

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FÍSICA



**INFORME DE COMPETENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR
EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FÍSICO**

TITULADO:

**CONSTRUCCIÓN DE UN MANÓMETRO PATRÓN DE COLUMNA LÍQUIDA
DE AGUA Y ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA CALIBRAR
MANÓMETROS DIFERENCIALES**

PRESENTADO POR:

CHRISTIAN ARTURO MEZA NIÑO

ASESOR :

MANFRED JOSEF HORN MUTSCHLER

**LIMA – PERÚ
2015**

Dedicado

A mi familia que siempre estuvo apoyándome en todo momento.

CONTENIDO

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Objetivos	3
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Definiciones básicas	4
2.2 Instrumentos para medir presión	8
2.3 Manómetro de columna líquida	11
2.3.1 Fluidos manométricos	12
2.3.2 Condiciones de referencia	12
2.3.3 Magnitudes de influencia.....	12
CAPÍTULO 3. CONSTRUCCIÓN DEL MANÓMETRO PATRÓN	19
3.1 Materiales y piezas utilizadas.....	19
3.2 Instalación del manómetro a calibrar y patrón.....	26
3.3 Mantenimiento y cuidados.....	31
CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN	32
4.1 Fundamento del método.....	32
4.2 Instrumentos y equipos de medición.....	32
4.3 Materiales y/o equipos similares.....	32
4.4 Condiciones de calibración.....	33
4.5 Consideraciones preliminares.....	33

4.6 Procedimiento de calibración.....	33
4.6.1 Selección del patrón.....	33
4.6.2 Realización de las mediciones.....	33
4.6.3 Determinación de los errores de indicación y de histéresis.....	35
4.7 Calculo de incertidumbre.....	37
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	40
5.1 Calibración de un manómetro diferencial.....	40
CAPÍTULO 6. DISCUSIONES.....	47
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	49
ANEXOS.....	51
ANEXO A Definiciones metrológicas.....	51
ANEXO B Incertidumbre en la medición.....	56
ANEXO C Fotos del manómetro patrón.....	59
ANEXO D Certificados de calibración.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	74

PRÓLOGO

El sector industrial representa uno de los pilares de la economía del país, siendo importante la evaluación y medición de procesos que permitan la maximización del aprovechamiento de los recursos. Esto implica el uso continuo de instrumentos y equipos de medición de magnitudes físicas que aseguren una optimización de resultados y que cumplan requisitos de sistemas o procesos estándares.

Una de estas magnitudes a hacer medida y controlada es la presión, siendo una variable de esta la presión diferencial.

La presión diferencial se encarga de medir la diferencia de presiones entre dos puntos, para ello se utilizan manómetros diferenciales, generalmente en filtros de fluidos. Midiendo la diferencia de presiones entre la entrada y salida del filtro se observa que tan obstruido se encuentra el mismo.

En la empresa Ferreyros el uso de manómetros diferenciales es muy común ya que se utilizan dentro de un sistema encargado de realizar pruebas de potencia y transmisión de los motores de las maquinarias pesadas (camiones, tractores, excavadoras, etc.), esto ayudará a mantener un fluido limpio y libre de contaminación ya que el manómetro diferencial servirá como un indicador del estado del aceite o de una probable falla en la transmisión de flujo.

Mantener las pruebas dentro de los estándares de calidad requerirá que los instrumentos de medición se encuentren calibrados para asegurar la confiabilidad y certeza de las pruebas realizadas, esto asociado a un costo por la realización del servicio.

Actualmente no se cuenta en el país con un procedimiento normalizado para la calibración de manómetros diferenciales, por lo cual para plasmar una idea clara se ha utilizado como referencia procedimientos nacionales y extranjeros de calibración de instrumentos similares. Uno de estos procedimientos utilizado como referencia es el PC -04 para la calibración de manómetros de deformación elástica del Servicio Nacional de Metrología.

En el informe se diseñara y construirá un manómetro patrón de columna líquida que servirá para realizar calibraciones de manómetros diferenciales y se elaborará un procedimiento adecuado para su uso. Todo ello con el objetivo de asegurar la calidad de las mediciones y el ahorro en los tiempos de servicio y adquisición de equipos más costosos.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Por medio de este informe, detallaré y explicaré como se realizó la elaboración de un patrón y un procedimiento que permita realizar la calibración de manómetros diferenciales industriales de un alcance máximo de 20 pulgadas de agua (50 mbar).

Información de la Empresa Ferreyros S.A.

Ferreyros basa principalmente sus servicios en la comercialización de bienes de capital.

Con 90 años de fundada en el Perú, Ferreyros es la empresa líder en la venta y alquiler de maquinaria pesada así como también en la provisión de servicios dentro de este ámbito.

Es distribuidora de la marca Caterpillar desde 1942, así como de otras renombradas marcas que complementan su portafolio, entre ellas, Terex, Paus, Oldenburg, Metso y Massey Ferguson. Orientada a los sectores económicos más importantes del país como la minería, construcción, energía, industria, hidrocarburos, pesca y agricultura entre otros.

En el año 2012, como consecuencia del crecimiento sostenible de Ferreyros y otras compañías subsidiarias del grupo, se procedió a realizar una reorganización corporativa.

Gracias a la reorganización Ferreyros se transformó en Ferreycorp, que asumió el rol corporativo en calidad de holding del grupo, propietaria de todas las subsidiarias tanto locales como extranjeras. Por su parte Ferreyros fue asignada a dedicarse exclusivamente a la comercialización de maquinaria, equipos y servicio postventa de la línea Caterpillar y sus marcas aliadas.

Funciones desempeñadas en la Empresa

Dentro de la organización desempeño mis labores en el área del Laboratorio de Calibraciones donde soy el analista responsable del laboratorio de la magnitud física de presión, realizo las calibraciones de los instrumentos de medición y la emisión de certificados de calibración los cuales cumplen los requisitos de normas internacionales. Estos instrumentos utilizados en los diversos talleres de la Empresa, servirán para realizar mediciones en las pruebas a los motores y equipos de maquinaria pesada. También bajo mi cargo está la operatividad de instrumentos de otras magnitudes tales como la temperatura, flujo volumétrico, revoluciones, etc.

Actualmente el Laboratorio de Calibraciones cuenta con la acreditación ISO 17025 en las magnitudes de presión y longitud, otorgada por el Servicio Nacional de Acreditación, dicha distinción es el máximo reconocimiento otorgado a los laboratorios de ensayo y calibración.

Implementación de un patrón para manómetros diferenciales

La elaboración del patrón de columna líquida pretende dar solución a una necesidad presentada para la Empresa.

Actualmente la Empresa cuenta con numerosos manómetros diferenciales por lo cual envía estos instrumentos de medición a proveedores externos para que se les realice la calibración de los mismos.

Esto genera una pérdida en tiempo y costos significativos, por lo cual la creación de un patrón disminuirá considerablemente estos gastos.

La primera parte del trabajo consiste en la construcción de un patrón que será utilizado para la calibración de manómetros diferenciales.

El patrón elaborado es un manómetro de columna líquida de agua, el cual será detallado más adelante. Este patrón tendrá un alcance de 20 pulgadas de agua (50 mbar), por lo cual su uso estará limitado solo a instrumentos con un alcance de indicación menor o igual a este valor y que tengan una clase de exactitud del 2% del alcance máximo de indicación.

La segunda parte consiste en la creación de un procedimiento de calibración de manómetros diferenciales, utilizando como patrón un manómetro de columna líquida de agua, dicho procedimiento permitirá calcular coherentemente los errores de indicación y las incertidumbres de dichas mediciones. Para esto se utilizará normas estandarizadas, así como información técnica relevante de los propios equipos.

De acuerdo a lo explicado anteriormente mostraré una forma correcta de elaborar un manómetro patrón de columna líquida de agua y como realizar calibraciones de manómetros diferenciales reduciendo tiempos y costos, dando solución no solo a la empresa en la que me desempeño sino a cualquiera que se encuentre dentro del rubro o utilice estos equipos y necesite mantener el control y funcionamiento de sus instrumentos dentro de valores establecidos, economizando de esta manera la compra de equipos sofisticados y de mayor precio.

1.1 Objetivos

- Construir un manómetro patrón de columna líquida de agua.
- Utilizar el manómetro patrón como un instrumento que sea capaz de realizar calibraciones de manómetros diferenciales con un alcance máximo de 20 pulgadas de agua.
- Elaborar un procedimiento de calibración para manómetros diferenciales utilizando como patrón una columna líquida.
Este procedimiento debe calcular el error de medición y la incertidumbre asociada de forma coherente.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo revisaremos conceptos que serán utilizados como base teórica. Se profundizará sobre los tipos de manómetros, utilidades, diferencias y se hará un mayor énfasis en los manómetros de columna líquida que posteriormente servirá como ayuda a la construcción de un patrón de columna de agua.

2.1 Definiciones básicas

Presión

La presión está definida como la cantidad de fuerza que se ejerce sobre una determinada unidad de área de cualquier sustancia.

Según la relación:

$$P = \frac{F}{A}$$

Tal como se observa en la figura 2.1 donde **P** es la presión ejercida por la fuerza **F** que actúa perpendicularmente sobre la superficie de área **A**

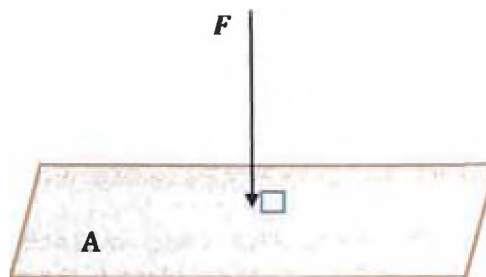


Figura 2.1 Acción de una fuerza sobre una superficie.

Hay que mencionar también que para una distribución de fuerza en general, esta puede ser constante o variable de punto en punto alrededor de la superficie (Ver figura 2.2). Por esta razón esta definición involucra a un elemento infinitésimo de área dA , en donde está distribuido un dF de fuerza, de modo que la presión P de dicho punto resulta. [11]

$$P = \frac{dF}{dA}$$

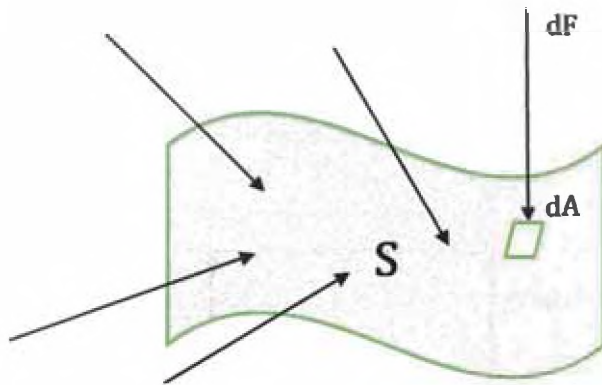


Figura 2.2 Distribución de una fuerza variable sobre una superficie S .

Las unidades de presión en el Sistema Internacional de Unidades SI, es el Pascal, simbolizado por el Pa.

$$1\text{Pa} = 1\text{Nm}^{-2}$$

Presión atmosférica

La atmósfera está constituida por aire, una mezcla de gases fundamentales, Oxígeno y Nitrógeno, que como toda sustancia es atraída por el campo gravitacional de la Tierra, es decir la atmósfera tiene un peso. La atmósfera es un fluido de varios kilómetros de altura y debido a su peso ejerce presión sobre todos los objetos sumergidos sobre ella. Esta presión se denomina la presión atmosférica.

La presión atmosférica normalizada es igual a 1013, 25 hPa (760 mm Hg). La cual idealmente se presenta a una altitud de 0 m.s.n.m, a una temperatura ambiente de 20°C, humedad relativa de 65% y densidad de aire 1,2 kg/m³.

Presión manométrica

Es una presión mayor a la atmosférica, es medida con referencia a la presión atmosférica, también conocida como presión positiva o relativa.

Presión absoluta

Es la presión total medida con referencia al vacío absoluto.

Presión de vacío

Es la presión menor a la presión atmosférica. Cuando el vacío se mide con respecto a la presión atmosférica se le conoce como presión negativa, el vacío también puede medirse con respecto al 'cero absoluto' como una presión absoluta menor a la presión atmosférica.

Presión diferencial

Es la presión que mide la diferencia entre dos presiones diferentes. [1]

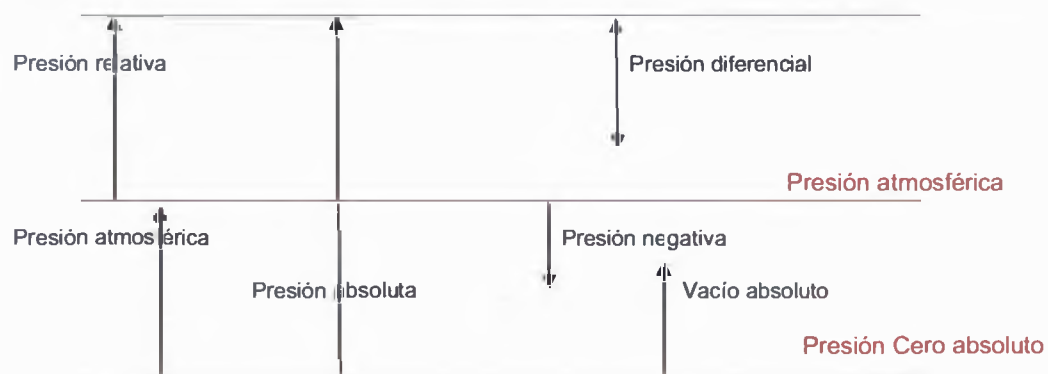


Figura 2.3 Esquema de los tipos de presión a partir de la presión atmosférica y la presión cero absoluto como referencia.

Presión en fluido

Cuando un fluido se encuentra en reposo este ejerce una fuerza perpendicular a cualquier superficie que se encuentre en contacto con él, ya sea cualquier cuerpo sumergido o la pared de un recipiente. Considerando al fluido como un todo en reposo, las moléculas que lo componen si están en movimiento, esta fuerza ejercida por el fluido se debe a los choques de las moléculas con su entorno. En la figura 2.4 para una superficie dA que se encuentra dentro de un fluido, este ejerce sobre cada lado de ella fuerzas dF opuestas e iguales, ya que de otra manera la superficie se aceleraría y el fluido no permanecería en reposo.

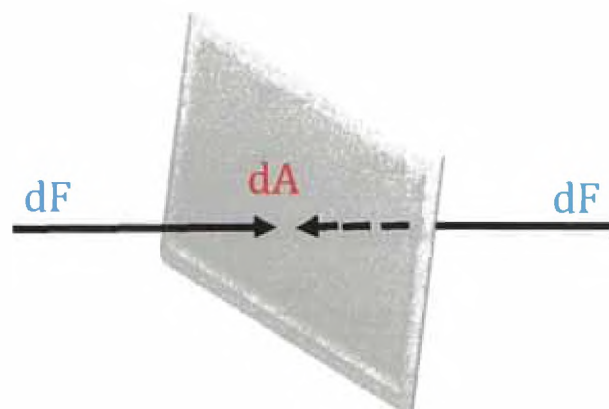


Figura 2.4 Fuerzas iguales y opuestas que actúan sobre una pequeña superficie dentro de un fluido en reposo.

Variación de la presión con la profundidad en un fluido en reposo

Para un líquido en reposo, supondremos que la densidad ρ y la aceleración de la gravedad g tienen el mismo valor en todo el fluido.

Tomemos un diferencial de masa dm del fluido a una profundidad y . Sobre ella actuarán la fuerza de presión P en la parte superior de la superficie y en la parte inferior actúa la fuerza de presión $(P+dP)$, donde dP corresponde a una variación en la profundidad de dy (ver figura 2.5)

La resultante de las fuerzas de presión del líquido es igual al diferencial de peso $dw=gdm$

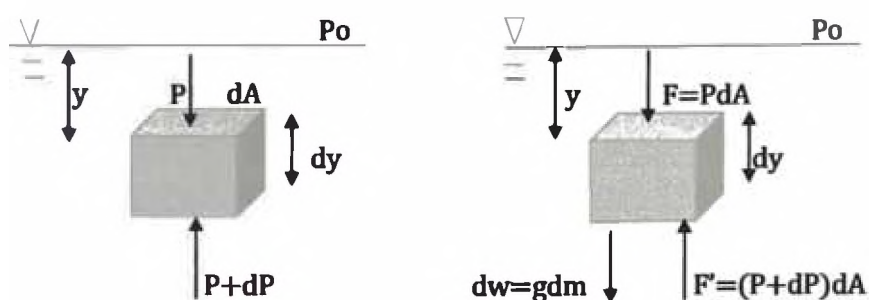


Figura 2.5 Fuerzas verticales sobre un diferencial de porción de fluido.

Como el fluido está en equilibrio, la suma vectorial de las fuerzas verticales sobre la porción de fluido debe ser cero.

De la figura 2.5

$$F' - F = dw$$

$$(P + dP)dA - PdA = dm g$$

$$dP dA = \rho g dy dA$$

$$\frac{dP}{dy} = \rho g$$

$$\int_{P_0}^P dP = \int_0^y \rho g dy$$

$$P = P_0 + \rho g y$$

(Ecuación 2.1)

Si P_0 es la presión en la superficie del fluido y P la presión a una profundidad y , observamos que P es mayor que la presión P_0 .

Podemos deducir también que la presión es la misma en dos puntos cualesquiera situados en el mismo nivel en el fluido. Se observa además que si la profundidad aumenta la presión también crecerá. [7]

2.2 Instrumentos para medir presión

Existen diversos instrumentos para medir los distintos tipos de presión, ya sea presión absoluta, manométrica, atmosférica, diferencial, etc.

Entre los principales instrumentos para medir presión tenemos los siguientes:

Barómetro

Instrumento diseñado para medir la presión absoluta o también la presión atmosférica, los barómetros más utilizados están formados por una columna líquida de mercurio la cual consta de un tubo largo de vidrio, cerrado por un extremo, el cual se llena de mercurio y luego se invierte. En la figura 2.6 se puede observar que el espacio vacío arriba de la columna solo contiene vapor de mercurio cuya presión generada es insignificante.

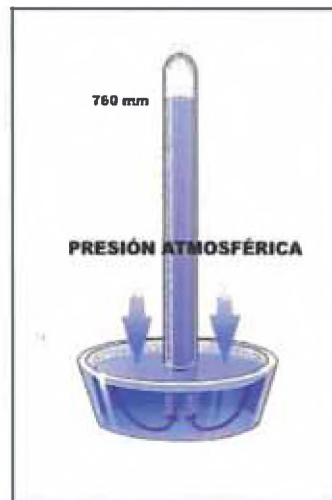


Figura 2.6 Barómetro de mercurio.

Manómetro

Instrumento diseñado para realizar la medición de la presión manométrica o relativa, su utilización se da principalmente en el sector industrial.

Entre los principales manómetros tenemos a los de tipo Bourdon (figura 2.7), los cuales poseen en su interior un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo y cerrado por el otro extremo del tubo. En los manómetros analógicos de tipo Bourdon al aumentar la presión dentro del tubo, este se deforma y el movimiento se transmite a la aguja indicadora. [3]

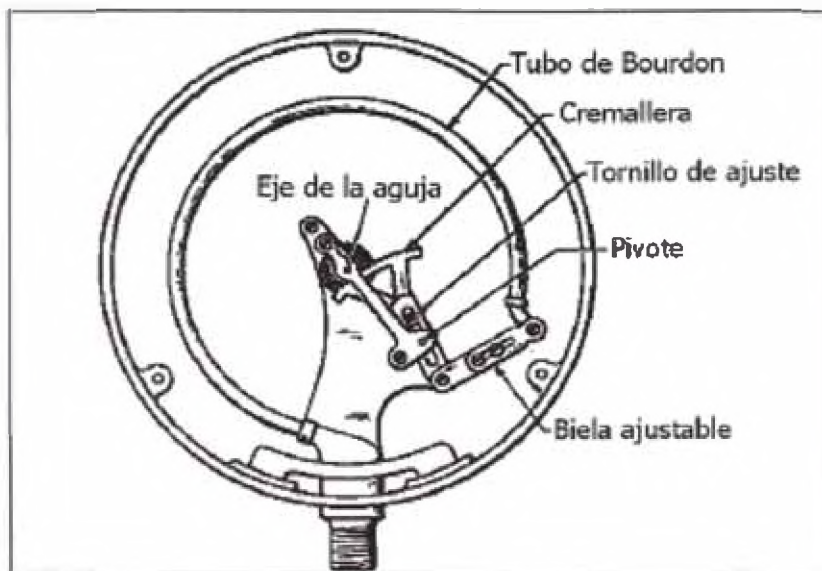


Figura 2.7 Vista interna de un manómetro de tipo Bourdon.

También existen los manómetros digitales tal como se puede ver en la figura 2.8, los cuales poseen un sensor interno el cual al ser sometido a presión muestra el valor del mismo digitalmente en una pantalla o indicador.



Figura 2.8 Tipos de manómetros (analógico y digital).

Manómetro diferencial

Son dispositivos que miden la diferencia de presiones entre dos puntos.

Está formado por un elemento sensible a la presión, un sistema de transmisión de la presión, un indicador y dos tomas de conexiones, una para la toma alta y otra para la baja.

Su uso es muy frecuente en filtros en línea, de esta forma se puede observar lo obturado que se encuentra el filtro midiendo la diferencia de presión entre la entrada y salida del filtro. También son utilizados para medir la dinámica del flujo de un gas mediante la comparación de la presión en diferentes puntos de la tubería.

Es común su uso cuando en las tuberías se realizan cambios en el diámetro o la altura y se desea conocer el cambio de la presión de un punto a otro. [2]



Figura 2.9 Diversos tipos de manómetros diferenciales.

2.3 Manómetro de columna líquida

Haremos un mayor análisis para este tipo de manómetro, ya que en base a estos conocimientos se desarrollará el diseño del patrón.

Las columnas de líquido son instrumentos de medición primaria y basa su principio de funcionamiento en el equilibrio de la fuerza de presión generada y el peso de la columna líquida del fluido contenido en una columna.

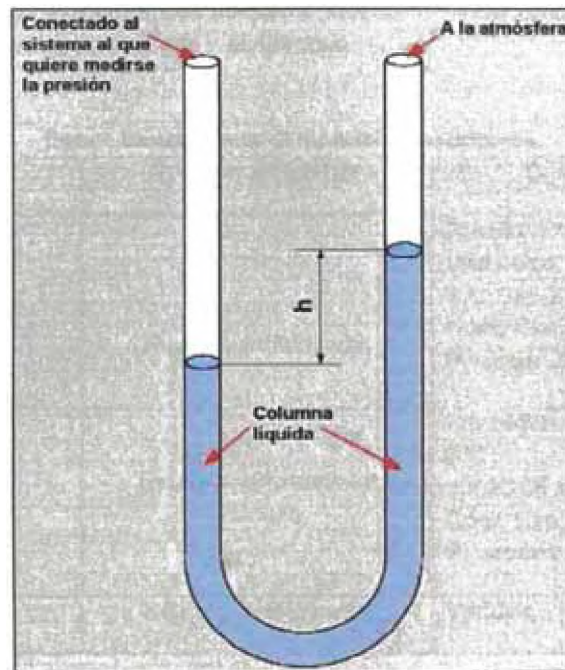


Figura 2.10 Manómetro de columna líquida.

Como se observa en la figura 2.10, el extremo izquierdo del manómetro de columna líquida se conectará al instrumento donde se medirá la presión y el extremo derecho puede estar abierto a la atmósfera o conectado a otro instrumento generador de presión.

Para un líquido de densidad ρ y con gravedad local g_l , sea P la presión que se genera en la superficie del lado izquierdo del manómetro, y P_{ref} , la presión generada por el otro extremo de la superficie, se cumple entonces:

$$P - P_{ref} = \rho g_l h \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

h : diferencia de niveles entre P y P_{ref} .

Si P_{ref} es cero, es decir está vacío, estaríamos en el caso de un barómetro y, si es distinto de cero tendremos un manómetro.

Podemos observar que los manómetros de columna líquida son los manómetros más versátiles y pueden medir diferentes tipos de presión entre las cuales están la presión manométrica, absoluta o diferencial. [7]

2.3.1 Fluidos manométricos

Entre los principales fluidos manométricos utilizados para la medición de presión en manómetros de columna líquida tenemos al agua, el aceite y el mercurio.

Tabla 1. Características de los fluidos manométricos.

Fluido	Presión a trabajar	Característica
Agua	Relativa y diferencial	Pureza: Destilada Densidad: 1000 kg/m ³ a 4°C, 998,21 kg/m ³ a 20°C Coef. Exp.: 207x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ P. vapor 2238 Pa (20°C)
Mercurio	Relativa, diferencial y absoluta	Densidad: 13595,08 kg/m ³ a 0°C 13585,85 kg/m ³ a 20°C Coef. Exp: 181x10 ⁻⁶ °C ⁻¹ P. vapor 0,139 Pa (20°C)
Aceite	Relativa y diferencial	Variable

2.3.2 Condiciones de referencia

La indicación que muestran los manómetros de columna líquida a ciertas condiciones de referencia por lo general son:

Temperatura del fluido (20°C, 4°C, 0°C, etc.)

Temperatura de la escala (20°C)

Aceleración de la gravedad normalizada (9,780665 m/s²)

Presión atmosférica normalizada (101,325 kPa)

2.3.3 Magnitudes de influencia

Las magnitudes de influencia más relevantes para este tipo de manómetro serán:

Aceleración de la gravedad

La gravedad varía de acuerdo a la posición geográfica donde se encuentra el instrumento. La corrección debido a esta magnitud tiene bastante influencia en manómetros de columna líquida.

En caso de no poder medirse directamente la gravedad, puede calcularse de acuerdo a la ecuación recomendada por la OIML (Organización Internacional de la Metrología Legal) en el boletín OIML 127, por medio de la siguiente fórmula:

$$g_l = 9,7803184 \cdot (1 + 5,3024 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}^2(\varnothing) + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot \text{sen}^2(2\varnothing)) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H \quad (\text{ec.2.3})$$

Siendo: \varnothing la latitud y H la altitud respecto al nivel del mar en metros. Esta fórmula da el valor de la gravedad local con una incertidumbre del 0,005%, con un factor de cobertura $k=2$, o lo mismo que una exactitud del 0,01%.

Esta ecuación adopta los coeficientes adoptados por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), en el GRS80 (Geodetic Reference System of 1980), dichos coeficientes representan el tamaño, forma y campos gravitacionales de la Tierra. [12]

Medición de altura

Los cambios de temperatura afectan a los materiales de las escalas por lo que las condiciones de altura deben ser corregidas con la siguiente ecuación:

$$h = h_0(1 + \alpha \Delta t) \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde:

h : Medición de altura corregida por temperatura.

h_0 : Medición de altura.

α : Coeficiente de expansión térmica del material de la escala ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Δt : Variación de temperatura de la escala respecto a un valor de referencia (por lo general 20°C) [5]

Tabla 2. Coeficientes de expansión térmica de diversos materiales.

MATERIAL	COEFICIENTE DE EXPANSION ($10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Aluminio	24,5
Latón	18,4
Vidrio	3 a 8,5
Invar	0 a 5
Acero Inoxidable	17
Acero	11,5

Densidad del líquido ρ

El líquido utilizado depende de la presión que se quiera obtener. El mercurio se utiliza por lo general para altas presiones absolutas, ya que por su mayor densidad se necesitará menor altura de columna. Otros líquidos como el agua se utilizan para medir pequeñas diferencias de presión con mejor exactitud ya que, al ser menos denso, la altura de la columna aumenta y con ello la resolución de la escala mejora notablemente.

En nuestro caso el líquido a utilizar será el agua destilada.

Para el mercurio si es que no se puede medir su valor directamente, la densidad puede ser hallada mediante la ecuación de Ambrose:

$$\rho_{Hg}(t) = \frac{\rho_{Hg}(t=0)}{1+a_1 \cdot t+a_2 \cdot t^2+a_3 \cdot t^3+a_4 \cdot t^4} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde:

$$\rho_{Hg}(t = 0) = 13595,08 \text{ kg/m}^3$$

$$a_1 = 1,815868 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$a_2 = 5,4583 \cdot 10^{-9} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$a_3 = 3,498 \cdot 10^{-11} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$$

$$a_4 = 1,5558 \cdot 10^{-14} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

El valor de t está dado en $^\circ\text{C}$. La incertidumbre expandida de esta fórmula es $0,01 \text{ kg/m}^3$ de 10°C a 30°C y $0,02 \text{ kg/m}^3$ de 0°C a 10°C . [5]

Si el líquido utilizado es agua puede emplearse la ecuación de Tanaka, que para el agua bidestilada (alto nivel de pureza y libre de dióxido de carbono), puede asumirse como la más adecuada ya que nos entrega una incertidumbre expandida de $0,02 \text{ kg/m}^3$.

$$\rho_w = b_5 \left[1 - \frac{(t+b_1)^2 \cdot (t+b_2)}{b_3 \cdot (t+b_4)} \right] \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Donde:

ρ_w : densidad del agua

$$b_1 = -3,983035$$

$$b_2 = 301,797$$

$$b_3 = 522528,9$$

$$b_4 = 69,34881$$

$$b_5 = 999,97495 \text{ kg/m}^3$$

El valor de t es la temperatura del agua y está dado en °C. [13]

Capilaridad

El efecto de la capilaridad ocurre debido a la tensión superficial entre el líquido y el tubo que lo compone. La tensión superficial es una medida de la fuerza elástica que existe en la superficie de un líquido. La capilaridad muestra porque el agua sube espontáneamente en un tubo capilar cuando una delgada película de agua se adhiere a las paredes del tubo de vidrio. La capilaridad es el resultado de dos tipos de fuerzas, una de ellas es la cohesión que se da entre moléculas semejantes (como las moléculas de agua) y la otra fuerza es conocida como la adhesión que es una atracción entre moléculas distintas (moléculas del agua y las del tubo de vidrio). Si la adhesión es más fuerte que la cohesión, el contenido del tubo será impulsado hacia arriba, este proceso continua hasta que la fuerza adhesiva se contrarresta por el peso del agua del tubo (ver figura 2.11).

En el caso del mercurio la cohesión es mayor que la adhesión y lo que se observa es una depresión del nivel del mercurio. [6]

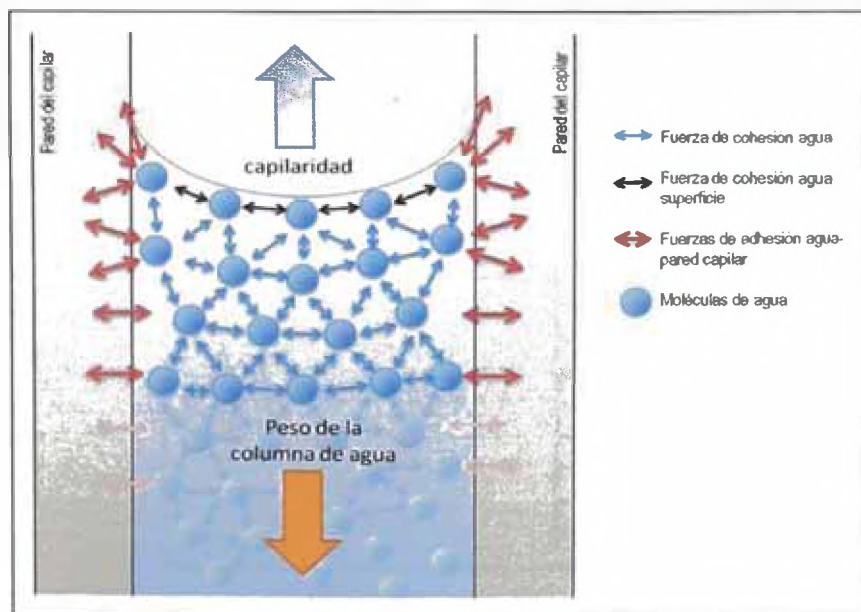


Figura 2.11 Efecto de la capilaridad entre un tubo de vidrio y el agua, se observa la acción de las fuerzas de cohesión y adhesión.

Como se puede observar en la figura 2.12, para el agua la fuerza de adhesión es mayor que la fuerza de cohesión en consecuencia el líquido sube por el tubo capilar.

Para el mercurio la cohesión es mayor que la adhesión y se observa una depresión del líquido en el tubo capilar.

Una observación importante es que el menisco formado en el tubo con agua es cóncavo o redondeado hacia abajo, mientras que en el tubo con mercurio el menisco formado es convexo o redondeado hacia arriba.

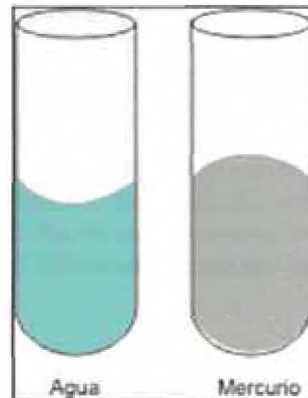


Figura 2.12 Formación del menisco en tubo capilar con agua y con mercurio.

Paralaje

El nivel del menisco generado en el manómetro debe ser leído al mismo nivel que la altura de los ojos. Fijado el nivel de los ojos con el menisco se eliminan lecturas distorsionadas calculadas por el ángulo de lectura.

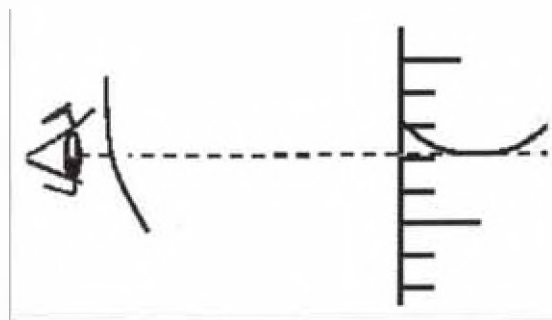


Figura 2.13 Forma correcta de lectura de la columna líquida. La altura de los ojos debe estar al nivel del menisco.

Inclinación de la escala de la columna líquida

El efecto por una inclinación de la escala será de la forma

$$d' = d \cdot \cos\varphi$$

Siendo d la distancia entre trazos reales de la escala, d' la distancia entre trazos corregidos y φ el posible ángulo de inclinación.

La corrección máxima por inclinación de la escala de la columna dependerá del instrumento con la que se asegure su verticalidad.

Con φ el error máximo que se puede cometer al asegurar la verticalidad, por ejemplo, con un nivel de burbuja puede ser 1° .

Diferencia de alturas

Cuando se realicen comparaciones entre un manómetro y una columna líquida, en principio ambos se deben colocar al mismo nivel de referencia o que esta diferencia de alturas sea la menor posible, tal como se observa en la figura 2.14. Si no es posible mantener una diferencia de alturas mínima, la variación de presión por diferencias de alturas viene dada por la expresión: [5]

$$\Delta_R = (\rho_g - \rho_a) \cdot g_l \cdot L \quad \text{(Ecuación 2.7)}$$

Δ_R : Es la corrección por diferencia de alturas.

ρ_g : es la densidad del fluido generador de la presión, ρ_a es la densidad del aire, g_l es la gravedad local y L la diferencia de alturas entre el nivel de referencia de la columna líquida y el manómetro a medir. Por lo general el nivel de referencia del manómetro a medir se encuentra en su parte central.

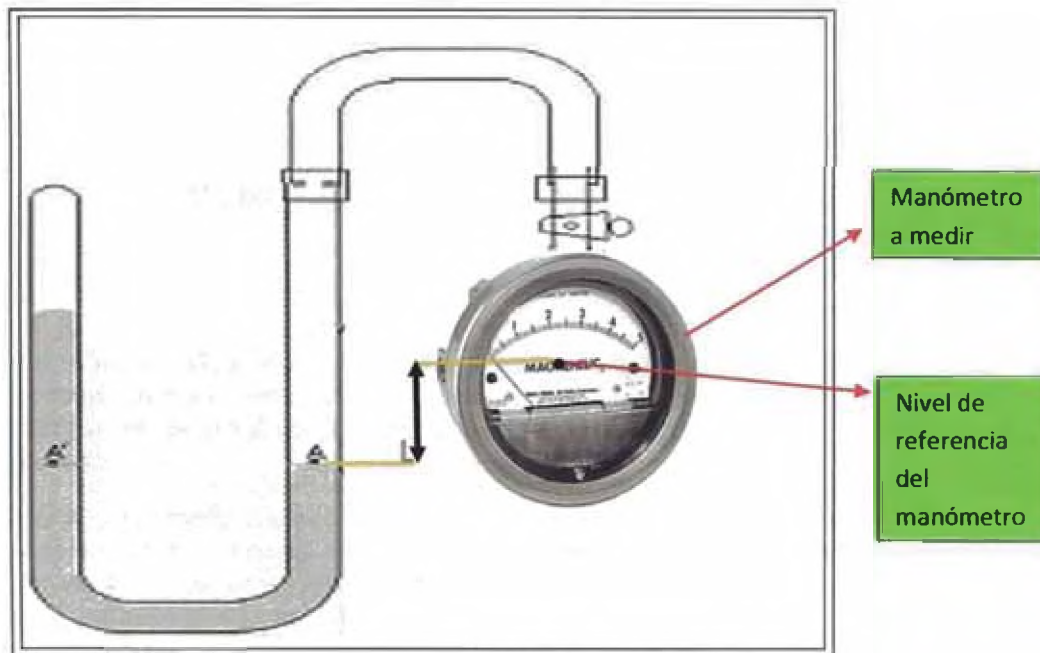


Figura 2.14 Diferencia de altura L entre una columna líquida y un manómetro.

La diferencia de alturas L , será positiva cuando el nivel de referencia del manómetro a medir se encuentra más bajo que el nivel de referencia de la columna líquida.

En el caso que se utilice aire como fluido generador de la presión, el valor Δ_R es insignificante. Para la calibración de manómetros industriales su valor es cero, por lo cual este aporte en la medición se desprecia.

CAPÍTULO 3

CONSTRUCCIÓN DEL MANÓMETRO PATRÓN

Con la información teórica detallada en el capítulo dos, a continuación explicaré la forma como se construyó un manómetro patrón de columna líquida de agua, el cual será utilizado para realizar calibraciones de manómetros diferenciales utilizando un procedimiento que será explicado más adelante.

Para la construcción de este manómetro de columna líquida de agua inicialmente se realizó un diseño de como estaría compuesto. Se realizaron mediciones, estudio de los materiales, así como la elección de cada pieza que serviría para ensamblarlo.

3.1 Materiales y piezas utilizadas

Los materiales utilizados fueron los siguientes:

Placa de acero inoxidable: Inicialmente tenía una longitud de 38cm x 28 cm x 1,2 mm de espesor. Esta placa sirve como una base inicial donde se colocará un bloque sólido de acero que estará unido a dos tubos de vidrio. Posee también tres reguladores de altura (dos atrás y una adelante) y un nivel de burbuja que servirá para mantener la posición vertical correcta y descartar cualquier error en la formación de ángulo por inclinación. Posteriormente a la placa se le realizó un doblado en los lados laterales para tener el diseño que se muestra en la figura 3.1

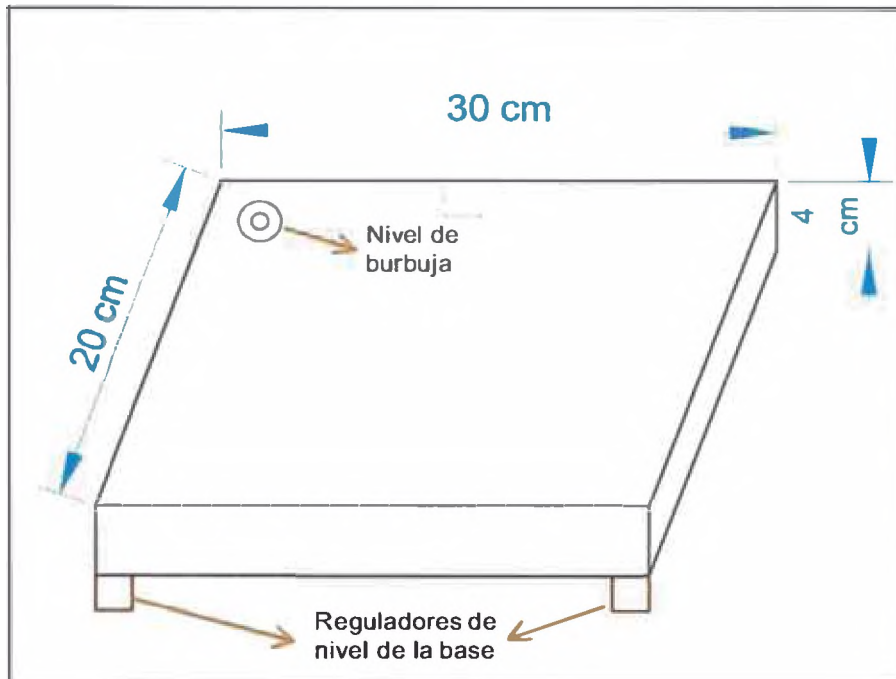


Figura 3.1 Placa de acero inoxidable donde se colocará un bloque que irá unido con dos tubos de vidrio.

Bloque de acero inoxidable: Se eligió este material debido a la robustez del mismo para disminuir la transmisión que se pueda generar por cualquier efecto vibratorio. Este bloque de 10cm x 6cm x 5cm irá colocado sobre la placa inicial. En su superficie estarán unidos dos tubos de vidrio y en la parte posterior una barra de aluminio sobre la cual se colocará una regla en milímetros. Este bloque tendrá perforaciones que permitirán unir a los tubos de vidrio para de esta forma asemejarlo a un manómetro en forma de U.

A continuación en la figura 3.2 se muestra el esquema del bloque de acero inoxidable.

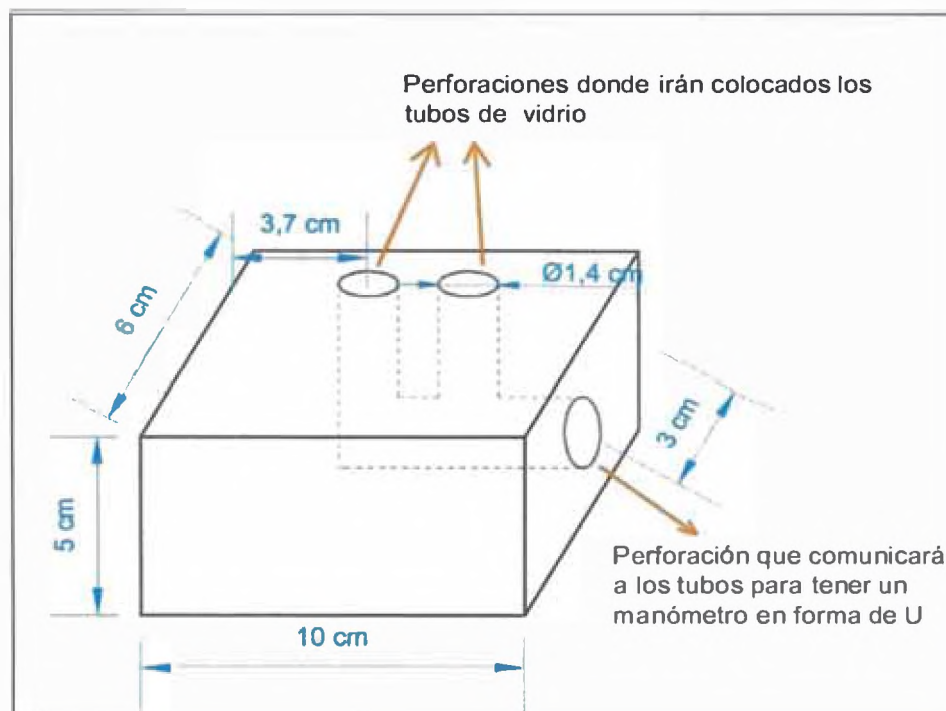


Figura 3.2 Bloque de acero donde irán colocados dos tubos de vidrio para formar el manómetro en forma de U. Las perforaciones se encuentran aproximadamente en el centro de las caras.

Barra de aluminio trefilado: Se escogió el aluminio trefilado ya que es un material más ligero que el acero y permite una mejor manipulación para los diversos cortes y diseños que se realizaron sobre la barra.

Esta pieza irá unida en la parte posterior del bloque de acero, y además se colocará una regla en milímetros que estará por detrás de los tubos de vidrio, para que se pueda visualizar la medición debido a la transparencia del vidrio y del fluido que será agua destilada. El diseño de esta pieza se observa en la figura 3.3

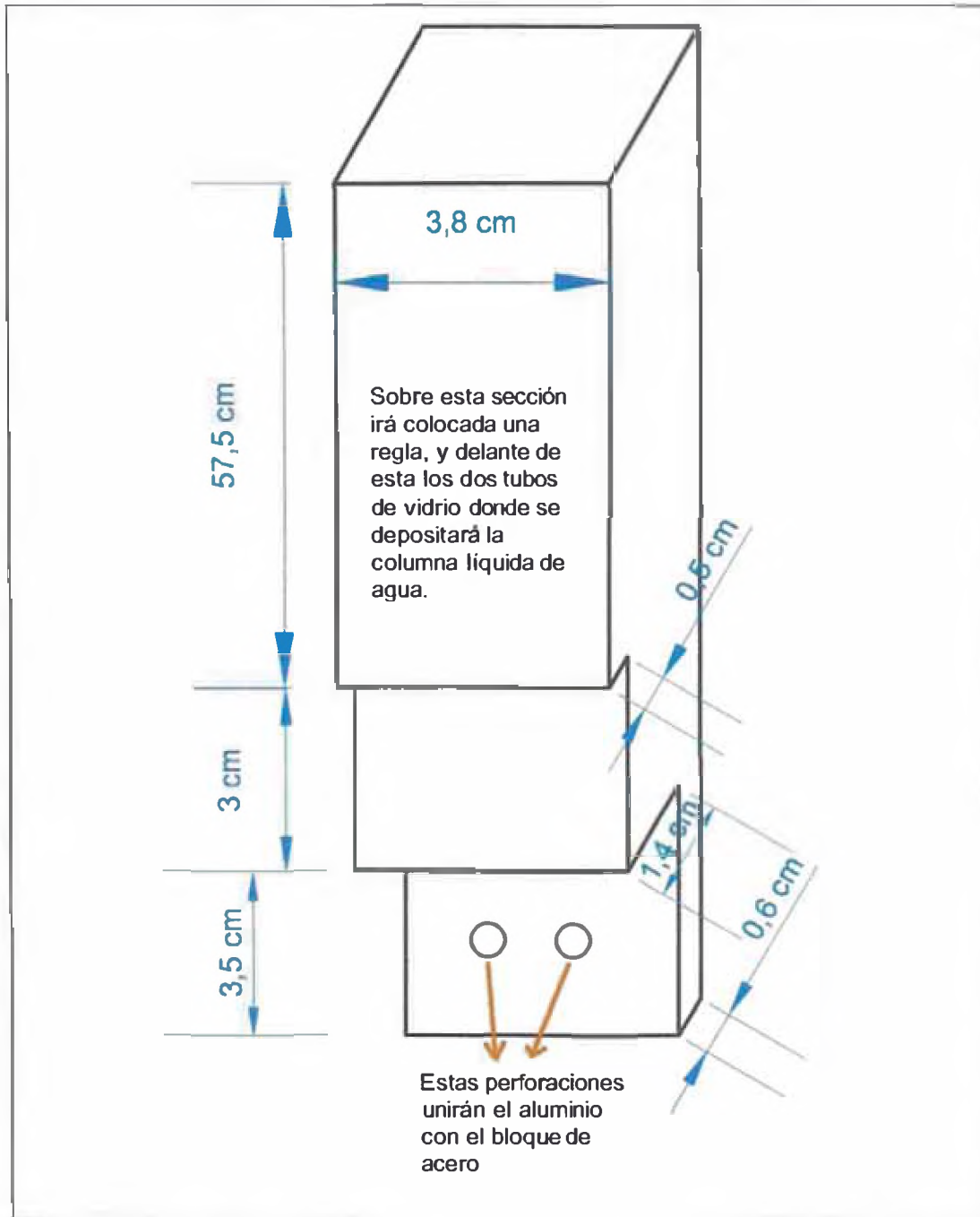


Figura 3.3 Barra de aluminio que irá unido al bloque de acero. Servirá como soporte para la columna de agua.

Regla metálica: La regla utilizada es de acero con una longitud de 60 cm y resolución de 1 mm. La regla se colocará sobre la barra de aluminio y servirá como escala para visualizar las mediciones generadas en la columna líquida de agua. Las unidades de la regla en centímetros, se debe a que el Servicio Nacional de Metrología emite certificados de calibración de instrumentos de longitud utilizando como unidad base del SI al metro (ver anexo I).



Figura 3.4 Regla de acero que servirá como escala para la medición de la columna de agua.

Tubos de vidrio: El tipo de vidrio utilizado es el pírex, un material muy utilizado en laboratorios ya que es más resistente que el vidrio común por su durabilidad y su resistencia calórica. En estos tubos se depositará el agua y se observará la columna líquida cuando se genere presión sobre uno de ellos. Estos tubos irán por encima de la regla para que se pueda visualizar la medición de la columna líquida de agua.



Figura 3.5 Posición de los tubos de vidrio sobre la regla para que se pueda visualizar la columna de agua.

Prensaestopas: Para mantener la verticalidad y el sellado entre los tubos de vidrio y el bloque de acero se utilizaron dos prensaestopas, las cuales poseen en su interior un o-ring para evitar fugas posibles del líquido.

Estas prensaestopas van enroscadas en el bloque de acero y sujetan a los tubos de vidrio.



Figura 3.6 En el lado izquierdo se muestra una prensaestopa y en el derecho se observa como van enroscadas al bloque y sujetando a los tubos de vidrio.

Habiendo realizado una explicación de todos los materiales utilizados, se ensamblará cada parte para dar forma al patrón de columna líquida de agua y así obtener el diseño propuesto que nos servirá para realizar calibraciones de manómetros diferenciales con un alcance máximo de 20 pulgadas de agua.

El diseño final es el que se muestra en la siguiente imagen.

En el Anexo C, se muestran más imágenes del manómetro patrón.



Figura 3.7 Diseño del manómetro patrón de columna líquida de agua.

3.2 Instalación del manómetro a calibrar y patrón

Este patrón ha sido creado principalmente para calibrar manómetros diferenciales de 5 pulgadas de agua, pero por su alcance puede utilizarse hasta instrumentos de 20 pulgadas de agua.

Instalación del manómetro a calibrar

El tipo de manómetro diferencial a calibrar tiene las siguientes características:

Marca:	Magnehelic
Alcance:	5 pulgadas de agua
División:	0,1 pulgada de agua
Clase de exactitud:	2%



Figura 3.8 Modelo de manómetro diferencial que será calibrado con el patrón de columna líquida.

Estos manómetros poseen en la parte posterior cuatro tomas de conexiones, dos para la conexión de presión alta y dos para la conexión de presión baja.

Otros tipos de manómetros diferenciales solo poseen una entrada para la toma alta y otra entrada para la toma baja, sin embargo la forma de funcionamiento e instalación es similar. Aquí se explicará solo el manómetro diferencial mencionado anteriormente ya que por el momento es el instrumento más utilizado en la empresa.

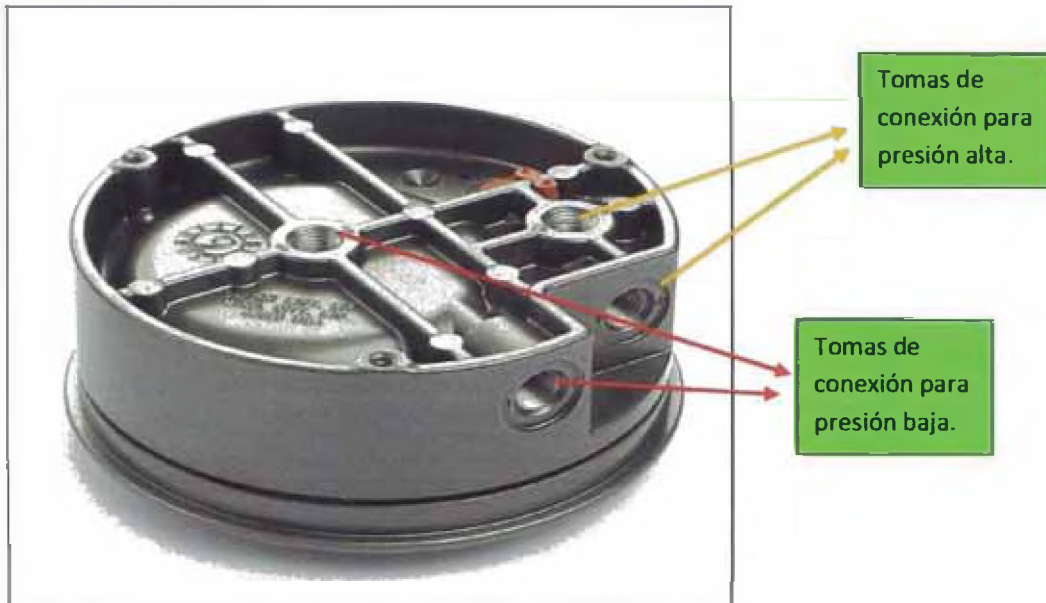


Figura 3.9 Parte posterior de un manómetro diferencial. Se observa que posee dos tomas de conexión para altas y dos para bajas.

Para poder realizar la calibración del manómetro diferencial tenemos que realizar una configuración adecuada en las conexiones.

Ya que se cuenta con un generador de presión, las tomas de presión baja estarán abiertas y afectadas solo por la presión atmosférica (o también una de ellas puede estar abierta y la otra sellada), mientras que para las tomas de presión alta, una estará sellada y la otra conectada a un generador de presión necesariamente.

De esta manera se tendrá un manómetro diferencial que medirá la diferencia de presiones entre la presión alta (debida al generador de presión) y la presión atmosférica (presión baja), en consecuencia el manómetro diferencial funcionará como un instrumento que mide presión manométrica o relativa ya que toma como referencia a la presión atmosférica. [4]

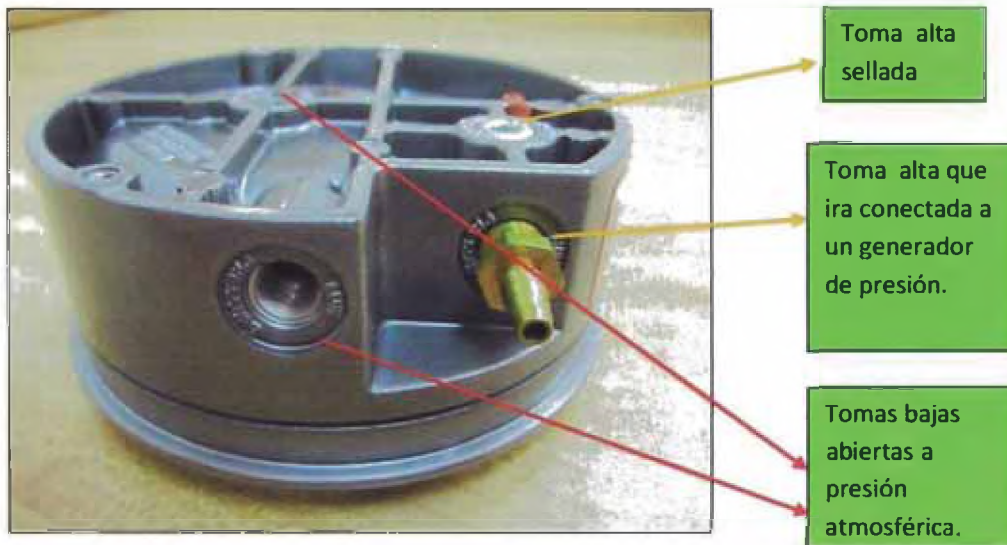


Figura 3.10 Configuración de las tomas de conexión del manómetro diferencial que será calibrado.



Figura 3.11 Bomba neumática o generador de presión. Posee un conector con dos salidas, una estará conectada al patrón y la otra al manómetro diferencial.

Instalación del patrón

A continuación veremos las conexiones que se deben realizar en el patrón.

Se conectará uno de los tubos de vidrio a una manguera de jebe que esta acoplada a un generador de presión, mientras que el otro tubo estará abierto a la presión atmosférica.



Figura 3.12 Colocación de los tubos de vidrio del patrón de columna de agua.



Figura 3.13 Bomba neumática acoplada al patrón y al manómetro diferencial.

Con la bomba neumática se genera presión en ambos instrumentos conectados en línea observando que empieza a formarse la columna de agua en el patrón y el movimiento de la aguja en el manómetro diferencial, de esta forma se inicia la calibración.

Es así que hemos logrado crear un sistema capaz de realizar calibraciones de manómetros diferenciales, utilizando como patrón a un manómetro de columna líquida de agua.

Las pruebas y cálculos realizados se mostrarán en el capítulo 5, donde se verificará la eficacia del sistema.



Figura 3.14 Distribución final de todos los instrumentos antes de iniciar la calibración.

3.3 Mantenimiento y cuidados

Para mantener en buen estado y conservación el patrón se recomienda lo siguiente:

Mantener las condiciones ambientales controladas en el lugar de trabajo para evitar cualquier efecto provocado por la dilatación.

Utilizar solo agua destilada y realizar su cambio cada seis meses, de esta manera se asegura que el agua utilizada se mantendrá lo más limpia posible ante cualquier partícula que pueda contaminar el líquido.

Limpia los tubos de vidrio con un disolvente especial para la suciedad o grasa cada vez que se cambie el agua destilada.

Cuando no se utilice el patrón, proteger los orificios de los vidrios con algún tipo de tapa u objeto similar para evitar que se contamine el patrón.

Dado que la presión con la cual se trabaja es muy baja, se sugiere el cambio los o-rings de las prensaestopas cada doce meses, esto puede variar dependiendo la frecuencia de uso del patrón y los cuidados que se tengan del mismo.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

En este capítulo desarrollaremos un procedimiento de calibración para manómetros diferenciales, utilizando como patrón un manómetro de columna líquida de agua, acorde a las necesidades que exigen instrumentos de este tipo.

4.1 Fundamento del método

La calibración de instrumentos de presión diferencial se basa en el método de comparación directa de la indicación del instrumento bajo calibración y el valor de presión lograda con el manómetro de columna líquida. Los manómetros a calibrar serán de clase de exactitud menor o igual a 2%.

4.2 Instrumentos y equipos de medición

- Manómetro de columna líquida con clase de exactitud 0,1.
- Bomba neumática para generar las presiones necesarias de forma lenta y suave, y que las pueda mantener de forma estable.

4.3 Materiales y/o equipos auxiliares

- Termómetro para temperatura ambiente con exactitud de $\pm 1^\circ\text{C}$.
- Higrómetro con exactitud de $\pm 5\%$ HR.
- Medidor de altura.
- Termómetro para medición de temperatura del fluido con exactitud de $0,2^\circ\text{C}$.
- Barómetro con exactitud de ± 5 mbar.
- Lupa.
- Empaquetadura; cinta teflón, piezas de conexión (niples, codos, reducciones, válvulas). [1]

4.4 Condiciones de calibración

Temperatura de ambiente:	20°C ± 1°C
Humedad relativa del aire:	60% ± 10%
Presión atmosférica:	995 mbar ± 10 mbar

4.5 Consideraciones preliminares

Antes de iniciar el proceso de calibración se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Realizar una inspección visual del manómetro diferencial a calibrar.
2. Revisar la información técnica del equipo a calibrar tales como instrumentos de conexión y operación.
3. El manómetro diferencial a calibrar deberá mantenerse en el laboratorio durante no menos de 12 horas para que alcance su estabilidad térmica.
4. El nivel de referencia del sensor del manómetro a calibrar estará aproximadamente en el centro de su carátula.

4.6 Procedimiento de calibración

En un registro de medición se anotarán los datos y observaciones concernientes a la calibración efectuada.

El instrumento de presión a calibrar se debe instalar en línea con el manómetro de columna líquida utilizando la menor cantidad de conexiones y adaptadores a fin de minimizar las posibles pérdidas de presión por fugas en las conexiones.

La calibración se efectuará en no menos de cinco valores de presión distribuidos en todo el alcance de indicación del manómetro a calibrar.

Asegurar la verticalidad del manómetro de columna líquida.

Nivelar la base del manómetro patrón con ayuda del nivel de burbuja.

4.6.1 Selección del patrón

Para la selección del patrón se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El alcance de indicación del instrumento patrón debe de ser mayor o igual al alcance de indicación del instrumento a calibrar.
2. La incertidumbre del patrón deberá ser menor o igual a la tercera parte del valor del error máximo permitido del instrumento a calibrar.

4.6.2 Realización de las mediciones

1. Verificar que la fuente de generación de presión se encuentre en cantidad suficiente (aire o gas nitrógeno).
2. Instalar el instrumento de presión a calibrar directamente al manómetro de columna líquida.

3. Verificar la indicación cero del instrumento de presión a calibrar, si se diera el caso de manómetros con indicación digital poner la indicación en cero antes de la aplicación de presión.
4. Para los instrumentos de indicación analógica antes de registrar la lectura se deberá dar ligeros golpes sobre la carátula del manómetro a calibrar.
5. El lugar donde se efectúa la calibración no debe estar sujeto a vibraciones o perturbaciones que produzcan una oscilación de la aguja del manómetro bajo calibración o la indicación del instrumento patrón.
6. Minimizar la diferencia de altura entre el nivel de referencia del patrón y del instrumento bajo calibración para eliminar la corrección por este efecto. (la diferencia de niveles debe ser menor a 10 cm).
7. Generar presión hasta el 100% del alcance de medición del manómetro a calibrar y este debe permanecer a dicha presión no menos de un minuto. Mientras se va generando la presión se debe observar si se presentan fugas en las conexiones, lo que se evidencia en el descenso de la indicación del manómetro de columna líquida. Si ocurre el descenso de la indicación se deberá retirar la presión, corregir el defecto y volver a montar el manómetro a calibrar.
8. Se realizarán dos series de medición tal como se muestra en la figura 4.1 tanto en ascenso y descenso en no menos de cinco puntos distribuidos entre el 0% y 100% del alcance de indicación del instrumento a calibrar (ver el capítulo 6, discusiones).

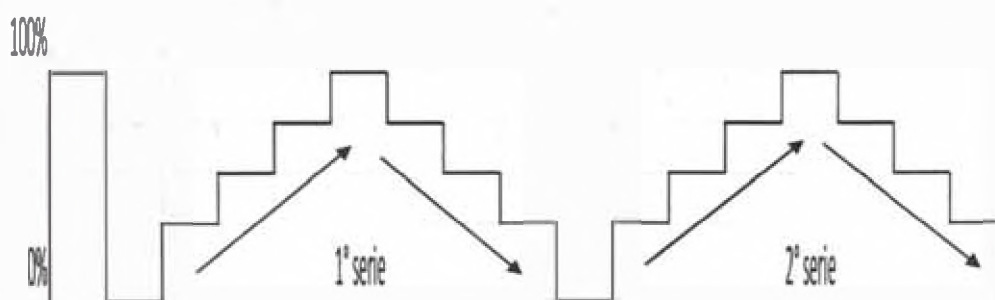


Figura 4.1 Secuencia de mediciones en la calibración.

9. Seleccionar los valores nominales de presión a calibrar tomando de referencia el manómetro de columna líquida y fijar estos como puntos de presión de calibración.
10. Generar presión y realizar la medición de altura de la columna líquida desplazada, registrar dicho valor y registrar también el valor de la indicación del manómetro a calibrar, de la temperatura del fluido de la columna y las condiciones ambientales.
11. Al llegar al punto de presión máximo seleccionado y luego de registrar el valor indicado permanecer 1 minuto en dicho valor para luego ir disminuyendo la presión (prueba de descenso) hasta conseguir los mismos valores de presión logrados en el ascenso.
12. Repetir los puntos 10 y 11 para la segunda prueba de ascenso y descenso.
13. El proceso de calibración culmina cuando se retira toda la presión generada y tanto la columna como la indicación del manómetro a calibrar se encuentran en la lectura cero.

4.6.3 Determinación de los errores de indicación y de histéresis

Error de indicación: El error de indicación E de ascenso y descenso para cada valor de presión seleccionado estará dado por la siguiente ecuación (ver Anexo A).

$$E_{\uparrow\downarrow} = \bar{I}_{X\uparrow\downarrow} - P_{col} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Donde

$\bar{I}_{X\uparrow\downarrow}$: Es la indicación promedio del manómetro a calibrar tanto en ascenso como para descenso.

Para el ascenso el promedio de la indicación será

$$\bar{I}_{X\uparrow} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{X\uparrow i}}{n}$$

Y para el descenso

$$\bar{I}_{X\downarrow} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{X\downarrow i}}{n}$$

El valor de n es la cantidad de eventos o repeticiones que se realizan, para nuestro caso $n=2$.

$P_{col} = \rho g h$: Es la indicación del patrón de columna de agua.

Para el cálculo de columna de agua se debe considerar las características de cada componente.

Gravedad: El valor de la gravedad local es $9,780665 \text{ m/s}^2$, pero también puede utilizarse la siguiente fórmula:

$$g_l = 9,7803184 \cdot \left(1 + 5,3024 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}^2(\varnothing) + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot \text{sen}^2(2\varnothing) \right) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H \quad (\text{De la ec. 2.3})$$

Donde \varnothing es la latitud y H la altitud con respecto al nivel del mar, con una exactitud del 0,01%.

Densidad: La densidad del agua a la presión de una atmósfera y temperatura de 20°C es $998,2067 \text{ kg/m}^3$. También puede ser calculado directamente, o si no se cuenta con este valor puede usarse la siguiente ecuación:

$$\rho_w = b_5 \left[1 - \frac{(t+b_1)^2 \cdot (t+b_2)}{b_3 \cdot (t+b_4)} \right] \quad (\text{De la ecuación 2.6})$$

$$b_1 = -3,983035$$

$$b_2 = 301,797$$

$$b_3 = 522528,9$$

$$b_4 = 69,34881$$

$$b_5 = 999,97495 \text{ kg/m}^3$$

t : Temperatura del agua en °C.

Medición de la altura de la columna: Para la escala de la regla se debe considerar el efecto de la dilatación debido a la variación de temperatura.

$$h = h_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (\text{De la ecuación 2.4})$$

Donde:

h: Medición de la altura corregida por temperatura.

h₀: Es la medición de altura.

α: Coeficiente de expansión térmica del material de la escala. Para el acero el coeficiente de expansión es $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Δt: Variación de la temperatura respecto a la temperatura de referencia 20°C.

Error de histéresis: El error de histéresis **H** en cada punto de calibración será:

$$H = E_{I\downarrow} - E_{I\uparrow}$$

E_{I↓} : es el error de indicación en descenso.

E_{I↑} : es el error de indicación en ascenso.

De la ecuación 4.1, manteniendo las condiciones ambientales estables, P_{col} tendrá el mismo valor tanto para ascenso como descenso, el error de histéresis se reduce entonces:

$$H = \bar{I}_{X\downarrow} - \bar{I}_{X\uparrow} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Donde

H: Error de histéresis.

$\bar{I}_{X\downarrow}$: Indicación promedio de presión en el instrumento a calibrar en ascenso.

$\bar{I}_{X\uparrow}$: Indicación promedio de presión en el instrumento a calibrar en descenso.

ρ: Densidad del líquido.

g_l: Gravedad local.

h: Altura. [8]

4.7 Cálculo de incertidumbre

Para el cálculo de la incertidumbre del error de indicación E , partamos de la ecuación 4.1 (revisar el Anexo B):

$$E_{\uparrow\downarrow} = \bar{I}_{X\uparrow\downarrow} - P_{col}$$

Además $\bar{I}_{X\uparrow\downarrow}$, está conformado por los siguientes términos:

$$\bar{I}_{X\uparrow\downarrow} = \bar{I}_X + \delta I_{rep} + \delta I_{div} + \delta I_{hist}$$

Donde :

\bar{I}_X : Indicación promedio del manómetro a calibrar.

δI_{rep} : Corrección debida a la repetibilidad del manómetro a calibrar.

δI_{div} : Corrección debida a la división de escala.

δI_{hist} : Corrección debida a la histéresis.

Las correcciones δI_{div} , δI_{hist} , δI_{rep} son despreciables, pero su aporte como incertidumbre es significativo.

Tenemos también:

$$P_{col} = \rho g_l h + \delta I_p + \delta I_{g_l} + \delta I_\rho + \delta I_h$$

Donde

$\rho g_l h$: Indicación del patrón de columna de agua.

δI_p : Corrección debida a la resolución de la columna.

δI_{g_l} : Corrección debida a la gravedad local.

δI_ρ : Corrección debida a la densidad del agua.

δI_h : Corrección debida a la escala de la regla.

Las correcciones δI_p , δI_{g_l} , δI_ρ , δI_h son despreciables, pero su aporte como incertidumbre es significativo.

Entonces la relación funcional para calcular la incertidumbre del error de indicación (ver Anexo B) estará dada por:

$$E_{\uparrow\downarrow} = f(\bar{I}_X; \delta I_{rep}; \delta I_{div}; \delta I_{hist}; \rho g_i h; \delta I_p; \delta g_i; \delta \rho; \delta h) \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

De la ecuación 4.3, tenemos que la incertidumbre estándar combinada $u_c(E_{\uparrow\downarrow})$ (ver Anexo B) del error de indicación $E_{\uparrow\downarrow}$ esta dada por:

$$u^2_c(E_{\uparrow\downarrow}) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)$$

Donde:

$$c_i = \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]: \text{Coeficientes de sensibilidad (ver Anexo B).}$$

$u(x_i)$: Incertidumbre asociada a cada magnitud de influencia.

Calculamos los coeficientes de sensibilidad.

$$\frac{\partial E_{\uparrow\downarrow}}{\partial I_{X\uparrow\downarrow}} = 1$$

$$\frac{\partial E_{\uparrow\downarrow}}{\partial h} = -\rho g_i$$

$$\frac{\partial E_{\uparrow\downarrow}}{\partial g_i} = -\rho h$$

$$\frac{\partial E_{\uparrow\downarrow}}{\partial \rho} = -g_i h$$

La incertidumbre combinada $u_c(E_{\uparrow\downarrow})$ será:

$$u_c(E_{\uparrow\downarrow}) = \sqrt{u^2(I_{p\uparrow\downarrow}) + u^2(P_{col}) + u^2(I_{X\uparrow\downarrow})} \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Donde:

- $u(I_{p\uparrow\downarrow})$: Incertidumbre debida a la resolución de la columna del patrón.

$$u(I_{p\uparrow\downarrow}) = \frac{div_{escala}}{2p\sqrt{3}} ; \text{ (Distribución rectangular Tipo B, ver Anexo B)}$$

El valor de p , es el número de partes en que se puede dividir la división de escala de la columna.

- $u(P_{col}) = \sqrt{(\rho g_i u(h))^2 + (h g_i u(\rho))^2 + (h \rho u(g_i))^2}$ **Incertidumbre por error de la columna**
 $u(h)$: Incertidumbre de la escala o regla (dist. rectangular Tipo B).

$u(\rho)$: Incertidumbre de la densidad del agua (dist. rectangular Tipo B).

$u(g_l)$: Incertidumbre de la aceleración de la gravedad local (dist. rectangular Tipo B).

El valor de la componente de incertidumbre debida al manómetro calibrar:

$$u(I_{X11}) = \sqrt{u_{div}^2(I_{X11}) + u_{rep}^2(I_{X11}) + u_{hist}^2(I_{X11})} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

- **Incertidumbre debido a la resolución del instrumento a calibrar** (dist. rectangular Tipo B)

$$u_{div}(I_{X11}) = \frac{div.escala}{2m\sqrt{3}}$$

m : Número de partes en las que se puede dividir la división de escala del instrumento a calibrar.

- **Incertidumbre debido a la repetibilidad del instrumento** (dist. normal Tipo A, ver anexo B)

$$u_{rep}(I_{X11}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{Xi11} - \bar{I}_{X11})^2}{n(n-1)}}$$

n : Número de repeticiones realizadas.

- **Incertidumbre por histéresis** (dist. rectangular Tipo B)

$$u_{hist}(I_{X11}) = \frac{H}{2\sqrt{3}}$$

Entonces el valor de u_c será:

$$u_c = \sqrt{u^2(I_{p11}) + (\rho g_l u(h))^2 + (h g_l u(\rho))^2 + (h \rho u(g_l))^2 + u_{div}^2(I_{X11}) + u_{rep}^2(I_{X11}) + u_{hist}^2(I_{X11})}$$

Finalmente la incertidumbre expandida (ver anexo B) es $U = k \times u_c$

Donde $k=2$, es el factor de probabilidad de cobertura, que corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

Por lo tanto la incertidumbre expandida será: $U = 2u_c$ [9]

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

Ahora veremos un ejemplo de calibración de un manómetro diferencial donde se utilizarán todas las pautas explicadas en el procedimiento descrito anteriormente.

Las unidades del manómetro a calibrar estarán en **inH₂O (pulgadas de agua)**

5.1 Calibración de un manómetro diferencial

Datos del manómetro diferencial y del patrón

- El manómetro a calibrar tiene las siguientes características:

Alcance: 5 inH₂O

División de escala: 0,1 inH₂O

Clase de exactitud: 2%

Error máximo permitido: 0,1 inH₂O

Número de partes en que se puede dividir la división de escala: m=5

- El patrón tiene las siguientes características:

Alcance: 52 mm H₂O (20 inH₂O)

División de escala: 1 mm H₂O (0,04 inH₂O)

Clase de exactitud: 0,1%

Densidad del agua (obtenida por la fórmula 2.6): 998,20 kg/m³

Incertidumbre de la densidad del agua: 0,01 kg/m³

Gravedad local: 9,780 m/s²

Incertidumbre de la gravedad local: 0,00098 m/s²

Coefficiente de dilatación lineal del acero α : $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Incertidumbre de la escala o medidor de altura: 0,1 mm (ver certificado de calibración Anexo D)

Número de partes en que se puede dividir su división de escala: p=5

Temperatura de referencia 20°C

Los puntos elegidos para la calibración son: **1 inH₂O, 2 inH₂O, 3 inH₂O, 4 inH₂O, 5 inH₂O**

- En la primera prueba de ascenso y descenso se obtuvo lo siguiente:

Para las condiciones ambientales se utilizó un termohigrómetro y barómetro calibrado (ver certificado de calibración Anexo D), obteniéndose lo siguiente:

$T_o=20,0^\circ\text{C}$ $HR_o = 56,3\%$ $P_{atm_o} = 997,6 \text{ mbar}$

$T_f=20,1^\circ\text{C}$ $HR_f = 58,9\%$ $P_{atm_f} = 997,5 \text{ mbar}$

Además de los datos:

$\rho_{agua} = 998,20 \text{ kg/m}^3$ y $\alpha = 11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

La temperatura del agua en la columna registrada es 20.1°C. (Ver certificado del termómetro Anexo D)
Para el patrón se obtiene el valor de la columna en unidades de Pascal

Tabla 5.1 Datos de la medición del patrón en la primera prueba.

h _o (mm)	Temp (°C)	h (mm)	P _{col} (Pa)
25,4	20,1	25,4	248,0
50,8	20,1	50,8	496,0
76,2	20,1	76,2	743,9
101,6	20,1	101,6	991,9
127,0	20,1	127,0	1239,9

Como el manómetro a calibrar está en unidades de inH₂O, multiplicaremos el valor de la columna por el factor de conversión: $1 \text{ Pa} = 4,014742 \times 10^{-3} \text{ inH}_2\text{O}$. [10]

Los datos obtenidos para el manómetro a calibrar y el patrón fueron los siguientes:

Tabla 5.2 Valores en inH₂O para la columna y el manómetro a calibrar en la primera prueba.

P _{col} (inH ₂ O)	I _{X↑} (inH ₂ O)	I _{X↓} (inH ₂ O)
1,00	1,02	1,00
1,99	1,98	1,98
2,99	3,00	3,02
3,98	4,02	3,98
4,98	5,00	5,00

- De manera similar en la segunda prueba de ascenso y descenso se obtuvo lo siguiente:

Condiciones ambientales

T_o=20,1°C HR_o = 57,1% P atm_o = 997,4 mbar

T_r=20,2°C HR_r = 55,7% P atm_r = 997,1 mbar

La temperatura del agua de la columna registrada en esta medición es 20,2 °C.

Tabla 5.3 Datos de la medición del patrón en la segunda prueba.

h _o (mm)	Temp (°C)	h (mm)	P _{col} (Pa)
25,4	20,2	25,4	248,0
50,8	20,2	50,8	496,0
76,2	20,2	76,2	743,9
101,6	20,2	101,6	991,9
127,0	20,2	127,0	1239,9

Para el patrón y el manómetro a calibrar en la segunda prueba se registraron las siguientes mediciones:

Tabla 5.4 Valores en inH2O para la columna y el manómetro a calibrar en la segunda prueba.

P_{col} (in H ₂ O)	$I_{X↑}$ (in H ₂ O)	$I_{X↓}$ (in H ₂ O)
1,00	1,00	1,02
1,99	2,00	1,98
2,99	3,00	3,02
3,98	4,02	3,98
4,98	5,00	5,00

- Para el cálculo de la incertidumbre combinada usaremos la ecuación 4.4, la cual se analizó en el capítulo 4 :

$$u(E_{1L}) = \sqrt{u^2(I_{P1L}) + u^2(P_{col}) + u^2(I_{X1L})} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

PRIMER PUNTO DE MEDICIÓN: 1 inH₂O

Primero hallamos las aportantes debidas al patrón:

$$u(I_{P1L}) = \frac{1 \text{ mm H}_2\text{O}}{2 \times 5 \times \sqrt{3}} \times 9,806383 \times \frac{\text{Pa}}{\text{mm H}_2\text{O}}$$

$$u(I_{P1L}) = 0,56617 \text{ Pa}$$

$$u(P_{col}) = \sqrt{(\rho g_l u(h))^2 + (h g_l u(\rho))^2 + (h \rho u(g_l))^2}$$

$$\rho g_l u(h) = 998,20 \text{ kg/m}^3 \times 9,780 \text{ m/s}^2 \times 0,1 \text{ mm} = 0,97631 \text{ Pa}$$

$$h g_l u(\rho) = 25,4 \text{ mm H}_2\text{O} \times 9,780 \text{ m/s}^2 \times 0,01 \text{ kg/m}^3 = 0,00248 \text{ Pa}$$

$$h \rho u(g_l) = 25,4 \text{ mm H}_2\text{O} \times 998,20 \text{ kg/m}^3 \times 0,00098 \text{ m/s}^2 = 0,02485 \text{ Pa}$$

Ahora hallamos las aportantes debido al manómetro a calibrar:

$$u(I_{X1L}) = \sqrt{u_{div}^2(I_{X1L}) + u_{rep}^2(I_{X1L}) + u_{hist}^2(I_{X1L})}$$

$$u_{div}(I_{X1L}) = \frac{0,1 \text{ inH}_2\text{O}}{2 \times 5 \times \sqrt{3}} \times 249,082 \times \frac{\text{Pa}}{\text{inH}_2\text{O}} = 1,43808 \text{ Pa}$$

$$u_{rep}(I_{X1L}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{X1Li} - \bar{I}_{X1L})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

El valor de σ que es la desviación estándar se calculará para el punto **1 inH₂O** tanto en ascenso como para descenso, luego se elegirá la mayor de ambas para obtener una incertidumbre que comprenda esta probable variación.

$$\sigma_{ascenso} = 0,01414214 \text{ inH}_2\text{O}$$

$$\sigma_{descenso} = 0,01414214 \text{ inH}_2\text{O}$$

Para este caso ambos valores son iguales, por lo tanto se elige a cualquiera.

Esta operación se realizará para todos los puntos de calibración del manómetro.

$$u_{rep}(I_{X\uparrow\downarrow}) = \frac{0,01414214 \text{ inH}_2\text{O}}{\sqrt{2}} \times 249,082 \times \frac{\text{Pa}}{\text{inH}_2\text{O}} = 2,49082 \text{ Pa}$$

La aportante de incertidumbre por histéresis será:

$$u_{hist}(I_{X\uparrow\downarrow}) = \frac{H}{2\sqrt{3}} = \frac{0,00}{2\sqrt{3}} = 0,00 \text{ Pa}$$

Reemplazando todos estos valores obtenemos la incertidumbre combinada:

$$u_c(1 \text{ inH}_2\text{O}) = 3,08976 \text{ Pa}$$

Y la incertidumbre expandida será $U = k \times u_c$

Donde $k = 2$ es el factor de cobertura para una nivel de confianza del 95%.

Por lo tanto:

$$U(1 \text{ inH}_2\text{O}) = 6,17952 \text{ Pa}$$

De los resultados calculados se obtiene el siguiente cuadro:

PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE PARA EL VALOR DE 1 inH ₂ O						
	Símbolo	Tipo de distribución	Valor numérico (Pa) u_i	Coefficiente de sensibilidad c_i	$c_i u_i$ (Pa)	% en peso
Resolución del instrumento patrón	$u(I_{p\uparrow\downarrow})$	Rectangular Tipo B	0,56617	1	0,56617	3,36
Error de la columna	$u(P_{col})$	Rectangular Tipo B	0,97663	1	0,97663	9,99
Resolución del instrumento a calibrar	$u_{div}(I_{X\uparrow\downarrow})$	Rectangular Tipo B	1,43808	1	1,43808	21,66
Repetibilidad del instrumento a calibrar	$u_{rep}(I_{X\uparrow\downarrow})$	Normal Tipo A	2,49082	1	2,49082	64,99
Error de Histéresis	$u_{hist}(I_{X\uparrow\downarrow})$	Rectangular Tipo B	0,00000	1	0,00000	0,00
Incertidumbre estándar combinada u_c (Pa)					3,08976	100
Incertidumbre Expandida $U_{(k=2)}$ (Pa)					6,17952	

Cuadro 5.1 Contribución porcentual en la incertidumbre para 1 inH₂O.

SEGUNDO PUNTO DE MEDICIÓN: 2 inH₂O

Los cálculos que se realizan son similares a los hallados para el primer punto. Se obtienen los siguientes valores:

PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE PARA EL VALOR DE 2 inH ₂ O						
	Símbolo	Tipo de distribución	Valor numérico (Pa) u_i	Coficiente de sensibilidad c_i	$c_i u_i$ (Pa)	% en peso
Resolución del instrumento patrón	$u(I_{pTi})$	Rectangular Tipo B	0,56617	1	0,56617	3,18
Error de la columna	$u(P_{col})$	Rectangular Tipo B	0,97759	1	0,97759	9,49
Resolución del instrumento a calibrar	$u_{div}(I_{XTi})$	Rectangular Tipo B	1,43808	1	1,43808	20,55
Repetibilidad del instrumento a calibrar	$u_{rep}(I_{XTi})$	Normal Tipo A	2,49082	1	2,49082	61,64
Error de Histéresis	$u_{hisc}(I_{XTi})$	Rectangular Tipo B	-0,71904	1	-0,71904	5,14
Incertidumbre estándar combinada u_c (Pa)					3,17262	100
Incertidumbre Expandida $U_{(k=2)}$ (Pa)					6,34523	

Cuadro 5.2 Contribución porcentual en la incertidumbre para 2 inH₂O.

TERCER PUNTO DE MEDICIÓN: 3 inH₂O

Se obtiene:

PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE PARA EL VALOR DE 3 inH ₂ O						
	Símbolo	Tipo de distribución	Valor numérico (Pa) u_i	Coficiente de sensibilidad c_i	$c_i u_i$ (Pa)	% en peso
Resolución del instrumento patrón	$u(I_{pTi})$	Rectangular Tipo B	0,56617	1	0,56617	5,92
Error de la columna	$u(P_{col})$	Rectangular Tipo B	0,97918	1	0,97918	17,70
Resolución del instrumento a calibrar	$u_{div}(I_{XTi})$	Rectangular Tipo B	1,43808	1	1,43808	38,19
Repetibilidad del instrumento a calibrar	$u_{rep}(I_{XTi})$	Normal Tipo A	0,00000	1	0,00000	0,00
Error de Histéresis	$u_{hisc}(I_{XTi})$	Rectangular Tipo B	1,43808	1	1,43808	38,19
Incertidumbre estándar combinada u_c (Pa)					2,32712	100
Incertidumbre Expandida $U_{(k=2)}$ (Pa)					4,65423	

Cuadro 5.3 Contribución porcentual en la incertidumbre para 3 inH₂O.

CUARTO PUNTO DE MEDICIÓN: 4 inH₂O

De manera similar:

PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE PARA EL VALOR DE 4 inH ₂ O						
	Símbolo	Tipo de distribución	Valor numérico (Pa) u_i	Coefficiente de sensibilidad c_i	$c_i u_i$ (Pa)	% en peso
Resolución del instrumento patrón	$u(I_{PTL})$	Rectangular Tipo B	0,56617	1	0,56617	2,76
Error de la columna	$u(P_{col})$	Rectangular Tipo B	0,98141	1	0,98141	8,29
Resolución del instrumento a calibrar	$u_{div}(I_{XTL})$	Rectangular Tipo B	1,43808	1	1,43808	17,79
Repetibilidad del instrumento a calibrar	$u_{rep}(I_{XTL})$	Normal Tipo A	0,00000	1	0,00000	0,00
Error de Histeréresis	$u_{hist}(I_{XTL})$	Rectangular Tipo B	-2,87615	1	-2,87615	71,17
Incertidumbre estándar combinada u_c (Pa)					3,40940	100
Incertidumbre Expandida $U_{(k=2)}$ (Pa)					6,81880	

Cuadro 5.4 Contribución porcentual en la incertidumbre para 4 inH₂O.

QUINTO PUNTO DE MEDICIÓN: 5 inH₂O

Para el último punto se obtiene:

PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE PARA EL VALOR DE 5 inH ₂ O						
	Símbolo	Tipo de distribución	Valor numérico (Pa) u_i	Coefficiente de sensibilidad c_i	$c_i u_i$ (Pa)	% en peso
Resolución del instrumento patrón	$u(I_{PTL})$	Rectangular Tipo B	0,56617	1	0,56617	9,55
Error de la columna	$u(P_{col})$	Rectangular Tipo B	0,98426	1	0,98426	28,86
Resolución del instrumento a calibrar	$u_{div}(I_{XTL})$	Rectangular Tipo B	1,43808	1	1,43808	61,60
Repetibilidad del instrumento a calibrar	$u_{rep}(I_{XTL})$	Normal Tipo A	0,00000	1	0,00000	0,00
Error de Histeréresis	$u_{hist}(I_{XTL})$	Rectangular Tipo B	0,00000	1	0,00000	0,00
Incertidumbre estándar combinada u_c (Pa)					1,83232	100
Incertidumbre Expandida $U_{(k=2)}$ (Pa)					3,66463	

Cuadro 5.5 Contribución porcentual en la incertidumbre para 5 inH₂O.

Finalmente el resultado de las mediciones para el manómetro a calibrar se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5.5 Expresión de resultados para la calibración del manómetro diferencial.

EXPRESIÓN DE RESULTADOS							
Indicación del instrumento patrón		Indicación del manómetro diferencial		Error de indicación del manómetro diferencial		Error de histéresis	Incertidumbre
(Pa)	(inH ₂ O)	Ascenso (inH ₂ O)	Descenso (inH ₂ O)	Ascenso (inH ₂ O)	Descenso (inH ₂ O)		
248,0	1,00	1,01	1,01	0,01	0,01	0,00	0,02
496,0	1,99	1,99	1,98	0,00	-0,01	-0,01	0,03
743,9	2,99	3,00	3,02	0,01	0,03	0,02	0,02
991,9	3,98	4,02	3,98	0,04	0,00	-0,04	0,03
1239,9	4,98	5,00	5,00	0,02	0,02	0,00	0,01

CAPÍTULO 6

DISCUSIONES

- Como se vio en el capítulo 5, la incertidumbre calculada depende principalmente de los aportes tanto del patrón como del instrumento a calibrar. Es por eso que se debe analizar el valor porcentual de cada aportante para establecer cuál de ellos tiene un mayor impacto y ver la forma de corregirlo y generar una mejora.
- Para el primer punto 1 inH₂O, se observó que la mayor aportante para la incertidumbre es el error por repetibilidad del instrumento a calibrar con un porcentaje del 64,99 %, esto es debido a las propias características del instrumento a calibrar. Lo mismo ocurre para el punto 2 inH₂O. Para tratar de disminuir este valor podría aumentarse el número de mediciones.
- Para el punto 3 inH₂O se observa que el aporte de las incertidumbres por resolución del instrumento a calibrar y por histéresis para cada una es de 38,19 %, debido a que el aporte por la repetibilidad es cero. El aporte por incertidumbre en la columna es de 17,70 %, para mejorar esta aportante se puede utilizar una escala de medición con una menor incertidumbre, ya que para la gravedad y la densidad del agua los valores son estándares.
- Se observa que para todos los puntos de medición el aporte de la incertidumbre por resolución del patrón es menor al 10 %. Si se quiere disminuir este aporte se podría utilizar una lente de aumento para poder tener una mejor resolución.
- Para el punto 4 inH₂O la mayor aportante en la incertidumbre es el error de histéresis con un porcentaje del 71,17 %, esto evidentemente se debe a las características del propio instrumento a calibrar por lo que este error no puede eliminarse.
- Para el punto 5 inH₂O la contribución a la incertidumbre por resolución del instrumento a calibrar tiene un porcentaje del 61,60 %, eso debido a que los aportes por histéresis y repetibilidad son cero. Si se quiere disminuir esta aportante puede utilizarse una lente de aumento que permita visualizar mejor la división de escala del instrumento a calibrar.
- A continuación mostraremos los resultados de calibración obtenidos por otro laboratorio.

Cuadro 6.1 Resultados experimentales obtenido por otro laboratorio de calibración.

Ensayo Ascendente				Ensayo Descendente		Histéresis inH2O	Incertidumbre inH2O
Indicación en Instrumento inH2O	Desviación inH2O	Indicación en Instrumento inH2O	Desviación inH2O				
0,0	0,00	0,0	0,00	0,00		0,06	
1,0	-0,03	1,0	0,01	0,04			
2,0	-0,02	2,0	0,00	0,02			
3,0	-0,08	3,0	0,02	0,10			
4,0	-0,05	4,0	0,02	0,07			
5,0	-0,07	5,0	-0,07	0,00			

Comparando los resultados del Cuadro 6.1, con los resultados obtenidos en la Tabla 5.5, observamos que los errores de indicación (el laboratorio externo utiliza el término desviación que es el equivalente a error de indicación) son similares y se encuentran dentro de lo esperado.

Lo más importante por destacar en esta comparación de resultados es la obtención de la incertidumbre. Mientras que para nuestro caso la mayor incertidumbre obtenida fue de 0,03 inH₂O, la incertidumbre reportada por el otro laboratorio fue de 0,06 inH₂O, esto evidencia que otorgamos resultados más confiables.

- Las mediciones realizadas en la calibración para el ascenso y descenso son solo dos. Si se aumentará la cantidad de mediciones esto podría mejorar la aportante de incertidumbre por repetibilidad, ya que si se realizan más pruebas se tendría una mejor información del instrumento a calibrar. Por motivos de tiempo y disponibilidad del instrumento las pruebas se encuentran limitadas solo a dos mediciones por calibración.
- El tiempo de entrega para la calibración de un manómetro diferencial realizado por un proveedor externo en el mejor de los casos es quince días, mientras que el tiempo de respuesta por parte de nosotros como máximo son dos días. Claramente se está realizando un trabajo más eficaz.
- Una mejora en el futuro para la columna líquida, sería reducirlo de dos tubos de vidrio a uno solo. Ya que de esta forma se realizaría una medición directa, y ya no se tendría que medir las dos columnas.

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

- Se demostró que es posible realizar la construcción de un manómetro de columna líquida que sirva como patrón para realizar mediciones de forma eficaz y coherente.
- Para la calibración de manómetros diferenciales, el uso de una columna líquida de agua asegura la obtención de resultados confiables y con trazabilidad metrológica a Patrones Nacionales.
- En el cálculo de incertidumbre una de las aportantes a considerar es la componente por error de columna, por lo cual, si se quiere mejorar o reducir este valor es necesario adquirir una escala que tenga una mejor exactitud.
- La incertidumbre del error de medición obtenida por este procedimiento es menor comparada con otros laboratorios, lo cual confirma que nuestros resultados son más confiables.
- El uso de un manómetro de columna líquida asegura la realización de una buena medición ya que se trata de un sistema primario y en consecuencia se obtendrán buenas exactitudes en la magnitud de presión.
- Los tiempos de respuesta en la ejecución de las calibraciones es notoriamente menor en comparación a los tiempos ofrecidos por proveedores externos.
- Si se quiere realizar la calibración de manómetros de mayor alcance, se tendrá que aumentar el tamaño de la columna para cubrir los valores deseados.
- Si se desea medir presiones bajas y con buena exactitud con un manómetro de columna, el líquido más adecuado a utilizar es el agua, ya que por tener una menor densidad en comparación a otros fluidos permite tener una mejor resolución de la escala.
- Si se desea medir presiones altas o absolutas, el líquido más adecuado en un manómetro de columna es el mercurio, ya que debido a su alta densidad la altura requerida será menor.
- Para la construcción del patrón de columna líquida, se realizó la selección de cada pieza para su ensamblaje final. El valor de cada pieza se detalla a continuación:

Placa de acero inoxidable:	S/. 30
Bloque de acero inoxidable:	S/. 60
Barra de aluminio trefilado:	S/. 50
Regla metálica:	S/. 20
Tubos de vidrio:	S/. 40
Manguera de jebe:	S/. 20
Nivel de burbuja:	S/. 10

Prensaestopas y o-ring:	S/. 20
Acoples y abrazaderas:	S/. 10
Servicio de torno:	<u>S/. 300</u>
Total:	S/. 560

La inversión económica para la construcción del patrón es de S/. 560, que resulta ser mucho menor comparado a un instrumento similar que cumplirá la misma función y cuyo costo es de S/. 4300.