Manual de Prácticas del Laboratorio de Mecánica de Fluidos I

Elaborado por:	Revisado por:	Autorizado por:	Vigente desde:
Dr. Rafael Chávez Martínez Dr. Christian Lagarza Cortes Dr. Carlos Alberto Palacios Morales Dr. Edgar Ali Ramos Gómez M.I. Servando Ruiz Rodríguez	Dr. Ian Guillermo Monsivais Montoliu M.I. Mauricio Iván Escalante Camargo M.I. Alejandro Cortés Eslava	Dr. José Melesio Sánchez Huerta	**29 de enero de 2024**

Índice de prácticas

Práctica 1. Presión y manometría……3

Práctica 2. Medición de densidad y otras propiedades de los fluidos……15

Práctica 3. Viscosimetría……31

Práctica 4. Fuerzas sobre superficies sumergidas……40

Práctica 5. Medición de velocidad……49

Práctica 6. Medición de gasto……62

Práctica 7. Vertederos……75

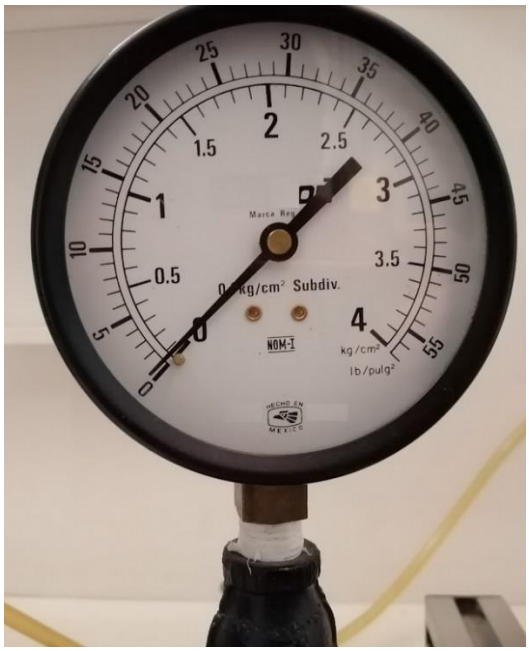
Práctica 8. Pérdidas primarias en tuberías……88

Práctica 9. Pérdidas secundarias en tuberías……98

Práctica 10. Flujo Compresible……107

Práctica 1

Presión y manometría



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir experimentación adecuada; analizar e interpretar datos y utilizar el juicio ingenieril para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar efectivamente en equipos que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	***Riesgo asociado.***
Pesas	Posibles lesiones en los dedos de los pies por caída de las pesas.

2. Objetivos

- ✓ Estudiar el comportamiento de la presión en un fluido en reposo y los diferentes dispositivos que se utilizan para medirla.
- ✓ Calibrar un manómetro tipo Bourdon utilizando pesas como patrones en una balanza de pesos muertos.

3. Conceptos básicos y definiciones

Definición de fluido

Para comprender la transferencia de momento en un fluido es preciso estudiar el movimiento de los fluidos y de las fuerzas que producen dichos movimientos. Por la segunda ley de Newton, se sabe que la fuerza está directamente relacionada con la razón de cambio del momento de un sistema con respecto al tiempo. Si se excluyen las fuerzas que actúan a distancia o fuerzas de cuerpo, como la gravedad, puede demostrarse que las fuerzas que actúan sobre un fluido (fuerzas superficiales), como la presión y el esfuerzo cortante, son el resultado de una transferencia microscópica (molecular) de momento. Por lo tanto, se puede llamar también a la mecánica de fluidos como transferencia de momento.

Un **fluido** se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. Una consecuencia importante de esta definición es que cuando un fluido se encuentra en reposo, no existen esfuerzos cortantes. Tanto los líquidos como los gases son fluidos. Algunas sustancias como el vidrio se clasifican técnicamente como fluidos. Sin embargo, la razón o escala de tiempo de la deformación de un vidrio a temperaturas normales es tan pequeña que es impráctico considerarle como un fluido.

Estática de fluidos

En un fluido que se encuentra sin movimiento sobre la superficie de la Tierra, se presenta con frecuencia una situación estática. Aunque la Tierra tiene cierto movimiento propio, puede dentro de los límites normales de exactitud, despreciarse la aceleración absoluta del sistema de coordenadas que, en este caso, estaría fijo en relación con la Tierra. Se dice que tal sistema de coordenadas es una referencia inercial. Si, por otra parte, un fluido es estacionario con respecto a un sistema de coordenadas que tiene cierta aceleración absoluta significativa propia, se dice que

la referencia es no inercial. Un ejemplo de esta última situación sería el fluido en un carro tanque de ferrocarril cuando viaja en una parte curva de las vías.

La aplicación de la segunda ley de Newton del movimiento a una masa fija de fluido se reduce a la expresión de que la suma de las fuerzas externas es igual al producto de la masa por su aceleración. En el caso de una referencia inercial se tendría, naturalmente, la relación ΣF = 0, mientras que en el caso no inercial debe utilizarse el postulado más general ΣF = ma.

La **presión** se define como una fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área. Se habla de presión sólo cuando se trata de un gas o un líquido. La contraparte de la presión en los sólidos es el esfuerzo normal. Puesto que la presión se define como fuerza por unidad de área, tiene la unidad de newtons por metro cuadrado (N/m^2), la cual se llama pascal (Pa); es decir,

$$1\ Pa = 1\ N/m^2$$

La unidad de presión Pascal es demasiado pequeña para las presiones que se encuentran en la práctica ingenieril; por lo tanto, son de uso común sus múltiplos kilopascal (1 kPa = 10^3 Pa) y el megapascal (1 MPa = 10^6Pa). Otras unidades de presión utilizadas en el campo de la ingeniería son el bar, la atmosfera estándar y el kilogramo fuerza por centímetro cuadrado.

La máxima rapidez de cambio de la presión ocurre en la dirección de la vector gravedad; el cual, siempre es perpendicular a las líneas de presión constante, las cuales representan las direcciones en donde el cambio de la presión es nulo. Por lo tanto, la variación de presión de un punto a otro se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$\rho \boldsymbol{g} = \nabla P$$

Medición de la presión

Los instrumentos que se utilizan para medir la presión se llaman manómetros y pueden ser de diferentes tipos. Uno de ellos es el manómetro de tubo en U, el cual, mide la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica. Esta diferencia se llama presión manométrica cuando la presión absoluta es mayor que la presión atmosférica. La presión absoluta es la presión real que se encuentra en una posición dada y se mide en relación con el vacío absoluto (es decir, presión cero absoluta). La mayoría de los instrumentos para medir la presión se calibran para que den una lectura de cero en la atmósfera, de modo que indican la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local. Las presiones por debajo de la atmosférica se conocen como presiones de vacío y se miden con instrumentos de vacío que indican la diferencia entre la presión atmosférica y la absoluta. Las presiones absoluta, manométrica y de vacío son todas cantidades positivas y están relacionadas por

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm}$$

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs}$$

Este concepto se ilustra en la Fig. 1.1.

Figura 1.1 Presión absoluta, manométrica y de vacío.

Otro tipo de dispositivo mecánico que comúnmente se utiliza para medir la presión es el tubo de Bourdon, nombrado así en honor del ingeniero e inventor francés Eugene Bourdon (1808-1884). Consta de un tubo metálico hueco, doblado como un gancho, cuyo extremo se cierra y se conecta a la aguja de un indicador de carátula Figura 1.2. Cuando el tubo se abre a la atmósfera, el tubo queda sin cambiar de forma y, en este estado, la aguja de la carátula se calibra para que marque una lectura de cero (presión manométrica). Cuando se presuriza el fluido que está en el tubo, éste tiende a enderezarse y mueve el agua en proporción a la presión aplicada.

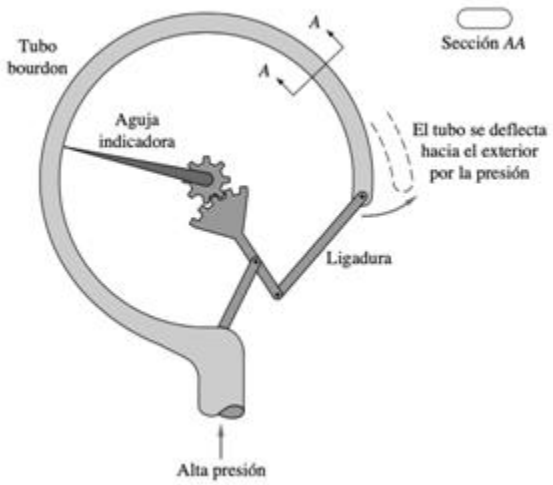


Figura 1.2. Esquema de tubo de Bourdon.

La Figura 1.2 muestra el esquema básico de la sección transversal de un tubo de Bourdon convencional; sin embargo, existe una gran diversidad de tubos de Bourdon con diferentes secciones transversales, Figura 1.3.

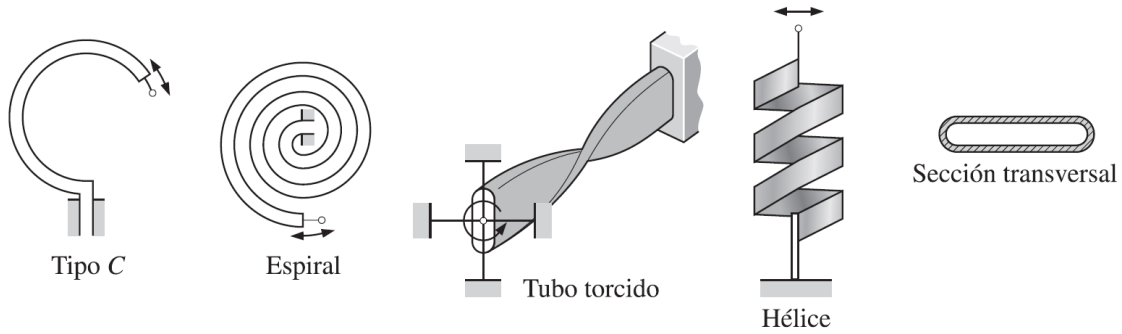


Figura 1.3. Varios tipos de tubo de Bourdon usados para medir la presión.

En los sensores modernos de presión, llamados transductores de presión, se aplican varias técnicas para convertir el efecto de presión en un efecto eléctrico, como un cambio en la tensión, la resistencia o la capacitancia. Los transductores de presión son más pequeños y más rápidos, y pueden ser más sensibles, confiables y precisos que sus contrapartes mecánicas. Pueden medir presiones desde un millonésimo de 1 atm hasta varios miles de atm.

Existe una amplia variedad de transductores de presión para medir presiones manométricas, absolutas y diferenciales, en una numerosa gama de aplicaciones. En los transductores de presión manométricos se usa la presión atmosférica como un valor de referencia fijo, generalmente cero, sin importar la altitud. Los transductores de presión absoluta están calibrados para tener una salida de señal cero al pleno vacío. Los transductores de presión diferencial miden de manera directa la diferencia de presión entre dos lugares, en lugar de usar dos transductores de presión y tomar su diferencia.

Los transductores de presión elásticos (de medición de deformación) emplean la deformación que la presión produce sobre una membrana o diafragma, conforme la membrana se estira en respuesta al cambio en la diferencia de presión de un lado a otro de ella. La presión se puede medir directamente o a través de un dispositivo conectado. Un transductor de capacitancia funciona en respuesta a un cambio en la capacitancia conforme la membrana se estira.

Los transductores piezoeléctricos, también conocidos como transductores de presión de estado sólido, funcionan con base en el principio de que se genera un potencial eléctrico en una sustancia cristalina cuando se le somete a una presión mecánica. Este fenómeno descubierto primero por los hermanos Pierre y Jacques Curie en 1880, se llama efecto piezoeléctrico (o presión-eléctrico). La respuesta de los transductores piezoeléctricos de presión es mucho más rápida en comparación

con las unidades de membrana, y son muy adecuados para aplicaciones a presiones altas pero, en general, no son tan sensibles como los de membrana.

Exactitud, precisión, calibración y resolución de un instrumento

La exactitud es el grado de concordancia entre el resultado de las medidas y el valor verdadero de la magnitud que se pretende medir. No puede determinarse cuando el valor verdadero es desconocido, pero sí tiene sentido cuando este se conoce o cuando se comparan las medidas con la que proporciona un método del que se sabe de antemano que tiene un alto grado de exactitud, y se emplea como referencia para la calibración.

La precisión, por su parte, es el grado de concordancia entre diferentes medidas realizadas en las mismas condiciones, al nivel en que pueden ser controladas por el método experimental en cuestión; si el conjunto de medidas presenta mucha dispersión, el método es impreciso, mientras que si están muy concentradas en torno a un valor, el método es preciso.

La calibración es el cálculo y la documentación de la desviación de un instrumento en comparación con otro dispositivo correspondiente con una mayor exactitud bajo condiciones predefinidas. Este dispositivo se denomina patrón.

La resolución de un instrumento es el menor incremento de la variable bajo medición que puede ser detectado.

Balanza de pesos muertos

Una balanza de pesos muertos es un estándar de calibración que utiliza el principio de un equilibrio de presiones para calibrar instrumentos de medición de presión. Las balanzas de pesos muertos utilizan pesos calibrados que sirven como patrones para aplicar presiones conocidas a un dispositivo sometido a prueba con el fin de brindar una solución simple y rentable que abarca un rango amplio de calibraciones de presión, Figura 1.4.

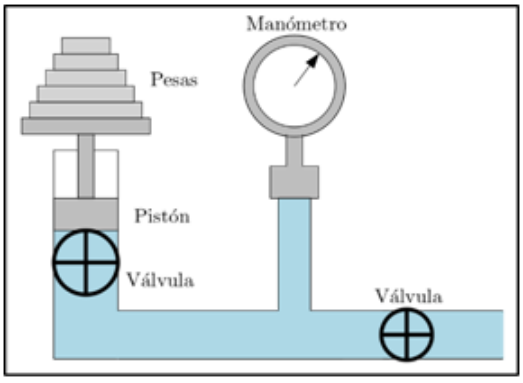


Figura 1.4. Esquema general de una balanza de pesos muertos.

4. Equipo y Material

1. Balanza de pesos muertos.
2. Manómetro tipo Bourdon.
3. Pesas de diferentes masas.
4. Balanza granataria.
5. Calibrador vernier.

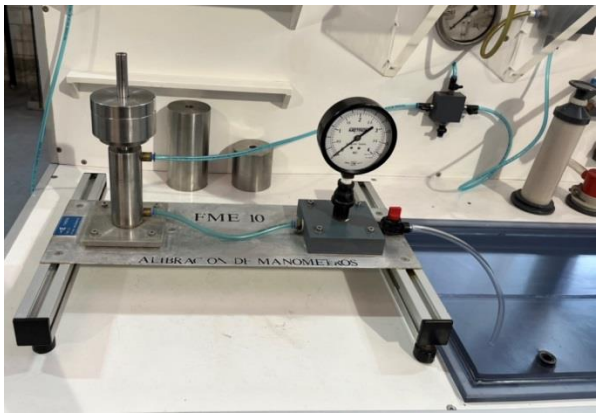


Figura 1.5. Balanza de pesos muertos que se encuentra en el Laboratorio de Termofluidos.

5. Desarrollo

Actividad 1. Calibración de un manómetro de tipo Bourdon.

El dispositivo se opera de la siguiente manera:

1. Obtener la masa de cada una de las pesas patrón, incluyendo el émbolo, utilizando la balanza granataria, Figura 1.6.

Figura 1.6. Balanza granataria, émbolo y pesas patrón.

2. Medir el diámetro del émbolo para calcular el área, *A*, sobre la que se ejerce la fuerza, Figura 1.7.

Figura 1.7. Medición del diámetro del émbolo.

3. Para purgar el equipo, abrir las válvulas de alimentación y de desagüe hasta que se elimine todo el aire posible, y después cerrar la llave de desagüe, Figura 1.7.

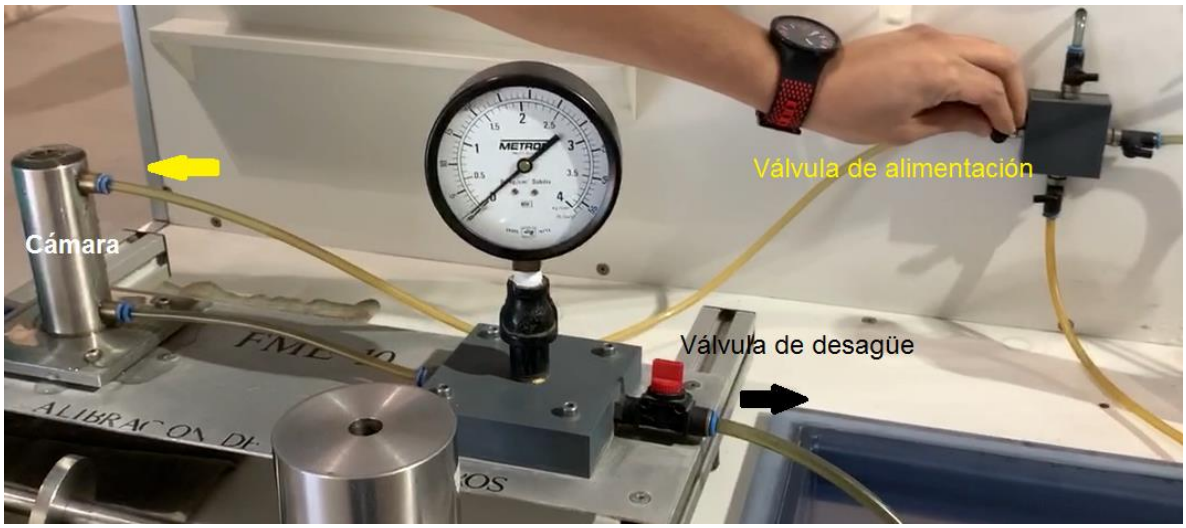


Figura 1.7. Válvula de alimentación y válvula de desagüe.

4. Esperar a que se llene la cámara con agua y cerrar la válvula de alimentación, Figura 1.8.

Figura 1.8. Apertura de la válvula de alimentación para llenado de la cámara con agua.

5. Introducir con precaución el pistón (émbolo) en la cámara, Figura 1.9 a Figura 1.10

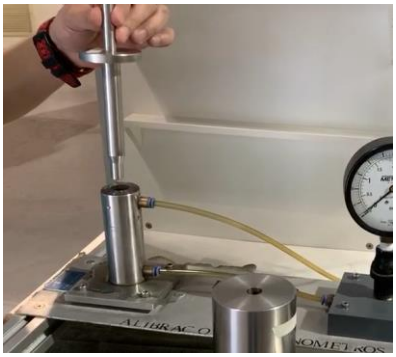


Figura 1.9. Colocación del émbolo en la cámara de la balanza de pesos muertos Sujetar el émbolo para evitar su caída fuera de la cámara y soltar hasta que se detenga el deslizamiento.

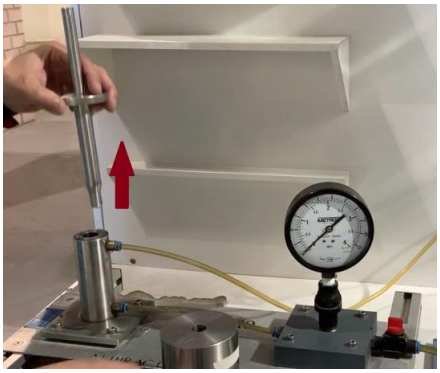


Figura 1.10. Retiro del émbolo de la cámara de la balanza de pesos muertos con válvula de desagüe abierta.

6. Con la válvula de desagüe cerrada, abrir la válvula de alimentación y esperar a que se llene la cámara, Figura 1.11.

Figura 1.11. Apertura de la válvula de alimentación para rellenar nuevamente la cámara con agua.

7. Colocar el émbolo con una pesa, Figura 1.12, y anotar la lectura del manómetro en la Tabla 1.1.

Figura 1.12. Colocación de las pesas en el émbolo.

Tabla 1.1. Tabla de datos experimentales.

Masa $[kg]$	**Presión del manómetro** $[kg_f/cm^2]$

8. Retirar la pesa del émbolo.
9. Retirar el émbolo con válvula de desagüe abierta, Figura 1.13.

Figura 1.13. Válvula de desagüe abierta y retiro del émbolo de la cámara.

10. Con la válvula de desagüe abierta, abrir la válvula de alimentación hasta que se elimine todo el aire posible, y después cerrar la llave de desagüe.
11. Repetir el procedimiento a partir del punto 6 con distintas pesas. Se recomienda realizar al menos 10 mediciones.
12. Precaución: No colocar las pesas de manera brusca para evitar una desconfiguración y malas mediciones en el equipo.

6. Resultados

1. Obtener el valor de la fuerza que ejerce cada una de las masas patrón:

$$F_{patrón} = W_{patrón} = m_{patrón} g \qquad \text{(Ec. 1.1)}$$

2. Obtener el valor de la presión para cada uno de los patrones:

$$P_{patrón} = \frac{F_{patrón}}{A} \qquad \text{(Ec. 1.2)}$$

3. Calcular los errores absoluto y relativo que se presentan al tomar las lecturas de presión con el manómetro de Bourdon, los cuales, se calculan con las siguientes expresiones:

$$E_{rel} = \frac{|P_{patrón} - P_{manómetro}|}{P_{patrón}} \qquad \text{(Ec. 1.3)}$$

4. Completar la siguiente Tabla con los valores obtenidos:

Tabla 1.2. Tabla de resultados.

Masa del émbolo [Kg]	Presión patrón [N/m^2]	Presión del manómetro de Bourdon [N/m^2]	Error Relativo %

5. Con los resultados obtenidos, realizar las siguientes gráficas:

    a) Error relativo contra presión del manómetro.
    b) Presión del manómetro contra peso de cada patrón y Presión patrón contra peso de cada patrón en una misma gráfica.

7. Cuestionario

1. Tomando como referencia la gráfica de la presión del manómetro contra el peso de cada patrón, realizar una regresión lineal e interpretar el significado de la pendiente y la ordenada al origen.
2. ¿Cómo influye la resolución de los instrumentos de medición en la toma de lecturas?
3. Mencionar al menos tres manómetros diferentes al tubo de Bourdon, y explique el funcionamiento de cada uno de ellos.
4. ¿Cuáles considera que sean los puntos más importantes que le permitan decidir el tipo de manómetro a utilizar en alguna aplicación industrial?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
2. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.
3. Welty J. R., Wicks, C. E. y Wilson R. E. (1994). Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa. 2a edición. Ed. Limusa.
4. Edibon, S.A (1995). Banco Hidrostático BHI: Manual de prácticas. España.

Práctica 2

Medición de densidad y otras propiedades de los fluidos

Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir experimentación adecuada; analizar e interpretar datos y utilizar el juicio ingenieril para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar efectivamente en equipos que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	***Riesgo asociado.***
Instrumentos de vidrio.	El usuario es vulnerable a sufrir algún tipo de lesión por ruptura de los instrumentos debido a un manejo inadecuado.

2. Objetivos

- ✓ Determinar la densidad de algunos líquidos con un picnómetro, un densímetro y con el aparato de Hare y comparar los resultados obtenidos.
- ✓ Repasar brevemente otras propiedades como tensión superficial, capilaridad, viscosidad, la clasificación en fluidos newtonianos y no newtonianos y la importancia de esto en diferentes aplicaciones.

3. Conceptos básicos y definiciones

Un fluido se define como aquella sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante mientras este sea aplicado y comprenden a los líquidos y gases. Existen diferentes propiedades de los fluidos de interés en la mecánica de fluidos y se pueden clasificar en:

- **Propiedades cinemáticas.** Aquellas que están en función de la velocidad, siendo esta la más importante.
- **Propiedades termodinámicas.** Siendo la densidad, la temperatura y la presión las principales, así como los calores específicos, la entalpía, la entropía y la energía interna.
- **Propiedades de transporte.** Coeficiente de viscosidad dinámica y la conductividad térmica, importantes en los procesos donde se tiene flujo másico o de calor, respectivamente.

Se tienen además diversas propiedades secundarias como la tensión superficial o la presión de vapor. En esta sesión se trabajará a detalle con la densidad y se abordarán de manera breve la tensión superficial y la viscosidad; las demás propiedades se abarcarán en otras sesiones (práctica de presión) o en otras asignaturas.

Densidad, ρ.

Relación de la masa, *m*, al volumen, V, de una sustancia.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \text{(Ec. 2.1)}$$

Varía directamente con la presión e inversamente con la temperatura (con la excepción del agua cerca del punto de solidificación). La densidad de los gases presenta una gran variación con la temperatura y la presión, es casi lineal con respecto a esta última (White, 2011); en el caso del aire y otros gases, se puede utilizar la expresión para gas ideal.

Por otro lado, la densidad de los líquidos es prácticamente constante con la presión, por lo que se consideran incompresibles y solamente se toman en cuenta, si se requiere de mayor precisión, los cambios con respecto a la temperatura, aunque estos tampoco suelen ser muy grandes. Por ejemplo, a 20°C el agua aumenta su densidad de 998 kg/m3 a 1 atm a 1003 kg/m3 a 100 atm, lo que representa un aumento de alrededor del 0.5%; además, a 1 atm, su densidad pasa de 1000 kg/m3 a 0°C a 958 kg/m3 a 100°C (Cengel, 2019), menos de 5%.

La densidad relativa (adimensional) es la relación de la densidad de un líquido de interés, ρ_l, a la densidad de una sustancia de referencia, generalmente agua, ρ_a, para líquidos, es decir:

$$\rho_r = \frac{\rho_l}{\rho_a} \qquad \text{(Ec. 2.2)}$$

Para el caso de gases, se utiliza comúnmente el aire como referencia.

Existen diversas formas de medir la densidad de un líquido, en el laboratorio se utilizarán tres equipos.

1. **Densímetro o areómetro**

El areómetro (en inglés hydrometer o areometer) se utiliza para medir la densidad relativa de un líquido sin previamente medir su masa y su volumen (aunque hay algunos que también dan la lectura de densidad absoluta). Consta de un tubo hueco de vidrio con una masa pesada en el fondo (para otorgarle estabilidad y que siempre permanezca en posición vertical al sumergirlo en el líquido a medir) y graduado en su parte superior, figura 2.1.

Figura 2.1. Areómetro utilizado en el laboratorio.

Realizando el diagrama de cuerpo libre del densímetro, las fuerzas que actúan en él son el peso, $W = m \cdot g$, y la Fuerza de Flotación, $F_f = \rho \cdot g \cdot V$, donde m es la masa, g es la aceleración de la gravedad, V es el volumen sumergido del densímetro. Cuando estas fuerzas se igualan, ecuación 2.3, el densímetro llega a un equilibrio y permanece flotando de forma estable en el líquido.

$$W = F_f \qquad \text{(Ec. 2.3)}$$

Teniendo en cuenta que la masa es constante, suponiendo al densímetro como un prisma cilíndrico de radio constante, sustituyendo los términos de peso y fuerza de flotación y reduciendo se llega a

$$m = \rho \cdot h \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = cte \qquad \text{(Ec. 2.4)}$$

De aquí se observa que si el líquido es menos denso, el densímetro se sumergirá más, y si es más denso, se sumergirá menos, figura 2.2.

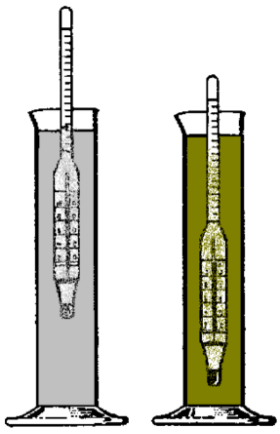


Figura 2.2. Diferencia en la profundidad del densímetro de acuerdo a las densidades de los líquidos.

2. Picnómetro

Generalmente fabricado de vidrio, aunque también los hay de plástico o metal. Es un recipiente cuyo volumen está calibrado y puede ser conocido de manera exacta. Utilizando una balanza granataria se obtiene la masa del líquido dentro de él, y con ello, la densidad. Cuenta con un tapón esmerilado que facilita un ajuste perfecto al recipiente de un tubo capilar que permite la salida de las burbujas de aire que pudieran quedar atrapadas, figura 2.3.

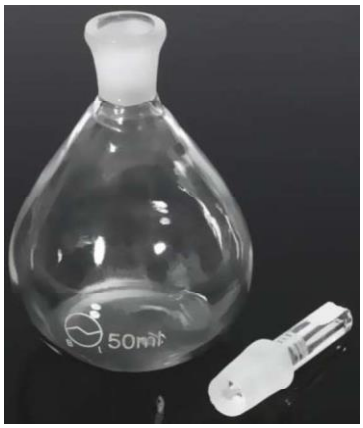


Figura 2.3. Picnómetro utilizado en el laboratorio.

Tiene la ventaja de permitir la medición de densidad de polvos, pinturas, recubrimientos y demás. Para líquidos muy viscosos o polvos, existen de otros tipos, tamaños de boquilla y materiales. La ASTM cuenta con varios documentos con el proceso a seguir para medir la densidad de líquidos comunes, pinturas, polvos o suelos, barnices, etcétera; ASTM D854-14, ASTM D1475-98, ASTM D1217-15, ASTM D1963-85. Debido a que no se cuenta con todo el material necesario, se seguirá un proceso de medición con base a estos documentos sin seguirlos totalmente, esto con la finalidad de obtener lecturas lo más exactas posibles.

Medición de densidad relativa para líquidos

Con la ayuda de una balanza, se mide la masa del picnómetro vacío, m_p, la masa del picnómetro con agua, m_{pa}, y la masa del picnómetro con el líquido cuya densidad se quiere conocer, m_{pl}.

Se sabe que la densidad del líquido es la relación de su masa, que será igual a la diferencia de las mediciones de masas del picnómetro con la sustancia y del picnómetro vacío, $m_l = m_{pl} - m_p$, a su volumen, que, en este caso, sería igual al volumen del picnómetro, $V_l = V_p$.

$$\rho_l = \frac{m_l}{V_l} = \frac{m_{pl} - m_p}{V_p} \qquad \text{(Ec. 2.5)}$$

Sin embargo, el volumen marcado en el picnómetro solamente es a la temperatura marcada en este (20°C, normalmente), por lo que el volumen real del picnómetro es diferente al marcado debido a la dilatación térmica y se debe calcular. Para ello se usa la densidad del agua a la temperatura de la prueba (tabla A2.1 que se encuentra en el apéndice de la práctica) y la medición de la masa del picnómetro con agua, ecuación 2.6.

$$V_p = \frac{m_a}{\rho_a} = \frac{m_{pa} - m_p}{\rho_a} \qquad \text{(Ec. 2.6)}$$

Por lo que la densidad del líquido será,

$$\rho_l = \left(\frac{m_{pl} - m_p}{m_{pa} - m_p}\right) \rho_a \qquad \text{(Ec. 2.7)}$$

O, en términos de densidad relativa

$$\rho_r = \frac{\rho_l}{\rho_a} = \frac{m_{pl} - m_p}{m_{pa} - m_p} \qquad \text{(Ec. 2.8)}$$

Medición de densidad relativa para sustancias granulares (fluido granular)

Una ventaja que permite el picnómetro es la medición de sustancias granulares. Un material o fluido granular es un material multifásico formado por una gran colección de partículas sólidas muy compactas rodeadas por un gas o un líquido, estando las partículas en contacto entre sí, debido a que la relación entre el volumen de las fases sólida y fluida es muy alta. Materiales de este tipo se encuentran cotidianamente (arenas, polvo, grava, semillas, granos, nieve) y pueden tener tamaños desde el orden de micras hasta metros. La particularidad de este tipo de material es que, al fluir, presentan comportamientos que pueden ser descritos con ecuación de la Mecánica de Fluidos.

Para medir la densidad de un material granular con el picnómetro se requiere la masa del picnómetro y del picnómetro con agua, como en el caso de la medición de densidad de líquidos. Ya obtenidos estos datos, se agregarán el fluido granular en el picnómetro, aproximadamente a la mitad, aunque no hay, en teoría, variación con la cantidad usada. Se mide la masa entonces del picnómetro con el fluido granular, m_{pg} .

Finalmente se llena con agua el picnómetro, sin vaciar la sustancia granular, se coloca la tapa, se seca el líquido derramado por el tubo capilar y se mide la masa del picnómetro con el fluido granular con agua, m_{pga} .

La densidad del fluido granular es la relación de su masa, que será igual a la diferencia de las mediciones de masas del picnómetro con la sustancia y del picnómetro vacío, $m_g = m_{pg} - m_p$, a su volumen, V_g .

$$\rho_g = \frac{m_g}{V_g} = \frac{m_{pg} - m_p}{V_g} \qquad \text{(Ec. 2.9)}$$

El volumen del fluido granular será la diferencia entre el volumen real del picnómetro, V_p , y el volumen de agua que se agregó para llenar el picnómetro con el fluido granular adentro, V_{a+} , o sea

$$V_g = V_p - V_{a+} \qquad \text{(Ec. 2.10)}$$

Sustituyendo la ecuación 2.10 en 2.9

$$\rho_g = \frac{m_g}{V_g} = \frac{m_{pg} - m_p}{V_p - V_{a+}} \qquad \text{(Ec. 2.11)}$$

El volumen real del picnómetro se calcula igual que en el caso anterior, mientras que el volumen añadido de agua será igual a

$$V_{a+} = \frac{m_{pga} - m_{pg}}{\rho_a} \qquad \text{(Ec. 2.12)}$$

Sustituyendo esta última ecuación y la ecuación 2.6 en la ecuación 2.11 y reacomodando términos, se tiene que

$$\rho_g = \left(\frac{m_{pg} - m_p}{m_{pa} + m_{pg} - m_p - m_{pga}}\right)\rho_a \qquad \text{(Ec. 2.13)}$$

3. Aparato de Hare

Aparato que permite la comparación de la densidad entre dos o más líquidos mediante la comparación de la altura a la que llegan, mediante succión, dentro de unos tubos, generalmente de vidrio, inmersos en los líquidos y conectados en un tubo central en donde se provoca la succión mediante la acción de la presión ejercida en una perilla flexible para retirar el aire de la misma y

obstrucción de un orificio para evitar la entrada de aire de regreso a la perilla en tanto se realiza la medición , figura2.4.

Figura 2.4. Aparato de Hare del laboratorio.

Si uno de los líquidos es agua, se puede saber entonces la densidad relativa de los otros líquidos.

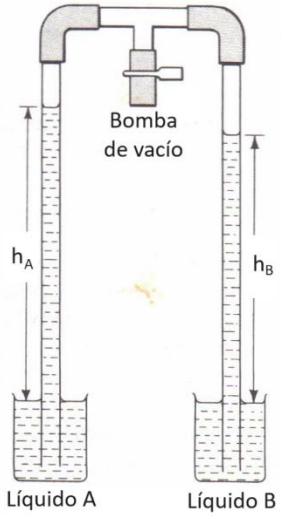


Figura 2.5. Altura de columna de líquidos en el Aparato de Hare.

De acuerdo con la Figura 2.5, las presiones en la base de las columnas de los líquidos A y B serán $P_A = P_{atm} + \rho_A \cdot g \cdot h_A$ y $P_B = P_{atm} + \rho_B \cdot g \cdot h_B$, respectivamente. Al igualar presiones se tiene que

$$P_{atm} + \rho_A \cdot g \cdot h_A = P_{atm} + \rho_B \cdot g \cdot h_B \quad \text{(Ec. 2.14)}$$

$$\frac{\rho_B}{\rho_A} = \frac{h_A}{h_B} \quad \text{(Ec. 2.15)}$$

Finalmente, si el líquido A es agua y tiene una altura h_a y el líquido B es cualquier otro, cuya altura es h_l, la densidad relativa del líquido será

$$\rho_r = \frac{\rho_l}{\rho_a} = \frac{h_a}{h_l} \quad \text{(Ec. 2.16)}$$

Tensión Superficial.

Se presenta cuando hay interfases de líquidos con sólidos o gases y se debe a las fuerzas de atracción/repulsión entre las moléculas de una sustancia y otra. Se observa como una membrana elástica en la superficie del líquido que impide que esta aumente. Esta fuerza depende de las interfases que se tengan y de la temperatura; puede además verse afectado por las impurezas de las sustancias lo cual es aprovechado por los detergentes y jabones para lograr un mejor lavado, aunque esto mismo puede afectar situaciones de aparatos que dependen de este fenómeno (algunos intercambiadores de calor y partes de aparatos de aire acondicionado utilizan tubos capilares).

Se puede apreciar cuando pequeños insectos u objetos quedan en la superficie del líquido, cuando se llena un envase a tope y este no se derrama, en la formación de burbujas y gotas y en un fenómeno conocido como la capilaridad. La capilaridad es la capacidad que tienen los líquidos por fluir a través de tubos capilares (tubos muy delgados). Entre más delgado es un tubo capilar, el fluido se desplaza más con la siguiente relación:

$$h = \frac{2\sigma_i}{\rho g R} \cos\theta \quad \text{(Ec. 2.17)}$$

Donde *h* es la altura que sube el líquido, σ_i es el coeficiente de tensión superficial que depende de las interfases y la temperatura, ρ es la densidad, *g* es el valor de la gravedad local, *R* es el radio del tubo capilar y θ es el ángulo que forman las interfases. Si este último es menor a 90° se dice que moja la superficie (la mayoría de los líquidos) y si es mayor se dice que no la moja (como el mercurio). En la práctica, se desprecian los efectos para tubos mayores de medio centímetro de

radio; se debe tener cuidado de utilizar tubos suficientemente grandes en manómetros para poder despreciar estos efectos (Cengel, 2006).

Viscosidad, μ

La viscosidad es una medida de la resistencia de los fluidos al movimiento y depende de las fuerzas. Es la responsable que sea más difícil moverse en el agua que en el aire. La densidad de los fluidos puede variar considerablemente por muchos órdenes de magnitud. La viscosidad prácticamente no varía con la presión, pero sí con la temperatura como se verá la siguiente práctica. Debido a su naturaleza, la viscosidad es de vital importancia en cualquier aplicación en que haya flujo y afecta fuertemente su comportamiento pues representa la cantidad de fricción, siendo así, una propiedad que se encarga de disipar energía.

Matemáticamente se calcula con la relación que hay entre el esfuerzo cortante a un fluido, τ , y la tasa a la que este se deforma debido a él, $\dot{\gamma}$.

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \qquad \text{(Ec. 2.18)}$$

A esta relación lineal se le llama la 'Ley de Viscosidad de Newton' y a los fluidos que la siguen se les conoce como newtonianos (agua, aire, miel, gasolina) y en ellos, la viscosidad no depende de la tasa de deformación. A los fluidos que no la siguen se les conoce como no newtonianos y se subdividen, entre otros, en pseudoplásticos (disminuye la viscosidad cuando aumenta la tasa de deformación), dilatantes (aumenta la viscosidad cuando aumenta la tasa de deformación), plásticos de Bingham (requieren un esfuerzo mínimo para empezar a fluir, llamado de cedencia) y viscoelásticos (presentan viscosidad y elasticidad).

4. Equipo y Material

- Densímetro o aerómetro.
- Probeta de 500 ml o 1 litro.
3. Picnómetro.
4. Balanza granataria.
5. Franela, papel para limpieza y sacado.
6. Líquidos diversos (champú, detergentes, miel, salsas, aceites comestibles, glicerina).
7. Tubos capilares.
8. Recipientes.
9. Aparato de Hare.

10. Esferas de vidrio o balines de metal.
11. Calibrador Vernier.

5. Desarrollo

Actividad 1. Medición de densidad con el Aparato de Hare.

1. Corroborar que el nivel de los líquidos esté dentro de la hoja de papel milimétrico que está en la parte posterior. De no ser así, agregar líquido para que así sea.
2. Apretar la pera negra de hule con la mano, figura 2.6, para desalojar el aire de la misma; sin dejar de presionar, tapar con un dedo el orificio que se encuentra en el extremo de la pera. A continuación, liberar lentamente la presión sobre la pera para que suban los líquidos en los tubos debido al vacío. Tener en cuenta que algunos subirán más lentamente, se deberá esperar a que los líquidos ya no presenten movimiento.

Figura 2.6. Pera para generar vacío en el Aparato de Hare.

3. Medir la altura de los líquidos, h_l , y la del agua, h_a , con la ayuda de la hoja milimétrica que se encuentra en la parte posterior y registrarlas en la tabla 2.1 La cantidad de líquidos estudiados queda a consideración del profesor.

Tabla 2.1. Tabla de datos para el Aparato de Hare.

Líquido				
Altura [cm]				

Actividad 2. Medición de densidad con el areómetro o densímetro.

1. Limpiar y secar la probeta (el tamaño de la probeta depende del viscosímetro que se ocupe, existen dos de diferente tamaño en el laboratorio).
2. Llenar la probeta con el fluido de trabajo, procurando usar los mismos líquidos que los empleados en el Aparato de Hare y en el picnómetro.
3. Colocar el densímetro con cuidado y siempre con la parte donde está concentrada la masa por debajo.

4. Esperar unos segundos a que deje de oscilar el instrumento y realizar la lectura de densidad relativa.
5. Registrar la temperatura, vaciar el fluido de trabajo a su contenedor, limpiar la probeta, secarla y repetir con algún otro líquido de trabajo.
6. Registrar los datos en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Tabla de datos para el densímetro.

Líquido			
Densidad Relativa			

Actividad 3. Medición de densidad con el picnómetro.

1. Lavar y secar perfectamente el picnómetro cuidando que no quede ningún residuo.
2. Ajustar a cero la balanza granataria.
3. Colocar el picnómetro en la balanza; cuidar que no contenga ningún residuo, incluso la presencia de huellas dactilares podría variar el resultado. Registrar el valor de la masa del picnómetro vacío, m_p .
4. Llenar el picnómetro hasta el tope con agua.
5. Colocar el tapón al picnómetro, las burbujas deberían salir por el tubo capilar, de no ser así, se debe retirar la tapa, vaciar un poco de líquido del recipiente, volver a llenar y tapar.
6. Secar con papel desechable la parte exterior del picnómetro, cuidando de que no queden residuos del material empleado para realiza el secado, y evitar colocar el papel desechable en la parte superior del tapón del picnómetro, ya que podría absorber parte del líquido.
7. Colocar nuevamente el picnómetro en la balanza granataria y registrar la medida de la masa del picnómetro con el agua destilada, m_{pa} .
8. Vaciar y secar el picnómetro.
9. Llenar el picnómetro al tope con el fluido que se vaya a estudiar, procurando usar los mismos líquidos que los empleados en el Aparato de Hare.
10. Colocar el tapón teniendo las mismas consideraciones mencionadas anteriormente.
11. Colocar el picnómetro en la balanza y registrar la masa del picnómetro con el fluido de trabajo, m_{pl} .
12. Se recomienda medir al menos tres veces el valor para una misma sustancia y realizar un promedio de las mediciones.
13. Repetir el procedimiento con algún otro líquido de trabajo.

Tabla 2.3. Tabla de datos para el picnómetro.

Líquido			
m_p			
m_{pa}			
m_{pl}			

Actividad 4. Medición de densidad de un fluido granular con el picnómetro.

1. Repetir los pasos 1 a 9 de la actividad 3 (Si se utilizó el mismo picnómetro, se pueden usar los mismos datos) para obtener m_p y m_{pa} .
2. Verter en el picnómetro, aproximadamente a la mitad, esferas de vidrio o balines de metal, figura 2.7, tapar el picnómetro y colocarlo en la balanza para obtener la masa del picnómetro con el fluido granular m_{pg} .

Figura 2.7. Picnómetro con material granular.

3. Agregar agua al picnómetro, sin sacar las esferas o los balines, hasta llenar el picnómetro.
4. Tapar el picnómetro y colocarlo en la balanza para obtener la masa del picnómetro con el fluido granular y agua, m_{pga} .
5. Con la ayuda de un calibrador Vernier, medir el diámetro de las esferas o de los balines, d_b.
6. Colocar varias esferas o balines, 20 o 25, en la balanza granataria para medir su masa, m_b.
7. Calcular la densidad de les esferas o los balines con el picnómetro y con los datos geométricos y de masa de las esferas y compararlos.

6. Resultados

Reportar los valores obtenidos de la densidad (reportar aquí solamente el valor promedio y la desviación) para los fluidos de trabajo con el picnómetro y el aerómetro. También indicar el error

relativo obtenido del aerómetro y del Aparato de Hare con respecto a la medición realizada con el picnómetro, Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Tabla de resultados para la densidad de líquidos.

Fluido	Densidad relativa con Picnómetro	Densidad relativa con aerómetro	Densidad relativa con Aparato de Hare	Error relativo del aerómetro [%]	Error relativo del Aparato de Hare [%]

Reportar el valor de la densidad de las esferas calculado con el método del picnómetro, ecuación 2.13, y con la fórmula de densidad, ecuación 2.1. Calcular el error relativo del picnómetro con respecto al valor obtenido con datos geométricos y de masa de las esferas. Presentar los resultados en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Tabla de resultados de la densidad de las esferas calculado con el método del picnómetro.

Material Granular	Densidad con Picnómetro $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Densidad con datos geométricos $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Error del picnómetro [%]

Adicionalmente, comentar lo que se observó en los experimentos de tensión superficial y con las observaciones de viscosidad.

7. Cuestionario

Contestar tomando en cuenta los resultados obtenidos y su análisis de respuesta a las siguientes cuestiones:

1. ¿Cómo es la variación de la densidad medida con los tres métodos y a qué se debe dicha variación?
2. ¿Cuándo se justificaría el uso del picnómetro para medir la densidad de una sustancia y cuándo el aerómetro? Justifica tu respuesta.
3. ¿Influye la viscosidad del líquido en la altura alcanzada por este en el Aparato de Hare?. Argumente su respuesta.

4. ¿Cómo podría llevar a cabo la medición de la densidad con el picnómetro a una temperatura diferente a la ambiental?.
5. ¿Cómo es la variación de la densidad del material granular medida con los dos métodos y a qué se debe dicha variación?.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
2. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.

10. Anexos

Tabla A2.1. Densidad del agua respecto a la temperatura.

Temperatura, °C	Densidad, g/ml	Temperatura, °C	Densidad, g/ml	Temperatura, °C	Densidad, g/ml
0	0.999840	21	0.997991	40	0.992212
3	0.999964	22	0.997769	45	0.990208
4	0.999972	23	0.997537	50	0.988030
5	0.999964	24	0.997295	55	0.985688
10	0.999699	25	0.997043	60	0.983191
15	0.999099	26	0.996782	65	0.980546

15.56	0.998012	27	0.996511	70	0.977759
16	0.998943	28	0.996231	75	0.974837
17	0.998774	29	0.995943	80	0.971785
18	0.998595	30	0.995645	85	0.968606
19	0.998404	35	0.994029	90	0.965305
20	0.998203	37.78	0.993042	100	0.958345

Densidad del agua. Estos valores de la Escala Internacional de Temperatura 1990 (ITS 90, por sus siglas en inglés) fueron tomadas del Apéndice G del 'Standard Methods for Analysis of Petroleum and Related Products 1991' del Instituto del Petróleo, Londres.

Práctica 3

Viscosimetría

Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir experimentación adecuada; analizar e interpretar datos y utilizar el juicio ingenieril para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar efectivamente en equipos que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	***Riesgo asociado.***
Parrilla eléctrica y líquidos a alta temperatura.	Quemaduras.
Instrumentos de vidrio	Cortaduras debido a la ruptura de los instrumentos por un manejo inadecuado.

2. Objetivos

- ✓ Calcular la viscosidad de algunas de las sustancias más utilizadas en la ingeniería con un viscosímetro de Stokes.
- ✓ Obtener los coeficientes de alguno de los modelos matemáticos existentes en la literatura que permitan predecir el comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura.
- ✓ Obtener la viscosidad de diversos líquidos con un viscosímetro Stokes y compararlo con el resultado obtenido con el viscosímetro comercial.

3. Conceptos básicos y definiciones

La viscosidad es un parámetro muy importante en la mecánica de fluidos, principalmente en aplicaciones donde el fluido este en movimiento, por lo tanto, su medición es de una importancia vital. Para ello se cuentan con diversos métodos de medición de viscosidad, en los cuales se utilizan los instrumentos de medición llamados viscosímetros, aunque también se pueden utilizar los reómetros; los primeros se utilizan para fluidos newtonianos, pues solamente miden el valor de la viscosidad, los segundos se utilizan tanto para fluidos newtonianos como no newtonianos, pues se pueden obtener curvas de viscosidad contra tasa de deformación para los distintos fluidos, así como diversos parámetros reológicos. De estos métodos, se utilizarán dos de ellos en el laboratorio.

Viscosímetro de Stokes

Se basa en medir la velocidad de la caída de una esfera de diámetro pequeño, usualmente del orden de milímetros para garantizar que el número de Reynolds sea pequeño. Haciendo un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre la esfera, se tiene lo siguiente:

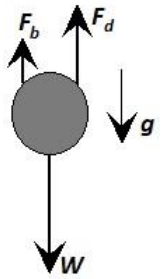


Figura 3.1. Diagrama de cuerpo libre de una esfera cayendo en un fluido.

Donde F_d es la fuerza de arrastre hidrodinámico, F_b es la fuerza de flotación, W es el peso de la esfera y g es la aceleración de la gravedad. Usando la ley de Stokes, la cual indica que:

$$F_d = 6\pi R\mu v$$

Por otro lado

$$F_b = \rho_f \left(\frac{4}{3}\pi R^3\right) g$$

$$W = mg = (\rho_b)\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right) g$$

Realizando el balance de fuerzas se obtiene finalmente la ecuación de Stokes, que cuando se tiene un movimiento rectilíneo uniforme, la viscosidad, μ, se obtiene con:

$$\mu = \frac{2gR^2}{9v}\left(\rho_b - \rho_f\right) \qquad \text{(Ec. 3.1)}$$

Donde ρ_b es la densidad de la esfera, ρ_f es la densidad del fluido, v es la velocidad de la esfera y R es el radio de la esfera.

De las variables anteriores la mayoría se pueden obtener de tablas del fabricante o medir con un flexómetro, excepto la velocidad. El material y tamaño del balín son decisión del usurario, teniendo en cuenta que el Re tiene que ser pequeño. La metodología por seguir es realizar varias pruebas en las que se mide la velocidad de caída de un balín en un fluido. La distancia recorrida es un parámetro determinado por el usuario y solo hay que medir el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia. Otro parámetro que se puede modificar es la temperatura.

Viscosímetro rotacional.

En este tipo de viscosímetros/reómetros se cuenta con un cuerpo inmerso en un fluido (un husillo, cilindros concéntricos, cono y plato, platos paralelos, etc.) que gira a velocidades preestablecidas,

deformando así el fluido a estudiar. Se mide la velocidad angular que se utiliza para calcular la tasa de deformación, $\dot{\gamma}$; por otro lado, por medio de un sensor se mide el par de torsión aplicado al cuerpo, τ. Finalmente, recordando que $\tau = \mu\dot{\gamma}$, se despeja la viscosidad.

Dependencia de la viscosidad con la temperatura.

La viscosidad es una propiedad que depende de la temperatura. Para los gases esta propiedad aumenta al incrementarse la temperatura, mientras que para los líquidos disminuye. Lo anterior se debe al efecto de la temperatura en los enlaces e interacción molecular de los fluidos.

Existen diversas fórmulas para modelar la viscosidad de un líquido con respecto a la temperatura, entre ellas se encuentran las siguientes:

$$\mu = a \cdot 10\text{^}\left(\frac{b}{T-c}\right) \quad \text{(Ec. 3.2)}$$

$$\ln\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right) = a + b\left(\frac{T_0}{T}\right) + c\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \quad \text{(Ec. 3.3)}$$

$$\mu = a \cdot e^{b/T} \quad \text{(Ec. 3.4)}$$

Esta última ecuación se puede modificar y presentarse como:

$$\ln(\mu) = \ln(a) + \frac{b}{T} \quad \text{(Ec. 3.5)}$$

Por mencionar algunos ejemplos, se tiene: En general cualquier sistema de lubricación, motor de combustión interna, aceites multigrado. Se deja al estudiante el investigar a qué se debe dicho comportamiento y qué sucede con la viscosidad de los gases. En clase, el profesor dará ejemplos prácticos, los que considere adecuados, en los cuales la dependencia de la viscosidad con respecto a la temperatura sea de suma importancia.

4. Equipo y Material

1. Probetas de vidrio de diferentes tamaños.
2. 3 esferas de diferentes tamaños.
3. Calibrador pie de rey o vernier.
4. Balanza granataria.
5. Densímetro o picnómetro.
6. Cinta adhesiva.

7. Cronómetro.
8. Termómetro.
9. Viscosímetro rotacional marca Brookfield modelo RVT.
10. Parrilla eléctrica.
11. Pinzas.
12. Guantes de carnaza o asbesto.
13. Líquidos obligatorios: aceite automotriz, agua, glicerina.
14. Líquidos optativos: aceite comestible, alcohol, miel, chamoy, shampoo, etc.

5. Desarrollo

Actividad 1. Viscosímetro de bola en caída libre.

1. Medir la densidad del líquido de trabajo con el picnómetro y la balanza granataria.
2. Medir el diámetro (con el calibrador vernier y la masa (con la balanza) de las esferas a utilizar para calcular la densidad de estas.
3. Medir el diámetro (con el calibrador vernier y la masa (con la balanza) de las esferas a utilizar para calcular la densidad de estas.
4. Llenar la probeta con el fluido a estudiar, preferentemente hasta el tope.
5. Seleccionar uno de los balines que se encuentren en la lista de materiales
6. Depositar el balín sobre la superficie del líquido para observar qué tan rápido cae.
7. Se recomienda realizar el experimento con, al menos, dos esferas diferentes para observar cómo varía el resultado de la viscosidad a diferentes números de Reynolds.
8. Identificar dos puntos, cuya distancia sea conocida, la cual determinará la distancia recorrida por la esfera. **(el profesor será el encargado de recomendarla, de forma analítica o empírica)** para que se tenga movimiento rectilíneo uniforme.
9. Soltar una esfera y, con la ayuda del cronómetro, medir el tiempo que tarda la esfera en recorrer la distancia considerada para obtener la velocidad de caída.
10. Se recomienda repetir al menos cuatro veces el experimento y tomar el promedio de las lecturas.
11. Si el fluido no es totalmente transparente, se puede utilizar una luz puesta al fondo para que se pueda observar el movimiento de la esfera.
12. Medir la temperatura del fluido con ayuda del termómetro de alcohol.
13. Realizar el experimento con cada uno de los fluidos recomendados.

Actividad 2. Viscosímetro Rotacional.

1. Conectar el viscosímetro a la alimentación eléctrica por medio del eliminador.

2. Nivelar el viscosímetro, utilizar para ello los tornillos que se encuentran en la base del dispositivo.
3. Elevar hasta la altura máxima el viscosímetro girando la perilla que se encuentra en la parte posterior del viscosímetro.
4. Llenar uno de los vasos metálicos del viscosímetro con el fluido de estudio.
5. Elegir un husillo, colocarlo en el viscosímetro, colocar el vaso bajo el cabezal y bajar el cabezal con el husillo.
6. Verificar que el fluido de estudio cubra la marca del husillo, de no ser así, agregar más fluido del mismo para que lo haga.
7. Encender el viscosímetro y esperar unos segundos (entre 15 y 30 dependiendo del fluido de trabajo y la velocidad de rotación) a que pase el estado transitorio.
8. Hacer la medición de la lectura; si la velocidad de rotación es muy alta, bajar el pequeño "embrague" que tiene el viscosímetro y el botón de pausa (en ese orden y casi simultáneamente) para realizar la lectura. Si al hacerlo la lectura no se pude leer en el dial, repetir desde el paso anterior.
9. Leer el factor de corrección en la tabla del viscosímetro tomando en cuenta el número de medidor (husillo) y la velocidad de rotación.
10. Si la lectura es muy grande o pequeña, modificar la velocidad de rotación; si el problema continúa, cambiar el medidor.
11. Una vez hecha la lectura, apagar el viscosímetro, subir el cabezal y registrar la temperatura.
12. Calentar en la parrilla eléctrica el fluido de trabajo, posteriormente colocarlo en el viscosímetro, registrando el valor de la viscosidad obtenido y enseguida registrar el valor de la temperatura. Repetir este procedimiento para diferentes valores de temperatura (los intervalos de temperatura los decidirán los alumnos junto con el profesor) y volver a tomar la viscosidad, registrando la temperatura después de medirla.
13. Repetir hasta alcanzar temperaturas altas, dependerán del fluido de trabajo y el tiempo disponible. Utilizar los guantes de carnaza o las pinzas para manipular el vaso metálico cuando se encuentre a altas temperaturas.
14. Si el tiempo lo permite, utilizar algún otro fluido de trabajo. Para hacerlo hay que vaciar la sustancia de regreso a su envase original y lavar el vaso metálico y los husillos del viscosímetro para evitar contaminación de las sustancias.

6. Resultados

Realizar las siguientes actividades: Trazar una gráfica de viscosidad dinámica contra temperatura en la cual se incluirá lo siguiente:

1. Resultados de la viscosidad tomados con el viscosímetro Brookfield.
2. Viscosidad medida con el viscosímetro de bola en caída libre. Debido a que se realizó el experimento en diversas ocasiones, incluir solamente el promedio de los valores obtenidos; si se utilizaron más de una bola, graficar el valor obtenido con cada una.
3. Ajuste de curva con la ecuación que mejor se adapte a los datos experimentales, utiliza uno de los modelos presentados (Ec. 3.2 a Ec. 3.4). Tener cuidado de realizar el ajuste de curva utilizando solamente los datos del viscosímetro rotacional y temperatura absoluta.

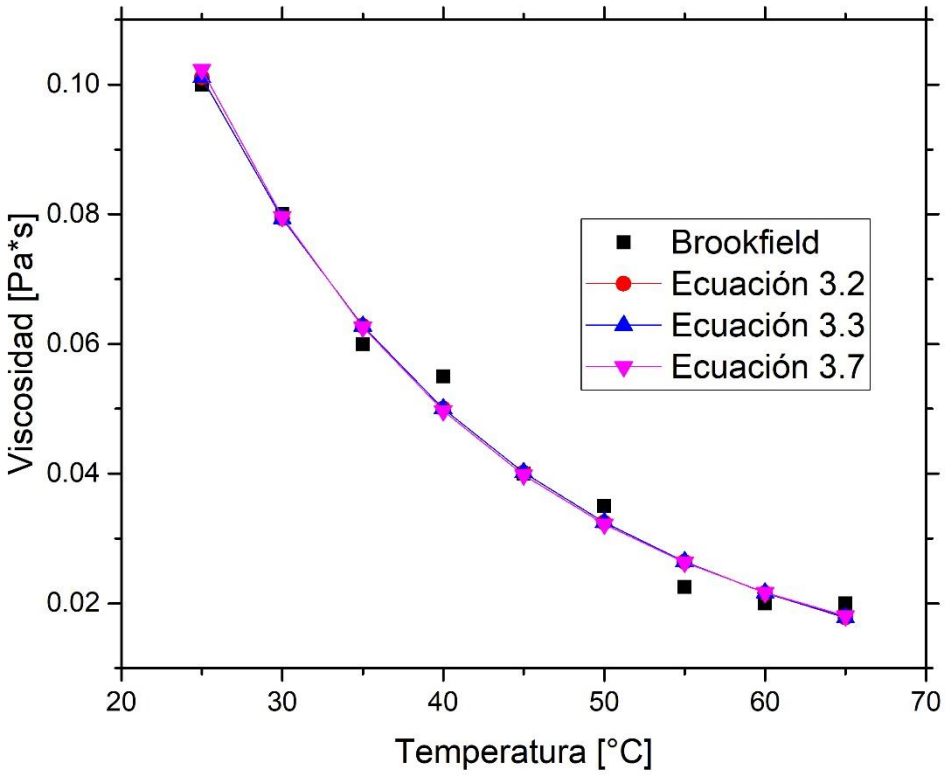


Figura 3.2. Gráfica de viscosidad contra temperatura.

4. Calcular el número de Reynolds que se tiene con el viscosímetro de bola en caída libre, utilizando la medida de viscosidad hecha con el viscosímetro Brookfield, y comparar ambos valores de viscosidad. Observar cómo influye el número de Reynolds obtenido con cada tipo de esfera utilizada en el resultado de la viscosidad.

7. Cuestionario

1. ¿Cuál es la importancia de la viscosimetría? Investiga los diferentes métodos que existen para medir la viscosidad de las sustancias, explicando en que se basan cada uno de ellos
2. ¿Con qué medirías la viscosidad de un shampoo, de vaselina, de salsas, etcétera? ¿Se puede utilizar un viscosímetro como los utilizados en el laboratorio? Justifica tu respuesta.
3. ¿Cómo se comporta la viscosidad con respecto a la temperatura y a qué se debe dicho comportamiento en líquidos y en gases?
4. ¿Cómo influye la temperatura en el comportamiento de la viscosidad en procesos como, el bombeo de sustancias a lo largo de una tubería o en la extrusión de plásticos o algún otro proceso? Justifica tu respuesta de manera lógica.
5. ¿Qué importancia tiene el conocer el comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura en, por ejemplo, los aceites para lubricación de motor o máquinas?
6. ¿Qué debes tener en cuenta para que el viscosímetro de bola en caída libre genere resultados confiables y por qué?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. White F. M. (2011). *Mecánica de fluidos.* 7a edición. McGraw-Hill EUA.
2. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.

10. Anexos

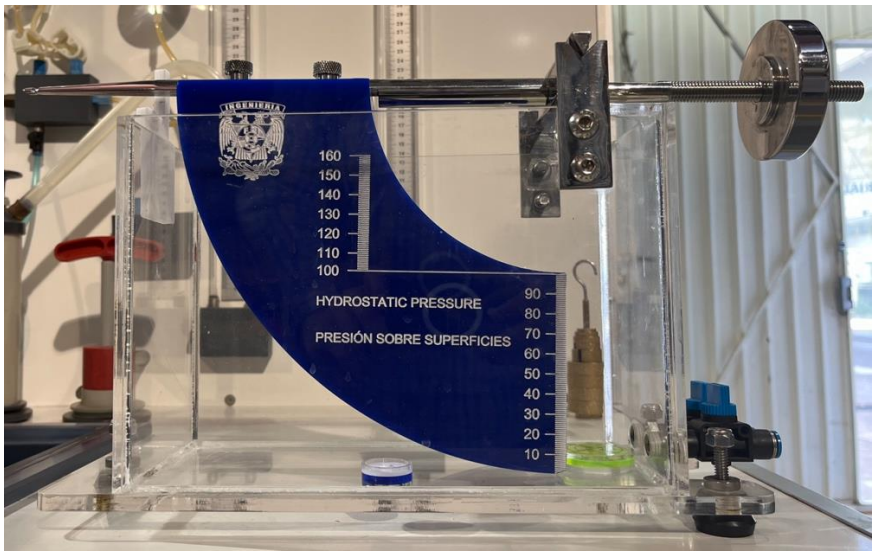
Memoria de cálculo.

Incluir aquí los datos experimentales obtenidos, todas las ecuaciones utilizadas con su análisis de unidades, así como la forma en que se realizaron todos los cálculos para llegar a los resultados obtenidos. También incluir aquí el desarrollo de la ecuación para obtener la viscosidad (Ec. 3.1). Se

deja aquí libre al profesor para dar algún otro material complementario de acuerdo con el enfoque que se quiera dar.

Práctica 4

Fuerzas Sobre Superficies Sumergidas



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir experimentación adecuada; analizar e interpretar datos y utilizar el juicio ingenieril para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar efectivamente en equipos que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	***Riesgo asociado.***
Tanque de Acrílico	Riesgo de ruptura al golpearlo con el dispositivo que funciona como compuerta o con el contrapeso del tornillo sin fin.
Pesas	Posibles lesiones en los dedos de los pies por caída de las pesas.

2. Objetivos

- ✓ Localizar el centro de presión de una superficie sumergida parcial y totalmente.

3. Conceptos básicos y definiciones

El diseño de estructuras de contención requiere el cálculo de las fuerzas hidrostáticas sobre las superficies adyacentes al fluido. Estas fuerzas están relacionadas con el efecto del peso del fluido sobre las superficies que lo contienen. Por ejemplo, un depósito con una base plana y horizontal de área A que contenga una altura H de agua soportará una fuerza vertical hacia abajo igual a $F = \gamma HA$, donde γ es el peso específico del agua. Si la superficie no es horizontal, se requieren cálculos adicionales para determinar las componentes de la fuerza hidrostática.

Si despreciamos las variaciones en la densidad del fluido, la ecuación de la hidrostática nos dice que la presión sobre cualquier superficie sumergida varía linealmente con la profundidad. Esta situación se muestra claramente en la Figura 4.1 para una pared plana vertical. Por lo tanto, el caso de una superficie plana es análogo al problema de flexión y compresión combinadas en resistencia de materiales, ya que en ambos se presenta una distribución lineal de esfuerzos. El problema hidrostático se reduce a fórmulas simples que atañen al centroide o centro de gravedad y a los momentos de inercia de la sección plana.

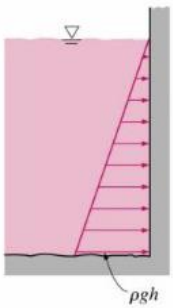


Figura 4.1. Distribución de las fuerzas de presión sobre una pared plana vertical, en donde las flechas horizontales representan cada una de estas fuerzas.

La fuerza total f en una pared plana vertical sumergida es igual a la presión P aplicada en el centroide de la pared multiplicada por el área total de la misma, es decir:

$$f = PA = \rho g \bar{h} \qquad \text{(Ec. 4.1)}$$

donde ρ, g y $\bar{h}$ son respectivamente, la densidad del fluido, la aceleración de la gravedad y la profundidad del centroide de la pared plana vertical. Sin embargo, para equilibrar la contribución del momento de flexión producido por la distribución de fuerzas de presión ejercidas sobre toda la superficie de la pared, la línea de acción de la fuerza resultante no pasa por el centroide sino debajo de éste, hacia la zona de presiones más elevadas. A este punto de la pared en donde se aplica la fuerza resultante se le conoce como ***Centro de Presión***. Despreciando la presión atmosférica, la distancia vertical y_{CP} entre el centroide de la pared plana y el centro de presión se calcula de la siguiente manera:

$$y_{CP} = \frac{I_C}{\bar{h}A} \qquad \text{(Ec. 4.2)}$$

Donde I_C es el momento de inercia con respecto al eje horizontal que pasa por centroide (C) de la pared plana vertical.

En el caso de la distribución de fuerzas sobre una superficie curva es conveniente separar la fuerza resultante de estás fuerzas en una componente horizontal y una componente vertical, como se muestra en la Figura 4.2, donde F_1 es la componente horizontal, F_2 es la componente vertical y F_w el peso del fluido que se encuentra sobre la superficie curva sumergida.

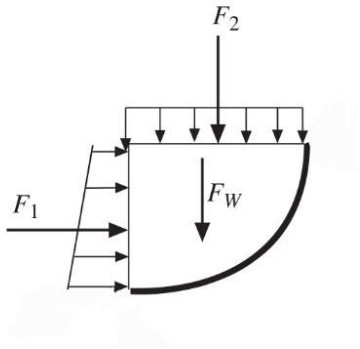


Figura 4.2. Distribución de fuerzas de presión sobre una superficie curva sumergida.

4. Equipo y Material

1. Aparato para simular una compuerta que se va sumergiendo (Figura 4.3).
2. Porta pesas y masas estándar.
3. Flexómetro.
4. Burbuja de nivel.

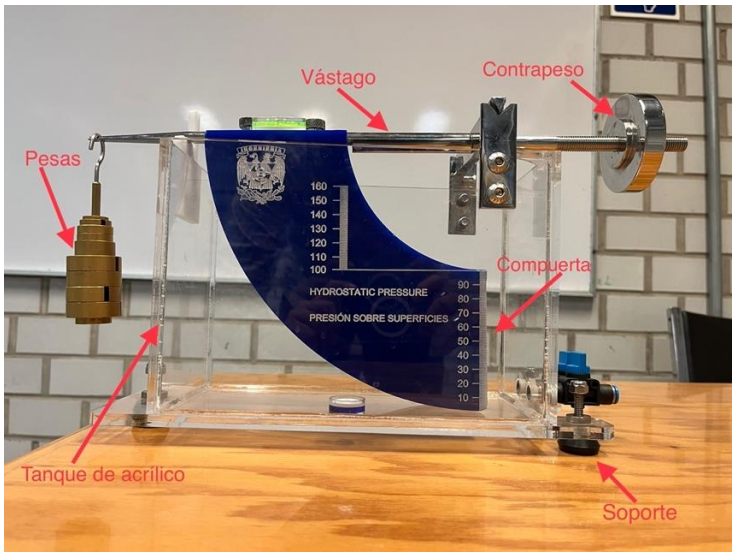


Figura 4.3. Equipo experimental para simular una compuerta que se va sumergiendo.

5. Desarrollo

1. Medir la longitud del vástago (L) y las dimensiones de la compuerta (B y D). (Ver Figuras 4.4 y 4.5).
2. Nivelar la base del equipo (únicamente el acrílico) variando la altura de los soportes en sus esquinas. Es importante hacer esto antes de agregar la compuerta y el agua al dispositivo (Figura 4.3).
3. Medir la distancia R_2 que se muestra en las Figuras 4.4 y 4.5.
4. Colocar el vástago junto con el porta pesas y equilibrarlos con respecto a la base de acrílico.
5. Pesar en la balanza granataria cada una de las pesas que serán utilizadas.
6. Agregar una masa de 30 g, lo cual desnivelará el equipo con respecto a la base de acrílico.
7. Llenar el depósito con agua hasta que se nivele el equipo.
8. Registrar el valor de la masa utilizada.
9. Medir la distancia d (Ver Figuras 4.4 y 4.5).

10. Repetir los puntos del 6 al 9, agregando pesas de diferentes masas hasta alcanzar una masa total de 450 g.
11. Tener cuidado de no dejar caer las pesas al suelo para evitar que se dañen.

Actividad 1. Inmersión parcial.

Tabla de Datos

$L =$ _____ cm
$B =$ _____ cm
$R_2 =$ ____ cm

Tabla 4.1. Tabla de datos experimentales para una inmersión parcial.

m [g]	d [cm]
30	
60	
90	
…	

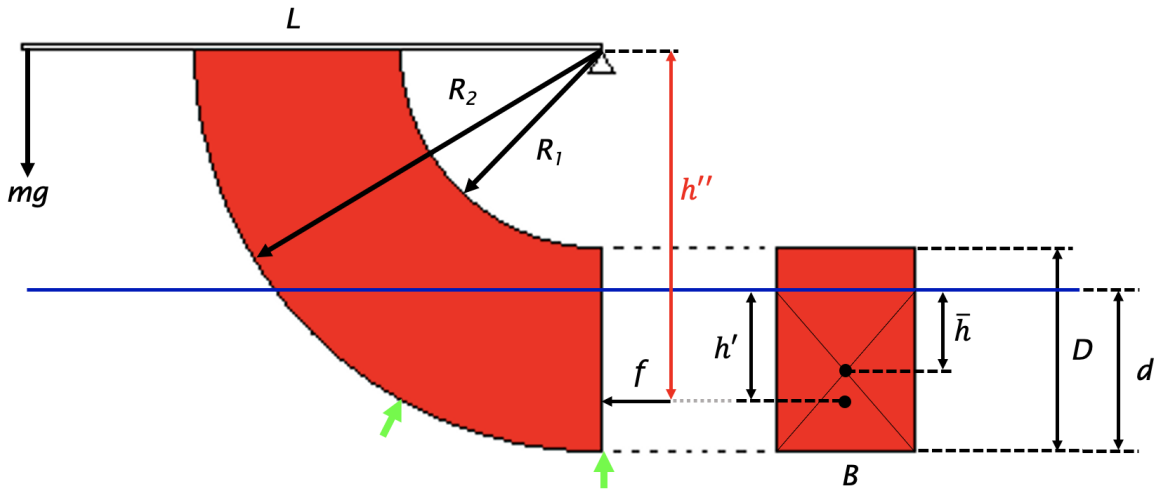


Figura 4.4. Diagrama del equipo experimental que simula una compuerta parcialmente sumergida.

Expresión matemática experimental

Para obtener de forma experimental la distancia al centro de presiones, h'', se requiere el siguiente procedimiento:

La magnitud de la fuerza sobre la cara plana de la compuerta cuya base es B, se calcula como:

$$f = PA = \rho g \bar{h}\left(Bd\right) \qquad \text{(Ec. 4.3)}$$

Por lo tanto:

$$f = \rho g \frac{d}{2}\left(Bd\right) = \frac{\rho g B d^2}{2} \qquad \text{(Ec. 4.4)}$$

Por otra parte, el momento con respecto al eje x (perpendicular al plano de esta hoja de papel), producido por el peso de la masa m (en sentido positivo), debe de ser compensado por el momento producido por la fuerza f debida a la presión ejercida por el agua sobre la cara plana de la compuerta, y se calcula como:

$$M = Fh" = mgL \qquad \text{(Ec. 4.5)}$$

Entonces:

$$h" = \frac{mgL}{F} = \frac{2mL}{\rho B d^2} \qquad \text{(Ec. 4.6)}$$

Con la expresión anterior se obtiene la distancia desde el vástago al centro de presiones calculada experimentalmente.

Expresión matemática teórica

Para poder obtener de forma teórica la distancia (h'') desde el vástago al centro de presiones, se requiere el siguiente procedimiento:

De la teoría de compuertas,

$$h' = \bar{h} + y_{CP} = \bar{h} + \frac{I_C}{A\bar{h}} \qquad \text{(Ec. 4.7)}$$

Donde h' es la distancia entre el nivel del agua y la línea de acción de la fuerza f (ver Figura 4.4). Por lo tanto:

$$h' = \frac{d}{2} + \frac{\frac{Bd^3}{12}}{Bd\left(\frac{d}{2}\right)} = \frac{2}{3}d \qquad \text{(Ec. 4.8)}$$

Además:

$$h'' = R_2 - d + h' \qquad \text{(Ec. 4.9)}$$

Finalmente:

$$h'' = R_2 - \frac{d}{3} \qquad \text{(Ec. 4.10)}$$

Con la expresión anterior se obtiene la distancia desde el vástago al centro de presiones calculada teóricamente.

Actividad 2. Inmersión total.

Tabla de Datos

$L =$ _____ cm
$B =$ _____ cm
$D =$ _____ cm
$R_2 =$ ____ cm

Tabla 4.2. Tabla de datos experimentales para una inmersión total.

m [g]	d [cm]
…	
390	
420	
450	

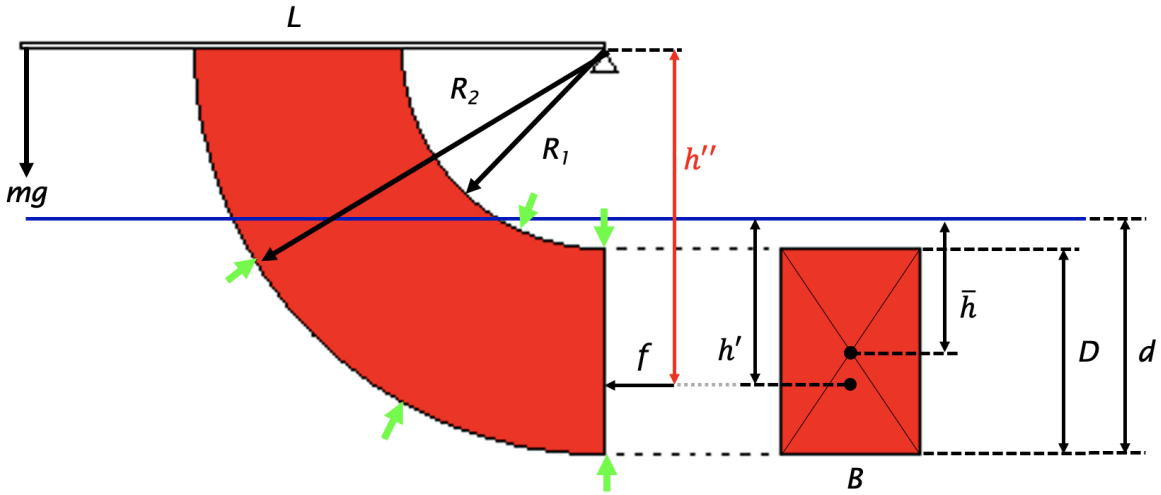


Figura 4.5. Diagrama del equipo experimental que simula una compuerta totalmente sumergida.

De manera similar al caso de inmersión parcial, las siguientes expresiones deben utilizarse para calcular la magnitud de la fuerza resultante y la ubicación del centro de presiones para el caso de inmersión total:

$$f = PA = \rho g \bar{h}(BD) = \rho g BD\left(d - \frac{D}{2}\right) \qquad \text{(Ec. 4.11)}$$

$$M = Fh" = mgL \qquad \text{(Ec. 4.12)}$$

Expresión matemática experimental

$$h" = \frac{mL}{\rho BD\left(d - \frac{D}{2}\right)} \qquad \text{(Ec. 4.13)}$$

Expresión matemática teórica

$$h'' = \frac{\frac{D^2}{12} + \left(d - \frac{D}{2}\right)^2}{d - \frac{D}{2}} + R_2 - d \qquad \text{(Ec. 4.14)}$$

6. Resultados

1. Con los datos obtenidos y las fórmulas presentadas en la sección de desarrollo, llenar las siguientes tablas de resultados:

   Actividad 1. Inmersión parcial.

   Tabla 4.3. Tabla de resultados para una inmersión parcial.

f [N]	h''_{TEO} [m]	h''_{EXP} [m]

   Actividad 2. Inmersión total

   Tabla 4.4. Tabla de resultados para una inmersión total.

f [N]	h''_{TEO} [m]	h''_{EXP} [m]

2. Trazar la gráfica de la distancia h'' vs la profundidad de inmersión (d), tanto para el caso teórico como para el experimental para cada una de las actividades.

7. Cuestionario

1. ¿A qué se debe que el centro de presiones siempre se encuentra por debajo del centro de área en una superficie plana sumergida?
2. Explique por qué las fuerzas que se aplican sobre las superficies curvas de la compuerta y el peso de esta, no se toman en cuenta en el balance de momentos.
3. Comentar acerca de la variación del empuje hidrostático con la profundidad.
4. ¿A qué se debe la discrepancia entre los resultados del experimento y los teóricos, en cuanto a la profundidad del centro de presión?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
2. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.

Práctica 5

Medición de velocidad

Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir experimentación adecuada; analizar e interpretar datos y utilizar el juicio ingenieril para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar efectivamente en equipos que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	***Riesgo asociado.***
Operar a más de 40 Hz	Vibración excesiva en el túnel de viento.
Hilo caliente	Ruptura del hilo debido a manejo inadecuado.
Velómetro	Ruptura debido a manejo inadecuado.
Ventilador del túnel de viento	Daños físicos en manos y brazos al operar a una distancia muy corta entre el alumno y conjunto motor eléctrico-ventilador.

2. Objetivos

- ✓ Medir la velocidad puntual de un flujo de aire al interior del túnel de viento (zona de prueba), con diferentes instrumentos.
- ✓ Medir la presión dinámica con un tubo de Prandtl para el cálculo posterior de la velocidad promedio del flujo de aire en la sección de prueba del túnel de viento.
- ✓ Obtener una ecuación para correlacionar la velocidad del aire a diferentes frecuencias del motor del túnel de viento.

3. Conceptos básicos y definiciones

La velocidad de un flujo es una de las propiedades cinemáticas más importantes en la mecánica de fluidos. Esta puede ser medida de forma puntual por medio de diversos instrumentos que actúan bajo diferentes principios físicos, la mayoría de estos, midiéndola de forma indirecta. Dos de estas formas de medir la velocidad son el tubo de Pitot/Prandtl y el anemómetro de hilo caliente.

Tubo de Pitot/Prandtl.

Las sondas de Pitot (figura 5.1.a) y de Pitot estática (figura 5.1.b, está última también llamada tubo de Prandtl) son dos instrumentos que miden en forma indirecta la velocidad de un flujo mediante una diferencia de presión. Constan de un tubo delgado con un orificio de borde redondeado que se encuentra alineado con el flujo de velocidad V.

Fue inventado por el ingeniero Henri Pitot en 1732 y modificado en el siglo XIX por Henry Darcy, dando origen al tubo de Pitot estático o tubo de Prandtl, el cual es un tubo de Pitot que tiene orificios en la pared exterior del tubo. Se utiliza para medir la velocidad del viento en aparatos aéreos y para medir las velocidades de aire y gases en aplicaciones industriales, midiendo la velocidad en un punto dado de la corriente de flujo y no la media de la velocidad del flujo.

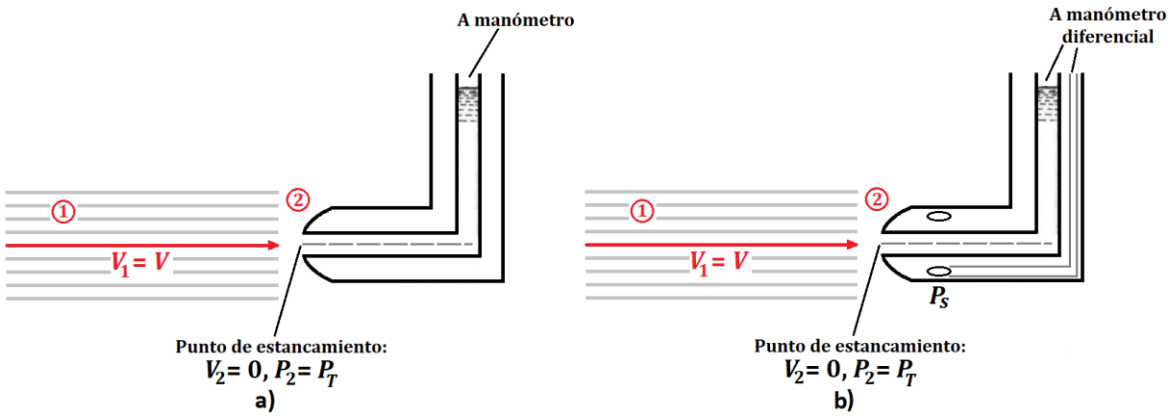


Figura 5.1. a) Tubo de Pitot. b) Tubo de Prandtl (Pitot estático).

Como se puede observar en la figura 5.1, por un lado, en el punto 1, se tiene al flujo con velocidad $V_1 = V$, densidad ρ y presión $P_1 = P_S$, que es la **presión estática**. Por otro lado, en el punto 2 se tiene un punto de estancamiento, en el cual el flujo se frena, por lo que la velocidad es de $V_2 = 0$, y el flujo junto a este punto se divide y circula alrededor del tubo. En este punto el tubo mide la **presión total, $\boldsymbol{P_2 = P_T}$** (también llamada **presión de estancamiento**, presión o de remanso) y que es igual a la suma de la presión estática P_S y de la presión dinámica, P_D.

$$P_T = P_S + P_D \qquad \text{(Ec. 5.1)}$$

Si se considera flujo incompresible y no viscoso se puede aplicar la ecuación de Bernoulli,

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 \qquad \text{(Ec. 5.2)}$$

Tomando en cuenta que $z_1 \approx z_2$, sustituyendo y despejando V se puede demostrar que

$$V = \sqrt{\frac{2(P_T - P_S)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2P_D}{\rho}} \qquad \text{(Ec. 5.3)}$$

En el caso de utilizar un tubo de Prandtl, este se conecta a un manómetro diferencial para obtener directamente la presión dinámica (diferencia entre la total y la estática) y, con ella, la velocidad, figura 5.2.a. Mientras que en el caso tubo del tubo de Pitot, se mide la presión total o de estancamiento y la presión estática es medida en algún otro punto en el flujo como se observa en la figura 5.2.b.

Figura 5.2. a) Tubo Pitot estático o Prandtl. b) Tubo de Pitot y tomas estáticas de presión independientes.

Además de ser un instrumento sencillo, barato y confiable por no tener partes móviles. También provoca una caída pequeña de presión y no perturba de forma considerable al flujo siempre y cuando el diámetro sea pequeño comparado con el lugar donde se está midiendo; por ejemplo, al medir el flujo en una tubería, el diámetro del tubo de Pitot debe ser pequeño comparado con el diámetro de esta. Sin embargo, deben tenerse consideraciones para su correcto funcionamiento, por ejemplo: debe llevar un correcto mantenimiento para evitar que se "tape" el tubo provocando lecturas incorrectas, debe estar alineado adecuadamente con el flujo para evitar errores significativos, figura 5.2.

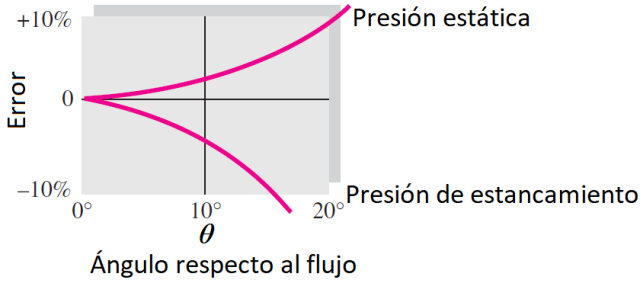


Figura 5.3. Error en las presiones en función del ángulo entre el tubo y el flujo (tomado y modificado de White, 2011).

Finalmente, se debe recordar que su funcionamiento se basa en la ecuación de Bernoulli, que considera un flujo no viscoso. Para esto se debe tomar en cuenta la definición del número de Reynolds para el tubo de Pitot.

$$\mathrm{Re} = \frac{Fuerzas\ de\ inercia}{Fuerzas\ viscosas} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_P}{\mu} \qquad \text{(Ec. 5.4)}$$

Donde D_P es el diámetro del tubo de Pitot y μ la viscosidad del fluido. Así pues, se debe asegurar un alto número de Reynolds (altas velocidades y/o fluidos poco viscosos) para que sea válida la ecuación de Bernoulli; White indica que para Reynolds mayores a 1000 se puede considerar válido,

sin embargo, algunos fabricantes sugieren números de Reynolds mayores a 20,000 para mediciones adecuadas (An Introduction to Pitot Tubes and Probes, s.f. https://www.omega.com/en-us/resources/pitot-tube). También se recomienda utilizar un manómetro adecuado, con buena resolución y velocidad de respuesta. Adicionalmente, se deben evitar mediciones donde en zonas donde las fuerzas viscosas dominan, por ejemplo, en la capa límite, aunque, cabe mencionar, hay factores y procedimientos para la corrección de la velocidad medida con un tubo de Pitot a bajos números de Reynolds o en capa límite (Spelay *et al*, 2015 y Bailey *et al*, 2013, respectivamente).

Anemómetro de Hilo Caliente.

Otra sonda de velocidad es el Hilo Caliente (HC). Este instrumento puede medir la velocidad de forma puntual y está basado en el principio del enfriamiento por convección de un cuerpo a alta temperatura.

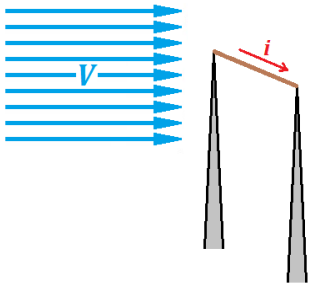


Figura 5.3. Principio del anemómetro de Hilo Caliente.

Esta sonda consta de un hilo metálico delgado (10 µm o menos) que puede ser de platino o níquel de resistencia, R, sujetado en dos soportes metálicos entre los que hay una diferencia de potencial, provocando que por el hilo circule una corriente eléctrica, i, generándose calor por efecto Joule (I^2R). Cuando se encuentra en equilibrio, el calor generado es el mismo que se pierde principalmente por convección debido al flujo. Si hay un cambio en la velocidad, cambia la tasa de transferencia de calor y la temperatura del hilo hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Los soportes están conectados a un circuito eléctrico que amplifica y controla al anemómetro dando como resultado un voltaje de salida para cada valor de velocidad. De esta forma, el calor perdido se puede modelar con la Ley de King (en honor a L. V. King, quien ideó este procedimiento)

$$q = I^2R \approx \left(T_W - T_f\right)(a + b \cdot V^n) \qquad \text{(Ec. 5.5)}$$

Donde T_W y T_f son las temperaturas del hilo y del fluido, respectivamente, mientras que a, b y n son coeficientes que se obtienen mediante una calibración.

El anemómetro se puede operar de dos formas: a temperatura constante, CTA (*Constant Temperature Anemometer*) o a corriente constante, CCA (*Constant Current Anemometer*), siendo

la primera la más común debido a su mayor facilidad de uso, la alta velocidad de respuesta y el bajo ruido, a pesar de que necesita un circuito electrónico más complejo. De esta forma se tiene una sonda capaz de realizar mediciones para flujo laminar o turbulento, sin embargo, debido a su fragilidad, no se debe utilizar en líquidos. Para ello se utiliza una película metálica delgada, normalmente de platino y que tiene una operación similar al hilo caliente. También permite la medición de flujos bidimensionales y tridimensionales cambiando la probeta (figura 5.4).

Figura 5.4. Probetas para flujos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales y anemómetro de película caliente. Dantec Dynamics (2001) [Diapositiva de Power Point]. Dantec Dynamics. https://www.dantecdynamics.com.

Este tipo de anemómetro puede ser más o menos sofisticado, de acuerdo con el uso que se le vaya a dar: investigación (hilo y probeta más pequeña provocando menos perturbación en el flujo, mayor resolución temporal y sensibilidad) o mediciones de campo (hilo más robusto y mayor facilidad de ajuste y transporte).

Figura 5.5. Hilo caliente para investigación (izquierda) y para mediciones de campo (derecha). Equipo del laboratorio de termofluidos.

Velocidad promedio y flujo volumétrico.

El flujo volumétrico es la cantidad de volumen de un fluido que atraviesa un área por unidad de tiempo. En términos de la velocidad de un flujo:

$$Q = \int (\boldsymbol{V} \cdot \boldsymbol{n})\, dA \qquad \text{(Ec. 5.6)}$$

Donde $\boldsymbol{V}$ es el vector velocidad del flujo y $\boldsymbol{n}$ es el vector normal a la superficie a través de la cual se da el flujo. Si dividimos el flujo volumétrico entre el área por donde fluye, obtenemos la velocidad promedio, o bien

$$V_{prom} = \frac{\dot{Q}}{A} \qquad \text{(Ec. 5.7)}$$

Debido a la condición de no deslizamiento en paredes y a perturbaciones que pudiera haber en un flujo, rara vez se puede obtener flujo uniforme estacionario, por lo que se suele utilizar el valor de la velocidad promedio. Algunos parámetros, como el Número de Reynolds o el flujo volumétrico, se calculan a partir de este, de ahí la importancia de su medición.

En el caso de ductos, se debe tomar la velocidad puntual en varias zonas de la sección transversal y obtener el promedio aritmético de dichas mediciones para obtener la velocidad promedio. La **ASTM International** recomienda dividir imaginariamente al ducto (circular o rectangular) en diversas secciones de acuerdo con el área de la sección transversal, figura 5.6, y tomar mediciones puntuales de velocidad en ellas para el posterior cálculo de la velocidad promedio y el flujo (ASTM D3464-96 Y ASTM D3154-96). Esa medida debe hacerse en un punto al menos 8 diámetros equivalentes internos aguas abajo y al menos 2 aguas arriba de cualquier cambio en la geometría, o en un punto donde sea lo más cercano a esta condición, si es que resulta impráctica.

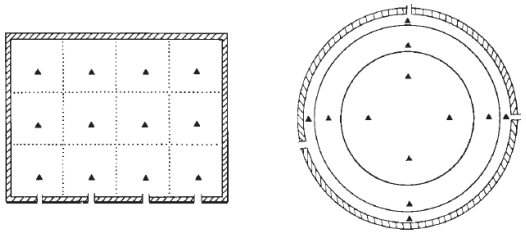


Figura 5.6. Segmentación del área para toma de mediciones de velocidad para el cálculo de la velocidad promedio para ductos a) rectangulares y b) circulares.

El mismo procedimiento proporciona, además, el número mínimo de mediciones a realizarse de acuerdo con el tamaño del ducto, sugiriendo tomar un promedio temporal en cada punto en caso de que la velocidad no sea estacionaria y cuidando que el diámetro del tubo de Pitot no sea mayor que 1/30 del diámetro del ducto para minimizar perturbaciones en el flujo.

Tabla 5.1. Número mínimo de mediciones para el cálculo de la velocidad promedio de acuerdo con el tamaño del área de la sección transversal para ductos rectangulares.

Área de la sección transversal en m^2	Número de mediciones
Menor de 0.2	4
Entre 0.2 y 2.3	12
Mayor de 2.3	20

4. Equipo y Material

1. Túnel de viento con accesorios.
2. Tubos de Prandtl.
3. Manómetro digital.
4. Velómetro.
5. Anemómetro de hilo caliente.
6. Flexómetro.
7. Transportador con nivel de burbuja.

5. Desarrollo

Preparación de los anemómetros. Antes de comenzar con la actividad, se debe preparar adecuadamente los instrumentos de medición para corroborar que funcionen correctamente.

Figura 5.7. Anemómetros a utilizar en la práctica de laboratorio. a) Tubo de Prandtl de columna de agua, b) Tubo de Prandtl digital, c) Velómetro, d) Hilo Caliente.

Tubo de Prandtl de columna de agua (figura 5.7.a).

1. Comprobar que las mangueras no se encuentren tapadas y conectarlas en el banco de tubos con agua que se encuentra junto al túnel de viento.
2. Medir el ángulo del banco de tubos con agua (inclinado previamente con la ayuda del tornillo de sujeción) con el transportador con nivel de burbuja.

Tubo de Prandtl digital (figura 5.7.b).

1. Conectar las mangueras en el manómetro que viene con la sonda, teniendo en cuenta que la medición estática es la que se encuentra perpendicular a la base del tubo.
2. Prender el manómetro, elegir las unidades (m/s) y si el instrumento no marca 0, dejar apretado el botón HOLD/ZERO para su ajuste. El manómetro de este tubo de Prandtl, a diferencia del de columna de agua, es un manómetro de diafragma.

Velómetro (figura 5.7.c).

1. Conectar las mangueras en la parte posterior de la carátula y en la probeta adecuada guiándose con los signos **+** y **–** que se encuentran marcados para su correcta colocación. La sonda viene con diversas probetas, se aconseja utilizar la probeta roja con la escala hasta 5000 ft/min.
2. No mover la carátula mientras se realiza una medición pues esto provoca que la aguja se desplace y se tenga una lectura incorrecta.

Hilo caliente (figura 5.7.d).

1. Conectar la probeta con el hilo en el dispositivo y encenderlo, asegurándose previamente que el hilo se encuentre cubierto con su tapa.
2. Elegir las unidades adecuadas (m/s) y, en caso de que no marque cero, dejar apretado el botón aproximadamente 3 segundos ZERO para que se ajuste.

Actividad 1. Medición de la velocidad puntual de un flujo de aire en un túnel de viento.

1. Abrir el túnel de viento para remover tuercas y tapones laterales para insertar instrumentos de medición.
2. Cerrar el túnel viento, apretando el tornillo de cierre y tapando parte inferior para no afectar las mediciones de velocidad.
3. Conectar el túnel de viento al suministro eléctrico y encender el interruptor principal. El túnel debe ser operado presionando únicamente cuatro botones del panel de control: iniciar (START), parar (STOP), subir y disminuir frecuencia (flechas arriba y abajo, respectivamente), figura 5.8.
4. Encender el motor del túnel viento (botón START) y colocarlo a una frecuencia (usando las flechas), f; se sugiere comenzar con un calor de frecuencia entre 15 y 22 Hz.
5. Introducir los instrumentos por los orificios laterales de la zona de visualización del túnel alineándolos en sentido del flujo (eje axial del túnel) y registrar las mediciones con todos los anemómetros en la Tabla 5.2: velocidad para el tubo de Prandtl digital, el velómetro y el hilo caliente, diferencia de alturas, $\Delta h_{Prandtl}$, para el tubo de Prandtl de columna de agua (medir el ángulo).
6. Aumentar la frecuencia del motor (se sugiere aumentos de 2 o 3 Hz) y volver a medir la velocidad con los instrumentos.
7. Repetir los pasos 5 y 6 hasta obtener 5 o 6 mediciones totales dando incrementos constantes a la frecuencia y procurando no sobrepasar los 40 Hz.
8. Apagar el Hilo Caliente y desmontarlo. Desmontar también el tubo de Prandtl de columna de agua y el velómetro; no olvidar regresar el banco de tubos a su posición vertical.

Figura 5.8. Túnel de viento del laboratorio.

Tabla 5.2. Datos experimentales

f [Hz]	$\Delta h_{Prandtl}$ [mm_{agua}]	$V_{Prandtl\ digital}$ [m/s]	$V_{Velómetro}$ [ft/min]	$V_{HiloCaliente}$ [m/s]

Actividad 2. Medición de la velocidad promedio de un flujo de aire en un ducto con el tubo de Prandtl digital.

Para esta actividad se tomó en cuenta el área de la sección transversal de la zona de visualización del túnel de viento y el procedimiento marcado por la ASTM (ASTM D3464-96), considerando la Tabla 5.1 y la figura 5.6. Se medirá entonces la velocidad del flujo de aire en 4 puntos de la sección transversal del túnel de viento, mostradas en la figura 5.9, para calcular la velocidad promedio y el flujo volumétrico de aire en el túnel de viento (cuya área de sección transversal es de $A = 0.08843$ m^2) con el siguiente procedimiento:

1. Sin apagar el túnel de viento, fijar el motor en una frecuencia entre 15 y 40 Hz, a elección del grupo.
2. Marcar con cinta adhesiva una distancia de 23 centímetros en el tubo medidos a partir de la toma de presión total.
3. Introducir el tubo de Prandtl digital con un ángulo de 64° en el orificio lateral de la zona de visualización del túnel de viento como se muestra en la figura 5.9 hasta donde se realizó la

marca en el tubo y registrar las mediciones en la tabla 5.3; utilizar el transportador con nivel de burbuja o con la herramienta auxiliar para ello.

4. Repetir el procedimiento en el lado opuesto de la zona de visualización del túnel de viento, tapando previamente el orificio del lado opuesto.
5. Apagar el tubo de Prandtl digital, desmontar las mangueras, disminuir la frecuencia, apagar el motor del ventilador (botón STOP), desconectar equipo del suministro eléctrico, regresar el banco de tubos a su posición vertical, colocar los tapones del túnel y entregar el equipo.

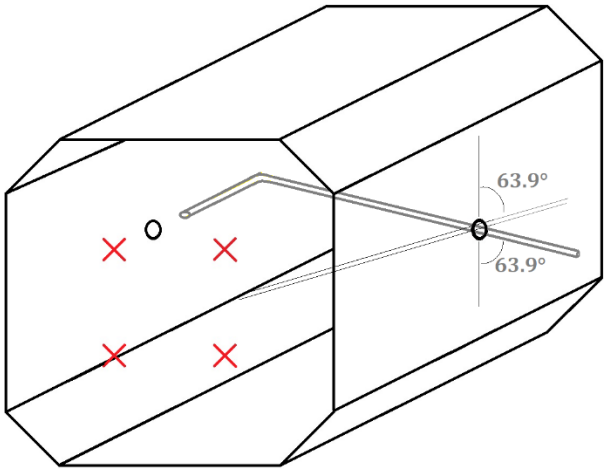


Figura 5.9. Diagrama de la posición del tubo de Prandtl digital para las mediciones de velocidad.

Tabla 5.3. Datos experimentales para obtener la velocidad promedio del flujo de aire en la sección de prueba del túnel de viento.

V $[\mathbf{m/s}]$				

6. Resultados

Para la **actividad 1**. Obtener la presión dinámica, P_D, con la diferencia de alturas $\Delta h_{Prandtl}$, así como la velocidad respectiva en el tubo de Prandtl; el valor de la velocidad del tubo de Prandtl digital, del velómetro y del hilo caliente en unidades del SI. Completar la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Tabla de resultados de la actividad 1.

f [Hz]	P_D [Pa]	$V_{Prandtl}$ [m/s]	$V_{Velómetro}$ [m/s]	$V_{HiloCaliente}$ [m/s]	$V_{Prandtl\ digital}$ [m/s]

Graficar los resultados y obtener, mediante regresión lineal, una curva de ajuste para cada instrumento que modele la velocidad en función de la frecuencia.

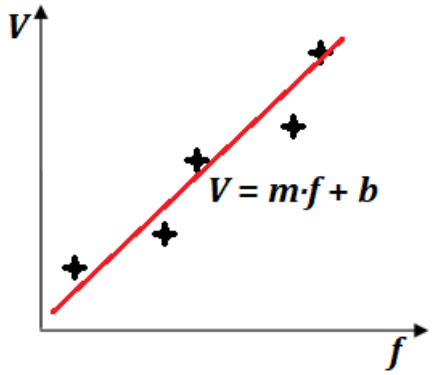


Figura5.8. Gráfica de velocidad contra frecuencia con datos experimentales y ajuste de curva.

Para la **actividad 2**. Calcular la velocidad promedio, V_{prom} con los datos de la tabla 5.3, y el flujo volumétrico, $\dot{Q}$, en el ducto con la ecuación 5.7.

7. Cuestionario

1. ¿Cuál es la relevancia del valor mínimo de frecuencia del motor? ¿Qué pasa si el valor seleccionado es más pequeño?
2. ¿Dentro del túnel las presiones manométricas generadas son positivas o negativas? Explique su respuesta.
3. ¿Es aconsejable conectar las mangueras del manómetro digital de cierta manera, o eso no importa para obtener una lectura?
4. ¿Qué medidor de velocidad presentó los valores más grandes? Explique dicho comportamiento.
5. ¿Qué medidor de velocidad presentó los valores más pequeños? explique dicho comportamiento
6. Si tuvieras que elegir uno de los anemómetros utilizados para realizar el tipo de medición que se llevó a cabo (flujo uniforme, estacionario a número de Reynolds moderado), ¿cuál sería y por qué?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
2. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.
3. D3154. *Standard Test Method for Average Velocity in a duct (Pitot Tube Method).* ASTM International (2000), USA.
4. D3464. *Standard Test Method for Average Velocity in a duct using a Thermal Anemometer.* ASTM International (2001), USA.

Fuentes complementarias

5. Spelay, R. B., Adane, K. F., Sanders, R. S., Sumner, R. J., Gillies, R. G. (2015). The effect of low Reynolds number flows on pitot tube measurements. *Flow Measurement and Instrumentation, Volume 45,* 247-254,
6. Bailey, S.C.C., Hultmark, M, Monty, J.P., Alfredsson, P.H. (2013). Obtaining accurate mean velocity measurements in high Reynolds number turbulent boundary layers using Pitot tubes. *Journal of fluid mechanics,* 2013-670.

Práctica 6

Medición de gasto

Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir experimentación adecuada; analizar e interpretar datos y utilizar el juicio ingenieril para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar efectivamente en equipos que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	***Riesgo asociado.***
Manómetro de Mercurio	Intoxicación por contacto del mercurio con la piel o ingestión accidental.

2. Objetivos

- ✓ Calcular tanto el gasto volumétrico real (volumen y tiempo) como el obtenido a través de la caída de la presión y comparar dichas mediciones.
- ✓ Obtener el coeficiente de descarga correspondiente a cada medidor por obstrucción utilizando los valores medidos.

3. Concepto básicos y definiciones

La medición de flujo es la cantidad de volumen de fluido que pasa a través de un área en un intervalo de tiempo. La medición precisa del flujo resulta esencial para el control de procesos industriales, la evaluación del rendimiento de motores, sistemas de enfriamiento, etc. Existen muchos tipos de medidores de flujo disponibles en el mercado. La elección del tipo básico de medidor de fluido y su sistema indicador dependen de varios factores, algunos importantes son el rango y el tipo de fluido.

Rango: Los medidores disponibles comercialmente pueden medir flujos desde unos pocos mililitros por segundo $[mL/s]$ para experimentos precisos de laboratorio hasta varios miles de metros cúbicos por segundo $[m^3/s]$ para el agua de riego y los sistemas de agua y alcantarillado municipales. Entonces, para la selección de un medidor particular, es necesario conocer el orden de magnitud general de la rapidez de flujo y el rango de las variaciones esperadas.

Tipo de fluido: El desempeño de algunos medidores de flujo se ve afectado por las propiedades y la condición del fluido. Una consideración básica es si el fluido es un líquido o gas. Otros factores importantes son; la viscosidad, temperatura, corrosividad, conductividad eléctrica entre otros. Los lodos y fluidos con fases múltiples requieren medidores especiales.

Existe un tipo de dispositivos (Venturi, placa de orificio y tobera) que a través de la caída de presión permiten calcular el flujo volumétrico. En esta práctica se utilizarán el Venturi y placa de orificio.

Tubo venturi

El Tubo venturi, Fig. 6.1, es un dispositivo que provoca cambios en la presión del fluido que pasa por él. En esencia, éste es una tubería de menor diámetro entre dos tramos cónicos. La presión varía en la proximidad de la sección estrecha; el flujo proveniente de la tubería principal se acelera mediante una sección estrecha llamada garganta, donde se disminuye la presión del fluido. Enseguida, el flujo se expande a través de la porción divergente hasta el mismo diámetro de la tubería principal llamada sección *2*. Estas tomas de presión van unidas a los dos lados de un manómetro diferencial de manera que la altura h es una indicación de la diferencia de presión $(P_1 - P_2)$.

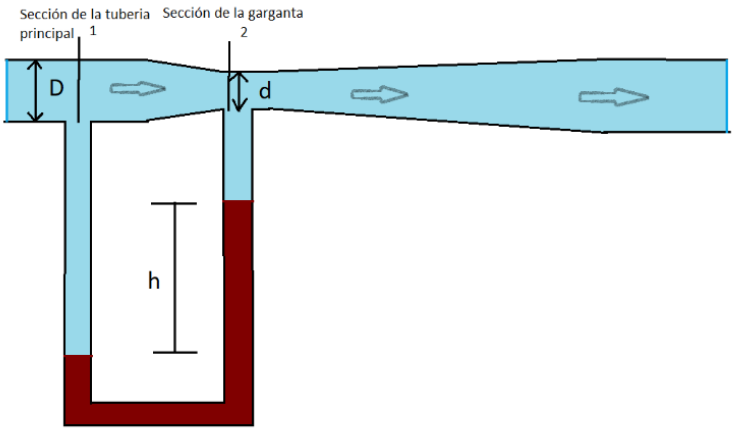


Figura 6.1. Tubo venturi.

Placa de orificio

Una placa plana con un agujero de bordes rectos, maquinados de forma precisa, se refiere como un orificio, Fig. 6.2. Cuando se colocan orificios concéntricos en una tubería, provoca que el flujo se contraiga súbitamente a medida que se acerca al orificio y después se expande de nuevo repentinamente hasta el diámetro de la tubería principal. La corriente que fluye a través del orificio forma una vena contracta (sección 2) y la velocidad de flujo resulta en una disminución de la presión aguas abajo del orificio.

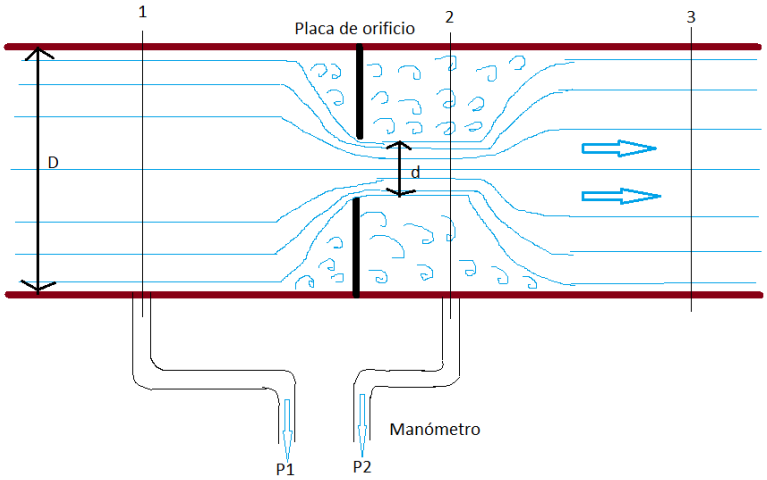


Figura 6.2. Placa de orificio

4. Equipo y Material

El equipo a utilizar en esta práctica está compuesto por:

1. Banco de pruebas para medidores de gasto.
2. Sección de tubería con placa de orificio.
3. Sección de tubería con tubo venturi.
4. Cronómetro.

5. Desarrollo

Actividad 1. Medición del gasto volumétrico con placa de orificio.

El diámetro interior de la tubería principal es de 39 mm y el diámetro del orificio de la placa es de 22 mm.

1. Colocar la sección de tubería que tiene la placa de orificio en el banco de pruebas, poniendo especial atención en que los empaques de cada uno de los extremos de la sección de tubería se encuentren en su lugar (1).

Figura 6.1. Equipo. Ubicación de zona de interés (1).

2. Conectar las mangueras que van al manómetro de mercurio en cada una de las válvulas (2) que se encuentran en la placa de orificio, teniendo cuidado que dichas válvulas se encuentren totalmente cerradas al igual que las válvulas de purga del manómetro (3).

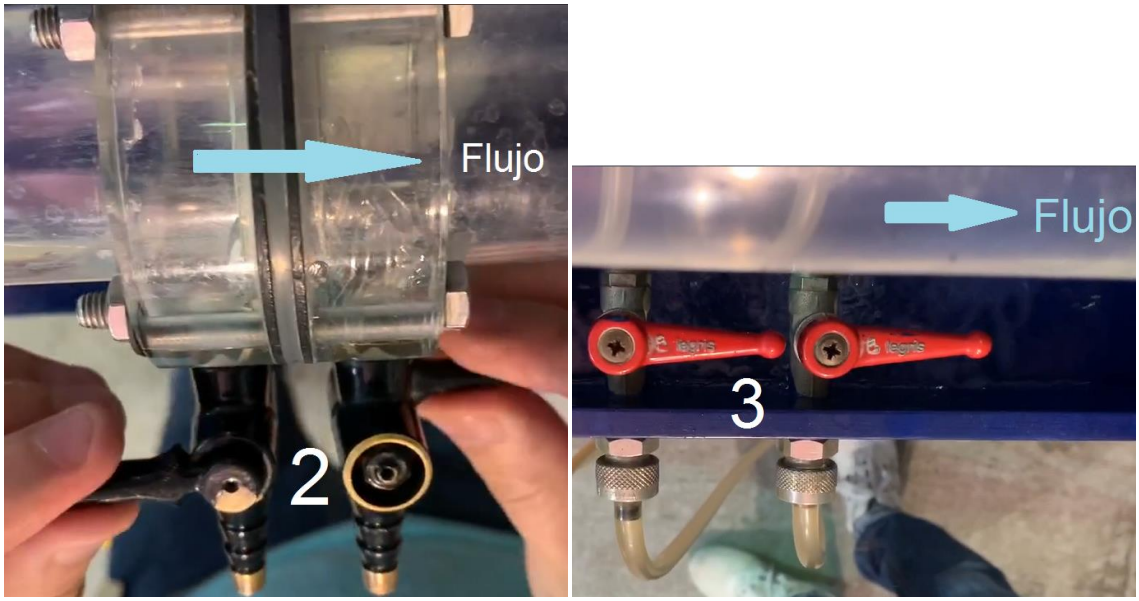


Figura 6.2. Ubicación de zona de interés (2) y (3).

3. Abrir gradualmente la válvula que regulará el gasto a lo largo del experimento (4) y encender el equipo (5) apretando el botón negro para que el agua (fluido de trabajo), inicie a circular por el sistema.

Figura 6.3. Ubicación de zona de interés (4) y (5).

4. Abrir las válvulas (2) que se encuentran en la placa de orificio para que el agua pase y expulse el aire que tienen las mangueras por la zona en las que se encuentran las válvulas de purga, dejando dichas mangueras totalmente purgadas de aire.
5. Una vez purgadas las mangueras se debe de abrir al mismo tiempo y lentamente las dos válvulas de purga para evitar fuertes cambios de presión que puedan hacer que el manómetro de mercurio se dañe. Abiertas totalmente las válvulas de purga (3) se tendrá en el manómetro una diferencial de presión la cual se utilizará como la primera medición.

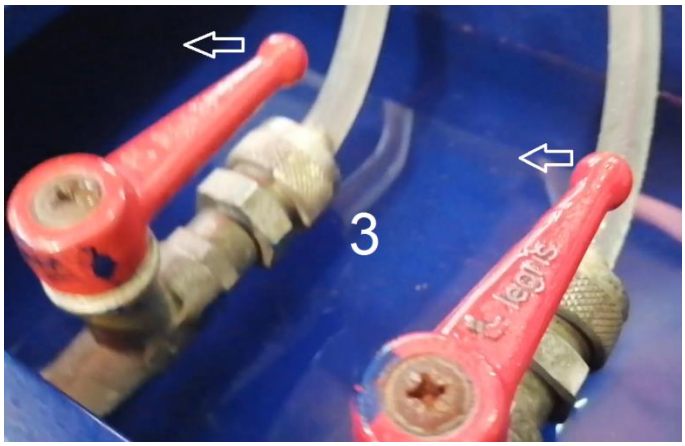


Figura 6.4. Ubicación de zona de interés (3) purga de aire en mangueras.

Medición del gasto real con el tanque volumétrico. Con la primera diferencia de presiones se tomará el gasto que se tiene en el tanque volumétrico donde se descarga el agua, dicha medición se realizará de la siguiente manera:

6. Se obstruirá el flujo del agua dejando caer una esfera en el orificio (6) por donde esta se evacua.

Figura 6.5. Ubicación de zona de interés (6).

7. En la zona de medición del volumen (7) se dejará que el agua pase a la segunda escala de medición y marque 5 litros, momento en el que se iniciará a tomar el tiempo con el cronometro.

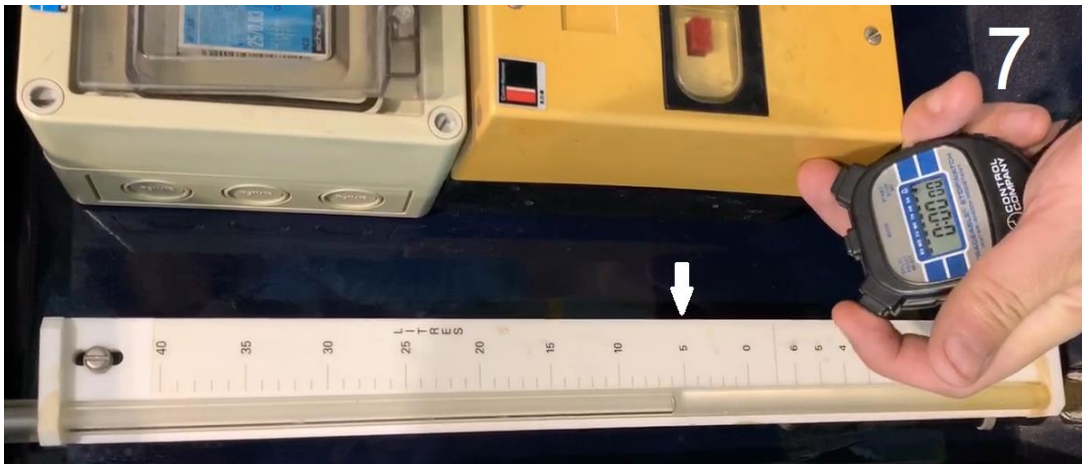


Figura 6.6. Ubicación de zona de interés (7).

8. Se tomará el tiempo que tarda en llenarse cierta cantidad de volumen en el medidor de volumen (7), se recomienda usar volúmenes altos para minimizar errores en el accionamiento del cronómetro (iniciar y detener) en el conteo del tiempo. Para gastos

bajos se recomienda 10 litros, y para gastos altos 20 litros. Después de realizar las mediciones, quitar la esfera para liberar el fluido del tanque volumétrico.

Se sugiere realizar la medición de gasto al menos 5 veces, variando el gasto con la válvula del equipo (4). Llenar la siguiente Tabla de datos.

Tabla 6.1: Datos experimentales, actividad 1.

Evento	Volumen [l]	Tiempo [s]	Δh [mm]
1			
2			
3			
4			
5			

Los datos obtenidos de volumen y tiempo serán utilizados para calcular el gasto real del agua, Q_{real}.

Actividad 2. Medición del gasto volumétrico con el tubo venturi.

El diámetro interior de la tubería principal es de 39 mm y el diámetro de la garganta del tubo venturi es de 18 mm.

Efectuar el procedimiento descrito en la actividad 1 (incisos 1 a 8), pero ahora con el tubo venturi.

Se sugiere realizar la medición de gasto al menos 5 veces, variando el gasto con la válvula del equipo (4). Llenar la siguiente Tabla de datos.

Tabla 6.2: Datos experimentales, actividad 2.

Evento	Volumen [l]	Tiempo [s]	Δh [mm]
1			
2			
3			
4			
5			

Los datos obtenidos de volumen y tiempo serán utilizados para calcular el gasto real del agua, Q_{real}.

6. Resultados

Adicionalmente se tendrán que desarrollar cálculos para determinar el gasto real, la velocidad promedio, el número de Reynolds, la diferencia de presiones, el gasto ideal, el coeficiente de descarga y el gasto real del equipo para la placa de orificio y para el tubo de Venturi. Los resultados obtenidos se anotarán en las Tablas 6.3 y 6.4.

Tabla 6.3: Resultados para la placa de orificio.

Lectura	Q_{real} [m^3/s]	V_{prom} [m/s]	Re [1]	Δh [m]	ΔP [Pa]	Q_I [m^3/s]	C_d [1]	$Q_{r\ equipo}$ [m^3/s]	$Error$ [%]
1									
2									
3									
:									
n									

Tabla 6.4: Resultados para el tubo de Venturi.

Lectura	Q_{real} [m^3/s]	V_{prom} [m/s]	Re [1]	Δh [m]	ΔP [Pa]	Q_I [m^3/s]	C_d [1]	$Q_{r\ equipo}$ [m^3/s]	$Error$ [%]
1									
2									
3									
:									
N									

Graficar el coeficiente de descarga *Cd* contra el número de Reynolds para el tubo venturi y para la placa de orficio.

7. Cuestionario

1. ¿Qué representa físicamente el coeficiente de descarga?
2. ¿Cómo varía el coeficiente de descarga con el número de Reynolds? ¿Qué pasa a bajos y a altos valores de este último y por qué?

3. Una vez considerando el coeficiente de descarga, ¿consideras que alguno de los instrumentos utilizados tiene una mayor exactitud o precisión?
4. ¿Cuándo considerarías conveniente utilizar la placa de orificio y el tubo venturi?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Mott, R.L. y Untener, J. A. (2015), Applied Fluid Mechanics. 7th. Edition. Pearson.
2. White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
3. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.

10. Anexos

El gasto real (Q_{real}) se obtiene con la división del volumen medido en el tanque volumétrico y el tiempo que tardo en llenarse dicho volumen:

$$Q_{real} = Volumen\ /tiempo \qquad \text{(Ec. 6.1)}$$

La velocidad promedio (V_{prom}) se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_{prom} = \frac{Q_{real}}{Area_{transversal\ sección\ 1}} \qquad \text{(Ec. 6.2)}$$

Para el cálculo del número de Reynolds (*Re*), se realiza de la siguiente manera:

$$Re = \frac{V_{prom} * \rho * D_1}{\mu} \qquad \text{(Ec. 6.3)}$$

Donde ρ y μ son la densidad y viscosidad del fluido de trabajo, y D_1 es el diámetro en la sección 1.

El gasto ideal (Q_I) se calculará por medio de la ecuación de Bernoulli (figura 6.1 o figura 6.2) y continuidad de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \qquad \text{(Ec. 6.4)}$$

El subíndice 1 denota que el valor de la propiedad es en la *sección 1* y el subíndice 2 denota que el valor de la propiedad es en la *sección 2*. *P* representa la presión, *V* la velocidad, *z* la altura y *g* la gravedad.

Donde $z_1 = z_2$, entonces:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_1^2) = \frac{\rho V_2^2}{2}\left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right] \quad \text{(Ec. 6.5)}$$

De la continuidad $V_1 A_1 = V_2 A_2$, por lo que:

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \quad \text{(Ec. 6.6)}$$

Sustituyendo la ecuación (6.6) en (6.5) se obtiene:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}} \quad \text{(Ec. 6.7)}$$

El gasto volumétrico ideal sería:

$$Q_I = A_2 V_2 \quad \text{(Ec. 6.8)}$$

Donde $(P_1 - P_2)$ es igual a la diferencial de presión, ΔP, obtenida en cada uno de los experimentos con el fluido manométrico.

$$\Delta P = (\rho_M - \rho_f) * g * \Delta h \quad \text{(Ec. 6.9)}$$

Donde ρ_M es la densidad del fluido manométrico (mercurio), ρ_f es la densidad del fluido de trabajo (agua) y Δh es la diferencia de altura entre las columnas del fluido manométrico.

Estos cálculos se realizarán para la placa de orificio y para el tubo de Venturi utilizados y se obtendrá un coeficiente de descarga, C_d, para cada uno por medio de la relación del gasto real e ideal que se presenta en la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_I} \quad \text{(Ec. 6.10)}$$

El fabricante del equipo suministra valores fijos del coeficiente de descarga para el tubo venturi y la placa de orificio.

Venturi:

$$C_{d\ fabricante} = 0.98 \qquad \text{(Ec. 6.11)}$$

Placa de orificio:

$$C_{d\ fabricante} = 0.60 \qquad \text{Ec. 6.12)}$$

Existe en la literatura técnica correlaciones experimentales y gráficas que presentan el *Cd* contra el número de Reynolds (y de la geometría del medidor). Examinando las correlaciones y/o las gráficas, vemos que el coeficiente de descarga permanece casi constante en el rango de trabajo (número de Reynolds) con valores típicos de la práctica.

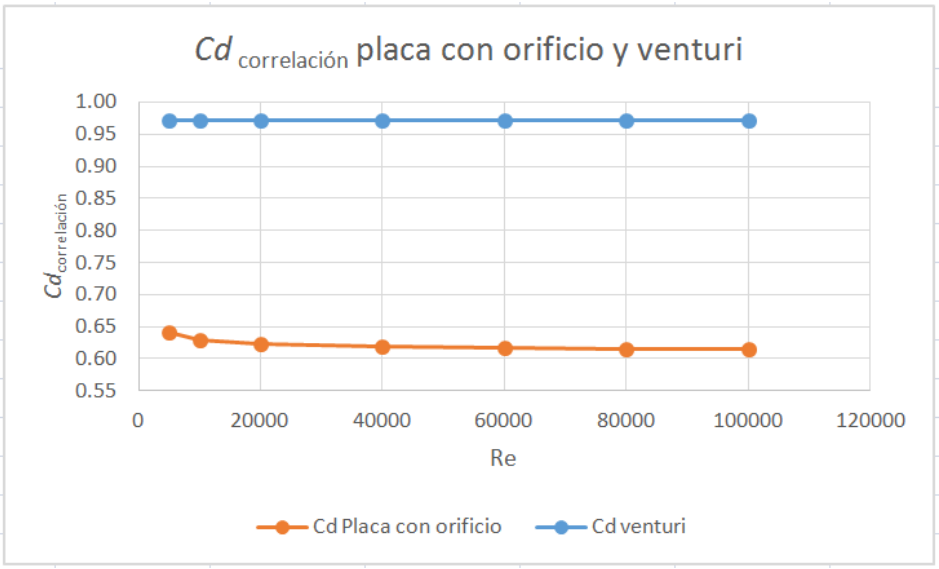


Figura 6.7. Gráficas obtenidas a partir de correlaciones experimentales utilizando valores obtenidos de la práctica, *Cd* correlación vs *Re*.

El gasto real (ecuación práctica para el cálculo del flujo) también se puede obtener utilizando el coeficiente de descarga que nos da el fabricante ($C_{d\ fabricante}$) y el gasto ideal (Q_I), a este gasto real le llamaremos $Q_{r\ equipo}$, el cual calcularemos de la siguiente manera:

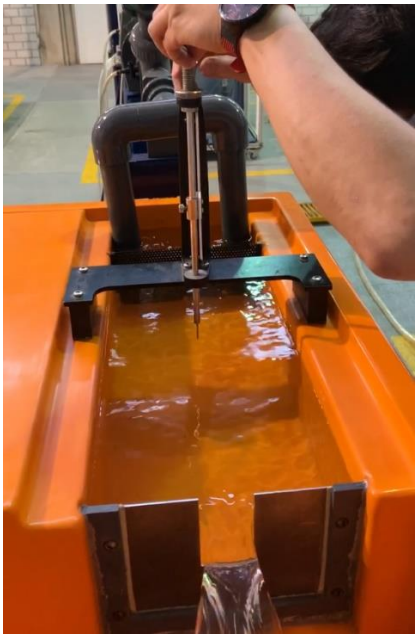
$$Q_{r\ equipo} = Q_i * C_{d\ fabricante} \qquad \text{(Ec. 6.13)}$$

También se calcula el error:

$$\%Error = \left|(Q_{real} - Q_{r\ equipo}\right)|/Q_{real}x100 \qquad \text{(Ec. 6.14)}$$

Práctica 7

Vertederos



Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir experimentación adecuada; analizar e interpretar datos y utilizar el juicio ingenieril para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar efectivamente en equipos que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	***Riesgo.***
Enchufe de bomba	Riesgo de electrocución al estar instalada dentro del depósito de almacenamiento de agua del banco de medición de gasto.
Limnímetro	Riesgo de caída y daño físico al usuario por incisión.

2. Objetivos

- ✓ Medir el gasto experimental, y calcular el gasto teórico para cada uno de los vertederos a estudiar.
- ✓ Calcular el coeficiente de descarga para cada uno de los vertederos empleados.

3. Concepto básicos y definiciones

El flujo volumétrico o flujo másico es tal vez la variable más importante a medir en la Mecánica de Fluidos después de la velocidad. Este parámetro es de vital importancia en cualquier actividad industrial en la que se transporten fluidos como aceites, bebidas carbonatadas, etc. Sin esta medida el balance de materia, el control de calidad y la operación misma de un proceso continuo serían casi imposibles de realizar.

Existen muchos métodos confiables para la medición de flujo, uno de los más comunes se basa en la caída de presión causada por un mecanismo que reduce la sección en la línea de flujo; al pasar el fluido a través de la reducción aumenta su velocidad y su energía cinética, esto para flujo en tuberías.

En particular para el transporte, control y distribución de agua, ya sea para consumo humano o agrícola, se ha realizado desde las civilizaciones antiguas por medio de canales naturales o artificiales. Para medir la cantidad de agua transportada se han desarrollado diferentes dispositivos, por su facilidad de construcción e instalación los vertederos son los más populares. Ofrecen grandes ventajas como larga duración, no se obstruyen por materiales transportados por la corriente, se les puede dar un carácter decorativo, entre otras.

Se define como vertedero a una estructura que sirve para desalojar, regular y medir el flujo de agua en canales abiertos. Las partes principales de un vertedero son la cresta, que es la base horizontal por la que fluye el agua, y su ancho b. Las dimensiones importantes son la carga H y la altura Y. Todas se presentan en la Figura 7.1

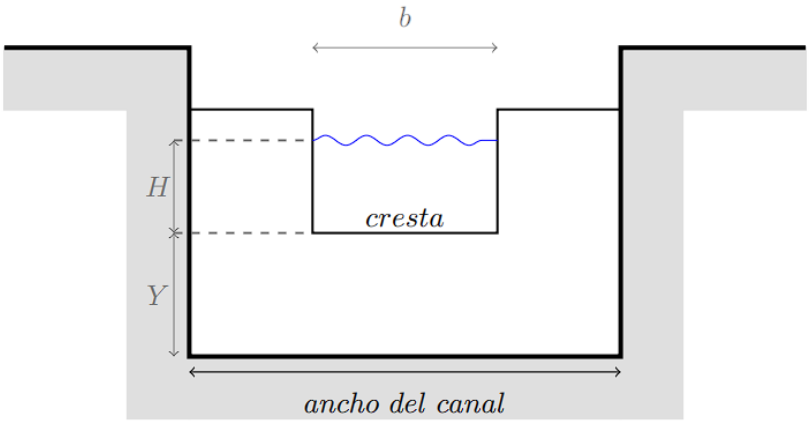


Figura 7.1. Partes principales de un vertedero.

Estos se pueden clasificar de acuerdo la forma de su cresta o el espesor de la obstrucción. De acuerdo con la última se pueden clasificar en vertederos de pared delgada y de pared gruesa, para esta última el espesor del vertedero debe ser mayor a $0.66H$.

Análisis de vertederos

Para calcular el flujo volumétrico que pasa por un vertedero se utiliza la ecuación $Q = V \times A$, donde V es la velocidad del fluido al pasar por el vertedero y A es el área del vertedero ocupado por el fluido. El primero se puede determinar con la ecuación de Bernoulli, mientras que el segundo depende de la geometría del vertedero y del nivel del agua en el canal.

Para calcular la velocidad aplicamos la ecuación de Bernoulli

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 \qquad \text{(Ec. 7.1)}$$

En los puntos que se muestran en la Figura 7.2. La ecuación se simplifica dado que el punto 1 se encuentra en la superficie del agua, y el punto 2 en la zona de aireación, por lo que $P_1 = P_2 = \mathrm{P_{atm}}$. Por otro lado se puede considerar que la velocidad en el punto uno es pequeña, de tal forma que $V_1 \approx 0$. Para Z_1 y Z_2 se considera la base del canal como el origen del sistema coordenado, por lo que $Z_1 = Y + H$, mientras que $Z_2 = Y$. Reordenando las variables se tiene que la velocidad se calcula como:

$$V_2 = \sqrt{2gH} \qquad \text{(Ec. 7.2)}$$

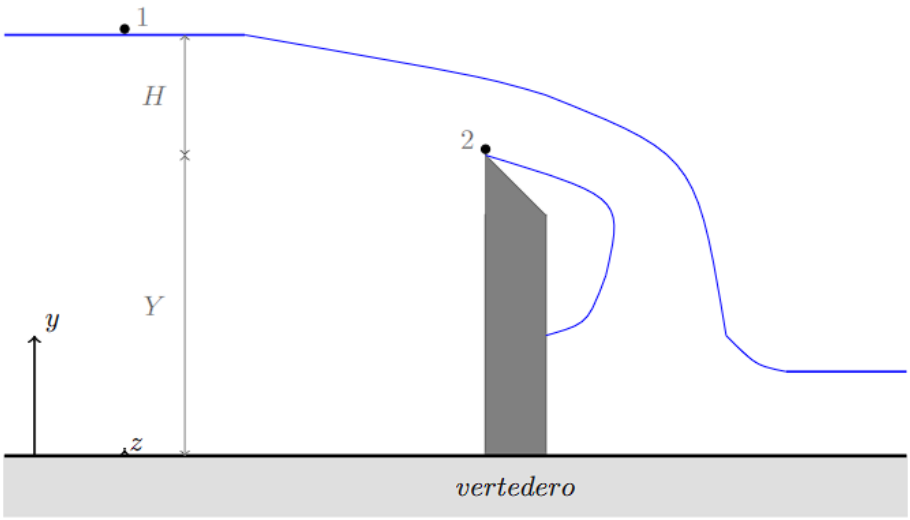


Figura 7.2. Análisis de un vertedero.

Para calcular el flujo volumétrico consideremos que se trabaja con un vertedero rectangular de ancho b. En este caso el área se calcula como el ancho del vertedero por la altura del nivel del agua; el primero es constante, mientras que el segundo es aproximadamente $2/3H$, por lo que sustituyendo se tiene que el flujo volumétrico se calcula como:

$$Q = CbH^{3/2}\sqrt{2g} \qquad \text{(Ec. 7.3)}$$

Donde C es una constante que depende de la geometría de la cresta. Para la mayoría de los vertederos el flujo volumétrico es proporcional a $H^{3/2}$.

Las simplificaciones realizadas a la ecuación de Bernoulli nos permiten obtener la velocidad para un flujo ideal sin pérdidas Q_I, calculado con la Ecuación 7.2. Para obtener el valor para un flujo real Q_R es necesario corregir la velocidad multiplicando la Ecuación 7.3 por un factor llamado coeficiente de descarga, definido como

$$C_{d,exp} = \frac{Q_R}{Q_I} \qquad \text{(Ec. 7.4)}$$

La velocidad real será menor que la velocidad ideal por lo que C_d siempre es menor a 1.

Cálculo del gasto ideal y coeficiente de descarga teórico

El fabricante del equipo proporcionó ecuaciones analíticas para el cálculo de Q_I y $C_{d,teo}$ de los vertederos a utilizar en la práctica.

Vertedero rectangular

$$Q_I = \frac{2}{3} b H^{3/2} \sqrt{2g} \quad \text{(Ec. 7.5)}$$

$$C_{d,teo} \approx 0.611 + \frac{0.075H}{Y} \quad \text{(Ec. 7.6)}$$

Vertedero triangular

$$Q_I = \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{5/2} \sqrt{2g} \quad \text{(Ec. 7.7)}$$

$$C_{d,teo} \approx 0.44 \quad \text{(Ec. 7.8)}$$

Vertedero de pared gruesa

$$Q_I = 1.705 b H^{3/2} \quad \text{(Ec. 7.9)}$$

$$C_{d,teo} \approx \frac{0.65}{\left(1+\frac{H}{Y}\right)^{0.5}} \quad \text{(Ec. 7.10)}$$

4. Equipo y Material

1. Banco de medición de gasto.
2. Vertederos de pared delgada: rectangular y triangular.
3. Vertedero de pared gruesa y canal adicional.
4. Medidor de flujo digital.
5. Limnímetro de aguja con escala Vernier.
6. Desarmador plano y llave mixta de 11 mm.
7. Cronómetro.
8. Flexómetro.

5. Desarrollo

Preparación del equipo

El banco de medición de gasto cuenta con una bomba sumergible que hace circular el fluido de trabajo en un circuito cerrado. Este consta de una sección de tubería, un canal, un depósito de almacenamiento y otro para la medición del gasto. El último se compone de un tubo de vidrio graduado en el que sube el nivel del agua a medida que se llena el depósito de medición. En la Figura 7.3 se muestra un esquema del banco de medición de gasto. En esta práctica se utilizarán únicamente la sección del canal y el depósito de medición de gasto.

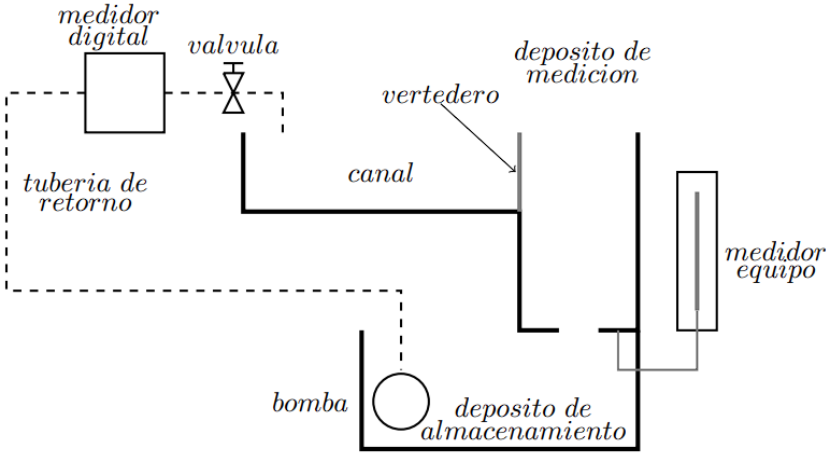


Figura 7.3. Esquema del banco de medición de gasto.

Antes de realizar las mediciones se tiene que preparar el banco de medición de gasto, que consta de los siguientes pasos.

1. Verificación de vertederos. En específico el estado del empaque de los vertederos.
2. Instalación de los vertederos. Los vertederos de pared delgada se instalan a uno de los extremos del canal por medio de cinco tornillos con sus respectivas tuercas, que se colocan con los dedos hasta llegar al tope como se ilustra en la Figura 7.4. Apretar media vuelta más con ayuda de la llave mixta y el desarmador plano.

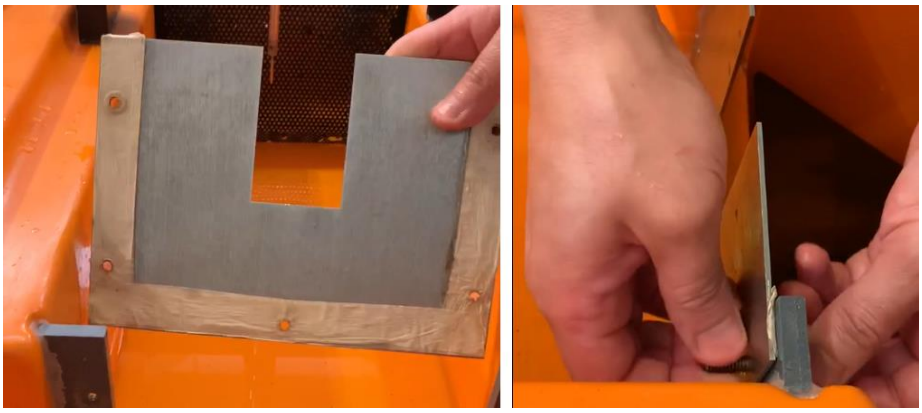


Figura 7.4. Izquierda: empaque del vertedero rectangular de pared delgada. Derecha: instalación del vertedero.

3. Para el vertedero de pared gruesa es necesario instalar un canal adicional, que se fija al canal principal de forma similar a los vertederos de pared delgada. El vertedero se fija al canal secundario por medio de un gancho ubicado en su superficie inferior, ver Figura 7.5.

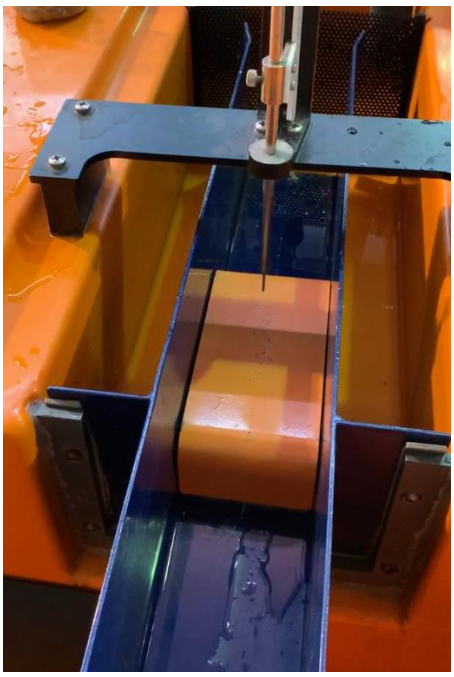


Figura 7.5. Vertedero de pared gruesa y canal adicional.

4. Dimensiones de los vertederos. Con el flexómetro se mide la altura H desde la base del canal a la cresta del vertedero, así como el ancho b. Para el vertedero triangular se mide el ángulo de apertura del vertedero con un transportador. Con los datos obtenidos llenar la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Parámetros del vertedero

Parámetro	Dato
$Y\ (m)$	
$b\ (m)$	
$\theta\ (°)$	

5. Medición del gasto real, Q_R. Uno de los datos a medir es el flujo volumétrico de agua que circula por el canal. Esta medición se puede realizar utilizando: (A) el medidor de flujo digital o (B) el medidor de flujo del banco de medición. Ambos se presentan en la Figura 7.6.

Figura 7.6. Izquierda: Medidor de flujo digital. Derecha medidor de flujo del banco de medición de gasto.

6. Calibración y posicionamiento del limnímetro. La medición del nivel de agua H se realiza con el limnímetro. Este se debe calibrar tomando como cero la cresta del vertedero, como se muestra en la Figura 7.7. Para realizar la medición de H, el

instrumento se debe desplazar aguas arriba del vertedero, se recomienda a una distancia de al menos $4Y$. Para más información del instrumento DA CLICK AQUÍ.

Figura 7.7. Calibración del limnímetro.

7. Verificación de fugas. Conectar y encender la bomba para verificar fugas en todas las secciones de la unidad de demostración. En caso necesario ajustar el apriete de las uniones o tornillos.

Tabla 7.1. Parámetros del vertedero

Parámetro	Dato
$Y\ (m)$	
$b\ (m)$	
$\theta\ (°)$	

Actividad 1. Medición del flujo volumétrico.

Para realizar la medición de H para diferentes flujos volumétricos se recomienda el siguiente procedimiento.

1. Abrir la válvula de control de flujo hasta alcanzar la altura máxima del vertedero, sin que se desborde el agua.
2. Medir la altura H con el limnímetro, cuyo funcionamiento es similar al de un calibrador Vernier. Es importante que solo la punta del medidor toque la superficie del agua, para ello se puede apoyar del tornillo de ajuste en la parte superior del instrumento.
3. Seleccionar la metodología para medir el flujo volumétrico, Q_R.
   - 3.A.- El medidor de flujo digital se instala en la sección de tubería y la lectura es directa. Se debe tener cuidado en la manipulación del medidor ya que tiene un peso considerable. Conectar el suministro de energía con la bomba apagada, ya que el contacto se encuentra dentro de la tina de almacenamiento.
   - 3.B.- Para medir el flujo volumétrico con el depósito de medición se utilizan un cronómetro y el tapón esférico, que desvía el flujo de agua al medidor del equipo, como se muestra en la Figura 7.8. Se recomienda tomar el tiempo que tardan en llenarse al menos $5\ l$. Al finalizar cada lectura quitar el tapón esférico para estabilizar el nivel del agua en el depósito de almacenamiento.
4. Anotar los datos en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Mediciones de los experimentos para diferentes gastos.

Lectura	Volumen (m^3)	Tiempo (s)	H(m)

5. Reducir el flujo de agua con la válvula y esperar a que se estabilice el nivel del agua en el canal antes de medir H.
6. Se repite el procedimiento desde el paso 2 de acuerdo al número de lecturas solicitadas por el profesor. Se recomienda realizar al menos 3 lecturas para el vertedero triangular, 5 para el rectangular y 10 para el de pared gruesa. Genera para cada vertedero una Tabla similar a la Tabla 7.2.
7. Al finalizar las lecturas, se apaga la bomba y se instala el siguiente vertedero de acuerdo a los pasos indicados en la Sección “Preparación del equipo”.

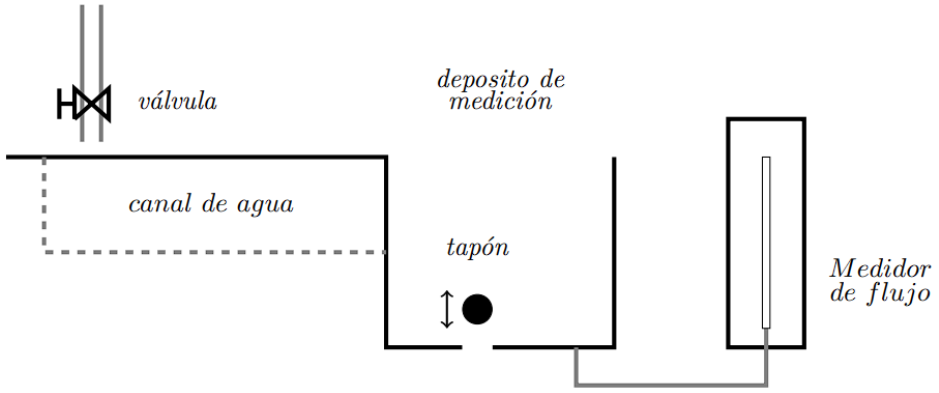


Figura 7.8. Esquema del medidor de flujo del banco de medición de gasto.

Apagado del equipo

Al finalizar las mediciones se deben seguir los siguientes pasos para asegurar el correcto apagado del equipo:

1. Apagar la bomba y esperar a que se decante el agua de la tubería.
2. Quitar el tapón esférico para que se vierta el agua al depósito de almacenamiento.
3. Desconectar el medidor de flujo digital.
4. Desinstalar el vertedero del canal y colocar todos los vertederos en el estante correspondiente.
5. Desajustar el limnímetro, teniendo cuidado que la punta este protegida por la base del instrumento. Colocar el medidor en el estante correspondiente.

6. Resultados

Los datos de las Tablas 7.1 y 7.2 se utilizarán para calcular el gasto real, Q_R ,el gasto ideal, Q_I ,así como el coeficiente de descarga experimental y teórico. Para ello se generará una Tabla similar a la Tabla 7.3 para cada vertedero utilizado en la práctica.

Para cada Con los resultados obtenidos se generará una gráfica C_d vs Q_R, como la mostrada en la Figura 7.9.

Tabla 7.3. Cálculo del coeficiente de descarga.

Lectura	$Q_R(m^3/s)$	$Q_I(m^3/s)$	$C_{d,exp}$	$C_{d,teo}$	Error

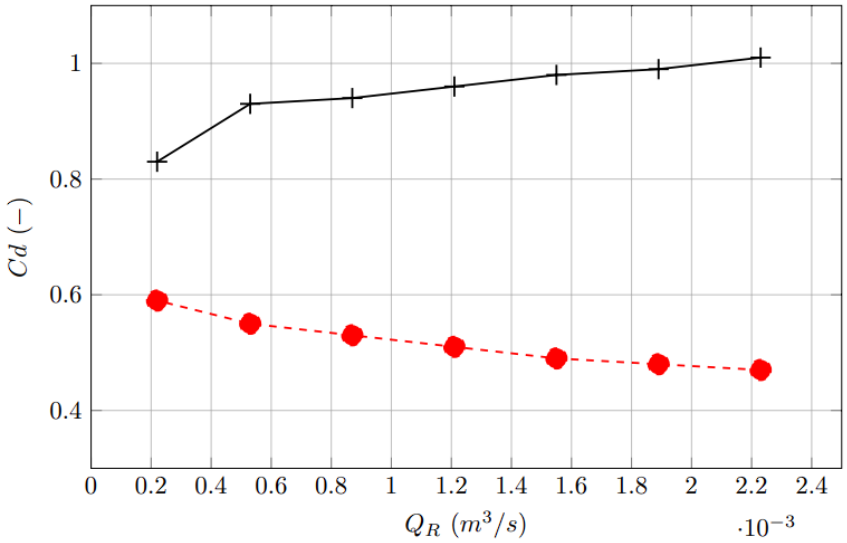


Figura 7.9. Resultados del cálculo del coeficiente de descarga teórico $C_{d,teo}$(—) y experimental $C_{d,exp}$(+).

7. Cuestionario

1. ¿Qué ventajas ofrecen los vertederos en la medición del agua?
2. ¿Cuál es el principio de funcionamiento de los vertederos y en qué se diferencian de los medidores de flujo en conductos cerrados?
3. ¿Cuándo se utiliza un vertedero de pared delgada y cuándo uno de pared gruesa?
4. Entre dos vertederos de pared delgada, uno rectangular y otro triangular, ¿cuál presenta mayor carga para el mismo caudal?
5. ¿Cómo influye la velocidad del flujo en el vertedero a utilizar?
6. ¿Qué tipo de flujo se presenta en una sección aguas arriba del vertedero y en otra justo encima de la cresta del mismo?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Mott, R.L. y Untener, J. A. (2015), Applied Fluid Mechanics. 7th. Edition. Pearson.
2. White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
3. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4a edición en español. McGraw-Hill México.
4. Streeter, V.L., Wylie, E.B. y Bedford, K. W. (2000). Mecánica de los fluidos. 9a Edición. McGraw-Hill Colombia.
5. Armfield Ltd (1995). Manual C9: Flowmeter demostration unit, Armfield (8), England.

Práctica 8

Pérdidas primarias en tuberías

Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir experimentación adecuada; analizar e interpretar datos y utilizar el juicio ingenieril para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar efectivamente en equipos que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	***Riesgo asociado.***
Energía eléctrica y fluido de trabajo	Posible corto circuito en el banco de trabajo.
Manómetro	Ruptura de manómetro y fuga de mercurio.

2. Objetivos

- ✓ Calcular la pérdida de carga por fricción en tuberías de diferente diámetro, para diferentes gastos de forma experimental y teórica.
- ✓ Calcular y comparar la pérdida de carga en una tubería lisa con una rugosa.

3. Concepto básicos y definiciones

El transporte de fluidos en ductos o tuberías es un proceso común en la industria, utilizando para ello dispositivos como bombas o ventiladores, dependiendo si es un líquido o gas, respectivamente. Dimensionar la potencia de estos dispositivos es una tarea importante, para ello es necesario conocer diversos parámetros de la tubería o ducto, como son el diámetro, la longitud, la velocidad del fluido, etc.

En general, cuando se desplaza un fluido sobre una superficie se genera una capa límite hidrodinámica en la que los efectos de la viscosidad son importantes. Aplicando este principio al flujo en una tubería, donde el fluido está confinado por las paredes de la tubería, la capa límite crece desde cero en la entrada de la tubería hasta un punto en el que se unen, que se conoce como distancia de desarrollo hidrodinámica.

A partir de este punto se tiene un flujo desarrollado hidrodinámicamente, en el que el perfil de velocidad depende del tipo de flujo que se tenga en la tubería. Para un flujo laminar ($Re < 2300$) el perfil de velocidad es parabólico, mientras que para un flujo turbulento ($Re > 4000$) la curvatura del perfil es menos pronunciada debido a la interacción entre las partículas de fluido, y por ende mayor intercambio de energía cinética entre ellas.

El desplazamiento del fluido en una tubería tiene un efecto de disipación de energía debido a la viscosidad del fluido resultado de una conversión irreversible de energía mecánica a térmica, denominada “pérdida de carga”. Para calcular esta pérdida de carga se utiliza la ecuación de la energía, que en su forma general se escribe como:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t}\int_{VC} \rho e d\forall + \int_{SC} \rho e \left(\vec{V}\cdot\vec{n}\right) dA \qquad \text{(Ec. 8.1)}$$

donde $\dot{Q}$ es el calor transferido, $\dot{W}$ es el trabajo efectuado por unidad de tiempo, mejor conocido como potencia, e es la energía existente en el sistema, que se compone de la energía interna, cinética, potencial $u + \frac{v^2}{2} + gz$, y $\vec{V}$ es el es el vector de velocidad normal a la superficie de control.

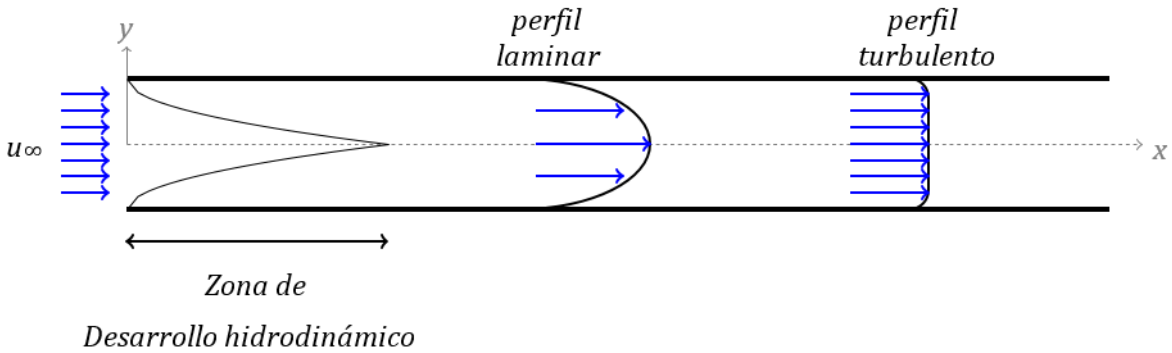


Figura 8.1. Flujo al interior de una tubería.

Para la mayoría de las aplicaciones en mecánica de fluidos $\dot{W}$ está compuesta por el trabajo efectuado por un eje a través de la frontera del volumen de control W_{eje} , que puede ser una bomba (se agrega energía al sistema) o una turbina (se extrae energía del volumen de control), y el trabajo efectuado por la presión en la superficie de control del sistema W_p, este último se calcula como:

$$\dot{W}_p = \int_{SC} P\left(\vec{V}\cdot\vec{n}\right) dA \qquad \text{(Ec. 8.2)}$$

Esta forma de la ecuación es muy complicada de resolver, por lo que se aplican las siguientes simplificaciones:

- Considerar que el sistema (flujo en la tubería) se encuentra en estado permanente.
- Flujo incompresible (ρ = cte.).
- Un sistema con una entrada y una salida.

Bajo estas simplificaciones la ecuación 8.1 se reduce a:

$$q - w_{eje} = \frac{p_2}{\rho} + u_2 + gz_2 + \frac{V_2^2}{2} - \frac{p_1}{\rho} - u_1 + gz_1 + \frac{V_1^2}{2} \qquad \text{(Ec. 8.3)}$$

Donde el término *u* es la energía interna, *q* es el flujo de calor por unida de masa, y w_{eje} es el trabajo de eje efectuado por unida de masa.

Reordenando términos, dividiendo entre la gravedad, y definiendo a la pérdida de carga h_l como:

$$h_l = u_2 - u_1 - q \qquad \text{(Ec. 8.4)}$$

La ecuación 8.3 queda como:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + w_{bomba} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + w_{turbina} + h_l \qquad \text{(Ec. 8.5)}$$

Cabe destacar que las unidades de todos los términos de esta ecuación son *metros*.

Finalmente, para una tubería horizontal, de sección constante en la que no se realiza trabajo de o hacia el sistema, la ecuación se simplifica a

$$h_l = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \qquad \text{(Ec. 8.6)}$$

Esta ecuación es la que se utilizará para calcular la pérdida de carga en la tubería en forma experimental, es decir $h_{l,exp}$.

Por otro lado, a partir de la solución exacta para el flujo laminar de un fluido en una sección circular de radio r_0 (tubo), se encuentra que la caía de presión Δp a lo largo del tubo por unidad de longitud *L* es igual a

$$\Delta p = \frac{32\mu L\bar{V}}{D^2} \qquad \text{(Ec. 8.7)}$$

Donde μ es la viscosidad del fluido, $\bar{V}$ es la velocidad promedio en la tubería, y *D* es el diámetro interno. Si se expresa a Δp en términos del factor de fricción *f* se tiene

$$\Delta p = f\frac{L}{D}\frac{\rho\bar{V}^2}{2} \qquad \text{(Ec. 8.8)}$$

Recordando que la ecuación 8.6 se puede escribir como:

$$h_l = \frac{\Delta p}{\rho g} \qquad \text{(Ec. 8.9)}$$

Entonces tenemos que la pérdida de carga en la tubería se calcula como:

$$h_l = f\frac{L}{D}\frac{\rho \bar{V}^2}{2g} \qquad \text{(Ec. 8.10)}$$

Todos los términos en la ecuación 8.10 se pueden medir directamente de la tubería, excepto *f*. Este parámetro representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería. Es función de las características de la tubería como: la rugosidad de las paredes, el diámetro interno, y la velocidad a la que se desplaza el fluido. Se puede determinar utilizando el diagrama de Moody y o por medio de correlaciones, la más utilizada es la ecuación de Colebrook. Ambas se pueden encontrar en todos los libros de Mecánica de Fluidos y publicados en diversas páginas de Internet. De forma particular, para un flujo laminar

$$f = \frac{64}{Re} \qquad \text{(Ec. 8.11)}$$

La ecuación 8.10 se conoce como la ecuación e Darcy-Weizchback, y se utilizará para determinar la pérdida de carga de forma analítica $h_{l,Darcy}$ a partir de los parámetros de cada una de las tuberías a utilizar en los experimentos.

4. Equipo y Material

El equipo a utilizar en esta práctica está compuesto por:

1. Banco de demostración de pérdidas en tuberías.
2. Manómetro diferencial de mercurio-agua.
3. Cronómetro.
4. Calibrador Vernier.
5. Flexómetro.

5. Desarrollo

A continuación se detallan las actividades a realizar para medir los parámetros necesarios para calcular la pérdida de carga en 4 tuberías horizontales de sección constante, cada una de diferente diámetro. El esquema de cada una se presenta en la Fig. 8.2.

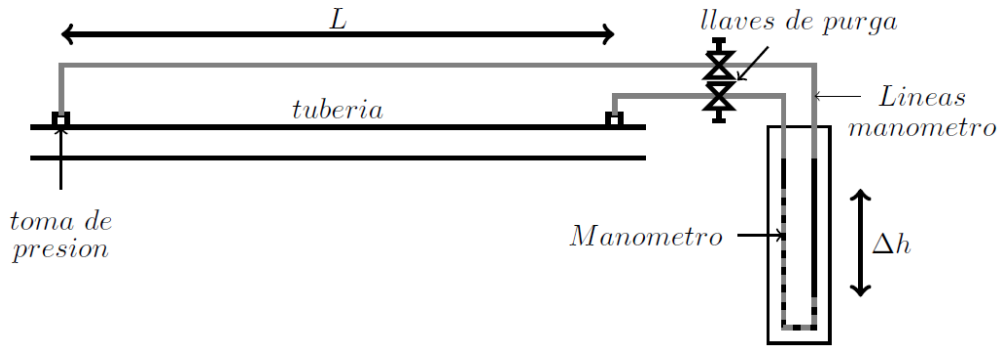


Figura 8.2. Esquema de una tubería y la conexión del manómetro diferencial.

Actividad 1. Medición de parámetros del experimento.

Medir el diámetro interno y la longitud de las tuberías a utilizar con el calibrador Vernier y el flexómetro, respectivamente. Con los datos obtenidos llenar la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Parámetros de la tubería.

Parámetro	Dato
Diámetro interno (m)	
Longitud (m)	
Rugosidad (m)	

NOTA: Para el tubo liso la rugosidad es aproximadamente cero. La rugosidad específica (e/D) para el tubo rugoso es igual a 0.1.

Actividad 2. Toma de lecturas.

2.1 Preparación del equipo

Antes de realizar las mediciones es necesario preparar el banco de demostración de pérdidas de carga en tuberías, los elementos a manipular muestran en la Fig. 8.2, de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Revisar que todas las válvulas del banco se encuentren abiertas.
2. Conectar las líneas del manómetro mercurio-agua a las tomas de presión de la tubería que se quiere estudiar. Las llaves de purga tienen que estar cerradas.
3. Conectar el equipo a la electricidad y encender la bomba sumergible. Esperar a que las tuberías estén llenas de agua.
4. Cerrar todas las válvulas del banco de demostración, excepto el de la tubería a estudiar
5. Abrir las llaves de purga y esperar a que se haya eliminado todo el aire de las líneas del manómetro.

2.2 Toma de lecturas

Los elementos a manipular durante los experimentos se representan en la Fig. 8.3. Para cada una de las cuatro tuberías se analizará el efecto de la velocidad del fluido de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Colocar la llave de salida de agua en posición totalmente abierta.
2. Medir Δh en el manómetro diferencial.
3. Medir el flujo volumétrico utilizando el cronómetro y el medidor de flujo (tanque volumétrico). Colocar previamente la pelota para que al agua se direccione a éste último
4. Escribir los datos obtenidos en la Tabla 8.2
5. Cerrar un poco la llave. Se recomienda tomar como referencia Δh en el manómetro, para tener una variación uniforme de éste parámetro.
6. Se repite el procedimiento dependiendo del número de lecturas solicitadas por el profesor.

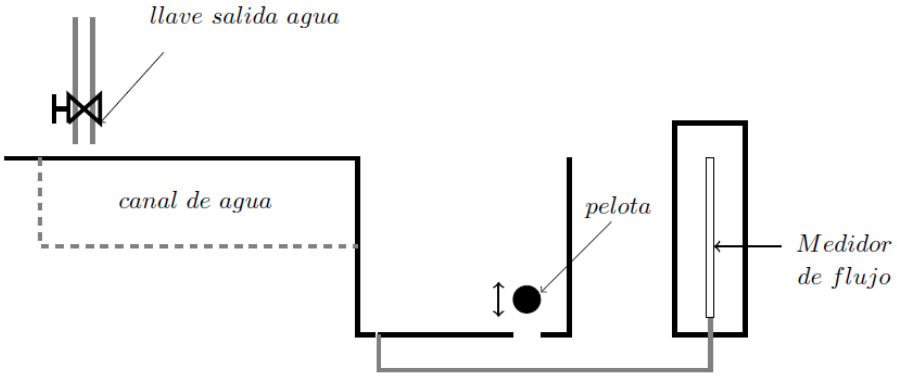


Figura 8.3. Medición del flujo volumétrico.

Tabla 8.2: Mediciones de los experimentos para diferentes gastos.

lectura	Volumen (m^3)	tiempo (s)	Δh (m)
1			
2			
3			
⋮			
n			

2.3 Cambio de tubo

Para realizar mediciones en una tubería diferente de debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Cerrar las llaves de purga del manómetro
2. Abrir todas las válvulas del banco. Es opcional apagar la bomba sumergible.
3. Cambiar las líneas del manómetro a las tomas de presión del tubo seleccionado.
4. Cerrar las válvulas, excepto la del tubo a estudiar.
5. Para la toma de lecturas seguir el procedimiento desarrollado en la sección 2.2.

2.4 Apagado del equipo

Al finalizar las mediciones se deben seguir los siguientes pasos para asegurar el correcto apagado del equipo, evitando así el desajuste del manómetro:

1. Cerrar las llaves de purga.
2. Abrir todas las válvulas del banco de trabajo.
3. Apagar la bomba sumergible.
4. Desconectar las líneas del manómetro de las tomas de presión.

5. Desconectar el equipo de la toma de corriente.

6. Resultados

1. Los resultados obtenidos se anotarán en las Tablas 8.1 y 8.2, la primera con los parámetros de cada tubo y la segunda con las mediciones realizadas.
2. Adicionalmente, tendrán que desarrollar cálculos para determinar la pérdida de carga en cada tubería (h_l). Para ello utilizarán como ejemplo la Tabla 8.3.

Tabla 8.3: Cálculo de la pérdida de carga.

lectura	Gasto (m^3/s)	ΔP (Pa)	$\overline{V}$ (m/s)	Re	f	$h_{l,exp}$ (m)	$h_{l,Darcy}$ (m)
1							
2							
3							
⋮							
n							

3. Con los cálculos de pérdida de carga se generará una gráfica *Re* vs *Q*, tomando como ejemplo la Fig. 8.4.

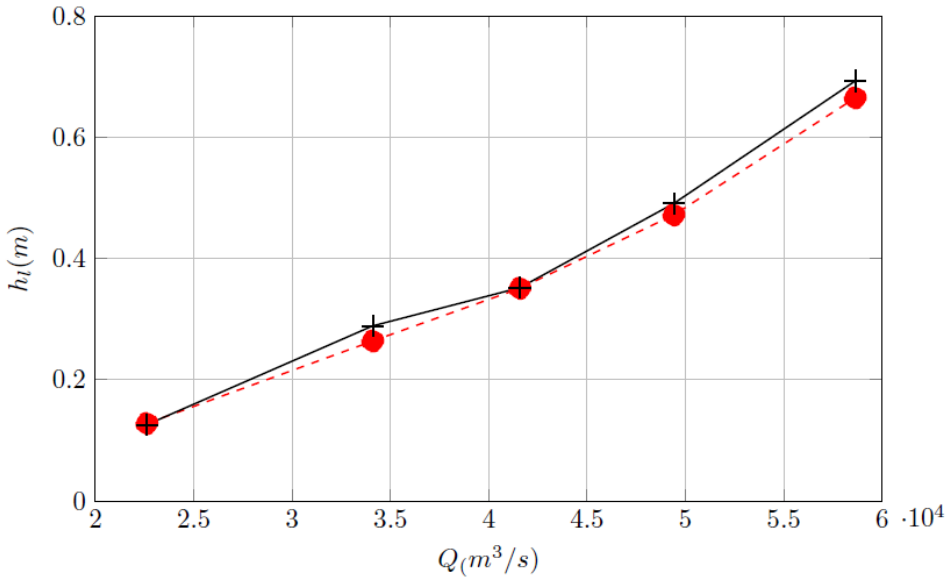


Figura 8.4: Resultados del cálculo de pérdidas de carga en tuberías horizontales de sección constante con la ecuación de la energía $h_{l,exp}$ (+) y la ecuación de Darcy-Weisbach $h_{l,Darcy}$ (—).

7. Cuestionario

1. ¿A qué se debe la caída de presión en un fluido al ser transportado en un ducto horizontal?
2. ¿Qué efecto tiene el aumento de la velocidad del fluido en la pérdida de carga en la tubería?
3. ¿Cómo afecta la rugosidad de la tubería a la pérdida de carga?
4. ¿Qué efecto tiene el envejecimiento de la tubería en la caída de presión? Argumente su respuesta.
5. De las tuberías estudiadas en la práctica, ¿Cuál tubería utilizaría si se desea tener la mínima caída de presión?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Mott, R.L. y Untener, J. A. (2015), Applied Fluid Mechanics. 7th. Edition. Pearson.
2. White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
3. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.
4. Streeter, V.L., Wylie, E.B. y Bedford, K. W. (2000). Mecánica de los fluidos. 9ª. Edición. McGraw-Hill Colombia.

Práctica 9

Pérdidas secundarias en tuberías

Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir experimentación adecuada; analizar e interpretar datos y utilizar el juicio ingenieril para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar efectivamente en equipos que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	***Riesgo asociado.***
Energía eléctrica y fluido de trabajo	Posible corto circuito en el banco de trabajo.
Manómetro	Ruptura de manómetro y fuga de mercurio

2. Objetivos

- ✓ Calcular la constante de pérdida actual de los accesorios.
- ✓ Determinar la relación de la pérdida de carga por fricción con la velocidad del fluido.

3. Concepto básicos y definiciones

Los sistemas para transportar fluidos se componen, además de tuberías, por accesorios que sirven para cambiar la dirección de la tubería, controlar el gasto, así como para la adecuación del fluido transportado, como el filtrado. Entre los accesorios más comunes se encuentran: codos en 45◦ y 90◦, uniones, ramificaciones en *T* o *Y*, cambios de sección, filtros, válvulas, etc. Estos elementos generalmente contribuyen en menor medida a la pérdida de carga por fricción, denominándolas h_m donde el subíndice m se refiere a pérdidas menores. Lo anterior es relativamente cierto, exceptuando a las válvulas que dependiendo de su posición de apertura, su contribución puede ser similar a la pérdida de carga en la tubería. Calcular h_m utilizando la ecuación de Darcy-Weischback es complicado ya que la geometría de los accesorios es irregular, por lo que es difícil estimar *f*, *L* y *D*.

$$h_{L,Darcy} = f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} \qquad \text{(Ec. 9.1)}$$

Una forma de solucionar esto es agrupar estas variables en un término conocido como constante de pérdida del accesorio, K, por lo que la Ecuación 9.1 queda como:

$$h_m = K\frac{v^2}{2g} \qquad \text{(Ec. 9.2)}$$

El valor de K se determina igualando la ecuación de la energía considerando que el accesorio está en posición horizontal, y el diámetro a la entrada y salida del accesorio es el mismo. La ecuación de la energía queda de la siguiente forma:

$$h_{L,Energía} = \frac{\Delta P}{\rho g} \qquad \text{(Ec. 9.3)}$$

Igualando las ecuaciones 9.2 y 9.3

$$K\frac{v^2}{2g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \qquad \text{(Ec. 9.4)}$$

Despejando K, se tiene que

$$K = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} \qquad \text{(Ec. 9.5)}$$

El valor de K se obtiene de forma experimental para cada tipo de accesorio midiendo la diferencia de presiones para diferentes flujos volumétricos. Los fabricantes publican catálogos específicos para sus productos, mientras que en los libros de Mecánica de Fluidos y en la literatura especializada incluyen tablas con valores promedio, por lo que deben ser utilizados con cautela. Los datos necesarios para buscar el valor de K en la literatura son: (a) modelo del accesorio, (b) tipo de acoplamiento a la tubería, (c) diámetro nominal y (d) material.

4. Equipo y Material

1. Banco de demostración de pérdidas en tuberías y accesorios.
2. Manómetro diferencial de mercurio-agua.
3. Manómetro diferencial de agua-aire.
4. Cronómetro.

5. Desarrollo

Los accesorios que se recomienda utilizar son:

1. Codo de 90°, extensión corta.
2. Codo de 90°, extensión larga.
3. Codo de 45°.
4. Filtro.
5. Válvula de compuerta.
6. Válvula de esfera.
7. Válvula de globo.

Estos se encuentran montados en el banco de demostración de pérdidas en tuberías y accesorios.

Antes de iniciar las actividades es necesario registrar los parámetros de cada uno de los accesorios, estos están grabados en el accesorio, o se verifica visualmente. Para cada accesorio los datos obtenidos se transcriben en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1. Parámetro de los accesorios.

Parámetro	Dato
Nombre del accesorio	
Diámetro nominal (pulgadas)	
Tipo de conexión	

Esta información será de utilidad para buscar la constante de pérdida K en la bibliografía y comparar resultados.

Preparación del equipo

Antes de realizar las mediciones es necesario preparar el banco de demostración de pérdidas de carga en tuberías y accesorios, los elementos a manipular se muestran en la Figura 9.1. Se recomienda el siguiente procedimiento:

1. Revisar que todas las válvulas del banco se encuentren cerradas.
2. Conectar las líneas del manómetro a las tomas de presión del accesorio que se quiere estudiar. Las llaves de purga deben estar cerradas, para eliminar el aire de las líneas de conexión.
3. Conectar el equipo al suministro eléctrico y encender la bomba sumergible. Esperar a que las tuberías estén llenas de agua.
4. Cerrar todas las válvulas del banco de demostración, excepto la del accesorio a estudiar.
5. Cerciorarse que no haya aire en las líneas del manómetro y abrir las llaves de purga para que la presión se transmita al manómetro.

Debido a la diferencia de presión generada por cada accesorio, se recomienda utilizar el manómetro de mercurio-agua para las válvulas y el filtro. Para el resto de los accesorios se recomienda utilizar el manómetro de agua. Las ecuaciones para el ΔP con estos instrumentos son respectivamente:

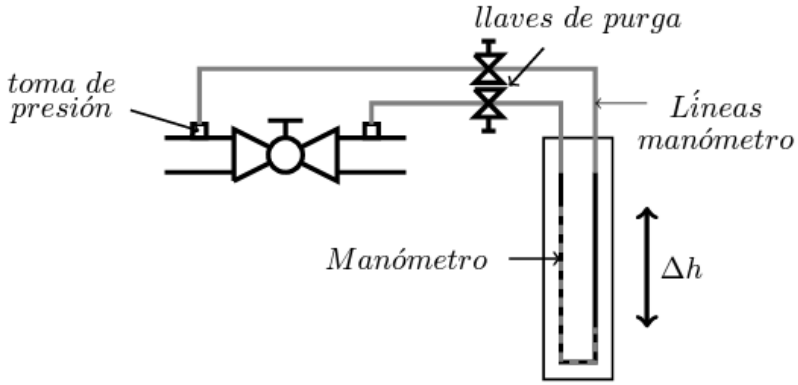


Figura 9.1. Esquema de una tubería y la conexión del manómetro diferencial.

$$\Delta P_{Hg-H_20} = (\rho Hg - \rho H_2O)\, g\, \Delta h \qquad \text{(Ec. 9.6)}$$

$$\Delta P_{H_2O-aire} = (\rho H_2O)\, g\, \Delta h \qquad \text{(Ec. 9.7)}$$

Donde ρ es la densidad del fluido en el manómetro, que puede ser mercurio (Hg), agua (H_2O) y/o aire, g es la aceleración de la gravedad, y Δh es la diferencia de altura medido en el manómetro.

Toma de lecturas

Los accesorios con los que cuenta el banco de medición generan caídas de presión en rangos variados. Los que tienen un mayor ΔP son las válvulas, mientras que para los otros es relativamente pequeña. Por lo anterior se realizarán dos actividades.

Actividad 1. Válvulas.

El equipo cuenta con tres tipos de válvulas: de *globo*, de *esfera* y de *compuerta*. Estas se utilizan para regular el flujo másico en el equipo. Se recomienda el siguiente procedimiento para la toma de lecturas:

1. Colocar la válvula en posición totalmente abierta.
2. Medir el Δh en el manómetro diferencial.
3. Medir el flujo volumétrico utilizando el cronómetro y el medidor de flujo (tina), colocando previamente la pelota para que al agua se direccione a este último. Un esquema del medidor de flujo se muestra en la Figura 9. 2.
4. Escribir los datos obtenidos en la Tabla 9.2.

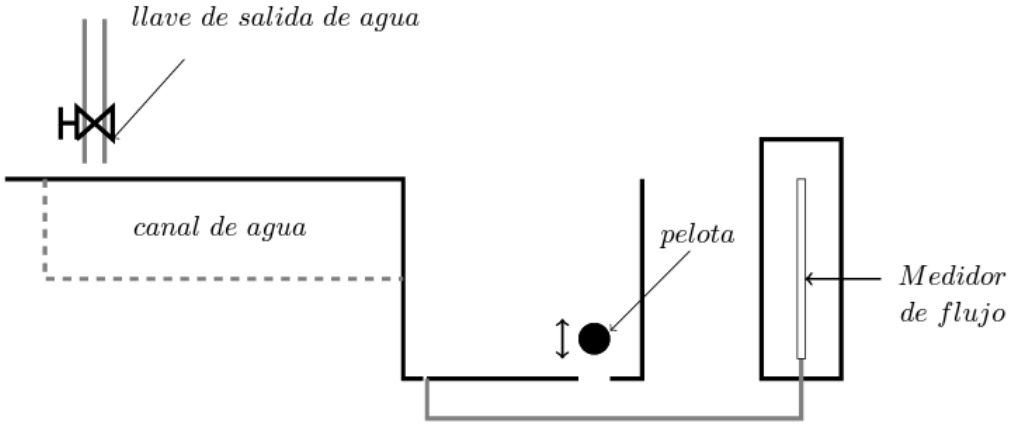


Figura 9.2. Medición de flujo volumétrico.

5. Colocar en la siguiente posición a la válvula. Las posiciones recomendadas se incluyen en la Tabla 9.2.

Tabla 9.2. Mediciones de los experimentos para diferentes casos.

Posición	**Volumen (m^3)**	**Tiempo (s)**	**Δh (m)**
Totalmente abierta			
3/4 abierta			
1/2 abierta			
1/4 abierta			

Por cuestiones de tiempo se recomienda realizar las cuatro lecturas para la válvula de su preferencia, mientras que para las otras dos solo tomar una lectura en la posición *totalmente abierta*.

Actividad 2. Otros accesorios.

Para los accesorios como *codos* y *filtro*, el gasto se regula con la llave de salida de agua. El procedimiento es similar al descrito en la actividad 1. Los datos obtenidos se depositan en la Tabla 9.3.

Tabla 9.3. Mediciones de los experimentos para diferentes gastos

Lectura	Volumen (m^3)	Tiempo (s)	Δh (m)
1			
2			
3			
⋮			
n			

Cambio de accesorio

Para cambiar de un accesorio a otro se recomienda el siguiente procedimiento:

1. Cerrar las llaves de purga del manómetro.
2. Abrir todas las válvulas del banco. Es opcional apagar la bomba sumergible.
3. Cambiar las líneas del manómetro a las tomas de presión del accesorio deseado.
4. Cerrar las válvulas, excepto la del accesorio a estudiar.
5. Para la toma de lecturas, seguir el procedimiento presentado en la actividad 1.

Al **finalizar** las mediciones se deben seguir los siguientes pasos para asegurar el correcto apagado del equipo, evitando así el desajuste del manómetro:

1. Cerrar las llaves de purga.
2. Abrir todas las válvulas del banco de trabajo.
3. Apagar la bomba sumergible.
4. Desconectar las líneas del manómetro de las tomas de presión.
5. Desconectar el equipo de la toma de corriente.

6. Resultados

Con los datos obtenidos en las actividades en el laboratorio, los alumnos realizarán cálculos para determinar la constante de pérdida de cada accesorio (K). Para ello utilizarán como ejemplo la Tabla 9.4.

Tabla 9.4. Cálculo de la pérdida de carga.

Lectura	Gasto (m^3/s)	$\Delta P\ (Pa)$	$V\ (m/s)$	K_{exp}	K_{biblio}	$h_{1,exp}\ (m)$
1						
2						
3						
⋮						
n						

Con los cálculos resultados obtenidos se generará una gráfica K vs *Re*, tomando como ejemplo la Figura 9.3.

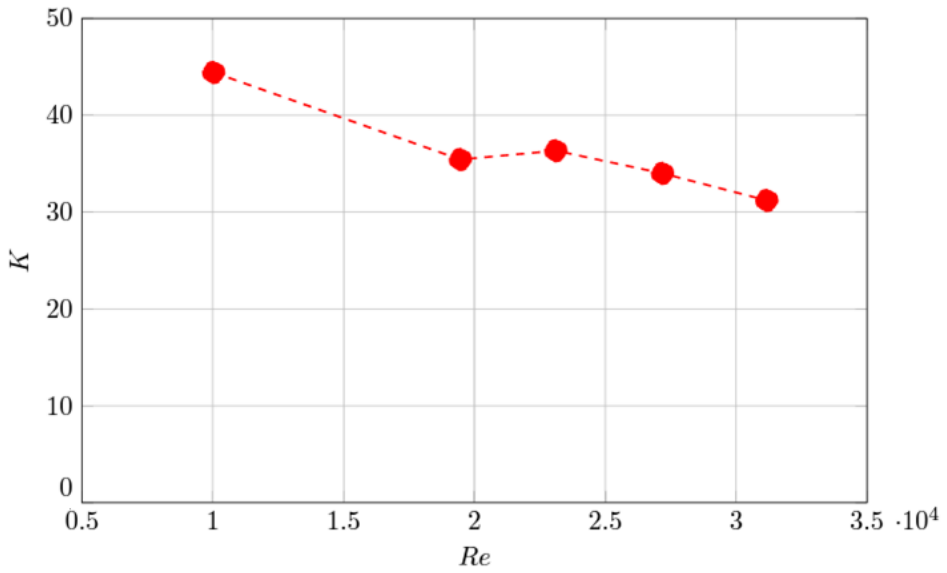


Figura 9.3. Constante de pérdida K_{exp} del filtro.

7. Cuestionario

1. ¿A qué se debe la caída de presión del agua al pasar por un accesorio?
2. ¿Cuál es el comportamiento de K al aumentar la velocidad del flujo?
3. ¿Qué le pasa a la pérdida de carga al abrir o cerrar una válvula?
4. ¿A qué se debe la discrepancia entre los resultados obtenidos en el laboratorio y los reportados en la literatura?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Mott, R.L. y Untener, J. A. (2015), *Applied Fluid Mechanics*. 7th Edition. Pearson.
2. White, F. M. (2021). *Fluid Mechanics*. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
3. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.
4. Streeter, V. L., Wylie, E. B. y Bedford, K. W. (2000). *Mecánica de los fluidos*. 9ª Edición. McGraw-Hill Colombia.

Práctica 10

Flujo Compresible

Atributos de CACEI

AE3. Desarrollar y conducir experimentación adecuada; analizar e interpretar datos y utilizar el juicio ingenieril para establecer conclusiones.

AE7. Trabajar efectivamente en equipos que establecen metas, planean tareas, cumplen fechas límite y analizan riesgos e incertidumbre.

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	***Riesgo asociado.***
Transmisión mecánica motor eléctrico-compresor.	El usuario es vulnerable a sufrir algún tipo de lesión.
Eje del compresor.	Daño en dedos o manos. Evitar introducir los dedos en el acceso al eje del compresor.
Manómetro inclinado.	Posible irritación en las vías respiratorias debido a fugas del líquido manométrico hacia el compresor.

2. Objetivos

- ✓ Estudiar los efectos que tiene la compresibilidad en una tobera convergente-divergente en flujos a alta velocidad.
- ✓ Observar el fenómeno de bloqueo o ahogamiento (‘choking’) que se presenta en la tobera convergente-divergente.

3. Conceptos básicos y definiciones

Un flujo compresible es comúnmente definido como un flujo con densidad variable. Lo contrario, es el flujo incompresible, donde la densidad permanece constante. El flujo de cualquier fluido es compresible en mayor o menor medida. Bajo ciertas condiciones, un flujo se puede considerar como incompresible con una precisión razonable. La simple definición de flujo compresible como un flujo en el que la densidad es variable no es suficiente por lo que se requiere algunas especificaciones.

Considere ahora un pequeño elemento de fluido con un volumen específico v. La presión ejercida en las caras del elemento por el fluido circundante es p. Asuma ahora que la presión es incrementada una cantidad infinitesimal dp. El elemento es entonces comprimido una cierta cantidad dv. Ya que el volumen se reduce, dv es negativo. Así, la compresibilidad del fluido se define como

$$\tau = -\frac{1}{v}\frac{dv}{dp} \qquad \text{(Ec. 10.1)}$$

Físicamente, la compresibilidad se define como la fracción de cambio del volumen por unidad de cambio en la presión en el fluido.

Por otro lado, si no hay flujo de calor hacia o desde el elemento de fluido (compresión adiabática) y no hay efecto alguno debido a mecanismos de transporte (viscosidad o conductividad térmica), la compresibilidad del elemento se lleva a cabo de manera isentrópica.

$$\tau_s = -\frac{1}{v}\left(\frac{dv}{dp}\right)_s \qquad \text{(Ec. 10.2)}$$

La compresibilidad se define como una propiedad del fluido. Los líquidos, tienen bajos valores de compresibilidad y los gases, altos valores. En términos de densidad la ecuación 10.1 se define como

$$\tau = \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp} \qquad \text{(Ec. 10.3)}$$

Por lo tanto, siempre que el fluido experimenta un cambio en la presión, le corresponderá un cambio en la densidad $d\rho$. Donde $d\rho$, es definida por

$$d\rho = \rho\tau\, dp \qquad \text{(Ec. 10.4)}$$

Compresibilidad en un fluido en movimiento

Hasta este punto solo hemos considerado al fluido. Ahora, considere un fluido en movimiento. Tal flujo es iniciado y mantenido por fuerzas sobre el fluido, las cuales usualmente generan o van acompañadas de cambios en la presión. En esta práctica veremos que flujos con alta velocidad genera grandes cambios de presión y, a su vez, de densidad (particularmente para el aire). Dado un cambio de presión, esperaríamos pequeños cambios en la densidad para líquidos y altos para gases debido principalmente sus los valores de compresibilidad τ.

El establecer el régimen de compresibilidad del flujo no es algo sencillo. Sin embargo, haciendo uso de un número adimensional, es posible lograrlo. Este es el número de Mach (Ma). Este número se define como:

$$Ma = \frac{v}{a} = \frac{fuerzas\ de\ iniercia}{fuerzas\ elasticas} \qquad \text{(Ec. 10.5)}$$

Donde v es la velocidad del flujo y a representa la velocidad del sonido en el fluido de trabajo. Aunque se observa simplemente como una relación de velocidad nos dice cuando alguna de las fuerzas mencionadas es dominante, similar al número de Reynolds (Re).

Experimentalmente se ha demostrado que para números de Ma menores a 0.3 la densidad varia alrededor del 3%; con estas variaciones de densidad, el flujo se considera incompresible.

La velocidad del sonido se define de la siguiente manera

$$a^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s \qquad \text{(Ec. 10.6)}$$

Retomando la definición de compresibilidad isotrópica, ecuación 10.2

$$a = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} = \sqrt{(\rho \tau_s)^{-1}} \qquad \text{(Ec. 10.7)}$$

De esta forma se observa que la velocidad del sonido está asociada a la compresibilidad del fluido.

Si las variaciones de densidad son significativas, la ecuación de estado nos señala que las de presión y temperatura también lo son. Las grandes variaciones de temperatura implican que la ecuación de la energía no se puede suprimir. Los flujos compresibles combinan la dinámica de fluidos y la termodinámica, ambas son absolutamente necesarias para el desarrollo de los fundamentos teóricos necesarios.

El análisis del flujo compresible precisa las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, ecuación de estado y ecuación de la energía (primera y segunda Ley de la Termodinámica). Ecuaciones que se deben resolver simultáneamente para obtener las 4 incógnitas: velocidad, presión, temperatura y densidad.

Variación de la presión y de la velocidad del fluido con el área de flujo en ductos

Para flujos en ductos la cuestión más importante es simplemente si el flujo es subsónico (*Ma* < 1) o supersónico (*Ma* > 1), porque su efecto en el flujo y en sus propiedades es opuesto. A partir de la ecuación de continuidad y de la energía, y para un proceso isentrópico, se obtiene la relación que describe la variación de la presión y de la velocidad en función de la variación del área de flujo, ecuación 10.8 y 10.9 respectivamente.

$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho V^2}[1 - Ma^2] \qquad \text{(Ec. 10.8)}$$

De acuerdo a la ecuación 10.8, para flujos subsónicos (*Ma* < 1), el término 1-Ma^2 es positivo; por lo tanto *dA* y *dP* deben tener el mismo signo. Es decir, la presión del fluido debe disminuir si el área de flujo del ducto disminuye.

En flujos supersónicos (*Ma* > 1), el término 1-Ma^2 es negativo; por lo tanto *dA* y *dP* deben tener signo opuestos. Es decir la presión del fluido debe disminuir si el área de flujo aumenta.

$$\frac{dA}{A} = \frac{-dV}{V}[1 - Ma^2] \qquad \text{(Ec. 10.9)}$$

De acuerdo a la ecuación 10.9, para flujos subsónicos (*Ma* < 1), el término 1-Ma^2 es positivo; por lo tanto *dA* y *dV* deben tener signo opuesto. Es decir la velocidad del fluido debe aumentar si el área de flujo del ducto disminuye.

En flujos supersónicos (*Ma* > 1), el término 1-Ma^2 es negativo; por lo tanto *dA* y *dV* deben tener el mismo signo. Es decir la velocidad del fluido debe aumentar si el área de flujo aumenta.

Tobera

Es un dispositivo que convierte la energía (térmica y de presión) de un fluido en energía cinética. El aumento de velocidad que sufre el fluido en su recorrido a lo largo de la tobera es acompañado por una disminución de su presión y de la temperatura, al conservarse la energía del fluido. Se pueden tener toberas convergentes o toberas convergentes-divergentes.

Las toberas convergentes se utilizan para flujos subsónicos (*Ma* < 1) o hasta alcanzar condiciones sónicas, *Ma* = 1, figura 10.1.

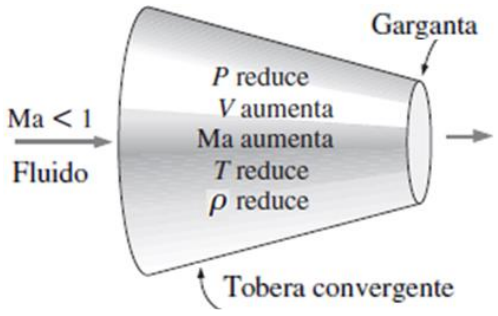


Figura 10.1. Tobera convergente. Tomado y modificado de la referencia [2].

Una tobera convergente-divergente, también conocida como tobera de Laval, se utiliza para acelerar gases a velocidades supersónicas, figura 10.2. En la garganta de la tobera se alcanzan condiciones sónicas (*Ma* = 1) y para poder acelerar más el flujo se utiliza una parte divergente. El aumento de velocidad que sufre el fluido en su recorrido a lo largo de la tobera es acompañado por una disminución de su presión y temperatura, figura 10.3.

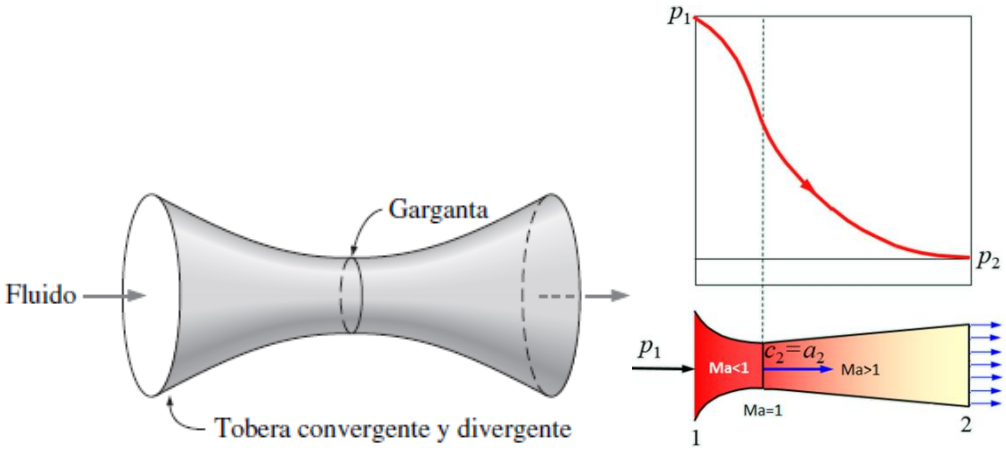


Figura 10.2. Tobera convergente-divergente. Tomado y modificado de la referencia [2].

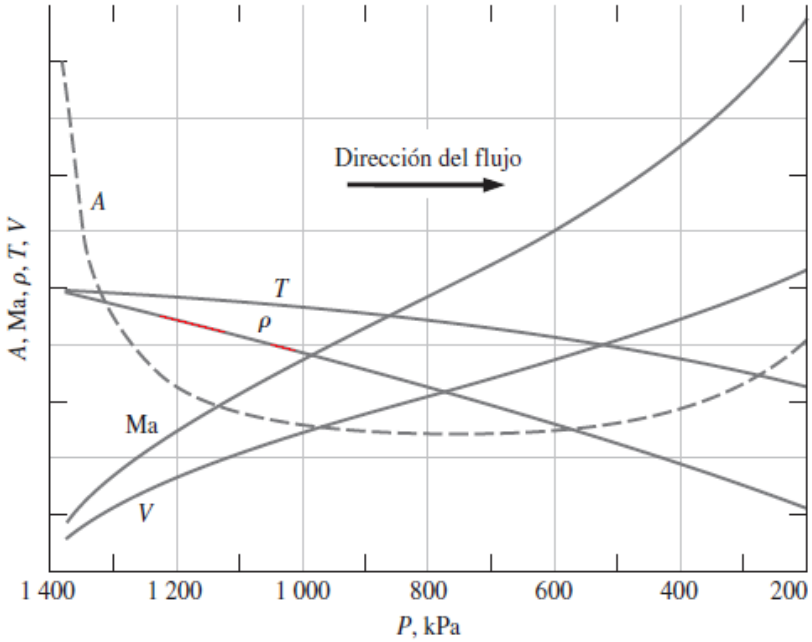


Figura 10.3. Cambios de las propiedades del fluido en una tobera convergente-divergente. La línea punteada representa el cambio de área de la sección transversal a lo largo del ducto a medida que disminuye la presión. Tomado de la referencia [3]

Inicialmente el fluido puede acelerarse en una tobera convergente pero se limita a la velocidad sónica (*Ma* = 1), la cual ocurre en la salida (garganta) de la tobera.

Figura 10.4. Sección convergente de una tobera de Laval. Tomado y modificado de la referencia [2].

La aceleración del fluido a velocidades supersónicas ($Ma > 1$) puede lograrse solamente al añadir una tobera divergente a la tobera aceleradora subsónica en su garganta.

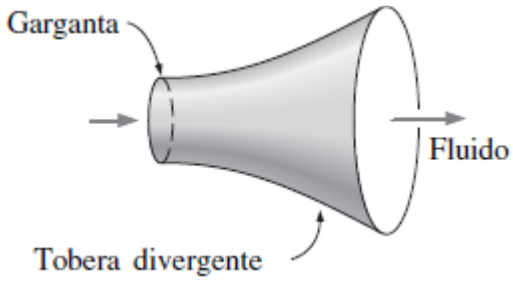


Figura 10.5. Sección divergente de una tobera de Laval. Tomado y modificado de la referencia [2].

La combinación resultante es una tobera convergente-divergente, la cual es un dispositivo común en aviones supersónicos y cohetes de propulsión para proporcionar una gran fuerza de empuje, Figura 10.6. Estas toberas deben tener una expansión adecuada para evitar la generación de ondas de choque o de contracción dentro del flujo.

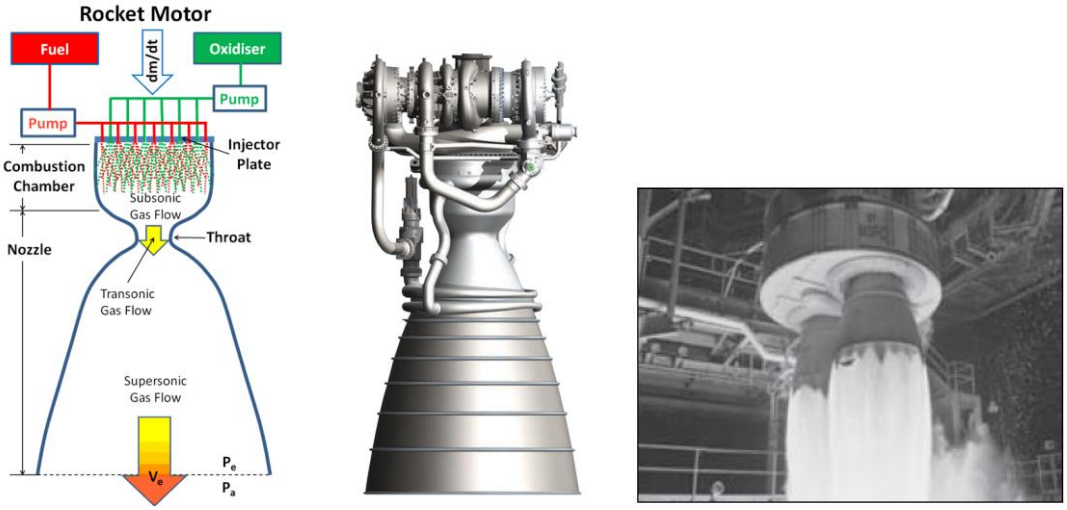


Figura 10.6. Utilización de una tobera convergente-divergente para la propulsión de un cohete. Tomado y modificado de la referencia [3].

Balance de energía

Considere el balance de energía dentro de un conducto con una entrada y una salida:

$$Q - W_F - W_v = \dot{m}\Delta\left(\hat{u} + \frac{P}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gZ\right) \qquad \text{(Ec. 10.10)}$$

Donde Q es flujo de calor, W_F es trabajo de flecha, W_v es trabajo viscoso, $\dot{m}$ el flujo másico y $\hat{u}$ es la energía interna que se define:

$$\hat{u} = C_V T = C_V \frac{P}{\rho R}$$

Para un gas ideal; donde C_V es el calor específico a volumen constante y R es la constante del gas. Considerando que no existe transferencia de calor $Q = 0$, ningún trabajo $W = 0$ y, si además el conducto es horizontal $\Delta Z = 0$, la ecuación de la energía queda:

$$C_V \frac{P}{\rho R} + \frac{P}{\rho} + \frac{U^2}{2} = Cte$$

Por otro lado, considerando la relación termodinámica $C_V = R/(k-1)$ la ecuación de la energía queda finalmente:

$$\frac{k}{k-1}\frac{P}{\rho}+\frac{U^2}{2}=Cte \qquad \text{(Ec. 10.11)}$$

Donde $k = C_P/C_V$ es el índice adiabático del gas.

4. Equipo y Material

- Banco de pruebas para flujo compresible.
- Tobera convergente-divergente.
- Manómetros (aceite, mercurio y/o digitales).
- Dos mangueras para tomar presiones en el dispositivo.
- Tacómetro.

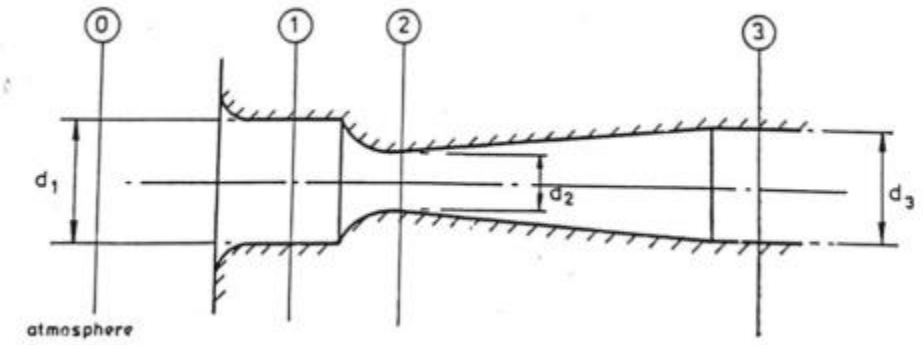


Figura 10.7. Conducto convergente – divergente. La dirección del flujo es de izquierda a derecha. Tomado de la referencia [4].

5. Desarrollo

Observe la figura 10.7 donde el punto (0) corresponde a las condiciones atmosféricas (justo antes de entrar al conducto); siendo p_0, T_0 y ρ_0 la presión, temperatura y densidad del aire, respectivamente, en la atmósfera. El punto (1) corresponde a la zona antes de la contracción y el punto (2) corresponde a la garganta del conducto convergente-divergente donde el flujo se acelera.

De acuerdo al manual del banco de pruebas para flujo compresible, el diámetro en el punto (1) es $D_1 = 24$ mm, el diámetro en el punto (2) es $D_2 = 9.5$ mm.

Actividad 1. Estudio del efecto de compresibilidad.

4. Verificar que el variador de frecuencia del motor eléctrico se encuentre en el valor mínimo y abrir completamente la válvula de salida del compresor antes de comenzar la medición. El variador de frecuencia tiene una lectura de 0 a 100 con incrementos de 10.
5. Tomar la lectura del barómetro que se tiene en el laboratorio para obtener la presión atmosférica P_0 y con el termómetro obtener la temperatura T_0 del laboratorio. Con la fórmula del gas ideal (Eq. 10.12), determinar la densidad del aire.
6. Conectar un manómetro de aceite a la entrada de la tobera (punto 1) para determinar la diferencia de presiones $P_0 - P_1$. Verificar la inclinación correcta de este manómetro (top, medium, bottom) de acuerdo al rango de medición y determinar el factor de medición que corresponda. Verificar que inicialmente el manómetro está nivelado y que el nivel de aceite marca en *0*. De lo contrario, nivelar y ajustar. En este caso, la medición se obtendrá en *kPa*.

   Nota: De no contar con un manómetro de aceite, se puede usar un manómetro digital que mida en el rango de medición para obtener $P_0 - P_1$.

7. Conectar un manómetro de mercurio o digital en la zona de la garganta (punto 2) para medir la diferencia de presión $P_0 - P_2$. En este caso la medición se obtendrá en *bar*, *Pa*, *mmHg*, etc., dependiendo del manómetro.
8. Encender el motor, elevar paulatinamente las revoluciones del mismo y verificar que el aceite del manómetro inclinado no supera el máximo valor. De lo contrario, modificar la inclinación del manómetro. Esto evitará fugas del aceite hacia la tobera.
9. Inicio de la medición: girar el variador de frecuencia hasta obtener un valor $P_0 - P_1 = 0.1$ *kPa* en el manómetro inclinado. Anotar el valor $P_0 - P_2$ del manómetro digital o mercurio. Realizar incrementos de 0.1 *kPa* en el manómetro inclinado y anotar ambas presiones hasta llegar a $P_0 - P_1 = 2$ kPa.

   Nota: Opcionalmente, se puede medir la velocidad angular del compresor con un tacómetro en cada una de las mediciones.

Con los datos obtenidos, puede llenarse la siguiente tabla:

Tabla 10.1. Tabla de datos.

$P_0 - P_1$ [kPa] Factor:	$P_0 - P_2$ [bar]	Velocidad compresor [rpm]
0.1		
0.2		
0.3		
0.4		
0.5		
0.6		
0.7		
0.8		
0.9		
1.0		
1.1		
1.2		
1.3		
1.4		
1.5		
1.6		
1.7		
1.8		
1.9		
2.0		

La densidad del aire ρ_0 en el laboratorio puede calcularse de la fórmula de ley de gases ideales:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0} \qquad \text{(Ec. 10.12)}$$

Donde R es la constante del aire $R = 287$ J/kg K.

Proceso a densidad constante

Si suponemos que la densidad del aire se mantiene constante a lo largo de todo el conducto, es decir, que el flujo es incompresible, entonces: $\rho_0 = \rho_1 = \rho_2$. En realidad, esto solo sería válido si la velocidad del flujo es suficientemente baja. En todo caso, bajo esta suposición, podemos evaluar la ecuación de Bernoulli entre los puntos (0) y (1), de manera que:

$$\frac{P_0}{\rho_0 g}+\frac{U_0^2}{2g}+Z_0 = \frac{P_1}{\rho_0 g}+\frac{U_1^2}{2g}+Z_1$$

donde g es la gravedad, Z_0, Z_1 son las alturas (en la dirección vertical) y U_0, U_1 son las velocidades del flujo en los puntos (0) y (1). Considerando que $U_0 = 0$ y $Z_0 = Z_1$ por ser un conducto horizontal:

$$\frac{P_0-P_1}{\rho_0 g} = \frac{U_1^2}{2g} \qquad \text{(Ec. 10.13)}$$

haciendo el mismo análisis para los puntos 0 y 2 se tiene:

$$\frac{P_0-P_2}{\rho_0 g} = \frac{U_2^2}{2g} \qquad \text{(Ec. 10.14)}$$

además, por conservación de masa $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ por lo que:

$$\dot{m}_1 = \rho_0 U_1 A_1 = \rho_0 U_2 A_2 = \dot{m}_2 \qquad \text{(Ec. 10.15)}$$

donde A_1 y A_2 son las áreas de las secciones de los puntos 1 y 2 respectivamente. Combinando estas 3 últimas relaciones podemos concluir que:

$$P_0 - P_2 = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 (P_0 - P_1) \qquad \text{(Ec. 10.16)}$$

Por lo tanto, de esta ecuación podemos observar que es posible estimar la diferencia de presión $P_0 - P_2$ a partir de la medición de $P_0 - P_1$, por lo que podríamos escribir:

$$(P_0 - P_2)_{calc} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 (P_0 - P_1)_{med}$$

donde el subíndice $calc$ se refiere a calculado y el subíndice med se refiere a medido. Un objetivo de la práctica es comparar esta diferencia de presión calculada $(P_0 - P_2)_{calc}$ con la diferencia medida $(P_0 - P_2)_{med}$. Si son similares, quiere decir que la suposición de flujo incompresible es válida. Pero si los valores medido y calculado son muy diferentes, entonces existen efectos de compresibilidad y la ecuación de Bernoulli ya no es válida. De las ecuaciones 10.13 y 10.14 podemos obtener la velocidad de flujo a la entrada y en la garganta.

$$U_1 = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho_0}} \qquad U_2 = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_2)}{\rho_0}} \qquad \text{(Ec. 10.17)}$$

El gasto másico del flujo en el conducto $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ se puede obtener con la ecuación 10.15.

Proceso a entropía constante

Dado que el flujo dentro del conducto convergente-divergente es compresible, una de las formas de estimar el flujo másico de manera más confiable, es considerar que el flujo en la garganta es isentrópico. Esto es, $P/\rho^k = cte$. De manera que:

$$\frac{P_0}{\rho_0^k} = \frac{P_2}{\rho_2^k} \qquad \text{(Ec. 10.18)}$$

además, se tiene que: $T^k P^{1-k} = cte.$, por lo que:

$$T_0^k P_0^{1-k} = T_2^k P_2^{1-k} \qquad \text{(Ec. 10.19)}$$

donde $k = 1.4$ para aire y P_0 y P_2 son presiones absolutas. De estas relaciones es posible estimar los valores de la densidad y temperatura en la garganta ρ_2, T_2. Además, podemos evaluar la ecuación de la energía (Eq. 10.11) entre los puntos (0) y (2) del conducto (ver figura 10.7):

$$\frac{K}{K-1}\frac{P_0}{\rho_0} + \frac{U_0^2}{2} = \frac{K}{K-1}\frac{P_2}{\rho_2} + \frac{U_2^2}{2}$$

donde $U_0 = 0$ (condiciones atmosféricas). La velocidad en el punto 2 queda:

$$U_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1}\left(\frac{P_0}{\rho_0} - \frac{P_2}{\rho_2}\right)}$$

Considerando que el flujo es isentrópico (Ecuación 10.18), se tiene: $\rho_2 = r^{1/k}\rho_0$, donde r es el Índice de presiones $r = P_2/P_0$. La velocidad del flujo queda:

$$U_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{P_0}{\rho_0}\left(1 - r^{\frac{k-1}{k}}\right)} \qquad \text{(Ec. 10.20)}$$

además, $\dot{m}_2 = \rho_2 U_2 A_2 = r^{1/k}\rho_0 U_2 A_2$, por lo que el flujo másico en la garganta es:

$$\dot{m}_2 = \rho_0 A_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{P_0}{\rho_0}\left(r^{\frac{2}{k}} - r^{\frac{k+1}{k}}\right)} \qquad \text{(Ec. 10.21)}$$

Por otro lado, la velocidad del sonido c_2 en la garganta puede calcularse según las propiedades locales a entropía constante:

$$c_2 = \sqrt{\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_s} = \sqrt{kRT_2} \qquad \text{(Ec. 10.22)}$$

donde la temperatura T_2 puede obtenerse usando la relación 10.19, por lo que:

$$T_2 = T_0\left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{1-k}{k}} \qquad \text{(Ec. 1.23)}$$

finalmente, el número de Mach puede obtenerse como:

$$Ma = \frac{U_2}{c_2} = \sqrt{\frac{2}{k-1}\left(r^{\frac{1-k}{k}} - 1\right)} \qquad \text{(Ec. 10.24)}$$

6. Resultados

Con los datos obtenidos pueden obtenerse las siguientes tablas de resultados:

Proceso a densidad constante

Tabla 10.2. Tabla de resultados. Proceso a densidad constante.

Vel compresor [rpm]	$(P_0 - P_1)$ ***med*** $[kPa]$	$(P_0 - P_2)$ ***med*** $[kPa]$	$(P_0 - P_2)$ ***calc*** $[kPa]$	$U_1\ [m/s]$	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2\ [kg/min]$	$U_2\ [m/s]$

Mostrar en una misma gráfica los valores de $(P_0 - P_2)$ med y $(P_0 - P_2)$ calc en función de $(P_0 - P_1)$ o en función de la velocidad del compresor en (rpm) y compararlas.

Proceso a entropía constante

Tabla 10.3. Tabla de resultados. Proceso a entropía constante.

Vel compresor [rpm]	$\boldsymbol{\rho_2\ [kg/m\text{^}3\ ]}$	$\boldsymbol{r = P_2/P_0}$	$\boldsymbol{U_2\ [m/s]}$	$\boldsymbol{\dot{m}_2\ [kg/min]}$	$\boldsymbol{Ma}$

Para estos resultados mostrar en la misma gráfica el gasto másico $\dot{m}_1$ de la tabla 10.2 y el gasto másico $\dot{m}_2$ de la tabla 10.3 en función de la relación de presiones r. Compararlas entre sí y verificar si el gasto másico $\dot{m}_2$ tiene un valor máximo (proceso de bloqueo). También se puede graficar el número de Mach Ma en función de r. Observe el valor de la densidad ρ_2.

7. Cuestionario

Contestar tomando en cuenta los resultados obtenidos y su análisis de respuesta a las siguientes cuestiones:

1. ¿Cuál es el comportamiento de las diferencias de presiones $(P_0 - P_2)$, leídas con el manómetro y aquella calculada? Si existen diferencias entre ambos valores, explique a qué se deben dichas discrepancias.
2. ¿Qué parámetro utilizaría usted para determinar hasta qué punto un flujo se puede considerar como incompresible?
3. ¿Cuál es el comportamiento de la gráfica Ma vs r?
4. Tomando en cuenta el valor del número de Mach, ¿qué tipo de flujo se presenta en la garganta de la tobera?
5. ¿Cómo varía la densidad del aire ρ_2 al aumentar la velocidad en la garganta U_2?
6. ¿Se ha observado en los resultados el fenómeno de ahogamiento (bloqueo) en la tobera? Argumente su respuesta.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. White, F. M. (2011). Fluid Mechanics. 7th Edition. McGraw-Hill EUA.
2. Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2019). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones. 4ª edición en español. McGraw-Hill México.
3. Cengel, Y. A. y Boles, M. A. (2012). Termodinámica. 7ª edición en español. McGraw-Hill México.
4. Armfield Ltd. (Issue 6, sept. 1996). Instruction Manual C1 Compresible Flow & multi-stage compresor bench. England.