

85  
Zej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTABLECIMIENTO DE PROCEDIMIENTOS DE  
MEDICION Y CALIBRACION DE INSTRUMENTOS  
EN EL AREA DE PRESION.

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO QUIMICO**  
P R E S E N T A :  
**PRAXEDIS ISRAEL SANTAMARIA MATA**



MEXICO, D. F.



EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

274499



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: ISAURA LUISA CARRERA GARCIA.  
Vocal: RAMIRO DOMINGUEZ DANACHE.  
Secretario: MARIA DE LOS ANGELES OLVERA TREVIÑO.  
1er. Suplente: PATRICIA RAQUEL AVILES MANDUJANO.  
2o. Suplente: MINERVA ESTELA TELLEZ ORTIZ.

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Física y Química Teórica de la Facultad de Química de la UNAM.

Asesor del tema:

MARIA DE LOS ANGELES OLVERA TREVIÑO.

Sustentante:



PRAXEDIS ISRAEL SANTAMARIA MATA.

A Dios.  
Gracias.

A Fernando Santamaría Hernández.  
Gracias por introducirme en caminos maravillosos y compartir su recorrido.  
Por tu enseñanza, tu confianza y tu respeto.  
Por ser mi mejor amigo durante tanto tiempo.

A Celia Mata Vázquez.  
Gracias por tu amor y por tu ejemplo.  
Por ser el equilibrio de tu familia y el eslabón más fuerte.  
Por que cuando busco mi origen, siempre encuentro una parte de ti.

A Karla M. Díaz Gutiérrez.  
Gracias por los momentos compartidos.  
Tu compañía, apoyo y ayuda fueron fundamentales para la realización de éste trabajo.  
Eres una parte insustituible de mi vida.

A Gloria Mata Vázquez y toda su familia, gracias por toda la ayuda (sincera y desinteresada), y por haberme adoptado en el momento preciso.

Agradesco a la Maestra Angeles Olvera Treviño por todo el apoyo brindado durante mi formación profesional. Su ayuda y confianza son la estructura de este trabajo.

Gracias a la Maestra Rocío Cassaigne por su enseñanza, confianza y apoyo, los cuales contribuyeron enormemente para la culminación de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.  
Por poner al alcance de mis manos tanta riqueza.

A la Facultad de Química.  
Por ser mi segundo hogar y darme las herramientas necesarias para ser un individuo útil a la sociedad.

A todas las personas que siempre han creído en mi.

¡Gracias!

Os indico las tres transformaciones del espíritu:

La del espíritu en camello, la del camello en león y la del león en niño.

Muchas cosas pesadas hay para el espíritu fuerte, sufrido y reverente; apetece su fuerza lo pesado, lo más pesado.

‘¿Qué es pesado?’, pregunta el espíritu sufrido, y se arroja cual camello, ansioso de llevar pesada carga.

‘¿Qué es lo más pesado?, oh héroes’, pregunta el espíritu sufrido, ‘para que yo cargue con ello y goce de mi fuerza’ (...).

Con todo esto carga el espíritu sufrido; como el camello cargado se interna en el desierto, se interna él en su desierto.

Mas en pleno desierto tiene lugar la segunda transformación: la del espíritu en león ansioso de conquistar libertad y mandar en su propio desierto (...).

Mas decid, hermanos, ¿de qué empresa superior a las fuerzas del león será capaz el niño? ¿Por que tiene que transformarse en niño el león rapaz?

Es el niño inocencia y olvido, un nuevo comienzo, un juego, una rueda que hecha a girar espontáneamente, un movimiento inicial, un santo decir ¡sí!

Federico Nietzsche.

## Indice.

Introducción.	1
Capítulo I. Medidores de presión primarios.	3
1.1 Antecedentes.	4
1.2 Clasificación de los medidores de presión.	8
1.3 Manómetros en forma de U y de cubeta o cisterna.	8
1.4 Micromanómetros.	11
1.5 Barómetro.	16
1.6 Medidor McLeod.	18
1.7 Balanza de pesos muertos.	20
Capítulo II. Medidores de presión secundarios.	23
2.1 Manómetro de Bourdon.	24
2.2 Fuelles.	30
2.3 Diafragmas.	30
2.4 Manómetro de tensión.	31
2.5 Manómetro de transferencia de momento.	33
2.6 Manómetro de conductividad térmica.	34
2.7 Manómetro de ionización de gases.	37
2.8 Consideraciones adicionales.	37
Capítulo III. Aspectos de seguridad en el uso y operación de manómetros tipo Bourdon.	39
3.1 Seguridad.	40
3.2 Aspectos generales de seguridad.	40
3.3 Tipos de falla de manómetros.	41
3.4 Otras recomendaciones para el uso seguro de manómetros tipo Bourdon.	43
Capítulo IV. Procedimiento de calibración de manómetros tipo Bourdon.	51
4.1 Condiciones para la calibración.	52
4.2 Factores ambientales.	52
4.3 Procedimiento de calibración de manómetros con una balanza de pesos muertos.	54
4.4 Calibración de manómetros con una columna de mercurio.	57
Capítulo V. Cálculo de la incertidumbre de las mediciones.	60
5.1 Introducción.	61
5.2 Incertidumbre de una medición.	62
5.3 Procedimiento de evaluación de la incertidumbre en la calibración de manómetros con elemento elástico tipo Bourdon, usando como patrón una balanza de pesos muertos.	69

Conclusiones.	104
Anexos.	107
Anexo 1. Tabla de conversión de unidades de presión.	108
Anexo 2. Tabla de altitudes y latitudes de las principales ciudades de México.	109
Anexo 3. Tabla de valores de Z.	110
Anexo 4. Informe de calibración.	111
Anexo 5. Definición de términos.	115
Bibliografía.	121

## Introducción.

Es muy probable que todas las personas en algún momento de su vida, tengan que realizar una medición, o estén involucrados de alguna manera con un instrumento diseñado para medir alguna propiedad de un cuerpo o sistema.

Sin embargo, pocas veces nos preguntamos cual es la importancia de medir, y aún menos, cual es la importancia de conocer la calidad de nuestras mediciones. Tal vez esto se debe a que en nuestra vida común, utilizamos los resultados de una medición para fines comparativos que no requieren un análisis profundo, por ejemplo, a pocos de nosotros nos importaría si pagamos por un litro de agua, y nos dan 0,999 litros; y si nuestro objetivo es beber esa agua, sería prácticamente lo mismo recibir 1,001 litros. Aun más, confiamos en que los aparatos, equipos e instrumentos con los que realizamos nuestras mediciones, realmente están midiendo lo que indican, y no preguntamos que tan cercano es el valor que registra el instrumento al que verdaderamente queremos o debemos medir.

Desafortunadamente, en la industria en general, el tomar a la ligera el proceso o el resultado de una medición, puede traer consecuencias muy desafortunadas, dependiendo de cual sea la finalidad de realizar una medición determinada. Por ejemplo, una reacción química entre dos sustancias distintas, se realiza en proporciones bien definidas, por lo cual, el poner a reaccionar estas sustancias con una ligera desproporción significa el estar desperdiciando una cierta cantidad de alguno de los componentes de la reacción, cosa que seguramente, ninguna industria esta dispuesta a hacer, por lo que se pone un cuidado extra en la medición de las cantidades (ya sea de masa o volumen) de las sustancias que han de reaccionar para producir un producto determinado.

Existen casos más dramáticos para ejemplificar la importancia de una medición dentro de la industria, como el hecho de que hay compuestos que son explosivos a ciertas condiciones de presión, temperatura y humedad, o la putrefacción de productos alimenticios a ciertos valores de las mismas propiedades ambientales, lo cual exige una mayor atención en los procesos de medición y en los equipos con que se mide cualquier propiedad, ya sea humedad, longitud, área, volumen, masa, temperatura, voltaje, velocidad, presión, etc.

La necesidad de realizar una medición en la cual se pueda confiar, no solo ha llamado la atención en la industria química, sino que a nivel internacional existe el interés de establecer procedimientos universales para la realización de procesos de medición y de reporte de los resultados de estos procesos, debido principalmente al irreversible establecimiento de un mercado global, en el que resulta necesario y de gran utilidad, el utilizar en cualquier país el resultado de una medición, cualquiera que haya sido el lugar donde ésta se realizó.

Para lograr esto, se pretende adoptar internacionalmente una serie de operaciones que establezcan dentro de condiciones específicas, la relación entre los valores de una magnitud indicada por un aparato de medida (o de un sistema de medida) y los valores correspondientes de la magnitud obtenidos con patrones o estándares aceptados previamente por todos los países que pretendan realizar transacciones comerciales dentro del ya citado mercado globalizado.

Con este conjunto de operaciones (conocidas como *proceso de calibración*, o simplemente *calibración*), podemos obtener la incertidumbre de una medición.

De esta forma, el medir ha adquirido en la actualidad una importancia significativa, por lo que los procesos de medición y calibración, así como la utilización de los resultados que se obtienen a partir de ellos, han ido evolucionando de forma constante; incluso la definición de medir, ha cambiado ligeramente; anteriormente, se decía que medir era comparar una magnitud con otra de la misma naturaleza, sin embargo, la definición se ha ampliado diciendo que el medir es el obtener información acerca del estado de una propiedad o de un concepto bien definidos para utilizarla en una acción de fines prácticos o para mejorar y completar un modelo mental que se tiene de un aspecto específico de la naturaleza o del entorno.

Esta definición mucho más completa, implica el hecho de que el proceso de medición permite aplicar números a propiedades empíricas, lo cual es de gran ayuda para la mejor comprensión de nuestro entorno.

Una de las propiedades de nuestro entorno, es precisamente la presión, la cual tiene una importancia fundamental en prácticamente toda la industria química, ya que en ésta, es necesario conocer el valor de la presión de distintos sistemas para tener un mejor control de los procesos, por ejemplo, la presión que requiere un fluido para ser transportado de un lugar a otro por medio de una tubería, la presión a la cual una reacción química es óptima, la presión interna que tiene un contenedor de gases, la presión a la que debe operar un equipo de destilación, etc. En todos estos procesos, se puede medir la presión con diferentes equipos e instrumentos, de los cuales, los más usados son los manómetros con elemento elástico.

Por todo lo anterior, este trabajo tiene como objetivo establecer un procedimiento de calibración de instrumentos medidores de presión, usando como patrones una balanza de pesos muertos y una columna de mercurio.

Adicionalmente, se incluye en este trabajo un breve análisis del funcionamiento de distintos equipos medidores de presión, así como una serie de recomendaciones para el uso seguro de los manómetros tipo Bourdon y por supuesto, un procedimiento para la evaluación de la incertidumbre en la calibración de estos instrumentos.

## **Capítulo I.**

### **Medidores de presión primarios.**

## Capítulo I. Medidores de presión primarios.

### 1.1 Antecedentes.

Los sistemas y procesos que comúnmente se estudian y utilizan en la industria química, están caracterizados por diferentes propiedades que se clasifican en intensivas y extensivas.

Para un fluido las propiedades extensivas son aquellas que dependen de la cantidad del fluido como la masa, el peso, el volumen y la energía interna; Las propiedades intensivas son aquellas que no dependen de la cantidad del fluido como la presión, la densidad, la temperatura y la concentración<sup>(1)</sup>.

La presión es una propiedad sumamente importante para el estudio de cualquier sistema, por lo que a continuación definiremos este concepto.

La palabra presión viene del latín *pressionem*, que significa apretar<sup>(2)</sup> y se define como una Fuerza ejercida perpendicularmente por un fluido sobre una unidad de área  $A$ <sup>(3)</sup>.

Este enunciado podemos expresarlo matemáticamente de la siguiente manera:

$$P = \frac{dF}{dA} \quad (1)$$

De acuerdo con las reglas del Sistema Internacional (SI), la unidad de medida de la presión es el Pascal (Pa). Esta misma asociación ha autorizado los siguientes múltiplos para las unidades de presión: kPa, MPa y GPa<sup>(4)</sup>.

Un pascal equivale a un newton sobre metro cuadrado ( $N/m^2$ ), y a su vez el newton es la unidad internacional de medida de fuerza y equivale a un kilogramo por metro sobre segundo cuadrado ( $kgm/s^2$ ), y el metro cuadrado es la unidad internacional de medida de longitud elevada al cuadrado ( $m^2$ ), que representa el área<sup>(5)</sup>.

A pesar de que el SI utiliza como unidad de presión el pascal, existen unidades de uso corriente en otros sistemas de unidades como el Sistema Inglés. En el anexo 1 se muestran los factores de conversión de unidades de presión más importantes y de mayor uso en el mundo.

Como puede observarse, el concepto de presión puede ser totalmente descrito en términos de las dimensiones masa, longitud y tiempo.

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

F = fuerza = ma

m = masa = [M] ; a = aceleración = [L / T<sup>2</sup>]

A = área = bh

b = base = [L] ; h = altura = [L]

$$F = \left[ M \left( \frac{L}{T^2} \right) \right]$$

$$A = [L^2]$$

$$P = \left[ \frac{ML/T^2}{L^2} \right] = \left[ \frac{ML}{T^2 L^2} \right] = \left[ \frac{M}{T^2 L} \right]$$

Los primeros intentos realizados para medir la presión se remontan a 1643, año en que Evangelista Torricelli, quien había sido discípulo de Galileo, experimento con mercurio y la presión atmosférica<sup>(22)</sup>.

Torricelli invirtió un tubo de vidrio cerrado en uno de sus extremos y completamente lleno de mercurio, en una vasija de poca profundidad y también llena de mercurio, al hacer esto, el nivel del mercurio dentro del tubo disminuyó hasta quedar aproximadamente 30 pulgadas sobre el nivel de la vasija.

E. Torricelli se dio cuenta de que la atmósfera ejerce una presión sobre la tierra, la cual mantiene la columna de mercurio en equilibrio (Fig. 1).

Posteriormente observó al realizar el mismo experimento en distintos lugares, que la altura de la columna de mercurio no permanecía constante y concluyó que ésta disminuía con la altitud.

Incidentalmente con este experimento Torricelli logró obtener por vez primera un vacío (dentro de la columna de vidrio). Así pues, las primeras medidas de presión fueron en realidad una medida de la altura (longitud) que alcanzaba la columna de mercurio realizando este experimento.

En 1647 Blaise Pascal midió la altura de una columna de mercurio dentro de un tubo invertido en la cima de la montaña Puy de Dôme y posteriormente en su base, encontrando una diferencia de alturas en la columna de mercurio de aproximadamente 3 pulgadas, siendo la distancia entre la base y la cima de la montaña de aproximadamente 3000 pies, encontrando una regla general para expresar el cambio de la presión atmosférica con la altitud, que fue de 1 pulgadas de mercurio por cada 1000 pies de altura<sup>(3)</sup>.

Después de realizar esto, Pascal estableció dos principios importantes acerca de la presión, cuyos enunciados son los siguientes:

- La Presión actúa uniformemente en todas las direcciones en un pequeño volumen de un fluido (Fig. 2.1).
- En un fluido confinado por las paredes de un sólido, la presión actúa perpendicularmente a las paredes (Fig. 2.2).

Estos dos enunciados son también llamados *leyes de Pascal*<sup>(6)</sup>.

Pascal nombró barómetro al instrumento de “mercurio bajo vacío” que usó para experimentar con la presión atmosférica.

En 1660 Robert Boyle encontró que el producto de la presión y el volumen es constante para una cantidad de masa de aire dada a una temperatura fija.

$$PV \Big|_{M \text{ y } T \text{ constantes}} = \text{cte.}$$

El primer medidor de presión conocido como manómetro de émbolo, fue diseñado en 1846 por Galy-Cazalat, aparato cuyo funcionamiento se basa en la definición de presión  $P = F/A$ . Un año después, Shinz y Bourdon patentaron el “manómetro Bourdon”, el cual funciona aprovechando el cambio de curvatura de un tubo hueco de sección transversal elíptica, al aplicarle una presión interna<sup>(22)</sup>.

Posteriormente en 1971 Pelletier construyó un manómetro de émbolo diseñado por Desgoffe, con el cual se pudieron medir presiones de hasta 100 MPa.

Para su mejor estudio, se ha clasificado a la presión en presión absoluta, positiva, diferencial, ambiental, negativa (vacío) y cero (ver Anexo 5). En la Figura 3 se muestra un diagrama que muestra los diferentes tipos de presión.

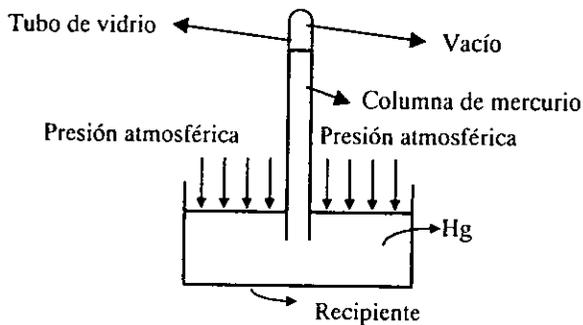


Figura 1. Experimento de Torricelli.

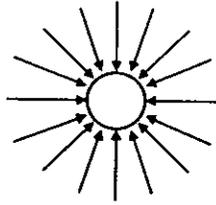


Figura 2.1

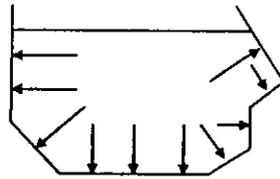


Figura 2.2

Figura 2. Leyes de Pascal.

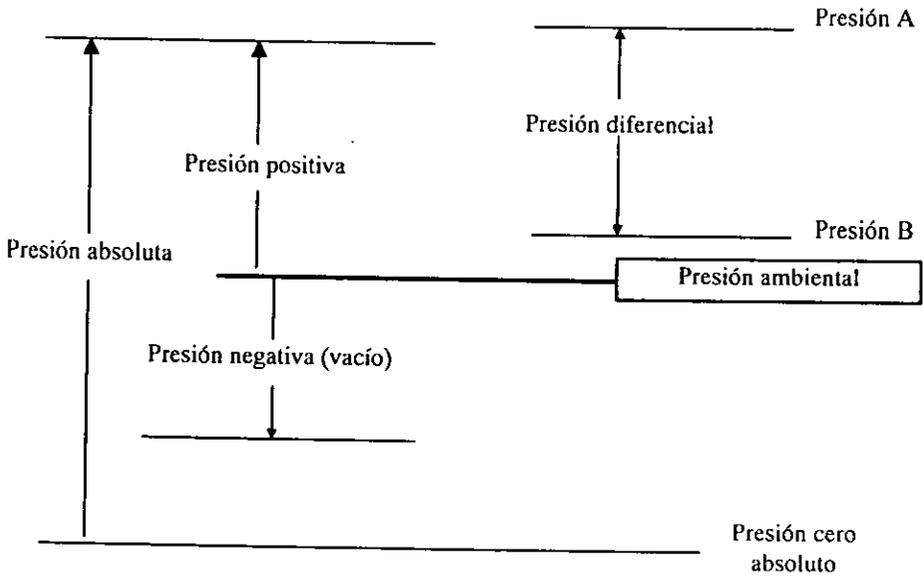


Figura 3. Tipos de presión.

## 1.2 Clasificación de los medidores de presión.

Los medidores de presión se clasifican comúnmente de acuerdo a su principio de operación y a su calidad metrológica.

De acuerdo a su principio de operación estos equipos se clasifican en primarios y en secundarios:

- Medidores de presión *primarios*: son aquellos que miden la presión de un sistema en función de las magnitudes fundamentales (masa, longitud y tiempo).
- Medidores de presión *secundarios*: son aquellos que miden la presión de un sistema aprovechando el cambio de alguna propiedad que varía en función de la presión, por ejemplo la elasticidad de un elemento; dicha propiedad se llama manométrica<sup>(7)</sup>.

A continuación se mencionan las características y funcionamiento de los medidores de presión primarios más usados.

## 1.3 Manómetros en forma de U y de cubeta o cisterna.

Los aparatos en U y cubeta son instrumentos de líquido con nivel visible y se emplean en calidad de manómetros para medir presiones desde 700 mm de H<sub>2</sub>O (7000 Pa.) a 735 mm de Hg (0,1 MPa.), de vacuómetros para medir vacíos de hasta 760 mm de Hg (0,101 MPa) y como manómetros diferenciales para medir diferencias de presiones de gases sometidos a una presión cercana a la atmosférica de hasta 700 mm de H<sub>2</sub>O (7000 Pa.) y de líquidos, gases y vapores sometidos a una presión superior a 0,1 MPa, de hasta 700 mm de Hg. Estos manómetros sirven como estándares en el rango de 0,1 pulgadas de agua a 100 psig, con una incertidumbre de calibración de 0,02% a 0,2 % de la lectura<sup>(3)</sup>.

### 1.3.1 Manómetro en U.

El manómetro en U (Fig.4) consta de un tubo de vidrio en forma de U abierto por sus dos extremos, el cual es llenado con el fluido manométrico aproximadamente hasta la mitad de su altura y de una escala que permite leer los niveles en ambos tramos del tubo.

La diferencia de presiones genera una variación de niveles en ambos lados del tubo, la cual se determina como la suma de las columnas  $h_1$  y  $h_2$ . Generalmente se utiliza como fluido manométrico mercurio o agua, ya que existe información detallada de sus pesos específicos.

Se recomienda que el diámetro interior del tubo de vidrio se encuentre en un intervalo de 8 a 10 mm y debe ser lo más uniforme posible a todo lo largo del tubo.

El manómetro debe instalarse en forma vertical con la ayuda de una plomada y todas las mediciones deben realizarse en el estado estacionario.

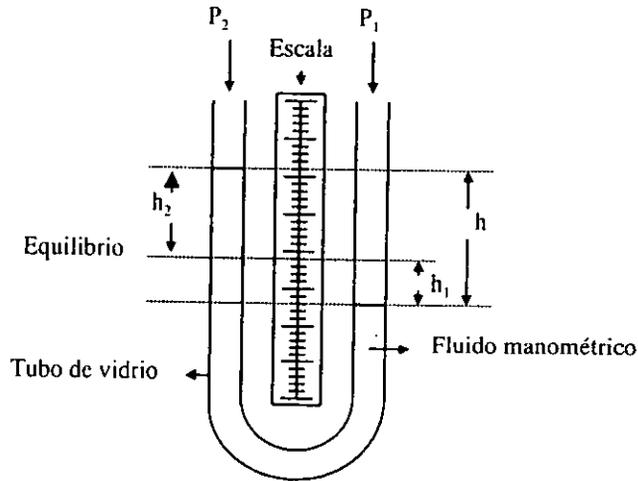


Figura 4. Manómetro en U.

El resultado de las mediciones puede expresarse en milímetros de mercurio o de agua, o también en pascales por medio de la siguiente fórmula:

$$p = hg (\rho - \rho_c) \quad (2)$$

donde  $g$  es el valor de la aceleración local de la gravedad en  $m/s^2$ ;  $h$  es la diferencia de niveles del líquido de trabajo en  $m$ ;  $\rho$  es la densidad del líquido de trabajo en  $kg/m^3$  y  $\rho_c$  es la densidad del medio que se halla sobre el líquido de trabajo en  $kg/m^3$ .

El valor de  $h$  depende de diversos factores como son:

1. Variación de la escala debido a cambios de temperatura y a gradientes de temperatura a lo largo de la columna.
2. Peso específico e impurezas del fluido manométrico.
3. Efectos de capilaridad.

La variación de los pesos específicos del mercurio y del agua con la temperatura, para el rango de operación del manómetro, están dados por las siguientes relaciones:

$$(W_{s,t})_{\text{mercurio}} = (0,491154 / (1 + 1,01 (t - 32) 10^{-4})) \text{ lbf/in}^3 \quad (3)$$

y

$$(W_{s,t})_{\text{agua}} = ((62,2523 + 0,978476 \times 10^{-2} t - 0,145 \times 10^{-3} t^2 + 0,217 \times 10^{-6} t^3) / 1728) \text{ lbf/in}^3 \quad (4)$$

donde los subíndices s, t significan evaluación a valores estándar de la gravedad y temperatura en grados Fahrenheit del fluido manométrico<sup>(7)</sup>.

### 1.3.2 Manómetro de cubeta o de cisterna.

El manómetro de cubeta o cisterna (Fig. 5) consta de un recipiente cilíndrico conectado a un tubo medidor de vidrio cuyo diámetro es mucho menor que el del recipiente.

El fluido manométrico comúnmente usado en estos aparatos es mercurio o agua.

Cuando se va a medir una diferencia de presiones con este tipo de manómetros, la presión mayor debe ser suministrada a la cubeta, mientras que la presión menor se debe aplicar en el tubo medidor.

Al aplicar una presión a la cubeta o cisterna, el fluido manométrico contenido en el tubo medidor asciende hasta la altura  $h_1$ , mientras que el nivel de la cisterna disminuye hasta la posición  $h_2$ .

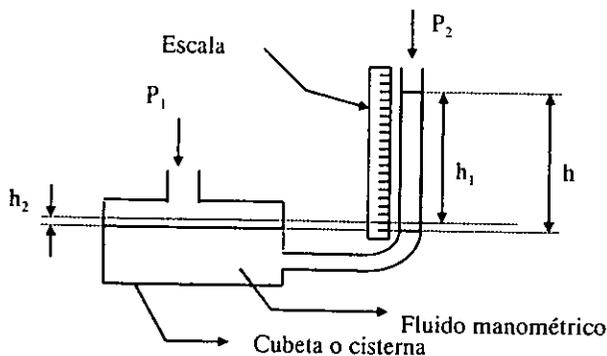


Figura 5. Manómetro de cubeta o cisterna.

Una vez que esto sucede, la altura  $h$  de la columna que es equivalente a la presión que se mide será:

$$h = h_1 + h_2 \quad (5)$$

Si  $A_1$  es el área de la sección transversal del tubo medidor y  $A_2$  es el área de la sección transversal de la cisterna, entonces:

$$h_1 A_1 = h_2 A_2 \quad (6)$$

ya que el volumen del líquido que ascendió en el tubo medidor equivale al volumen desplazado por la presión aplicada en la cisterna.

Despejando  $h_2$  de (6), y sustituyendo el resultado en (5) obtenemos:

$$h_2 = \frac{A_1 h_1}{A_2} \quad (7)$$

$$h = h_1 + \frac{A_1 h_1}{A_2} \quad (8)$$

$$h = h_1 \left( 1 + \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (9)$$

La ecuación (9) representa la altura de la columna en el tubo medidor más la variación del nivel de la cisterna, que es en realidad la diferencia de presiones que se produce dentro del aparato.

Si  $A_2$  es 500 veces más grande que  $A_1$ , las variaciones del nivel de la cisterna pueden despreciarse.

#### 1.4 Micromanómetros.

Los micromanómetros son en realidad una modificación del manómetro en U convencional y existen varios tipos. Estos aparatos sirven como estándares de presión en un rango de 0,0002 a 20 pulgadas de agua.

#### 1.4.1 Micromanómetro con tubo medidor inclinado.

La inclinación del tubo medidor en este tipo de aparatos (Fig.6) se hace con el fin de reducir errores en la medición que son ocasionados por la capilaridad y el menisco.

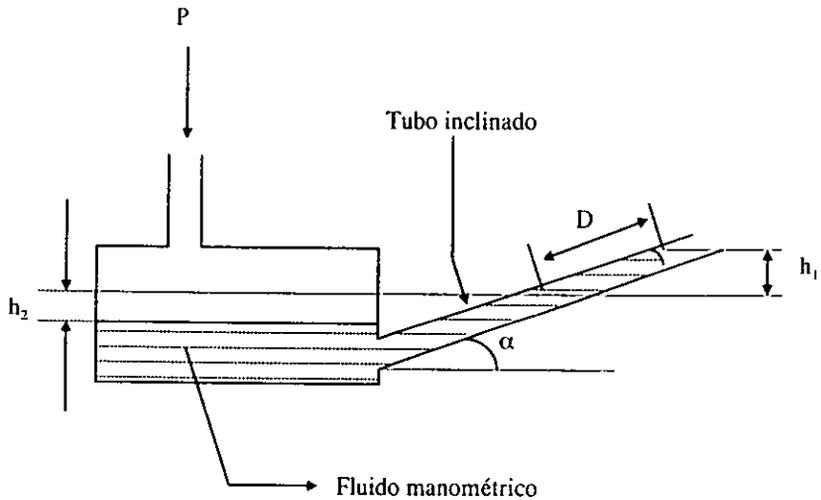


Figura 6. Micromanómetro con tubo medidor inclinado.

Estos instrumentos se utilizan para medir diferencias de presiones bajas, por lo que generalmente, como fluido manométrico se usa alcohol etílico.

Al aplicar una presión al recipiente, el nivel del líquido en el tubo inclinado sube hasta la posición  $h_1$  y el de la cubeta baja hasta  $h_2$ , por lo que la diferencia de alturas ( $h$ ) de los niveles del líquido manométrico es:

$$h = h_1 + h_2 \quad (10)$$

donde

$$h_1 = D \operatorname{sen} \alpha \quad (11)$$

Si  $A_1$  y  $A_2$  son las áreas transversales del tubo y del recipiente respectivamente, entonces:

$$DA_1 = h_2A_2 \quad (12)$$

despejando  $h_2$  de (12) obtenemos:

$$h_2 = \frac{DA_1}{A_2} \quad (13)$$

sustituyendo (11) y (13) en (10) obtenemos:

$$h = D\text{sen}\alpha + \frac{DA_1}{A_2} = D\left(\text{sen}\alpha + \frac{A_1}{A_2}\right) \quad (14)$$

El valor de la diferencia de presiones sujeta a medición será:

$$\Delta P = hg\rho = Dg\rho \left(\text{sen}\alpha + \frac{A_1}{A_2}\right) \quad (15)$$

donde

$g$ = valor de la gravedad en el lugar donde se realice la medición.

$\rho$ = densidad del fluido manométrico.

Si suponemos que las condiciones de temperatura, presión ambiental, humedad del aire y el valor de la gravedad de la tierra permanecen constantes durante la medición, entonces:  $g$ ,  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $A_1$  y  $A_2$ , serán entonces constantes, por lo cual la ecuación (15) podemos expresarla de la siguiente manera:

$$\Delta P = Dk \quad (16)$$

donde

$$k = g\rho \left(\text{sen}\alpha + \frac{A_1}{A_2}\right) \quad (17)$$

siendo este valor de  $k$  la constante del aparato.

#### 1.4.2 Micromanómetro de contacto micrométrico.

Con este aparato se minimizan los efectos de capilaridad y meniscos mediante la medición de los desplazamientos del fluido manométrico (que en estos aparatos es generalmente mercurio) generados por una diferencia de presiones. Estos desplazamientos se miden con micrómetros de precisión con puntas metálicas (Fig.7).

Los recipientes en los que se encuentra el fluido manométrico están unidos en sus bases por un tubo en forma de U.

Después de aplicar las presiones  $P_1$  y  $P_2$  en los recipientes, debe establecerse el contacto entre las puntas de los micrómetros y la superficie del mercurio.

La diferencia de alturas que se genera ( $\Delta h$ ) se determina mediante la diferencia que existe entre las lecturas de los dos micrómetros, las cuales se registran por lo general en milímetros.

Las puntas metálicas deben estar colocadas lo más cercano posible del centro del área transversal de los cilindros. Este tipo de instrumentos sirven como estándares con una incertidumbre de calibración de 0,001 pulgadas de agua.

#### 1.4.3 Micromanómetro tipo Prandtl.

El micromanómetro tipo Prandtl consta de un recipiente, un tubo con una sección inclinada, un tubo conector flexible y el fluido manométrico (Fig. 8).

En este instrumento los errores de capilaridad y de meniscos se minimizan regresando el menisco a una posición de referencia nula antes de medir la diferencia de presiones aplicada.

El recipiente se mueve verticalmente con respecto al tubo con sección inclinada para lograr la posición de referencia.

Esta posición se alcanza cuando el menisco se encuentra dentro de las marcas que tiene el tubo en la sección inclinada. Hecho lo anterior, se aplica la diferencia de presiones y el recipiente o el tubo son movidos verticalmente hasta que el menisco se encuentre nuevamente dentro de las marcas antes mencionadas; posteriormente se mide el  $\Delta h$  correspondiente a la diferencia de presiones aplicada.

El micromanómetro tipo Prandtl es generalmente aceptado como estándar de presión con una incertidumbre de calibración de 0,001 pulgadas de agua.

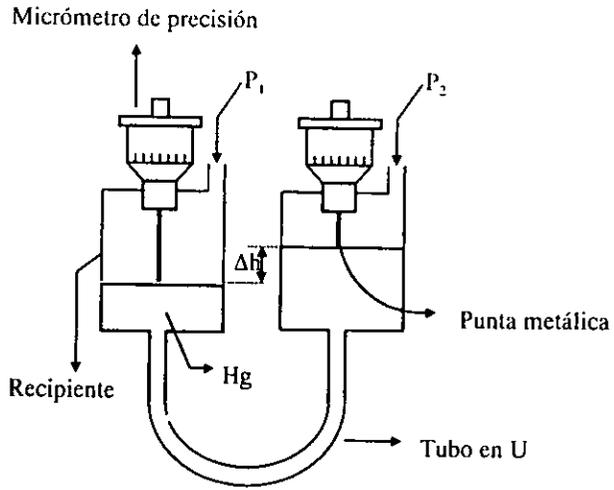


Figura 7. Micromanómetro de contacto micrométrico.

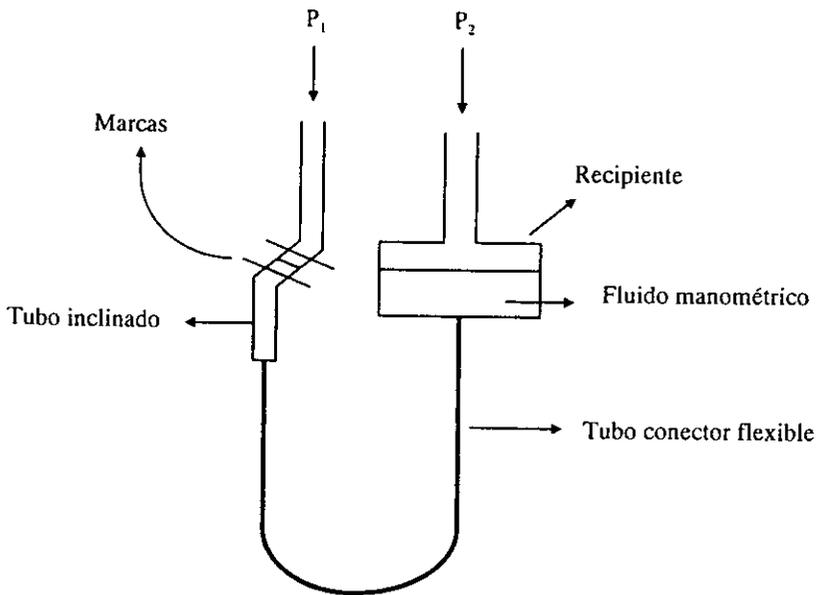


Figura 8. Micromanómetro tipo Prandtl.

## 1.5 Barómetro.

Este aparato consta de una columna de mercurio bajo vacío que se encuentra dentro de un tubo de vidrio y que a su vez esta inmersa dentro de otra columna de mercurio de diámetro mayor, que está en contacto con el ambiente por medio de un orificio. La columna de diámetro mayor sirve como cisterna (Fig.9).

El barómetro de más uso es el tipo Fortín, en el cual la altura del nivel de mercurio en la cisterna puede ser ajustada. En este caso, la cisterna es en realidad un recipiente de paredes flexibles soportado por una caja de baquelita (Fig.10).

El ajuste del nivel de la cisterna permite fijar el nivel cero de referencia en una escala en la que puede leerse la altura de la columna de mercurio. Este nivel se obtiene haciendo girar el tornillo de ajuste, hasta que el mercurio hace contacto con una punta indicadora de marfil. En este punto, la superficie del mercurio esta alineada con el cero de la escala del instrumento.

La altura de la columna de mercurio debe reportarse a la temperatura a la que se encuentra el barómetro al momento de realizar las mediciones.

La presión que ejerce la atmósfera sobre la superficie del mercurio que se encuentra en la cisterna se compensa con el peso por unidad de área de la columna de mercurio bajo vacío de acuerdo a la ecuación:

$$P_{\text{barometrica}} = W_{\text{Hg}} h_{10} \quad (18)$$

donde  $W_{\text{Hg}}$  es el peso específico del mercurio, cuyo valor depende de la temperatura y del valor local de la gravedad y  $h_{10}$  es la altura leída de la columna de mercurio, la cual depende del coeficiente de expansión térmica del mercurio y de la escala.

Cuando se lee la altura de la columna de mercurio con la escala ajustada a cero en base al nivel del mercurio en la cisterna, la altura correcta de dicha columna a la temperatura  $t$  ( $h_t$ ) será mayor que la altura de la columna leída a la temperatura  $t$  ( $h_{10}$ ), siempre y cuando  $t > t_c$ , donde  $t_c$  es la temperatura a la que se calibró la escala. A continuación se expresa esta diferencia en términos de la expansión de la escala, la cual sucede de  $t_c$  a  $t$ <sup>(3)</sup>:

$$h_t = h_{10} [1 + S(t - t_c)] \quad (19)$$

donde  $S$  es el coeficiente lineal de expansión térmica de la escala por grado centígrado.

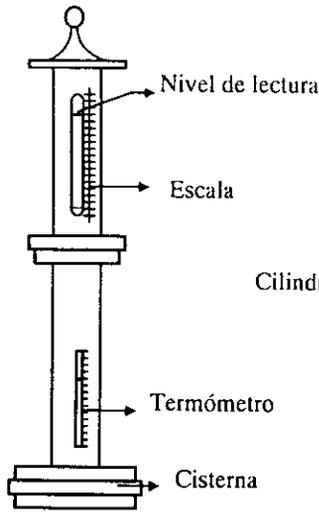


Figura 9. Barómetro.

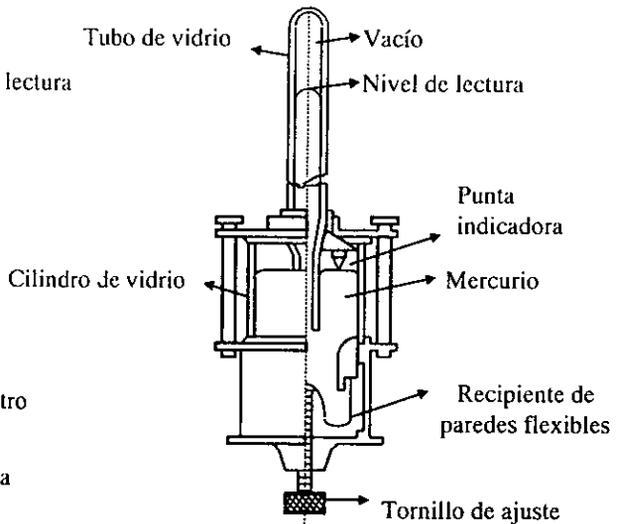


Figura 10. Barómetro tipo Fortín.

Si se desea la altura del mercurio referida a alguna temperatura  $t_0$ , la altura correcta del mercurio a  $t$  será mayor que la altura del mercurio referida a  $t_0$  ( $h_{t_0}$ ), siempre y cuando  $t > t_0$ .

Esta diferencia puede expresarse en términos del coeficiente volumétrico de expansión térmica del mercurio de  $t_0$  a  $t$  de la siguiente manera:

$$h_t = h_{t_0} [1 + m(t - t_0)] \quad (20)$$

donde  $m$  es el coeficiente volumétrico de expansión térmica del mercurio por grado centígrado.

Con esto, podemos definir un factor de corrección por temperatura, utilizando la altura del mercurio leída a  $t$  y la altura del mercurio referida a  $t_0$ . El factor de corrección por temperatura quedaría de la siguiente forma:

$$C_t = h_{t_0} - h_t \quad (21)$$

Despejando  $h_{11}$  de (19),  $h_{10}$  de (20) y sustituyendo los resultados en (21), obtenemos:

$$C_1 = \left\{ \frac{1}{[1 + m(t - t_0)]} - \frac{1}{[1 + S(t - t_c)]} \right\} h_{11} \quad (22)$$

Sustituyendo  $h_t$  de (19) en (22) obtenemos:

$$C_1 = \left[ \frac{S(t - t_c) - m(t - t_0)}{1 + m(t - t_0)} \right] h_{11} \quad (23)$$

### 1.6 Medidor McLeod.

Este medidor está diseñado para la determinación de presiones absolutas muy bajas de gases estacionarios. Basado en un principio elemental de la termodinámica (la ley de Boyle), el medidor McLeod sirve como estándar en el rango de 0,001 mm de Hg, hasta 1 mm de Hg por encima del cero absoluto, con una incertidumbre de calibración de 3% a  $0,1\mu\text{m}$ , y de 0,5% por encima de  $1\mu\text{m}$ <sup>(3)</sup>.

El medidor McLeod es un arreglo tubular diseñado de tal forma que puede ser atrapada una muestra de gas a una presión desconocida y posteriormente comprimida isotérmicamente mediante la elevación de una columna de mercurio.

Esto amplifica la presión desconocida y permite hacer la medición por medios manométricos convencionales (Fig.11).

Todo el mercurio está inicialmente contenido en el volumen que se encuentra bajo el corte.

El medidor McLeod primero es expuesto al gas con la presión desconocida  $P_1$ . Posteriormente el mercurio se eleva en el tubo A, atrapando la muestra de gas de un volumen inicial  $V_1 = V + ah_c$ , donde  $a$  es el área del capilar medidor. El mercurio es forzado continuamente a subir hasta que alcanza el nivel cero en el capilar de referencia B. A este tiempo el mercurio en el capilar medidor C alcanza el nivel  $h$ , donde la muestra de gas tiene un volumen final  $V_2 = ah$  y una presión manométrica final  $P_2 = P_1 + h$ .

Cuando la muestra de gas se encuentra a esta presión podemos aplicar las siguientes ecuaciones:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (24)$$

Ya que  $P_2 = P_1 + h$ , podemos sustituir  $P_2$  en (24), obteniendo lo siguiente:

$$P_1 V_1 = (P_1 + h) V_2 \quad (25)$$

despejando  $P_1$  de (25):

$$P_1 = \frac{hV_2}{V_1 - V_2} \quad (26)$$

Por otra parte, sustituyendo  $V_2 = ah$  en (26):

$$P_1 = \frac{h(ah)}{V_1 - ah} = \frac{ah^2}{V_1 - ah} \quad (27)$$

De la ecuación (24) puede observarse que el valor de la relación  $V_1 / V_2$  es equivalente a la amplificación de  $P_1$ , así mismo, con la ecuación (27) es posible conocer el valor de la presión desconocida  $P_1$  en función de los parámetros del equipo.

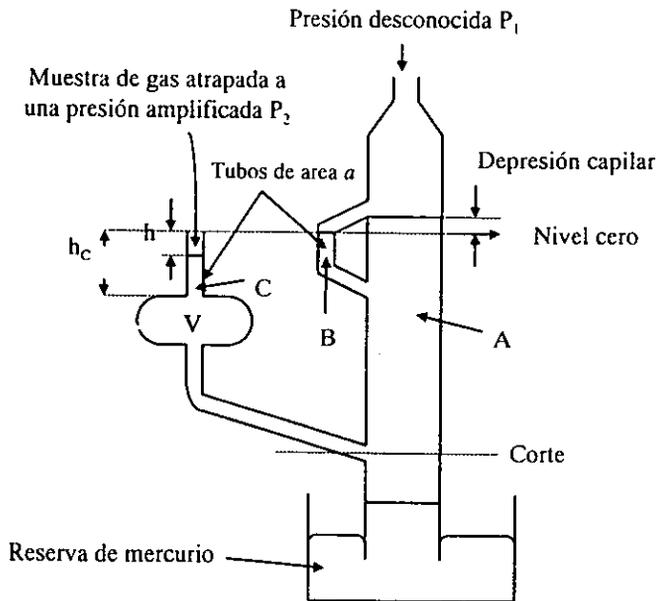


Figura 11. Medidor McLeod.

Al hacer uso del medidor McLeod deben tomarse la siguiente consideración, ya que afecta de forma importante los resultados de las mediciones.

- Antes de introducir la muestra de gas al medidor, es necesario pasarla por una trampa de vapor, con el objeto de retirar vapores condensables, ya que estos condensables ocupan un gran volumen en fase gas antes de realizar la amplificación de la muestra y también en fase líquida cuando la muestra se encuentra a su presión final. Por esto último la presencia de condensables causa que las lecturas de presión sean muy bajas.

### 1.7 Balanza de pesos muertos.

Los primeros reportes del uso de una balanza de pesos muertos se deben a Amagat, quien en 1893 la usó para la determinación de presiones estáticas<sup>(9)</sup>. Esta balanza sirve para definir presiones estáticas en el rango de 0,01 a 10,000 psig, en intervalos de hasta 0,01% del rango, con una incertidumbre de calibración de hasta 0.01 de la lectura.

La balanza consiste de un pistón o émbolo insertado dentro de un cilindro, ambos con una área de sección transversal conocida (Fig. 12).

En un extremo del pistón se colocan masas de pesos conocidos y en el extremo opuesto se aplica presión por medio de un fluido hasta que la fuerza generada es capaz de levantar el conjunto pistón - masas. Cuando el pistón flota libremente dentro del cilindro (dentro de ciertos límites), el pistón está en equilibrio con la presión desconocida, la cuál se define en este punto como:

$$P_{PM} = F_E / A_E \quad (28)$$

donde  $P_{PM}$  es la presión desconocida, que es igual a la presión que ejercen los pesos muertos sobre el fluido que transmite la presión (el subíndice PM es la abreviación de Pesos Muertos);  $F_E$  es la fuerza equivalente de el conjunto pistón - masas, la cuál depende del valor de la gravedad local y de la humedad del aire; y  $A_E$  es el área equivalente del conjunto pistón - cilindro, la cuál depende del espacio entre el pistón y el cilindro, el nivel de presión y la temperatura.

En este equipo el fluido transmisor de presión aporta la necesaria lubricación entre la superficie del cilindro y la del pistón.

Debido al espacio que existe entre el pistón y el cilindro, existe una pequeña fuga del fluido manométrico.

El pistón y (en ocasiones el cilindro) puede hacerse girar para reducir la fricción del sistema.

Debido a la fuga del fluido manométrico es necesario aplicar presión continuamente para mantener la flotación del pistón.

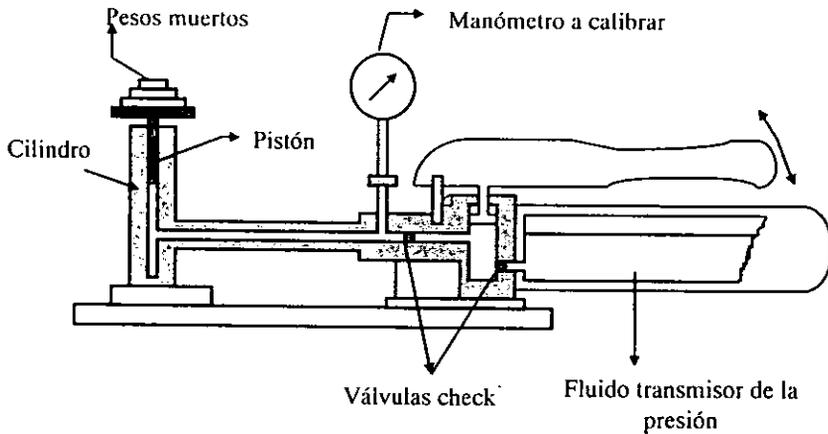


Figura 12. Balanza de pesos muertos.

Con la balanza de pesos muertos pueden realizarse mediciones de gran exactitud, sin embargo debe considerarse adicionalmente fenómenos que se presentan en este equipo como son:

- Flotación: El aire desplazado por los pesos muertos y el pistón, ejerce una fuerza de flotación que origina que la balanza de pesos muertos indique presiones alteradas.
- Tensión superficial: El fluido manométrico ejerce una fuerza sobre el pistón, debida a la tensión superficial del fluido.
- Deformación del pistón y cilindro: Tanto el pistón como el cilindro sufren una deformación elástica debida a la fuerza con que choca el fluido manométrico con estos elementos (Fig.13.1).

Para eliminar el problema de la deformación elástica del conjunto pistón cilindro tipo simple (Fig.13.2) existen fundamentalmente dos modelos de arreglos de este conjunto que son:

Tipo reentrante:

En este tipo de diseño el fluido manométrico ejerce una presión tanto en las paredes internas del cilindro como en una parte del exterior de este (Fig 14.1), disminuyendo así la deformación de las paredes y evitando el aumento del espacio entre el pistón y el cilindro.

Por lo anterior, el conjunto pistón - cilindro tipo reentrante puede ser utilizado para medir presiones de hasta 1320 MPa. Sin embargo, si se sobrepasa este límite, el huelgo del conjunto puede disminuir, aumentando la fricción del sistema, lo que representaría un grave error en las determinaciones y un subsecuente incremento en los valores de la incertidumbre de cada medición<sup>(23)</sup>.

**Tipo huelgo controlado:**

En este diseño la deformación elástica que sufre el cilindro es controlada por una presión externa (Fig. 14.2), la cual puede variarse a placer, dependiendo de la medición que se realice. Con este arreglo pistón - cilindro pueden medirse presiones de hasta 2,5 GPa con una gran exactitud.

Existen diferentes correcciones y consideraciones que deben hacerse antes, durante y después del uso de este equipo, por lo cual, el proceso de calibración usando como patrón la balanza de pesos muertos se detallará mas adelante<sup>(23)</sup>.

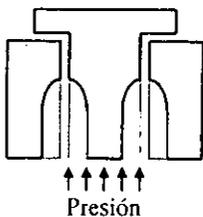


Figura 13.1. Deformación del conjunto pistón cilindro.

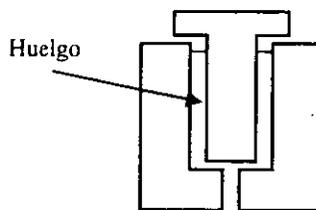


Figura 13.2. Tipo simple.

Figura 13. Deformación del arreglo pistón - cilindro tipo simple.

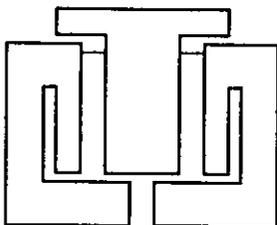


Figura 14.1. Tipo reentrante.

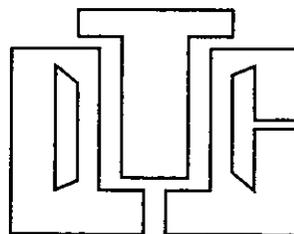


Figura 14.2. Tipo huelgo controlado.

Figura 14. Arreglos pistón - cilindro.

## **Capítulo II.**

### **Medidores de presión secundarios.**

## Capítulo II.

### Medidores de presión secundarios.

Los medidores de presión secundarios, se conocen también como transductores de presión convencionales.

Como ya se mencionó, los medidores de presión secundarios son aquellos que miden la presión de un sistema aprovechando el cambio de alguna propiedad que varía en función de la presión.

En otras palabras, este tipo de medidores están compuestos de dispositivos que actúan debido a la energía de un sistema y que a la vez suministran energía (en cualquier forma) a otro sistema.

El componente principal de un medidor de presión secundario es generalmente un elemento elástico, el cuál convierte energía del sistema presurizado en estudio en un desplazamiento dentro de un sistema mecánico de medición. Algunos medidores de presión secundarios contienen un componente adicional que es un elemento eléctrico que tiene como función el convertir el desplazamiento de un sistema mecánico en una señal eléctrica. La popularidad de los medidores de presión con elemento eléctrico se debe a la facilidad con la cuál pueden amplificarse, transmitirse, controlarse y medirse las señales eléctricas.

A continuación se describe el funcionamiento de algunos de los medidores de presión secundarios más usados.

#### 2.1 Manómetro de Bourdon.

Este manómetro es quizás el medidor secundario que más se utiliza en la industria en general para realizar medidas de presión.

Estos manómetros miden la presión mediante un elemento elástico llamado tubo de Bourdon, que es un tubo de volumen pequeño cerrado en uno de sus extremos y abierto por el otro para recibir la presión aplicada. El extremo abierto está fijo mientras que el extremo cerrado permanece libre para permitir el desplazamiento del tubo bajo la acción de deformación de la diferencia de presiones a través de las paredes internas del tubo.

Existen varios modelos de tubos Bourdon como se muestra en la Fig. 18; sin embargo el modelo más común de este tipo de elementos es un tubo de sección transversal ovalada, doblado en forma de arco circular llamado también "tubo Bourdon en forma de C" (Fig. 15).

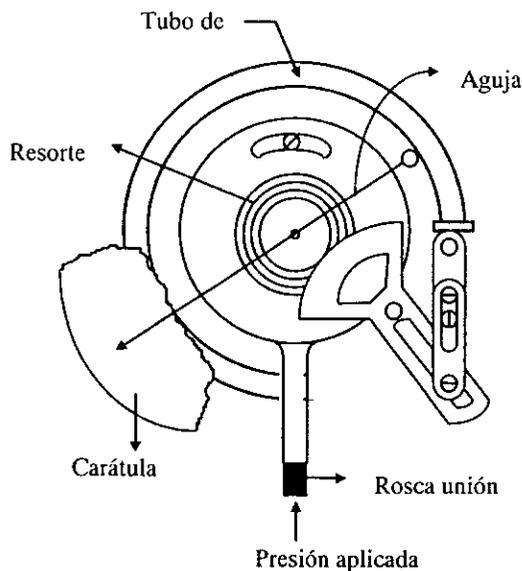


Figura 15. Manómetro de Bourdon con elemento elástico en forma de C.

Bajo presión la sección ovalada del tubo tiende a convertirse en circular, con un subsecuente incremento en el radio del arco circular. Por medio de un mecanismo casi libre de fricción, el extremo libre del tubo hace girar una manecilla por encima de una escala graduada para dar una indicación de la presión por medios mecánicos.

Con los medidores tipo Bourdon pueden medirse también presiones absolutas de manera directa sin la necesidad de evacuar la caja en la que se encuentra el mecanismo, sino haciendo que el tubo Bourdon trabaje junto con otro tubo de referencia, el cual se encuentra evacuado y sellado (Fig. 16).

Los medidores tipo Bourdon pueden medir rangos de presiones absolutas, manométricas y diferenciales con una incertidumbre de calibración de aproximadamente 0,1% de la lectura<sup>(7 y 3)</sup>.

Las partes que componen a un manómetro tipo Bourdon se muestran en la Figura 17 y son las siguientes:

### 2.1.1 Aguja.

Es el componente que indica la presión sobre una carátula graduada.

El grosor de la punta de la aguja debe ser menor o igual al grosor de la división mas pequeña de la graduación.

La aguja debe girar en el sentido de las manecillas del reloj cuando se miden incrementos de presiones positivas y en el sentido contrario cuando se miden incrementos de presiones negativas.

### 2.1.2 Anillo.

El anillo es un componente que asegura la ventana a la caja. La forma del anillo puede variar por razones de diseño y estética.

### 2.1.3 Caja.

Es el contenedor o recipiente que soporta, cubre y protege al elemento elástico y al mecanismo.

Las cajas de los manómetros pueden ser fabricadas de varios materiales, usando diversos procesos de manufactura. Pueden tener frentes sólidos o frentes abiertos y pueden emplear o no, varios medios de alivio de la presión interior de la caja. Una aplicación específica puede requerir alguna variación en el diseño y construcción de la caja.

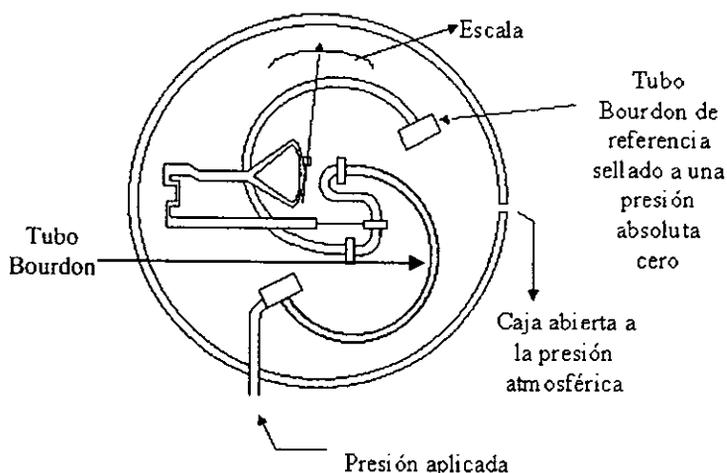


Figura 16. Manómetro tipo Bourdon para mediciones de presión absoluta.

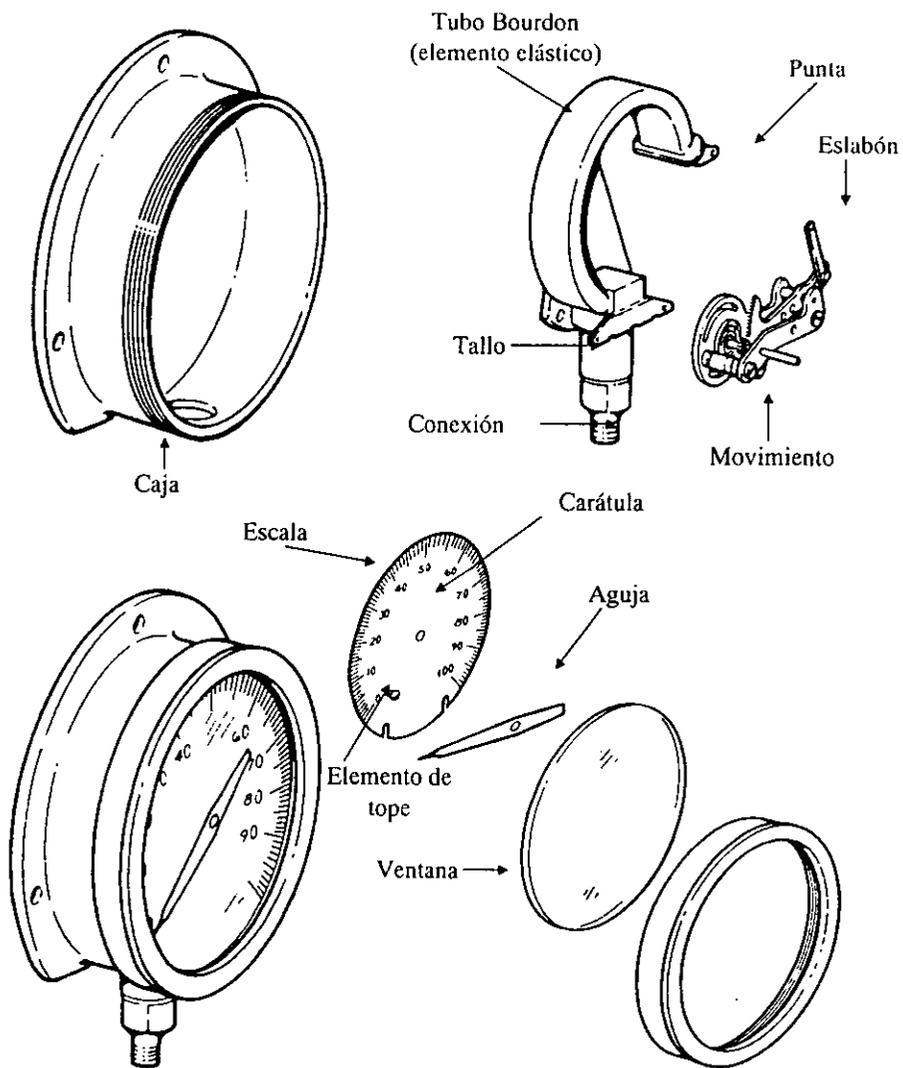


Figura 17. Componentes de un manómetro tipo Bourdon.

Existen cajas con dispositivos de alivio de presión interna, las cuales se recomiendan para manómetros destinados a medir presiones de gases superiores a los 2800 kPa (400 psi) y para presiones de líquidos superiores a 7000 kPa (1000 psi).

#### **2.1.4 Carátula.**

Es el componente que contiene la escala y la nomenclatura.

La carátula debe indicar las unidades en las que está graduada la escala y la presión máxima que debe aplicarse al manómetro. En ocasiones la carátula tiene dos escalas graduadas cada una en diferentes unidades, lo cual es útil para evitar el realizar conversiones de un sistema a otro.

De la misma manera, la carátula debe indicar si el equipo mide presiones absolutas, diferenciales o de vacío.

El uso de múltiplos como x100, x1000, x100 kPa, etc., es indeseable debido a su posible malinterpretación.

##### **2.1.4.1 Escala.**

La escala es un conjunto de marcas en la carátula que forman una graduación relacionada con números y unidades de medida de presión.

La graduación de la escala debe abarcar un arco de 270 grados y las líneas que la componen deben estar en posición radial al centro de rotación de la aguja y proyectarse bajo el arco descrito por la punta de la aguja (excepto en las carátulas con doble escala o espejos auxiliares de lectura).

Las líneas de graduación mayores e intermedias deben enfatizarse y no deben extenderse más allá de la porción calibrada de la escala.

El incremento más pequeño de la escala no debe exceder dos veces el máximo error permisible y el espaciado de la escala no debe ser menor a 1 mm.

El espesor de las marcas de la escala no debe exceder 1/5 de la longitud de la división mínima de la escala.

##### **2.1.4.2 Elemento de tope.**

Es un componente de la carátula que limita la rotación angular de la aguja para evitar un daño al mecanismo del manómetro causado por la aplicación de presiones por debajo de la mínima escala o superiores al valor máximo de la escala.

### 2.1.5 Conexión.

Es el componente que permite el acoplamiento del manómetro con el sistema bajo estudio y generalmente tiene forma de rosca.

### 2.1.6 Elemento elástico.

El elemento elástico, es el componente que sufre una deformación en respuesta a un cambio de presión. Puede ser un tubo tipo Bourdon, un diafragma u otro tipo de elemento (Fig. 18).

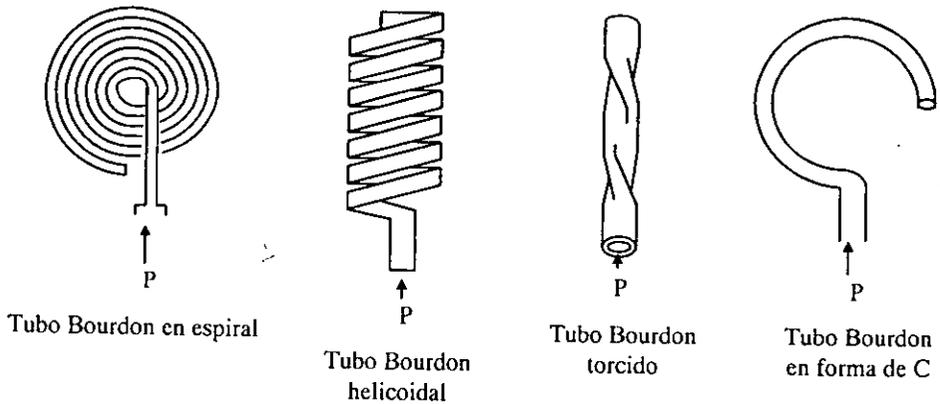


Figura 18. Elementos elásticos.

### 2.1.7 Estabón.

Componente que conecta el elemento elástico con el movimiento.

### **2.1.8 Movimiento.**

Componente del manómetro que convierte el movimiento del elemento elástico en un movimiento de rotación de la aguja.

### **2.1.9 Punta.**

Componente que se encuentra al final del extremo libre del elemento elástico, y que sirve como conexión del eslabón.

### **2.1.10 Tallo.**

Componente que soporta al elemento elástico.

### **2.1.11 Ventana.**

Componente transparente que cierra el frente de la caja.

## **2.2 Fuelles.**

Otro tipo de elemento elástico que se usa para medir la presión es el fuelle. En estos aparatos la presión se aplica en un lado del fuelle, lo que genera una deflexión, la que a su vez es balanceada por un resorte. El desplazamiento que tiene el fuelle debido a la deflexión se traduce en el movimiento de una aguja, la cual se desplaza sobre una escala graduada para dar una lectura directa de la presión del sistema (Fig.19).

## **2.3 Diafragmas.**

Los diafragmas, son elementos elásticos que pueden tener forma plana, ondulada o cóncava. La elección de estas depende de la fuerza y cantidad de la deflexión deseada (Fig. 20).

Estos elementos elásticos se utilizan generalmente para medir presiones diferenciales, aplicando la presión  $P_1$  en el interior de la cápsula y la presión  $P_2$  en el exterior de esta (Fig. 21).

Cuando la diferencia de presiones se aplica al diafragma este sufre una deflección, lo que genera un desplazamiento en un sistema mecánico que permite que una aguja indique sobre una escala graduada la diferencia de presiones medida.

#### 2.4 Manómetro de tensión.

Los equipos eléctricos de este tipo operan aprovechando la variación de la resistencia eléctrica de un conductor en función de su longitud.

Estos medidores tienen cuatro conductores que se deslizan libremente entre cuatro alfileres fabricados de algún material aislante, ubicados dos de ellos en un armazón fijo y los otros dos en una armadura móvil. Los alambres están instalados con una tensión inicial conocida y son las partes activas de un circuito convencional de puente (Fig. 22).

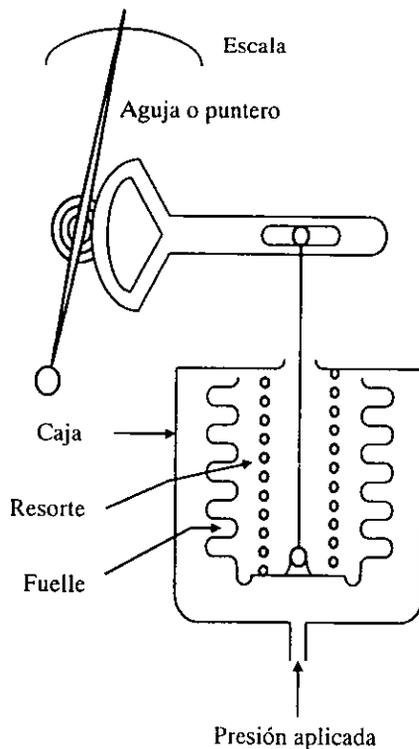


Figura 19. Manómetro de fuelle.

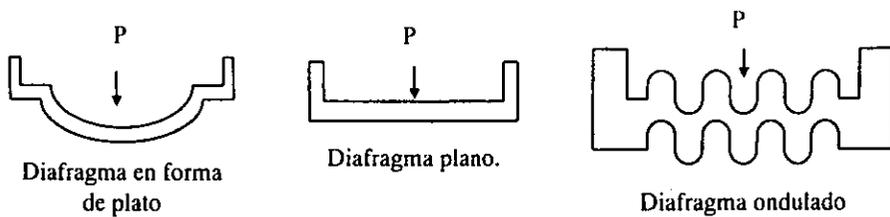


Figura 20. Tipos de diafragmas.

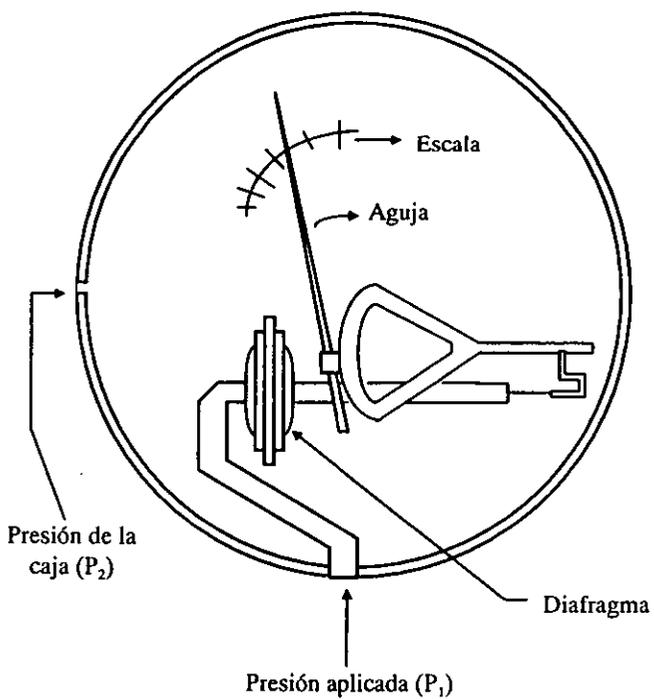


Figura 21. Manómetro con diafragma.

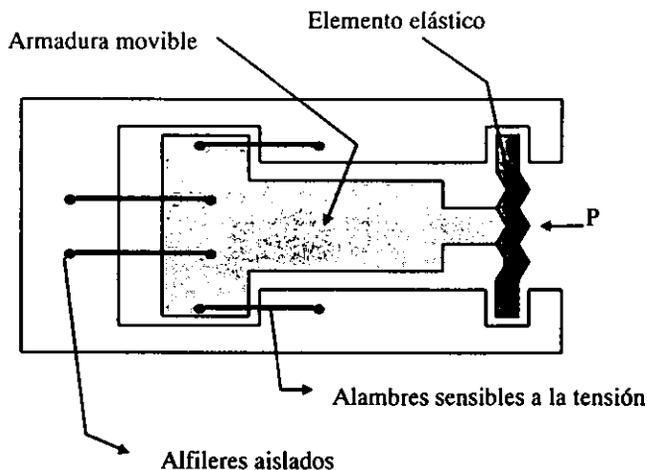


Figura 22. Manómetro de tensión.

Bajo presión, el elemento elástico, que es usualmente un diafragma, desplaza la armadura causando que dos de los alambres sufran una elongación, mientras que en los otros dos se reduce la tensión. Este cambio en la resistencia de los conductores genera que el puente pierda su balance original, lo cual ocurre proporcionalmente con la presión aplicada.

La incertidumbre de calibración de estos equipos está dentro del 1% de la escala total.

### 2.5 Manómetro de transferencia de momento.

La teoría cinética de los gases predice que la viscosidad de un gas es directamente proporcional a su presión siendo éste el fundamento del funcionamiento de estos manómetros. Sin embargo, ésta proporcionalidad solo se cumple para presiones menores de  $10^{-2}$  torr, ya que para presiones mayores la variación de la viscosidad de los gases con la presión se realiza en forma no lineal.

Existen diferentes formas para medir la viscosidad de un gas, pero en la mayoría de los casos estos equipos realizan esta medición en términos del torque requerido para hacer rotar a velocidad constante un cilindro concéntrico a otro cilindro.

Uno de los problemas que presenta este tipo de equipos es que la variación de la viscosidad con la presión es diferente para cada gas, por lo que los manómetros basados en este principio deben ser calibrados para un gas específico.

Los manómetros de transferencia de momento comerciales (Fig 23), son calibrados generalmente para aire seco y cubren rangos de 0 a 20 torr en los cuales la escala es calibrada en forma no lineal<sup>(8)</sup>.

## 2.6 Manómetro de conductividad térmica.

Cuando la presión de un gas es lo suficientemente baja como para permitir que sus moléculas recorran una trayectoria libre dentro de un sistema, la teoría cinética de los gases predice la existencia de una relación lineal entre la presión y la conductividad térmica del gas. En estos equipos el gas se encuentra entre una superficie caliente y una fría.

Al igual que en los manómetros de transferencia de momento, en estos aparatos, la relación entre presión y conductividad térmica deja de ser lineal a altas presiones. La región de transición entre la dependencia y no dependencia de la conductividad térmica con la presión se encuentra aproximadamente en el rango de  $10^{-2}$  a 1 torr (al igual que para los manómetros de transferencia de momento).

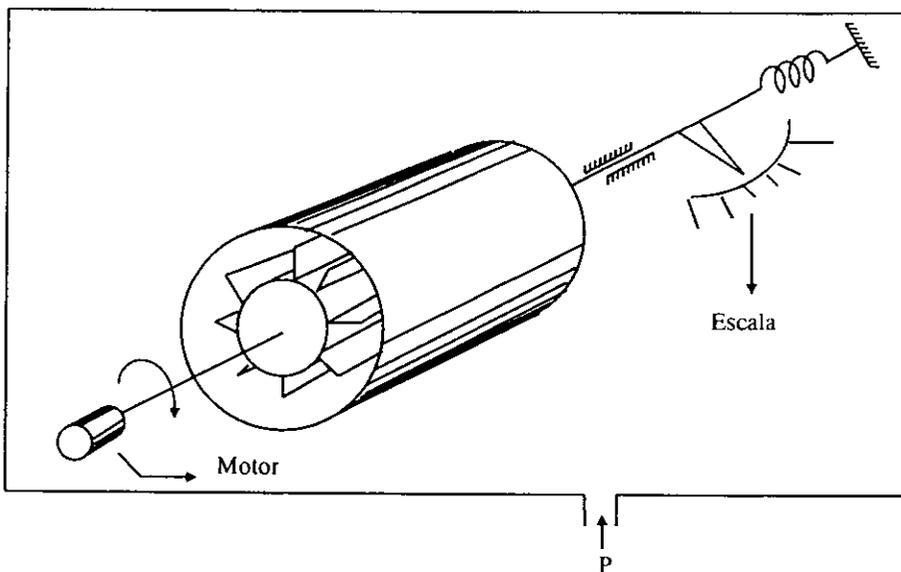


Figura 23. Manómetro de transferencia de momento.

La aplicación del principio de conductividad térmica es complicado debido a la presencia simultánea de otra forma de transferencia de calor entre las superficies fría y caliente, que es la radiación. Para contrarrestar esto se utiliza como superficie caliente un elemento calentado mediante el suministro constante de energía eléctrica. Este elemento adquiere una temperatura de equilibrio cuando la energía que recibe se balancea con sus pérdidas de calor por conducción y radiación. Las pérdidas por conducción varían con la composición y presión del gas, por lo que para un gas dado la temperatura de equilibrio del elemento caliente se puede traducir en una medida de presión.

Las pérdidas por radiación pueden minimizarse también usando superficies de baja emisividad.

Los manómetros de conductividad térmica más usados son el de termopar (Fig. 24) y el tipo Pirani (Fig. 25.1).

Los elementos básicos que componen el manómetro de conductividad térmica de termopar, son una superficie caliente que es en realidad una lámina delgada de algún metal cuya temperatura puede variarse mediante un cambio en la corriente eléctrica que pasa a través de él. Para una corriente eléctrica dada y un gas dado, la temperatura adquirida por la superficie caliente depende de la presión del gas. Esta temperatura es medida por un termopar, el cual está soldado a la superficie caliente.

La superficie fría es un tubo de vidrio que tiene una temperatura igual a la del ambiente.

El manómetro tipo Pirani consta de un elemento formado por una resistencia eléctrica de tungsteno en forma de cuatro resortes conectados en paralelo soportados dentro de un tubo de vidrio, en el cual se introduce una muestra de gas a una presión determinada. También en este manómetro la superficie fría es el tubo de vidrio.

Este tubo es conectado en un circuito en forma de puente (Fig. 25.2) junto con otro tubo de las mismas características. Uno de los tubos es evacuado y sellado y funciona como un compensador para reducir el efecto de la excitación del puente generada por los cambios de voltaje y temperatura en la lectura de salida. El flujo de corriente a través del elemento genera que este se caliente a una temperatura que depende de la presión del gas. La resistencia eléctrica del elemento cambia en función de la temperatura y este cambio en la resistencia causa que el puente quede desbalanceado. Estos equipos cubren un rango de presiones de  $10^{-5}$  a 1 torr.

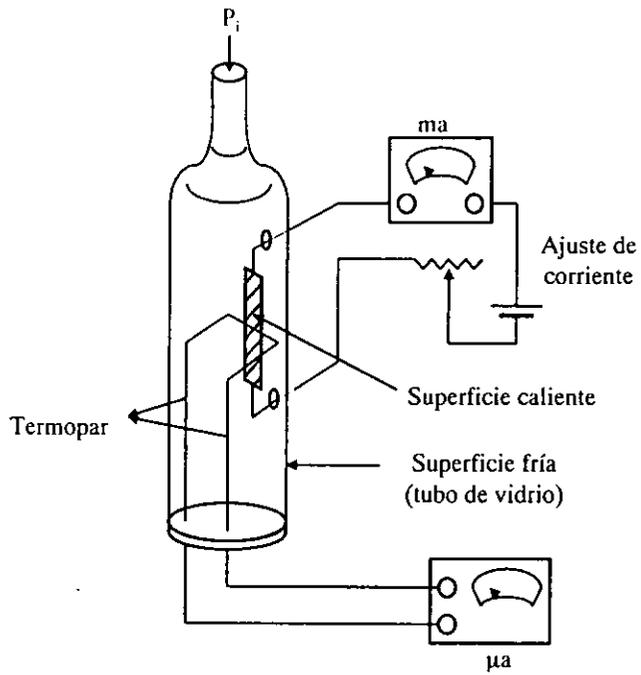


Figura 24. Manómetro de conductividad térmica.

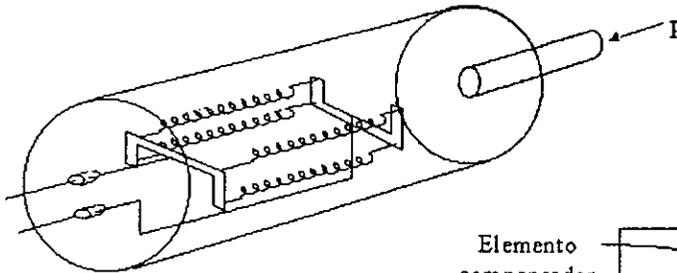


Figura 25.1. Manómetro de Pirani

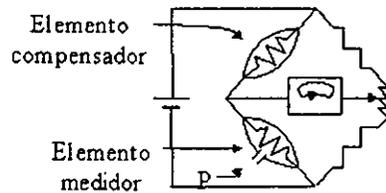


Figura 25.2. Circuito de un manómetro de Pirani

Figura 25. Manómetro de conductividad térmica tipo Pirani.

## 2.7 Manómetros de ionización de gases.

Los manómetros de ionización de gases funcionan bajo el siguiente fundamento:

Un electrón que pasa a través de una diferencia de potencial adquiere una energía cinética proporcional a la diferencia de potencial. Cuando esta energía es lo suficientemente grande y el electrón golpea a una molécula de un gas, existe la probabilidad de que el electrón arranque otro electrón de la molécula del gas (al cual se le denomina electrón secundario) dejando un posible ion con carga positiva.

En un manómetro de ionización un flujo de electrones es emitido por un cátodo. Para la operación normal de estos manómetros, los electrones secundarios forman una parte despreciable del total del flujo de electrones que suministra el cátodo.

Tomando en cuenta esto, para fines prácticos el flujo de electrones  $i_e$  es el mismo si se mide en el punto de emisión (cátodo) o en el punto de recepción (ánodo). El número de iones positivos formados es directamente proporcional a  $i_e$  y directamente proporcional a la presión del gas.

En estos equipos la emisión de electrones se debe al calentamiento del cátodo. Existen fundamentalmente dos desventajas en el uso de estos aparatos que son:

- En ocasiones el cátodo se funde debido al calentamiento al que se le somete, si es expuesto al aire mientras se calienta.
- Descomposición de algunos gases con el contacto del filamento caliente, lo que produce una contaminación del gas bajo estudio. Esto afecta directamente las mediciones de presión.

Estos manómetros son adecuados para medir presiones que se encuentren en el rango de  $10^{10}$  a 1 torr. En la Figura 26 se esquematiza un manómetro de ionización de gases.

## 2.8 Consideraciones adicionales.

Existen otros factores que de no controlarse y corregirse influyen de forma importante en la incertidumbre de las mediciones que se realizan con todos los equipos ya mencionados, y son los siguientes:

- Alineamiento: Para todos los equipos se requiere una alineación vertical para efectuar determinaciones correctas de la presión problema.

- Iluminación: En el lugar en donde se operen los equipos medidores de presión es necesaria una iluminación que permita realizar lecturas correctas en los manómetros. Por ejemplo en los equipos en los que la presión se lee en función de la altura de una columna de mercurio u otro fluido, la localización del tope del menisco es esencial.

Aparte de estos aspectos, el control de las variables de influencia es fundamental para realizar cualquier medición.

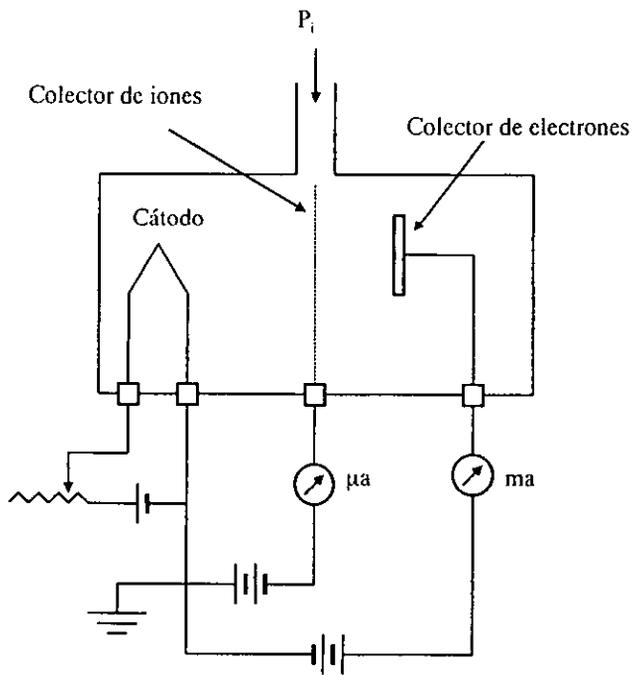


Figura 26. Manómetro de ionización de gases.

## **Capítulo III.**

### **Aspectos de seguridad en el uso y operación de manómetros tipo Bourdon.**

## Capítulo III.

### Aspectos de seguridad en el uso y operación de manómetros tipo Bourdon.

#### 3.1 Seguridad<sup>(1)</sup>.

La siguiente información tiene como propósito minimizar las fallas y accidentes que pueden resultar en el uso de los manómetros tipo Bourdon, pero debe tomarse en cuenta que la seguridad en el proceso de calibración de manómetros, así como en su uso, depende en gran parte de una selección e instalación cuidadosa de los equipos y del conocimiento de las características de los sistemas bajo estudio.

#### 3.2 Aspectos generales de seguridad.

En realidad, existen pocos casos registrados de accidentes generados por el uso de manómetros, en los que estén involucrados daños personales o daños a la propiedad, y los que llegan a presentarse, se deben en su mayoría a un mal uso o a la mala aplicación de estos equipos.

Es por esto que el usuario debe informar al distribuidor de todas las condiciones pertinentes a la aplicación del manómetro y al ambiente que ha de rodear a este, con el propósito de que el distribuidor pueda recomendar el manómetro más apropiado para cada aplicación.

Generalmente la posibilidad de que exista una falla con efectos catastróficos, se debe a la alta tensión interna que se aplica al elemento elástico y el potencial de riesgo se incrementa cuando se opera a altas presiones.

Existen equipos como reguladores de presión, sellos químicos (diafragmas), eliminadores de pulsaciones (amortiguadores), sifones y otros artículos similares que son adecuados para usarse en sistemas potencialmente peligrosos.

A continuación se mencionan los sistemas que se consideran potencialmente riesgosos y que deben evaluarse cuidadosamente.

- a) Sistemas con gases comprimidos.
- b) Sistemas con presencia de oxígeno.
- c) Sistemas con presencia de hidrógeno.
- d) Sistemas con fluidos corrosivos (gases y líquidos).
- e) Sistemas que contengan cualquier mezcla o medio explosivo o inflamable.
- f) Sistemas con vapor.
- g) Sistemas en los que la presión sea variable.
- h) Sistemas en los que puedan aplicarse accidentalmente altas sobrepresiones.
- i) Sistemas que contengan fluidos tóxicos o radioactivos (gases o líquidos).
- j) Sistemas instalados en ambientes peligrosos.

Cuando los manómetros se encuentran en contacto con medios radioactivos o corrosivos, es posible que solo se presenten fenómenos destructivos en el equipo; en estos casos el usuario debe proporcionar al distribuidor o fabricante información relativa a la aplicación del equipo y solicitar su asesoría antes de la instalación del manómetro.

La presencia de fuego y explosiones dentro de los sistemas en estudio, puede causar fallas en el elemento elástico con efectos muy violentos como la completa destrucción del manómetro o la fusión del mismo.

También se producen efectos violentos cuando se presentan fallas debidas a:

- a) Ataque del hidrógeno sobre el elemento elástico, generando que este último se vuelva quebradizo.
- b) Contaminación de gases comprimidos.
- c) Formación de acetilenos.
- d) Debilitamiento de soldaduras en uniones, propiciado por la presencia de vapor u otras fuentes de calor.
- e) Corrosión.
- f) Fatiga.
- g) Choques mecánicos.
- h) Vibración excesiva.

### **3.3 Tipos de falla de manómetros.**

#### **3.3.1 Falla por fatiga.**

Las fallas por fatiga son causadas por la tensión inducida por la presión al elemento elástico y se manifiestan generalmente como pequeñas grietas que se propagan a lo largo del elemento y que ocurren del interior al exterior de este. Estas fallas son usualmente mas críticas en sistemas en los que el fluido manométrico es un gas comprimido que cuando es un líquido.

Las grietas producidas por la tensión permiten la fuga del fluido en forma lenta, por lo que existe una acumulación de presión en la caja del manómetro. Esta acumulación puede ser eliminada mediante aberturas de alivio de presión en la caja.

El colocar un restrictor en la entrada del fluido manométrico al elemento elástico reduce la fuerza del fluido y limita el flujo de este dentro del elemento elástico, prolongando así la vida útil del instrumento.

### **3.3.2 Falla por sobrepresión.**

Las fallas por sobrepresión son causadas por la aplicación de una presión interna que supera los límites para los cuales está diseñado el elemento elástico y puede ocurrir cuando un manómetro de bajas presiones se instala en una línea de alta presión. Los efectos de las fallas por sobrepresión son impredecibles, sin embargo puede existir la proyección de partes en cualquier dirección, lo que sucede de forma más crítica en sistemas de gases comprimidos que en sistemas líquidos.

Cabe señalar que las cajas con aberturas de alivio de presión no siempre retienen las partes proyectadas.

Cuando se instalan restrictores en la entrada del fluido al manómetro, no se evitan totalmente los efectos de la falla, pero ayudan a controlar el escape del fluido que sigue después de la ruptura y reduce el potencial de efectos secundarios.

Para evitar que exista la proyección de partes en una eventual falla por sobrepresión, se utilizan generalmente cajas con frentes sólidos y alivio de presión trasero.

La ventana del manómetro no brinda una adecuada protección contra la acumulación de presión en el interior de la caja y puede ser el componente más peligroso, ya que pueden llegar a proyectarse fragmentos de vidrio hacia el exterior.

En sistemas neumáticos o hidráulicos pueden presentarse impulsos de presión de corta duración (picos de presión) especialmente cuando las válvulas de la línea de presión se abren y cierran frecuentemente.

La magnitud de estos picos de presión puede ser varias veces la magnitud de la presión normal de operación y pueden no ser indicados por el manómetro. Esto puede ocasionar una falla inmediata o una falla a largo plazo en la indicación del manómetro. Un amortiguador puede disminuir la presión que transmiten los picos al elemento elástico.

### **3.3.3 Falla por corrosión.**

Las fallas por corrosión ocurren cuando el elemento elástico ha sido debilitado mediante el ataque de sustancias químicas corrosivas presentes ya sea en el fluido manométrico o en el medio que rodea al elemento.

La falla puede presentarse en forma de fugas a través de pequeños orificios en las paredes del elemento elástico o como una falla por fatiga, debido a la ruptura por tensión de las paredes debilitadas por el deterioro químico o la tendencia del material a quebrarse.

Los sellos químicos o diafragmas deben ser considerados para usarse en medios que puedan tener efectos corrosivos sobre el elemento elástico.

### **3.3.4 Falla por explosión.**

Las fallas por explosión se presentan cuando se libera una gran cantidad de energía en forma de explosión, generada por una reacción química, como por ejemplo, la compresión adiabática del oxígeno en presencia de hidrocarburos. Desafortunadamente no existen medios para predecir la magnitud o los efectos de este tipo de fallas. En estos casos las paredes sólidas entre el elemento elástico y la ventana no necesariamente evitan la proyección de partes.

En sistemas que presentan este tipo de riesgos, se recomienda el uso de manómetros con ventanas de vidrio laminado o plástico, y cajas con relleno líquido, las cuales disminuyen los efectos de la proyección de partes.

### **3.3.5 Fallas por vibración.**

La forma más común en que se presenta una falla por vibración, es en la que el movimiento de las partes produce un desgaste en los componentes del sistema mecánico del manómetro, lo cual genera una pérdida gradual de la exactitud e incluso en ocasiones, la aguja es incapaz de indicar algún cambio de presión.

Además de esto, las vibraciones pueden ocasionar fracturas en las partes de unión del manómetro o el elemento elástico, generando una acumulación de presión en el interior de la caja, lo que puede traducirse a la larga en una falla similar a la falla por explosión.

Generalmente, las vibraciones se transmiten al manómetro por la línea de presión, por lo que se recomienda la instalación de amortiguadores en las tuberías, para disminuir los efectos que se producen en los equipos.

## **3.4 Otras recomendaciones para el uso seguro de manómetros tipo Bourdon.**

### **3.4.1 Instalación.**

Antes de realizar la instalación de un manómetro deben de considerarse cuidadosamente factores ambientales como la temperatura, la humedad, las vibraciones, las pulsaciones y los impactos a los que estará sujeto el manómetro, con el fin de determinar si es necesario hacer uso de dispositivos adicionales de protección o si se requiere algún tipo de instalación especial.

La instalación del manómetro debe realizarse con las técnicas apropiadas de ensamble y debe ser congruente con el tipo de conexión con que cuenta el equipo.

La instalación del manómetro debe llevarse a cabo con el ajuste necesario de las conexiones, asegurándose de que queden completamente herméticas con el objetivo de evitar fugas en éstas.

### **3.4.2 Presión de operación.**

El manómetro seleccionado debe tener una escala tal que la presión de operación se encuentre dentro del 25% al 75% de la escala total. La ASME recomienda que la escala total sea aproximadamente dos veces la presión que se pretende medir<sup>(10)</sup>.

### **3.4.3 Compatibilidad con el medio.**

El elemento elástico es generalmente construido de paredes delgadas, las cuales son sometidas a tensiones altas, por lo que se debe poner especial atención en el medio con el que se pondrá en contacto el elemento elástico, tanto en su interior como en su exterior, ya que cualquier material con que esté construido es susceptible de ser atacado químicamente.

El potencial del ataque corrosivo es función de la concentración, la temperatura, y la contaminación del medio, por lo que el usuario debe informar al distribuidor de las condiciones de instalación para que pueda seleccionarse el manómetro adecuado.

### **3.4.4 Cajas.**

Las cajas son comunmente de frente abierto (Fig. 27) pero existen diseños que ofrecen mayor seguridad para algunas aplicaciones.

#### **3.4.4.1 Cajas de frente sólido.**

Las cajas de frente sólido (Fig. 28) reducen la posibilidad de que exista la proyección de partes en una falla potencial del elemento elástico, con excepción de las fallas por explosión.

#### **3.4.4.2 Cajas rellenas de líquido.**

En este tipo de cajas el líquido de relleno debe ser tal que no cause ningún efecto nocivo sobre el elemento elástico y los componentes del manómetro con los que este en contacto. Generalmente se utiliza como líquido de relleno glicerina o silicón, sin embargo estos líquidos no son adecuados para todas las aplicaciones.

### **3.4.5 Montaje.**

El montaje de los manómetros debe realizarse como se indica en la Figura 29, a reserva de que el fabricante indique algún tipo de montaje específico debido al diseño de éste.

### 3.4.6 Reuso de manómetros.

No es recomendable que los manómetros sean trasladados de una aplicación a otra, pero en caso de ser necesario, deben de considerarse de manera cuidadosa los siguientes aspectos:

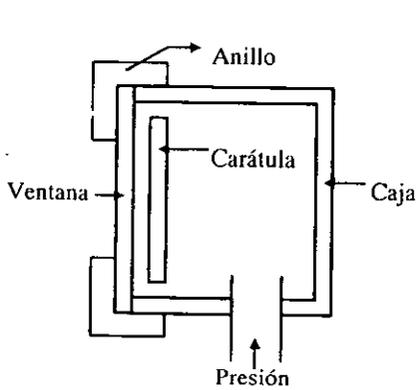


Figura 27.1 Caja sin abertura para alivio de presión interna.

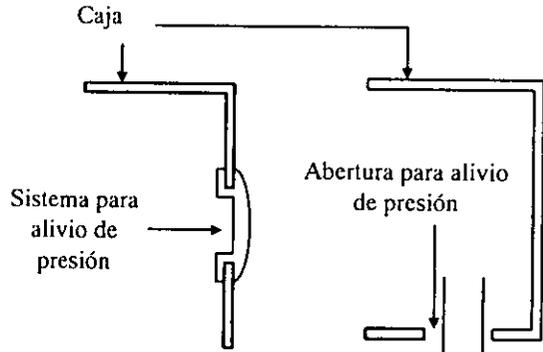


Figura 27.2 Cajas con aberturas para alivio de presión interna.

Figura 27. Cajas con frente abierto.

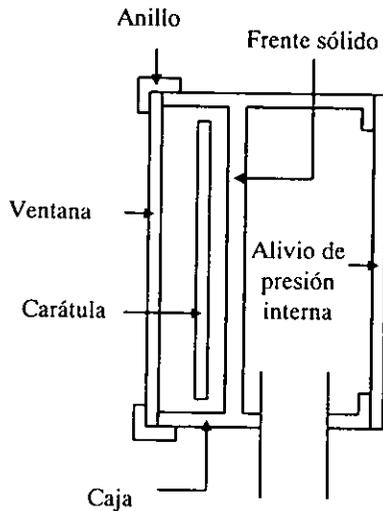


Figura 28. Caja con frente sólido y alivio de presión trasero.

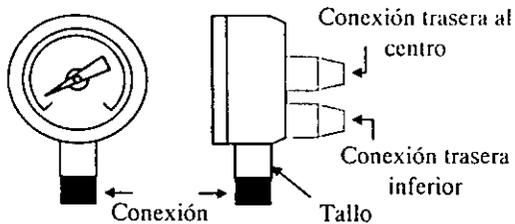


Figura 29.1 Montaje con conexión al tallo.

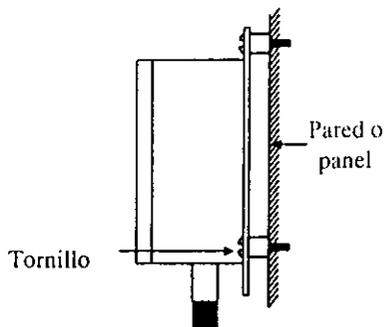


Figura 29.2 Montaje sobre superficie tipo pestaña.

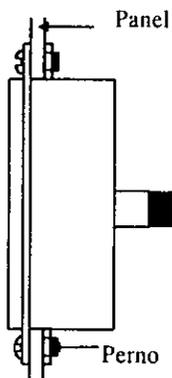


Figura 29.3 Montaje de nivel.

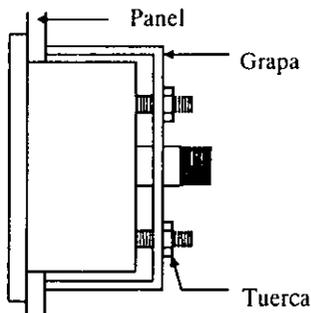


Figura 29.4. Montaje de nivel con grapa.

Figura 29. Montaje de manómetros.

### 3.4.6.1 Compatibilidad química de los sistemas.

Las consecuencias de la incompatibilidad química de los sistemas pueden ir desde la contaminación del sistema en el que se esta reutilizando el manómetro, hasta una falla por explosión. Por ejemplo, si un manómetro tiene como fluido transmisor de presión un aceite y es utilizado después para la medición de la presión de un gas con presencia de oxígeno, puede ocurrir una falla por explosión.

#### 3.4.6.2 Fatiga parcial.

La primera utilización del manómetro puede generar en el elemento elástico una fatiga parcial, sobre todo cuando existen picos de presión, lo que disminuye el tiempo de vida del equipo y puede derivar en una falla por fatiga en la segunda aplicación del manómetro.

#### 3.4.6.3 Corrosión.

La corrosión del elemento elástico generada en la primera instalación del manómetro puede ser lo suficientemente grave como para causar una falla en la segunda instalación.

#### 3.4.7 Ventanas.

La ventana puede ser el componente más peligroso del manómetro en el caso de que se presente una falla por sobrepresión o por explosión en el instrumento, sin embargo existen diferentes tipos de materiales con los que son construidas las ventanas, que dependiendo de la aplicación del manómetro y de sus condiciones de operación pueden ser de gran ayuda para evitar daños secundarios en la eventual presencia de alguna falla.

A continuación se mencionan los diferentes tipos de ventanas que se usan con mayor frecuencia.

##### 3.4.7.1 Ventana de vidrio laminado.

El vidrio laminado ofrece protección en prácticamente todas las aplicaciones, ya que reduce la posibilidad de que se esparzan partículas del vidrio si la ruptura del elemento elástico provoca alguna falla que ocasione que la ventana se rompa.

##### 3.4.7.2 Vidrio tratado a calor.

Este material ofrece grandes ventajas cuando el manómetro esta sujeto a picos de presión, debido a su gran resistencia a daños mecánicos.

### 3.4.7.3 Ventanas de plástico.

Estos materiales son susceptibles al daño por impactos mecánicos, condiciones abrasivas del ambiente, altas temperaturas y atmósferas corrosivas, por lo que deben considerarse cuidadosamente las características del sistema bajo estudio para la determinación del plástico adecuado para la aplicación.

### 3.4.7.4 Ventanas de vidrio natural.

Este material es usado con mucha frecuencia debido a su gran resistencia a los ataques químicos por abrasión y del ambiente en general. A pesar de esto debe ponerse especial atención cuando se trata de aplicaciones peligrosas.

## 3.4.8 Fluidos manométricos.

Es importante conocer (por seguridad propia), las propiedades tóxicas de los fluidos manométricos que se utilizan en la operación de cualquier medidor de presión, ya que en caso de presentarse un eventual accidente o falla en el sistema bajo estudio, se debe saber cual es el posible efecto que pueden generar dichos fluidos en caso de ser ingeridos, inhalados o si existe algún contacto cutáneo u ocular.

A continuación una breve información con fines preventivos, respecto a las propiedades físicas y tóxicas de los fluidos manométricos comunmente usados.

### 3.4.8.1 Mercurio.

#### 3.4.8.1.1 Propiedades físicas.

El mercurio es el único metal que se encuentra en fase líquida a temperatura ambiente y tiene un color plateado (por lo cual se le conoce también como plata líquida).

El símbolo químico del mercurio es Hg.

Peso atómico: 200,59 g/mol

Densidad: 14,193 g/cm<sup>3</sup> a -39°C; 13,546 g/cm<sup>3</sup> a 20°C.

Punto de ebullición: 356,58°C a 1 atmósfera de presión.

Punto de congelación: -38,87°C a 1 atmósfera de presión.

Coefficiente de expansión térmica volumétrico:  $182 \times 10^{-6}$  a 20°C.

Tensión superficial: 4,465 N/m a 20°C.

### 3.4.8.1.2 Información toxicológica.

El mercurio es tóxico cuando se encuentra tanto en compuestos orgánicos como inorgánicos.

El vapor de mercurio es fácilmente absorbido a través del tracto respiratorio, el tracto gastrointestinal o la piel.

Actúa como veneno pero sus efectos se manifiestan solo después de exposiciones prolongadas.

Un envenenamiento grave por vapor de mercurio es raro. El mercurio absorbido como vapor es eliminado del cuerpo humano relativamente rápido a través de las vías urinarias y por la materia fecal.

Los niveles de mercurio resultantes de una exposición de vapores de mercurio o de compuestos orgánicos de mercurio (incluidos los componentes del aríl mercurio, como el acetato de fenilmercurio) son fácilmente reducidos y no se acumulan. Los niveles resultantes de la exposición a los componentes del alquil mercurio como compuestos del metil mercurio o etil mercurio no pueden ser eliminados rápidamente y tienden a acumularse.

El mercurio es un elemento muy volátil y se alcanzan niveles peligrosos de vapor de mercurio a temperatura ambiente en espacios cerrados que no están debidamente ventilados.

La toxicidad límite del vapor de mercurio en aire es de  $0,05 \text{ mg/m}^3$ . A  $20^\circ\text{C}$  el aire saturado con vapor de mercurio contiene una concentración de más de 100 veces este límite.

### 3.4.8.1.3 Recomendaciones.

Debido a la naturaleza tóxica del mercurio y sus componentes, deben tomarse ciertas precauciones durante su manejo y disposición. Sus contenedores deben poder cerrarse de forma hermética. Cualquier operación que involucre mercurio debe ser realizada dentro de áreas bien ventiladas o fuera de áreas cerradas para prevenir la acumulación de vapores de mercurio en el área de trabajo; esta medida es de suma importancia si la operación incluye el calentamiento de mercurio.

## 3.4.8.2 Etanol.

### 3.4.8.2.1 Propiedades físicas.

El etanol es un líquido incoloro inflamable y soluble en líquidos orgánicos, al cual se le conoce también como alcohol o alcohol etílico.

La fórmula química del etanol es  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ .

Peso molecular: 46,07 g/mol.

Densidad: 0,7893 g/ml a  $20^\circ\text{C}$ .

Punto de ebullición: 78°C a 1 atmósfera de presión.

Punto de congelación: -130°C a 1 atmósfera de presión.

#### 3.4.8.2.2 Información toxicológica.

Cuando ocurre una intoxicación con etanol via oral, se presenta dolor de cabeza, daño hepático y renal y en ocasiones efectos mutagénicos.

Por inhalación, genera una respiración lenta, disnea y depresión del sistema nervioso central.

Puede presentarse irritación en caso de existir contacto cutáneo u ocular.

#### 3.4.8.2.3 Recomendaciones.

En caso de incendio usar CO<sub>2</sub>, agentes químicos secos, espumas o agua.

Alejar de fuentes de ignición.

En caso de derrame, absorber con arena o vermiculita.

### 3.4.8.3 Metanol.

#### 3.4.8.3.1 Propiedades físicas.

El metanol es un líquido incoloro, inflamable y soluble en líquidos orgánicos, al cual se le conoce también como alcohol metílico o carbinol.

La fórmula química del metanol es CH<sub>3</sub>O.

Peso molecular: 32,04 g/mol.

Densidad: 0,7915 g/ml a 20°C.

Punto de ebullición: 64,60°C a 1 atmósfera de presión.

Punto de congelación: -98°C a 1 atmósfera de presión.

#### 3.4.8.3.2 Información toxicológica.

La ingestión del metanol produce una depresión del sistema nervioso central, produce vómito, náuseas y ceguera.

Cuando es inhalado, produce náuseas, dolor de cabeza y laringitis.

Si existe contacto cutáneo, puede presentarse una dermatitis.

En ocasiones, el contacto vía ocular, produce daños visuales permanentes.

#### 3.4.8.3.3 Recomendaciones.

En caso de incendio usar CO<sub>2</sub>, agentes químicos secos o polímero en espuma.

Alejar de fuentes de ignición.

En caso de derrame, cubrir con cal seca, arena o sosa y ventilar el área.

## **Capítulo IV.**

### **Procedimiento de calibración de manómetros tipo Bourdon.**

## Capítulo IV.

### Procedimiento de calibración de manómetros tipo Bourdon.

#### 4.1 Condiciones para la calibración.

Como ya se ha mencionado, el funcionamiento de los equipos medidores de presión depende de las condiciones ambientales en las que estos se encuentren, es por esto que es de suma importancia el controlar y conocer durante el proceso de calibración, las variables que puedan afectar nuestras mediciones. A continuación se mencionan algunas recomendaciones para realizar de forma adecuada el proceso de calibración.

#### 4.2 Factores ambientales.

##### 4.2.1 Temperatura.

La temperatura es quizás la variable que más afecta las mediciones manométricas cuando no es controlada adecuadamente, ya que algunas de las propiedades de los equipos (sobre todo longitud y volumen) y de los fluidos manométricos (densidad y viscosidad principalmente) varían en función de la temperatura.

Por ejemplo, si la temperatura sube unos  $+3^{\circ}\text{C}$  en el momento en que se realizan las mediciones, puede esperarse un error en la indicación del manómetro de aproximadamente  $+0,1\%$  de la escala total.

Por esto es necesario que el lugar en donde se realiza la calibración cuente con un sistema de aire acondicionado que permita minimizar las variaciones de temperatura durante el proceso de calibración.

Según la normas mexicanas NMX-CH-3-1993-SCFI y NOM-13-SCFI-1993, las temperaturas del instrumento patrón y del aire ambiente deben ser de  $296\text{K}$  ( $+23^{\circ}\text{C}$ ) con desviaciones que no causen una variación de la indicación mayor a  $1/5$  del error máximo permisible del instrumento.

##### 4.2.2 Humedad.

La existencia de un exceso de humedad en el lugar donde se realiza la calibración, puede provocar que se depositen gotas de agua sobre los pesos muertos y en todo el equipo en general. Esto puede iniciar procesos de oxidación en los materiales y por lo tanto, variación en los pesos y otras propiedades, alterando así el resultado de las mediciones. Según las normas mexicanas mencionadas anteriormente, la humedad relativa no debe exceder del  $80\%$ .

### **4.2.3 Vibraciones.**

La presencia de vibraciones en el manómetro afecta directamente la indicación del equipo, dependiendo de la intensidad y frecuencia con que ocurran.

Por lo regular las vibraciones se transmiten al manómetro y al patrón mediante el contacto con cuerpos que generan estas vibraciones (como bombas y motores), o por la existencia de golpes cercanos a los equipos. Por esto se recomienda que los aparatos estén libres del contacto con cualquier otro cuerpo que pueda generar o transmitir vibraciones.

En el caso de la mesa de trabajo (en la cual se encuentra el equipo), se recomienda que tenga una cimentación adecuada que evite al máximo la transmisión de vibraciones.

Las normas ya citadas mencionan que no debe haber vibraciones o golpes que puedan producir una oscilación de la aguja indicadora con una amplitud mayor de 1/10 del espacio mas pequeño de la escala.

### **4.2.4 Polvo.**

La presencia de polvo en el lugar donde se realiza una calibración afecta el funcionamiento del patrón y del instrumento medidor de presión a calibrar, ya que pueden llegar a formarse pastas o costras de polvo que impidan el libre funcionamiento de los sistemas mecánicos de los equipos, razón por la cuál todos los instrumentos, equipos y materiales que se encuentren en el lugar de la calibración deben estar limpios, es decir, libres de polvo, grasa y cualquier tipo de suciedad.

### **4.2.5 Presión atmosférica.**

Es necesario conocer el valor de la presión atmosférica del lugar en el momento de realizar la calibración con el fin de hacer los cálculos y correcciones correspondientes a la presión que indica el instrumento patrón.

### **4.2.6 Campos magnéticos.**

La presencia de campos magnéticos cercanos al instrumento patrón y sobre todo al manómetro a calibrar, genera un error en la indicación del equipo, que depende de la intensidad del campo y del material con que esté construido el mecanismo del manómetro, ya que la fuerza de atracción entre las partes del mecanismo y el campo magnético puede causar un desacoplamiento de los componentes del manómetro o alterar el movimiento natural de la aguja. Debido a esto, se recomienda eliminar cualquier presencia de cuerpos o sistemas generadores de campos magnéticos (imanes, bobinas o transformadores) en el lugar donde se realiza la calibración.

### **4.3 Procedimiento de calibración de manómetros con una balanza de pesos muertos.**

El fundamento del siguiente procedimiento de calibración consiste en comparar la presión que se genera en una balanza de pesos muertos con la indicación que da un manómetro con elemento elástico.

Antes de iniciar la calibración del manómetro deben de realizarse dos inspecciones previas a los equipos, que son:

#### **4.3.1 Inspección Visual.**

- 4.3.1.1 Tanto el manómetro a calibrar como el instrumento patrón deben estar en buenas condiciones, sin huellas visibles de corrosión, abolladuras, polvo o suciedad.
- 4.3.1.2 Las cubiertas protectoras de los componentes de los instrumentos deben estar sin daños.
- 4.3.1.3 La ventana protectora y la carátula graduada del manómetro no deben presentar defectos como ralladuras, abolladuras, manchas y otras que puedan distorsionar las lecturas de las indicaciones.
- 4.3.1.4 La rosca unión, los sellos y aditamentos para la conexión tanto del manómetro como del instrumento patrón, deben estar en buen estado.
- 4.3.1.5 La aguja indicadora no debe presentar abolladuras, grietas, signos de corrosión u otros defectos que puedan distorsionar su indicación.
- 4.3.1.6 Verificar que el fluido manométrico este limpio.
- 4.3.1.7 Asegurarse que el nivel de líquido de la balanza de pesos muertos sea el adecuado para realizar las mediciones (regularmente el fabricante indica cual es la cantidad de líquido necesaria para la adecuada operación del equipo).
- 4.3.1.8 Las masas (o pesos muertos) deben encontrarse limpias, sin abolladuras, sin muestras de corrosión o alguna otra alteración de sus pesos originales.

#### **4.3.2 Inspección Inicial.**

- 4.3.2.1 Cuando el manómetro solo está sometido a la presión atmosférica, la indicación de la aguja debe ser de cero. Cualquier otra indicación no debe superar el error máximo permisible del instrumento.
- 4.3.2.2 Cuando se utiliza como fluido manométrico un líquido, es necesario purgar los equipos antes de realizar su conexión u acoplamiento, ya que la presencia de gases provoca inestabilidad en las indicaciones.

- 4.3.2.3 Revisar que las conexiones entre los equipos sean herméticas. Esto se realiza sometiendo al manómetro a la presión máxima de su escala durante 1 minuto, verificando que durante este tiempo no existan fugas en las uniones de los equipos (durante este tiempo, la indicación de la aguja no debe variar mas de la división mínima del instrumento).
- 4.3.2.4 Tanto el patrón como el manómetro a calibrar deben estar instalados sobre bases firmes y bajo condiciones ambientales óptimas (punto 1. Condiciones para calibración).
- 4.3.2.5 Al aumentar o disminuir la presión aplicada al manómetro, el movimiento de la aguja debe ser en forma suave.

Una vez que se han realizado estas inspecciones, el procedimiento a seguir es el siguiente:

#### 4.3.3 Proceso de medición.

- 4.3.3.1 Se dejan los equipos en el lugar donde se realizará la calibración por un tiempo no menor de dos horas para permitir que alcancen el equilibrio térmico entre ellos.
- 4.3.3.2 Se seleccionan los puntos de calibración de acuerdo a los siguientes criterios:
  - 4.3.3.2.1 Para los manómetros de clase de exactitud menor o igual a 0,5%, se seleccionan diez puntos de calibración como mínimo, distribuidos uniformemente en la escala.
  - 4.3.3.2.2 Para los manómetros de clase de exactitud mayor a 0,5%, se seleccionan como mínimo cinco puntos distribuidos de la siguiente forma:
    - Entre el 0 y 10% de la escala, el 25%, el 50%, el 75% y entre el 90 y 100% de la escala.
- 4.3.3.3 Se registran las características del manómetro a calibrar como son:
  - 4.3.3.3.1 División mínima (la mínima separación que existe entre dos marcas sucesivas de la escala).
  - 4.3.3.3.2 Alcance de medición (valores extremos que puede medir el instrumento).
  - 4.3.3.3.3 Clase de exactitud:
    - La clase de exactitud se define en base al límite superior del alcance de medición.
  - 4.3.3.3.4 Numero de serie.
  - 4.3.3.3.5 Numero de inventario.
  - 4.3.3.3.6 Unidades de medición.
  - 4.3.3.3.7 Máximo error permisible.
- 4.3.3.4 Se mide la temperatura del instrumento patrón y del manómetro a calibrar.

- 4.3.3.5 Se miden las condiciones ambientales (temperatura, humedad y presión atmosférica) del lugar donde se realiza la calibración en intervalos de 1 minuto, para llevar un registro de su posible variación.
- 4.3.3.6 Colocar el manómetro en su posición normal de trabajo (que por lo regular es en forma vertical).
- 4.3.3.7 Medir la diferencia de alturas entre el nivel de referencia de la balanza de pesos muertos y el manómetro (El nivel de referencia de la balanza es generalmente la base del pistón, mientras que el del manómetro es el centro de su carátula).
- 4.3.3.8 Verificar la indicación de cero del manómetro (Para manómetros con elemento de tope, la aguja indicadora debe estar en contacto con dicho elemento cuando el instrumento esta sometido a la presión atmosférica).
- 4.3.3.9 Se seleccionan los pesos para cada punto de calibración.
- 4.3.3.10 Se colocan las masas correspondientes a cada punto de calibración, una por una de manera cuidadosa para evitar deformaciones. Se recomienda el uso de guantes de algodón.
- 4.3.3.11 Aplicar la presión lentamente con el fin de evitar el efecto de inercia del fluido manométrico.
- 4.3.3.12 Medir la presión en forma ascendente y descendente (hasta completar al menos un ciclo) dando ligeros golpes al manómetro para eliminar la fricción del mecanismo del manómetro.
- 4.3.3.13 Antes de realizar el descenso, someter al manómetro a una presión del 100% de su escala durante 60 segundos.
- 4.3.3.14 Tomar las lecturas del instrumento en cada punto (exceptuando el de 100% de la escala) después de 30 segundos.
- 4.3.3.15 Evitar al máximo los errores de paralaje.
- 4.3.3.16 Considerar la columna de líquido del fluido manométrico y corregir con la siguiente formula:

$$P_H = -\delta_l g_l h$$

donde:

$P_H$  es la presión hidrostática debida a la columna del fluido manométrico.

$\delta_l$  es la densidad del fluido manométrico.

$g_l$  es el valor local de la aceleración de la gravedad.

$h$  es la distancia que existe entre el nivel de referencia de la balanza de pesos muertos y el manómetro(  $h$  es positiva si el centro de la carátula del manómetro está por encima del nivel de referencia de la balanza y negativa en el caso contrario).

- 4.3.3.17 Si por algún motivo se excede la presión para algún punto, regresar al anterior y repetir.

4.3.3.18 Se recomienda anotar el total de datos y lecturas durante todo el proceso de calibración en una tabla de registro.

#### **4.4 Calibración de manómetros con una columna de mercurio.**

El fundamento del siguiente procedimiento se basa en la comparación directa de la presión indicada en el manómetro a calibrar con la presión indicada en una columna de mercurio.

Las inspecciones que deben hacerse a los equipos antes de realizar la calibración son las siguientes:

##### **4.4.1 Inspección visual.**

4.4.1.1 puntos 4.3.1.1 al 4.3.1.6.

4.4.1.2 Asegurarse de que el nivel de mercurio en la columna sea el adecuado para realizar las mediciones (regularmente el fabricante indica cual es la cantidad de mercurio para la adecuada operación del equipo).

4.4.1.3 La escala graduada de la columna de mercurio debe encontrarse en buenas condiciones (limpia, sin abolladuras, sin muestras de corrosión o alguna otra alteración de su graduación original).

4.4.1.4 Todos los aditamentos necesarios para la conexión (tuberías, mangueras, llaves de paso, etc.) de los equipos deben estar en óptimas condiciones y deben permitir que el sistema sea completamente hermético, con la finalidad de evitar fugas y asegurar el perfecto funcionamiento del sistema.

##### **4.4.2 Inspección Inicial.**

4.4.2.1 puntos 4.3.2.1 al 4.3.2.5

4.4.2.2 Es importante que el sistema generador de presión permita aumentar y disminuir la presión de forma continua. De no ser así, el responsable de la calibración puede hacerlo manualmente mediante la manipulación de la llave de paso (Fig. 30).

Una vez que se han conectado los equipos como en la Figura 30, se realiza el siguiente proceso de medición.

##### **4.4.3 Proceso de medición.**

4.4.3.1 Se aplica el punto 4.3.3.1

4.4.3.2 Se seleccionan los puntos de calibración de acuerdo a los criterios 4.3.3.2.1 y 4.3.3.2.2

- 4.4.3.3 Se registran las características del manómetro a calibrar como en los puntos 4.3.3.3.1 al 4.3.3.3.7
- 4.4.3.4 Se ajusta el nivel de la columna de mercurio haciéndolo coincidir con el cero de la escala.

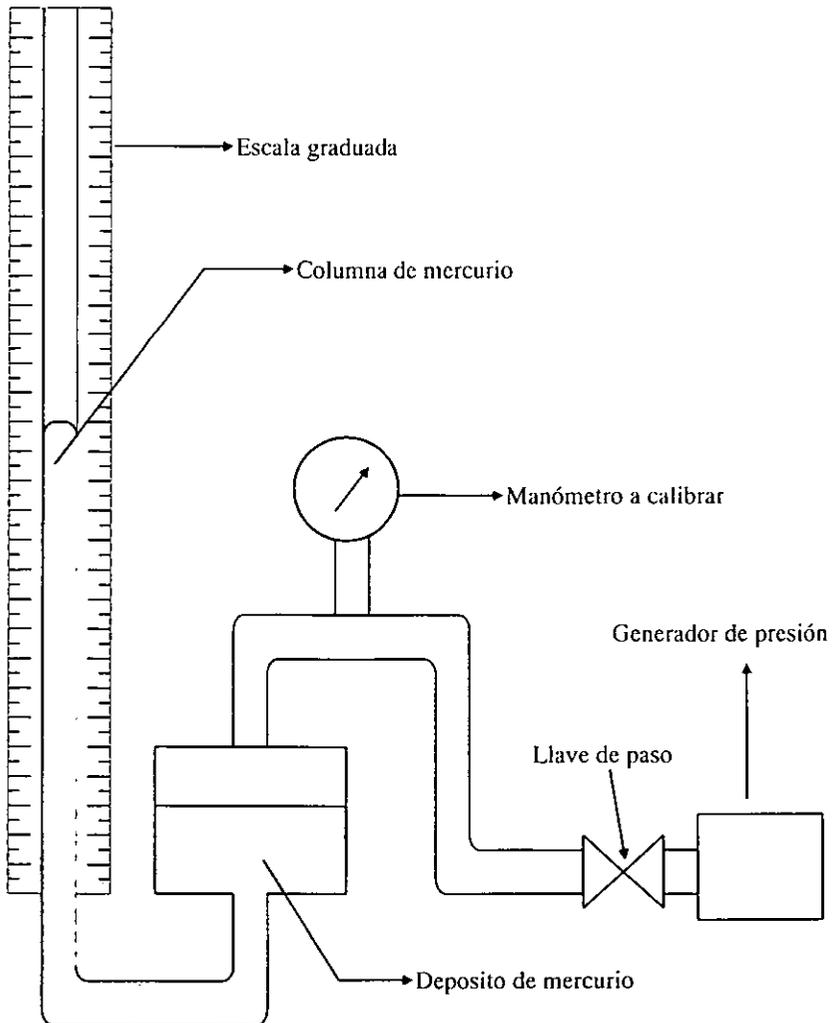


Figura 30.

- 4.4.3.5 Se mide las temperaturas del mercurio de la columna y la del manómetro a calibrar.
- 4.4.3.6 Se miden las condiciones ambientales (temperatura, humedad y presión atmosférica) del lugar donde se realiza la calibración en intervalos de 1 minuto, para llevar un registro de su posible variación.
- 4.4.3.7 Se coloca el manómetro en su posición de trabajo (ver Figura 30).
- 4.4.3.8 Se verifica la indicación de cero del manómetro a calibrar (punto 4.2.3.8).
- 4.4.3.9 Los puntos 4.4.3.4 y 4.4.3.8 deben realizarse sin el funcionamiento del sistema generador de presión.
- 4.4.3.10 Se aplica presión de forma lenta y creciente.
- 4.4.3.11 Se aplican los puntos 4.3.3.12 al 4.3.3.15 y del 4.3.3.17 al 4.3.3.18.
- 4.4.3.12 Se hace la conversión de unidades del patrón a las del manómetro.
- 4.4.3.13 Si la temperatura ambiente del lugar de la calibración es diferente de la temperatura a la cual fue calibrada la escala graduada del patrón, debe hacerse una corrección por diferencia de temperatura debido a la dilatación térmica del material de la escala, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h_c = 1 + \alpha (t - t_r) h_i \quad (29)$$

donde:

$\alpha$  = es el coeficiente de expansión térmica del material con el que esta construida la escala.

$h_i$  = es la lectura de la columna de mercurio sin corregir.

$h_c$  = es la lectura corregida por diferencia de temperaturas.

$t$  = es la temperatura ambiente del lugar de la calibración.

$t_r$  = es la temperatura de referencia a la cual fue calibrada la escala (este dato debe ser proporcionado por el fabricante).

- 4.4.3.14 Si se utiliza una columna con cisterna (como comúnmente se hace) debe de corregirse la altura de la columna de acuerdo a la ecuación (9) del capítulo I.

## Capítulo V.

Cálculo de la incertidumbre de las mediciones.

## Capítulo V.

### Cálculo de la incertidumbre de las mediciones.

#### 5.1 Introducción.

Ya que se han realizado todas las mediciones de acuerdo al proceso de medición, resulta de gran interés para el responsable de dicho proceso, el conocer cual es la calidad que tienen las mediciones obtenidas, ya que en función de estos resultados, se tomará un cierto número de decisiones, dependiendo de la finalidad que se busque al realizar el proceso.

Por lo tanto, un resultado de medición tendrá más calidad, cuando permita lograr más eficacia en las decisiones que se tomen basándose en él.

Por todo esto, la calidad del resultado de una medición, se debe juzgar en función del grado de representatividad que ésta tenga de la magnitud que se intenta cuantificar (en nuestro caso, la presión de un sistema determinado).

Así pues, la calidad de una medición, está relacionada con la información que pueda darnos, y como consecuencia, el uso de los valores obtenidos mediante un proceso de medición, y la confianza que puedan tener, se sustenta en la evaluación de la calidad de estos.

Vivimos en un mundo que se encamina vertiginosa e irremediamente hacia la consolidación de un mercado globalizado, en donde entre otras cosas, se pretende que el resultado de cualquier medición que se efectúe en un país, pueda utilizarse en otro, por lo que resulta conveniente y necesario, la universalización del procedimiento por medio del cual se cuantifique la incertidumbre de los resultados de las mediciones.

Internacionalmente se utiliza el concepto de incertidumbre para cuantificar y representar la calidad de una medición. En otras palabras, la incertidumbre del resultado de una medición refleja la falta de conocimiento exacto del valor del mensurando.

Es importante mencionar que antes de realizar cualquier medición, es conveniente, el identificar los eventos, conceptos, fenómenos, actitudes o propiedades que puedan disminuir claridad o transparencia al número que se obtiene con la utilización del proceso de medición.

La incertidumbre del resultado de una medición, está compuesta de diversos factores, los cuales se clasifican en dos categorías, dependiendo de la forma en que se estime su valor numérico.

Estas dos categorías son la incertidumbre tipo A y B, las cuales se describen a continuación:

**Incertidumbre tipo A:** Son aquellas que se evalúan mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones (los componentes que se encuentran en esta categoría se caracterizan mediante las desviaciones estándar estimadas a partir de las observaciones realizadas).

**Incertidumbre tipo B:** Son aquellas que se evalúan por otros medios.

## 5.2 Incertidumbre de una medición<sup>(20, 21)</sup>.

Podemos definir la incertidumbre de una medición como la duda que tiene la persona que mide, acerca de la calidad y la reproducibilidad de los valores que informa, y se cuantifica mediante un procedimiento aceptado por convención, con el cual es posible informarla como un parámetro asociado al valor del resultado de la medición.

### 5.2.1 Evaluación de la incertidumbre estándar.

Generalmente, cualquier mensurando, al cual llamaremos  $Z$ , se determina a partir de otras magnitudes  $W_i$  a través de una relación  $f$ , lo cual se representa como sigue:

$$Z = f(W_1, W_2, W_3, \dots, W_n) \quad (30)$$

Los argumentos  $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$  de los cuales depende el valor del mensurando  $Z$ , pueden identificarse a su vez como mensurando y depender de otras magnitudes.

Los argumentos  $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ , pueden dividirse en dos categorías:

- Magnitudes cuyos valores e incertidumbres se determinan directamente en la medición (estos valores e incertidumbres pueden ser obtenidos de por ejemplo, una sola observación, observaciones repetidas o por juicio basado en la experiencia, y pueden involucrar la determinación de correcciones en la lectura de los instrumentos y correcciones debidas a la presencia de magnitudes cuya influencia deba ser tomada en cuenta, tales como la temperatura ambiente, la presión barométrica y la humedad).
- Magnitudes cuyos valores e incertidumbres son incorporados a la medición y que provienen de fuentes externas, tales como magnitudes asociadas con patrones de medición calibrados, materiales de referencia certificados y datos de referencia obtenidos de manuales.

Llamemos  $z$  a la estimación del mensurado  $Z$ , la cual se obtiene de la ecuación (30) usando los argumentos estimados  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  para los valores de las  $n$  cantidades  $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ . Tomando en cuenta esto, la estimación de la magnitud resultante  $z$ , que es el resultado de la medición, está dada por:

$$z = f(w_1, w_2, w_3, \dots, w_n) \quad (31)$$

La desviación estándar asociada con cada valor estimado de los argumentos  $w_i$ , se denomina incertidumbre estándar y se denota por  $u(w_i)$ , mientras que la desviación estándar asociada con la estimación del resultado de la medición  $z$  se denomina incertidumbre estándar combinada y se denota por  $u_c(z)$ .

Cada valor estimado de un argumento  $w_i$  y su incertidumbre estándar asociada  $u(w_i)$  se obtienen a partir de una distribución de los posibles valores del argumento  $W_i$ . Esta distribución de probabilidad puede estar basada en frecuencia, es decir, basada en una serie de observaciones  $W_{i,k}$  de  $W_i$ , o puede ser una distribución a priori. Las evaluaciones tipo A de las componentes de la incertidumbre estándar están basadas en distribuciones de frecuencia, mientras que las evaluaciones del tipo B se basan en distribuciones a priori.

### 5.2.2 Evaluación de la incertidumbre tipo A.

Para un argumento  $W_i$  estimado a partir de  $n$  observaciones repetidas independientes  $W_{i,k}$  la media aritmética  $\bar{W}_i$  obtenida de la siguiente ecuación:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (32)$$

se usa como la estimación del argumento  $w_i$ , en la ecuación (31) para determinar el resultado de la medición  $z$ ; esto es,  $w_i = \bar{W}_i$ .

Las observaciones individuales  $q_k$  pueden diferir en valor debido a efectos aleatorios en las magnitudes que las afectan. La varianza de la distribución de probabilidad de  $q$ , que es también la varianza experimental de las observaciones, está dada por:

$$\sigma^2(q_k) = \left( \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \right) \quad (33)$$

Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada positiva  $s(q_k)$ , denominada desviación estándar experimental, caracterizan a la variabilidad de los valores observados  $q_k$ , o más específicamente, su dispersión al rededor de la media  $\bar{q}$ .

La mejor estimación de  $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$ , la varianza de la media, está dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_i)}{n} \quad (34)$$

La varianza experimental de la media  $s^2(\bar{q})$  y la desviación estándar experimental de la media  $s(\bar{q})$ , que es igual a la raíz cuadrada positiva de  $s^2(\bar{q})$ , cuantifican que tan bien  $\bar{q}$  estima el valor esperado de  $q$ , y cualquiera de ellas puede usarse como una medida de la incertidumbre de  $\bar{q}$ .

Por lo tanto, para un argumento  $W_i$  determinado a partir de  $n$  observaciones independientes repetidas  $W_{ik}$ , la incertidumbre estándar  $u(w_i)$  de su estimación  $w_i = W_i$  es  $u(w_i) = s(\bar{W}_i)$ , donde  $s^2(\bar{W}_i)$  se calcula de acuerdo a la ecuación (34). Por conveniencia,  $u^2(w_i) = s^2(\bar{W}_i)$  y  $u(w_i) = s(\bar{W}_i)$  son llamadas a veces varianza tipo A e incertidumbre estándar tipo A, respectivamente.

Los grados de libertad  $v_i$  de  $u(w_i)$ , que son  $n-1$  en el caso simple en que  $w_i = \bar{W}_i$  y  $u(w_i) = s(\bar{W}_i)$  y que se calculan a partir de  $n$  observaciones independientes deben siempre ser expresados cuando se documentan las evaluaciones de las componentes de incertidumbre tipo A.

### 5.2.3 Evaluación de la incertidumbre tipo B.

Para una estimación  $w_i$  de un argumento  $W_i$  que no se obtuvo de observaciones repetidas, la varianza estimada asociada  $u^2(w_i)$  o la incertidumbre estándar  $u(w_i)$  son evaluadas mediante juicios y criterios científicos basados en toda la información disponible sobre la variabilidad de  $W_i$ . Esta información puede incluir:

- Datos de mediciones anteriores.
- Experiencia con el conocimiento general de las características, el comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos relevantes.
- Especificaciones de los fabricantes.
- Datos obtenidos tanto de los certificados de calibración y otros tipos de certificados.
- Incertidumbres asignadas a datos de referencia tomados de manuales.

Por conveniencia,  $u^2(w_i)$  y  $u(w_i)$ , evaluadas de este modo, son algunas veces llamadas varianza tipo B e incertidumbre estándar tipo B, respectivamente.

Si la estimación  $w_i$  se toma de una especificación del fabricante, de un certificado de calibración, manual u otra fuente y su incertidumbre asignada se establece como un múltiplo particular de una desviación estándar, la incertidumbre estándar  $u(w_i)$  es simplemente el valor asignado dividido por el multiplicador, y la varianza estimada  $u^2(w_i)$  es el cuadrado de dicho cociente.

La incertidumbre asignada a  $w_i$  no necesariamente está dada como un múltiplo de una desviación estándar. En lugar de eso, puede encontrarse que la incertidumbre asignada define un intervalo con un nivel de confianza de 90, 95, o 99 por ciento.

A menos que se indique otra cosa, uno puede suponer que se usó una distribución normal para calcular la incertidumbre asignada, y recuperar la incertidumbre estándar de  $w_i$  dividiendo la incertidumbre asignada por el factor apropiado para la distribución normal. Los factores correspondientes a los tres niveles de confianza mencionados son 1,64; 1,96; y 2,58.

Consideremos el caso donde, con base en la información disponible, es posible establecer que "existe una probabilidad del 50% de que el valor del argumento  $W_i$  se encuentre en el intervalo de  $a_-$  hasta  $a_+$ ," (en otras palabras, la probabilidad de que  $W_i$  caiga dentro de este intervalo es 0,5 o 50 %). Si podemos suponer que la distribución de valores de  $W_i$  es aproximadamente normal, entonces la mejor estimación de  $w_i$  puede tomarse como el punto intermedio de tal intervalo. Adicionalmente, si la mitad del ancho del intervalo se denota como  $a=(a_+ - a_-)/2$ , uno puede tomar  $u(w_i) = 1,48a$ , porque para una distribución normal con valor esperado  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$  el intervalo  $\mu \pm \sigma/1,48$  incluye aproximadamente al 50 por ciento de la distribución.

Consideremos un caso similar pero donde, con base en la información disponible, es posible establecer que "existen alrededor de dos de cada tres posibilidades de que el valor de  $W_i$  se encuentre en el intervalo de  $a_-$  hasta  $a_+$ ," (en otras palabras, la probabilidad de que  $W_i$  esté dentro de ese intervalo es alrededor de 0,67). Entonces razonablemente es posible tomar  $u(w_i) = a$ , porque para una distribución normal con esperanza  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$  el intervalo  $\mu \pm \sigma$  comprende alrededor de 68,3 por ciento de la distribución.

En otros casos puede que sea posible estimar sólo los límites (superior o inferior) para  $W_i$ , en particular para establecer que "la probabilidad de que el valor de  $W_i$  esté dentro del intervalo de  $a_-$  hasta  $a_+$ , para todos los propósitos prácticos es igual a uno y la probabilidad de que  $W_i$  caiga fuera de ese intervalo es esencialmente cero". Si no existe un conocimiento específico acerca de los posibles valores de  $W_i$  dentro del intervalo, uno puede únicamente suponer que es igualmente probable para  $W_i$  tomar cualquier valor dentro del intervalo (una distribución uniforme o rectangular de valores posibles). Entonces  $w_i$ , o el valor esperado de  $W_i$ , es el punto medio del intervalo  $w_i=(a_+ + a_-)/2$ , con varianza asociada

$$u^2(w_i) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} \quad (35)$$

Si la diferencia entre los límites  $a_+$  y  $a_-$ , se denota por  $2a$ , entonces la ecuación (35) se convierte en:

$$u^2(w_i) = a^2/3 \quad (36)$$

Los límites superior e inferior,  $a_+$  y  $a_-$ , respectivamente, del argumento  $W_i$  podrían no ser simétricos con respecto a su mejor estimación  $w_i$ ; mas específicamente, si el límite inferior se escribe como  $a_- = w_i - b_-$  y el límite superior como  $a_+ = w_i + b_+$ , entonces  $b_+ \neq b_-$ . Debido a que en este caso  $w_i$  (que se supone es la esperanza de  $W_i$ ) no está en el centro del intervalo de  $a_-$  hasta  $a_+$ , la distribución de probabilidad de  $W_i$  no puede ser uniforme en todo el intervalo.

Sin embargo, podría no haber suficiente información disponible para escoger una distribución adecuada; diferentes modelos conducirán a diferentes expresiones para la varianza. En ausencia de tal información la aproximación más simple es:

$$u^2(w_i) = \frac{(b_+ + b_-)^2}{12} = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} \quad (37)$$

la cual es la varianza de una distribución rectangular con ancho  $b_+ + b_-$ .

En una distribución rectangular simétrica, debido a que no hay conocimiento específico acerca de los posibles valores de  $W_i$  dentro de sus límites estimados  $a_+$  y  $a_-$ , fue posible suponer únicamente que para  $W_i$  era igualmente probable tomar cualquier valor dentro de estos límites, con probabilidad cero de caer fuera de ellos. Tales discontinuidades de la función escalón en una distribución de probabilidad no tienen, frecuentemente, sentido físico. En muchos casos es más realista esperar que los valores cercanos a los límites sean menos probables que aquellos que están cerca del punto medio.

Es entonces razonable reemplazar la distribución rectangular simétrica con una distribución trapezoidal simétrica con igual pendiente en ambos lados (un trapezoide isósceles), con una base inferior de longitud  $a_+ - a_- = 2a$ , y una base superior de longitud  $2a\beta$ , donde  $0 \leq \beta \leq 1$ . Conforme  $\beta \rightarrow 1$  esta distribución trapezoidal se aproxima a la distribución rectangular simétrica, mientras que para  $\beta = 0$  ésta es una distribución triangular. Suponiendo tal distribución trapezoidal para  $W_i$ , uno encuentra que la esperanza de  $W_i$  es  $w_i = (a_+ + a_-)/2$  y su varianza asociada es:

$$u^2(w_i) = a^2 \frac{(1 + \beta)^2}{6} \quad (38)$$

la cual se convierte para la distribución triangular, con  $\beta=0$ , en:

$$u^2(w_i) = a^2/6 \quad (39)$$

Es importante no "contar dos veces" las componentes de la incertidumbre. Si un componente de incertidumbre que resulta de un efecto en particular, se obtiene a partir de una evaluación tipo B, debería incluirse como una componente independiente de incertidumbre en el cálculo de la incertidumbre estándar combinada del resultado de la medición, únicamente si el efecto no contribuye a la variabilidad apreciada en las observaciones. Esto es así porque la incertidumbre debida a la porción del efecto que contribuye a la variabilidad observada está ya incluida en la componente de incertidumbre obtenida a partir del análisis estadístico de las observaciones.

#### 5.2.4 Determinación de la incertidumbre estándar combinada.

La incertidumbre estándar de  $z$ , donde  $z$  es la estimación del mensurando  $Z$  y por lo tanto el resultado de la medición, se obtiene combinando apropiadamente las incertidumbres estándar de las estimaciones de los argumentos  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ . Esta incertidumbre estándar combinada de la estimación  $z$  se denota por  $u_c(z)$ .

La incertidumbre estándar combinada  $u_c(z)$  es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada  $u_c^2(z)$ , la cual está dada por:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial w_i} \right)^2 u^2(w_i) \quad (40)$$

donde  $f$  es la función dada en la ecuación (30). Cada  $u(w_i)$  es una incertidumbre estándar tipo A o tipo B. La incertidumbre estándar combinada  $u_c(z)$  es una desviación estándar estimada que caracteriza la dispersión de los datos que pueden ser razonablemente atribuidos al mensurando  $Z$ .

La ecuación (40), la cual esta basada en una aproximación en serie de Taylor a primer orden de  $Z = f(W_1, W_2, W_3, \dots, W_n)$ , expresa la ley de propagación de incertidumbres.

Las derivadas parciales  $\partial f / \partial w_i$  son iguales a  $\partial f / \partial W_i$  evaluadas en  $W_i = w_i$ . Estas derivadas llamadas frecuentemente coeficientes de sensibilidad, describen cómo la estimación  $z$  varía con los cambios de las estimaciones de los argumentos  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ . En particular, el cambio en  $z$  producido por un pequeño cambio  $\Delta w_i$  en la estimación del argumento  $w_i$  está dado por  $(\Delta z)_i = (\partial f / \partial w_i)(\Delta w_i)$ .

Si este cambio es generado por la incertidumbre estándar de la estimación  $w_i$ , la correspondiente variación en  $z$  es  $(\partial f / \partial w_i) u(w_i)$ .

La varianza combinada  $u_c^2(z)$  puede entonces ser vista como una suma de términos cada uno de los cuales representa la varianza estimada asociada con la estimación del mensurando  $z$  generada por la varianza estimada asociada con cada determinación de  $w_i$ .

Esto sugiere escribir la ecuación 10 como:

$$u_c^2(z) = \sum_{i=1}^n [c_i u(w_i)]^2 = \sum_{i=1}^n u_i^2(z) \quad (41)$$

donde:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial w_i}; u_i(z) = |c_i| u(w_i) \quad (42)$$

### 5.2.5 Determinación de la incertidumbre expandida.

Aunque  $u_c(z)$  puede ser universalmente usada para expresar la incertidumbre del resultado de una medición, en algunas aplicaciones comerciales, industriales o regulatorias, y cuando la salud o la seguridad están involucradas, es frecuentemente necesario proporcionar una medida de la incertidumbre que define un intervalo alrededor del resultado de la medición que se espera incluya una fracción grande de la distribución de valores que razonablemente pueden ser atribuidos al mensurando.

La medida adicional de la incertidumbre que cumple con el requisito de definir un intervalo alrededor del resultado de la medición que se espera incluya una fracción grande de la distribución de valores que razonablemente pueden ser atribuidos al mensurando es llamada incertidumbre expandida y se denota por el símbolo  $U_E$ . La incertidumbre expandida  $U_E$  se obtiene al multiplicar la incertidumbre estándar combinada  $u_c(z)$  por un factor de cobertura  $k$ :

$$U_E = k u_c(z) \quad (43)$$

El resultado de una medición se expresa entonces convenientemente, como  $Z = z \pm U_E$ , que se interpreta diciendo que la mejor estimación del valor atribuible al mensurando  $Z$  es  $z$ , y que se espera que el intervalo que va de  $z - U_E$  a  $z + U_E$  abarque una fracción importante de la distribución de los valores que razonablemente pueden ser atribuidos a  $Z$ .

Tal intervalo también se puede expresar como:  $z - U_E \leq Z \leq z + U_E$ .

#### 5.2.5.1 Elección del factor de cobertura.

El valor del factor de cobertura  $k$  se elige en base al nivel de confianza requerido para el intervalo de  $z - U_E$  a  $z + U_E$ . En general,  $k$  tomará valores entre 2 y 3. Sin embargo, para ciertas aplicaciones especiales  $k$  podrá estar fuera de este intervalo de valores. La experiencia y el conocimiento a fondo del uso que se le dé a los resultados de las mediciones, puede facilitar grandemente la selección del valor apropiado para  $k$ .

Idealmente, se debería ser capaz de elegir un valor específico del factor de cobertura  $k$  que determinaría el intervalo  $Z = z \pm U_k = z \pm k u_c(z)$  correspondiente al nivel de confianza particular  $p$ , tal como el 95 o 99 %; en forma equivalente, para un valor dado de  $k$ , sería ideal poder establecer inequívocamente el nivel de confianza asociado con ese intervalo. Sin embargo, esto no es sencillo de hacer en la práctica ya que se requiere un conocimiento amplio de la distribución de probabilidad caracterizada por el resultado de la medición  $z$ , y la incertidumbre estándar combinada  $u_c(z)$ . Aunque estos parámetros son de importancia crítica, son por sí mismos insuficientes para el propósito de establecer intervalos que tengan niveles de confianza exactamente conocidos.

### 5.3 Procedimiento de evaluación de la incertidumbre en la calibración de manómetros con elemento elástico tipo Bourdon, usando como patrón una balanza de pesos muertos.

A continuación se muestra el procedimiento que se siguió para determinar la incertidumbre expandida de una serie de mediciones, obtenidas de la calibración de un manómetro tipo Bourdon, usando como patrón una balanza de pesos muertos.

La ecuación que se utilizó para el cálculo de la presión generada en una balanza de pesos muertos es la siguiente:

$$P = \frac{mg_1 \left[ t - \left( \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \right] + \gamma \sqrt{4\pi A_0}}{A_0 \left[ 1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - t_r) \right] (1 + bp_n)} - H(f - \rho_a) g_t \quad (44)$$

donde:

$P$  = presión generada en la balanza de pesos muertos.

$m$  = masa total de los pesos muertos.

$g_1$  = aceleración local de la gravedad.

$\rho_a$  = densidad del aire circundante a las masas.

$\rho_m$  = densidad de los pesos muertos.

$\gamma$  = tensión superficial del fluido manométrico.

$A_0$  = área transversal del pistón.

$\alpha_c$  = coeficiente de dilatación térmica del cilindro.

$\alpha_p$  = coeficiente de dilatación térmica del pistón.

$t$  = temperatura del embolo al momento de realizar la calibración.

$t_r$  = temperatura de referencia del pistón.

$b$  = coeficiente de deformación elástica del émbolo.

$p_n$  = presión nominal.

$H$  = diferencia de alturas entre la parte inferior del pistón sujeto a presión y el punto de medición del manómetro a calibrar.

$f$  = densidad del fluido manométrico a la temperatura ambiente del lugar de la calibración.

### 5.3.1 Evaluación de la incertidumbre de los componentes de la ecuación (44).

#### 5.3.1.1 Incertidumbre sobre el valor de m.

Ya que no se realizaron mediciones de los valores de las masas correspondientes a los pesos muertos que se utilizaron para fijar o medir la presión en la balanza, solo se dispone de la información que a este respecto, proporciona el fabricante.

El fabricante de los pesos muertos informa que el valor de cada masa, tiene asociado un error de  $\pm 0,1 \%$  de su valor.

Los valores de las masas de los pesos muertos se muestran a continuación:

Peso muerto	Masa (Oz)	Masa (kg)
L5 H25	5	0,14175
L10 H50	10	0,2835
L20 H100	20	0,567
L40 H200	40	1,134

Con estos datos podemos obtener las siguientes incertidumbres tipo B:

#### Incertidumbre tipo B del peso muerto L5 H25.

Para calcular la incertidumbre de las masas, se asumirá que el error que informa el fabricante obedece a una distribución rectangular.

$$U_{\text{combinada}} = U_{\text{CBm L5H25}} = \pm \frac{0,001 * 0,14175 \text{ kg}}{2\sqrt{3}} = \pm 4,09197 * 10^{-5} \text{ kg}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de las incertidumbres asociadas a cada masa.

La incertidumbre expandida de cada masa se determinó usando un factor de cobertura  $k=2$ .

Peso muerto	Masa (kg)	$U_{\text{CBm}}$ (kg)	$U_{\text{expandida}}$ (kg)
L5 H25	0,14175	$\pm 4,09197 * 10^{-5}$	$\pm 8,18394 * 10^{-5}$
L10 H50	0,2835	$\pm 8,18394 * 10^{-5}$	$\pm 1,636788 * 10^{-4}$
L20 H100	0,567	$\pm 1,636788 * 10^{-4}$	$\pm 3,273576 * 10^{-4}$
L40 H200	1,134	$\pm 3,273576 * 10^{-4}$	$\pm 6,547152 * 10^{-4}$

### 5.3.1.2 Incertidumbre del valor local de la gravedad ( $g_1$ ).

Todo el proceso de calibración se realizó en el laboratorio de Física de la Facultad de Química de la UNAM, en donde el Instituto de Geofísica de la misma dependencia, determinó una gravedad local de:

$$g_1 = 9,7792644 \pm 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$$

Como no se dispone de otro tipo de información, se asumirá que la incertidumbre que informa el Instituto de Geofísica es una incertidumbre expandida con un factor de cobertura de 2. Por lo tanto la incertidumbre asociada al valor de la gravedad será de tipo B como se muestra a continuación:

$$U_{B \text{ gravedad}} = \pm \frac{1 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{2} \frac{1}{\text{s}^2} = \pm 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Por lo tanto } U_x = \pm 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Cuando no se conoce el valor local de la gravedad, es posible determinarlo (El CENAM informa que al utilizar el siguiente método, se obtiene una incertidumbre de  $\pm 0,01$  %) con la siguiente fórmula<sup>(24)</sup>:

$$g_1 = G(1 + b_1 \text{sen}^2 \theta - b_2 \text{sen}^2 2\theta) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H \quad (45)$$

donde:

$g_1$  = valor local de la aceleración de la gravedad en  $\text{m/s}^2$ .

$G$  = valor de la aceleración de la gravedad en el Ecuador =  $9,7803184 \text{ m/s}^2$ .

$b_1$  =  $0,0053024$

$b_2$  =  $0,0000058$

$\theta$  = latitud (del lugar en donde se realiza la calibración) en grados.

$H$  = altitud (del lugar donde se realiza la calibración) = altura sobre el nivel del mar en m.

Si los valores de  $\theta$  y  $H$  son obtenidos de tablas, la incertidumbre asociada al valor de  $g_1$  determinada por éste método, será de tipo B.

El valor de  $g_1$  obtenido (para la Ciudad de México) con la ecuación (45) fue el siguiente:

$$g_1 = 9,779124016 \text{ m/s}^2$$

Ya que el CENAM informa una incertidumbre del 0.01% del valor de  $g$ , obtenido por este método, la incertidumbre asociada a  $g$ , es:

$$U_{gt} = \frac{0.0001 * 9,779124016 \text{ m/s}^2}{2} = 4.889562008 * 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Por lo tanto, el valor de la gravedad local, calculada con la ecuación (45) es:

$$g_t = (9,779124016 \pm 4.889562008 * 10^{-4}) \text{ m/s}^2$$

En el anexo 2 se incluye una tabla de valores de  $\theta$  y  $H$  para distintas ciudades.

Por considerarlo de mayor confiabilidad (por tener una menor incertidumbre), usaremos en los posteriores cálculos, el valor de  $g$ , informado por el Instituto de Geofísica de la UNAM.

### 5.3.1.3 Incertidumbre del valor de la densidad del aire circundante a las masas ( $\rho_a$ ).

La densidad del aire se calculó mediante la siguiente formula:

$$\rho_a = \frac{P_a M_u}{ZRT} \left[ 1 - X_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_u} \right) \right] \quad (46)$$

donde:

$\rho_a$  = Densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ).

$P_a$  = Presión ambiental (Pa).

$M_u$  = Masa molar del aire seco ( $\text{kg/mol}$ ).

$Z$  = Factor de compresibilidad para un gas real ( $\text{Pa}^2/\text{K}^2$ ).

$R$  = Constante universal de los gases ( $\text{J/mol K}$ ).

$T$  = Temperatura del aire (K).

$X_v$  = Fracción molar del vapor de agua que integra el aire húmedo ambiental.

$M_v$  = Masa molar del vapor de agua ( $\text{kg/mol}$ ).

Las lecturas obtenidas durante la calibración fueron:

$P_a$ (mmHg)	$P_a$ (Pa)	T (°C)	T (K)	h (%)
584,5	77926,8259	20,0	293,15	35,7
584,5	77926,8259	20,0	293,15	35,7
584,5	77926,8259	20,0	293,15	35,7
584,5	77926,8259	20,0	293,15	35,7
584,5	77926,8259	20,0	293,15	35,7

**Incertidumbre asociada a  $P_a$ .**

**Incertidumbre tipo A asociada a  $P_a$**

La incertidumbre tipo A asociada a la presión ambiental en el momento de la calibración está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{A P_a} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}}{\sqrt{n}} * t = \pm 0 Pa$$

**Incertidumbre tipo B asociada a la presión ambiental.**

La presión ambiental se midió con un barómetro CEMCO modelo 76878 con una resolución de 0,1 mmHg.

Con este dato podemos obtener la siguiente incertidumbre tipo B:

**Incertidumbre tipo B por resolución.**

Para determinar la incertidumbre tipo B por resolución se asumirá un error de la mitad de la división mínima del instrumento, lo cual se traduce en una distribución rectangular simétrica.

$$U_{B P_a R} = \pm \frac{\text{Resolución} / 2}{\sqrt{3}} = \pm \frac{0,1 \text{ mmHg}}{2\sqrt{3}} = \pm 0,028867513 \text{ mmHg} = 3,848680342 Pa$$

**Incertidumbre combinada asociada a la presión ambiental.**

La incertidumbre combinada asociada a la presión ambiental esta dada por la siguiente ecuación:

$$U_{C P_a} = \sqrt{U_{A P_a}^2 + U_{B P_a R}^2}$$

$$U_{C P_a} = \sqrt{(0 Pa)^2 + (3,848680342 Pa)^2} = \pm 3,848680342 Pa = \pm 0,028867513 \text{ mmHg}$$

**Incertidumbre expandida asociada a la presión ambiental.**

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{E P_a} = k * U_{C P_a} = \pm 2 * (3,848680342 Pa) = \pm 7,697360684 Pa = \pm 0,057735 \text{ mmHg}$$

### Expresión de la presión ambiental.

$$P=(77926,8259 \pm 7,697360684) \text{ Pa} = (584,5 \pm 0,057735) \text{ mmHg.}$$

### Masa molar del aire seco ( $M_a$ ).

Cuando no se cuenta con el equipo suficiente para determinar el valor de la masa molar del aire seco en función de su composición, el CENAM recomienda el siguiente valor promedio:

$$M_a = 28,9635 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol.}$$

### Factor de compresibilidad para un gas real (Z).

El valor del factor de compresibilidad se obtuvo de tablas proporcionadas por el CENAM (anexo 3).

$$Z=1,002609$$

### Constante universal de los gases (R).

El valor de R recomendado por el CIPM es el siguiente:

$$R=8,314510 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$$

### Temperatura del aire (T).

Los valores de la temperatura del aire que se registraron durante la calibración fueron los siguientes:

T (°C)	T (K)
20,0	293,15
20,0	293,15
20,0	293,15
20,0	293,15
20,0	293,15

Las mediciones de la temperatura del aire se realizaron con un medidor de temperatura y humedad marca VAISALA, modelo HM34, con una resolución de 0,1 °C y un error de precisión de  $\pm 0,3$  °C.

### Incertidumbre tipo A de la temperatura del aire.

La incertidumbre tipo A de la temperatura del aire está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{AT} = \pm \frac{s_T}{\sqrt{n}} * t$$

$$t = 1,14$$

$$s_T = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}$$

$$s_T = \sqrt{\frac{1}{4} (0^\circ C)^2} = 0^\circ C$$

$$U_{AT} = \pm \frac{0^\circ C}{\sqrt{5}} * 1,14 = \pm 0^\circ C$$

### Incertidumbres tipo B de la temperatura del aire.

El fabricante del medidor de temperatura y humedad informa un error de precisión del instrumento de  $\pm 0,3^\circ C$  y una resolución de  $0,1^\circ C$ .

Con estos datos podemos obtener las siguientes incertidumbres tipo B:

#### Incertidumbre tipo B por precisión del termohigrómetro.

Ya que el fabricante informa un error de precisión, se asumirá una distribución rectangular simétrica, por lo que se corregirá el valor dividiendo entre raíz de tres.

$$U_{B \text{ precisión}} = \frac{0,3^\circ C}{\sqrt{3}} = 0,17320508^\circ C$$

#### Incertidumbre tipo B por resolución.

Para determinar la incertidumbre tipo B por resolución se asumirá un error de la mitad de la división mínima del instrumento, lo cual se traduce en una distribución rectangular simétrica.

$$U_{B \text{ resolución}} = \pm \frac{\text{resolución}/2}{\sqrt{3}} = \pm \frac{0,1^\circ C}{2\sqrt{3}} = \pm 0,028867513^\circ C$$

### Incertidumbre combinada de la temperatura del aire.

La incertidumbre combinada de la temperatura del aire esta dada por la siguiente formula:

$$U_{CT} = \sqrt{U_{AT}^2 + U_{H_{precisión}}^2 + U_{H_{resolución}}^2}$$
$$U_{CT} = \sqrt{(0^\circ C)^2 + (0,17320508^\circ C)^2 + (0,028867513^\circ C)^2}$$
$$U_{CT} = \pm 0,175594228^\circ C$$

### Incertidumbre expandida de la temperatura del aire.

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{ET} = k * U_{CT} = \pm 2 * (0,175594228^\circ C) = \pm 0,351188456^\circ C$$

### Expresión de la temperatura del aire.

La temperatura del aire debe expresarse de la siguiente forma:

$$T = (20,0 \pm 0,351188456)^\circ C$$

### Incertidumbre de la Humedad del aire (h).

Los valores de la humedad del aire que se registraron durante la calibración fueron los siguientes:

h (%)
35,7
35,7
35,7
35,7
35,7

Las mediciones de la humedad del aire se realizaron con un medidor de temperatura y humedad marca VAISALA, modelo HM34, con una resolución de  $\pm 0,1\%$  de humedad y un error de precisión de  $\pm 1\%$  de humedad.

### Incertidumbre tipo A de la humedad del aire.

La incertidumbre tipo A de la humedad del aire está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{Ah} = \pm \frac{s_h}{\sqrt{n}} * t$$

$$t = 1,14$$

$$s_h = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}$$

$$s_h = \sqrt{\frac{1}{4}(0\%)^2} = 0\%$$

$$U_{Ah} = \pm \frac{0\%}{\sqrt{5}} * 1,14 = \pm 0\%$$

### Incertidumbres tipo B de la humedad del aire.

Ya que el error de precisión del instrumento es de  $\pm 1\%$  de humedad y su resolución de  $\pm 0,1\%$  de humedad, podemos obtener las siguientes incertidumbres tipo B:

#### Incertidumbre tipo B por precisión del termohigrómetro.

Ya que el fabricante informa un error de precisión, se asumirá una distribución rectangular simétrica, por lo que se corregirá el valor dividiendo entre raíz de tres.

$$U_{B \text{ precisión}} = \pm \frac{1\%}{\sqrt{3}} = \pm 0,577350269\% \text{ de humedad}$$

#### Incertidumbre tipo B por resolución.

Para determinar la incertidumbre tipo B por resolución se asumirá un error de la mitad de la división mínima del instrumento, lo cual se traduce en una distribución rectangular simétrica.

$$U_{B \text{ resolución}} = \pm \frac{\text{resolución}/2}{\sqrt{3}} = \pm \frac{0,1\%}{2\sqrt{3}} = \pm 0,028867513\% \text{ de humedad}$$

### Incertidumbre combinada de la humedad del aire.

La incertidumbre combinada de la humedad del aire esta dada por la siguiente formula:

$$U_{C_h} = \sqrt{U_{A_h}^2 + U_{U_{\text{precipitacion}}}^2 + U_{U_{\text{humidacion}}}^2}$$
$$U_{C_h} = \sqrt{(0\%)^2 + (0,577350269\%)^2 + (0,028867513\%)^2}$$
$$U_{C_h} = \pm 0,578071506\%$$

### Incertidumbre expandida de la humedad del aire.

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{E_h} = k * U_{C_h} = \pm 2 * (0,578071506\%) = \pm 1,156143013\% \text{ de humedad}$$

### Expresión de la humedad del aire.

La humedad del aire debe expresarse de la siguiente forma:

$$h = (35,7 \pm 1,156143013)\% \text{ de humedad} = 0,357 \pm 0,01156143013$$

### Fracción molar del vapor de agua que integra el aire húmedo ambiental ( $X_v$ ).

$$X_v = hf \frac{P_{sv}}{P} \quad (47)$$

$P_{sv} = 2394,6$  Pa de tablas CENAM

$h = \text{humedad (\%)} = (35,7 \pm 1,156143013)\% = 0,357 \pm 0,01156143013$

$f = \text{factor de corrección de la presión de vapor saturado} = 1,00329$  de tablas

$P = \text{presión ambiental} = (77926,8259 \pm 7,697360684)$  Pa

$$X_v = \frac{(0,357)(1,00329)(2394,6 \text{ Pa})}{77926,8259 \text{ Pa}} = 0,011006283$$

### Incertidumbre combinada asociada al valor de $X_v$ .

La incertidumbre combinada asociada al valor de  $X_v$  está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{c_{Xv}} = \sqrt{\left(\frac{\partial X_v}{\partial h}\right)^2 (U_h)^2 + \left(\frac{\partial X_v}{\partial P}\right)^2 (U_p)^2}$$

$$U_{c_{Xv}} = \sqrt{\left(\frac{hP_{sv}}{P}\right)^2 (U_h)^2 + \left(-\frac{hP_{sv}}{P^2}\right)^2 (U_p)^2}$$

$$U_{c_{Xv}} = \sqrt{\left(\frac{1,00329 \cdot 23946 Pa}{779268259 Pa}\right)^2 (5,78071506 \cdot 10^{-3})^2 + \left(-\frac{0,357 \cdot 1,00329 \cdot 23946 Pa}{(779268259 Pa)^2}\right)^2 (3,84868 Pa)^2}$$

$$U_{c_{Xv}} = \pm 1,782198434 \cdot 10^{-4}$$

### Incertidumbre expandida del valor de $X_v$ .

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{E_{Xv}} = k \cdot U_{c_{Xv}} = \pm 2 \cdot (1,782198434 \cdot 10^{-4}) = \pm 3,564396868 \cdot 10^{-4}$$

### Expresión del valor de $X_v$ .

El valor de  $X_v$  debe expresarse de la siguiente forma:

$$X_v = (0,011006283 \pm 3,564396868 \cdot 10^{-4})$$

### Masa molar del vapor de agua ( $M_v$ ).

$$M_v = 18,015 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Cálculo de la densidad del aire ( $\rho_a$ ).

$$\rho_a = \frac{P_a M_a}{ZRT} \left[ 1 - X_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$$

$$\rho_a = \frac{(77926,8259 Pa) \left( 28,9635 * 10^{-3} \frac{kg}{mol} \right)}{(1,002609) \left( 8,314510 \frac{J}{molK} \right) (293,15K)} \left[ 1 - 0,011006283 \left( 1 - \frac{18,015 * 10^{-3} \frac{kg}{mol}}{28,9635 * 10^{-3} \frac{kg}{mol}} \right) \right]$$

$$\rho_a = 0,91974879 \frac{kg}{m^3}$$

Cálculo de la incertidumbre de la densidad del aire.

La incertidumbre asociada al valor de la densidad del aire está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{C_{\rho_a}} = \sqrt{\left( \frac{\partial \rho_a}{\partial P_a} \right)^2 (U_{P_a})^2 + \left( \frac{\partial \rho_a}{\partial T} \right)^2 (U_T)^2 + \left( \frac{\partial \rho_a}{\partial X_v} \right)^2 (U_{X_v})^2}$$

Donde :

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial P_a} = \frac{M_a}{ZRT} \left[ 1 - X_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] = 1,180272364 * 10^{-5} \frac{kg}{Nm}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial T} = -\frac{P_a M_a}{ZRT^2} \left[ 1 - X_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] = -3,137468154 * 10^{-3} \frac{kg}{m^3 K}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial X_v} = -\frac{P_a M_a}{ZRT} \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) = -0,349127012 \frac{kg}{m^3}$$

$$U_{C_{\rho_a}} = \sqrt{2,063359012 * 10^{-9} \frac{kg^2}{m^6} + 3,035233291 * 10^{-7} \frac{kg^2}{m^6} + 3,871497815 * 10^{-9} \frac{kg^2}{m^6}}$$

$$U_{C_{\rho_a}} = 5,562896601 * 10^{-4} \frac{kg}{m^3}$$

### Incertidumbre expandida del valor de $\rho_s$ .

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{E_{\rho_s}} = k * U_{C_{\rho_s}} = \pm 2 * \left( 5,562896601 * 10^{-4} \frac{kg}{m^3} \right) = \pm 1,11257932 * 10^{-3} \frac{kg}{m^3}$$

### Expresión del valor de $\rho_s$ .

El valor de  $\rho_s$  debe expresarse de la siguiente forma:

$$\rho_s = \left( 0,9194879 \pm 1,11257932 * 10^{-3} \right) \frac{kg}{m^3}$$

### 5.3.1.4 Densidad de los pesos muertos ( $\rho_m$ ).

Debido a que no se realizó ninguna determinación de la densidad de los pesos muertos, solo se dispuso de la información que brinda el fabricante a este respecto por lo que no es posible determinar la incertidumbre asociada a esta propiedad.

$$\text{Densidad de los pesos muertos} = \rho_m = 7,84 \text{ g/cm}^3 = 7840 \text{ kg/m}^3$$

### 5.3.1.5 Incertidumbre sobre el valor de la tensión superficial del fluido manométrico ( $\gamma$ ).

La tensión superficial del fluido manométrico (el fluido manométrico utilizado fue aceite ESSO turbo II para motores fuel injection) se determinó mediante mediciones directas con un tensiómetro de Du Nouy marca CENCO modelo 70535, con una resolución de 0,1 Din/cm y un error de precisión de  $\pm 0,1$  Din/cm

El funcionamiento de este equipo se basa en la determinación de la fuerza máxima necesaria F para separar un anillo metálico de la superficie de un líquido.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Lecturas tomadas a T= 20°C y P= 584,5 mmHg	
No. de lectura	$\gamma$ *(Din/cm)
1	33,4
2	33,3
3	33,3
4	33,4
5	33,3

Donde  $\gamma$  \* es el valor experimental de la tensión superficial del fluido manométrico.

### Incertidumbre tipo A de la tensión superficial del fluido manométrico.

La incertidumbre tipo A de la tensión superficial del fluido manométrico está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{A\gamma} = \pm \frac{s_{\gamma}}{\sqrt{n}} * t$$

$$t = 1,14$$

$$s_{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$s_{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{4} \left( 0,012 \frac{Din}{cm} \right)^2} = 0,054772255 \frac{Din}{cm}$$

$$U_{A\gamma} = \pm \frac{0,054772255 \frac{Din}{cm}}{\sqrt{5}} * 1,14 = \pm 0,027924182 \frac{Din}{cm}$$

### Incertidumbres tipo B asociadas a la tensión superficial del fluido manométrico.

El fabricante del tensiómetro informa un error de precisión del instrumento de  $\pm 0,1$  Din/cm y una resolución de 0,1 mm.

Con estos datos podemos obtener las siguientes incertidumbres tipo B:

#### Incertidumbre tipo B por precisión del tensiómetro.

Ya que el fabricante reporta un error de precisión, se asumirá una distribución rectangular simétrica, por lo que se corregirá el valor dividiendo entre raíz de tres.

$$U_{B \text{ precisión}} = \frac{0,1 \text{ Din/cm}}{\sqrt{3}} = 0,057735 \frac{Din}{cm}$$

#### Incertidumbre tipo B por resolución.

Para determinar la incertidumbre tipo B por resolución se asumirá un error de la mitad de la división mínima del instrumento, lo cual se traduce en una distribución rectangular simétrica.

$$U_{B \text{ resolución}} = \pm \frac{\text{resolución} / 2}{\sqrt{3}} = \pm \frac{0,1 \text{ Din/cm}}{2\sqrt{3}} = \pm 0,0288675 \frac{Din}{cm}$$

### Incertidumbre combinada de la tensión superficial del fluido manométrico.

La incertidumbre combinada de la tensión superficial del fluido manométrico esta dada por la siguiente ecuación:

$$U_{c,\gamma} = \sqrt{U_{A,\gamma}^2 + U_{h_{prevision}}^2 + U_{h_{revelacion}}^2}$$
$$U_{c,\gamma} = \sqrt{\left(0,027924182 \frac{Din}{cm}\right)^2 + \left(0,057735 \frac{Din}{cm}\right)^2 + \left(0,0288675 \frac{Din}{cm}\right)^2}$$
$$U_{c,\gamma} = \pm 0,070330809 \frac{Din}{cm}$$

### Incertidumbre expandida de la tensión superficial del fluido manométrico.

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{E,\gamma} = k * U_{c,\gamma} = \pm 2 * \left(0,070330809 \frac{Din}{cm}\right) = \pm 0,140661618 \frac{Din}{cm}$$

### Expresión de la tensión superficial del fluido manométrico.

La tensión superficial del fluido manométrico debe expresarse de la siguiente forma:

$$\gamma^* = (33,34 \pm 0,1406614) \frac{Din}{cm}$$

### Corrección del valor experimental de la tensión superficial del fluido manométrico.

La corrección del valor experimental de la tensión superficial se debe a que al separar el anillo de la superficie del líquido, siempre se lleva consigo cierta cantidad de líquido (que depende de las dimensiones del anillo), por lo cual la fuerza medida debe corregirse con un factor  $f$ , de esta forma:

$$\gamma = f \bar{\gamma}^*$$

El factor  $f$  es obtenido de tablas, para lo cual es necesario conocer el valor de  $R/r$  y  $\phi = R^3/V$ , donde  $R$  es el radio promedio de la circunferencia del anillo,  $r$  es el radio del alambre con el cual está formado el anillo y  $V$  es el volumen del líquido levantado por el anillo.

El fabricante del anillo informa un valor de  $R = 6,02 \text{ cm} / 2\pi$  y una relación  $R/r$  de 53,92.

El valor de V se determinó con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{4\pi R \bar{\gamma}^*}{g_l \rho} = \frac{401,4136}{8895649,186} \frac{Din}{g/m^2 \cdot s^2} = 4,512471115 * 10^{-7} m^3$$

**Incertidumbre asociada al volumen del fluido arrastrado por el anillo.**

$$U_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial \bar{\gamma}^*}\right)^2 U_{\bar{\gamma}^*}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial g_l}\right)^2 U_{g_l}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho}\right)^2 U_{\rho}^2}$$

$$U_V = \sqrt{\left(\frac{4\pi R}{g_l \rho}\right)^2 U_{\bar{\gamma}^*}^2 + \left(-\frac{4\pi R \bar{\gamma}^*}{g_l^2 \rho}\right)^2 U_{g_l}^2 + \left(-\frac{4\pi R \bar{\gamma}^*}{g_l \rho^2}\right)^2 U_{\rho}^2}$$

$$U_V = \sqrt{\left(\frac{4\pi R}{g_l \rho}\right)^2 U_{\bar{\gamma}^*}^2 + \left(-\frac{4\pi R \bar{\gamma}^*}{g_l^2 \rho}\right)^2 U_{g_l}^2 + \left(-\frac{4\pi R \bar{\gamma}^*}{g_l \rho^2}\right)^2 U_{\rho}^2}$$

$$U_V = \sqrt{9,061266524 * 10^{-19} m^6 + 5,323000439 * 10^{-30} m^6 + 6,787548622 * 10^{-16} m^6}$$

$$U_V = \pm 2,607030857 * 10^{-8} m^3$$

**Valor de R<sup>3</sup>/V.**

El valor obtenido de R<sup>3</sup>/V fue:

$$\frac{R^3}{V} = \frac{8,795284015 * 10^{-7} m^3}{4,512471115 * 10^{-7} m^3} = 1,949105887$$

**Incertidumbre asociada al valor de  $\phi = R^3/V$ .**

El valor de la incertidumbre asociada a  $\phi$  esta dado por la siguiente ecuación:

$$U_{\phi} = \sqrt{\left(\frac{\partial \phi}{\partial V}\right)^2 U_V^2} = \sqrt{\left(-\frac{R^3}{V^2}\right)^2 U_V^2} = \sqrt{\left[\frac{8,795284015 * 10^{-7} m^3}{(4,512471115 * 10^{-7} m^3)^2}\right]^2 (2,607030857 * 10^{-8} m^3)^2}$$

$$U_{\phi} = \pm 0,112607461$$

Conociendo los valores de R/r y  $\phi$  podemos obtener el valor de f de la siguiente tabla:

Factores de corrección  $f$  para  $R/r=54$

$R^3/V$	$f$	$R^3/V$	$f$	$R^3/V$	$F$	$R^3/V$	$f$
0,90	0,943	1,15	0,926	1,55	0,906	1,95	0,891
0,92	0,942	1,20	0,923	1,60	0,904	2,00	0,890
0,94	0,940	1,25	0,920	1,65	0,902	2,10	0,886
0,96	0,939	1,30	0,917	1,70	0,900	2,20	0,883
0,98	0,937	1,35	0,915	1,75	0,898	2,30	0,880
1,00	0,936	1,40	0,913	1,80	0,896	2,40	0,878
1,05	0,932	1,45	0,910	1,85	0,895	2,50	0,875
1,10	0,929	1,50	0,908	1,90	0,893	2,60	0,872

El valor correspondiente a  $f$  fue de 0,891, por lo que el valor corregido de la tensión superficial será:

$$\gamma = f \bar{\gamma}^* = 0,891(33.34 \pm 0,1406614) \text{ Din/cm} = (29,70594 \pm 0,125329307) \text{ Din/cm}$$

De esta forma, la tensión superficial del fluido manométrico debe expresarse de la siguiente forma:

$$\gamma = (29,70594 \pm 0,125329307) \text{ Din/cm} = (0,02970594 \pm 1,25329307 \cdot 10^{-4}) \text{ kg/s}^2$$

### 5.3.1.6. Incertidumbre sobre el valor del área transversal del pistón ( $A_0$ ).

El área transversal del pistón, se determinó a través de la medición del diámetro del pistón.

Estas mediciones se realizaron con un micrómetro digital marca Mitutoyo serie 293, de 0 a 1", con una resolución de 0,001mm.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Lecturas tomadas a una $T=20^\circ\text{C}$ y $P=584,5 \text{ mmHg}$		
No. de lectura	Diámetro (mm)	Diámetro (m)
1	7,162	0,007162
2	7,162	0,007162
3	7,163	0,007163
4	7,161	0,007161
5	7,162	0,007162

### Incertidumbre tipo A del diámetro del pistón.

La incertidumbre tipo A del diámetro del pistón está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{A_D} = \pm \frac{s_D}{\sqrt{n}} * t$$

$$t = 1,14$$

$$s_D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}$$

$$s_D = \sqrt{\frac{1}{4} (2,0 * 10^{-12} m^2)} = 7,071067812 * 10^{-7} m$$

$$U_{A_D} = \pm \frac{7,071067812 * 10^{-7} m}{\sqrt{5}} * 1,14 = \pm 3,604996533 * 10^{-7} m$$

**Incertidumbres tipo B del diámetro del pistón.**

El fabricante del micrómetro reporta un error de precisión del instrumento de  $\pm (L/75)$  y una resolución de 0,001mm.

Con estos datos podemos obtener las siguientes incertidumbres tipo B:

**Incertidumbre tipo B por precisión del micrómetro.**

Ya que el fabricante reporta un error de precisión, se asumirá una distribución rectangular simétrica, por lo que se corregirá el valor dividiendo entre raíz de tres.

$$U_{B \text{ precisión}} = \frac{(L_{\text{máx}} / 75)}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B \text{ precisión}} = \pm \frac{\left( \frac{0,007163m}{75} \right)}{\sqrt{3}} = \pm 5,514079971 * 10^{-5} m$$

**Incertidumbre tipo B por resolución.**

Para determinar la incertidumbre tipo B por resolución se asumirá un error de la mitad de la división mínima del instrumento, lo cual se traduce en una distribución rectangular simétrica.

$$U_{B \text{ resolución}} = \pm \frac{\text{Resolución} / 2}{\sqrt{3}} = \pm \frac{0,001mm}{2\sqrt{3}} = \pm \frac{1 * 10^{-6} m}{2\sqrt{3}}$$

$$U_{B \text{ resolución}} = \pm 2,886751346 * 10^{-7} m$$

**Incertidumbre combinada del diámetro del pistón.**

La incertidumbre combinada del diámetro del pistón esta dada por la siguiente formula:

$$U_{C \text{ Diámetro}} = \sqrt{U_{A_D}^2 + U_{B \text{ precisión}}^2 + U_{B \text{ resolución}}^2}$$

$$U_{C \text{ Diámetro}} = \sqrt{(3,604996533 * 10^{-7} m)^2 + (5,514079971 * 10^{-5} m)^2 + (2,886751346 * 10^{-7} m)^2}$$

$$U_{C \text{ Diámetro}} = \pm 5,514273376 * 10^{-5} m$$

### **Incertidumbre expandida del diámetro del pistón.**

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{E \text{ Diámetro}} = k * U_{C \text{ Diámetro}} = \pm 2 * (5,514273376 * 10^{-5} m) = \pm 1,1028544675 * 10^{-4} m$$

### **Incertidumbre del área transversal del pistón.**

El área del pistón se determinará mediante la siguiente formula:

$$A = \pi \left( \frac{\bar{D}}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} (0,007162m)^2 = 4,028640503 * 10^{-5} m^2$$

### **Incertidumbre combinada del área transversal del pistón.**

Para obtener esta incertidumbre, se requiere primero determinar el valor de los coeficientes de sensibilidad de la ecuación utilizada para el cálculo de dicha área, lo cual se muestra a continuación:

$$A = f(\bar{D})$$

$$\frac{\partial A}{\partial \bar{D}} = \frac{1}{2} \pi \bar{D} = 0,011250043m$$

$$U_{C \text{ Área}} = \sqrt{\left( \frac{\partial A}{\partial \bar{D}} \right)^2 U_{C \text{ Diámetro}}^2} = \sqrt{(0,011250043m)^2 (5,514273376 * 10^{-5} m)^2}$$

$$U_{C \text{ Área}} = \pm 6,203581421 * 10^{-7} m^2$$

### **Incertidumbre expandida del área transversal del pistón.**

$$U_{E \text{ Área}} = k * U_{C \text{ Área}} = \pm 2(6,203581421 * 10^{-7} m^2) = \pm 1,240716284 * 10^{-6} m^2$$

### **Expresión del área de la sección transversal del pistón.**

El área transversal del pistón debe expresarse de la siguiente forma:

$$A = (4,028640503 * 10^{-5} \pm 1,240716284 * 10^{-6}) m^2$$

### 5.3.1.7 Coeficiente de dilatación térmica del cilindro y del pistón ( $\alpha_c$ y $\alpha_p$ )<sup>(25)</sup>.

El fabricante de la balanza de pesos muertos informa que el material del cual están contruidos tanto el cilindro como el pistón es acero inoxidable de alta resistencia.

El valor del coeficiente de dilatación térmica para este material es de:

$$\text{Coeficiente de dilatación térmica} = \alpha_c = \alpha_p = 11,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

### 5.3.1.8 Incertidumbre sobre el valor de la temperatura del émbolo al momento de realizar la calibración ( $t$ ).

Ya que es difícil medir la temperatura del émbolo en el momento de la calibración, se determinó la temperatura del plato de la balanza de pesos muertos, y se asumió que la temperatura determinada es igual a la temperatura del émbolo.

Los resultados se muestran a continuación:

$t$ ( $^\circ\text{C}$ )	$t$ (K)
19,6	292,75
19,6	292,75
19,6	292,75
19,6	292,75
19,6	292,75

Las mediciones de la temperatura del plato de la balanza se realizaron con un electro-termómetro marca Cooper Instrument Corporation, modelo TM99A, con una resolución de 0,1  $^\circ\text{C}$ .

### Incertidumbre tipo A de la temperatura del émbolo.

La incertidumbre tipo A de la temperatura del émbolo está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{A,t} = \pm \frac{s_t}{\sqrt{n}} * t$$

$$t = 1,14$$

$$s_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}$$

$$s_t = \sqrt{\frac{1}{4} (0^\circ\text{C})} = 0^\circ\text{C}$$

$$U_{A_t} = \pm \frac{0^\circ\text{C}}{\sqrt{5}} * 1.14 = \pm 0^\circ\text{C}$$

### **Incertidumbre tipo B de la temperatura del émbolo.**

El fabricante del electro-termómetro informa una resolución del instrumento de 0,1 °C.

Con estos datos podemos obtener la siguiente incertidumbre tipo B:

### **Incertidumbre tipo B por resolución.**

Para determinar la incertidumbre tipo B por resolución se asumirá un error de la mitad de la división mínima del instrumento, lo cual se traduce en una distribución rectangular simétrica.

$$U_{B_{\text{resolución}}} = \pm \frac{\text{resolución}/2}{\sqrt{3}} = \pm \frac{0,1^\circ\text{C}}{2\sqrt{3}} = \pm 0,028867513^\circ\text{C}$$

### **Incertidumbre combinada de la temperatura del émbolo.**

La incertidumbre combinada de la temperatura del émbolo esta dada por la siguiente formula:

$$U_{C_t} = \sqrt{U_{A_t}^2 + U_{B_{\text{resolución}}}^2}$$

$$U_{C_t} = \sqrt{(0^\circ\text{C})^2 + (0,028867513^\circ\text{C})^2}$$

$$U_{C_t} = \pm 0,028867513^\circ\text{C}$$

### **Incertidumbre expandida de la temperatura del émbolo.**

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{E_t} = k * U_{C_t} = \pm 2 * (0,028867513^\circ\text{C}) = \pm 0,057735026^\circ\text{C}$$

### **Expresión de la temperatura del émbolo.**

La temperatura del émbolo debe expresarse de la siguiente forma:

$$t = (19,6 \pm 0,057735026)^\circ\text{C}$$

### 5.3.1.9 Temperatura de referencia del pistón ( $t_r$ ).

El fabricante de la balanza de pesos muertos informa una temperatura de referencia del pistón de 20°C.

$$t_r = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 5.3.1.10 Coeficiente de deformación elástica del émbolo (b).

El fabricante de la balanza de pesos muertos informa que el material del cual está construido el émbolo es acero inoxidable de alta resistencia.

El valor del coeficiente de deformación elástica para este material es de:

$$b = (3\mu - 1)/E$$

$$\mu = \text{relación de Poisson} = 0,300$$

$$E = \text{modulo de Young} = 2,03 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$b = -4,93 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$$

### 5.3.1.11 Presión nominal ( $p_a$ ).

A continuación se muestran los valores de la presión nominal en cada uno de los puntos de calibración:

$p_a$ (psi)	$P_a$ (Pa)
0	0
5	34473,795
10	68947,59
15	103421,385
20	137895,18
25	172368,975

### 5.3.1.12 Incertidumbre sobre el valor de la diferencia de alturas entre la parte inferior del pistón sujeto a presión y el punto de medición del manómetro a calibrar (H).

La diferencia de alturas entre la parte inferior del pistón sujeto a presión y el punto de medición del manómetro a calibrar (el centro de la carátula), se determinó mediante mediciones directas.

Estas mediciones se realizaron con un vernier marca Scala, con una resolución de 0,005cm.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Lecturas tomadas a una T=20°C y P=584,5 mmHg		
No. de lectura	H (cm)	H (m)
1	21,19	0,2119
2	21,19	0,2119
3	21,19	0,2119
4	21,19	0,2119
5	21,19	0,2119

### Incertidumbre tipo A asociada al valor de H.

La incertidumbre tipo A asociada al valor de H está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{A_H} = \pm \frac{s_H}{\sqrt{n}} * t$$

$$t = 1,14$$

$$s_H = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}$$

$$s_H = \sqrt{\frac{1}{4} (0m)^2} = 0m$$

$$U_{A_H} = \pm \frac{0m}{\sqrt{5}} * 1,14 = \pm 0m$$

### Incertidumbre tipo B asociada al valor de H.

El vernier que se utilizó para determinar el valor de H, tiene una resolución de 0,005cm.

Con este dato podemos obtener la siguientes incertidumbres tipo B:

### Incertidumbre tipo B por resolución.

Para determinar la incertidumbre tipo B por resolución se asumirá un error de la mitad de la división mínima del instrumento, lo cual se traduce en una distribución rectangular simétrica.

$$U_{B_{resolución}} = \pm \frac{Resolución/2}{\sqrt{3}} = \pm \frac{0,005cm}{2\sqrt{3}} = \pm \frac{5 * 10^{-5} m}{2\sqrt{3}}$$

$$U_{B_{resolución}} = \pm 1,443375673 * 10^{-5} m$$

### **Incertidumbre combinada asociada al valor de H.**

La incertidumbre combinada asociada al valor de H esta dada por la siguiente fórmula:

$$U_{CH} = \sqrt{U_{A_n}^2 + U_{B_{\text{resolución}}}}^2$$

$$U_{CH} = \sqrt{(0m)^2 + (1,443375673 * 10^{-5} m)^2}$$

$$U_{C_{\text{Diámetro}}} = \pm 1,443375673 * 10^{-5} m$$

### **Incertidumbre expandida del valor de H.**

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{EH} = k * U_{CH} = \pm 2 * (1,443375673 * 10^{-5} m) = \pm 2,886751346 * 10^{-5} m$$

### **Expresión del valor de H.**

El valor de H debe expresarse de la siguiente forma:

$$H = (0,2119 \pm 2,886751346 * 10^{-5}) m$$

### **5.3.1.13 Incertidumbre sobre el valor de la densidad del fluido manométrico a la temperatura ambiente del lugar de la calibración (f).**

La densidad del fluido manométrico (que en nuestro caso fue aceite ESSO Turbo II para motores fuel injection) se midió con un picnómetro Pyrex de 0,00001 m<sup>3</sup> (10 ml) de capacidad.

El procedimiento fue el siguiente:

1. Se midió la masa del picnómetro ( $m_{pic}$ ).
2. Se midió la masa del picnómetro lleno de aceite ( $m_{ac+pic}$ ).
3. Se determinó por diferencia la masa del aceite ( $m_{ac}$ ).
4. Conociendo el volumen del picnómetro (informado por el fabricante) y la masa del aceite, se calculó la densidad del fluido manométrico (f).

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

P = 584,5 mmHg y T=20°C		
No. de lectura	m <sub>pic</sub> (g)	m <sub>ac+pic</sub> (g)
1	14,8040	23,9004
2	14,8040	23,9004
3	14,8040	23,9004
4	14,8040	23,9005
5	14,8039	23,9004

La masa del aceite contenida en el picnómetro se determino con la siguiente ecuación:

$$m_{ac} = \bar{m}_{pic+ac} - \bar{m}_{pic}$$

por lo que es necesario calcular las incertidumbres de  $\bar{m}_{pic+ac}$  y  $\bar{m}_{pic}$  lo cual se muestra a continuación:

#### Incertidumbre tipo A de la masa del picnómetro.

La incertidumbre tipo A de la masa del picnómetro está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{Ampic} = \pm \frac{s_{mpic}}{\sqrt{n}} * t$$

$$t = 1,14$$

$$s_{mpic} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(m_{pic})_i - \bar{m}_{pic}]^2}$$

$$s_{mpic} = \sqrt{\frac{1}{4} (8 * 10^{-9} g^2)} = 4,472135955 * 10^{-5} g$$

$$U_{Ampic} = \pm \frac{4,472135955 * 10^{-5} g}{\sqrt{5}} * 1,14 = \pm 2,28 * 10^{-5} g$$

#### Incertidumbres tipo B de la masa del picnómetro.

La masa del picnómetro se determinó con una balanza electrónica marca Sartorius modelo BP210s, con número de serie 50311381, clase de exactitud especial I, resolución de 0,0001g y una incertidumbre expandida de  $\pm 0,0013g$ .

Con esta información podemos obtener las siguientes incertidumbres tipo B:

**Incertidumbre del certificado de calibración:**

$$U_{IC} = \pm \frac{0,0001g}{2} = \pm 6,5 * 10^{-4} g$$

**Incertidumbre por resolución:**

$$U_{BR} = \pm \frac{0,0001g}{2\sqrt{3}} = \pm 2,886751346 * 10^{-5} g$$

**Incertidumbre combinada de la masa del picnómetro.**

La incertidumbre combinada de la masa del picnómetro esta dada por la siguiente formula:

$$U_{Cmpic} = \sqrt{U_{Ampic}^2 + U_{BC}^2 + U_{BR}^2}$$

$$U_{Cmpic} = \sqrt{(2,28 * 10^{-5} g)^2 + (6,5 * 10^{-4} g)^2 + (2,886751346 * 10^{-5} g)^2}$$

$$U_{Cmpic} = \pm 6,510400705 * 10^{-4} g$$

**Incertidumbre expandida de la masa del picnómetro.**

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{Lmpic} = k * U_{Cmpic} = \pm 2 * (6,510400705 * 10^{-4} g) = \pm 1,302080141 * 10^{-3} g$$

**Expresión de la masa del picnómetro.**

La masa del picnómetro debe expresarse de la siguiente forma:

$$m_{pic} = (14,80398 \pm 1,302080141 * 10^{-3}) g$$

**Incertidumbre tipo A de la masa del picnómetro lleno de aceite.**

La incertidumbre tipo A de la masa del picnómetro lleno de aceite está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{Ampic+uc} = \pm \frac{S_{mpic+uc}}{\sqrt{n}} * t$$

$$t = 1,14$$

$$S_{mpic+ac} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(m_{pic+ac})_i - \bar{m}_{pic+ac}]^2}$$

$$S_{mpic+ac} = \sqrt{\frac{1}{4} (8 * 10^{-9} g^2)} = 4,472135955 * 10^{-5} g$$

$$U_{Ampic+ac} = \pm \frac{4,472135955 * 10^{-5} g}{\sqrt{5}} * 1,14 = \pm 2,28 * 10^{-5} g$$

**Incertidumbres tipo B de la masa del picnómetro lleno de aceite.**

**Incertidumbre del certificado de calibración:**

$$U_{BC} = \pm \frac{0,0001g}{2} = \pm 6,5 * 10^{-4} g$$

**Incertidumbre por resolución.**

$$U_{BR} = \pm \frac{0,0001g}{2\sqrt{3}} = \pm 2,886751346 * 10^{-5} g$$

**Incertidumbre combinada de la masa del picnómetro.**

$$U_{Cmpic+ac} = \sqrt{U_{Ampic+ac}^2 + U_{BC}^2 + U_{BR}^2}$$

$$U_{Cmpic+ac} = \sqrt{(2,28 * 10^{-5} g)^2 + (6,5 * 10^{-4} g)^2 + (2,886751346 * 10^{-5} g)^2}$$

$$U_{Cmpic+ac} = \pm 6,510400705 * 10^{-4} g = \pm 6,510400705 * 10^{-7} kg$$

**Incertidumbre expandida de la masa del picnómetro lleno de aceite.**

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se usará un factor de cobertura de 2.

$$U_{Empic+ac} = k * U_{Cmpic+ac} = \pm 2 * (6,510400705 * 10^{-7} kg) = \pm 1,302080141 * 10^{-6} kg$$

**Cálculo de la masa de aceite contenida en el picnómetro.**

La masa del aceite contenida en el picnómetro se determino con la siguiente ecuación:

$$m_{ac} = \bar{m}_{pic+ac} - \bar{m}_{pic}$$

$$m_{ac} = 23,90042g - 14,80398g = 9,09644g = 9,09644 * 10^{-3} kg$$

### **Incertidumbre de la masa de aceite contenida en el picnómetro.**

La incertidumbre de la masa del aceite esta dada por la siguiente ecuación:

$$U_{C_{mac}}^2 = \left( \frac{\partial m_{ac}}{\partial m_{pic+ac}} \right)^2 U_{m_{pic+ac}}^2 + \left( \frac{\partial m_{ac}}{\partial m_{pic}} \right)^2 U_{m_{pic}}^2$$
$$U_{C_{mac}} = \sqrt{U_{m_{pic+ac}}^2 + U_{m_{pic}}^2} = \sqrt{(6,510400705 * 10^{-4} g)^2 + (6,510400705 * 10^{-4} g)^2}$$
$$U_{C_{mac}} = \pm 9,207096973 * 10^{-4} g = \pm 9,207096973 * 10^{-7} kg$$

### **Expresión de la masa de aceite contenida en el picnómetro.**

La masa de aceite contenida en el picnómetro debe expresarse de la siguiente forma:

$$m_{ac} = (9,09644 * 10^{-3} \pm 9,207096973 * 10^{-7}) kg$$

### **Cálculo de la densidad del fluido manométrico.**

La densidad del fluido manométrico se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m_{ac}}{V_{pic}} = \frac{9,09644 g}{10 ml} = 909,644 \frac{kg}{m^3}$$

### **Incertidumbre de la densidad del fluido manométrico.**

La incertidumbre combinada de la densidad del aceite esta dada por la siguiente ecuación:

$$U_{C_{\rho}} = \sqrt{\left( \frac{\partial \rho}{\partial m_{ac}} \right)^2 U_{m_{ac}}^2}$$
$$U_{C_{\rho}} = \sqrt{\left( \frac{1}{V_{pic}} \right)^2 U_{m_{ac}}^2}$$
$$U_{C_{\rho}} = \sqrt{\left( \frac{1}{1 * 10^{-5} m^3} \right)^2 (9,207096973 * 10^{-4} g)^2}$$
$$U_{C_{\rho}} = \pm 92,07096973 \frac{g}{m^3} = \pm 0,092070969 \frac{kg}{m^3}$$

Incertidumbre expandida de la densidad del fluido manométrico.

$$U_{\rho_f} = k * U_{c_f} = \pm 2 \left( 0,092070969 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \pm 0,184141938 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Expresión de la densidad del fluido manométrico.

La densidad del fluido manométrico debe expresarse de la siguiente forma:

$$f = (909644 \pm 184,141938) \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = (909,644 \pm 0,184141938) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### 5.3.2 Cuadro de incertidumbres.

Enseguida se muestra una tabla en donde se encuentran los valores obtenidos de las incertidumbres de cada uno de los componentes de la ecuación 44.

Componente de la ec. 44	Valor	Incertidumbre
$m_{L5 \text{ H25}}$	0,14175 kg	$\pm 4,09197 * 10^{-5}$ kg
$m_{L10 \text{ H50}}$	0,2835 kg	$\pm 8,18394 * 10^{-5}$ kg
$m_{L20 \text{ H100}}$	0,567 kg	$\pm 1,636788 * 10^{-4}$ kg
$m_{L40 \text{ H200}}$	1,134 kg	$\pm 3,273576 * 10^{-4}$ kg
$g$	$9,7792644 \text{ m/s}^2$	$\pm 5 * 10^{-8} \text{ m/s}^2$
$\rho_a$	$0,91974879 \text{ kg/m}^3$	$\pm 5,562896601 * 10^{-4} \text{ kg/m}^3$
$\rho_m$	$7840 \text{ kg/m}^3$	-----
$\gamma$	$0,02970594 \text{ kg/s}^2$	$\pm 6,2664653 * 10^{-5} \text{ kg/s}^2$
$A_0$	$4,028640503 * 10^{-5} \text{ m}^2$	$\pm 6,203581421 * 10^{-7} \text{ m}^2$
$\alpha_c$	$11,4 * 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	-----
$\alpha_p$	$11,4 * 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	-----
$t$	$19,6 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0,028867513 \text{ }^\circ\text{C}$
$t_r$	$20 \text{ }^\circ\text{C}$	-----
$b$	$-4,93 * 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$	-----
$p_n$	0, 5, 10, 15, 20 y 25 psi	-----
$H$	0,2119 m	$\pm 1,443375673 * 10^{-5}$ m
$f$	$909,644 \text{ kg/m}^3$	$\pm 0,092070969 \text{ kg/m}^3$

### 5.3.3 Incertidumbre asociada a la presión generada en la balanza de pesos muertos (P).

La incertidumbre estándar combinada asociada a la presión generada en la balanza de pesos muertos, esta dada por la siguiente ecuación:

$$(U_{c,r})^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial P}{\partial X_i} \right)^2 (U_{x_i})^2 \quad (48)$$

donde:

$X_i$  = cada uno de los componentes de la ecuación (44).

desarrollando la ecuación (48) obtenemos:

$$\begin{aligned} (U_{c,r})^2 = & \left( \frac{\partial P}{\partial m} \right)^2 U_m^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial g} \right)^2 U_g^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial \rho_a} \right)^2 U_{\rho_a}^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial \rho_m} \right)^2 U_{\rho_m}^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial \gamma} \right)^2 U_{\gamma}^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial A_0} \right)^2 U_{A_0}^2 + \\ & \left( \frac{\partial P}{\partial \alpha_c} \right)^2 U_{\alpha_c}^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial \alpha_p} \right)^2 U_{\alpha_p}^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial t} \right)^2 U_t^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial t_r} \right)^2 U_{t_r}^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial b} \right)^2 U_b^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial p_n} \right)^2 U_{p_n}^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial H} \right)^2 U_H^2 + \\ & \left( \frac{\partial P}{\partial f} \right)^2 U_f^2 \end{aligned}$$

Los coeficientes de sensibilidad se muestran a continuación:

$$\frac{\partial P}{\partial m} = \frac{g \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right)}{A_0 \left[ 1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - t_r) \right] \left[ 1 + b p_n \right]}$$

$$\frac{\partial P}{\partial g} = \frac{m \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right)}{A_0 \left[ 1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - t_r) \right] \left[ 1 + b p_n \right]} - H(f - \rho_a)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \rho_a} = \frac{-mg}{\rho_m \left\{ A_0 \left[ 1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - t_r) \right] \left[ 1 + b p_n \right] \right\}} + Hg$$

$$\frac{\partial P}{\partial \rho_m} = \frac{mg \rho_a}{\rho_m^2 \left\{ A_0 \left[ 1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - t_r) \right] \left[ 1 + b p_n \right] \right\}}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \gamma} = \frac{\sqrt{4\pi A_0}}{A_0 [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - t_r)](1 + bp_n)}$$

$$\frac{\partial P}{\partial A_0} = \frac{-mg \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_m}\right)}{A_0^2 [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - t_r)](1 + bp_n)} - \frac{\gamma \sqrt{\pi}}{A_0^{\frac{3}{2}} [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - t_r)](1 + bp_n)}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha_c} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha_p} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{mg \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_m}\right) + \gamma \sqrt{4\pi A_0}}{A_0 [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - t_r)](1 + bp_n)} (\alpha_c + \alpha_p)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t_r} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial b} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial p_n} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial H} = -g(f - \rho_u)$$

$$\frac{\partial P}{\partial f} = -Hg$$

A continuación se muestran los valores de los coeficientes de sensibilidad para las diferentes masas aplicadas en la balanza de pesos muertos.

	m=0,14175 kg	m=0,2835 kg	m=0,42525 kg	m=0,567 kg	m=0,70875 kg
$\partial P/\partial m$	242712,841 s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	242741,2841 s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	242741,2841 s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	242741,2841 s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	242741,2841 s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>
$\partial P/\partial g$	3325,553218 kg/m <sup>2</sup>	6843,665104 kg/m <sup>2</sup>	10361,77699 kg/m <sup>2</sup>	13879,88888 kg/m <sup>2</sup>	17398,00076 kg/m <sup>2</sup>
$\partial P/\partial p_a$	-2,3166237 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	-6,705474 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	-11,094323 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	-15,4832 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	-19,87202 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
$\partial P/\partial y$	558,5083136 m <sup>-1</sup>				
$\partial P/\partial A_p$	-854204828,1 kg/s <sup>2</sup> m <sup>3</sup>	-1708203747 kg/s <sup>2</sup> m <sup>3</sup>	-2562202665 kg/s <sup>2</sup> m <sup>3</sup>	-3416201584 kg/s <sup>2</sup> m <sup>3</sup>	-4270200502 kg/s <sup>2</sup> m <sup>3</sup>
$\partial P/\partial c_a$	0	0	0	0	0
$\partial P/\partial \alpha_a$	0	0	0	0	0
$\partial P/\partial t$	-0,784809082 kg <sup>2</sup> /Cms <sup>2</sup>	-1,569239892 kg <sup>2</sup> /Cms <sup>2</sup>	-2,353670702 kg <sup>2</sup> /Cms <sup>2</sup>	-3,138101513 kg <sup>2</sup> /Cms <sup>2</sup>	-3,922532323 kg <sup>2</sup> /Cms <sup>2</sup>
$\partial P/\partial L$	0	0	0	0	0
$\partial P/\partial b$	0	0	0	0	0
$\partial P/\partial p_a$	0	0	0	0	0
$\partial P/\partial H$	-8886,654719 g/m <sup>2</sup> s <sup>2</sup>				
$\partial P/\partial t$	-2,07223 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>				

### Cálculo de la incertidumbre combinada de P.

La incertidumbre combinada de P (para m=0,14175 kg) se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 (U_{CP})^2 = & \left( 242712,841 \frac{1}{ms^2} \right)^2 \left( 4,09197 \cdot 10^{-5} kg \right)^2 + \left( 3325,553218 \frac{kg}{m^2} \right)^2 \left( 5 \cdot 10^{-8} \frac{m}{s^2} \right)^2 + \\
 & \left( -2,3166237 \frac{m^2}{s^2} \right)^2 \left( 5,562896601 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m^3} \right)^2 + \left( 558,5083136 \frac{1}{m} \right)^2 \left( 6,26646535 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s^2} \right)^2 + \\
 & \left( -854204828,1 \frac{kg}{s^2 m^3} \right)^2 \left( 6,203581421 \cdot 10^{-7} m^2 \right)^2 + \left( -0,784809082 \frac{kg}{Cms^2} \right)^2 \left( 0,028867513^{\circ}C \right)^2 + \\
 & \left( -8886,654719 \frac{kg}{m^2 s^2} \right)^2 \left( 4,43375673 \cdot 10^{-5} m \right)^2 + \left( -2,07223 \frac{m^2}{s^2} \right)^2 \left( 0,092070969 \frac{kg}{m^3} \right)^2
 \end{aligned}$$

$$(U_{CP})^2 = 280906,3969 Pa^2$$

$$U_{CP} = 530,0060348 Pa$$

A continuación se muestran los valores de las incertidumbres combinadas y expandidas (usando un factor de cobertura de 2) para las diferentes masas aplicadas en la balanza de pesos muertos:

Masa (kg)	$U_{CP}$ (Pa)	$U_{EP}$ (Pa)
0,14175	530,0681134	1060,136227
0,2835	1060,008435	2120,01687
0,42525	1589,948774	3179,897548
0,567	2119,889116	4239,778232
0,70875	2649,82946	5299,65892

**5.3.3 Resultados de la calibración de un manómetro tipo Bourdon, con una balanza de pesos muertos.**

**Lecturas del patrón y del equipo a calibrar en ascenso.**

En la siguiente tabla se muestran las lecturas del patrón y del equipo a calibrar.

Presión generada en balanza de pesos muertos (presión patrón) (Pa)	Lectura del equipo a calibrar				Error (Pa) (Lectura - Valor real)	
	1ª serie		2ª serie		Serie 1	Serie 2
	Psi	Pa	Psi	Pa		
0	0	0	0	0	0	
32538,05490	5	34473,795	5	34473,795	1935,7401	
66942,60123	10	68947,59	10	68947,59	2004,98877	
101347,1476	15	103421,385	15	103421,385	2074,2374	
135751,6939	20	137895,18	20	137895,18	2143,4861	
170156,2402	25	172368,975	25	172368,975	2212,7348	

**Lecturas del patrón y del equipo a calibrar en descenso.**

En la siguiente tabla se muestran las lecturas del patrón y del equipo a calibrar.

Presión generada en la balanza de pesos muertos (Pa)	Lectura del equipo a calibrar				Error (Pa) (Lectura - Valor real)	
	1ª serie		2ª serie		Serie 1	Serie 2
	Psi	Pa	Psi	Pa		
170156,2402	25	172368,975	25	172368,975	2212,7348	
135751,6939	20	137895,18	20	137895,18	2143,4861	
101347,1476	15	103421,385	15	103421,385	2074,2374	
66942,60123	10	68947,59	10	68947,59	2004,98877	
32538,05490	5	34473,795	5	34473,795	1935,7401	
0	0	0	0	0	0	

**Incertidumbre del calibrando.**

El equipo bajo prueba, fue un manómetro tipo Bourdon marca Surex, con número de inventario 1468722 y carátula de doble escala con un intervalo de medición de 0 a 28 psi y de 0 a 2 kg/cm<sup>2</sup>.

La división mínima del instrumento es de 1 psi (6894,759 Pa).

Con estos datos, podemos calcular la incertidumbre del equipo a calibrar de la siguiente forma:

**Incertidumbre por resolución del equipo a calibrar.**

$$U_{RR} = \pm \frac{6894,759 Pa}{2\sqrt{3}} = \pm 1990,345482 Pa$$

Por lo tanto:

$$U \text{ calibrando} = U \text{ resolución} = \pm 1990,345482 Pa$$

Ya que las lecturas del equipo bajo prueba en ascenso y descenso fueron iguales, la incertidumbre tipo A de dichas lecturas es cero.

De la misma forma, el efecto de Histéresis (H) es cero, es decir:

$$H = \text{valor máximo de ( abs (Xi - Yi))}$$

donde

Xi = resultados en ascenso

Yi = resultados en descenso

Por lo tanto, la incertidumbre estándar por Histéresis ( $U_H = H/(2*\sqrt{3})$ ) tiene un valor de cero.

**Incertidumbre del patrón.**

La incertidumbre combinada del patrón se informará como un porcentaje del valor de la lectura, es decir:

Lectura del patrón (Pa)	$U_{CP}$ (Pa)	$U_{CP}$ (% de la lectura del patrón)	$U_{EP}$ (% de la lectura del patrón)
34473,795	530,0060348	1,537417145 $\approx$ 1,54	3,08
68947,59	1059,884270	1,537231787 $\approx$ 1,54	3,08
103421,385	1589,514327	1,536930033 $\approx$ 1,54	3,08
137895,18	2119,291750	1,536886025 $\approx$ 1,54	3,08
172368,975	2649,072277	1,53686142 $\approx$ 1,54	3,08

Así pues, podemos decir que la incertidumbre combinada del patrón, es de 1,54 % de la lectura.

### Incertidumbre de la calibración.

Así pues, la incertidumbre de la calibración está dada por la siguiente fórmula:

$$U_{Cal} = \sqrt{U_{Patrón}^2 + U_{Calibrando}^2} \quad (49)$$

Calculando la incertidumbre de la calibración del equipo bajo prueba, para una lectura del patrón de 34473,795 Pa (5 psi) obtenemos:

$$U_{Patrón} = 1,54 \% \text{ de la lectura} = \pm 530,896443 \text{ Pa}$$

$$U_{Calibrando} = \pm 1990,345482 \text{ Pa}$$

$$U_{Cal} = \sqrt{(530,896443 \text{ Pa})^2 + (1990,345482 \text{ Pa})^2} = \pm 2059,933536 \text{ Pa}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de  $U_{Cal}$  para las cinco lecturas obtenidas del patrón:

Lectura del patrón (Pa)	$U_{Cal}$ (Pa)
34473,795	$\pm 2059,933536$
68947,59	$\pm 2255,854444$
103421,385	$\pm 2549,143863$
137895,18	$\pm 2910,513987$
172368,975	$\pm 3317,793087$

Para informar la incertidumbre de calibración del equipo bajo prueba, se tomará el mayor valor obtenido de  $U_{Cal}$ .

Por lo tanto, la incertidumbre de calibración del manómetro tipo Bourdon Surex con número de inventario 1468722 y con alcance de medición de 0 a 28 psi es de:

$$U_{Cal} = \pm 3317,793087 \text{ Pa} = \pm 0,4812 \text{ psi}$$

En el anexo 4 se muestra el informe de calibración del equipo bajo prueba.

## Conclusiones.

## Conclusiones.

El objetivo de la realización de este trabajo fue establecer un procedimiento de calibración de instrumentos medidores de presión, usando como patrones una balanza de pesos muertos y una columna de mercurio, sin embargo, por falta de equipo solo se pudo poner en práctica el procedimiento que contempla como patrón, una balanza de pesos muertos.

Debido a que el proceso de calibración involucra el calculo de la incertidumbre de las mediciones realizadas, se consideró necesario incluir un capítulo en el cual se detallara el procedimiento por el cual se obtiene la incertidumbre de una medición (Capítulo V).

Podemos decir entonces, que el resultado final de este trabajo es el anexo 4 "Informe de calibración", en el cual se encuentran resumidos los resultados obtenidos del procedimiento de calibración y del calculo de incertidumbres.

Respecto a estos resultados, podemos hacer los siguientes comentarios:

- El factor que contribuyó de forma más significativa a la incertidumbre de la calibración, fue el correspondiente al área transversal del pistón:

$$\left( \frac{\partial P}{\partial A_0} \right)^2 U_{A_0}^2$$

De esto último se desprende que el valor de la incertidumbre de la calibración, podría disminuir considerablemente, si la incertidumbre del área transversal del pistón fuera menor a la obtenida en este trabajo, lo cual está en función del equipo con el que se determine el diámetro del pistón.

- El valor de la corrección por flotación de los pesos muertos  $\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right)$  fue de 0,9998827, por lo que entre mayor sea la presión aplicada en la balanza, menor será la contribución de dicha corrección a la presión generada en el patrón.
- El valor de la corrección por deformación elástica del émbolo  $(1 + b p_n)$  fue de 0,999999915 para una presión nominal de 25 psi, por lo cual, para la posterior calibración de manómetros cuyo alcance de medición sea menor de  $1 \cdot 10^8$  Pa, esta corrección puede despreciarse.

- El valor de la corrección por dilatación térmica del conjunto pistón-cilindro  $[1+(\alpha_c+\alpha_p)(t-t_r)]$  fue de 0,99999088, por lo que su efecto en la determinación de la presión generada en la balanza de pesos muertos, es menos significativo mientras mayor sea la presión aplicada al patrón.
- Extrapolando los resultados registrados en la “Tabla de resultados de calibración” del Anexo 4, podemos decir que el error % disminuye conforme aumenta la presión generada en la balanza de pesos muertos, lo que quiere decir que el equipo bajo prueba presenta una mayor exactitud, cuando es sometido a presiones de 15 psi a 25 psi.

**Anexos.**

Anexo I. Tabla de conversión de unidades de presión.

Atm	1	0.9869232	bar	1	0.033421	in Hg (0 °C)	2.5483163*10 <sup>-3</sup>	in H <sub>2</sub> O (4°C)	2.490889*10 <sup>-3</sup>	kg/m <sup>2</sup>	9.678411*10 <sup>-5</sup>
bar	1.01325	1	10 <sup>6</sup>	1	0.0338638	1	33863.84	2490.889	2.8959061*10 <sup>-3</sup>	9.80665*10 <sup>-5</sup>	98.0665
Dyna/cm <sup>2</sup>	1.01325*10 <sup>6</sup>	29.530024	29.530024	2.9530024*10 <sup>5</sup>	1	13.595082	345.31507	25.4	0.073556	0.03937	1
in Hg (0 °C)	29.921297	401.46309	401.46309	4.0146309*10 <sup>4</sup>	0.0101971	14.50377*10 <sup>-3</sup>	0.4911533	0.361272	5.2023254	1.422334*10 <sup>-3</sup>	0.2048159
in H <sub>2</sub> O (4°C)	406.78248	760	750.06168	7.5006168*10 <sup>4</sup>	10197.162	2.0885416*10 <sup>-3</sup>	70.72604	25.4	1.8683204	0.0735559	0.1
kg/m <sup>2</sup>	1.0332275*10 <sup>4</sup>	1033.2275	1019.7162	1.0197162*10 <sup>3</sup>	0.1	1.0197162*10 <sup>3</sup>	34.531507	249.0889	9.80665	9.80665	9.80665
Psi	14.695945	14.50377	14.50377	14.50377*10 <sup>-3</sup>	0.0101971	14.50377*10 <sup>-3</sup>	0.4911533	0.361272	5.2023254	1.422334*10 <sup>-3</sup>	0.2048159
lb/ft <sup>2</sup>	2116.2148	2088.5416	2088.5416	2.0885416*10 <sup>-3</sup>	760	750.06168*10 <sup>-4</sup>	70.72604	25.4	1.8683204	0.0735559	0.1
mm Hg (0°C)	760	1019.7162	1019.7162	1.0197162*10 <sup>3</sup>	0.1	1.0197162*10 <sup>3</sup>	34.531507	249.0889	9.80665	9.80665	9.80665
cm H <sub>2</sub> O (4°C)	1033.2275	1019.7162	1019.7162	1.0197162*10 <sup>3</sup>	0.1	1.0197162*10 <sup>3</sup>	34.531507	249.0889	9.80665	9.80665	9.80665
Pa (N/m2)	101325	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	0.1	0.1	0.1	3386.384	249.0889	9.80665	9.80665	9.80665

Atm	0.0680459	4.7254182*10 <sup>-4</sup>	lb/ft <sup>2</sup>	4.7254182*10 <sup>-4</sup>	1.3157895*10 <sup>-3</sup>	mm Hg (0°C)	9.678411*10 <sup>-4</sup>	cm H <sub>2</sub> O (4°C)	9.678411*10 <sup>-4</sup>	Pa (N/m2)	9.8692327*10 <sup>-6</sup>
bar	6.894759*10 <sup>-2</sup>	4.78803*10 <sup>-4</sup>	4.78803*10 <sup>-4</sup>	4.78803*10 <sup>-4</sup>	1.333222*10 <sup>-3</sup>	1.333222*10 <sup>-3</sup>	9.80665*10 <sup>-4</sup>	9.80665*10 <sup>-4</sup>	9.80665*10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>
Dyna/cm <sup>2</sup>	6.894759*10 <sup>-4</sup>	478.803	478.803	478.803	1.333222*10 <sup>3</sup>	1.333222*10 <sup>3</sup>	980.665	980.665	980.665	10	10
in Hg (0 °C)	2.036024	0.014139	0.014139	0.014139	0.03937*10 <sup>2</sup>	0.03937*10 <sup>2</sup>	0.028959	0.028959	0.028959	2.9530024*10 <sup>-4</sup>	2.9530024*10 <sup>-4</sup>
in H <sub>2</sub> O (4°C)	27.679913	0.1922217	0.1922217	0.1922217	0.5352401	0.5352401	0.3937007	0.3937007	0.3937007	4.0146309*10 <sup>-3</sup>	4.0146309*10 <sup>-3</sup>
kg/m <sup>2</sup>	703.06975	4.8824318	4.8824318	4.8824318	13.595098	13.595098	10	10	10	0.1019716	0.1019716
Psi	1	6.9444487*10 <sup>-3</sup>	6.9444487*10 <sup>-3</sup>	6.9444487*10 <sup>-3</sup>	0.0193367	0.0193367	0.0142233	0.0142233	0.0142233	1.450377*10 <sup>-4</sup>	1.450377*10 <sup>-4</sup>
lb/ft <sup>2</sup>	143.99991	1	1	1	2.7844932	2.7844932	2.0481597	2.0481597	2.0481597	0.0208854	0.0208854
mm Hg(0°C)	51.714945	0.3591317	0.3591317	0.3591317	1	1	0.7355601	0.7355601	0.7355601	7.5006263*10 <sup>-3</sup>	7.5006263*10 <sup>-3</sup>
cmH <sub>2</sub> O(4°C)	70.306975	0.4882431	0.4882431	0.4882431	1.3595081	1.3595081	1	1	1	0.0101971	0.0101971
Pa (N/m2)	6894.759	47.8803	47.8803	47.8803	133.3222	133.3222	98.0665	98.0665	98.0665	1	1

Ejemplo de uso: 19 bar equivalen a 19(14.50377)psi.

Anexo 2. Tabla de altitudes y latitudes de las principales ciudades de México.

Ciudad	Latitud Norte	Altitud (m)
1. Acapulco, Gro.	16°51'	20
2. Aguascalientes, Ags.	21°53'	1870
3. Campeche, Camp.	19°51'	10
4. Celaya Gto.	20°31'	1750
5. Ciudad de México, D.F.	19°26'	2240
6. Ciudad Juárez, Chih.	31°44'	1120
7. Ciudad Madero, Tamps.	22°15'	10
8. Ciudad Obregón, Son.	28°29'	40
9. Ciudad Victoria, Tamps.	23°44'	320
10. Coatzacoalcos, Ver.	18°09'	10
11. Colima, Col.	19°15'	490
12. Córdova, Ver.	18°53'	860
13. Cuernavaca, Mor.	18°55'	1480
14. Culiacán, Sin.	24°48'	60
15. Chihuahua, Chih.	28°38'	1440
16. Chilpancingo, Gro.	17°33'	1300
17. Durango, Dgo.	24°01'	1880
18. Ensenada, B.C.	31°51'	20
19. Guadalajara, Jal.	20°41'	1550
20. Guanajuato, Gto.	21°00'	2000
21. Guaymas, Son.	27°55'	10
22. Hermosillo, Son.	29°06'	210
23. León, Gto.	21°07'	1800
24. Los Mochis, Sin.	25°48'	10
25. Matamoros, Tamps.	25°52'	10
26. Mazatlán, Sin.	23°14'	10
27. Mérida, Yuc.	20°58'	10
28. Mexicali, B.C.	32°39'	10
29. Monterrey, N.L.	25°40'	540
30. Morelia, Mich.	19°42'	1920
31. Nuevo Laredo, Tamps.	27°30'	150
32. Oaxaca, Oax.	17°03'	1550
33. Orizaba, Ver.	18°51'	1230
34. Pachuca, Hgo.	20°07'	2000
35. Puebla, Pue.	19°03'	2160
36. Queretaro, Oro.	20°35'	1820
37. Reynosa, Tamps.	26°04'	20
38. Saltillo, Coah.	25°25'	1600
39. Tampico, Tamps.	22°17'	10
40. Toluca, Mex.	19°17'	2660
41. Veracruz, Ver.	19°11'	10
42. Villahermosa, Tab.	17°59'	10
43. Xalapa, Ver.	19°32'	1460

Fuente: INEGI; Dirección General de Geografía.

Anexo 3. Tabla de valores de Z.

Temperatura (°C).	Presión (mm Hg).					
	500	520	540	560	580	600
16,0	1,001903	1,001960	1,001960	1,001988	1,002016	1,002044
16,5	1,001968	1,001996	1,002024	1,002052	1,002080	1,002108
17,0	1,002035	1,002063	1,002091	1,002119	1,002147	1,002175
17,5	1,002105	1,002133	1,002161	1,002189	1,002217	1,002245
18,0	1,002178	1,002206	1,002234	1,002262	1,002290	1,002318
18,5	1,002254	1,002282	1,002310	1,002339	1,002366	1,002394
19,0	1,002333	1,002361	1,002388	1,002416	1,002444	1,002472
19,5	1,002414	1,002442	1,002470	1,002497	1,002525	1,002553
20,0	1,002498	1,002526	1,002553	1,002581	1,002609	1,002637
20,5	1,002585	1,002612	1,002640	1,002669	1,002695	1,002723
21,0	1,002674	1,002701	1,002729	1,002757	1,002785	1,002912
21,5	1,002766	1,002793	1,002821	1,002849	1,002876	1,002904
22,0	1,002860	1,002888	1,002915	1,002943	1,002971	1,002998
22,5	1,002957	1,002985	1,003012	1,003040	1,003067	1,003095
23,0	1,003057	1,003084	1,003112	1,003139	1,003167	1,003194
23,5	1,003159	1,003186	1,003214	1,003214	1,003269	1,003296
24,0	1,003263	1,003291	1,003319	1,003346	1,003373	1,003401
24,5	1,003370	1,003398	1,003425	1,003453	1,003480	1,003507
25,0	1,003480	1,003507	1,003535	1,003562	1,003589	1,003617
25,5	1,003592	1,003619	1,003647	1,003674	1,003701	1,003729
26,0	1,003733	1,003733	1,003761	1,003788	1,003815	1,003843
26,5	1,003823	1,003850	1,003877	1,003905	1,003932	1,003959
27,0	1,003942	1,003969	1,003996	1,004024	1,004051	1,004078
27,5	1,004063	1,004091	1,004118	1,004145	1,004172	1,004199
28,0	1,004187	1,004214	1,004242	1,004269	1,004296	1,004323
28,5	1,004313	1,004340	1,004368	1,004395	1,004422	1,004449
29,0	1,004442	1,004469	1,004496	1,004523	1,004550	1,004577
29,5	1,004572	1,004599	1,004626	1,004653	1,004680	1,004708
30,0	1,004705	1,004732	1,004759	1,004786	1,004813	1,004840

Fuente: Norma mexicana NMX-CH-049:1996 IMNC.

#### Anexo 4. Informe de calibración.

**Nombre del cliente:** Facultad de Química. UNAM.

**Dirección:** Ciudad Universitaria. Edif. A Planta baja, laboratorio A003.

**Fecha de calibración:** 1998-11-25

**Identificación del instrumento:** Manómetro tipo Bourdon.

**Marca:** Surex.

**No. de inventario:** 1468722

**Incertidumbre:**  $\pm 3317,793087$  Pa.

**Nivel de confianza:** 68,27% (k=1)

**Condiciones ambientales:** Temperatura:  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,3512^{\circ}\text{C}$  (con k=2)  
Humedad relativa:  $35,7\% \pm 1,156143\%$  (con k=2)  
Presión atmosférica:  $77926,8259$  Pa  $\pm 7,6974$  Pa (con k=2).

**Procedimiento utilizado:** Comparación con balanza de pesos muertos.

---

Calibró	Aprobó	Fecha de emisión
Praxedis Israel Santamaría Mata	M. en C. Ma. de los Ángeles Olvera T.	1999-01-04

**Anexo 4. (Continuación).**

La calibración se realizó por comparación, utilizando como patrón una balanza de pesos muertos.

En las siguientes tablas se muestran los datos de los equipos utilizados para la calibración.

<b>Instrumento patrón</b>	Balanza de pesos muertos	<b>Instrumento bajo prueba</b>	Manómetro tipo Bourdon
<b>No. de serie</b>	2JH-88395	<b>No. inventario</b>	1468722
<b>Marca</b>	OMEGA	<b>Marca</b>	Surex.
<b>Modelo</b>	DWT 1305-D	<b>Modo de operación</b>	Manométrico
<b>Modo de operación</b>	Manométrico	<b>Intervalo</b>	0 a 28 psi
<b>Incertidumbre</b>	1,54% de la lectura	<b>Fluido de operación</b>	Aceite automotriz ESSO turbo II
<b>Fluido de operación</b>	Aceite automotriz ESSO turbo II	<b>Diferencia de niveles</b>	0,2119 m
<b>Aceleración local de la gravedad</b>	9,7792644 ms <sup>2</sup>	<b>Fecha sugerida de recalibración</b>	Noviembre de 1999

1 psi =6894,759 Pa

Anexo 4. (Continuación).

Tabla de resultados de calibración.

Presión nominal (psi)	Presión patrón (Pa)	Presión equipo bajo prueba (Pa)	Error (Pa)	Error %
0	0	0	0	0
5	32 538,05490	34 473,795	-1 935,7401	5,95
10	66 942,60123	68 947,59	-2 004,98877	2,99
15	101 347,1476	103 421,385	-2 074,2374	2,05
20	135 751,6939	137 895,18	-2 143,4861	1,58
25	170 156,2402	172 368,975	-2 212,7348	1,30

Incertidumbre =  $\pm 3317,7931\text{Pa}$

Gravedad local =  $9,7792644\text{m/s}^2$

Densidad de las masas patrón =  $7840\text{kg/m}^3$

Coefficiente de expansión térmica del pistón – cilindro patrón =  $11,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Coefficiente de deformación elástica del émbolo =  $-4,93 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$

Condiciones ambientales

Temperatura ambiente =  $(20 \pm 0,3512)^\circ\text{C}$

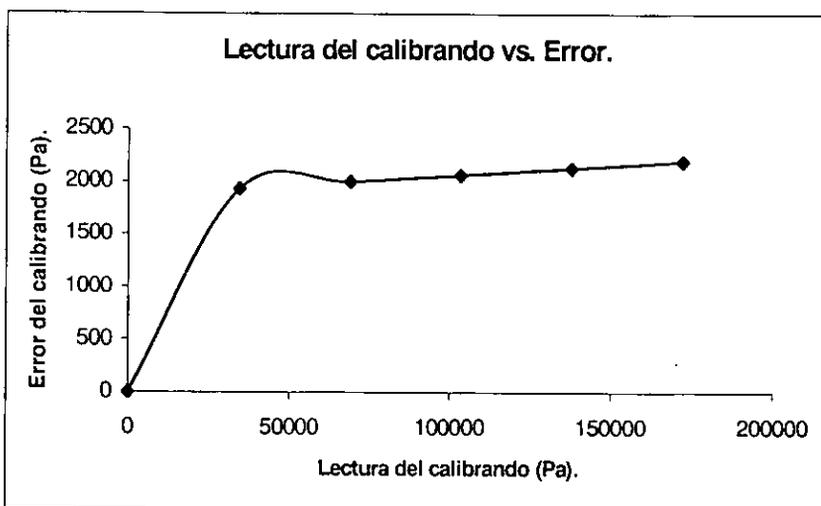
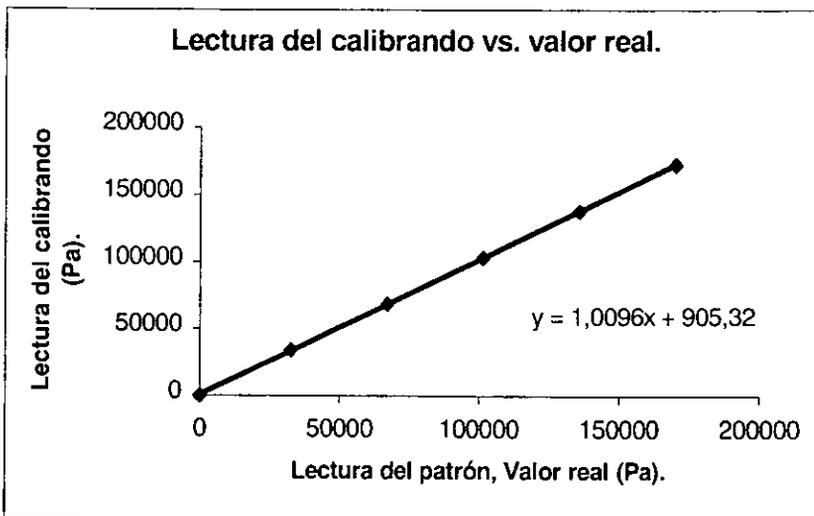
Presión atmosférica =  $(77926,8259 \pm 7,6974)\text{Pa}$

Humedad relativa =  $(35.7 \pm 1,1561)\%$

La incertidumbre total estimada esta basada en la desviación estándar de las mediciones, con un factor de cobertura de  $k = 1$ .

La incertidumbre fue calculada en base a la norma mexicana NMX-CH-140:1996 IMNC "Guía para evaluación de la incertidumbre en los resultados de las mediciones".

Anexo 4. (Continuación).



## Anexo 5. Definición de términos.

**Alcance de medición (de un instrumento de medición):** Condición extrema que un instrumento de medición puede soportar sin sufrir ningún daño o degradación de sus características metrológicas especificadas<sup>(25)</sup>.

**Barómetro:** Instrumento que se utiliza para medir la presión atmosférica<sup>(17)</sup>.

**Calibración:** Conjunto de operaciones que establecen dentro de condiciones específicas, la relación entre los valores de una magnitud indicada por un aparato de medida, o de un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de la magnitud realizados por estándares<sup>(25)</sup>.

**Clase de exactitud:** Clase de un instrumento de medida que satisface a ciertas exigencias metrológicas destinadas a conservar los errores dentro de ciertos límites específicos<sup>(25)</sup>.

**Coefficiente de sensibilidad:** La derivada parcial del mensurando por la variable de interés determina el coeficiente de sensibilidad. Éste se utiliza para estimar la incertidumbre estándar compuesta del resultado de la magnitud sujeta a medición, multiplicando el cuadrado del coeficiente de sensibilidad por la "varianza" correspondiente a la variable en cuestión<sup>(21)</sup>.

**Corrección:** Valor agregado algebraicamente al valor del mensurando sin corregir para compensar por una desviación o error sistemático conocido o calculable. Para todas las mediciones, se supone que se realizan todas las correcciones deterministas, sea por razones de escala y variables de influencia, de no linealidad u otras causas. Cuando la información es incompleta, como casi siempre lo es, la corrección puede ser incompleta. Los residuos de corrección forman parte de los componentes de la incertidumbre compuesta. A esta falta de información o nitidez, se le puede asociar, mediante un proceso convencional y convenido, una incertidumbre.

La evaluación de incertidumbre se realiza para el valor del mensurando después de aplicar todas las correcciones. Esto significa que es la responsabilidad del evaluador, tomar en cuenta toda la información de la cual dispone para, de una parte, informar del mejor valor del mensurando, y de otra parte cuantificar la falta de información, es decir, del desconocimiento que estima que podría existir<sup>(21)</sup>.

**Diferencia de presión:** Diferencia entre dos presiones, para una misma presión de referencia<sup>(17)</sup>.

**División:** Parte de una escala comprendida entre dos marcas sucesivas<sup>(25)</sup>.

**Error de medición:** Es el resultado de la sustracción del valor medido al valor convencional que se supone es el verdadero. El error no es la incertidumbre en el resultado de la medición. Si este error o desviación es desconocido, pero se sabe que se encuentra dentro de cierto rango, esta última información se utiliza para la evaluación de la incertidumbre. Los errores mencionados suelen clasificarse según su comportamiento en errores aleatorios y en errores sistemáticos<sup>(25)</sup>.

**Error máximo permisible (de un instrumento de medición):** Es el límite que tolera una especificación, norma, regulación o el usuario del instrumento, en función de la utilización última de los resultados de las mediciones<sup>(25)</sup>.

**Estabilidad:** Capacidad de un instrumento de medición para mantener sus características metrológicas con el paso del tiempo. Si se considera la estabilidad en relación con una magnitud que no es el tiempo, se debe señalar la naturaleza de la misma.

Puede especificarse como el tiempo para obtener una cierta desviación, o como la desviación máxima que puede presentarse en un tiempo determinado<sup>(25)</sup>.

**Exactitud de medición:** Cercanía con la cual el valor del resultado de una medición se aproxima al valor convencional considerado como el valor verdadero del mensurando. Es un concepto cualitativo, utilizado para comparar y clasificar las mediciones y los sistemas de medición, sin que se intente cuantificar el criterio de ordenamiento. Este término no es sustituto de la palabra precisión<sup>(25)</sup>.

**Exactitud de un instrumento de medida:** Habilidad de un instrumento de medición para dar respuestas cercanas a un valor verdadero (el concepto de exactitud es cualitativo)<sup>(25)</sup>.

**Factor de cobertura:** Valor que multiplica el valor de la incertidumbre estándar compuesta para dar un intervalo de confianza<sup>(21)</sup>.

**Fluido manométrico:** Medio material, líquido o gas que se utiliza para transmitir la presión que se mide<sup>(17)</sup>.

**Incertidumbre de tipo A:** Método de evaluación que utiliza principios estadísticos, basado en una serie de observaciones. Se utiliza la desviación estándar (típica) como representante de esta incertidumbre. Puede provenir de la información que se recolecta cuando se efectúa un control de calidad de las mediciones, por ejemplo con el uso de repeticiones de la medición de alguna característica de un patrón de verificación, cuando estas se efectúan al mismo tiempo que la determinación del valor del mensurando de interés<sup>(21)</sup>.

**Incertidumbre de tipo B:** Método de evaluación que toma en cuenta la información disponible acerca del comportamiento del proceso de medición. En muchos casos se utiliza este tipo de evaluación por razones económicas, en particular cuando se tiene una buena experiencia práctica del proceso. Se utilizan datos históricos obtenidos del comportamiento del proceso de medición, información de fabricantes de los instrumentos, acervos técnicos publicados y otros. En cualquier proceso de medición existe, por lo menos, una fuente de incertidumbre de tipo B<sup>(21)</sup>.

**Incertidumbre en la medición:** Es la duda que tiene la persona que mide, acerca de la calidad y reproducibilidad de los valores que informa. Prácticamente, se cuantifica mediante un procedimiento convencional aceptado, validado y se informa como un parámetro asociado al valor del resultado de la medición. Por razones históricas y por costumbre se utilizan algunos conceptos estadísticos para la cuantificación<sup>(21)</sup>.

La evaluación debe tener en cuenta la variabilidad a corto plazo, normalmente mediante la desviación estándar (típica) de todos los factores de influencia, de las magnitudes independientes, y de la información disponible acerca del proceso de medición. Nótese que la incertidumbre es una duda acerca de un resultado relacionado con la utilización del mismo. No pueden existir incertidumbres aleatorias o sistemáticas ya que el concepto no pertenece ni a la medición ni al resultado, ni al dominio matemático, sino al proceso de obtención y a su utilización práctica<sup>(21)</sup>.

**Incertidumbre estándar:** Incertidumbre relacionada con el valor de un mensurando o una variable de influencia expresada como desviación estándar<sup>(21)</sup>.

**Incertidumbre estándar combinada:** Es la incertidumbre estándar relacionada con el resultado de una medición cuando el valor numérico del mensurando se obtiene mediante la medición de otras magnitudes. Todas las incertidumbres en las variables se estiman mediante el mismo proceso de cuantificación, utilizando una unidad conceptual única de dispersión o falta de nitidez, que es la desviación estándar. Luego se componen por un proceso de concatenación definido, tomando en cuenta todas las incertidumbres en las variables. A cualquier valor numérico, aunque sea de lectura directa, se le puede y debe asociar incertidumbres de dos fuentes de vaguedad o carencia de información, la primera puede ser de origen estadístico por la repetibilidad que pueda lograrse en unas condiciones determinadas, y la segunda relacionada con la incertidumbre de la calibración del instrumento, es decir en la realización específica de la diseminación de la unidad física, tal como se logró en el instrumento particular utilizado<sup>(21)</sup>.

**Incertidumbre expandida:** Es el producto de la incertidumbre estándar compuesta por el factor de cobertura. Se utiliza el resultado como parámetro que define el medio intervalo dentro del cual se espera que se encuentre el valor convencional con un cierto nivel de confianza<sup>(21)</sup>.

**Magnitud:** Atributo de un fenómeno, de un cuerpo o de una sustancia, que es susceptible de ser distinguida cualitativamente y determinada cuantitativamente<sup>(25)</sup>.

**Manómetro:** Nombre genérico del instrumento utilizado para medir la presión<sup>(17)</sup>.

**Medición:** Conjunto de operaciones que tienen la finalidad de determinar el valor de una magnitud. La operación de medición puede ser automática. En el lenguaje común, se utiliza este mismo vocablo para expresar el resultado de la medición<sup>(25)</sup>.

**Mensurando:** Magnitud particular sujeta a medición. Muy a menudo, es necesario indicar las condiciones en las cuales se han realizado las mediciones, ya que el valor numérico informado depende de otras variables (Por ejemplo, la densidad del aire es de 1,2 Kg./m<sup>3</sup> a 760 mm Hg y 20 °C)<sup>(25)</sup>.

**Micromanómetro:** Instrumento que se utiliza para medir pequeñas presiones<sup>(17)</sup>.

**Presión:** Magnitud que se define como la derivada de la fuerza con respecto al área (Cuando la fuerza que se aplica es normal y uniformemente distribuida sobre cierta superficie plana, la magnitud de la presión se obtiene dividiendo la fuerza aplicada sobre el área correspondiente<sup>(17)</sup>).

$$P = dF/dA$$

donde:

P es la presión en Pa.

F es la fuerza en N.

A es el área en m<sup>2</sup>.

**Presión absoluta:** Presión que se mide a partir de la presión cero de un vacío absoluto<sup>(17)</sup>.

**Presión atmosférica (barométrica):** Presión que ejerce la atmósfera que rodea la tierra, sobre todos los objetos que se haya en contacto con ella (la presión atmosférica cambia con la altura sobre el nivel del mar, la altitud y las condiciones atmosféricas)<sup>(17)</sup>.

**Presión diferencial:** Variable medida en la diferencia de presiones (la presión relativa es una presión diferencial en que una de las presiones puede ser la atmosférica)<sup>(17)</sup>.

**Presión estable:** Presión que, referida a un instrumento de medición, no varía o varía lentamente de manera continua<sup>(17)</sup>.

**Presión estática (o de línea):** Presión que en los fluidos en equilibrio, está determinada por el peso específico y por la altura del mismo en un determinado punto, o cuyo flujo es paralelo a la pared del conducto (también es conocida como carga estática o carga de presión, en el caso del agua se le conoce como presión hidrostática)<sup>(17)</sup>.

**Presión hidrostática (carga hidrostática):** Presión localizada en cierto punto abajo de la superficie del agua y la cual se debe a la altura del líquido arriba de dicho punto<sup>(17)</sup>.

**Presión negativa (o de vacío parcial):** Cualquier presión menor que la presión atmosférica<sup>(17)</sup>.

$$P_n = P_{at} - P_{ab} \qquad \text{si } P_{at} > P_{ab}$$

donde:

$P_n$  = Presión negativa.

$P_{at}$  = Presión atmosférica.

$P_{ab}$  = Presión absoluta.

**Presión normal:** Presión atmosférica equivalente a una atmósfera igual a 101323 Pa<sup>(17)</sup>.

**Presión relativa (manométrica o efectiva):** Presión positiva indicada por un instrumento y que representa la presión medida a partir de la presión atmosférica local<sup>(17)</sup>.

**Presión positiva (diferencia de presión):** Cualquier presión mayor que la presión atmosférica<sup>(17)</sup>.

$$P_p = P_{ab} - P_{at} \qquad \text{si } P_{ab} > P_{at}$$

donde:

$P_p$  = Presión positiva.

$P_{at}$  = Presión atmosférica.

$P_{ab}$  = Presión absoluta.

**Presión variable:** Presión que referida a un instrumento, varía de manera continua o discontinua<sup>(17)</sup>.

**Procedimiento de medición:** Conjunto de operaciones, descritas específicamente, utilizadas para la realización de mediciones particulares de acuerdo con un método determinado. Para asegurar la reproducibilidad de los resultados se elabora normalmente un escrito<sup>(25)</sup>.

**Proceso de medición:** Conjunto de recursos materiales y humanos, actividades programas y factores de influencia que permiten realizar mediciones y producir valores numéricos<sup>(25)</sup>.

**Sobrepresión:** Cantidad de presión que rebasa el alcance máximo de presión de una determinada escala de trabajo<sup>(17)</sup>.

**Transductor de presión:** Dispositivo que recibe una señal de presión y la convierte en otra señal equivalente, que contiene la información del valor de la cantidad de magnitud recibida<sup>(17)</sup>.

**Trazabilidad:** Propiedad de un resultado de medición o de un patrón, tal que este pueda ser relacionado a referencias determinadas, generalmente de patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones que tengan todas, incertidumbres determinadas<sup>(31)</sup>.

**Unidad de medición:** Magnitud particular, definida y adoptada por convención, con la cuál se comparan otras magnitudes de la misma naturaleza para expresarlas cuantitativamente en relación a dicha magnitud<sup>(25)</sup>.

**Vacío absoluto:** Condición que reúne un espacio donde no existe presión alguna (El vacío absoluto no puede obtenerse en la práctica)<sup>(17)</sup>.

**Vacuómetro:** Instrumento que se utiliza para medir presiones inferiores a la atmosférica<sup>(17)</sup>.

**Variable de influencia:** Magnitud que no es el mensurando pero que afecta de alguna manera el resultado de la medición. A menudo, las variables de influencia son de difícil control, o bien resultan incontrolables<sup>(25)</sup>.

## Bibliografía.

- (1) Tasos, C. Papanastasiou.  
Applied fluid mechanics, U.S.A., RTR Prentice Hall, 1995.
- (2) Gran enciclopedia Larousse  
España, Editorial Planeta, 1990, tomo 18, 2ª edición.
- (3) Benedict, Robert P.  
Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements, U.S.A,  
Editorial John Wiley & Sons, 1984, 3ª edición.
- (4) Bureau International de Métrologie Légale.  
International recommendation N° 53, Characteristics of elastic sensing elements  
used for measurement of pressure, Determination methods, Francia, 1982, 1ª  
edición.
- (5) Essentials of the SI: Base & derive units;  
<http://physics.nist.gov/cuu/units/units.html>; 03/16/98
- (6) Mott, Robert L.  
Applied fluid mechanics, U.S.A., Editorial Merrill, 1994, 4ª edición.
- (7) V. P. Preobrazhenski.  
Mediciones termotécnicas y aparatos para efectuarlas, URSS, Editorial Mir  
Moscu, 1980, tomo II.
- (8) Ernest O. Doebelin.  
Measurement systems, application and design, U.S.A., Editorial Mc. Graw Hill,  
1990, 4ª edición.
- (9) ANSI.  
ANSI/ASHRAE 41.3 "Standard method for pressure measurement", USA,  
1989.
- (10) ASME.  
ASME B40.1 "Gauges - Pressure indicating dial type - Elastic element", USA,  
1991.
- (11) SECOFI-DGN.  
NOM-013-SCFI-1993 "Instrumentos de medición - Manómetros con elemento  
elástico - Especificaciones", México, 1993.
- (12) Diario oficial de la federación.  
NOM-CH-65-1986 "Instrumentos de medición - Manómetros - Calibración  
con patrón de columna de mercurio", México, 18 de septiembre de 1986.
- (13) SECOFI-DGN.  
NMX-CH-3-1993-SCFI "Instrumentos de medición - Manómetros de presión,  
vacuómetros y manovacúómetros indicadores y registradores con elementos  
sensores elásticos (instrumentos ordinarios)", México, 1993.
- (14) IMNC.  
NMX-CH-049: 1996 IMNC "Instrumentos de medición - Medidas  
volumétricas metálicas para líquidos - Método de calibración", México, 1996.
- (15) SECOFI-DGN.  
NMX-CH-58-1994-SCFI "Instrumentos de medición - Manómetros con  
elemento elástico - Método de calibración con balanza de pesos muertos,  
México, 1994.

- (16) SECOFI-DGN.  
NMX-Z-60-1994-SCFI "Mediciones de presión, terminología", México, 1994.
- (17) Bureau International de Métrologie Légale.  
Recommandation Internationale N° 17, "Manomètres-Vacuomètres-  
Manovacuumètres indicateurs, Instruments usuels", Francia, 1981, 2ª edición.
- (18) Bureau International de Métrologie Légale.  
Recommandation Internationale N° 19, "Manomètres - Vacuomètres -  
Manovacuumètres enregistreurs, Instruments usuels", Francia, 1981, 2ª edición.
- (19) ASM International Handbook Committee.  
Metals Handbook, U.S.A., 1990, volumen 2; 10ª edición.
- (20) IMNC.  
NMX-CH-140: 1996 IMNC. "Guía para la evaluación de la incertidumbre en  
los resultados de las mediciones", México, 1996.
- (21) ISO.  
ISO-TAG 4/WG3, "Guide to the expression of uncertainty in measurement",  
U.S.A., 1993.
- (22) Holton, G.  
Introduction to concepts and theories in physical science, U.S.A., 1974.
- (23) Olvera, Arana Pablo.  
Anteproyecto de un procedimiento para la verificación de instrumentos de  
termometría y manometría en un laboratorio de calibración, Tesis de  
licenciatura en Ingeniería Química, México, UNAM, Facultad de Química,  
1991.
- (24) CENAM, Dirección de metrología mecánica, División de flujo y volumen.  
Memorias del "Curso básico de calibración de pequeños volúmenes", México,  
1997.
- (25) ISO.  
Vocabulario Internacional de términos básicos y generales de metrología,  
España, 1994