

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FÍSICA



INFORME DE SUFICIENCIA PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO FÍSICO

TITULADO

**“MEDICIÓN DE UN EQUIPO DE PRESIÓN DIFERENCIAL POR EL
MÉTODO DE COLUMNA DE LÍQUIDO”**

PRESENTADO POR:

JORGE JESÚS PADILLA DUEÑAS

ASESOR

Mg. CLEMENTE ALFREDO LUYO CAYCHO

LIMA – PERU

2015

RESUMEN

En la actualidad la industria necesita equipos de bajo costo y de gran utilidad, por ello los resultados deben ser mostrados acordes a las normativas correspondientes y cubrir el alcance de su necesidad.

Para la industria farmacéutica es necesario controlar la presión entre dos áreas, y utiliza equipos que reflejen ese requerimiento. Con esa idea nace los medidores de presión diferencial como su nombre lo dice, hacen posible medir la diferencia de presiones entre dos áreas y lo reflejan en una columna de líquido que en su interior contiene aceite y posee una regla graduada con un alcance de -0,05 a 3,00 pulgadas de columna de agua como sistema de medición.

El informe propone brindar un sistema de medición, elaboración de un procedimiento para la calibración de estos equipos diferenciales, evaluado por medio de ensayos, mostrar resultados, compararlo con las competencias normativas relacionadas a ellos y finalmente presentar resultados con su respectiva incertidumbre asociada mejorando la fineza existente en el mercado y aplicando el debido aseguramiento de los resultados por el procedimiento propuesto.

Para lograr esto se proyecta un sistema de medición usando como equipo referencial una regla patrón y una columna de líquido (agua) con la mejor fineza posible. La metodología aplicada permite hacer un tratamiento de los datos, para obtener la mejor incertidumbre posible se supone bases teóricas e investigación bibliográfica adaptada a los estándares de calidad que se exigen actualmente a este tipo de equipos.

Palabras claves:

Presión diferencial, Calibración, Columna de agua, Regla patrón

*A mis padres, por su
constante apoyo*

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivo del Informe	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivo Específico	3
Capítulo 2: Fundamento Teórico	4
2.1. Condiciones Metrológicas Generales	4
2.1.1. Calibración	4
2.1.2. Incertidumbre de medida	4
2.1.3. Medidor de presión diferencial	4
2.1.4. Histéresis	5
2.1.5. Repetibilidad	5
2.1.6. Condiciones de experimentación	5
2.1.7. Error de paralaje	5
2.1.8. Mojabilidad	5
2.1.9. Clase de exactitud	6
2.1.10 Gravedad específica	6
2.1.11 Factor de cobertura	6
2.1.12 Presión en un líquido	6

2.2. Determinación del sistema de medición	7
2.2.1. Determinación de la presión en el patrón	7
2.2.2. Determinación de la presión en el equipo examinado	8
2.2.3. Determinación de presión en el tanque transitorio	8
2.2.4. Relación de alturas entre los equipos patrón y diferencial de presión	8
Capítulo 3: Procedimientos Experimentales	9
3.1. Condiciones Generales	9
3.2. Consideración para el instrumento patrón	9
3.3. Proceso de experimentación	10
Capítulo 4: Resultados Experimentales	12
4.1. Resultados obtenidos en el equipo examinado	12
Capítulo 5: Discusión	16
5.1. Cálculo de la clase de exactitud	16
5.1.1. Clase de exactitud del instrumento patrón	16
5.1.2. Clase de exactitud del equipo diferencial de presión	16
5.2. Cálculo de errores	17
5.3. Cálculo de la incertidumbre	22
Capítulo 6: Conclusiones	23
Referencias	24

Anexos

Anexo 1: Cuando se utiliza agua u otro líquido humectante

Anexo 2: Determinación de la clase de exactitud

Anexo 3: Determinación de errores

Anexo 4: Cálculo de Incertidumbres

Anexo 5: Determinación de la densidad del agua y su incertidumbre

Anexo 6: Determinación de la densidad del aceite y su incertidumbre

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

El sector industrial del Perú tiene una gran demanda de equipos de medición ante las exigencias del mercado local, por ello, la necesidad de garantizar la confiabilidad de las mediciones.

La industria requiere de organismos que garanticen estos resultados por medio de procedimientos y patrones de calidad trazados en importantes centros metrologicos, como es el Instituto Nacional de Calidad (INACAL), que ofrece servicios de calibración, soluciones a problemas metrologicos y asesorías en calidad.

La diversidad de equipos existentes en el mercado industrial hace imposible que exista un procedimiento de calibración exclusivo para determinados equipos, como lo son de presión diferencial.

Cierto sector industrial adecua sus áreas de forma que cuando mayor sea la presión diferencial se considera como área crítica o área limpia. Esto es posible por el sistema de aire acondicionado que es utilizado imponiendo una diferencia de presión entre una sala y el exterior de acuerdo a la dirección del flujo de aire. El aire que ingresa a la sala pasa por filtros HEPA (high efficiency particle air) o filtros ULPA (ultra-low penetration air). Se debe proveer un caudal de aire que garantice que el volumen de aire de la sala es renovado una cierta cantidad de veces por hora. Se establece una determinada escala de presiones diferenciales con respecto a la presión exterior y entre salas para guiar el flujo de aire con la configuración que se le asigne a la sala. Las presiones diferenciales entre salas dependen también de qué tan crítica sea la sala.

Debido a esto se ubican equipos de medición de presión diferencial entre áreas, como la demanda industrial no permite grandes gastos económicos, estos equipos deben ser de mínimo gasto y de mayor eficiencia posible.

Para los organismos reguladores como la Dirección General de Medicamentos, Insumos y Drogas (DIGEMID) del Ministerio de Salud, esta información es importante

en alto grado, así que la verificación de las áreas de presión diferencial se visualiza en este equipo, lo cual muestra resultados reales, es por ello que se hace muy necesaria la elaboración de procedimientos para la calibración de este equipo.

Sin embargo, la capacidad de los sistemas convencionales actuales no abarca este grado de precisión, es evidente entonces que existe un abismo entre las necesidades de aseguramiento del resultado y la capacidad de una metodología para calibrarlo.

Siendo necesaria la elaboración de un procedimiento para la calibración de presiones diferenciales acorde a la normativa metrológica vigente.

Para satisfacer las interrogantes del estado del equipo se estable errores máximos permisibles y una incertidumbre de medición que mejore la calidad del producto y la confiabilidad de la industria.

1.2.Objetivo del Informe

1.2.1.Objetivo General

Elaborar un procedimiento de calibración para un equipo de presión diferencial de rango -0,05 a 3,00 pulgadas de columna de agua.

1.2.2.Objetivo Específico

Se busca un método de comparación cumpliendo los siguientes objetivos específicos:

- a. Elaborar y diseñar un sistema de medición para la evaluación de este tipo de equipos.
- b. Analizar los resultados entre el patrón utilizado y el equipo diferencial de presión por medio de una hoja de cálculo.
- c. Comparar los errores encontradas con las normativas establecidas para este tipo de equipos.
- d. Comparar la incertidumbre de la medición con las normativas establecidas para este tipo de equipos además de mejorar fineza de los resultados.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO TEORICO

2.1. Condiciones Metrológicas Generales

2.1.1. Calibración [7]

Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones específicas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones

2.1.2. Incertidumbre de medida [7]

Parámetro, asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mesurando.

2.1.3. Medidor de presión diferencial [5]

Medidor utilizado para medir la diferencia entre dos presiones y/o depresiones aplicadas sobre el medidor, mostrando una indicación única.

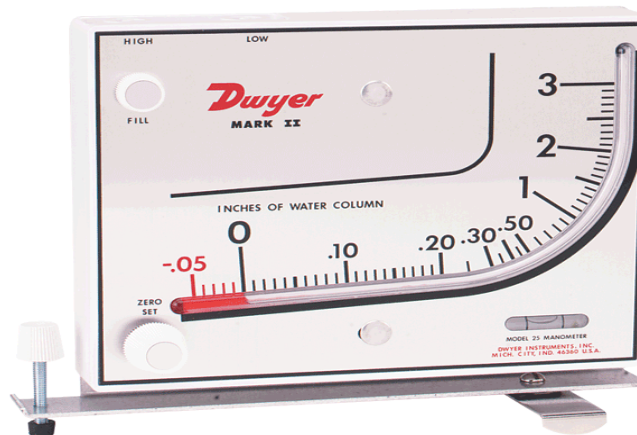


Figura 1. Equipo diferencial de presión

2.1.4. **Histéresis [2]**

Propiedad de un equipo de medida cuya variación en la indicación del manómetro en función de si ha sido sometido con anterioridad a una presión diferente.

2.1.5. **Repetibilidad [7]**

Grado de concordancia entre resultados de sucesivas mediciones del mismo mensurando, mediciones efectuadas con aplicación de la totalidad de las mismas condiciones de medida.

Tomar en cuenta que las condiciones de repetibilidad deben de comprender el mismo procedimiento de medida, el mismo observador, el mismo instrumento de medida utilizado en las mismas condiciones, el mismo lugar y en un corto periodo de tiempo. La repetibilidad puede expresarse cuantitativamente por medio de las características de los resultados.

2.1.6. **Condiciones de experimentación [7]**

Variación de temperatura y humedad relativa en el lugar del ensayo. Estas variaciones no deben ser muy elevadas por el sistema de medición a tratar.

2.1.7. **Error de paralaje [4]**

Es un error sistemático personal que se debe cuando uno no mira perpendicularmente la escala del instrumento que se está usando.

2.1.8. **Mojabilidad [8]**

Es la capacidad que tiene un líquido de extenderse y dejar una traza sobre un sólido. Depende de las interacciones intermoleculares entre las moléculas superficiales de ambas sustancias. Se puede determinar a partir del ángulo que el líquido forma en la superficie de contacto con el sólido, denominado ángulo de contacto; a menor ángulo de contacto, mayor mojabilidad.

2.1.9. Clase de exactitud [2]

Grado de concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero del mensurando.

2.1.10. Gravedad específica (GE) [9]

La gravedad específica es una comparación de la densidad de una sustancia con la densidad del agua. La gravedad específica es adimensional y numéricamente coincide con la densidad de la sustancia.

$$GE = \rho_{\text{sustancia}} / \rho_{\text{agua}}$$

2.1.11. Factor de cobertura [2]

Factor numérico utilizado como multiplicador de la incertidumbre típica combinada, para obtener una incertidumbre expandida.

2.1.12. Presión en un líquido [10]

La presión en el interior de un líquido queda determinada por el peso que ejerce la columna del propio líquido. Si la profundidad viene determinada por h y la densidad por ρ , la presión ejercida por el líquido es:

$$P = \rho g h$$

Donde:

g = es la aceleración de la gravedad.

Si el líquido está en contacto con el aire debemos tener en cuenta la presión que ejerce la atmósfera, P_a :

$$P = P_a + \rho g h$$

2.2. Determinación del sistema de medición

Utilizaremos los conceptos previos para elaborar la ecuación que nos indicará con mejor detalle la dependencia de los valores encontramos durante los ensayos a realizar para ello se tiene el siguiente diseño esquemático mostrado en la figura N° 2:

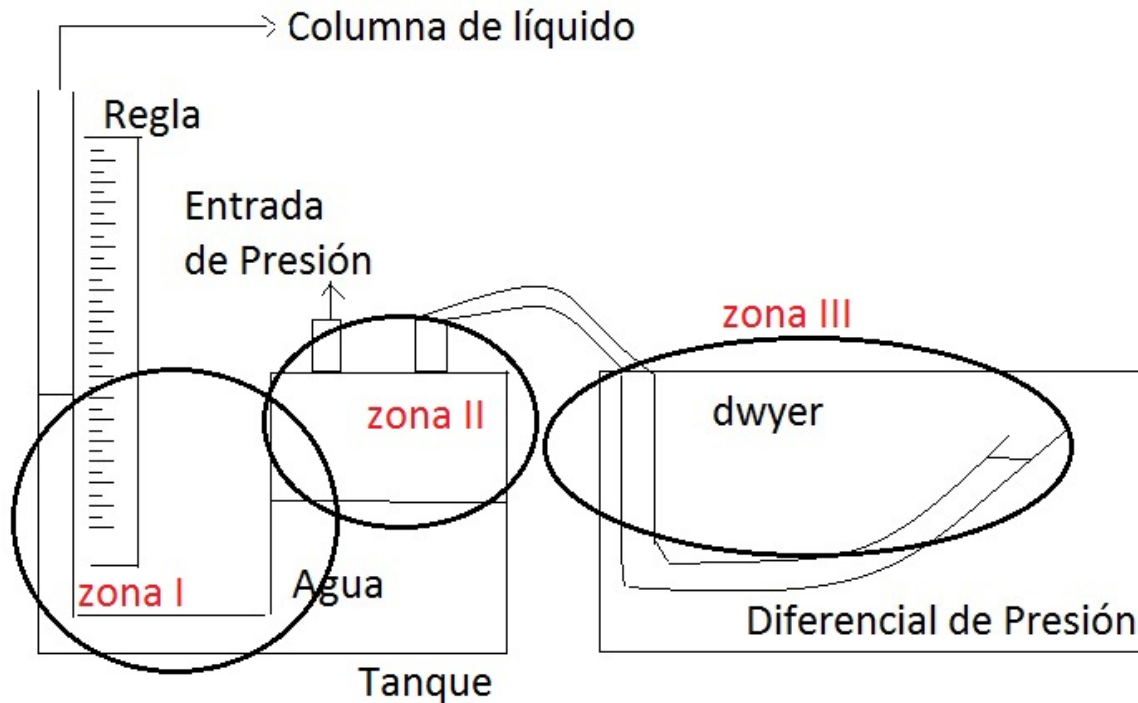


Figura 2. Diseño esquemático del sistema de medición

De acuerdo a la figura se reconocen tres zonas que se van a evaluar con mejor detalle:

2.2.1. Determinación de la presión en el patrón

Esta zona es determinada entre el tanque y la columna de agua, al generar presión en el tanque el nivel de líquido (agua) sufre una elevación quedando determinada su altura por el valor en el reglaje de la columna de líquido mediante la siguiente ecuación:

$$P_{\text{Patrón}} = P_a + \rho_{\text{agua}} g h_{\text{Patrón}} \quad (1)$$

2.2.2. Determinación de la presión en el equipo examinado

Esta zona es determinada entre el tanque y la columna de aceite por el equipo examinado, al generar presión en el tanque el nivel de aceite sufre una elevación quedando determinada por su altura en el valor en el reglaje que se visualiza en el equipo mediante la siguiente ecuación:

$$P_{\text{Equipo}} = P_a + \rho_{\text{aceite}} g h_{\text{Equipo}} \quad (2)$$

2.2.3. Determinación de presión en el tanque transitorio

Esta zona es donde se transfieren la presión ejercida por la bomba generadora de presión distribuyendo tanto para la zona del patrón como para la zona del equipo examinado. La presión generada va ser igual a las presiones que fueron distribuidas para las dos zonas mediante:

$$P_{\text{Patrón}} = P_{\text{Generado}} = P_{\text{Equipo}} \quad (3)$$

2.2.4. Relación de alturas entre los equipos patrón y diferencial de presión

De acuerdo a la relación (3) encontrada, utilizaremos la relación (1) y (2) para finalmente encontrar:

$$P_a + \rho_{\text{agua}} g h_{\text{Patrón}} = P_a + \rho_{\text{aceite}} g h_{\text{Equipo}}$$

$$h_{\text{Patrón}} = \left(\frac{\rho_{\text{aceite}}}{\rho_{\text{agua}}} \right) h_{\text{Equipo}}$$

Sea la gravedad específica GE, finalmente:

$$h_{\text{Patrón}} = GE h_{\text{Equipo}} \quad (4)$$

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

3.1. Consideraciones Generales

Se debe tomar en cuenta que las posiciones iniciales tanto de nuestro patrón como el equipo a examinar deben estar en su marca de cero “0”. Las conexiones deberán efectuarse de tal manera que no se presenten fugas del fluido utilizado como medio de presión. Una forma de cerciorarse que se está produciendo fuga del fluido utilizado como medio de presión, es generar una presión determinada (comprendida entre los límites del equipo examinado) y revisar si la indicación de la presión generada se mantiene constante, de producirse un continuo descenso en dicha indicación, quiere decir que las conexiones no se encuentran selladas herméticamente.

Se anotaran los datos y observaciones concernientes a la experimentación, se efectuará en no menos de cinco valores de presión incluyendo los límites inferior y superior del medidor de presión diferencial.

Se debe considerar también las condiciones ambientales que durante este proceso la variación de temperatura no será mayor a 2 °C. Por lo menos debe estar instalado unas tres horas antes el sistema de medición con el equipo diferencial de presión para que la temperatura de los líquidos sea térmicamente estable.

Se utilizarán accesorios para la interconexión de los equipos capaces de soportar las presiones generadas. Además deben ser compatibles con el fluido utilizado.

Es importante que la columna de agua esté debidamente alineada para evitar problemas de paralaje u otros, además que el diferencial de presión debe estar ubicado sobre una mesa debidamente nivelada.

3.2. Consideración para el instrumento patrón

El instrumento patrón se seleccionara de acuerdo a los siguientes criterios:

- a. La clase de exactitud del instrumento patrón debe ser cuatro (4) veces mejor que el instrumento que se va a calibrar.
- b. El alcance de indicación del instrumento patrón debe ser mayor o igual que el equipo examinado.

- c. El valor de división de escala o resolución del instrumento patrón debe ser menor o igual al valor de división de escala del instrumento a calibrar.

3.3. Proceso de experimentación

Una vez tomadas las consideraciones anteriores se empieza el proceso experimental de los equipos, tomando en cuenta que la referencia experimental es el diferencial de presión donde usa en el interior de su columna de indicación graduada el líquido aceite, se arma el sistema de medición de la siguiente manera:

- a. Seleccionado el instrumento que será nuestro patrón a partir de ahora sería la columna de agua con una regla graduada y montada el generador de presión.
- b. Se monta en el sistema de medición el equipo diferencial de presión, tal como se muestra en la figura 3.

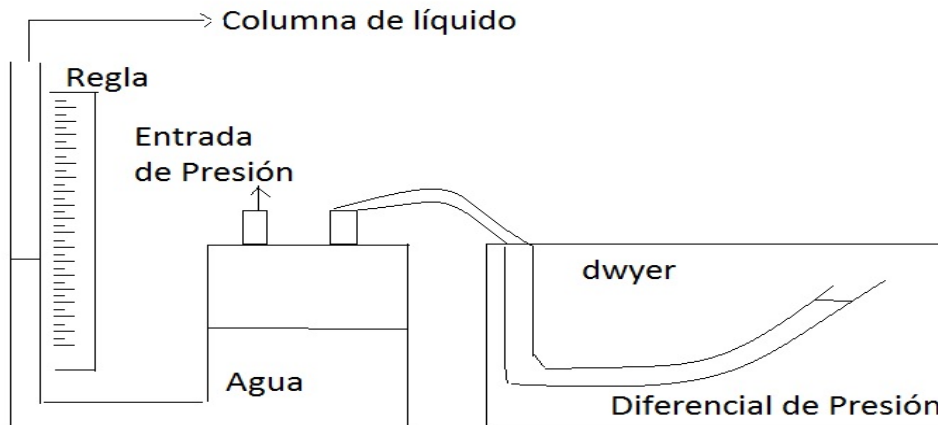


Figura 3. Distribución de los equipos experimentales

- c. Verificar que los líquidos se encuentren en la posición correspondiente a la indicación cero tanto en el instrumento patrón como en el equipo diferencial de presión.
- d. Ajustar en cero si es necesario, de manera que no exista diferencia de niveles que generen presión adicional.
- e. Dejar el extremo de la columna de líquido (agua) al aire libre y el equipo diferencial de presión dejarlo de la misma manera para evitar compresiones de modo que se encuentre sometido únicamente a la presión atmosférica.

- f. Generar presión hasta alcanzar el valor máximo de indicación en el equipo diferencial de presión, esperar 5 minutos. De esta manera se observará si existen fugas.
- g. Regresar a cero teniendo en cuenta lo establecido en los puntos anteriores.
- h. Esperar unos 5 minutos antes de empezar con el proceso de experimentación ya que los líquidos usados deben descender completamente.
- i. Nuestros puntos a evaluar serán 0.1; 0.2; 0.3; 0.5; 1; 2; 3 pulgadas de columna de agua para mayor comodidad estos puntos son acorde al equipo diferencial de presión.
- j. Se van anotar las presiones en ascenso y las presiones en descenso. Se empezará con el ascenso y finalmente se hará el descenso correspondiente.
- k. Generar presión con suavidad hasta alcanzar el primer valor de presión seleccionado.
- l. Esperar que estabilice el líquido si en caso se superó la lectura en el primer valor y anotar.
- m. Avanzar hasta el siguiente punto de presión tomando en cuenta que cada punto se debe esperar unos segundos para que el líquido se estabilice si en caso se superó la lectura al generar la presión y anotar (prueba en ascenso).
- n. Al llegar al punto de presión máxima esperar un minuto permaneciendo el sistema en dicho valor, ir disminuyendo la presión (prueba en descenso) hasta conseguir los mismos puntos de presión de la prueba de ascenso, registrar las lecturas.
- o. El descenso de la presión será lento y se efectuara hasta el punto seleccionado, tener la precaución de no descender por debajo de este.
- p. El proceso de experimentación termina cuando ambos instrumentos tanto patrón como el diferencial de presión llegan a la indicación cero (0) nuevamente.
- q. La indicación cero indica que no existe presión en el sistema y en un periodo no mayor a 5 minutos.
- r. Repetir el ensayo 5 veces desde el paso “g” y anotar cada uno de estos ensayos.
- s. Una vez culminado desmontar los equipos del sistema de medición con la debida precaución.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Resultados obtenidos en el equipo examinado

Se realizaron cinco ensayos para la experiencia de acuerdo al procedimiento explicado anteriormente:

Tabla 1. Primer ensayo del sistema de medición

Indicación Presión Diferencial		Indicación Columna de Agua Patrón		
(in H ₂ O)	Incert (in H ₂ O)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	Incert (cm)
0,00	±0,01	0,00	0,03	± 0,01
0,10	±0,01	0,14	0,18	± 0,01
0,20	±0,01	0,34	0,39	± 0,01
0,30	±0,05	0,61	0,63	± 0,01
0,50	±0,05	1,02	1,04	± 0,01
1,0	±0,1	2,05	2,07	± 0,01
2,0	±0,1	4,11	4,18	± 0,01
3,0	±0,1	6,23	6,23	± 0,01

Tabla 2. Segundo ensayo del sistema de medición

Indicación Presión Diferencial		Indicación Columna de Agua Patrón		
(in H ₂ O)	Incert (in H ₂ O)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	Incert (cm)
0,00	±0,01	0,00	0,02	± 0,01
0,10	±0,01	0,15	0,17	± 0,01
0,20	±0,01	0,35	0,37	± 0,01
0,30	±0,05	0,61	0,62	± 0,01
0,50	±0,05	1,03	1,03	± 0,01
1,0	±0,1	2,07	2,08	± 0,01
2,0	±0,1	4,11	4,19	± 0,01
3,0	±0,1	6,22	6,22	± 0,01

Tabla 3. Tercer ensayo del sistema de medición

Indicación Presión Diferencial		Indicación Columna de Agua Patrón		
(in H ₂ O)	Incert (in H ₂ O)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	Incert (cm)
0,00	±0,01	0,00	0,01	± 0,01
0,10	±0,01	0,16	0,18	± 0,01
0,20	±0,01	0,36	0,36	± 0,01
0,30	±0,05	0,62	0,63	± 0,01
0,50	±0,05	1,02	1,05	± 0,01
1,0	±0,1	2,05	2,08	± 0,01
2,0	±0,1	4,13	4,19	± 0,01
3,0	±0,1	6,23	6,23	± 0,01

Tabla 4. Cuarto ensayo del sistema de medición

Indicación Presión Diferencial		Indicación Columna de Agua Patrón		
(in H ₂ O)	Incert (in H ₂ O)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	Incert (cm)
0,00	±0,01	0,00	0,04	± 0,01
0,10	±0,01	0,17	0,20	± 0,01
0,20	±0,01	0,35	0,36	± 0,01
0,30	±0,05	0,62	0,61	± 0,01
0,50	±0,05	1,02	1,04	± 0,01
1,0	±0,1	2,07	2,09	± 0,01
2,0	±0,1	4,11	4,21	± 0,01
3,0	±0,1	6,24	6,24	± 0,01

Tabla 5. Quinto ensayo del sistema de medición

Indicación Presión Diferencial		Indicación Columna de Agua Patrón		
(in H ₂ O)	Incert (in H ₂ O)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	Incert (cm)
0,00	0,01	0,00	0,00	± 0,01
0,10	0,01	0,17	0,21	± 0,01
0,20	0,01	0,34	0,38	± 0,01
0,30	0,05	0,61	0,64	± 0,01
0,50	0,05	1,00	1,06	± 0,01
1,0	0,1	2,03	2,10	± 0,01
2,0	0,1	4,09	4,18	± 0,01
3,0	0,1	6,20	6,20	± 0,01

Parte de los resultados obtenidos esta comprobar si la ecuación (4) está próxima a los resultados reales, es por ello que se grafica los puntos diferenciales:

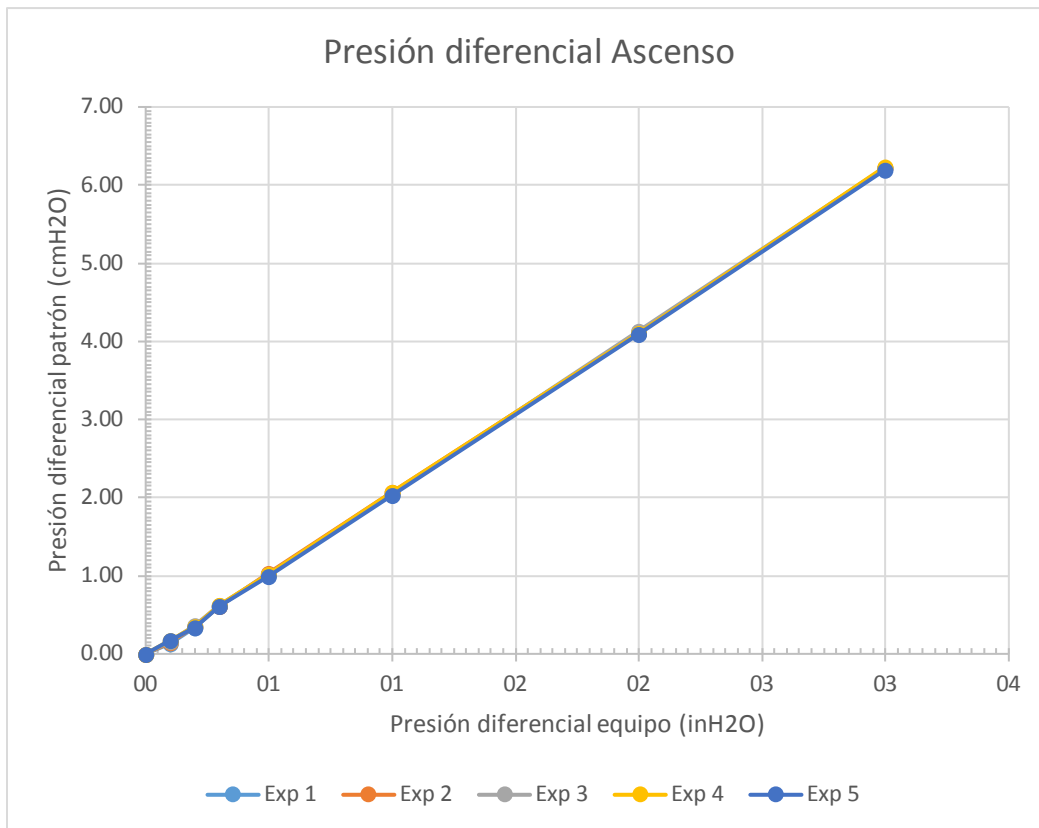


Figura 4. Presión diferencial de los cinco ensayos la parte ascendente

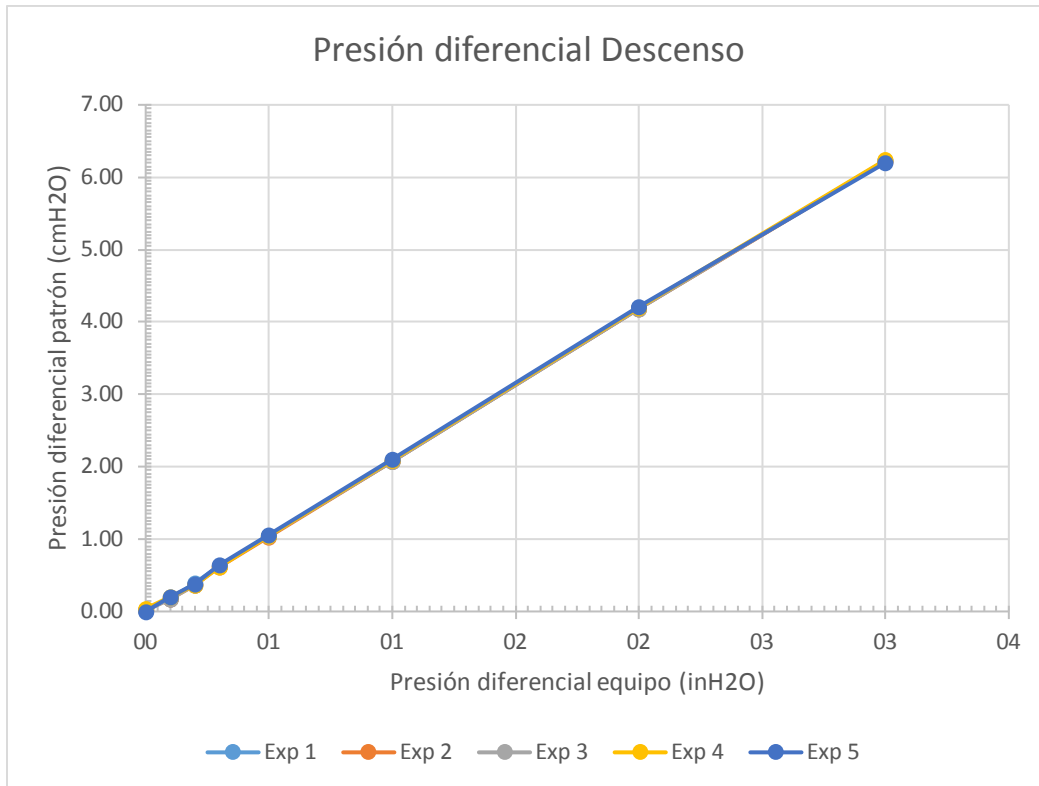


Figura 5. Presión diferencial de los cinco ensayos la parte descendente

Las figuras 4 y 5 representan la relación lineal que existe entre el equipo diferencial de presión y el equipo patrón de acuerdo a la ecuación 4.

La figura 4 es la representación de los resultados obtenidos en el proceso experimental cuando se aplica presión en forma ascendente.

La figura 5 es la representación de los resultados obtenidos en el proceso experimental cuando luego de esperar unos minutos en la presión máxima se empieza el proceso descendente de presión.

CAPÍTULO 5

DISCUSION

5.1. Cálculo de la clase de exactitud

Se determinará la clase de exactitud del instrumento patrón y el equipo diferencial de presión de acuerdo al Anexo 2 de su base teórica estimada.

5.1.1. Clase de exactitud del instrumento patrón

Alcance = 100 cm

División mínima = 1 mm

Partes que se pueda dividir = 10

$$Clase = \frac{(0.1/10)}{100} \times 100$$

$$Clase = 0.01$$

5.1.2. Clase de exactitud del equipo diferencial de presión

Alcance = 3 in H₂O

División mínima = 0.01 in H₂O

$$Clase = \frac{0.01}{3} \times 100 = 0.33$$

$$Clase = 0.33$$

Por lo tanto la clase de exactitud de patrón es 33 veces mejor que el equipo diferencial de presión.

Cumple con el requisito de la clase de exactitud del patrón es cuatro veces menor que el equipo diferencial de presión.

5.2. Cálculo de errores

Se determinará los errores de acuerdo al anexo 3 de acuerdo a su base teórica.

Determinamos el Error Máximo Permisible (emp) del equipo para ello utilizaremos el Anexo 3, sabemos que:

Alcance máx. = 3 in H₂O

De lo calculado en 5.1 utilizamos que la clase del diferencial de presión es 0.33

$$emp = \frac{3}{100} \times 0.33 = 0,0099 \text{ inH}_2\text{O}$$

$$emp = 0,25 \text{ cm H}_2\text{O}$$

✓ Para el primer ensayo tenemos:

Tabla 6. Procesamiento de datos en el primer ensayo del sistema de medición

RESULTADO DE LA EXPERIENCIA						
Indicación Presión Diferencial		Indicación Columna de Agua Patrón		Error de Indicación		Error de Histéresis
(in H ₂ O)	(cm)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	(cm)
0,0	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,02	-0,02
0,1	0,25	0,14	0,18	0,07	0,03	-0,04
0,2	0,51	0,34	0,39	0,08	0,03	-0,05
0,3	0,76	0,61	0,63	0,02	0,00	-0,02
0,5	1,27	1,02	1,04	0,03	0,01	-0,02
1	2,5	2,05	2,07	0,05	0,03	-0,02
2	5,1	4,11	4,18	0,09	0,02	-0,07
3	7,6	6,23	6,23	0,06	0,06	0,00

Máximo Error de Indicación = 0,09 cm H₂O

Máximo Error de Histéresis = 0,07 cm H₂O

Cumple con el requisito de que el máximo error absoluto de histéresis es menor que el error máximo absoluto de indicación.

Cumple con el requisito de que los errores absolutos de indicación y error de histéresis es menor que el Error Máximo Permitido para cada punto de diferencial de presión.

✓ Para el segundo ensayo tenemos:

Tabla 7. Procesamiento de datos en el segundo ensayo del sistema de medición

RESULTADO DE LA EXPERIENCIA						
Indicación Presión Diferencial		Indicación Columna de Agua Patrón		Error de Indicación		Error de Histéresis
(in H ₂ O)	(cm)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	
0,0	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,02	-0,02
0,1	0,25	0,15	0,17	0,06	0,04	-0,02
0,2	0,51	0,35	0,37	0,07	0,05	-0,02
0,3	0,76	0,61	0,62	0,02	0,01	-0,01
0,5	1,27	1,03	1,03	0,02	0,02	0,00
1	2,5	2,07	2,08	0,03	0,02	-0,01
2	5,1	4,11	4,19	0,09	0,01	-0,08
3	7,6	6,22	6,22	0,07	0,07	0,00

Máximo Error de Indicación = 0,09 cm H₂O

Máximo Error de Histéresis = 0,08 cm H₂O

Cumple con el requisito de que el máximo error absoluto de histéresis es menor que el error máximo absoluto de indicación.

Cumple con el requisito de que los errores absolutos de indicación y error de histéresis es menor que el Error Máximo Permitido para cada punto de diferencial de presión.

✓ Para el tercer ensayo tenemos:

Tabla 8. Procesamiento de datos en el tercer ensayo del sistema de medición

RESULTADO DE LA EXPERIENCIA						
Indicación Presión Diferencial		Indicación Columna de Agua Patrón		Error de Indicación		Error de Histéresis
(in H ₂ O)	(cm)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	
0,0	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,02	-0,02
0,1	0,25	0,16	0,18	0,05	0,03	-0,02
0,2	0,51	0,36	0,36	0,06	0,06	0,00
0,3	0,76	0,62	0,63	0,01	0,00	-0,01
0,5	1,27	1,02	1,05	0,03	0,00	-0,03
1	2,5	2,05	2,08	0,05	0,02	-0,03
2	5,1	4,13	4,19	0,07	0,01	-0,06
3	7,6	6,23	6,23	0,06	0,06	0,00

Máximo Error de Indicación = 0,07 cm H₂O

Máximo Error de Histéresis = 0,06 cm H₂O

Cumple con el requisito de que el máximo error absoluto de histéresis es menor que el error máximo absoluto de indicación.

Cumple con el requisito de que los errores absolutos de indicación y error de histéresis es menor que el Error Máximo Permitido para cada punto de diferencial de presión.

✓ Para el cuarto ensayo tenemos:

Tabla 9. Procesamiento de datos en el cuarto ensayo del sistema de medición

RESULTADO DE LA EXPERIENCIA						
Indicación Presión Diferencial		Indicación Columna de Agua Patrón		Error de Indicación		Error de Histéresis
(in H ₂ O)	(cm)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	
0,0	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,02	-0,02
0,1	0,25	0,17	0,20	0,04	0,01	-0,03
0,2	0,51	0,35	0,36	0,07	0,06	-0,01
0,3	0,76	0,62	0,61	0,01	0,02	0,01
0,5	1,27	1,02	1,04	0,03	0,01	-0,02
1	2,5	2,07	2,09	0,03	0,01	-0,02
2	5,1	4,11	4,21	0,09	0,01	-0,08
3	7,6	6,24	6,24	0,05	0,05	0,00

Máximo Error de Indicación = 0,09 cm H₂O

Máximo Error de Histéresis = 0,08 cm H₂O

Cumple con el requisito de que el máximo error absoluto de histéresis es menor que el error máximo absoluto de indicación.

Cumple con el requisito de que los errores absolutos de indicación y error de histéresis es menor que el Error Máximo Permitido para cada punto de diferencial de presión.

✓ Para el quinto ensayo tenemos:

Tabla 10. Procesamiento de datos en el quinto ensayo del sistema de medición

RESULTADO DE LA EXPERIENCIA						
Indicación Presión Diferencial		Indicación Columna de Agua Patrón		Error de Indicación		Error de Histéresis
(in H ₂ O)	(cm)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	Ascenso (cm)	Descenso (cm)	
0,0	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,02	-0,02
0,1	0,25	0,17	0,21	0,04	0,00	-0,04
0,2	0,51	0,34	0,38	0,08	0,04	-0,04
0,3	0,76	0,61	0,64	0,02	-0,01	-0,03
0,5	1,27	1,00	1,06	0,05	-0,01	-0,06
1	2,5	2,03	2,10	0,07	0,00	-0,07
2	5,1	4,09	4,18	0,11	0,02	-0,09
3	7,6	6,20	6,20	0,09	0,09	0,00

Máximo Error de Indicación = 0,11 cm H₂O

Máximo Error de Histéresis = 0,09 cm H₂O

Cumple con el requisito de que el máximo error absoluto de histéresis es menor que el error máximo absoluto de indicación.

Cumple con el requisito de que los errores absolutos de indicación y error de histéresis es menor que el Error Máximo Permitido para cada punto de diferencial de presión.

5.3. Cálculo de la incertidumbre

Se determinará el cálculo de incertidumbre de acuerdo al anexo 4 en cada punto de presión diferencial determinado en los ensayos.

Tabla 11. Presupuesto del Cálculo de la Incertidumbre en el sistema de medición

RESULTADO PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE															
Ind. Pre. Dif.	Vp	Ve	ρ_{aceite}	ρ_{agua}	$\delta_{\text{res p}}$	$\delta_{\text{res e}}$	δ_{his}	δ_{cai}	$\delta_{\text{men p}}$	$\delta_{\text{men e}}$	δ_{cero}	δ_{cos}	δ_{cert}	u_c	Unidad
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,007	0,006	0,003	0,003	0,007	0,006	0,000	0,050	0,003	cmH ₂ O
0,25	0,006	0,000	0,000	0,000	0,003	0,007	0,012	0,003	0,003	0,007	0,006	0,000	0,050	0,003	cmH ₂ O
0,51	0,004	0,000	0,000	0,000	0,003	0,007	0,014	0,003	0,003	0,007	0,006	0,000	0,050	0,003	cmH ₂ O
0,76	0,002	0,000	0,000	0,000	0,003	0,037	0,009	0,003	0,003	0,037	0,006	0,000	0,050	0,005	cmH ₂ O
1,27	0,005	0,000	0,000	0,000	0,003	0,037	0,017	0,003	0,003	0,037	0,006	0,000	0,050	0,006	cmH ₂ O
2,5	0,007	0,000	0,000	0,000	0,003	0,073	0,020	0,003	0,003	0,073	0,006	0,000	0,050	0,014	cmH ₂ O
5,1	0,006	0,000	0,000	0,000	0,003	0,073	0,035	0,003	0,003	0,073	0,006	0,000	0,050	0,015	cmH ₂ O
7,6	0,007	0,000	0,000	0,000	0,003	0,073	0,000	0,003	0,003	0,073	0,006	0,000	0,050	0,013	cmH ₂ O

De los puntos evaluados la mayor incertidumbre combinada es $u_c = 0,015 \text{ cm H}_2\text{O}$

Por lo tanto su incertidumbre expandida de la medición (U) es $0.029 \text{ cm H}_2\text{O}$

De acuerdo a los procedimientos de calibración que se está tomando como referencia la incertidumbre debe ser un tercio del error máximo permisible como máximo o sea:

$$U \leq 1/3 \text{ e.m.p.}$$

Cumple con el requisito declarado y el sistema de medición es suficiente para este tipo de equipos diferenciales de presión.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

- ✓ Se concluye que el instrumento patrón cumple con las normas técnicas peruanas estipuladas en los anexos 3 para un equipo de presión diferencial de rango -0,05 a 3,00 pulgadas de columna de agua.
- ✓ El sistema elaborado tiene como incertidumbre combinada 0,011 cm H₂O y su alcance máximo es mayor al diferencial de presión.
- ✓ Los errores máximos absolutos de histéresis son menores que los errores máximos de indicación debido a la buena estabilidad del sistema de medición.
- ✓ El error máximo permisible que tiene el equipo diferencial es de $\pm 0,25$ cm H₂O.
- ✓ Los errores encontrados tanto el máximo absoluto de indicación como el máximo absoluto de histéresis es menor que el error permisible.
- ✓ La incertidumbre combinada es de 0,022 cm H₂O para un nivel de confiabilidad de 95% tomando como factor de cobertura $k=2$.
- ✓ La incertidumbre combinada es menor a un tercio que el error máximo permisible acorde a las normativas peruanas vigentes y es el requisito mínimo necesario para este equipo diferencial de presión.
- ✓ El planteamiento de los pasos propuestos en el informe es una alternativa para poder utilizarlo como procedimiento de calibración para los equipos diferenciales de presión.

REFERENCIAS

- [1] a) Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO 1995
b) Versión traducida al español: J. M.Figueroa, Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones, CNM-MED-PT-002, CENAM 1997.
- [2] INDECOPI. “Procedimiento de calibración de manómetros, vacuómetros y manovacuumetros de trabajo de deformación elástica”. Ed. 1 Junio, 2000.
- [3] INDECOPI. “Procedimiento de calibración para material volumétrico de vidrio”. Ed. 4 Diciembre, 2010.
- [4] INDECOPI. “Procedimiento de calibración para comparador de cuadrante”. Ed. 2 Diciembre, 2001.
- [5] CEM. “Transductores de presión con salida eléctrica” Ed. 1. 1998
- [6] INDECOPI. “Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición”. Ed. 2 Diciembre, 2001.
- [7] INDECOPI. “Procedimiento de calibración para termómetro digitales”. Ed. 2 Diciembre, 2007.
- [8] <https://es.wikipedia.org/wiki/Mojabilidad> (consultado 05/09/15)
- [9] http://enciclopedia_universal.esacademic.com/18588/Gravedad_específica (consultado 05/09/15)
- [10] Robert L. Mott. Mecanica de fluidos aplicada. Edición 4. Pag. 12 – 17.
- [11] OIML R101 “Indicating and recording pressure gauges, vacuum gauges and pressure-vacuum gauges with elastic sensing elements” Edición 1991.

ANEXOS

Anexo 1: Cuando se utiliza agua u otro líquido humectante

Anexo 2: Determinación de la clase de exactitud

Anexo 3: Determinación de errores

Anexo 4: Cálculo de Incertidumbres

Anexo 5: Determinación de la densidad del agua y su incertidumbre

Anexo 6: Determinación de la densidad del aceite y su incertidumbre

Anexo 1: Cuando se utiliza agua u otro líquido humectante[3]

En todos los aparatos donde el volumen es definido por un menisco de agua. La lectura o ajuste se hace en el punto más bajo del menisco. Para observar el punto más bajo del menisco, es de gran ayuda colocar una sombra de algún material oscuro inmediatamente debajo del menisco, lo cual aclara su perfil haciéndolo más nítido y claramente visible contra un fondo de luz. Este puede lograrse, por ejemplo, colocando una tira de papel negro alrededor del recipiente a no más de 1 mm debajo del nivel de ajuste.

El menisco debe ser ajustado de tal modo que el plano de borde superior de la línea de graduación sea horizontalmente tangente al punto más bajo del menisco. Esta posición del menisco se obtiene haciendo el ajuste en el centro de la elipse formada por la parte delantera y posterior de la línea de graduación y que se observa cuando la línea visual del observador está ligeramente debajo del plano de la línea de graduación.

El ajuste es más exacto, si al ir elevando el plano visual y estrechase la elipse, el punto más bajo del menisco se mantiene al centro entre las porciones delantera y posterior de la línea de graduación. Por este método es posible observar la aproximación del menisco desde arriba o debajo de la línea de graduación para su correcto ajuste.

En recipientes que tienen líneas de graduación solo por delante, el error por paralaje puede volverse insignificante al hacer un ajuste en el borde superior de la línea utilizando la tira de papel negro, teniendo cuidado de que el borde superior de esta se encuentre en un plano

horizontal. En este caso el ojo debe ser colocado de modo que las partes delantera y posterior del borde superior parezcan ser coincidentes.

Para instrumentos volumétricos ajustados con una franja de Schellbach, la lectura debe realizarse a la altura del punto de contacto de las dos puntas de la flecha creadas por la distorsión del menisco debido a la franja oscura grabada en la parte trasera de la escala.

Anexo 2: Determinación de la clase de exactitud [2]

En los instrumentos que no tengan indicada su clase de exactitud, su error absoluto máximo permisible se determina en función del valor de su división mínima y de su alcance.

$$Clase = \frac{Div. Escala}{Alcance máx.} \times 100$$

Sabiendo la clase podemos determinar el Error Máximo Permisible (emp) dado por:

$$emp = \frac{Alcance máx. * Clase}{100}$$

Donde:

emp = Error Máximo Permisible

Alcance máx. = Alcance máximo del equipo diferencial de presión

Clase = Exactitud del equipo diferencial de presión

Según la OIML R101 inciso 9.1 menciona que el error máximo permisible del equipo usado para verificar no debe exceder un cuarto del error máximo permisible del instrumento a verificar.

Anexo 3: Determinación de errores [2]

La determinación del error de indicación de acuerdo a la ecuación (4) finalmente se obtiene lo siguiente:

$$\text{Error de Indicación} = (GE)\text{Valor Equipo Diferencial} - \text{Valor Patrón}$$

La determinación del error de histéresis viene del resultado:

$$\text{Error de Histéresis} = \text{Lectura Descenso} - \text{Lectura Ascenso}$$

Según la OIML R101 inciso 4.1.1 menciona que el error absoluto máximo de indicación y error de histéresis, para cualquier valor de presión tanto en ascenso como en descenso, no debe exceder el error máximo permisible (emp).

Según la OIML R101 inciso 4.1.2 menciona que el error de histéresis, no debe sobrepasar los errores absolutos máximos de indicación.

Anexo 4: Cálculo de Incertidumbres

El cálculo de incertidumbres se realizará aplicando los criterios establecidos en la Guía para la expresión de la Incertidumbre de Medida editada por el Centro Español de Metrología [1] y la guía EA-4/02 “Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration” [1].

A continuación se desarrolla el cálculo de incertidumbre para una presión de línea determinada, para las demás presiones de línea habrá que proceder de la misma manera

La corrección que se tendría que asignar al equipo diferencial de presión es:

$$C = V_p - V_e (GE) + \delta_{res\ p} + \delta_{res\ e} + \delta_{his} + \delta_{cai} + \delta_{men\ p} + \delta_{men\ e} + \delta_{cero} + \delta_{coseno} + \delta_{cert}$$

$$C = V_p - V_e (\rho_{aceite} / \rho_{agua}) + \delta_{res\ p} + \delta_{res\ e} + \delta_{his} + \delta_{cai} + \delta_{men\ p} + \delta_{men\ e} + \delta_{cero} + \delta_{coseno} + \delta_{cert}$$

Donde:

V_p = lectura del instrumento patrón

V_e = lectura del instrumento diferencia de presión

ρ_{aceite} = densidad del aceite

ρ_{agua} = densidad del agua

$\delta_{\text{res p}}$ = corrección por resolución del instrumento patrón

$\delta_{\text{res e}}$ = corrección por resolución del diferencial de presión

δ_{his} = corrección debida a la histéresis

δ_{cai} = corrección debida a las condiciones ambientales del manómetro diferencial

$\delta_{\text{men p}}$ = corrección del menisco en el instrumento patrón

$\delta_{\text{men e}}$ = corrección del menisco en el diferencial de presión

δ_{cero} = corrección debido a la estabilidad del cero

δ_{coseno} = corrección al posible error de coseno

δ_{cert} = contribución por certificado de calibración de la regla patrón

Entonces la relación funcional a partir de la cual se expresará el cálculo de la incertidumbre de la corrección estará dada por:

$$C = f(V_p, V_e, \rho_{\text{aceite}}, \rho_{\text{agua}}, \delta_{\text{res p}}, \delta_{\text{res e}}, \delta_{\text{his}}, \delta_{\text{cai}}, \delta_{\text{men p}}, \delta_{\text{men e}}, \delta_{\text{cero}}, \delta_{\text{coseno}}, \delta_{\text{cert}}) \quad (1)$$

A partir de (1) tenemos que la incertidumbre estándar combinada $u_c(C)$ de la corrección está dada por la Ley de Propagación de Incertidumbre:

$$u_c^2(C) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N c_i^2 * u^2(x_i) \quad (2)$$

Donde:

$c_i = \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]$: Coeficientes de sensibilidad

x_i : Magnitudes de influencia (V_P , V_E , ρ_{aceite} , ρ_{agua} , δ_{res} , δ_{his} , δ_{cai} , $\delta_{menisco}$, δ_{cero} , δ_{coseno} , δ_{cert})

$u(x_i)$: Incertidumbre estándar de la estimación de la magnitud de influencia x_i

N : Número de magnitudes de influencia (en este caso N=13)

Desarrollando (2) tenemos:

$$\begin{aligned}
 u_c^2(C) = & \left[\frac{\partial f}{\partial V_P} \right]^2 u^2(V_P) + \left[\frac{\partial f}{\partial V_E} \right]^2 u^2(V_E) + \left[\frac{\partial f}{\partial \rho_{aceite}} \right]^2 u^2(\rho_{aceite}) + \left[\frac{\partial f}{\partial \rho_{agua}} \right]^2 u^2(\rho_{agua}) + \\
 & \left[\frac{\partial f}{\partial \delta_{res\ p}} \right]^2 u^2(\delta_{res\ p}) + \left[\frac{\partial f}{\partial \delta_{res\ e}} \right]^2 u^2(\delta_{res\ e}) + \left[\frac{\partial f}{\partial \delta_{his}} \right]^2 u^2(\delta_{his}) + \left[\frac{\partial f}{\partial \delta_{cai}} \right]^2 u^2(\delta_{cai}) + \\
 & \left[\frac{\partial f}{\partial \delta_{men\ p}} \right]^2 u^2(\delta_{men\ p}) + \left[\frac{\partial f}{\partial \delta_{men\ e}} \right]^2 u^2(\delta_{men\ e}) + \left[\frac{\partial f}{\partial \delta_{cero}} \right]^2 u^2(\delta_{cero}) + \\
 & \left[\frac{\partial f}{\partial \delta_{coseno}} \right]^2 u^2(\delta_{coseno}) + u^2(\delta_{cert})
 \end{aligned} \quad (3)$$

Expresando la relación (3) en forma simplificada se tiene:

$$u_c^2(C) = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2 + u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2 \quad (4)$$

La incertidumbre expandida U, de la desviación encontrada estará dada por:

$$U = k * \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2 + u_{10}^2 + u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2} \quad (5)$$

Donde:

$k = 2$, factor de cobertura tomando para un nivel de confianza de aproximadamente 95%

A continuación se determinarán cada uno de los términos de incertidumbre mostrados en (4):

1. Debido a la repetibilidad del instrumento patrón [6]

Aplicando las propiedades de derivadas parciales para el cálculo de c_1 y considerando una distribución de probabilidad normal para la incertidumbre estándar por repetibilidad, se obtiene:

$$u_1 = |c_1|u(V_p) = 1 * \frac{s}{\sqrt{N}}$$

Donde:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_p - \overline{V_p})^2}$$

s = desviación estándar experimental de la muestra

N = número de mediciones realizadas

2. Debido a la repetibilidad del equipo diferencial de presión [6]

Aplicando las propiedades de derivadas parciales para el cálculo de c_2 y considerando una distribución de probabilidad normal para la incertidumbre estándar por repetibilidad, se obtiene:

$$u_2 = |c_2|u(V_E) = 1 * \frac{s}{\sqrt{N}}$$

Donde:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_e - \overline{V_e})^2}$$

s = desviación estándar experimental de la muestra

N = número de mediciones realizadas

3. Debido a la densidad del aceite

Aplicando derivadas parciales con respecto a ρ_{agua} se obtiene:

$$u_3 = |c_3|u(\rho_{\text{aceite}}) = \left| \frac{V_e}{\rho_{\text{agua}}} \right| u(\rho_{\text{aceite}})$$

Donde:

$u(\rho_{\text{aceite}})$ = incertidumbre estándar de la determinación de la densidad del aceite.

Su valor se puede tomar del anexo 6.

4. Debido a la densidad del agua (ρ_{agua}) [3]

Aplicando derivadas parciales con respecto a ρ_{agua} se obtiene:

$$u_4 = |c_4|u(\rho_{\text{agua}}) = \left| V_e \left(\frac{\rho_{\text{aceite}}}{\rho_{\text{agua}}^2} \right) \right| u(\rho_{\text{agua}})$$

Donde:

$u(\rho_{\text{agua}})$ = incertidumbre estándar de la determinación de la densidad del agua. Su

valor se puede tomar del anexo 5.

5. Debido a la resolución del instrumento patrón [6]

Una de las fuentes de incertidumbre de un instrumento es la resolución de su dispositivo indicador. Si la resolución del dispositivo indicador es δ_{res} sabiendo que podemos dividir entre cada intervalo en “m” partes, el valor de la señal de entrada que produce una indicación dada X puede situarse con igual probabilidad en cualquier punto dentro del intervalo que va desde $(x-\delta_{\text{res}}/m)$ a $(x+\delta_{\text{res}}/m)$. La señal de entrada puede describirse por medio de una distribución rectangular del rango δ_{res}/m y varianza $u(\delta_{\text{res}})^2 = (\delta_{\text{res}}/m)^2 / 12$, lo que supone una incertidumbre típica para cualquier indicación de:

$$u_5 = |c_5|u(\delta_{\text{res}} p) = 1 * \frac{\delta_{\text{res}} p}{2m\sqrt{3}}$$

Donde:

$\delta_{\text{res}} p$ = división de escala del instrumento patrón

m = número de partes que se puede dividir $\delta_{\text{res}} p$

6. Debido a la resolución del diferencial de presión [6]

Si la resolución del diferencial de presión es δ_{res} sabiendo que podemos dividir entre cada intervalo en “m” partes, el valor de la señal de entrada que produce una indicación dada X puede situarse con igual probabilidad en cualquier punto dentro del intervalo que va desde $(x-\delta_{res}/m)$ a $(x+\delta_{res}/m)$. La señal de entrada puede describirse por medio de una distribución rectangular del rango δ_{res}/m y varianza $u(\delta_{res})^2 = (\delta_{res}/m)^2 / 12$, lo que supone una incertidumbre típica para cualquier indicación de:

$$u_6 = |c_6|u(\delta_{res} e) = 1 * \frac{\delta_{res} e}{2m\sqrt{3}}$$

Donde:

$\delta_{res} e$ = división de escala del instrumento patrón

m = número de partes que se puede dividir $\delta_{res} e$

7. Debido a la histéresis [2]

La indicación del manómetro diferencial puede diferir en una cierta magnitud fija y conocida dependiendo de la dirección de lecturas son alcanzadas incrementando presión o disminuyendo. Se debe de tomar nota de la dirección en la que se realizan las lecturas. Sin embargo, la dirección de la histéresis no siempre es observable: pueden existir oscilaciones ocultas en el instrumento alrededor de un punto de equilibrio, de tal manera que la lectura depende de la dirección desde la que se realiza la aproximación a este punto. Si el intervalo de posibles lecturas originado por este motivo es δ_{his} , la varianza es $u(\delta_{his})^2 = (\delta_{his})^2 / 12$, lo que supone una incertidumbre típica debida a la histéris es:

$$u_7 = |c_7|u(\delta_{his}) = 1 * \frac{\delta_{his}}{2\sqrt{3}}$$

Donde:

δ_{his} = diferencia máxima, en valor absoluto entre los valores obtenidos incrementando y disminuyendo la presión.

8. Debido a las condiciones ambientales[5]

Los manómetros diferenciales sufren variaciones en su indicación debido a la variación de temperatura δT . La corrección debido a esta variación es difícil ya que no responden a un fenómeno físico como pudiera ser una dilatación, por consiguiente tiene que ser incluida como una componente de incertidumbre.

Normalmente el operario no puede obtener datos del comportamiento del manómetro diferencial con la temperatura por lo que tiene que utilizar las especificaciones del fabricante.

Los fabricantes suelen especificar el comportamiento de los manómetros diferenciales con la temperatura como un porcentaje, respecto de la indicación o del fondo de escala del manómetro diferencial, de la variación de la presión respecto a la variación de temperatura $\delta P/^\circ C$.

En este caso el intervalo de posibles lecturas es $(\delta P/^\circ C)(Vp/100)\delta T$, la varianza es nuevamente $u(\delta cai)^2 = ((\delta P/^\circ C)(Vp/100)\delta T)^2 / 12$ y la incertidumbre típica debida a las condiciones ambientales será:

$$u_8 = |c_8|u(\delta cai) = 1 * \frac{(\delta P/^\circ C)(Vp/100) \delta T}{2\sqrt{3}}$$

9. Debido a la lectura del menisco en el instrumento patrón [3]

Aplicando las propiedades de derivadas parciales para el cálculo de c_9 y considerando una distribución de probabilidad rectangular para la incertidumbre estándar, se obtiene:

$$u_9 = |c_9|u(\delta men p) = 1 * \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Donde:

a: semiancho de una distribución rectangular de valores posibles en la lectura del menisco (ver sección 4.3.7 de “Guía para la expresión de la Incertidumbre en la Medición”)

El valor de “a” se puede determinar midiendo el menor volumen agregado o retirado necesario para que el cambio en la lectura sea detectable visiblemente.

También puede estimarse como una fracción de una división de escala para el instrumento patrón graduado.

El valor raíz de 3 puede cambiarse por la raíz de 6 (distribución triangular) si se considera que hay mayor probabilidad de que el menisco esté más al centro que hacia los extremos del intervalo de duda.

10. Debido a la lectura del menisco en el diferencial de presión [3]

Aplicando las propiedades de derivadas parciales para el cálculo de c_{10} se obtiene:

$$u_{10} = |c_{10}|u(\delta men e) = 1 * \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Donde:

a: semiancho de una distribución rectangular de valores posibles en la lectura del menisco (ver sección 4.3.7 de “Guía para la expresión de la Incertidumbre en la Medición”)

El valor de “a” se puede determinar midiendo el menor volumen agregado o retirado necesario para que el cambio en la lectura sea detectable visiblemente. También puede estimarse como una fracción de una división de escala para el instrumento patrón graduado.

El valor raíz de 3 puede cambiarse por la raíz de 6 (distribución triangular) si se considera que hay mayor probabilidad de que el menisco esté más al centro que hacia los extremos del intervalo de duda.

11. Debido a la estabilidad del cero [2]

Durante el proceso de experimentación se ha tratado de mantener el valor de presión estable utilizando fluctuaciones de presión ascendente y descendente ligeras. Pues bien, la diferencia de indicación entre los patrones de referencia en el momento de hacer el cero, puede diferir de cero al final de una serie de medida. Si el intervalo de posibles diferencias de cero es δ_{cero} , la varianza es nuevamente $u(\delta_{cero})^2 = (\delta_{cero})^2 / 12$ y la incertidumbre típica debida a la estabilidad del cero es:

$$u_{11} = |c_{11}|u(\delta_{cero}) = 1 * \frac{\delta_{cero}}{2\sqrt{3}}$$

Donde:

δ_{cero} = diferencia máxima, en valor absoluto entre los valores obtenidos para los ceros iniciales y finales en las diferentes series de experimentación; se mide con el patrón conectado en la toma de presión de descenso.

12. Debido al posible error de coseno [4]

Básicamente se debe al posible desvío de la perpendicularidad de la columna de líquido (agua) que tiene el patrón tal como se muestra en la figura.

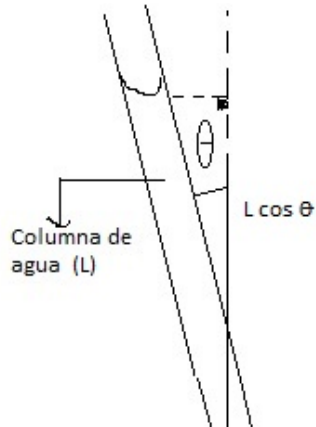


Figura 6. Desviación de la columna de líquido (agua)

El error de coseno estará dado por:

$$\delta_{\text{coseno}} = L - L * \cos \theta$$

Donde:

- L : longitud real de desplazamiento de la columna de líquido (agua)
- $L * \cos \theta$: Longitud de desplazamiento vertical cuando no hay inclinación de la columna de líquido (agua).
- θ : Angulo formado por la línea vertical y línea oblicua (se asume que $\theta \leq 1^\circ$)

$$u_{12} = |c_{12}|u(\delta\text{coseno}) = 1 * \frac{\delta\text{coseno}}{2\sqrt{3}}$$

13. Debido al certificado de calibración de la regla patrón [3]

Aplicando las propiedades de derivadas parciales para el cálculo de c_{13} y considerando una distribución de probabilidad normal para la incertidumbre estándar, se obtiene:

$$u_{13} = |c_{13}|u(\delta\text{cert}) = 1 * \frac{U}{k}$$

Donde:

U: incertidumbre por contribución de certificado de calibración de la regla patrón considerando una distribución normal con $k=2$ dado en el mismo documento.

Presupuesto de Incertidumbre

A continuación se presenta una tabla denominada “Presupuesto de Incertidumbre”, en la cual se resume los factores a considerar en el cálculo de Incertidumbre: Coeficientes de sensibilidad, las incertidumbres estándares de cada magnitud de influencia, la contribución de cada magnitud de influencia a la incertidumbre, la incertidumbre combinada y la incertidumbre expandida. Se muestra la siguiente tabla detallando todo lo estipulado:

Tabla 12. Presupuesto de los factores influyentes en la Incertidumbre

Magnitud de entrada Xi	Coefficiente de sensibilidad Ci	$u_i(x_i)$	Distribución Probabilidad	Contribución a la Incert. $ c_i * u_i(x_i)$	Observación
Vp	1	s/raíz(N)	Normal		N
Ve	1	s/raíz(N)	Normal		N
ρ_{aceite}	$\left \frac{V_e}{\rho_{agua}} \right $	$u(\rho_{aceite})$	Normal		
ρ_{agua}	$\left V_e \left(\frac{\rho_{aceite}}{\rho_{agua}^2} \right) \right $	$u(\rho_{agua})$	Normal		
$\delta_{res p}$	1	$\frac{\delta_{res p}}{2m\sqrt{3}}$	Rectangular		m=10
$\delta_{res e}$	1	$\frac{\delta_{res e}}{2m\sqrt{3}}$	Rectangular		m=10
δ_{his}	1	$\frac{\delta_{his}}{2\sqrt{3}}$	Rectangular		
δ_{cai}	1	$\frac{(\delta P/^\circ C)(Vp/100) \delta T}{2\sqrt{3}}$	Rectangular		
$\delta_{men p}$	1	$\frac{a}{\sqrt{3}}$	Rectangular		a=0.01
$\delta_{men e}$	1	$\frac{a}{\sqrt{3}}$	Rectangular		
δ_{cero}	1	$\frac{\delta_{cero}}{2\sqrt{3}}$	Rectangular		
δ_{coseno}	1	$\frac{\delta_{coseno}}{2\sqrt{3}}$	Rectangular		
δ_{cert}	1	$\frac{U}{k}$	Normal		k=2
Incertidumbre estándar combinada (u_c)				$\sqrt{\sum [c_i u_i(x_i)]^2}$	
Incertidumbre expandida U (k = 2)				$2 * u_c$	

Anexo 5: Determinación de la densidad del agua y suincertidumbre [3]

Para determinar la densidad del agua (con las condiciones de calidad especificada en este documento) existen diversas fórmulas y tablas. La fórmula recomendada a nivel internacional (fórmula de Tanaka) para una presión de 1atm (101325Pa) es la siguiente:

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

Donde:

$$a_1/^{\circ}\text{C} = -3.983035$$

$$a_2/^{\circ}\text{C} = 301.797$$

$$a_3/^{\circ}\text{C} = 522528.9$$

$$a_4/^{\circ}\text{C} = 69.34881$$

$$a_5/(\text{kg m}^{-3}) = 999.972 \text{ (este valor de } a_5 \text{ es para el agua purificada producida a partir de agua potable).}$$

Cuando la temperatura del agua se encuentra en el intervalo: $15^{\circ}\text{C} \leq T \leq 27^{\circ}\text{C}$ y se mide con una incertidumbre estándar de 0.07°C a 0.20°C la incertidumbre estándar $u(\rho_w)$ asociada al valor de densidad obtenido con esta fórmula está dado por la siguiente tabla:

Tabla 13. Incertidumbre Estándar de la densidad del agua (g/m³)

T(°C)	Incertidumbre Estándar de T(°C)							
	0.07	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
15	12.5	13.8	16.5	19.3	22.2	25.1	28.0	31.0
16	13.1	14.6	17.6	20.6	23.7	26.9	30.1	33.2
17	13.8	15.4	18.6	21.9	25.3	28.6	32.1	35.5
18	14.5	16.2	19.6	23.2	26.8	30.4	34.0	37.7
19	15.2	17.0	20.7	24.4	28.2	32.1	35.9	39.8
20	15.8	17.7	21.7	25.6	29.7	33.7	37.8	41.9
21	16.5	18.5	22.6	26.8	31.1	35.4	39.6	43.9
22	17.1	19.3	23.6	28.0	32.5	37.0	41.4	46.0
23	17.8	20.0	24.6	29.2	33.8	38.5	43.2	47.9
24	18.4	20.7	25.5	30.3	35.2	40.1	45.0	49.9
25	19.0	21.5	26.4	31.5	36.5	41.6	46.7	51.8
26	19.6	22.2	27.3	32.6	37.8	43.1	48.4	53.6
27	20.2	22.9	28.2	33.6	39.1	44.5	50.0	55.5

Para hacer esta estimación se ha asumido que el agua producida podría tener una variabilidad de su densidad con respecto del valor calculado de $\pm 0.010 \text{ kg/m}^3$.

Anexo 6: Determinación de la densidad del aceite y su incertidumbre

Para determinar la densidad del aceite utilizaremos el dato brindado del fabricante que estima en función de su gravedad específica dada por la siguiente fórmula:

$$\frac{\rho_{aceite}}{\rho_{agua}} = 0.826$$

$$\rho_{aceite} = 0.826 * \rho_{agua}$$

Donde:

ρ_{aceite} = Densidad del aceite

ρ_{agua} = Densidad del agua [3]

Asumiremos que la incertidumbre de la densidad del aceite será del mismo orden que la densidad del agua asumiendo el término mayor.