

# CONCEPTUALIZACIÓN Y DISEÑO DE MICROMANÓMETROS DE COLUMNA DE LÍQUIDO COMO PATRONES NACIONALES DE PRESIÓN EN LOS ALCANCES DE 1 kPa Y 5 kPa

Joaquin E. Rodríguez Mendoza<sup>1,2</sup>, Jorge C. Torres Guzmán<sup>1</sup>, Luis A. Santander Romero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro Nacional de Metrología, km 4,5 Carretera a los Cués, El Marqués, C. P. 76241, Querétaro.

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Veracruz, Ave. Miguel A. De Quevedo S/N, Veracruz.

## Resumen

La magnitud de presión es de gran utilidad tanto en el ámbito industrial como tecnológico, sus instrumentos de medición son variados. Para intervalos de 10 mPa hasta 130 kPa el patrón de referencia dominante es la columna de líquido.

El CENAM no cuenta con un patrón primario para el alcance de medición de 0,2 kPa a 5 kPa que permita dar trazabilidad. Por lo que, en México los instrumentos de medición en los alcances mencionados no son calibrados con las exactitudes que se pueden realizar en centros nacionales de metrología primarios. De aquí la importancia de diseñar un conjunto de micromanómetros con estos alcances de medición.

Este trabajo presenta la conceptualización y diseño de dos micromanómetros de columna de líquido con diferentes líquidos manométricos, una utilizando aceite y otra utilizando mercurio. Aquí se resume el principio de medición, el análisis de información técnica y el desarrollo del diseño. Se pretende desarrollar una base científica-técnica para un sistema de medición de presión que este en el estado del arte e implantar dos patrones nacionales.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los instrumentos para la medición de presión son variados y están relacionados con diferentes fenómenos y principios físicos. Las columnas de líquido son el instrumento de medición primaria de presión más difundido gracias a la simplicidad en su funcionamiento y lo económico que puede resultar su compra o fabricación. El tipo de columna de líquido más utilizado es en U, con mercurio y aceite como fluidos manométricos permitiendo implementar configuraciones de diferentes tipos de presión. En la magnitud de presión, es posible lograr las mediciones con menor incertidumbre en el alcance de medición de presión barométrica; el nivel de incertidumbre de medición de presión en los patrones nacionales indica el nivel de desarrollo tecnológico de los países [1].

La División de Fuerza y Presión, del Área de Metrología Mecánica del Centro Nacional de Metrología (CENAM), no cuenta con un patrón adecuado para el alcance de medición de 0,2 kPa a 5 kPa, por lo que el diseño de un conjunto de micromanómetros de columna de líquido con alcances de máximos de medición de 1 kPa y 5 kPa tienen alta importancia para permitir una

adecuada trazabilidad a los instrumentos de medición (en los alcances mencionados) en México.

## 2. ALCANCE DEL TRABAJO

La realización del proyecto pretende asimilar la tecnología existente y mejorarla técnicamente, así como científicamente, en un sistema de medición de presión que este en el estado del arte de pequeñas presiones y se utilice como patrón nacional. Este sistema estará formado por 2 micromanómetros del tipo de columna de líquido con la incertidumbre adecuada para permitir la calibración de balanzas de presión, transductores, manómetros absolutos, diferenciales y columnas de líquido.

Los micromanómetros del tipo de columna de líquido deberán tener un alcance desde 0,2 kPa hasta 1 kPa y desde 1 kPa a 5 kPa. Con una incertidumbre expandida máxima de 0,001 Pa.

## 3. ESTADO DEL ARTE EN MICROMANÓMETROS DE COLUMNA

Para medir, las columnas de líquido utilizan las unidades pertenecientes al Sistema Internacional de unidades SI, el pascal (Pa). La presión

generada por una columna de líquido se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P = Pa - Pb = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (1)$$

Donde:  $P$  representa la presión generada por la columna de líquido manométrico,  $Pa$  la presión aplicada a un extremo o brazo de la U,  $Pb$  la presión aplicada al otro extremo o brazo de la U,  $\rho$  es la densidad del líquido manométrico,  $g$  es la aceleración local de la gravedad,  $\Delta h$  la diferencia de alturas entre los brazos de la columna de líquido. La medición de la diferencia de alturas,  $\Delta h$ , en una columna de líquido se puede realizar por una gran variedad de métodos que detectan la posición de las superficies del líquido manométrico (generalmente, mercurio, aceite o agua). Estos métodos pueden ser: ópticos, capacitivos, ultrasónicos o inductivos. Para la medición de presiones de hasta 130 kPa, se pueden lograr exactitudes de hasta 0,01  $\mu\text{m}$ .

Los centros nacionales de metrología de los países desarrollados como el National Physical Laboratory de Inglaterra (NPL), Physikalisch-Technische Bundesanstalt de Alemania (PTB), National Institute of Standards and Technology de EUA (NIST), entre otros, cuentan con patrones primarios de columna de líquido de diferentes alcances de medición utilizando como líquido manométrico mercurio y aceite. En el Instituto de Metrología Gustavo Colonnetti (IMGC, de Italia), cuentan con una columna de mercurio denominada HG-5, que es su patrón primario de presión; su alcance de medición es de 100 Pa a 120 kPa y el principio utilizado es una columna de mercurio en forma de U del tipo Fortin [2]. El mismo IMGC cuenta con el MM1 que es una pequeña versión del HG-5 con un alcance de 12 mPa a 5 kPa, utilizando interferometría láser para medir la diferencia de alturas entre los meniscos del fluido manométrico [3].

En Japón tienen patrones primarios de presión, el ISB-2 y el ISB-3, que utilizan el mismo principio primario de instrumentación óptica, variando solo en su forma geométrica y alcance de medición [4 y 5]. El CENAM, cuenta con el IMGC/CENAM-HG6 que es una versión mejorada del diseño original italiano HG-5 [6].

La tabla 1 presenta un resumen de las características más relevantes de estos sistemas.

Tabla1. Características de los micromanómetros existentes actualmente.

Alcance	Japón 0,1 kPa – 1 kPa México 5 kPa – 120 kPa Italia 12 mPa – 5 kPa	EUA 13 – 350 kPa Inglaterra 0,0001 Pa – 1 kPa
medición de altura	<i>Interferometría láser.</i> Japón, México, Italia Inglaterra	<i>Interferometría por ultrasonido.</i> EUA
Fluido manométrico	<i>Mercurio</i> Japón, México, Italia, EUA	<i>Aceite</i> EUA, Inglaterra.
Alineación	<i>En conjunto con la estructura y en grupo.</i> Japón, México, Italia, EUA, Inglaterra	
Incertidumbre	Japón a 100 kPa $\pm 0,4$ Pa México de 0,0046 a 0,000375 %L. Inglaterra de 0,3 a 6 Pa menos de $\pm 0,5\%$	Italia de 0,024 a 0,00383 %L. EUA $4,3 \times 10^{-6}$
Termometría	<i>Platino R. T. D.</i> Japón, México, Italia, EUA	<i>Termistores.</i> Inglaterra

#### 4. DISEÑO CONCEPTUAL

Para cumplir con las necesidades, se requiere diseñar 2 micromanómetros de alta exactitud; incorporando diseño sencillo, económico y con la posibilidad de fabricarse en el CENAM. La mejor opción para poder realizar mediciones en baja presión absoluta, relativa y manométrica en los alcances de medición requeridos, se logra con dos micromanómetros de columna de líquido independientes. Cada uno formado por un par de tubos de vidrio (que permita visualizar el nivel del líquido manométrico) con diámetros 61 mm interior y 70 mm exterior. Se eligió utilizar vidrio porque sus características son las óptimas para aparatos de laboratorio como son: elevado punto de fusión, poca contracción y dilatación con los cambios de temperatura, buen aislamiento térmico y eléctrico.

Estos tubos conectados forman una U con una longitud de 500 mm [1, 6]. El diseño integra un diámetro del tubo de vidrio grande para reducir el efecto de capilaridad del menisco del fluido. Los tubos de vidrio, o brazos de la columna de líquido, serán montadas verticalmente en un plato de acero inoxidable y sellado con teflón a través de rebordes en sus extremos inferiores. Un ducto horizontal, maquinado en el plato, permite el paso del fluido manométrico de un brazo de la columna al otro, formando así la U. La temperatura del fluido manométrico será medida por dos sensores de temperatura de resistencia de platino (RTD),

ubicados en el fondo y dentro de cada uno de los 2 brazos de la columna.

Para lograr los alcances de medición requeridos se realizará una columna U con mercurio y la otra con aceite. La temperatura de operación de 20 °C. La diferencia de alturas entre ambas superficies de mercurio medida mediante un sistema de interferometría láser de helio-neón (He-Ne).

Para las bases de los brazos de las columnas se seleccionó aluminio por su poca densidad y buena dureza, que facilita el ensamble; además, tiene buena resistencia mecánica, buena resistencia a la corrosión y excelente maquinabilidad, todos estos factores que aunados al bajo costo son importantes para la fabricación y adquisición de las partes más grandes de los micromanómetros. Las piezas de conexión entre los tubos de vidrio y las bases requieren una alta exactitud para el ensamblaje y sellado, por lo que se seleccionó acero inoxidable clase 304; este material tiene buenas propiedades de soldabilidad, corte, alta resistencia a la corrosión, alta resistencia mecánica y baja susceptibilidad magnética, aunque un costo más elevado que el aluminio, pero para el tamaño de las piezas y su importancia en la operación de los micromanómetros de columna de líquido es el ideal.

Para definir a detalle los criterios de las dimensiones de las piezas de apoyo, así como su forma y tolerancias de fabricación, se tomaron en cuenta las facilidades y límites de los procesos de fabricación y los alcances en máquinas y herramientas con las que se cuenta en el laboratorio de tecnología de fabricación del CENAM. La Figura 1, muestra el diseño conceptual de un brazo del micromanómetro U, mostrando el tubo de vidrio y las conexión con las bases.



Figura 1. Brazo de un extremo del micromanómetro de columna de líquido.

#### 4.1 Medición de altura

Para la medición de la diferencia de alturas en los micromanómetros de columna de líquido se seleccionó el sistema de interferometría láser, ya que cumple con la exactitud requerida y tiene la factibilidad de utilizar componentes ópticos existentes en el mercado. Las otras opciones requieren investigación científica para lograr las incertidumbres necesarias.

El Interferómetro es un aparato que permite generar bandas de interferencias para medir distancias o desplazamientos. Las bandas de interferencias están en el campo de visión, sus espaciados son controlados por valores medios de tornillos de ajuste en el filtro dicróico y en el espejo de azogado anterior inclinado a 45°. En nuestro caso, un cambio de la diferencia de presión ( $P_a - P_b$ ) provoca un cambio directamente proporcional en el nivel líquido, por lo cual se cambia la diferencia del alcance óptico entre las dos distancias ópticas luminicas. Siendo los micromanómetros de columna de líquido un caso especial, la operación del sistema óptico no es rutinaria. Para asegurar que la medición se puede realizar con este sistema óptico se han realizado experimentos de medición y detección de diferencias en las franjas con cambios de altura en las columnas. Para este fin se diseñó y fabricó un sistema en vidrio pyrex de vasos comunicantes herméticos, colocando en cada brazo un retroreflector fijo en posición horizontal debajo de la superficie líquida (del micromanómetro de aceite), ver Figura 2.

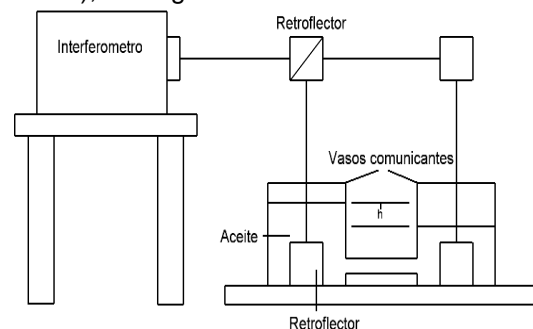


Figura 2. Esquema del sistema para probar interferometría en los micromanómetros.

Los experimentos realizados demostraron que el método de medición de altura por medios ópticos funciona adecuadamente (se tiene la

correspondencia de cambios en las bandas interferométricas con cambios en la diferencia de altura) y se prevé adecuado para las incertidumbres requeridas ya que la incertidumbre del sistema de medición probado es de  $\pm 1,0 \times 10^{-8}$  m. Se desarrollará en el proyecto el programa computacional (con los cálculos necesarios) para la medición de la diferencia de alturas. Se han establecido las bases para contar con la colaboración de los especialistas de la División de Metrología Dimensional del CENAM. Las características importantes que se han definido con las pruebas realizadas de la medición de la diferencia de alturas es que, en el caso de aceite los retrorreflectores se colocan en el fondo de los brazos de la columna y para el mercurio se colocan en la superficie del líquido manométrico.

#### 4.2 Otras consideraciones

La temperatura de los líquidos manométricos será medida por sensores RTD, los cuales permiten ser instalados dentro del líquido manométrico y son de alta exactitud, permitiendo determinar mejor la densidad del líquido utilizado. El sistema de posicionamiento y nivelación de las columnas se aplicará de manera individual en cada brazo, teniendo así la capacidad de poder nivelar la columna, cuando así se requiera, de una manera más sencilla.

El aislamiento de las vibraciones mecánicas externas (amplitud e intensidad de las vibraciones recibidas en las columnas), se logra instalando los micromanómetros de columna de líquido sobre unas mesas que hemos diseñado con algunas de las características de las mesas ópticas, tales como: gran masa, baja resonancia, conexión de la base con las patas soporte mediante fuelles neumáticos y patas unidas al suelo con goma. Estas mesas se están fabricando en el CENAM, ver Figura 3.

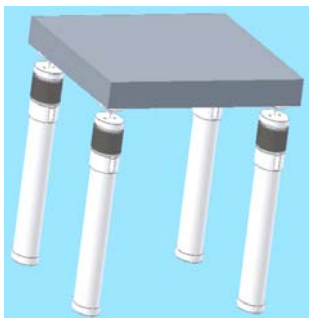


Figura 3. Mesa soporte de micromanómetros con amortiguamiento de vibraciones.

Las mediciones con los micromanómetros de columna de líquido estarán sujetas a influencias de: cambios de temperatura, vibraciones mecánicas, cambios en los suministros de energía eléctrica, límites del espacio para arreglos y conexiones. Dadas las características especiales de medición (alta exactitud, alcances de medición de muy baja presión y sistemas de medición de altura de las columnas por medios ópticos) se requiere un medio ambiente controlado y la operación por metrologos calificados. Para lograr la incertidumbre requerida, la medición de la diferencia de alturas debe tener una incertidumbre de  $\pm 1,0 \times 10^{-6}$  m, el control de temperatura debe ser  $\pm 0,01$  K y conocerse la densidad del fluido manométrico.

#### 5. RESULTADOS

El esfuerzo debido a la presión de operación de los micromanómetros de columna de líquido es muy pequeño como para impactar en el cálculo del espesor y resistencia de las piezas a fabricar. El diseño cuenta, desde el punto de vista de resistencia de materiales, con un alto factor de seguridad. La rigidez de la estructura de los micromanómetros se obtiene de dos placas soporte de aluminio (una superior y otra inferior). La placa inferior sostendrá la estructura completa, esto es los brazos de vidrio, sus conexiones, el sistema de medición de alturas y la placa superior. La placa superior soporta al sistema de interferometría y mantiene el paralelismo entre los brazos de vidrio. Toda la estructura estará soportada por una mesa amortiguada con soportes niveladores. Se realizó la distribución y adecuación geométrica de los micromanómetros en los programas de diseño Proengineer e Inventor (ver Figura 4).

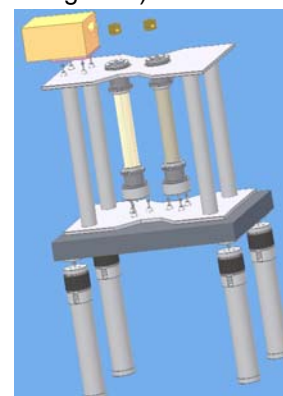


Figura 4. Ensamble general de uno de los micromanómetros de columna de líquido.

## 6. CONCLUSIONES

Se cuenta con un diseño conceptual completo y sólido que en las partes más importantes ha sido probado, como se comenta en las secciones 4 y 5.



Figura 5. Arreglo para probar la medición interferométrica en los micromanómetros.

En los micromanómetros de columna de líquido se incorporó un sistema novel de nivelación individual por brazo y para toda la columna, lo que permite eliminar los errores de alineamiento. Se utilizan fuelles de amortiguamiento neumáticos que eliminan la introducción de vibraciones mecánicas a las columnas. El sistema de medición de diferencia de alturas permitirá la posibilidad de corregir factores de desviación para presión absoluta, diferencial y relativa.

De acuerdo a los coeficientes de sensibilidad de las magnitudes de influencia más significativas (la medición de la altura de las columnas y el control de la temperatura con incertidumbres de  $\pm 1,0 \times 10^{-6}$  m y  $\pm 0,01$  K, respectivamente), la incertidumbre esperada para los micromanómetros es de 0,001 Pa.



Figura 6. Avance de construcción de partes.

## RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a la División Dimensional del CENAM (interferometría láser) y al Laboratorio de Tecnología de Fabricación (realización de las piezas del ensamble).

## REFERENCIAS

1. Torres Guzmán J. C.; *Manómetros de columna de líquido*. Publicación técnica CNM-MMF-PT-001. 2005.
2. F. Alasia, A. Capelli, G. Cignolo and M. Sardi; *The HG5 laser interferometer mercury manometer of the IMG*. Metrología, 1999, 36, 499-503.
3. F. Alasia, A. Capelli, G. Cignolo, R. Garcia and M. Sardi; *The MM1 Laser interferometer low-range mercury manometer of the IMG*. Metrología, 1999, 36, 505-509.
4. A. Ooiwa, M. Ueki and R. Kaneda; *New mercury interferometric baromanometer as the primary pressure standard of Japan*. Metrología, 1994, 30, 565-570.
5. M. Ueki and A. Ooiwa; *A heterodyne laser interferometric oil manometer*. Metrología, 1993/94, 30, 579-583.
6. Torres-Guzmán J. C., Olvera-Arana P., Alasia F., Sardi M., Zuñiga S., Santander L. A., Esparza A.; *The IMG/CENAM-HG6 mercury manobarometer*. Metrología, 2005, 42, nº6, S161-S164.