 24 Diámetro interno del tanque D_{tank}

Diámetro Interno del Tanque D_{tank} (mm)				
1	2	3	4	5
883,31	883,59	883,38	883,37	883,49

- **Variación del nivel de aceite Δnivel**

La variación en el nivel de aceite se determinó con un micrómetro de profundidad, tomando como referencia la brida que circunda el borde del tanque. Se realizaron mediciones en 14 niveles, comenzando con la campana en su posición superior y finalizando con la campana completamente sumergida.

Tabla 25 Variación del nivel de aceite.

Nivel #	Dist. Borde Superior (mm)	□ Nivel (mm)	Incertidumbre U (mm)	K
00	50	12,37	0,10	2,31
01	100	11,58	0,07	2,31
02	150	10,57	0,05	2,31
03	200	9,58	0,06	2,31
04	250	8,59	0,03	2,26
05	300	7,61	0,05	2,31
06	350	6,57	0,06	2,31
07	400	5,67	0,05	2,31
08	450	4,68	0,03	2,31
09	500	3,70	0,05	2,31
10	550	2,74	0,06	2,31
11	600	1,82	0,05	2,31
12	650	0,85	0,08	2,31

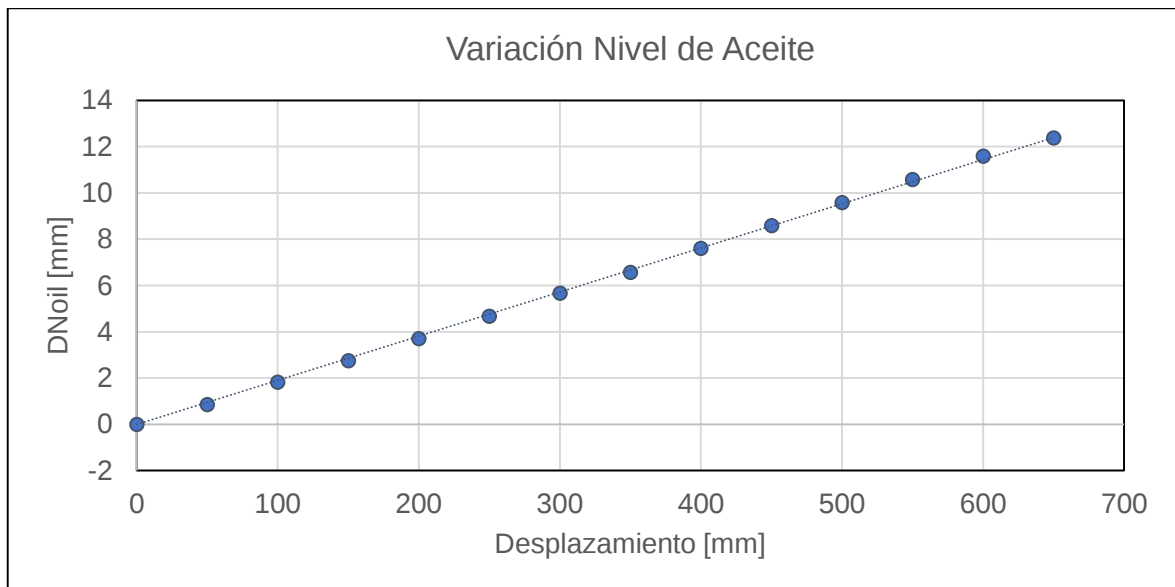
Nivel #	Dist. Borde Superior (mm)	□ Nivel (mm)	Incertidumbre U (mm)	K
13	700	0,00	0,01	1,97

Función nivel de aceite $f(x) = \Delta \text{Nivel}(\text{pulsos})$

Debido a que en la calibración dimensional se obtiene el diámetro externo de la campana, es necesario determinar el diámetro interno de la misma para definir su volumen interno. Para dicho propósito se mide el nivel de aceite de la campana a diferentes alturas durante su inmersión. El cambio en el nivel de aceite y el área anular entre la campana y el tanque, definen un volumen que afecta el volumen efectivo V_{Bell} .

Como el espesor de la campana es uniforme, la función que describe la variación del nivel de aceite al sumergirse la pared metálica de la campana en su interior, es lineal (véase Figura 27).

Figura 27 Función nivel de aceite $f(x) = \Delta \text{Nivel}(\text{pulsos})$



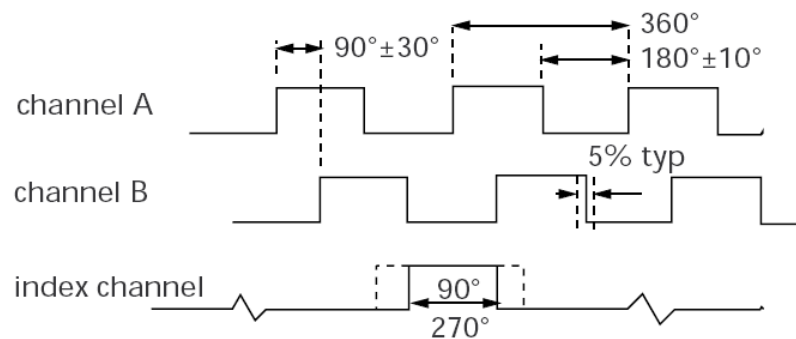
Lo anterior se verificó experimentalmente, encontrándose que la función que mejor se ajusta es del tipo lineal, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,99$. Teniendo en cuenta que la distancia vertical desplazada se define mediante el producto entre los pulsos registrados y la constante K_{Bell} , se obtiene:

$$f(x) = \Delta \text{Nivel}(\text{pulsos}) = 0,01907(K_{\text{Bell}} \cdot \text{pulsos})$$

- **Sistema generador de pulsos**

El desplazamiento vertical de la campana gasométrica se determina a partir de los pulsos emitidos por un codificador digital rotatorio (encoder). Este dispositivo posee 2 canales, los cuales generan un tren de pulsos, con la particularidad de estar desfasados 90° uno respecto al otro (ver Figura 28).

Figura 28 Sistema generador de pulsos.



Se realizó la medición de los pulsos emitidos por el encoder (utilizando los dos canales en modo cuadratura), al completar una revolución (360° de giro en el eje) teniendo como referencia el canal Z (index) del mismo. La prueba se llevó a cabo veintiún (21) veces a diferentes velocidades de giro dentro del intervalo de operación de la campana obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 26 Generación de pulsos a diferentes velocidades de giro.

20002	20000	19993	19997
19992	20001	19999	20008
19999	20002	20001	20002
20002	19999	20001	19997
20000	20000	20001	19998
			20002

Pulsos promedio por revolución: 20´000 pulsos $\pm$ 2 pulsos (k=2,00)

- **Constante cinemática de la campana K_{Bell}**

Con base en el modelo matemático descrito en la Ecuación 5. Y los resultados obtenidos de las mediciones realizadas, se obtiene la constante k_{bell} para el desplazamiento vertical de la campana

$$K_{Bell} = 0,00786711 \pm 2,55 \times 10^{-6} \text{ mm/pulso (0,032 \%) (k = 2,4)}$$

- **Volumen interno de la campana V_{bell}**

Con base en el modelo matemático descrito en la Ecuación 4. Se obtiene el volumen de trabajo útil de la campana V_{300} (nominal: 300 dm³).

$$V_{300} = 302,963 \pm 0,08 \text{ dm}^3 \text{ (k = 1,97)}$$

Anexo C. Adquisición de datos e interfaz gráfica de plantilla propuesta de calibración

ADQUISICIÓN Y CONTROL DE DATOS

El Sistema de adquisición y control se implementó bajo la plataforma Factory Floor de la empresa OPTO 22, sistema que ha sido utilizado anteriormente en otros proyectos desarrollados por el CDT de Gas y que ha demostrado poseer las especificaciones adecuadas para ser integrado en sistemas de medición.

Opto Control

Es un lenguaje de programación desarrollado por OPTO 22 y basado en diagramas de flujo, este permite el desarrollo de software para automatización industrial utilizando hardware de control (Controladores) de OPTO 22. Opto control hace parte del software para automatización industrial Factory Floor de 32-bits para Windows.

A continuación se presentan los aspectos y partes fundamentales necesarias para automatizar un sistema utilizando tecnología OPTO 22.

Estrategia

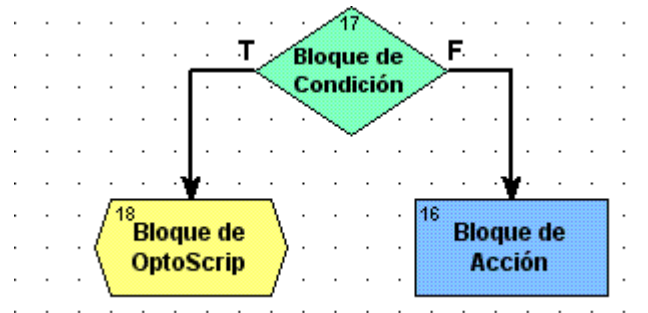
El Software creado usando Opto Control es llamado estrategia. Esta contiene todas las definiciones e instrucciones necesarias para el proceso de control. Está compuesta por un conjunto de diagramas de flujo o charts.

Chart

Es una serie de instrucciones en forma de diagrama de flujo en opto control, también llamado tarea. Cada chart controla un aspecto de la estrategia, una parte del proceso de automatización. En conjunto todos los charts constituyen la estrategia. Los charts están constituidos por bloques conectados por flechas, que indican como fluye el proceso (Ver Figura 22). Estos bloques pueden ser:

- **Bloques de Acción:** Son bloques rectangulares que contienen comandos o instrucciones a ser ejecutadas, un bloque puede incluir muchos comandos y tener varias entradas pero solo una salida.
- **Bloques de Condición:** Poseen forma de diamante y contienen condiciones que controlan el flujo lógico de una estrategia de opto control. Los bloques de condiciones pueden tener varias entradas pero solo dos salidas: verdadero y falso. Más de una condición puede ser evaluada en un solo bloque de condición. Los operadores AND y OR determinan si todas las condiciones deben ser verdaderas para obtener una salida verdadera (AND) o si solo una condición debe ser cierta para obtener una salida verdadera (OR).
- **Bloques de OptoScript:** Bloques en forma hexagonal que contienen lenguaje de programación Optoscript. Estos bloques pueden tener varias entradas pero solo una salida.

Figura 29 Bloques de OPTO control



Fuente: CDT de GAS

Controladores

Los controladores son dispositivos electrónicos que proveen la inteligencia requerida para la automatización. Usando Opto Control, se puede crear un conjunto de instrucciones (un software) que le indique al controlador como debe trabajar cada aspecto del proceso. Opto control también permite descargar el software de programación a un controlador de Opto 22 y este lo ejecuta como una aplicación permanente. Puesto que el conjunto de instrucciones es almacenado en la memoria interna del controlador este puede ejecutar el programa mientras el computador esta apagado o es utilizado para otra aplicación. Las instrucciones pueden ser modificadas fácilmente cuando sea necesario.

Brain

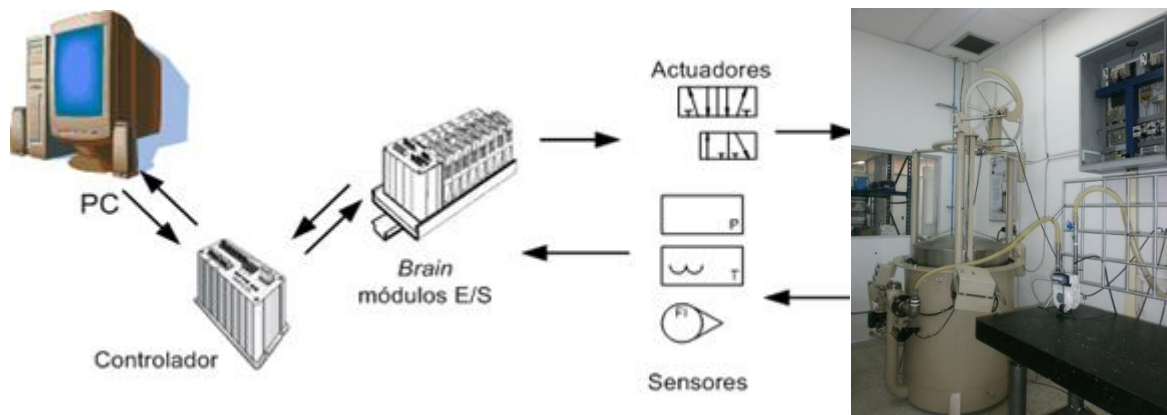
Es un procesador que se enclava en el rack seguido de módulos análogos, digitales y/o entradas/salidas de propósitos especiales formando una unidad E/S inteligente. Además de comunicarse con el computador o el controlador el Brain posee la inteligencia local necesaria para llevar a cabo funciones básicas de control tales como controles On/Off, contadores, o tareas complejas como controles PID, conversiones de temperatura, salidas proporcionales al tiempo, y cierres de emergencia.

Modulo E/S

Un dispositivo que provee una interfaz entre las señales recibidas del “Mundo Real”, dispositivos de campo y señales lógicas usadas en computadores y controladores.

- **Opto Display:** Es un paquete que forma parte del software para automatización industrial Factory Floor de 32-bits para Windows utilizado para crear interfaces hombre-maquina (IHM), o interfaces de operador para monitorear sistemas de control. Este se puede utilizar para crear una IHM que lleve a cabo el monitoreo de una estrategia de Opto Control que sea ejecutada por un controlador industrial Opto 22 permitiendo al operador visualizar en tiempo real la información acerca de la ejecución de las diferentes partes del sistema de control.

Figura 30 Esquema del sistema de control y adquisición de datos del patrón tipo campana gasométrica



Fuente: CDT de GAS

INTERFAZ GRÁFICA DE LA PLANTILLA DESARROLLADA (EJEMPLO MEDIDOR ROTATIVO)

Figura 31 Datos almacenados por medio del software Microsoft Excel.

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Date	Time	ID	QUINST	PRATMOS	PRMM	PRMUT	PDFMUT	TAMBIEN	TMM	TMUT	TACEITE	PMMI	PMMF	PMUT	TPRUEBA	HUM	IDQ	REPT	CONTROL
3	2/12/2018	15:46:58.88	12113	2,713	903,238	908,5	908,6	0,401	17,902	18,986	19,055	19,592	0	0	0	0	55,517	1	1	11
4	2/12/2018	15:47:01.77	12113	2,713	903,238	908,5	908,6	0,401	17,902	18,986	19,055	19,592	0	0	0	0	55,424	1	1	11
5	2/12/2018	15:47:03.78	12113	2,759	903,236	908,5	908,6	0,402	17,902	18,981	19,053	19,592	0	0	0	0	55,424	1	1	11
6	2/12/2018	15:47:05.77	12113	2,759	903,236	908,5	908,6	0,402	17,902	18,981	19,053	19,592	0	0	0	0	55,361	1	1	11
7	2/12/2018	15:47:07.77	12113	2,759	903,236	908,5	908,6	0,402	17,902	18,981	19,053	19,592	0	0	0	0	55,255	1	1	11
8	2/12/2018	15:47:09.77	12113	2,759	903,237	908,5	908,6	0,401	17,902	18,972	19,046	19,592	0	0	0	0	55,255	1	1	11
9	2/12/2018	15:47:11.77	12113	2,759	903,237	908,5	908,6	0,401	17,902	18,972	19,046	19,592	0	0	0	0	55,211	1	1	11
10	2/12/2018	15:47:13.77	12113	2,713	903,237	908,5	908,6	0,398	17,943	18,969	19,044	19,592	0	0	0	0	55,167	1	1	11
11	2/12/2018	15:47:15.78	12113	2,713	903,237	908,5	908,6	0,398	17,943	18,969	19,044	19,592	0	0	0	0	55,167	1	1	11
12	2/12/2018	15:47:17.78	12113	2,713	903,237	908,5	908,6	0,398	17,943	18,969	19,044	19,592	0	0	0	0	55,055	1	1	11
13	2/12/2018	15:47:19.79	12113	2,713	903,236	908,5	908,6	0,402	17,902	18,967	19,044	19,592	0	0	0	0	54,953	1	1	11
14	2/12/2018	15:47:21.83	12113	2,713	903,236	908,5	908,6	0,402	17,902	18,967	19,044	19,592	0	0	0	0	54,953	1	1	11
15	2/12/2018	15:47:23.83	12113	2,759	903,235	908,5	908,6	0,399	17,943	18,978	19,046	19,592	0	0	0	0	54,876	1	1	11
16	2/12/2018	15:47:25.84	12113	2,759	903,235	908,5	908,6	0,399	17,943	18,978	19,046	19,592	0	0	0	0	54,822	1	1	11
17	2/12/2018	15:47:27.84	12113	2,759	903,235	908,5	908,6	0,399	17,943	18,978	19,046	19,592	0	0	0	0	54,822	1	1	11
18	2/12/2018	15:47:29.84	12113	2,759	903,234	908,5	908,6	0,402	17,902	18,972	19,049	19,592	0	0	0	0	54,827	1	1	11
19	2/12/2018	15:47:31.84	12113	2,759	903,234	908,5	908,6	0,402	17,943	18,972	19,049	19,592	0	0	0	0	54,813	1	1	11
20	2/12/2018	15:47:33.85	12113	2,713	903,234	908,5	908,6	0,402	17,943	18,967	19,049	19,592	0	0	0	0	54,813	1	1	11
21	2/12/2018	15:47:35.84	12113	2,713	903,234	908,5	908,6	0,402	17,943	18,967	19,049	19,592	0	0	0	0	54,74	1	1	11
22	2/12/2018	15:47:37.85	12113	2,713	903,234	908,5	908,6	0,402	17,902	18,967	19,049	19,592	0	0	0	0	54,715	1	1	11
23	2/12/2018	15:47:39.87	12113	2,713	903,234	908,5	908,6	0,4	17,902	18,967	19,043	19,592	0	0	0	0	54,715	1	1	11
24	2/12/2018	15:47:41.87	12113	2,713	903,234	908,5	908,6	0,4	17,943	18,967	19,043	19,592	0	0	0	0	54,662	1	1	11
25	2/12/2018	15:47:43.95	12113	2,805	903,233	908,5	908,6	0,398	17,943	18,967	19,04	19,592	0	0	0	0	54,56	1	1	11
26	2/12/2018	15:47:45.96	12113	2,805	903,233	908,5	908,6	0,398	17,943	18,967	19,04	19,592	0	0	0	0	54,56	1	1	11
27	2/12/2018	15:47:47.96	12113	2,805	903,233	908,5	908,6	0,398	17,902	18,967	19,04	19,592	0	0	0	0	54,468	1	1	11
28	2/12/2018	15:47:50.05	12113	2,759	903,233	908,5	908,6	0,398	17,902	18,966	19,031	19,592	0	0	0	0	54,395	1	1	11
29	2/12/2018	15:47:52.07	12113	2,759	903,233	908,5	908,6	0,398	17,902	18,966	19,031	19,592	0	0	0	0	54,395	1	1	11
30	2/12/2018	15:47:54.10	12113	2,759	903,232	908,5	908,6	0,399	17,902	18,96	19,026	19,592	0	0	0	0	54,361	1	1	11

Figura 32 Condiciones ambientales

Recalcular								
K Factor MUT 0,0 dm³/Puls			Condiciones Ambientales					
Punto	Parámetros de la Prueba	Caudal Promedio	Prueba	Temperatura Ambiente	Presión Barométrica	Humedad Relativa	Humedad Relativa inicial	Humedad Relativa final
Nº	Factor	Q	Nº	Tamb	Pa	HR	HR1	HR2
	--	dm³/min		°C	mbar	%	%	%
1	0	2,7	1	18,93	903,24	63,98	55,52	66,88
			2	18,26	903,29	56,05	57,15	54,37
			3	19,25	903,25	63,07	71,12	57,61
			4					
			5					
			6					
			7					
			8					
			9					
			10					
	Variable del Medidor	Nº Pruebas	Prom Desvest u std u(y) Veff	18,812 0,505	903,258 0,025	61,032 4,339	61,263 8,573	59,618 6,496
	V	3						

<	>	...	CALC_V_AF	CERTIFICADO_Q_EA	CERTIFICADO_Q	DATOS	+
---	---	-----	-----------	------------------	---------------	-------	---

Figura 33 Datos y cálculos para el medidor bajo prueba MUT

[illegible]

Figura 34 Datos y cálculos para el patrón tipo campana gasométrica

Campana - MM													
Pulsos Campana		Temperatura Campana	Temperatura inicial campana	Temperatura final campana	Presión Campana	Presión inicial Campana	Presión final Campana	Densidad inicial Campana	u Densidad inicial Campana	Densidad final Campana	u Densidad final Campana	ΔP Densidad Campana	Caudal Medio
Pulsos Ini	Pulsos Fin	Tp	Tp1	Tp2	Pp	Pp1	Pp2	rho_p1	u_rho_m	rho_p2	u_rho_m	Δ rho_p	Qp
Puls	Puls	°C	°C	°C	mbar	mbar	mbar	Kg/m3	Kg/m3	Kg/m3	Kg/m3	Kg/m3	dm³/min
62282	70086	19,02	18,99	19,28	908,60	908,60	908,60	1,078	0,001	1,076	0,001	-0,002	2,72
62282	70130	19,29	19,43	19,11	908,64	908,60	908,60	1,076	0,001	1,078	0,001	0,002	2,73
62282	70102	19,42	19,19	19,41	908,60	908,60	908,60	1,076	0,001	1,076	0,001	0,000	2,70
62282	70106	19,241	19,204	19,266	908,611	908,600	908,600	1,077	0,001	1,077	0,001	0,000	2,717
0,000	22,271	0,205	0,224	0,149	0,020	0,000	0,000	0,001		0,001			0,013
								0,001		0,001			
								-0,156		0,092			
								470		470			

Figura 35 Cálculo de mensurando e incertidumbre asociada

Cálculos							Contribución por Componente				
Volumen Campana	u Volumen Campana	Volumen Acumulado	u Volumen acumulado	Error de Medición	Incertidumbre asociada al Error de Med	Factor de Cobertura	Parámetro	Contribución en el Error	Parámetro	Contribución en la Densidad	Contribución en el Error
Vp	uVp	Va	uVa	E	Ue	k	Xi	C_Err	Xi	C_rho	C_Err
dm³	dm³	dm³	dm³	%	%E	--	--	%	--	%	%
29.767	0.005	42.738	5.000	0.342	0.419	1.99	Dens MM1	54.91%	Dens MM1		
29.935	0.005	42.570	5.000	0.516			Dens MM2	19.04%	HRMM_1	33.77%	18.54%
29.828	0.005	42.677	5.000	0.621					TMM_1	9.49%	5.21%
							Dens MUT	9.56%	PMM_1	54.84%	30.11%
									Dens MM2		
							V MM	0.69%	HRMM_2	33.96%	6.47%
							V Acum	0.00%	TMM_2	9.43%	1.80%
									PMM_2	54.71%	10.42%
									Dens MUT		
29.844	0.005	42.662	5.000	0.493	uc	Vef	Repetibilidad	14.89%	HRMUT	33.13%	3.17%
0.085		0.085		0.1408	%E	--			TMUT	10.60%	1.01%
0.049		0.049		0.081			Método	0.90%	PMUT	54.42%	5.20%
-0.018		-0.001			0.211	84					
200		200					Q Fuga	0.00%			

Figura 36 Contribución de las fuentes de incertidumbre.

