

**DISMINUCIÓN EN LA INCERTIDUMBRE DE UN PATRÓN TIPO VASOS
COMUNICANTES PARA CALIBRACIÓN DE PRESIÓN, CON UN ALCANCE
MANOMÉTRICO DE -5,2 kPa A 5,2 kPa**

**JAIRO ALBERTO PRIETO ROJAS
CRISTIAN EDUARDO ROJAS GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

**DISMINUCIÓN EN LA INCERTIDUMBRE DE UN PATRÓN TIPO VASOS
COMUNICANTES PARA CALIBRACIÓN DE PRESIÓN, CON UN ALCANCE
MANOMÉTRICO DE -5,2 kPa A 5,2 kPa**

**JAIRO ALBERTO PRIETO ROJAS
CRISTIAN EDUARDO ROJAS GÓMEZ**

Trabajo de grado para optar al título de: Ingeniero Químico

Director

**CARLOS EDUARDO GARCÍA SÁNCHEZ
Ph.D. en Ingeniería Química**

Codirector

**JHON ALEJANDRO ANGULO
Ingeniero Electronico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

Quien decididamente, me dio el impulso para tomar este buen camino, mi madre,
Luisa Emma Rojas Jaimes.

Mi padre, Jairo Enrique Prieto Gómez, por su apoyo incondicional y constante a lo
largo de mi vida.

Mis hermanos Catalina Prieto Rojas y Fredy Prieto Rojas, por la paciencia y que
siempre han estado ahí para aconsejarme, ayudarme y escucharme cuando lo he
necesitado.

Mis familiares, que siempre me han tendido una mano cuando lo he necesitado.

Mi compañero Cristian y a mis amigos que de manera solidaria y altruista han
decidido compartir tiempo de su vida conmigo.

Jairo Alberto Prieto Rojas

A Dios, por ser mi guía, protector, por brindarme fuerza de seguir adelante.

A mi padre, pedro Rojas, por su apoyo incondicional durante toda mi carrera, por motivarme y estar a mi lado.

A mi madre, Blanca Gómez, por su amor incondicional, por motivarme y estar siempre a mi lado.

A mi hermano y tíos por confiar en mí, por apoyarme en los momentos que más lo he necesitado.

A Jairo y todos mis amigos, por sus buenos consejos y amistad incondicional.

A Lore, por aportar su buena energía, cariño y motivación.

Cristian Rojas Gómez.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor **Carlos Eduardo García Sánchez**, por su entrega, dedicación y compromiso en el desarrollo de este proyecto.

Al **CDT de Gas**, por el apoyo brindado durante la fase experimental de esta investigación, en especial a Jhon Alejandro Angulo.

A la **Universidad Industrial de Santander**, nuestra alma máter, por darnos la oportunidad de formarnos profesionalmente.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2. METODOLOGÍA	22
2.1 ESTUDIO PRELIMINAR.....	22
2.2 MODIFICACIONES AL PATRÓN.....	23
2.3 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN.....	23
2.4 IMPLEMENTACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA MODIFICACIÓN SELECCIONADA.....	24
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
3.1 ESTUDIO PRELIMINAR.....	25
3.2 PROPUESTAS DE MODIFICACIÓN.....	27
3.3 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE MODIFICACIÓN.....	37
3.3 IMPLEMENTACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA MODIFICACIÓN SELECCIONADA.....	39
4. CONCLUSIONES	41
5. RECOMENDACIONES.....	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43
ANEXOS.....	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coeficientes de sensibilidad por magnitud de entrada.....	25
Tabla 2. Resultados de incertidumbre original.	26
Tabla 3. Resultado de aporte por micrómetro.....	26
Tabla 4. ANOVA 1 para variabilidad en vasos y alturas.	28
Tabla 5. ANOVA 2 para variabilidad en vasos.	28
Tabla 6. ANOVA 3 para diámetro del micrómetro.....	28
Tabla 7. Incertidumbre en magnitudes de entrada para u (Hp).	30
Tabla 8. Coeficientes de sensibilidad propuesta 1.....	30
Tabla 9. Resultados de incertidumbre propuesta 1.....	31
Tabla 10. Incertidumbre de magnitudes de entrada para u (Hp).	32
Tabla 11. Coeficientes de sensibilidad para propuesta 2.....	32
Tabla 12. Resultados de incertidumbre propuesta 2.....	33
Tabla 13. Coeficientes de sensibilidad propuesta 3.....	35
Tabla 14. Resultados de incertidumbre propuesta 3.....	35
Tabla 15. Coeficientes de sensibilidad propuesta 4.....	36
Tabla 16. Resultados de incertidumbre propuesta 4.....	37
Tabla 17. Comparación técnica y económica de las propuestas.	38
Tabla 18 .Datos experimentales de nivel y temperatura generando presión.	39
Tabla 19. Comparación de incertidumbres original, modificada y requerida.....	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de metodología.....	22
Figura 2. Patrón modificado.....	39

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Proceso de estimación de incertidumbre por el método GUM para el patrón vasos comunicantes.	46
Anexo B. Método y procedimiento de medición	56
Anexo C. Datos experimentales y cálculos del análisis preliminar.....	58
Anexo D. Datos experimentales y cálculos para propuestas.	61
Anexo E. Análisis de varianza.....	65
Anexo F. Deducción de los sistemas de medición y esquemas.....	66

NOMENCLATURA

D_v	Diámetro del vaso de vacío [m].
D_p	Diámetro del vaso de presión [m].
d_p	Diámetro o del micrómetro [m].
d_a	Diámetro interno del imán (sensor) [m].
d_b	Diámetro externo del imán (sensor) [m].
d_v	Diámetro de la varilla del sensor [m].
g	Gravedad [m/s^2].
H_v	Nivel del vaso de vacío [m].
H_p	Nivel del vaso de presión [m].
H_c	Altura del cono en la punta del micrómetro [m].
K	Longitud real en la varilla de 25 mm [m].
L_v	Longitud de la varilla [m].
m	Masa del imán [kg].
P	Presión generada [Pa].
$u(H_p)$	Incertidumbre de nivel en el vaso de presión [m].
$u(H_{p \text{ res}})$	Incertidumbre de resolución del micrómetro de presión [m].
$u(H_{p \text{ exp}})$	Incertidumbre experimental de nivel en el vaso de presión [m].
$\frac{\Delta f}{\Delta x_i}$	Coefficiente de sensibilidad por magnitud de entrada.

Letras griegas

ρ	Densidad del líquido [kg/m^3].
--------	------------------------------------

RESUMEN

TÍTULO: DISMINUCIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE UN PATRÓN TIPO VASOS COMUNICANTES PARA CALIBRACIÓN DE PRESIÓN, CON UN ALCANCE MANOMÉTRICO DE - 5,2 kPa A 5,2 kPa*

AUTORES: Jairo Alberto Prieto Rojas - Cristian Eduardo Rojas Gómez**

PALABRAS CLAVE: Vasos Comunicantes, Incertidumbre, Fuente de variabilidad, Aporte de incertidumbre, Método GUM, precisión.

DESCRIPCIÓN:

La demanda insatisfecha en Colombia, respecto a la calibración de bajas presiones, se debe principalmente a la insuficiencia de patrones secundarios, que brinden baja incertidumbre y cuenten con certificación ONAC. Esta investigación tuvo como propósito, tomar el patrón de vasos comunicantes Dwyer 1425 Series Hook Gage del laboratorio CDT de Gas y modificarlo, de tal manera que su incertidumbre estimada por el método GUM, sea menor a la original y por tanto se habilite este para realizar calibraciones. Para cumplir tal objetivo, primero se hizo una estimación de incertidumbre en el patrón original, para identificar las fuentes de variabilidad que más aportan duda en las mediciones. Se obtuvo que la medición de nivel en los vasos es la fuente más relevante, debido a su falta de precisión. En segundo lugar, se diseñaron 4 propuestas enfocadas a una disminución en el aporte por las mediciones de nivel, para posteriormente escoger una de estas propuestas en base al costo y a la incertidumbre. Se encontró que la mejor opción es suprimir la medición de nivel en un vaso, e incorporar mejoras ópticas en el otro, para continuar lecturas de nivel con micrómetro. Por último, se compararon las diferencias de incertidumbre entre el patrón original, el modificado y la incertidumbre requerida, de allí se evidenció una brecha significativa entre la incertidumbre del patrón original y modificado. Además, se logró un cumplimiento en los requerimientos del laboratorio en un rango manométrico de 2.5 kPa a 5.2 kPa, en presión y vacío.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Carlos Eduardo García Sánchez, PhD. Codirector: Jhon Alejandro Angulo

ABSTRACT

TITLE: DECREASE OF THE UNCERTAINTY OF A COMMUNICATING VESSEL PATTERN FOR PRESSURE CALIBRATION, WITH A MANOMETRIC RANGE OF -5.2 kPa TO 5.2 kPa*

AUTHORS: Jairo Alberto Prieto Rojas - Cristian Eduardo Rojas Gómez**

KEYWORDS: Communicating Vessels, Uncertainty, Source of variability, Contribution of uncertainty, GUM Method, Accuracy.

DESCRIPTION:

The unsatisfied demand in Colombia, regarding the calibration of low pressures, is mainly due to the lack of secondary patterns that provide low uncertainty and have ONAC certification. The purpose of this research is to take the Dwyer 1425 Series Hook Gage communicating vessel pattern from the Gas CDT laboratory and modify it, in such a way that its uncertainty estimated by the GUM method is lower than the original one and therefore it is enabled to perform calibrations. To accomplish this aim, the uncertainty in the original pattern is first estimated to identify the sources of variability that most contribute to doubt in the measurements, from which it was obtained that the level measurement in the vessels is the most relevant source, due to its lack of precision. Secondly, 4 proposals focused on a decrease in the contribution by the level measurements were designed, to later choose one of these proposals based on the cost and the uncertainty, from which it was obtained that the best option is to suppress the measurement level in a vessel and incorporate optical improvements in the other to continue level measurements with micrometer. Finally, the differences of uncertainty between the original, modified pattern and the required uncertainty were compared, from there a significant gap was obtained between the original and modified uncertainty of pattern, in addition a compliance in the laboratory requirements was achieved in a manometric range of 2.5 kPa to 5.2 kPa, in pressure and vacuum.

* Undergraduate project

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Carlos Eduardo García Sánchez, PhD. Codirector: Jhon Alejandro Angulo

INTRODUCCIÓN

Las mediciones juegan un papel importante en la vida diaria puesto que permiten conocer, de forma cuantitativa, las propiedades físicas y químicas de los objetos. La ciencia de la medición es la Metrología, la cual se basa en aspectos teóricos, técnicos y legales, con la finalidad de saber la suficiente exactitud de una medición. Además, esta tiene en cuenta las capacidades de ciertos equipos patrones, para calibrar los instrumentos de medición necesarios en la industria¹. Por tal motivo, los laboratorios de metrología forman parte del sistema de producción y estos deben cumplir con los estándares nacionales o internacionales, según los requerimientos técnicos solicitados por el cliente². Las mediciones necesitan ser relacionadas a una referencia determinada, con la intención de lograr una equivalencia entre el proveedor y comprador, sin tener dependencia de lugar, tiempo y mediciones equivalentes de un mensurando. Esto genera el concepto de trazabilidad, la cual se basa en una cadena ininterrumpida de comparaciones, teniendo en cuenta la incertidumbre de cada instrumento utilizado en dicho sistema³. La cadena de trazabilidad a nivel nacional parte del patrón primario, de acá el compromiso del laboratorio nacional en brindar trazabilidad a sus patrones, es decir, la trazabilidad del país generalmente depende de dicho laboratorio⁴. En Colombia, por ejemplo, el Instituto Nacional de Metrología (INM), alberga los patrones primarios y de allí se derivan los laboratorios secundarios de calibración.

¹ ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE METROLOGÍA LEGAL. Vocabulario internacional de términos en metrología legal, París: OIML, 2013. p.9

² MENDOZA, Jairo. Aspectos de la norma NTC 17025 concernientes al diseño de software para calibración en un laboratorio de metrología. En: Scientia et Technica Año XI. Noviembre-Diciembre, 2005, vol.1 no.29., p.1-2

³ VILIESID ALONSO, Miguel, et al. Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en metrología dimensional. Querétaro: CENAM, 2008. p.20

⁴ GALLEGO, Juan Miguel y GUTIÉRREZ, Luis. Un análisis cualitativo del desarrollo del sistema. Bogotá D.C.: SNC, 2016.p.7

El grado de confiabilidad de las mediciones depende, tanto de la trazabilidad como de la incertidumbre que se tiene en las mismas, puesto que la incertidumbre es una característica de la medición, representa la duda que surge al momento de cuantificar un mensurando. La manera de estimar la incertidumbre en las mediciones de esta investigación, es por el método GUM, el cual consiste en la representación del modelo matemático haciendo uso de series de Taylor y el teorema del límite central. Este método generalmente se usa para problemas de medición sencillos, donde la linealización es una adecuada alternativa para la representación del modelo y no se cuenta con fuentes de variabilidad que dominen el aporte a la incertidumbre en un mensurando específico. En este método, a partir del mensurando se plantea un modelo matemático, que relacione magnitudes de entrada y fuentes de variabilidad, con sus respectivos aportes de incertidumbre y coeficientes de sensibilidad, esto con el fin de hallar la incertidumbre combinada⁵.

Además, la confiabilidad de las mediciones requiere, entre otras cosas, que los equipos de medición sean calibrados periódicamente. En Colombia, el cumplimiento de este requisito, fundamental para el intercambio comercial, presenta distintas dificultades, entre las que se encuentra que la demanda actual de calibración no es abarcada en su totalidad. Esto se debe a la baja cantidad de laboratorios de ensayo y calibración, lo que ocasiona demoras en entregar resultados. Por ejemplo, el Instituto Nacional de Metrología (INM) tarda aproximadamente dos meses en entregar resultados de una calibración, sin tener en cuenta la demora en la solicitud. Adicionalmente, estos laboratorios presentan problemas al momento de garantizar la calidad de bienes y servicios, debido a dificultades para la entrega de resultados precisos⁶.

⁵ GARCÍA SÁNCHEZ, Luis. Estimación de incertidumbre usando el método GUM. Bucaramanga: CDT de Gas, 2008.p.5

⁶ INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGÍA DE COLOMBIA. Calibración de equipos e instrumentos de medición. [En línea]. Metrología publicaciones. Bogotá D.C.: INM. 2017. (citado en 2 Enero 2018.) Disponible en <http://inm.gov.co/index.php/servicios-inm/calibracion>

Debido a esta problemática, en el área metrológica de calibración de presión, específicamente a bajas presiones manométricas, existe cierta demanda insatisfecha. Aparte del INM, solo hay 4 laboratorios prestando tal servicio acreditados por el organismo nacional de acreditación en Colombia (ONAC), entre los cuales está la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas (CDT de Gas)⁷. La calibración de equipos a bajas presiones, se hace por comparación directa con un patrón generador de presión, ya sea balanzas de presión, manómetros, vasos comunicantes, transductores o transmisores de presión. Estos patrones se rigen bajo los principios de expansión estática o dinámica de los gases, la expansión estática hace referencia a la presión ejercida por un fluido independientemente de la velocidad del mismo. Algunos patrones se basan también en la ley de Boyle, la cual establece que el volumen de una determinada masa de gas, es inversamente proporcional a la presión ejercida a temperatura constante. La expansión dinámica, se refiere a la presión ejercida por un fluido en movimiento, por lo tanto, estos patrones tienen una entrada continua de gas⁸. En cuanto a la balanza de presión, su funcionamiento se basa en la relación entre la componente normal de la fuerza sobre una superficie; se constituye de un sistema pistón-cilindro, fabricado con alta precisión, que se carga con masas para generar los distintos puntos de prueba, la carga de las pesas es proporcional a la presión deseada, su incertidumbre en la medida es de orden 10^{-5} kPa⁹. Por otra parte, los transductores o transmisores, se encargan de transformar los cambios en la presión en señales eléctricas, que posteriormente se convierten en lecturas, funcionan mediante un sensor de presión de tipo resistivo, piezoresistivo, capacitivo o piezoeléctrico, el tipo depende

⁷ ORGANISMO NACIONAL DE ACREDITACIÓN DE COLOMBIA. Listado de laboratorios de calibración Acreditados presión. [En línea]. Servicio de acreditación. Bogotá D.C.: ONAC. 2018. (citado en 3 Enero 2018.) Disponible en <https://goo.gl/KCoLiQ>

⁸ HERRANZ FERNÁNDEZ, David. Realización de un sistema de expansión estática como patrón nacional de presión absoluta en la región de vacío en el rango de 10^{-4} Pa a 1000 Pa. [En línea]. Jornada de difusión de resultados de proyectos CEM. Madrid: Centro Español de Metrología. 2016. (citado en 3 de Enero de 2018.) Disponible en http://www.cem.es/sites/default/files/proyecto_n3_see.pdf

⁹ DISAI AUTOMATIC SYSTEMS. Balanza de presión neumática Modelo CPB5000. [En línea]. Catálogo. Barcelona: WIKA. 2013. (citado en 2 de Enero 2018.) Disponible en http://www.disai.net/wp-content/uploads/catalogos_pdf/BALANZA.pdf

principalmente del rango de presión a trabajar, la temperatura del ambiente y el tipo de fluido¹⁰. También, se cuenta con manómetros como patrones de medición, los cuales por su función deben tener alta repetibilidad y bajo error, generalmente contienen galgas extensiométricas, ya que se mejora la estabilidad en el tiempo y la repetibilidad¹¹. Respecto al patrón vasos comunicantes, su funcionamiento consiste principalmente, que en dos recipientes con líquido, conectados entre sí y a presión atmosférica, su fuerza hidrostática a una profundidad dada siempre será la misma, sin importar la geometría de los recipientes o tipo de líquido; este sistema resulta útil para la medición de bajas presiones¹².

A pesar que actualmente, el patrón de vasos comunicantes no es muy común para llevar a cabo calibraciones, se encuentra que en el ámbito latinoamericano, se llevaron a cabo en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) con ayuda del Instituto Tecnológico de Veracruz (ITV) en México, unas pruebas incorporando un interferómetro láser como medidor de alturas en un patrón tipo vasos comunicantes, usando aceite para la columna de líquido, se construyó además una mesa con gran masa y baja resonancia, con el objetivo de aislar el patrón de las vibraciones mecánicas externas. Con los resultados obtenidos, se estimó que el patrón podría tener un rango de medición de 0.2 kPa a 5 kPa y proporcionaría una incertidumbre expandida de 1×10^{-6} kPa¹³. Sin embargo, el patrón no fue puesto en marcha y hoy día el CENAM cuenta con una balanza de presión como patrón primario en bajas presiones y una incertidumbre mínima de 2.5×10^{-4} kPa en las mediciones con el

¹⁰ DISAI AUTOMATIC SYSTEMS. Transductor magnético MTS 100. [En línea]. Catálogo. Barcelona: HONNER. 2013. (citado en 2 de Enero 2018.) Disponible en [http://www.disai.net/wpcontent/uploads/catalogos_pdf/MTS%20100\(500\)\(1K\)%20Rev%201.pdf](http://www.disai.net/wpcontent/uploads/catalogos_pdf/MTS%20100(500)(1K)%20Rev%201.pdf)

¹¹ DIGITRON. Pressure instruments 2000 series. [En línea]. Catálogo. Valencia: Femto instruments. 2017. (citado en 3 de Enero 2018) Disponible en <https://goo.gl/ikHp4H>

¹² DE LUCA, Roberto y FAELLA, Orazio. Communicating vessels: a non-linear dynamical system. En: Revista Brasileira de Ensino de Física. Febrero-Marzo, 2017, vol.39 no.3., p.1-2.

¹³ RODRÍGUEZ MENDOZA, Joaquín; TORRES GUZMÁN, Jorge y SANTANDER ROMERO, Luis. Conceptualización y diseño de micromanómetros de columna de líquido como patrones nacionales de presión en los alcances de 1 kPa y 5 kPa. Querétaro: CENAM, 2006. p.5.

mismo¹⁴. También, se encontró evidencia que el laboratorio Metroindustrial de Cali, realizó una modificación a este patrón, que consiste en reemplazar las varillas por un pie de rey fijo como medidor de la distancia entre vasos, aunque debido a la corta longitud alcanzada por el pie de rey, se disminuye considerablemente el rango de uso del patrón, por lo que el límite superior de alcance pasa de 5.88 kPa aproximadamente a 1.24 kPa tanto en presión como en vacío. También se suprimió un micrómetro, lo que ayuda a disminuir el número de datos tomados, aunque acarrea una mayor cantidad de cálculos y análisis. El uso de este patrón no se encuentra acreditado por el ONAC actualmente¹⁵.

Según el Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), respecto a los principales patrones de baja presión a nivel internacional, se tiene el de Alemania con una incertidumbre mínima de 1×10^{-5} kPa y el de Reino Unido con una incertidumbre mínima de 3.8×10^{-5} kPa, usando ambos una balanza de presión como patrón¹⁶. A nivel nacional, la calibración a bajas presiones depende de: el Instituto Nacional de Metrología (INM), que siendo el laboratorio primario del país, cuenta con un manómetro de campana de inmersión como patrón, en un rango manométrico de -1 kPa a 1.5 kPa, con una incertidumbre mínima de 6×10^{-5} kPa¹⁷; El CDT de Gas que logra una incertidumbre mínima de 2.6×10^{-4} kPa, empleando transmisores de presión como patrón, en un rango manométrico de 0 a 2.5 kPa y de los 3 laboratorios secundarios restantes, que empleando un indicador digital con módulo de presión como patrón, se encuentra una incertidumbre mínima de 2.7×10^{-4} kPa¹⁸.

¹⁴ CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA. Calibración de manómetros con balanza de presión de alta exactitud. [En línea]. Catálogo de servicios. Querétaro: CENAM. 2017. (citado en 5 de Enero 2018.) Disponible en <http://www.cenam.mx/calibracion/Servicios.aspx?division=720>

¹⁵ METROINDUSTRIAL. Equipo Patrón de presión diferencial. [En línea]. Productos fabricados por Metroindustrial. Cali: Metroindustrial S.A.S. 2016. (citado en 20 Diciembre 2017) Disponible en <http://www.metroindustrial.com.co/metroindustrial>

¹⁶ BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. Key and supplementary comparisons. [En línea]. KCDB. Saint-Cloud: BIPM. 2017. (citado en 4 Enero 2018) Disponible en <https://goo.gl/ojsxui>

¹⁷ Ibíd.

¹⁸ ORGANISMO NACIONAL DE ACREDITACIÓN DE COLOMBIA. Op. Cit.

Es evidente la necesidad de tener mayor cantidad de equipos para calibración a bajas presiones en Colombia. Con el fin de incrementar el número de patrones en esta área y además, teniendo en cuenta cómo se ha intentado dar solución a problemáticas similares en distintos laboratorios y países, el CDT de Gas, propone modificar un patrón de vasos comunicantes que estaba fuera de servicio (Dwyer 1425 Series Hook Gage), con el fin de disminuir la incertidumbre en sus mediciones, para posteriormente prestar un servicio de calibraciones con este.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL.

Diseñar, evaluar e implementar modificaciones en un patrón para calibración de presión tipo vasos comunicantes, de modo que su incertidumbre en la generación de presiones manométricas sea aproximadamente la requerida, en un rango de -5,2 kPa a 5,2 kPa.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Identificar y analizar las fuentes de variabilidad de mayor importancia en el patrón vasos comunicantes, estimando su incertidumbre en la presión generada.
- Seleccionar e implementar, entre varias alternativas, una modificación al patrón vasos comunicantes, que sea económicamente factible y se aproxime a los resultados de incertidumbre requeridos.
- Evaluar el desempeño del patrón de vasos comunicantes tras la modificación, en cuanto a su alcance de presión y al contraste que se obtenga respecto a la incertidumbre inicial y requerida.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo de la investigación se realizó en una serie de etapas las cuales se muestran en la figura 1.

Figura 1. Esquema de metodología.

Esquema de metodología
Estudio preliminar
Identificar y cuantificar en el patrón original las fuentes de variabilidad relevantes y su respectiva incertidumbre.
Definición de alternativas de modificación al patrón
Plantear mediante revisión del estado del arte y viabilidad tecnológica las mejores alternativas de modificación al equipo.
Comparación y selección de las alternativas de modificación
Escoger mediante criterios de factibilidad técnica y económica la mejor opción de modificación.
Implementación, caracterización y evaluación de la modificación seleccionada
Comparar y analizar incertidumbre requerida, original y modificada del patrón

2.1 ESTUDIO PRELIMINAR.

La primera etapa de la investigación consiste en descubrir qué fuentes de variabilidad aportan más incertidumbre en las mediciones con el patrón, esto con el objetivo de enfocar las propuestas de modificación posteriores a mitigar el impacto de tales fuentes de variabilidad. Se logra mediante una puesta en marcha del patrón con un análisis detallado de la incertidumbre y el porcentaje de aporte arrojado por las mediciones con el mismo. Se lleva a cabo siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo B y una vez se tienen los valores de experimentación necesarios, se

procede a determinar la incertidumbre por el método GUM, siguiendo los pasos contenidos en el Anexo A.

2.2 MODIFICACIONES AL PATRÓN.

Seguido de la identificación de las mayores fuentes de incertidumbre que tiene el patrón originalmente y el aporte de cada una sobre la incertidumbre global, se deben enfocar las modificaciones a mitigar los aportes más relevantes, esto se hace mediante la búsqueda de opciones favorables técnica y económicamente; en el aspecto económico, se hacen cotizaciones nacionales e internacionales, con el fin de incluir las mejores opciones en el mercado, teniendo en cuenta los costos de traslado e instalación; además, en el aspecto técnico, se tiene como criterio los requerimientos de exactitud, resolución, repetitividad y precisión de cada propuesta; de acuerdo a estos criterios se plantea un modelo de medición adecuado teniendo en cuenta el nuevo principio de funcionamiento, después se realiza el cálculo de incertidumbre por el método GUM siguiendo el procedimiento del Anexo A; esta incertidumbre se calcula mediante experimentación o estimación en base a las características de las modificaciones cotizadas, esto depende de la facilidad que se tenga en la implementación y el costo de las modificaciones.

2.3 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN.

Una vez hallados los valores de incertidumbre y costos de cada propuesta, se procede a comparar junto con los directivos del CDT de Gas, los valores de incertidumbre calculados en cada una. Además, se compararon los costos entre propuestas con la finalidad de tener un rango de presupuesto; adicionalmente, se comparó la facilidad en la adecuación de cada propuesta al patrón.

Finalmente, la selección fue hecha mediante la mejor relación costo-beneficio de acuerdo a las posibles calibraciones demandadas por este patrón, teniendo en cuenta su incertidumbre y alcance de medición.

2.4 IMPLEMENTACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA MODIFICACIÓN SELECCIONADA.

Para evaluar la propuesta seleccionada, se halla la diferencia entre el valor de incertidumbre original, modificado y requerido para el patrón, en los mismos rangos de presión. Por otra parte, haciendo uso del modelo matemático de las mediciones y del método GUM, se realiza el código de programación en Visual Basic, para crear un formulario en el cual el operador ingrese los datos de medición y este calculará la incertidumbre, presión o vacío generados y aportes en incertidumbre de las magnitudes de entrada.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 ESTUDIO PRELIMINAR.

El proceso de estimación de incertidumbre para el patrón original, parte de unas pruebas experimentales con el fin de evaluar su desempeño. El procedimiento y montaje se encuentra descrito en el Anexo B. El modelo matemático del patrón original es el siguiente:

$$P = \rho g (L_v + H_v + H_p - K) \quad (1)$$

Además, la incertidumbre se halla por el método GUM descrito de manera general en el Anexo A. En el paso 7, se determina la incertidumbre de la siguiente manera:

$$u(H_p) = \sqrt{u(H_{p \text{ exp}})^2 + u(H_{p \text{ res}})^2 + u(N)^2} \quad (2)$$

Tabla 1. Coeficientes de sensibilidad por magnitud de entrada.

Magnitud de entrada	Coefficiente de sensibilidad
Densidad	$\frac{\partial P}{\partial \rho} = g (l_v + H_v + H_p - K) \quad (1)$
Gravedad	$\frac{\partial P}{\partial g} = \rho (l_v + H_v + H_p - K) \quad (2)$
Nivel vaso de presión	$\frac{\partial P}{\partial H_p} = \rho g \quad (3)$
Nivel vaso de vacío	$\frac{\partial P}{\partial H_v} = \rho g \quad (6)$
Longitud de varilla	$\frac{\partial P}{\partial L_v} = \rho g \quad (7)$
Separación inicial entre codos	$\frac{\partial P}{\partial K} = \rho g \quad (8)$

La incertidumbre en las mediciones con el patrón, no depende de la presión generada, por esto se considerará representativo tomar los valores promedio para incertidumbre y aporte en los análisis con el patrón, como se describen en la Tabla 2. En el Anexo C, se encuentran los valores de incertidumbre obtenidos.

Tabla 2. Resultados de incertidumbre original.

Magnitudes	% aporte a la incertidumbre	Incertidumbre combinada (kPa)
Densidad	0.087	1.20×10^{-3}
Gravedad	0.001	
Nivelación del patrón	3.876	
nivel vaso presión	52.907	
nivel vaso vacío	42.609	
longitud de la varilla	0.316	
separación inicial entre codos	0.182	

Como se puede observar en la tabla anterior, la incertidumbre obtenida es de orden 10^{-3} kPa, si se compara este resultado con el patrón nacional, se obtiene una diferencia de 10^{-2} kPa, esto evidencia la necesidad de mejoras viables en el patrón. Por otra parte, la medición de niveles presenta el mayor aporte a la incertidumbre con el patrón, teniendo en cuenta que la incertidumbre de los niveles depende de la resolución y dispersión de los datos experimentales con los micrómetros, se procede a hacer un análisis de presupuesto a estas fuentes de variabilidad respecto a la incertidumbre global del patrón, con el fin de descubrir el mayor aporte entre ellas, los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultado de aporte por micrómetro.

Fuentes de variabilidad en micrómetros	% aporte a la incertidumbre global
<i>Datos experimentales</i>	43.61
<i>Resolución</i>	2.20

En la tabla 3, se evidencia que la fuente de variabilidad más influyente en el patrón, es la proveniente de la dispersión en los datos experimentales del nivel de líquido; estos resultados se consideran consecuentes puesto que los micrómetros presentan una buena resolución en la medida, pero presentan dificultades ópticas cuando se quiere medir el nivel.

3.2 PROPUESTAS DE MODIFICACIÓN.

En base a los resultados anteriores se descubre la necesidad primordial de aumentar la precisión en las mediciones de nivel, por lo cual las propuestas se enfocan principalmente a esto.

Adicionalmente, para las propuestas 1 y 2 fue necesario hacer 3 diseños de experimentos con el objetivo de analizar las características físicas del patrón y dar credibilidad a las suposiciones hechas en el modelo matemático, se hacen mediciones a los diámetros de los vasos aleatoriamente y al diámetro de la punta del micrómetro a alturas determinadas, obteniéndose los datos tabulados en el Anexo E. En el análisis de varianza con dos factores (ANOVA 1), su primer factor asume igual el diámetro de ambos vasos; sin embargo, por sus resultados no fue posible aceptar la hipótesis contundentemente. Se decidió entonces hacer un diseño de experimentos (ANOVA 2) con un solo factor para esta hipótesis y se obtuvo de manera segura la diferencia de diámetros entre ambos vasos, por lo que se considerarán sus diámetros de forma independiente para los cálculos. Con el segundo factor del ANOVA 1, se encontró que el diámetro de los vasos no varía con la posición vertical ni angular de donde se mida, es decir, es posible asumir como constantes los diámetros en cada vaso. Por último, el análisis de varianza ANOVA 3, arrojó que el diámetro de la punta del micrómetro a usar, no varía con la altura en su zona cilíndrica, es decir, es posible asumir como constante el diámetro de la parte cilíndrica de la punta. Los resultados se encuentran en Tablas 4, 5 y 6

Tabla 4. ANOVA 1 para variabilidad en vasos y alturas.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Alturas	0.000659	2	0.000329	0.764854	5.143253
Vasos	0.001951	1	0.001951	4.530482	5.987378
Interacción	0.000854	2	0.000427	0.991678	5.143253
Dentro del grupo	0.002584	6	0.000431		
Total	0.006047	11			

Tabla 5. ANOVA 2 para variabilidad en vasos.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Vasos	0.049408	1	0.0494	92.208	4.96460
Dentro de los grupos	0.005358	10	0.0005		
Total	0.054767	11			

Tabla 6. ANOVA 3 para diámetro del micrómetro.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
altura	0.000033	2	0.0000	0.500	9.55209
Dentro de los grupos	0.000100	3	0.0000		
Total	0.000133	5			

Propuesta 1.

- Polarizar la parte frontal del vaso de vacío e incorporar una fuente lumínica en la parte trasera de este

Se disminuirán las fuentes de iluminación externas con un papel polarizado que restringe 50% el paso de la luz exterior, se ubica en la parte frontal, justo donde se realizan las mediciones. Por otra parte, se hace uso del fenómeno de reflexión de la luz sobre la superficie del agua, igualando el ángulo de visión del operador al ángulo de la fuente lumínica.

- Suprimir el micrómetro del vaso de presión.

Para llevarse a cabo, es necesario cambiar el sistema de medición, el cual está apoyado en los ANOVAS 1,2 y 3. Los cálculos de presión o vacío, se harán con volumen de agua transferido de un vaso a otro, teniendo en cuenta los diámetros de los vasos y el volumen ocupado por el micrómetro en el vaso de vacío. La deducción del sistema de medición completa se puede encontrar en el Anexo F y el resultado es el siguiente:

$$P = \rho g \left(L_v + H_v + \frac{1}{D_p^2} \left(\frac{D_v^2 H_v}{4} - \frac{d_p^2 H_v}{3 H_c^2} \right) - k \right) \text{ para } H_v \leq 10.494 \text{ mm} \quad (3)$$

$$P = \rho g \left(L_v + H_v + \frac{1}{D_p^2} \left(D_v^2 H_v - d_p^2 \left(\frac{H_c}{4} + H_v \right) \right) - k \right) \text{ para } H_v > 10.494 \text{ mm} \quad (4)$$

La estimación de incertidumbre se realiza por el método GUM descrito de manera general en el Anexo A. En el paso 7, la incertidumbre del vaso de presión $u(H_p)$ se reemplaza por sus variables de dependencia, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Incertidumbre en magnitudes de entrada para u (Hp).

Magnitud de entrada	Incertidumbre
<i>Diámetro de punta del micrómetro (d_p)</i>	$u(d_p) = \sqrt{u(d_p \text{ exp})^2 + u(d_p \text{ res})^2}$ (1)
<i>Altura del cono en la punta (H_c)</i>	$u(H_c) = \sqrt{u(H_c \text{ exp})^2 + u(H_c \text{ res})^2}$ (2)
<i>Diámetro vaso de presión (D_p)</i>	$u(D_p) = \sqrt{u(D_p \text{ exp})^2 + u(D_p \text{ res})^2}$ (3)
<i>Diámetro vaso vacío (D_v)</i>	$u(D_v) = \sqrt{u(D_v \text{ exp})^2 + u(D_v \text{ res})^2}$ (4)

Los coeficientes de sensibilidad del paso 8, se calcularon mediante aproximaciones por series de Taylor mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Coeficientes de sensibilidad propuesta 1.

Magnitud de entrada	Coefficiente de sensibilidad
<i>Densidad</i>	$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{P(\rho+u(\rho))-P(\rho-u(\rho))}{2 u(\rho)}$ (1)
<i>Gravedad</i>	$\frac{\partial P}{\partial g} = \frac{P(g+u(g))-P(g-u(g))}{2 u(g)}$ (2)
<i>Nivel vaso de vacío</i>	$\frac{\partial P}{\partial H_v} = \frac{P(H_v+u(H_v))-P(H_v-u(H_v))}{2 u(H_v)}$ (3)
<i>Longitud de varilla</i>	$\frac{\partial P}{\partial L_v} = \frac{P(L_v+u(L_v))-P(L_v-u(L_v))}{2 u(L_v)}$ (4)
<i>Separación inicial entre codos</i>	$\frac{\partial P}{\partial K} = \frac{P(K+u(K))-P(K-u(K))}{2 u(K)}$ (5)
<i>Diámetro punta del micrómetro</i>	$\frac{\partial P}{\partial d_p} = \frac{P(d_p+u(d_p))-P(d_p-u(d_p))}{2 u(d_p)}$ (6)
<i>Altura del cono en la punta</i>	$\frac{\partial P}{\partial H_c} = \frac{P(H_c+u(H_c))-P(H_c-u(H_c))}{2 u(H_c)}$ (7)
<i>Diámetro del vaso de vacío</i>	$\frac{\partial P}{\partial D_p} = \frac{P(D_p+u(D_p))-P(D_p-u(D_p))}{2 u(D_p)}$ (8)
<i>Diámetro del vaso de presión</i>	$\frac{\partial P}{\partial D_p} = \frac{P(D_p+u(D_p))-P(D_p-u(D_p))}{2 u(D_p)}$ (9)

Los resultados de incertidumbre y aportes, son los mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de incertidumbre propuesta 1.

Magnitudes	% aporte a la incertidumbre	Incertidumbre combinada (kPa)
Densidad	1.30	3.69×10^{-4}
Gravedad	0.02	
Nivelación del patrón	51.13	
nivel vaso presión	1.91	
nivel vaso vacío	32.97	
longitud de la varilla	2.60	
separación inicial entre codos	10.78	

Respecto a los aportes de incertidumbre en la determinación de niveles, se aprecia una disminución favorable por un aumento en la precisión debido a la mejora óptica hecha con el papel polarizado y la fuente lumínica; por otra parte, la diferencia de aporte entre el nivel medido (H_v) y el nivel calculado (H_p) es bastante grande, lo que indica un acierto en la disminución de incertidumbre.

Propuesta 2

- Reemplazar el micrómetro de vacío por un sensor de tipo magnetostrictivo.

Estos sensores resultan de los más apropiados respecto a los medidores de nivel encontrados en el mercado, esto debido a sus características técnicas. Este sensor toma lecturas de nivel con una alta exactitud y una resolución de 0.01 mm, además, ofrece una dispersión menor a la actual con una repetitividad de 0.05% F.S¹⁹.

- Suprimir la medición de nivel en el vaso de presión.

Para llevarse a cabo, es necesario cambiar el sistema de medición, por lo que, igualmente que en la propuesta anterior, los cálculos de presión o vacío se harán

¹⁹ GERMANJET. Magnetostrictive sensor 17 series. Hong Kong.: Germanjet Company Ltd, 2017. p.7-17.

con volumen de agua transferido de un vaso a otro, esta posibilidad se apoya con el ANOVA 1 y ANOVA 2. La deducción del sistema de medición completo se encuentra en el Anexo F y el resultado es el siguiente:

$$P = \rho g \left(L_v + H_v + \left(\frac{D_V^2 - d_v^2}{D_p^2} - \frac{4m}{\pi D_p^2} \right) - k \right) \quad (5)$$

El proceso de estimación de incertidumbre se realiza por el método GUM descrito de manera general en el Anexo A, en este caso con la particularidad que en el paso 7, la incertidumbre del vaso de presión $u(H_p)$ al igual que en la propuesta anterior se reemplaza por sus variables de dependencia, mostradas en la tabla 10.

Tabla 10. Incertidumbre de magnitudes de entrada para u (Hp).

Magnitud de entrada	Incertidumbre
<i>Diámetro de la varilla del sensor</i>	$u(d_v) = \sqrt{u(d_{v\text{ cert}})^2} \quad (1)$
<i>Masa del imán flotador</i>	$u(m) = \sqrt{u(m_{\text{ cert}})^2} \quad (2)$
<i>Diámetro vaso de presión</i>	$u(D_p) = \sqrt{u(D_{p\text{ exp}})^2 + u(D_{p\text{ res}})^2} \quad (3)$

Los coeficientes de sensibilidad para determinar la incertidumbre del paso 8, se calculan mediante aproximaciones por series de Taylor, descritos en la Tabla 11.

Tabla 11. Coeficientes de sensibilidad para propuesta 2.

Magnitud de entrada	Coefficiente de sensibilidad
Densidad	$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{P(\rho+u(\rho))-P(\rho-u(\rho))}{2 u(\rho)} \quad (1)$
Gravedad	$\frac{\partial P}{\partial g} = \frac{P(g+u(g))-P(g-u(g))}{2 u(g)} \quad (2)$
Nivel vaso de vacío	$\frac{\partial P}{\partial H_v} = \frac{P(H_v+u(H_v))-P(H_v-u(H_v))}{2 u(H_v)} \quad (3)$
Longitud de varilla	$\frac{\partial P}{\partial L_v} = \frac{P(L_v+u(L_v))-P(L_v-u(L_v))}{2 u(L_v)} \quad (4)$
Separación inicial entre codos	$\frac{\partial P}{\partial K} = \frac{P(K+u(K))-P(K-u(K))}{2 u(K)} \quad (5)$

Magnitud de entrada	Coefficiente de sensibilidad
Masa del imán	$\frac{\partial P}{\partial m} = \frac{P(m+u(m))-P(m-u(m))}{2 u(m)}$ (6)
Diámetro de la varilla del sensor	$\frac{\partial P}{\partial d_v} = \frac{P(d_v+u(d_v))-P(d_v-u(d_v))}{2 u(d_v)}$ (7)
Diámetro vaso de vacío	$\frac{\partial P}{\partial D_v} = \frac{P(D_v+u(D_v))-P(D_v-u(D_v))}{2 u(D_v)}$ (8)
Diámetro vaso de presión (D_p)	$\frac{\partial P}{\partial D_p} = \frac{P(D_p+u(D_p))-P(D_p-u(D_p))}{2 u(D_p)}$ (9)

Seguido a esto, se continúan los pasos para determinar incertidumbre global y presupuestos, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de incertidumbre propuesta 2.

Magnitudes	% aporte a la incertidumbre	Incertidumbre combinada (kPa)
Densidad	4.985	1.51×10^{-4}
Gravedad	0.074	
Nivelación del patrón	20.215	
nivel vaso presión	11.291	
nivel vaso vacío	11.379	
longitud de la varilla	15.374	
separación inicial entre codos	40.129	

Con los resultados en la tabla anterior se observa una disminución en el aporte de nivel del sensor (Hv), esto se debe a sus parámetros técnicos favorables, se encuentra también, un aporte de valor similar en ambos niveles, lo que indica un bajo aporte por parte del nivel calculado.

Propuesta 3.

- Sustitución de ambos micrómetros por un interferómetro láser.

Teniendo en cuenta que un interferómetro láser puede lograr exactitudes micrométricas en la medición del nivel de líquido, esta propuesta se vuelve relevante

en el aspecto técnico. Para hacer uso del interferómetro es necesario que a cierta altura de cada vaso se instale un retroreflector fijo en posición horizontal, se debe instalar además un retroreflector en cada vaso bajo la superficie del líquido y el interferómetro debe estar de frente a los retroreflectores instalados arriba de los vasos ver Anexo F; en base a la experimentación hecha por el CENAM se obtendrá una incertidumbre en la medición de alturas cercana a $1 \times 10^{-8} \text{ m}^{20}$. El modelo de medición es:

$$P = \rho g(Lv + \Delta H - K) \quad (6)$$

Donde: $[\Delta H]$ es la diferencia de nivel entre vasos [m].

El proceso de estimación de incertidumbre, se realiza por el método GUM descrito de manera general en el Anexo A. En el paso 7, se define diferencia de alturas con respecto a los resultados hallados en el CENAM, es decir $u(\Delta H) = 1 \times 10^{-8} \text{ m}$.

Los coeficientes de sensibilidad para determinar la incertidumbre global en el paso 8 son los mostrados en la Tabla 13.

²⁰ RODRÍGUEZ MENDOZA, Joaquín; TORRES GUZMÁN, Jorge y SANTANDER ROMERO, Luis. Op. Cit.

Tabla 13. Coeficientes de sensibilidad propuesta 3.

Magnitud de entrada	Coeficiente de sensibilidad
Densidad	$\frac{\partial P}{\partial \rho} = g(l_v + H_v + H_p - K)$ (1)
Gravedad	$\frac{\partial P}{\partial g} = \rho(l_v + H_v + H_p - K)$ (2)
Nivel vaso de presión	$\frac{\partial P}{\partial H_p} = \rho g$ (3)
Nivel vaso de vacío	$\frac{\partial P}{\partial H_v} = \rho g$ (4)
Longitud de varilla	$\frac{\partial P}{\partial L_v} = \rho g$ (5)
Separación inicial entre codos	$\frac{\partial P}{\partial K} = \rho g$ (6)

Los valores de incertidumbre obtenidos, se pueden observar en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados de incertidumbre propuesta 3.

Magnitudes	% aporte a la incertidumbre	Incertidumbre combinada (kPa)
Densidad	6.8	1.20×10^{-4}
Gravedad	0.1	
variación de nivel	6.63×10^{-5}	
Nivelación del patrón	44.2	
longitud de la varilla	23.8	
separación inicial entre codos	25.0	

En base a los resultados de la tabla anterior, se encuentra relevante que el aporte a la incertidumbre por parte de los niveles medidos con el interferómetro son insignificantes, esto debido a sus parámetros técnicos favorables, por lo que la medición de nivel pasó de ser la más influyente en la incertidumbre a aportar muy poco.

Propuesta 4.

- Polarizar la parte frontal e incorporar una fuente lumínica en la parte trasera de ambos vasos.

Se pasman las fuentes de iluminación externas con un papel polarizado de 50%, y se crea una visualización mucho más clara de la punta del micrómetro justo en el momento en que toque la superficie del agua con una fuente de iluminación.

- Rectificar el micrómetro de presión.

Debido a unas pruebas de rectitud hechas en el laboratorio, se encontró que la punta de este micrómetro tiene una ligera curvatura y se lleva a reparación. El proceso de estimación de incertidumbre para el patrón inicial se realiza por el método GUM descrito de manera general en el Anexo A, en este caso con la particularidad que en el paso 7 se determina la incertidumbre del vaso de presión de la siguiente manera:

$$u(H_p) = \sqrt{u(H_{p \text{ exp}})^2 + u(H_{p \text{ res}})^2} \quad (6)$$

Y los coeficientes de sensibilidad para determinar la incertidumbre global en el paso 8 se encuentran en la Tabla 15.

Tabla 15. Coeficientes de sensibilidad propuesta 4.

Magnitud de entrada	Coefficiente de sensibilidad
Densidad	$\frac{\partial P}{\partial \rho} = g(l_v + H_v + H_p - K) \quad (1)$
Gravedad	$\frac{\partial P}{\partial g} = \rho(l_v + H_v + H_p - K) \quad (2)$
Nivel vaso de presión	$\frac{\partial P}{\partial H_p} = \rho g \quad (3)$
Nivel vaso de vacío	$\frac{\partial P}{\partial H_v} = \rho g \quad (4)$

Magnitud de entrada	Coefficiente de sensibilidad
Longitud de varilla	$\frac{\partial P}{\partial L_v} = \rho g$ (5)
Separación inicial entre codos	$\frac{\partial P}{\partial K} = \rho g$ (6)

Seguido a esto, se continúan los pasos para determinar incertidumbre global y presupuestos; los resultados están descritos en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados de incertidumbre propuesta 4

Magnitudes	% aporte a la incertidumbre	Incertidumbre combinada (kPa)
Densidad	0.57	9.80 × 10 ⁻⁴
Gravedad	2.027	
Nivelación del patrón	12.823	
nivel vaso presión	60.902	
nivel vaso vacío	22.924	
longitud de la varilla	0.734	
separación inicial entre codos	0.02	

La tabla anterior evidencia un mayor aporte por parte del nivel de presión (Hp) respecto al nivel de vacío (Hv), esto se posiblemente a debe a que la falla del micrómetro de presión fue solucionada parcialmente.

3.3 COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE MODIFICACIÓN.

Según el criterio de factibilidad técnica la incertidumbre obtenida según experimentación o estimación del patrón y el criterio de factibilidad económica el costo total de cada modificación, se obtienen los resultados de la tabla 17.

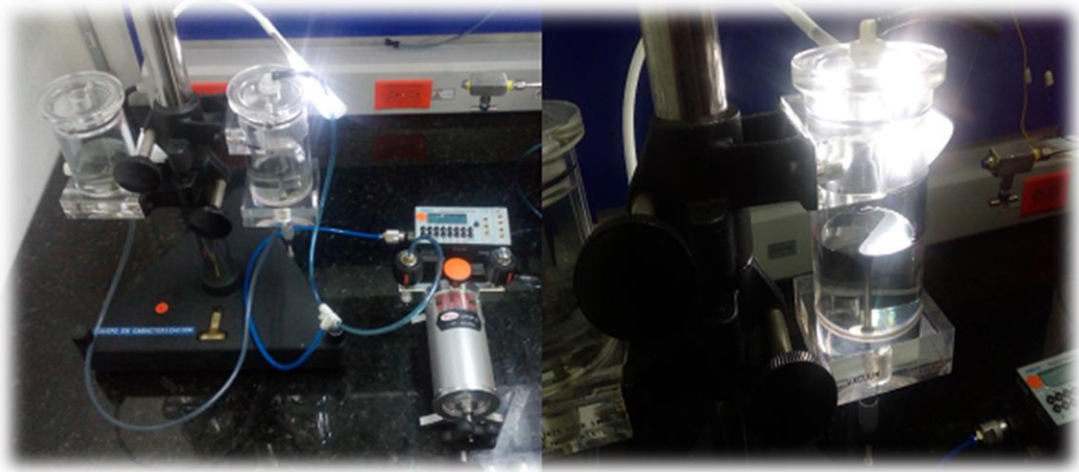
Tabla 17. Comparación técnica y económica de las propuestas.

Criterios de factibilidad		<i>Inicial</i>	<i>Propuesta 1</i>	<i>Propuesta 2</i>	<i>Propuesta 3</i>	<i>Propuesta 4</i>
Técnica	Incertidumbre promedio (kPa)	0.0012	3.7.E-04	1.5.E-04	1.2.E-04	9.8.E-04
Económica	Costo equipo	-	80 000	1 800 000	120 000 000	80 000
	Costo de instalación y accesorios	-	-	1 080 000	-	-
	costo de transporte	-	-	1 380 000	60 000 000	-
	Costo total (COP)	-	80 000	4 260 000	180 000 000	80 000

De la tabla anterior se puede observar que todas las propuestas presentan una disminución considerable en la incertidumbre, a excepción de la propuesta 4, donde el valor de incertidumbre es cercano al valor inicial, por tal motivo a pesar de su bajo costo esta propuesta es descartada. En la propuesta 2 y 3 se cumple el requerimiento de incertidumbre solicitado por el CDT de Gas pero se encuentra una relación costo-beneficio desfavorable, por lo tanto estas propuestas se descartan. Por último, la propuesta 1 resultó más favorable respecto a las otras, puesto que además de tener un bajo costo, la incertidumbre del patrón disminuye considerablemente.

3.3 IMPLEMENTACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA MODIFICACIÓN SELECCIONADA.

Figura 2. Patrón modificado.



A continuación se presentan los datos experimentales del patrón modificado, generando presión, se toman cuatro réplicas de nivel por varilla.

Tabla 18. Datos experimentales de nivel y temperatura generando presión.

varilla (mm)	Replica1 (m)	Replica2 (m)	Replica3 (m)	Replica4 (m)
25	0.01197	0.01193	0.01186	0.01192
75	0.01158	0.01156	0.0115	0.01155
125	0.01126	0.01121	0.01113	0.0112
175	0.01088	0.01086	0.01078	0.01084
225	0.01053	0.0105	0.01041	0.01048
275	0.01022	0.01017	0.00999	0.01013
325	0.00987	0.00984	0.00973	0.00978
375	0.00961	0.00967	0.00978	0.00969
425	0.00925	0.00935	0.00942	0.00941
475	0.00886	0.00891	0.00905	0.00902
525	0.00868	0.00866	0.00867	0.00867
575	0.00832	0.00831	0.00833	0.00835
Temperatura (°C)	20.5	20.2	19.4	19.9

Seguido a esto, se hace un análisis comparativo de incertidumbres inicial, final y requerida descritas en la tabla 19.

Tabla 19. Comparación de incertidumbres original, modificada y requerida.

<i>alcance presión manométrica en presión y vacío</i>	<i>u original (kPa)</i>	<i>u modificada (kPa)</i>	<i>u requerida (kPa)</i>
0 a 1.2 kPa	1.3×10^{-3}	3.8×10^{-4}	1.0×10^{-4}
1.2 kPa a 2.5 kPa	1.1×10^{-3}	4.1×10^{-4}	2.0×10^{-4}
2.5 kPa a 5.2 kPa	1.2×10^{-3}	3.5×10^{-4}	6.0×10^{-4}

De acuerdo con los datos obtenidos la propuesta seleccionada presenta una radical disminución de incertidumbre comparada con la obtenida inicialmente en los rangos descritos; en cuanto a la incertidumbre requerida por el CDT de gas, la propuesta seleccionada cumple con los requerimientos en el rango de 2.5 kPa a 5.2 kPa.

4. CONCLUSIONES

- Se llevó a cabo la comparación y selección de los posibles cambios en el patrón, en base a criterios técnicos y económicos. Se obtuvo que el patrón modificado está habilitado, con base a los requerimientos del CDT de Gas, en un rango manométrico en presión y vacío de 2.5 kPa a 5.2 kPa para llevar a cabo calibraciones, disminuyendo así la demanda insatisfecha nacional.
- Las modificaciones implementadas en el patrón conllevaron a una disminución considerable en la incertidumbre de las mediciones con este, por lo que ahora el orden de esta incertidumbre en todo el rango del equipo, concuerda con el orden de incertidumbre brindado por los laboratorios secundarios acreditados por la ONAC del país; adicionalmente, tales modificaciones posibilitan la ampliación del rango de medición del patrón, posiblemente de -6.89 kPa a 6.89 kPa.
- La disminución en la cantidad de mediciones necesarias para la calibración con el patrón, acarrea mayores cálculos y análisis, sin embargo, teniendo en cuenta las pocas imperfecciones geométricas del patrón, fue posible obtener resultados satisfactorios en la disminución de incertidumbre buscada.

5. RECOMENDACIONES

- En caso de ser necesario, el rango del patrón podrá ser de -6.89 kPa a 6.89 kPa si se fabrican dos varillas de 625 mm y 675 mm.
- Si se desea disminuir la incertidumbre del patrón en estudios posteriores, un enfoque primordial deberá ser la mejora en el sistema de nivelación y estabilidad del patrón.

BIBLIOGRAFÍA

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. Key and supplementary comparisons. [En línea]. KCDB. Saint-Cloud: BIPM. 2017. (citado en 4 Enero 2018) Disponible en <https://goo.gl/ojsxui>

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA. Calibración de manómetros con balanza de presión de alta exactitud. [En línea]. Catálogo de servicios. Querétaro: CENAM. 2017. (citado en 5 de Enero 2018.) Disponible en <http://www.cenam.mx/calibracion/Servicios.aspx?division=720>

DE LUCA, Roberto y FAELLA, Orazio. Communicating vessels: a non-linear dynamical system. En: Revista Brasileira de Ensino de Física. Febrero-Marzo, 2017, vol.39 no.3., p.1-2.

DIGITRON. Pressure instruments 2000 series. [En línea]. Catálogo. Valencia: Femto instruments. 2017. (citado en 3 de Enero 2018) Disponible en <https://goo.gl/ikHp4H>

DISAI AUTOMATIC SYSTEMS. Balanza de presión neumática Modelo CPB5000. [En línea]. Catálogo. Barcelona: WIKA. 2013. (citado en 2 de Enero 2018.) Disponible en http://www.disai.net/wp-content/uploads/catalogos_pdf/BALANZA.pdf

DISAI AUTOMATIC SYSTEMS. Transductor magnético MTS 100. [En línea]. Catálogo. Barcelona: HONNER. 2013. (citado en 2 de Enero 2018.) Disponible en [http://www.disai.net/wpcontent/uploads/catalogos_pdf/MTS%20100\(500\)\(1K\)%20Rev%201.pdf](http://www.disai.net/wpcontent/uploads/catalogos_pdf/MTS%20100(500)(1K)%20Rev%201.pdf)

GALLEGO, Juan Miguel y GUTIÉRREZ, Luis. Un análisis cualitativo del desarrollo del sistema. Bogotá D.C.: SNC, 2016.p.7

GARCÍA SÁNCHEZ, Luis. Estimación de incertidumbre usando el método GUM. Bucaramanga: CDT de Gas, 2008.p.5

GERMANJET. Magnetostrictive sensor 17 series. Hong Kong.: Germanjet Company Ltd, 2017. p.7-17.

HERRANZ FERNÁNDEZ, David. Realización de un sistema de expansión estática como patrón nacional de presión absoluta en la región de vacío en el rango de 10^{-4} Pa a 1000 Pa. [En línea]. Jornada de difusión de resultados de proyectos CEM. Madrid: Centro Español de Metrología. 2016. (citado en 3 de Enero de 2018.) Disponible en http://www.cem.es/sites/default/files/proyecto_n3_see.pdf

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGÍA DE COLOMBIA. Calibración de equipos e instrumentos de medición. [En línea]. Metrología publicaciones. Bogotá D.C.: INM. 2017. (citado en 2 Enero 2018.) Disponible en <http://inm.gov.co/index.php/servicios-inm/calibración>

MENDOZA, Jairo. Aspectos de la norma NTC 17025 concernientes al diseño de software para calibración en un laboratorio de metrología. En: Scientia et Technica Año XI. Noviembre-Diciembre, 2005, vol.1 no.29., p.1-2

METROINDUSTRIAL. Equipo Patrón de presión diferencial. [En línea]. Productos fabricados por Metroindustrial. Cali: Metroindustrial S.A.S. 2016. (citado en 20 Diciembre 2017) Disponible en <http://www.metroindustrial.com.co/metroindustrial>

ORGANISMO NACIONAL DE ACREDITACIÓN DE COLOMBIA. Listado de laboratorios de calibración Acreditados presión. [En línea]. Servicio de acreditación.

Bogotá D.C.: ONAC. 2018. (citado en 3 Enero 2018.) Disponible en <https://goo.gl/KCoLiQ>

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE METROLOGÍA LEGAL. Vocabulario internacional de términos en metrología legal, París: OIML, 2013. p.9

RODRÍGUEZ MENDOZA, Joaquín; TORRES GUZMÁN, Jorge y SANTANDER ROMERO, Luis. Conceptualización y diseño de micromanómetros de columna de líquido como patrones nacionales de presión en los alcances de 1 kPa y 5 kPa. Querétaro: CENAM, 2006. p.5.

VILIESID ALONSO, Miguel, et al. Guía técnica sobre trazabilidad e incertidumbre en metrología dimensional. Querétaro: CENAM, 2008. p.20

ANEXOS

Anexo A. Proceso de estimación de incertidumbre por el método GUM para el patrón vasos comunicantes.

1. Definición del mensurando.

Presión manométrica generada por el patrón vasos comunicantes a cierta diferencia de altura entre los niveles de agua de los vasos y a la temperatura ambiental del laboratorio CDT de Gas.

2. Determinación de las magnitudes de entrada y fuentes de variabilidad.

Tabla A.1). Magnitudes de entrada y fuentes de variabilidad.

magnitud de entrada	fuentes de variabilidad
densidad (ρ)	<i>Dilatación térmica y tipo de líquido</i>
gravedad (g)	<i>ubicación geográfica</i>
nivel vaso presión (Hp)	<i>lectura directa o indirecta del nivel, resolución de la lectura y nivelación del patrón</i>
nivel vaso vacío (Hv)	<i>lectura directa del nivel, resolución de la lectura y nivelación del patrón</i>
longitud de la varilla (Lv)	<i>Dilatación térmica, longitud real y ángulo de desviación respecto al eje vertical</i>
separación inicial entre codos (K)	<i>Dilatación térmica, longitud real y ángulo de desviación respecto al eje vertical</i>

3. Creación del modelo matemático

Se acude al principio básico de funcionamiento del patrón tipo vasos comunicantes, regido por el principio de presión hidrostática, allí se encontrará la relación entre el mensurando y las magnitudes de entrada:

$$P = \rho g(L_v + H_v + H_p - K)$$

4. Medición.

Se toman 4 réplicas en la medición de nivel ya sea en forma directa con ambos micrómetros o indirecta usando únicamente el micrómetro de vacío, esto a una altura específica entre codos.

5. Cuantificación de las fuentes de variabilidad.

Para cuantificar las fuentes de variabilidad el método GUM plantea dos tipos; *tipo A* se cuantifican a partir de experimentación, y *tipo B* son fuentes de variabilidad que no se hallan a partir de datos experimentales, es decir, se obtienen a partir de información proveniente de otros entes. La forma de cuantificar cada fuente de variabilidad en el patrón es la siguiente:

Densidad (ρ):

Dilatación térmica $u(T)$:

Tomando 4 réplicas de temperatura, se halla su incertidumbre experimental.

$$u(T_{exp}) = \frac{S_{tem}}{\sqrt{n}}$$

Donde: $[S_{tem}]$ es la desviación estándar de temperatura y $[n]$ es el número de réplicas.

Luego de tener $u(T_{exp})$, se toma el modelo de medición para la densidad tomado de una investigación [17]:

$$\rho = a_5 * \left(1 - \frac{(t + a_1)^2(t + a_2)}{a_3 * (t + a_4)}\right)$$

Donde: $[a_1] = -3.983035$, $[a_2] = 301.797$, $[a_3] = 522528.9$, $[a_4] = 69.34881$, $[a_5] = 999.97495$

Posteriormente, se halla el coeficiente de sensibilidad correspondiente a la temperatura, mediante una aproximación por series de Taylor.

$$c.T = \frac{\rho(T + U_T) - \rho(T - U_T)}{2 * U_T}$$

Donde: $[c.T]$ es el coeficiente de sensibilidad.

Para finalizar se calcula su incertidumbre:

$$u(\rho_{tem})^2 = c.T^2 * u(T_{exp})^2$$

Tipo de líquido:

Su incertidumbre es tipo B, y la ecuación es tomada del mismo artículo [17]:

$$\rho_L = (0.8394 - (1.28 * 10^{-3}) * T + (1.10 * 10^{-4}) * T^2 - (6.09 * 10^{-6}) * T^3 - (1.16 * 10^{-7}) * T^4) * 10^{-3}$$

Gravedad (g):

La variabilidad de la gravedad se ve afectada por la ubicación geográfica. El dato es obtenido a partir de una fuente tipo B, obtenida del Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania, por lo cual $u(g) = 0.000012 \text{ m/s}^2$.

Nivel vaso presión (Hp):

Lectura directa o indirecta del nivel:

El cálculo de $U(H_p)$ varía con cada propuesta o sistema de medición, por esto se encuentra especificado en cada una de ellas.

Nivel vaso vacío (Hv):

Lectura directa del nivel:

$$u(H_{v \text{ exp}}) = \frac{S_{HV}}{\sqrt{n}}$$

Donde: $[S_{HV}]$ es la desviación estándar, $[n]$ es el número de réplicas.

Resolución de la lectura:

$$u(H_{v \text{ res}}) = \frac{+a + (-a)}{\sqrt{12}}$$

Donde: $[-a]$ es el menor valor del rango posible y $[+a]$ es el mayor valor del rango posible.

Nivelación del patrón (N):

Se basa en la máxima desviación que pueden tener las lecturas de nivel en los vasos por un desnivel en el patrón.

$$u(N_{exp}) = \frac{S_N}{\sqrt{n}}$$

Donde: $[S_N]$ es la desviación estándar y $[n]$ es el número de réplicas.

Luego se tiene en cuenta la resolución del dispositivo para medir el nivel.

$$u(N_{res}) = \frac{+a + (-a)}{\sqrt{12}}$$

Donde: $[-a]$ es el menor valor del rango posible y $[+a]$ es el mayor valor del rango posible.

Posteriormente se halla la incertidumbre total atribuida a la nivelación del patrón.

$$u(N) = \sqrt{u(N_{exp})^2 + u(N_{res})^2}$$

Donde: $[u(N)]$ Incertidumbre debida al nivel.

Longitud de la varilla (Lv):

Dilatación térmica:

Se tiene en cuenta para cambios de temperatura en el sitio de medición, tomando n réplicas se halla la incertidumbre experimental.

$$u(T_{exp}) = \frac{S_{tem}}{\sqrt{n}}$$

Donde: $[S_{tem}]$ es la desviación estándar temperatura y $[n]$ es el número de réplicas.

Luego de haber definido $u(T_{exp})$ se halla el coeficiente partiendo del modelo de expansión térmica:

$$\Delta L = \alpha * l_v * \Delta T$$

$$\frac{\Delta L}{\Delta T} = c. \text{expansion} = \alpha * l_v$$

Donde: $[\Delta T]$ es la variación de la temperatura, $[\Delta L]$ es la dilatación térmica, $[c. \text{expansion}]$ es el coeficiente sensibilidad de expansión térmica, $[l_v]$ es la longitud real de la varilla, $[\alpha]$ es el coeficiente de expansión para el acero.

Luego se halla la incertidumbre debida a la expansión térmica.

$$u(L_{v \text{ temp}})^2 = c. \text{expansion}^2 * u(T_{exp})^2$$

Longitud real:

Se cuantifica como tipo B y varía para cada varilla.

$$u(L_{v \text{ cert}})$$

Donde: $[u(L_{v\ cert})]$ es la incertidumbre de certificado

Ángulo de desviación respecto al eje vertical:

Se toman cuatro datos de la mayor desviación posible, partiendo de estos datos y teniendo la longitud real de las varillas se halla el valor real en el eje vertical aplicando teorema de Pitágoras.

$$h^2 = a^2 + b^2$$

Donde: $[a^2]$ es la desviación horizontal, $[b^2]$ es la longitud real de la varilla,
 $[h^2]$ es el valor real eje vertical.

Luego se hallan La diferencia entre h y b , lo que cuantifica la posible falla en la medición.

$$u(L_{v\ exp}) = \frac{S_{h-b}}{\sqrt{n}}$$

Donde: $[S_{h-b}]$ es la desviación estándar de diferencia entre h y b , $[n]$ es la Número de réplicas.

También se tiene en cuenta la resolución:

$$uL(res) = \frac{+a + (-a)}{\sqrt{12}}$$

Donde: $[-a]$ es el menor valor del rango posible y $[+a]$ es el mayor valor del rango posible.

Para finalizar se calcula su incertidumbre, esta incertidumbre varía con cada varilla.

$$u(L_{v\ vert}) = \sqrt{uL(res)^2 + u(L_{v\ exp})^2}$$

Separación inicial entre codos:

Su cálculo de incertidumbre se realiza de la misma manera que la longitud de la varilla L_v hallado anteriormente, pero únicamente para la varilla de 25 mm de longitud.

6. Cálculos de resultado de medición

Se reemplazan los valores promedio o medias muestrales de las magnitudes de entrada en el modelo matemático:

$$P = \bar{\rho} \bar{g} (\bar{L}_v + \bar{H}_v + \bar{H}_p - \bar{K})$$

7. Incertidumbre de las magnitudes de entrada.

Para la incertidumbre de cada magnitud de entrada, la forma en que se combinan sus fuentes de variabilidad es la siguiente:

Tabla A.2). Incertidumbre en magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	cuantificación de su incertidumbre
Densidad	$u(\rho) = \sqrt{u(\rho_{tem})^2 + u(\rho_l)^2}$
Gravedad	$u(g) = 0.000012$
Nivelación del patrón	$u(N) = \sqrt{u(N_{exp})^2 + u(N_{res})^2}$

Magnitud de entrada	cuantificación de su incertidumbre
Nivel vaso de presión	$u(H_p) = \sqrt{u(H_p)^2}$
Nivel vaso de vacío	$u(H_v) = \sqrt{u(H_{v \text{ exp}})^2 + u(H_{v \text{ res}})^2}$
Longitud de varilla	$u(L_v) = \sqrt{u(L_{v \text{ cert}})^2 + u(L_{v \text{ temp}})^2 + u(L_{v \text{ vert}})^2}$
Separación entre codos	$u(K) = \sqrt{u(L_{v \text{ cert}})^2 + u(L_{v \text{ temp}})^2 + u(L_{v \text{ vert}})^2}$

8. Estimación de la incertidumbre combinada.

Para el cálculo de la incertidumbre global, es necesario determinar primero los coeficientes de sensibilidad aplicando la primera derivada ya sea numérica o analítica al modelo de medición respecto a cada magnitud de entrada. El valor de estos coeficientes dependerá del sistema de medición.

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = c_1, \quad \frac{\partial P}{\partial g} = c_2, \quad \frac{\partial P}{\partial L_v} = c_3, \quad \frac{\partial P}{\partial H_p} = c_4, \quad \frac{\partial P}{\partial H_v} = c_5, \quad \frac{\partial P}{\partial K} = c_6$$

Finalmente, se halla la incertidumbre global:

$$u(P) = \sqrt{\sum_1^6 \left(\frac{\partial P}{\partial c_i}\right)^2 * u^2(c_i)}$$

Donde: $[u(P)]$ es la Incertidumbre combinada, $\left[\frac{\partial P}{\partial c_i}\right]$ es el Coeficiente de sensibilidad, $[u^2(c_i)]$ es la Incertidumbre para la magnitud de entrada i

9. Presupuesto de incertidumbre.

El presupuesto de incertidumbre es un indicador de la influencia que tiene cada magnitud de entrada en las mediciones, se halla de la siguiente manera:

$$\%aporte(x_i) = \frac{u^2(x_i) \left(\frac{\partial P}{\partial c_i}\right)^2}{u^2(P)} \quad (100)$$

Donde: $[\%aporte(x_i)]$ es el aporte a la incertidumbre por parte de la magnitud de entrada x_i ,

$\left[\frac{\partial P}{\partial c_i}\right]$ es el Coeficiente de sensibilidad,

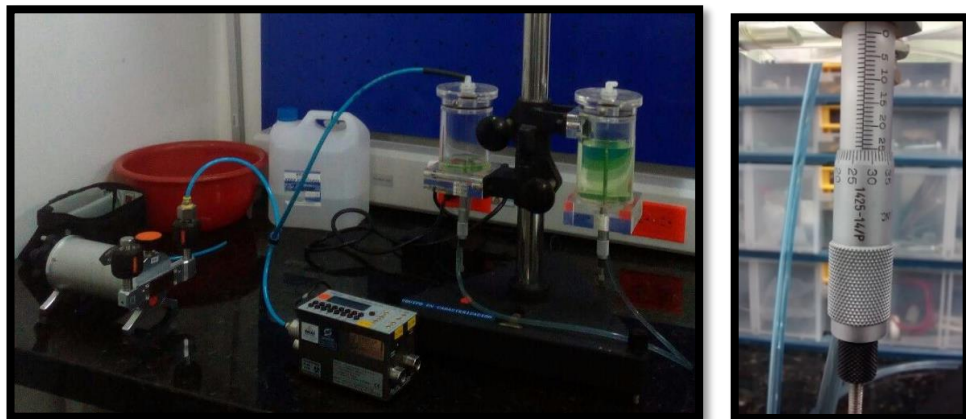
$[u^2(P)]$ es la Incertidumbre combinada.

Anexo B. Método y procedimiento de medición

Montaje

Se utiliza como elemento generador de presión una bomba pistón que será conectada al vaso de presión o vacío del patrón vasos comunicantes (Dwyer 14-25), se conecta de tal manera que el sistema quede hermético, adicionalmente, la bomba se conecta también a un sensor de presión que mantiene al operador al tanto de la presión en el sistema y por tanto de la seguridad del proceso.

Figura A.1). Montaje experimental.



Procedimiento de medición

Este procedimiento se basa en las instrucciones de operación encontradas en el manual del patrón [19].

1. Revisión de condiciones físicas del montaje (fisuras en las mangueras y hermeticidad del sistema).
2. Llenar los vasos comunicantes hasta el nivel de referencia y con la varilla de 25 mm de separación entre codos.

3. Ubicar los micrómetros en cero y al nivel del líquido en los vasos.
4. Generar presión con la bomba pistón.
5. Ubicar la varilla adecuada según la presión generada.
6. Esperar un tiempo prudente para que el agua desplace lo que sea necesario.
7. Tomar 4 réplicas en cada punto de medición.

Anexo C. Datos experimentales y cálculos del análisis preliminar.

Tabla C.1). Datos experimentales de nivel en el patrón original Hv y Hp para presión generados.

Datos experimentales					
varilla (mm)	Vaso	Replica 1 (m)	Replica 2 (m)	Replica 3 (m)	Replica 4 (m)
25	Hp	0.00067	0.00055	0.00041	0.00028
	HV	0.0005	0.00017	0.00022	0.00003
75	Hp	0.00129	0.00107	0.00115	0.00099
	HV	0.00107	0.00084	0.0009	0.00071
125	Hp	0.002	0.0018	0.00177	0.00154
	HV	0.00171	0.00154	0.00153	0.00139
175	Hp	0.00256	0.00242	0.00251	0.00243
	HV	0.00236	0.00218	0.00216	0.00202
225	Hp	0.00329	0.00297	0.00324	0.00297
	HV	0.00247	0.00286	0.00278	0.00261
275	Hp	0.00397	0.00376	0.00361	0.00351
	HV	0.00344	0.0034	0.00342	0.00331
325	Hp	0.00454	0.0042	0.00439	0.00407
	HV	0.00399	0.00408	0.00408	0.0039
375	Hp	0.00522	0.0049	0.00484	0.00482
	HV	0.00475	0.00454	0.00467	0.0045
425	Hp	0.0058	0.00557	0.00549	0.00532
	HV	0.0053	0.0053	0.00528	0.00515
475	Hp	0.00637	0.00549	0.00605	0.00604
	HV	0.00597	0.00528	0.00574	0.00571
525	Hp	0.0069	0.00685	0.00671	0.00674
	HV	0.00651	0.00647	0.0064	0.00631

Tabla C.2). Datos experimentales de nivel en el patrón original Hv y Hp para vacío generados.

Datos experimentales					
varilla (mm)	<i>vaso</i>	<i>Replica1 (m)</i>	<i>Replica2 (m)</i>	<i>Replica3 (m)</i>	<i>Replica4 (m)</i>
25	Hp	0.00016	0.00029	0.0003	0.00057
	HV	0.00015	0.00032	0.00034	0.00056
75	Hp	0.00065	0.00092	0.00109	0.00125
	HV	0.00058	0.00089	0.00097	0.00114
125	Hp	0.002	0.0018	0.00177	0.00154
	HV	0.00171	0.00154	0.00153	0.00139
175	Hp	0.00196	0.00212	0.00221	0.00246
	HV	0.00194	0.00204	0.00218	0.00229
225	Hp	0.00255	0.00259	0.00274	0.00279
	HV	0.00251	0.00248	0.00285	0.00282
275	Hp	0.00314	0.00317	0.00345	0.0034
	HV	0.0032	0.00318	0.0033	0.00348
325	Hp	0.00371	0.00382	0.00399	0.00403
	HV	0.00381	0.00382	0.00406	0.00403
375	Hp	0.00441	0.00442	0.00466	0.00461
	HV	0.00448	0.00447	0.00473	0.00476
425	Hp	0.0051	0.00505	0.00525	0.00532
	HV	0.00505	0.00501	0.00532	0.00532
475	Hp	0.00565	0.00568	0.00604	0.00593
	HV	0.00567	0.00566	0.00602	0.00599
525	Hp	0.0063	0.00631	0.00664	0.00663
	HV	0.00646	0.00634	0.00675	0.0067

Tabla C.3). Incertidumbre presión y vacío.

Longitud varilla (mm)	Incertidumbre combinada presión manométrica (Pa)	Incertidumbre combinada vacío (Pa)
25	1.273	1.177
75	1.013	1.731
125	1.167	1.174
175	0.822	1.314
225	1.237	1.167
275	1.068	1.079
325	1.140	1.036
375	1.118	1.047
425	1.084	1.083
475	2.293	1.382
525	0.692	1.376
PROMEDIO (Pa)	1.173	1.233
PROMEDIO GLOBAL(Pa)	1.203	

Anexo D. Datos experimentales y cálculos para propuestas.

Tabla D.1). Datos experimentales propuesta 1 para presión generada.

Datos experimentales				
varilla (mm)	Replica1	Replica2	Replica3	Replica4
25	0.01197	0.01193	0.01186	0.01192
75	0.01158	0.01156	0.0115	0.01155
125	0.01126	0.01121	0.01113	0.0112
175	0.01088	0.01086	0.01078	0.01084
225	0.01053	0.0105	0.01041	0.01048
275	0.01022	0.01017	0.00999	0.01013
325	0.00987	0.00984	0.00973	0.00978
375	0.00961	0.00967	0.00978	0.00969
425	0.00925	0.00935	0.00942	0.00941
475	0.00886	0.00891	0.00905	0.00902
525	0.00868	0.00866	0.00867	0.00867
575	0.00832	0.00831	0.00833	0.00835

Tabla D.2). Datos experimentales propuesta 1 para vacío generado.

Datos experimentales				
varilla (mm)	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4
25	0.01346	0.01351	0.01352	0.01353
75	0.01314	0.01312	0.01313	0.01313
125	0.01274	0.01275	0.01274	0.01275
175	0.01237	0.01238	0.01245	0.01254
225	0.012	0.012	0.01215	0.01214
275	0.01164	0.0117	0.01178	0.01176
325	0.01131	0.01132	0.01136	0.01137
375	0.01095	0.01101	0.01097	0.01098
425	0.01058	0.01059	0.0106	0.01064
475	0.01029	0.01034	0.01038	0.01045
525	0.0099	0.00991	0.00997	0.01005

Datos experimentales				
varilla (mm)	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4
575	0.00954	0.00957	0.00964	0.00953

Tabla D.3). Resultado de incertidumbre presión y vacío para propuesta 1.

Longitud por varilla (mm)	Incertidumbre combinada presión anométrica (Pa)	Incertidumbre combinada vacío (Pa)
25	0.493	0.373
75	0.386	0.216
125	0.562	0.219
175	0.467	0.792
225	0.284	0.107
275	0.506	0.346
325	0.332	0.314
375	0.371	0.321
425	0.404	0.3606
475	0.459	0.364
525	0.147	0.280
PROMEDIO (Pa)	0.401	0.336
PROMEDIO GLOBAL	0.368788273	

Tabla D.4). Resultado de estimación de la incertidumbre propuesta 2.

Longitud por varilla (mm)	Incertidumbre combinada presión manométrica
25	0.125
75	0.156
125	0.165
175	0.156
225	0.149
275	0.164
325	0.145
375	0.152

Longitud por varilla (mm)	Incertidumbre combinada presión manométrica
425	0.149
475	0.158
525	0.145
575	0.154
Promedio	0.151
Promedio global (kPa)	1.51.E-04

Tabla D.5). Resultado de estimación de la incertidumbre propuesta 3.

Varilla (mm)	incertidumbre presión
25	0.0926
75	0.1204
125	0.1395
175	0.1283
225	0.1196
275	0.1381
325	0.1143
375	0.1222
425	0.1174
475	0.1279
525	0.1204
575	0.1214
promedio	0.1218
promedio (kPa)	1.22E-04

Tabla D.6). Resultado de estimación de la incertidumbre propuesta 4.

Longitud por varilla (mm)	Incertidumbre combinada presión manométrica (Pa)	Incertidumbre combinada vacío (Pa)
25	0.825	0.548
75	0.628	0.308
125	0.902	0.448
175	1.204	0.479
225	1.491	0.594
275	1.484	0.627
325	1.646	1.174
375	1.361	0.679
425	1.370	0.669
475	2.576	0.558
525	1.497	0.494
promedio	1.362	0.598
promedio global (Pa)	0.980	

Anexo E. Análisis de varianza.

Tabla E.1). Datos experimentales diámetro de vasos.

Alturas	Diámetro vasos	
	Dp (presión)	Dv (vacío)
Altura 1	63.300	63.310
	63.287	63.290
Altura 2	63.287	63.282
	63.290	63.340
Altura 3	63.290	63.320
	63.290	63.355
Promedio	63.291	63.317

Tabla E.2). Datos experimentales diámetro de vasos alturas aleatorias.

Diámetro vasos	
Dp (presión)	Dv (vacío)
63.205	63.33
63.21	63.37
63.24	63.31
63.235	63.365
63.205	63.37
63.25	63.37

Tabla E.3). Datos experimentales del micrómetro.

Diámetro cilindro (dp)	Altura cono (Hc)
3.86	10.46
3.86	10.46
3.87	10.5
3.87	10.6
3.865	10.494
3.86	10.45

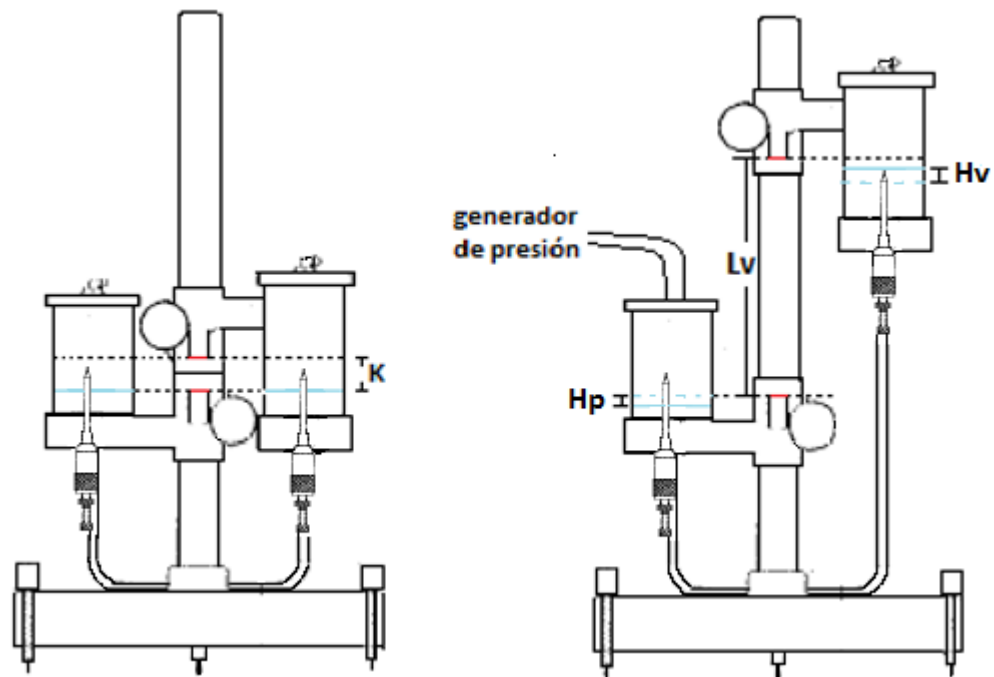
Anexo F. Deducción de los sistemas de medición y esquemas.

➤ Patrón original

Se hacía uso de dos micrómetros de profundidad para cuantificar los cambios de nivel (H_p y H_v), un juego de 12 varillas para medir la distancia entre los codos y agua desionizada como fluido. El sistema de medición es el siguiente:

$$P = \rho g(L_v + H_p + H_v - K)$$

Figura F.1.) . Esquema del patrón inicial.



➤ **Propuesta 1**

En primer lugar se determina la corrección debida al volumen ocupado por la punta del micrómetro, esta corrección depende del nivel de agua H_v y se basa en la geometría cónica y cilíndrica de esta punta.

$$V_{pun} = \frac{\pi d_p^2 H_v^3}{3H_c^2} \quad \text{para } H_v < 10.494 \text{ mm}$$

$$V_{pun} = \pi d_p^2 \left(\frac{H_c}{12} + \frac{H_v}{4} \right) \quad \text{para } H_v \geq 10.494 \text{ mm}$$

Seguido a ello se halla el volumen de agua que es transportado del vaso de vacío al de presión.

$$V = \frac{\pi D_v^2 H_v}{4} - V_{pun}$$

Posteriormente se determina la altura del vaso de presión teniendo en cuenta la estructura cilíndrica del mismo.

$$H_p = \frac{4V}{\pi D_p^3} \quad (1)$$

Finalmente se halla la presión o el vacío generados ya con las alturas determinadas.

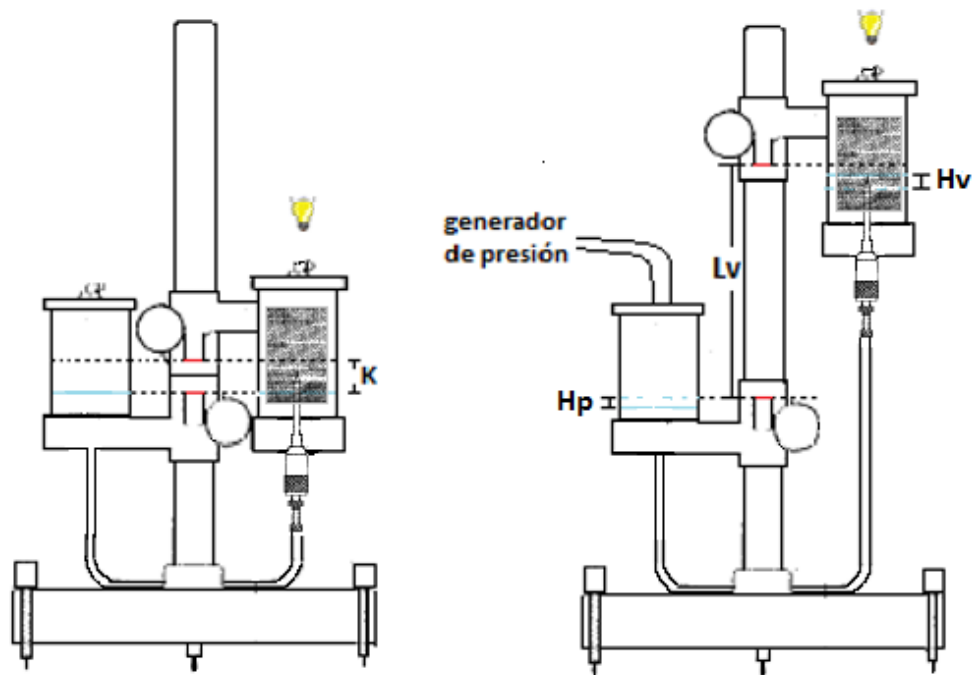
$$P = \rho g(Lv + H_v + H_p - K) \quad (2)$$

Reemplazando (1) en (2) queda:

$$P = \rho g \left(L_v + H_v + \frac{1}{D_p^2} \left(\frac{D_v^2 H_v}{4} - \frac{d_p^2 H_v}{3 H_c^2} \right) - k \right) \text{ para } H_v \leq 10.494 \text{ mm}$$

$$P = \rho g \left(L_v + H_v + \frac{1}{D_p^2} \left(D_v^2 H_v - d_p^2 \left(\frac{H_c}{4} + H_v \right) \right) - k \right) \text{ para } H_v > 10.494 \text{ mm}$$

Figura F.2.) . Esquema del patrón propuesta 1.



➤ **Propuesta 2**

En primer lugar, se determina el volumen que será transferido de un vaso a otro (V):

$$V = V_l + V_l \quad (1)$$

Donde:

$$V_l = \frac{(Dv^2 - dv^2) * H_v * \pi}{4} \quad (2), \text{ volumen transferido con corrección de varilla del sensor.}$$

$$V_l = \frac{(da^2 - db^2) * \pi}{4} * H_l \quad (3), \text{ volumen ocupado por el anillo flotador o imán, el cual será constante en cada medición}$$

Se reemplaza (2) y (3) en (1)

$$V = \frac{(Dv^2 - dv^2) * hv}{4} - \frac{(da^2 - db^2) * \pi}{4} * H_l \quad (4)$$

Posteriormente, se determina la altura del vaso de presión teniendo en cuenta la estructura cilíndrica del mismo:

$$V = \frac{\pi D_p^2 * H_p}{4} \quad (5)$$

Igualando (4) y (5) tenemos:

$$H_p = \frac{(Dv^2 - dv^2) * H_v}{Dp^2} - \frac{(da^2 - db^2) * H_l}{Dp^2} \quad (6)$$

Por otra parte, H_l se halla teniendo en cuenta las leyes de Newton y el principio de Arquímedes:

$$H_l = \frac{4 m}{\pi \rho (da^2 - db^2)} \quad (7)$$

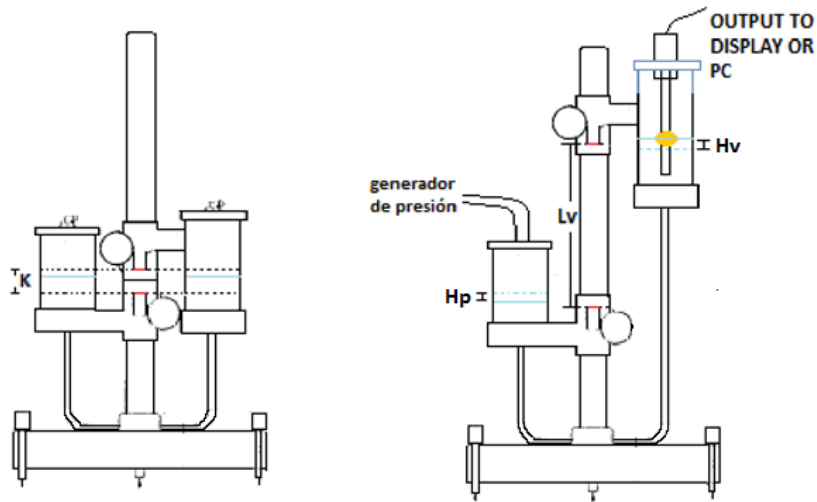
Se reemplaza (7) en (6) :

$$H_p = \left(\frac{(D_v^2 - d_v^2) * H_v}{D_p^2} - \frac{4 m}{\pi \rho D_p^2} \right)$$

Finalmente se halla la presión o el vacío generados con las alturas determinadas:

$$P = \rho g(Lv + H_v + \left(\frac{(D_v^2 - d_v^2) H_v}{D_p^2} - \frac{4 m}{\pi \rho D_p^2} \right)) - K$$

Figura F.3.) . Esquema del patrón propuesta 2.

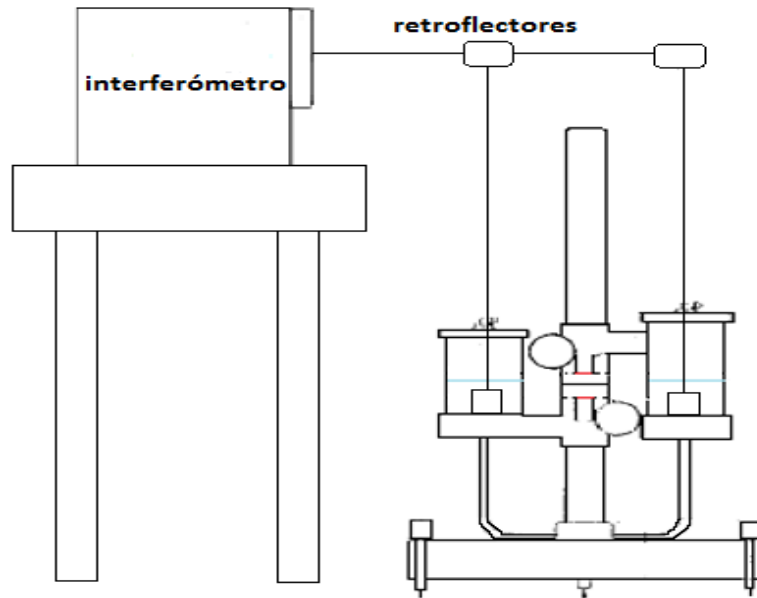


➤ **Propuesta 3**

Teniendo en cuenta que el sistema de medición con el interferómetro entregará directamente el cambio de nivel en los líquidos, la ecuación para determinar la presión se reduce a:

$$P = \rho g(Lv + \Delta H - K)$$

Figura F.4.). Esquema del patrón propuesta 3.



➤ Propuesta 4

Esta propuesta tiene como sistema de medición el mismo del patrón sin modificar, debido a que los cambios ópticos realizados no influyen.

$$P = \rho g(Lv + H_p + H_v - K)$$

Figura F.5.). Esquema del patrón propuesta 4.

