

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	1/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Elaborado por:	Revisado por:	Autorizado por:	Vigente desde:
Dr. Rafael Chávez Martínez. M.I. Christian Lagarza Cortés. 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	10 de febrero de 2025

Manual de prácticas del laboratorio de Termofluidos

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	2/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Índice de prácticas

Práctica 1. Viscosimetría.....	3
Práctica 2. Medición de velocidad.....	12
Práctica 3. Medición de gasto.....	25
Práctica 4. Pérdidas primarias en tuberías.....	38
Práctica 5. Conductividad y resistencia térmica.....	48
Práctica 6. Convección de calor en una placa vertical.....	64

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	3/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 1

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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	4/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	5/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

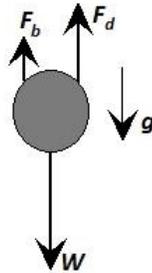


Figura 1.1. Diagrama de cuerpo libre de una esfera cayendo en un fluido.

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:

$$\mu = \frac{2gR^2}{9v} (\rho_b - \rho_f) \quad (\text{Ec. 1.1})$$

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 balón son decisión del usuario, 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 balón 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,

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	6/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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:

$$\mu = a \cdot 10^{\left(\frac{b}{T-c}\right)} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

$$\ln\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right) = a + b\left(\frac{T_0}{T}\right) + c\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \quad (\text{Ec. 1.3})$$

$$\mu = a \cdot e^{b/T} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Esta última ecuación se puede modificar y presentarse como:

$$\ln(\mu) = \ln(a) + \frac{b}{T} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	7/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 balón 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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	8/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 puede 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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	9/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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. 1.2 a Ec. 1.4). Tener cuidado de realizar el ajuste de curva utilizando solamente los datos del viscosímetro rotacional y temperatura absoluta.

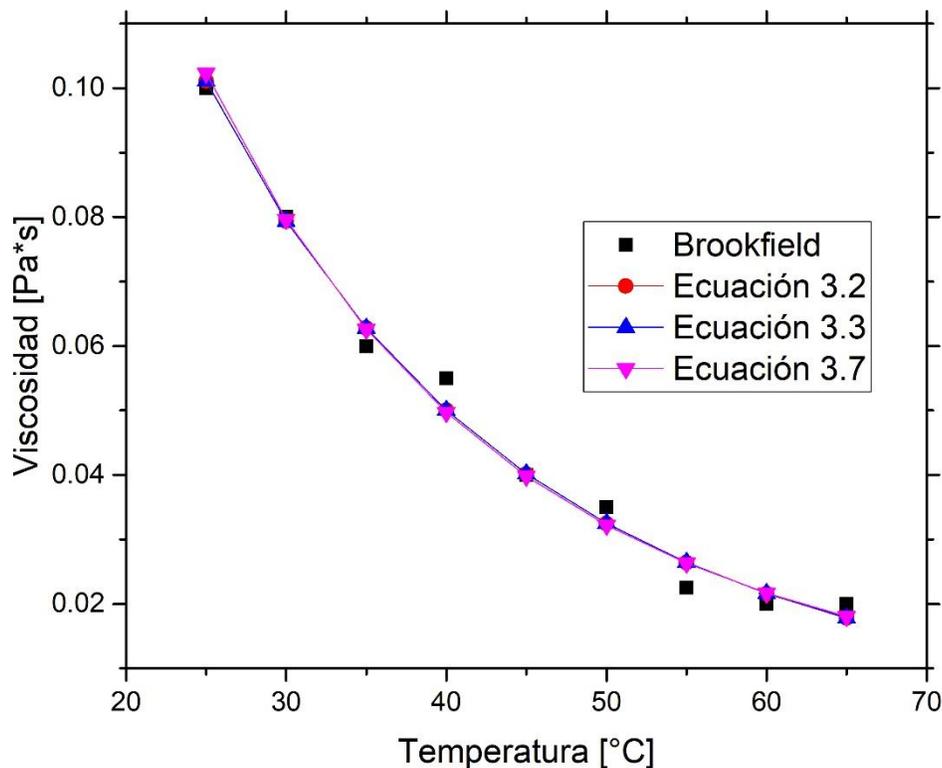


Figura 1.2. Gráfica de viscosidad contra temperatura.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	10/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 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

- ¿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
- ¿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.
- ¿Cómo se comporta la viscosidad con respecto a la temperatura y a qué se debe dicho comportamiento en líquidos y en gases?
- ¿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.
- ¿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?
- ¿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

- White F. M. (2011). *Mecánica de fluidos*. 7a edición. EUA: McGraw-Hill.
- 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. 1.1). Se

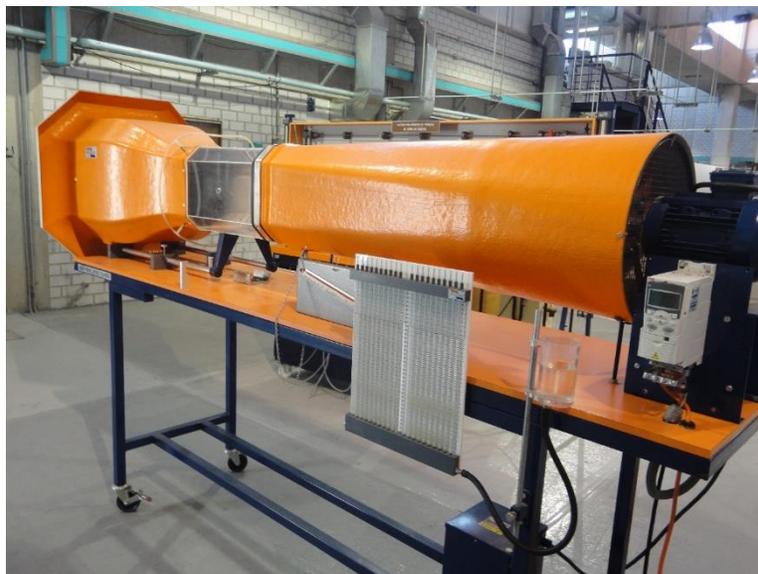
	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	11/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	12/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 2

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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	13/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 2.1.a) y de Pitot estática (figura 2.1.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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	14/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

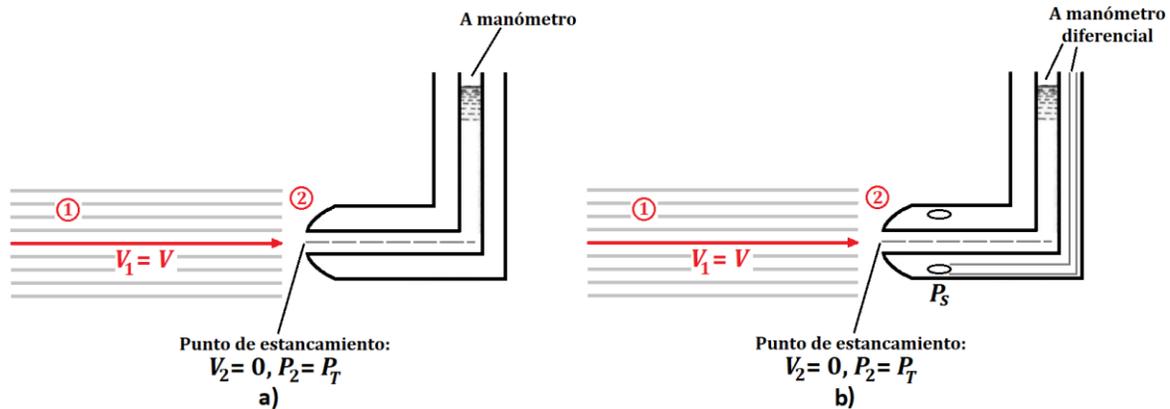


Figura 2.1. a) Tubo de Pitot. b) Tubo de Prandtl (Pitot estático).

Como se puede observar en la figura 2.1, 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**, $P_2 = P_T$ (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 .

$$P_T = P_S + P_D \quad (\text{Ec. 2.1})$$

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

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

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

$$V = \sqrt{\frac{2(P_T - P_S)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2P_D}{\rho}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

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 2.2.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 2.2.b.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	15/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 2.2. 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 2.2.

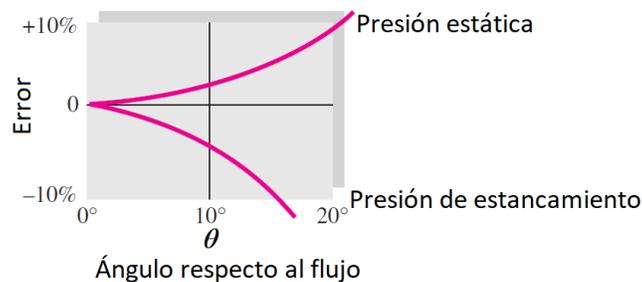


Figura 2.3. Error en las presiones en función del ángulo entre el tubo y el flujo (tomado y modificado de White, 2011).

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.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_p}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

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,

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	16/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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.

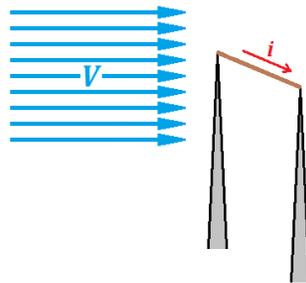


Figura 2.3. Principio del anemómetro de Hilo Caliente.

Esta sonda consta de un hilo metálico delgado ($10\ \mu\text{m}$ 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)

$$q = I^2R \approx (T_W - T_f)(a + b \cdot V^n) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	17/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 2.4).



Figura 2.4. 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 2.5. 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:

$$Q = \int (\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (\text{Ec. 2.6})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	18/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Donde \mathbf{V} es el vector velocidad del flujo y \mathbf{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

$$V_{prom} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

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 2.6, 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.

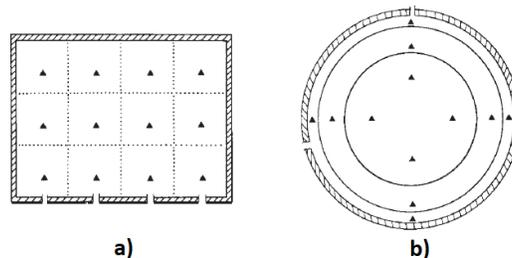


Figura 2.6. Segmentación del área para toma de mediciones de velocidad para el cálculo de la velocidad promedio para ductos a) rectangulares y b) circulares.

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 2.1. 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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	19/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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.

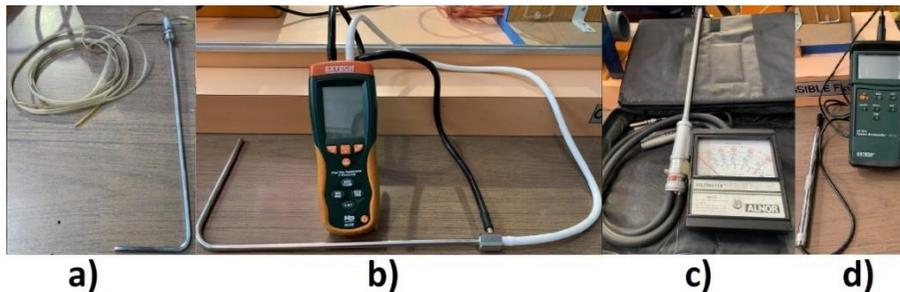


Figura 2.7. Anemómetros a utilizar en la práctica de laboratorio. a) Tubo de Prandtl de columna de agua, b) Tubo de Prandtl digital, c) Velómetro, d) Hilo Caliente.

Tubo de Prandtl de columna de agua (figura 2.7.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 2.7.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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	20/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Velómetro (figura 2.7.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 2.7.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 2.8.
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 2.2: 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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	21/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 2.8. Túnel de viento del laboratorio.

Tabla 2.2. 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 2.1 y la figura 2.6. Se medirá entonces la velocidad del flujo de aire en 4 puntos de la sección transversal del túnel de viento, mostradas en la figura 2.9, para calcular la velocidad promedio y el flujo volumétrico de aire en el túnel de viento (cuya área de sección transversal es de $A = 0.08843 \text{ m}^2$) 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 2.9 hasta donde se realizó la

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	22/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- marca en el tubo y registrar las mediciones en la tabla 2.3; utilizar el transportador con nivel de burbuja o con la herramienta auxiliar para ello.
- Repetir el procedimiento en el lado opuesto de la zona de visualización del túnel de viento, tapando previamente el orificio del lado opuesto.
 - 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.

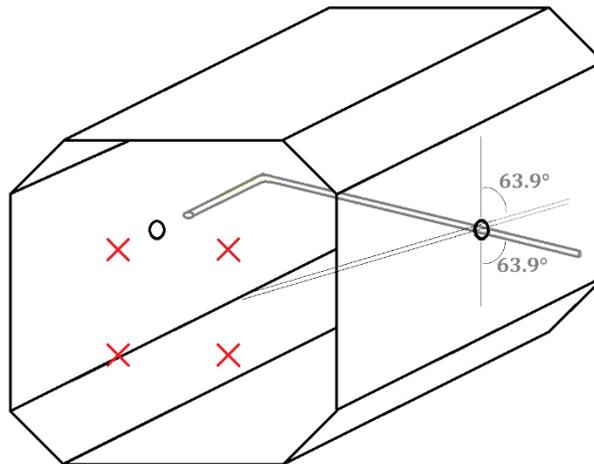


Figura 2.9. Diagrama de la posición del tubo de Prandtl digital para las mediciones de velocidad.

Tabla 2.3. Datos experimentales para obtener la velocidad promedio del flujo de aire en la sección de prueba del túnel de viento.

v [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 2.4.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	23/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 2.4. 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.

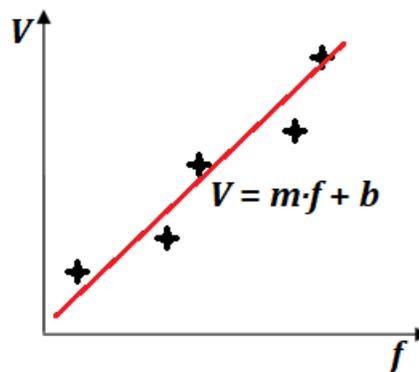


Figura2.8. Gráfica de velocidad contra frecuencia con datos experimentales y ajuste de curva.

Para la actividad 2. Calcular la velocidad promedio, V_{prom} con los datos de la tabla 2.3, y el flujo volumétrico, \dot{Q} , en el ducto con la Ec. 2.7.

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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	24/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	25/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 3

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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	26/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	27/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tubo venturi

El Tubo venturi, figura 3.1, 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 ($P_1 - P_2$).

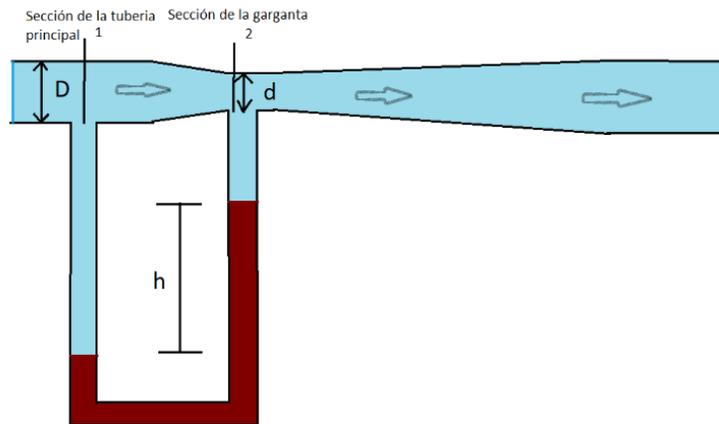


Figura 3.1. Tubo venturi.

Placa de orificio

Una placa plana con un agujero de bordes rectos, maquinados de forma precisa, se refiere como un orificio, figura 3.2. 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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	28/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

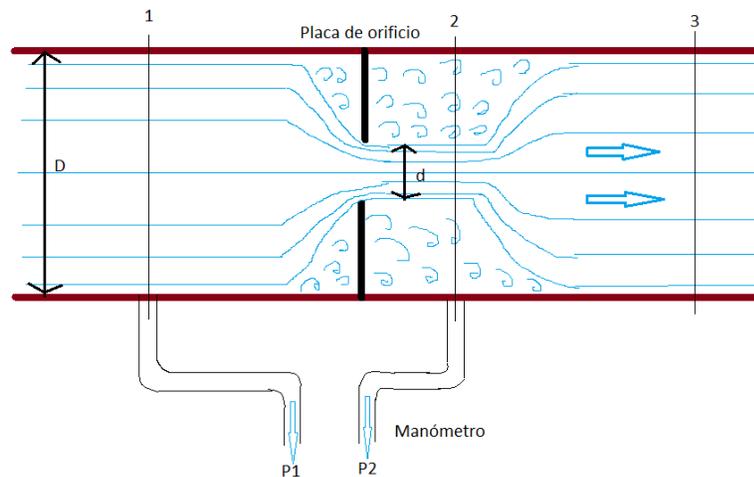


Figura 3.2. Placa de orificio

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).

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	29/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 3.1. 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).

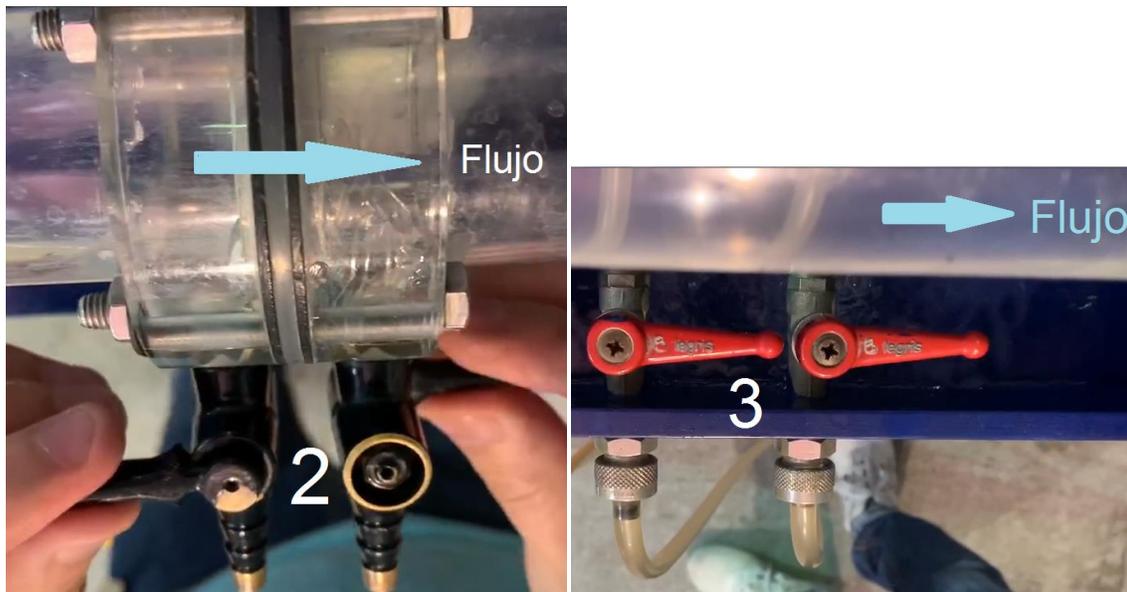


Figura 3.2. Ubicación de zona de interés (2) y (3).

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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	30/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 3.3. 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.

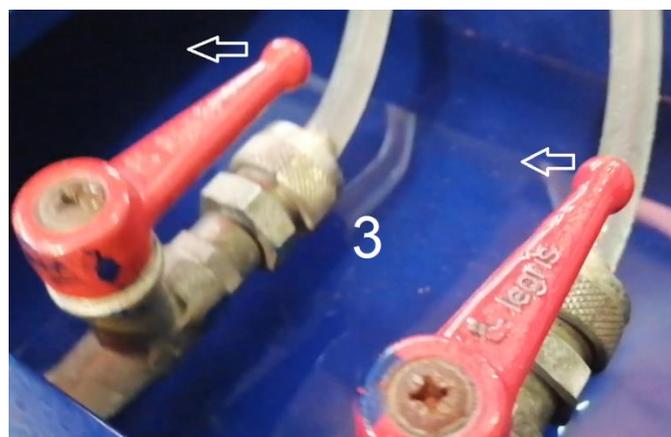


Figura 3.4. Ubicación de zona de interés (3) purga de aire en mangueras.

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:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	31/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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



Figura 3.5. Ubicación de zona de interés (6).

- 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 cronómetro.

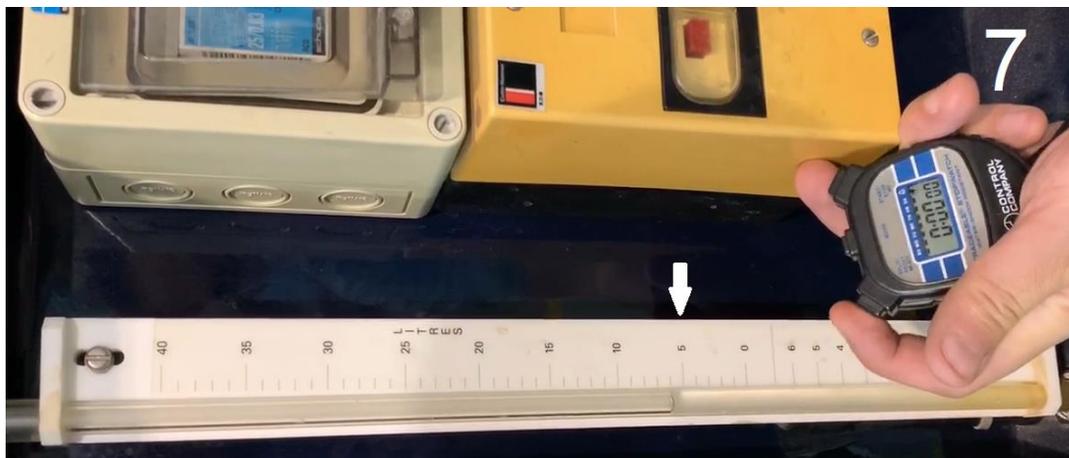


Figura 3.6. Ubicación de zona de interés (7).

- 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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	32/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 3.1: 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 3.2: 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} .

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	33/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 Venturi. Los resultados obtenidos se anotarán en las tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3: 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 3.4: 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 C_d contra el número de Reynolds para el tubo Venturi y para la placa de orificio.

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?

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	34/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

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

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:

$$Q_{real} = \text{Volumen} / \text{tiempo} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

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

$$V_{prom} = \frac{Q_{real}}{\text{Area}_{transversal\ seccion\ 1}} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

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

$$Re = \frac{V_{prom} * \rho * D_1}{\mu} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

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 3.1 o figura 3.2) y continuidad de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	35/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2) = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right] \quad (\text{Ec. 3.5})$$

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

$$\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Sustituyendo la Ec. (3.6) en (3.5) se obtiene:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

El gasto volumétrico ideal sería:

$$Q_I = A_2 V_2 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

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

$$\Delta P = (\rho_M - \rho_f) * g * \Delta h \quad (\text{Ec. 3.9})$$

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:

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_I} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	36/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

Venturi:

$$C_{d \text{ fabricante}} = 0.98 \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Placa de orificio:

$$C_{d \text{ fabricante}} = 0.60 \quad \text{Ec. 3.12})$$

Existe en la literatura técnica correlaciones experimentales y gráficas que presentan el C_d 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.

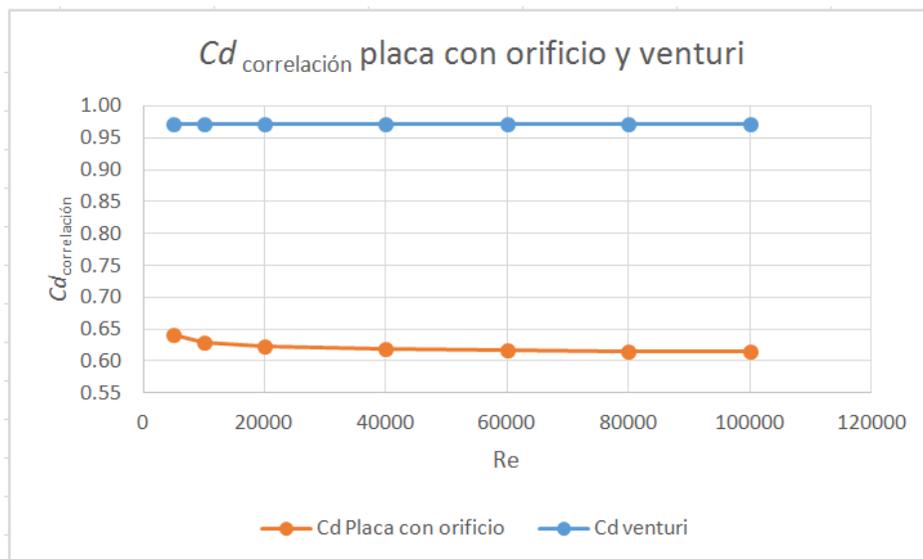


Figura 3.7. Gráficas obtenidas a partir de correlaciones experimentales utilizando valores obtenidos de la práctica, C_d correlación VS Re .

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

$$Q_{r \text{ equipo}} = Q_i * C_{d \text{ fabricante}} \quad (\text{Ec. 3.13})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	37/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

También se calcula el error:

$$\%Error = |(Q_{real} - Q_{r\ equipo})| / Q_{real} \times 100 \quad (Ec. 3.14)$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	38/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 4

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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	39/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	40/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho e dV + \int_{SC} \rho e (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (\text{Ec. 4.1})$$

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 vector de velocidad normal a la superficie de control.

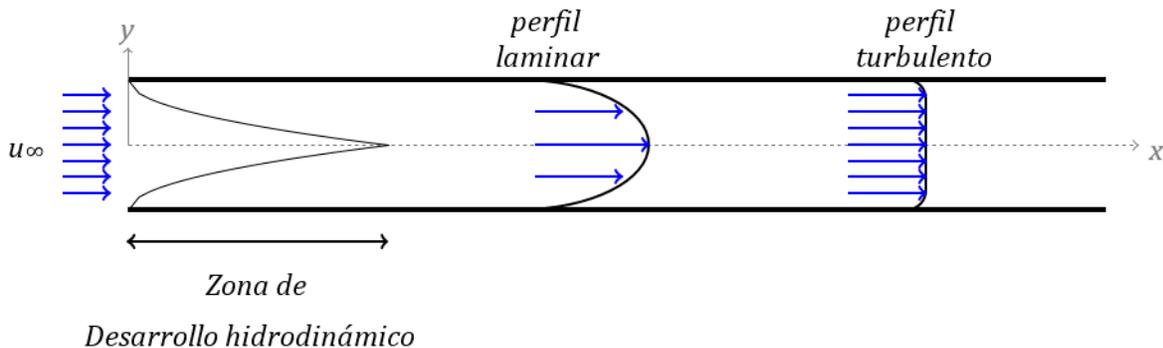


Figura 4.1. Flujo al interior de una tubería.

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:

$$\dot{W}_p = \int_{SC} P (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (\text{Ec. 4.2})$$

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 ($\rho = \text{cte.}$).
- Un sistema con una entrada y una salida.

Bajo estas simplificaciones la Ec. 4.1 se reduce a:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	41/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$q - w_{eje} = \frac{p_2}{\rho} + u_2 + gz_2 + \frac{V_2^2}{2} - \frac{p_1}{\rho} - u_1 + gz_1 + \frac{V_1^2}{2} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

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:

$$h_l = u_2 - u_1 - q \quad (\text{Ec. 4.4})$$

La Ec. 4.3 queda como:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + w_{bomba} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + w_{turbina} + h_l \quad (\text{Ec. 4.5})$$

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

$$h_l = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

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 caída de presión Δp a lo largo del tubo por unidad de longitud L es igual a

$$\Delta p = \frac{32\mu L \bar{V}}{D^2} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

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

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho \bar{V}^2}{2} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Recordando que la Ec. 4.6 se puede escribir como:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	42/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$h_l = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

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

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\rho \bar{v}^2}{2g} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Todos los términos en la Ec. 4.10 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

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

La Ec. 4.10 se conoce como la ecuación de Darcy-Weizbach, 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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	43/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 figura. 4.2.

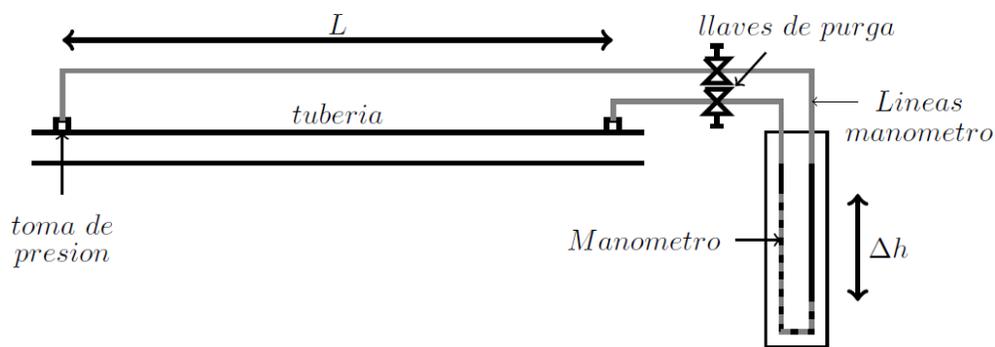


Figura 4.2. Esquema de una tubería y la conexión del manómetro diferencial.

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 4.1.

Tabla 4.1: 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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	44/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 figura 4.2, 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 figura 4.3. 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 dirija a éste último
4. Escribir los datos obtenidos en la Tabla 4.2
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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	45/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

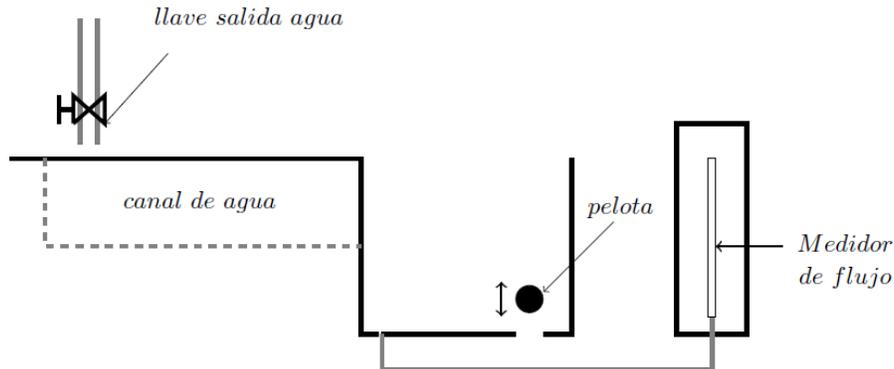


Figura 4.3. Medición del flujo volumétrico.

Tabla 4.2: 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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	46/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Desconectar el equipo de la toma de corriente.

6. Resultados

- Los resultados obtenidos se anotarán en las tablas 4.1 y 4.2, la primera con los parámetros de cada tubo y la segunda con las mediciones realizadas.
- Adicionalmente, tendrán que desarrollar cálculos para determinar la pérdida de carga en cada tubería (h_l). Para ello utilizarán como ejemplo la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Cálculo de la pérdida de carga.

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

- Con los cálculos de pérdida de carga se generará una gráfica Re vs Q , tomando como ejemplo la figura 4.4.

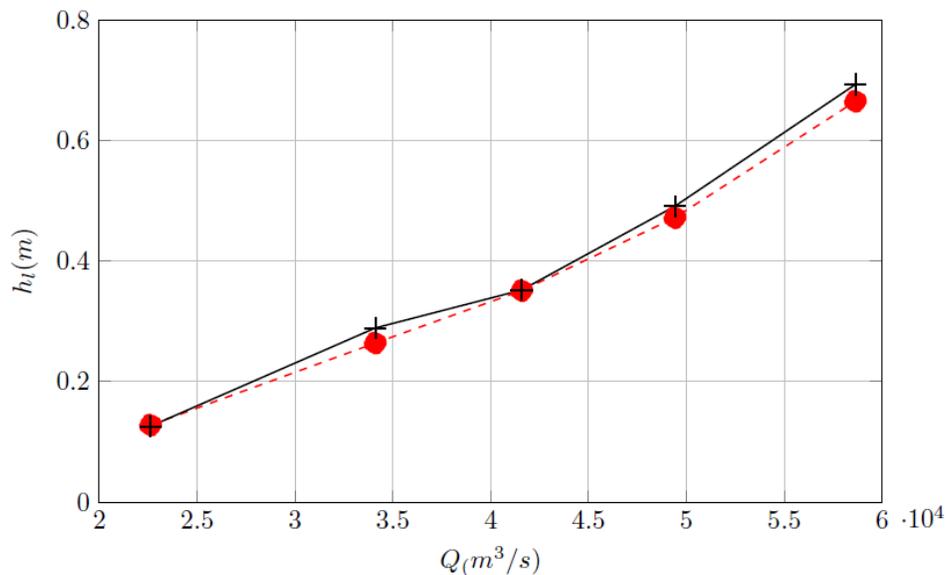


Figura 4.4: Resultados del cálculo de pérdidas de carga en tuberías horizontales de sección constante con la ecuación de la energía $h_{l,exp}$ (+) y la ecuación de Darcy-Weisbach $h_{l,Darcy}$ (—).

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	47/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

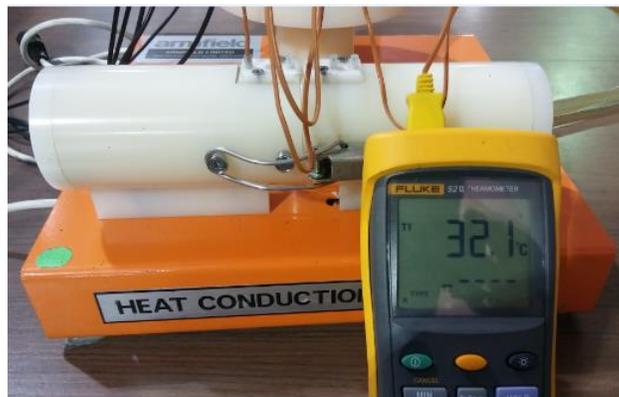
Fuentes básicas

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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	48/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 5

Conductividad y resistencia térmica



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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	49/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	Riesgo asociado.
Pasta térmica	Posible intoxicación por ingestión o irritación por contacto con los ojos.

2. Objetivos

- ✓ Determinar experimentalmente la conductividad térmica del cilindro metálico que forma parte del dispositivo experimental.
- ✓ Obtener la distribución de temperatura a lo largo del cilindro, tanto experimental como teóricamente.
- ✓ Analizar el efecto de la resistencia de contacto en la conducción de calor en el cilindro y en la distribución de temperaturas.

3. Conceptos básicos y definiciones

La transferencia de calor es la energía térmica en tránsito por unidad de tiempo debido a una diferencia de temperaturas; esta última es la fuerza impulsora para cualquier forma de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. La temperatura está asociada a la energía molecular.

La transferencia de calor por conducción se define como la transferencia de energía térmica de las partículas de mayor temperatura de una sustancia hacia las de menor temperatura. Recordando que la temperatura es proporcional a la actividad molecular.

En un sólido se debe a las vibraciones de las moléculas en una red conocida como "fonones" y al flujo de electrones libres.

La rapidez a la que se da la conducción de calor en el sólido depende de la diferencia de temperaturas, de la configuración geométrica, del espesor y del material de que está hecho. Su relación está definida en la ley de Fourier, definida en la Ec. 5.1.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

donde q es la rapidez de la conducción de calor en el medio (W), k es la conductividad térmica ($W/m \cdot ^\circ C$), A es el área perpendicular a la transferencia de calor (m^2) y dT/dx es el gradiente de

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	50/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) el cual es el de cambio de la temperatura con respecto a la distancia en esa dirección.

El calor se conduce en la dirección de la temperatura decreciente, por lo que el gradiente de temperatura es negativo cuando el calor se conduce en la dirección positiva de x . La ley de Fourier tiene las siguientes características:

- Es una generalización basada en evidencia experimental sin hacer uso de ninguna teoría molecular.
- Es una expresión que define una propiedad de la materia, la conductividad térmica.
- Es una expresión vectorial indicando que el flujo de calor transferido es en dirección del decremento de temperatura.
- Se aplica para sólidos, así como líquidos y gases estáticos.

Conductividad térmica

El uso de la ley de Fourier implica conocer la conductividad térmica del material. Ésta es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado indica que el material es un buen conductor de calor, mientras que un valor bajo indica que es un mal conductor de calor, también conocidos como aislantes térmicos.

La figura 5.1 presenta la conductividad térmica de diferentes materiales. Observe que se consideran materiales aislantes aquellos que tienen una conductividad térmica menor a $1 (W/m \cdot ^{\circ}\text{C})$. Como referencia, la conductividad térmica del cobre es de $400 (W/m \cdot ^{\circ}\text{C})$, del aluminio es de $237 (W/m \cdot ^{\circ}\text{C})$, mientras que para el aire es de $0.026 (W/m \cdot ^{\circ}\text{C})$. En la bibliografía especializada se pueden encontrar tablas para diversos materiales y fluidos.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	51/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

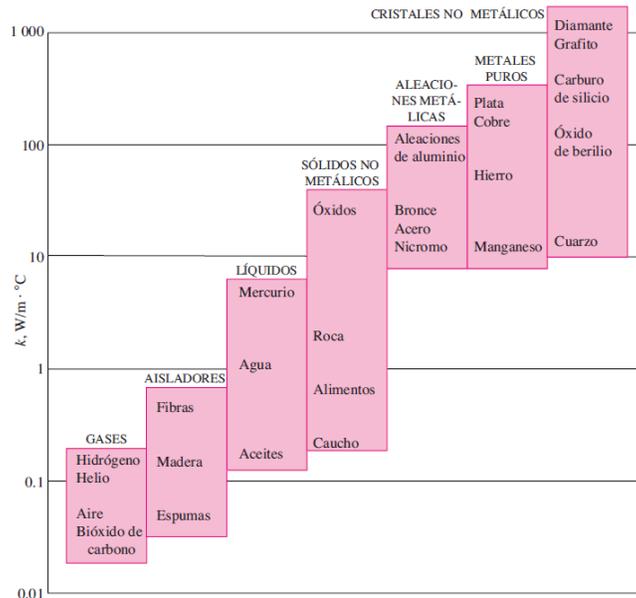


Figura 5.1. Conductividad térmica de materiales a temperatura ambiente [2].

Distribución de temperaturas teórica en un cilindro

La distribución de temperaturas en un cilindro se puede obtener a partir de un balance de energía sobre un elemento de volumen diferencial en coordenadas cilíndricas. El resultado es la Ec. 5.2.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(kr \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Esta se puede simplificar aplicando ciertas consideraciones como: (1) conducción de calor unidimensional (en dirección z), (2) en estado estacionario y (3) sin generación interna de calor en el medio. Es importante subrayar que la transferencia de calor será constante en todo el cilindro si se cumplen las condiciones anteriores.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Puesto que la temperatura es solo función de z , en la ecuación se rempazan las derivadas parciales por derivadas ordinarias.

$$\frac{d}{dz} \left(k \frac{dT}{dz} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Para conductividad térmica constante:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	52/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\frac{d^2T}{dz^2} = 0 \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Cuya solución general es:

$$T(z) = C_1z + C_2 \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Para obtener el valor de las constantes se aplica las condiciones de frontera.

$$\text{En } z=0: \quad q'' = \frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dz}$$

donde q'' es el flujo de calor.

$$\text{En } z = L: \quad T(L) = T_f, \text{ mostradas en la figura 5.2}$$

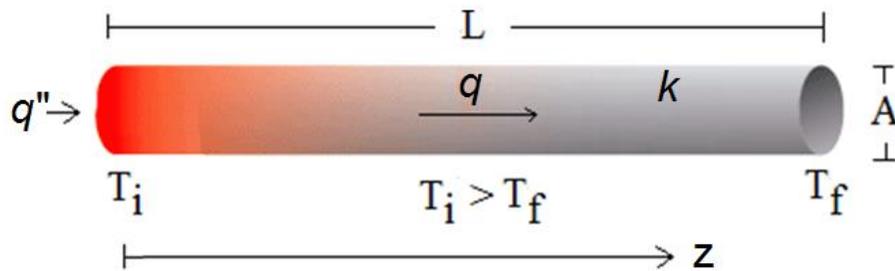


Figura 5.2. Condiciones de frontera en un cilindro para conducción de calor unidimensional en estado estacionario y sin generación interna de calor.

Para encontrar C_1 se deriva la Ec. 5.6 y aplica la condición de frontera para $z = 0$, obteniendo

$$C_1 = -\frac{q''}{k}$$

Aplicando la condición de frontera para $z = L$ en la Ec. 5.6 y el valor de la constante C_1 , se obtiene que

$$C_2 = T_f + \frac{q''}{k}L$$

Sustituyendo las constantes en la Ec. 5.6 y reduciendo términos, se obtiene la Ec. 5.7 que representa la distribución de temperatura teórica en un cuerpo de geometría cilíndrica. Cabe destacar que esta ecuación es lineal.

$$T(z) = \frac{q''}{k}(L - z) + T_f \quad (\text{Ec. 5.7})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	53/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Concepto de resistencia térmica

Tomando como referencia la conducción de calor unidireccional en estado estacionario en paredes planas sin generación interna de calor y conductividad térmica constante, como se representa en la figura 5.3. Para estas condiciones la temperatura varía de forma lineal con la coordenada espacial, por ejemplo x .

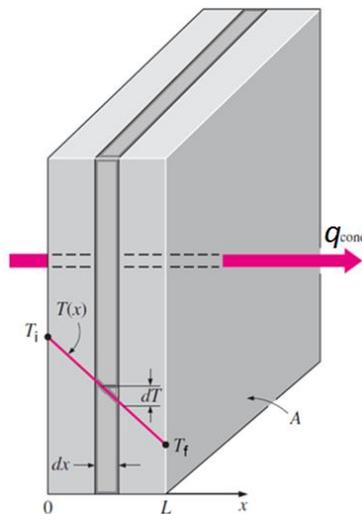


Figura 5.3. Transferencia de calor a través de una pared plana, [2]

$$T(x) = \frac{(T_f - T_i)x}{L} + T_i \quad (\text{Ec. 5.8})$$

Derivando:

$$\frac{d}{dx} T(x) = \frac{(T_f - T_i)}{L} \quad (\text{Ec. 5.9})$$

Sustituyendo la Ec. 5.9 en la Ec. 5.1, la transferencia de calor es:

$$q = -kA \frac{(T_f - T_i)}{L} \quad (\text{Ec. 5.10})$$

Esta última ecuación indica que la velocidad a la que se transfiere la energía térmica es constante a lo largo de la dirección x . A partir de esta ecuación se ha propuesto una analogía entre la transferencia de calor y el transporte de energía eléctrica en un conductor. De la misma manera

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	54/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

que se asocia una resistencia eléctrica, R_e , con la conducción de electricidad en un conductor, se asocia una resistencia térmica con la conducción de calor, $R_{t,conducción}$.

Corriente eléctrica:
$$I = (V_1 - V_2)/R_e$$

Transferencia de calor, reordenado la Ec. 5.10:

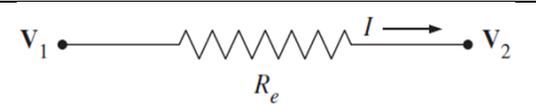
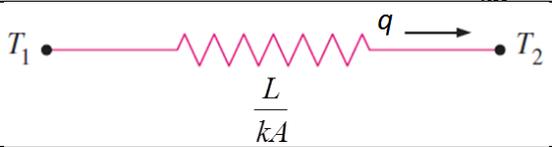
$$q = (T_i - T_f)/R_{t,conducción} \quad (\text{Ec. 5.11})$$

Donde la resistencia térmica a la conducción de calor es:

$$R_{t,conducción} = \frac{L}{kA} = R_{pared} \quad (\text{Ec. 5.12})$$

La Ec. 5.12 es la resistencia térmica de la pared en contra de la conducción de calor o simplemente la resistencia que presenta la pared a la conducción de calor. En la tabla 5.1 se relaciona la parte eléctrica con su equivalente térmico.

Tabla 5.1: Parte eléctrica con su equivalente térmico.

Eléctrico	Térmico
Corriente eléctrica: I	Calor transferido: q
Diferencia de voltaje: $\Delta V = (V_1 - V_2)$	Diferencia de temperatura: $\Delta T = (T_1 - T_2)$
Resistencia eléctrica: R_e	Resistencia térmica: $R_{t,conducción} = \frac{L}{kA}$
	

Resistencia térmica por contacto

En la presente práctica se analiza la conducción de calor en un cilindro dividido en dos secciones que se ponen en contacto, como lo muestra la figura 5.4.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	55/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 5.4. Arreglo experimental. Conducción de calor en un cilindro de latón.

La interfaz de la unión provoca una interrupción en la continuidad del material y una resistencia a la conducción de calor en la interface de las dos secciones, como se detalla en la figura 5.5.

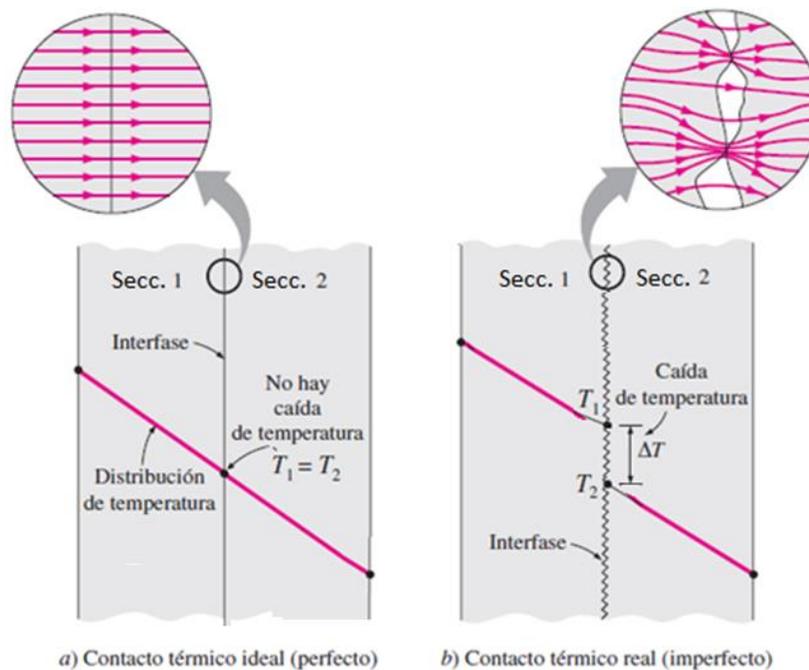


Figura 5.5. Distribución de temperatura y líneas de flujo de calor a lo largo de dos secciones del cilindro para contacto perfecto e imperfecto. Adaptado de [2].

La Ec. 5.7 se obtuvo considerando continuidad en el material del cilindro y aplicaría si las dos secciones del cilindro presentan “contacto perfecto” en la interfaz como se muestra en la figura 5.5a. Éste sería el caso cuando las dos superficies de las secciones son perfectamente lisas y producen un contacto perfecto en cada punto.

Sin embargo, las superficies de las dos secciones son ásperas cuando se examinan con un microscopio, presentando picos y valles. Cuando se unen las superficies no existe contacto perfecto. Los picos forman buen contacto material pero los valles formarían espacios con aire,

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	56/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

figura 5.5b que actúan como aislamiento debido a la baja conductividad térmica del aire, $k_{\text{aire}} < 0.1 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$.

Por lo tanto, la interface ofrece dificultad o “resistencia” a la transferencia de calor entre las dos secciones del cilindro y se refleja en temperaturas diferentes en las dos secciones en una diminuta distancia. La magnitud de la caída de temperatura será proporcional a la resistencia de contacto.

La resistencia a la transferencia de calor en la interface por unida de área de la interface se conoce como resistencia térmica por contacto, $R_{t,\text{contacto}}$.

Pasta térmica

La pasta térmica generalmente es un fluido viscoso con conductividad térmica mayor al aire que promueve el acoplamiento térmico efectivo entre dos superficies sólidas. Su objetivo es llenar los huecos que hay entre los valles en la interface de los sólidos, como se presenta en la figura 5.6. Solo se necesita aplicar una pequeña capa en las superficies ya que un exceso de pasta puede disminuir su efectividad y crear una resistencia térmica de magnitud similar al que se tendría con el aire en la interface. Si se aplica de forma adecuada, permite reducir la resistencia térmica hasta en un 75%.

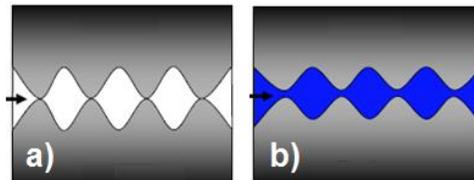


Figura 5.6. a) Cavidades con aire y b) cavidades con grasa térmica

Las características deseables de la grasa térmica es una alta conductividad térmica, estable a altas temperaturas, además de no presentar escurrimiento y que no se degrade. En el mercado se comercializan una gran variedad de pastas térmicas, las más comunes se basan en *componentes cerámicos y/o metálicos*. Las primeras diseñadas para tener alta conductividad térmica y ser dieléctricas que se encuentran entre 0.7 y 0.9 [W/m·K]; mientras que los basados en componentes metálicos, llega a valores de 9 [W/m·K].

4. Equipo y Material

1. Equipo de conducción de calor.
2. Termopar digital.
3. Cronómetro.
4. Calibrador Vernier.
5. Pasta térmica.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	57/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

La figura 5.7 y 5.8 muestran el arreglo experimental para analizar la conducción de calor en un cilindro de latón dividido. Este consta de un cilindro de 2.54 cm de diámetro. Distancia entre tomas de temperatura de 1 cm.

La composición de la aleación del latón se encuentra en el rango de 60 a 65% de cobre y de 35 a 40% de Zinc.

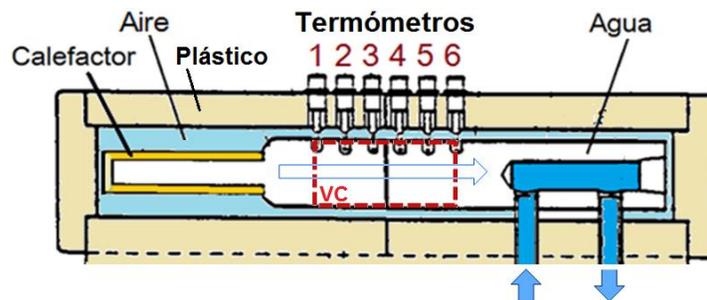


Figura 5.7. Esquema del arreglo experimental indicando el volumen de control. Adaptado de [3].

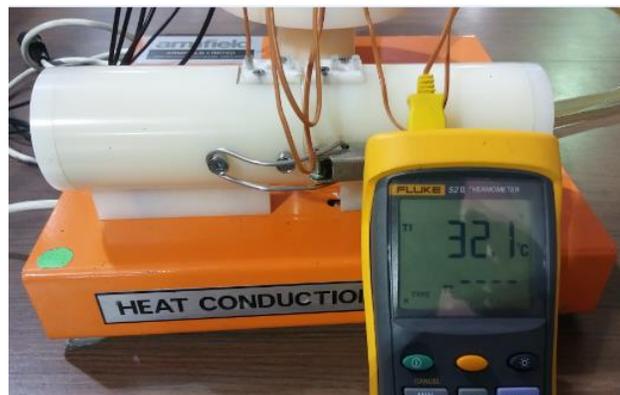


Figura 5.8. Arreglo experimental.

El arreglo experimental cuenta con un calefactor eléctrico en el extremo izquierdo de la sección 1 que eleva la temperatura en el punto 1 de medición y de toda la barra de latón. Por otro lado, en el extremo derecho de la sección 2, circula agua a temperatura ambiente con un gasto tal que permite que la temperatura en el punto 6 sea cercana a la temperatura ambiente. Por lo que $T_1 > T_6$.

La construcción del arreglo experimental facilita que el calor generado (por unidad de tiempo) por el calefactor se transmita por conducción en el cilindro, hasta que finalmente es retirado, por el

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	58/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

agua, logrando el estado estacionario en aproximadamente 25 minutos. De esta forma, idealmente se espera que $q_{conducción} \cong \dot{W}_{calefactor}$.

Es importante que **el profesor prepare la primera actividad al inicio de la clase** para contar con tiempo suficiente para realizar las dos actividades programadas.

5. Desarrollo

Actividad 1. Conducción de calor sin pasta térmica.

1. Unir firmemente las dos secciones del cilindro con las abrazaderas.
2. Asignar una potencia del calefactor, se sugiere una potencia de 11 W o menor.
3. Abrir parcialmente la válvula de alimentación del agua de enfriamiento. Se sugiere abrir entre $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ de giro.
4. Esperar de 20 a 25 minutos para alcanzar el estado estacionario en el cilindro. Transcurrido este tiempo, se sugiere monitorear la temperatura del punto 1 por dos minutos más para verificar el estado estacionario.
5. Medir la temperatura de cada punto de medición con el termopar. Se debe asegurar que el termopar toque firmemente el cilindro de latón. Después de introducir el termopar en el punto de medición, esperar al menos de 2 minutos para que se estabilice la lectura.
6. Llenar la tabla 5.2 con las lecturas obtenidas.

Tabla 5.2: Datos experimentales sin pasta térmica.

Potencia [W]		
Punto	z [m]	T [°C]
1	0	
2	0.01	
3	0.02	
4	0.03	
5	0.04	
6	0.05	

Actividad 2. Conducción de calor con pasta térmica.

1. Aplicar una gota de aproximadamente 5 mm de diámetro de pasta térmica en uno de los extremos del cilindro y unir las dos secciones con las abrazaderas.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	59/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

2. Mantener la misma potencia eléctrica del calefactor de la actividad 1.
3. Repetir los pasos 4 y 5 de la actividad 1.
4. Anotar las lecturas en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Datos experimentales con pasta térmica.

Potencia [W]		
Punto	z [m]	T [°C]
1	0	
2	0.01	
3	0.02	
4	0.03	
5	0.04	
6	0.05	

6. Resultados

Cálculo experimental de la conductividad térmica del material del cilindro.

Para un arreglo experimental “ideal”, la conductividad térmica se puede calcular en cualquier par de temperaturas medidas a lo largo del cilindro adaptando la ecuación 5.1 para incrementos de temperatura (excepto el par formado por las temperaturas 3 y 4).

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (\text{Ec. 5.13})$$

Antes se debe calcular el gradiente de temperaturas local entre dos puntos, por ejemplo entre el punto 1 y 2.

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta z}\right)_{1-2} = \frac{(T_2 - T_1)}{(z_2 - z_1)} \quad (\text{Ec. 5.14})$$

La conductividad térmica local se obtiene de la Ec. 5.13.

La conductividad térmica experimental promedio se obtiene considerando que los dos últimos pares de temperatura ya no se ven afectados por la resistencia de contacto y se aproximan más a la distribución lineal teórica.

$$k_{prom} = \{(k_{4-5} + k_{5-6})_{Actividad\ 1} + (k_{4-5} + k_{5-6})_{Actividad\ 2}\} / 4 \quad (\text{Ec. 5.15})$$

Los resultados se presentan en la tabla 5.4.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	60/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 5.4. Tabla de resultados.

Punto	z [m]	Actividad 1			Actividad 2		
		T [°C]	Gradiente [°C/m] local	k local [W/m°C]	T [°C]	Gradiente [°C/m] local	k local [W/m°C]
1	0		<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	0.01						
3	0.02						
4	0.03						
5	0.04						
6	0.05						

$$k \text{ promedio local} = \boxed{}$$

Investigar el valor de la conductividad térmica en referencias bibliográficas, k_{ref} , y comparar con el valor experimental, k_{prom} , por medio de un porcentaje de error relativo, considerando el valor correcto el de la referencia bibliográfica.

$$\%E_{rel} = \frac{|k_{ref} - k_{prom}|}{k_{ref}} \quad (\text{Ec. 5.16})$$

Distribución de temperaturas teórica

Se obtiene a partir de la Ec. 5.7, sustituyendo valores experimentales conocidos de la actividad 2.

$$\frac{q}{A} = \frac{W_{calefactor}}{A} = q'' \quad [\text{W/m}^2]$$

$$T(0.05) = T_f = T_6 \quad [^\circ\text{C}]$$

$$T(z) = \frac{q''}{k_{prom}} (L - z) + T_f \quad (\text{Ec. 5.17})$$

Calcular los valores de temperatura teórica a la distancia de los puntos de medición y presentarlos en la siguiente tabla.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	61/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 5.5. Tabla de temperatura teórica.

Punto	z [m]	T [°C]
1	0	
2	0.01	
3	0.02	
4	0.03	
5	0.04	
6	0.05	

Graficar los datos de temperatura experimental de las dos actividades y los valores de temperatura teórica, obteniendo una gráfica similar a la mostrada en la figura 5.9.

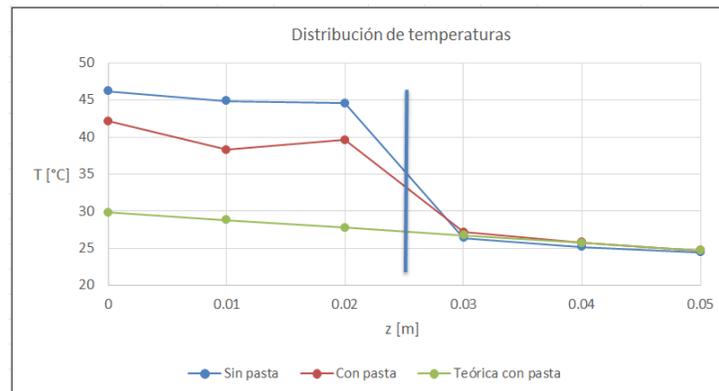


Figura 5.9. Ejemplo de gráfica de distribución de temperatura.

Cálculo de la resistencia térmica de pared y de contacto mecánico

En estado estacionario la conducción de calor es constante en todo el cilindro, por lo que es adecuado asumir una red de resistencias térmicas en serie, para el caso particular entre los puntos 3 a 4, figura 5.10.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	62/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

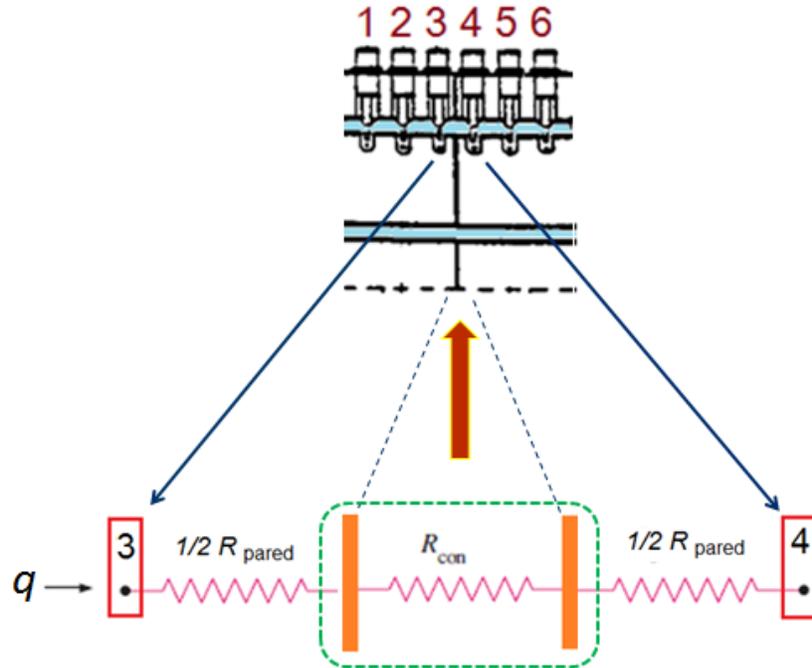


Figura 5.10. Red de resistencias térmicas del arreglo experimental entre los puntos 3 y 4.

$$R_{Total} = 1/2R_{pared} + R_{contacto} + 1/2R_{pared} = R_{pared} + R_{contacto} \quad (\text{Ec. 5.18})$$

A partir de la Ec. 5.11 y 5.12 se pueden conocer la resistencia térmica total y de pared respectivamente.

Presentar los resultados para las dos actividades en la siguiente tabla.

Tabla 5.6. Resistencias térmicas entre los puntos 3 y 4.

Actividad	R_{total} [K/m]	R_{pared} [K/m]	$R_{contacto}$ [K/m]
1. Sin Pasta			
2. Con pasta			

7. Cuestionario

1. ¿Qué distribución de temperatura experimental se aproxima más a la distribución teórica? Explique.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	63/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

2. Compare el valor de la resistencia de contacto de la actividad 1 con la de la actividad 2 ¿Es útil la aplicación de pasta térmica en la unión de las dos secciones de la barra? Argumente su respuesta.
3. Compare el valor de la resistencia de contacto y el valor de la resistencia de pared para las dos actividades ¿Cuál debería ser mayor y por qué?
4. ¿Cuál es el efecto de la resistencia de contacto en la conducción de calor por el cilindro? Tome en cuenta que la transferencia de calor, q , es constante en todo el cilindro. Explique
5. ¿Tiene algún significado físico el que los valores obtenidos para la conductividad térmica local sean diferentes? Argumente su respuesta.
6. De acuerdo al porcentaje de error relativo obtenido para la conductividad térmica experimental, ¿Considera que es adecuado el equipo experimental para este propósito? Justifique su respuesta.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera F.P. y DeWitt, D. P. (2011). Introduction to Heat Transfer. 6a Edición. USA: John Wiley & sons.
2. Çengel, Y. A, Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones. 4a Edición. México: Mc Graw Hill.
3. Armfiel LTD. (1996). Instruction Manual, Heat Conduction Apparatus HT 1. Issue 12. United Kingdom: Armfield Limited.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	64/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 6

Convección de calor en una placa vertical



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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	65/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

Fuente de riesgo.	Riesgo asociado.
Placa plana	Quemaduras en manos. La placa puede alcanzar temperaturas cercanas a 90°C.

2. Objetivos

- ✓ Determinar el coeficiente promedio de transferencia de calor por convección en una placa plana vertical.
- ✓ Determinar el efecto que tiene la velocidad del fluido en la transferencia de calor por convección.

3. Concepto básicos y definiciones

La transferencia de calor por convección se presenta cuando una superficie sólida interactúa energéticamente con un fluido en movimiento que lo circunda. Esta se clasifica en convección natural y en convección forzada. En el primer caso el movimiento del fluido es debido a la fuerza de flotación causada por su calentamiento. Mientras que en el segundo, es activado por un dispositivo externo como un ventilador o una bomba.

La tasa de transferencia de calor por convección se calcula utilizando la ley de enfriamiento de Newton

$$q_{conv} = h_L A_s (T_s - T_\infty) \quad (\text{Ec. 6.1})$$

donde A_s es el área de intercambio de calor [m^2], h_L es el coeficiente de transferencia de calor por convección o coeficiente convectivo para toda la superficie [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$], T_s es la temperatura de la superficie de transferencia [$^\circ\text{C}$] y T_∞ es la temperatura del fluido lejos de la superficie [$^\circ\text{C}$].

En el estudio de la transferencia de calor por convección lo principal es determinar el coeficiente convectivo para diferentes geometrías y condiciones de flujo y obtener formas específicas de las funciones que representan estos coeficientes.

El coeficiente de transferencia de calor por convección depende de todas las variables involucradas, como las propiedades del fluido (viscosidad, densidad, conductividad térmica, calor específico, coeficiente de expansión térmica volumétrica), de las características del flujo como la velocidad, así como de la superficie (geometría y rugosidad). Por lo anterior, el estudio de

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	66/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

transferencia de calor por convección es el más complejo de los mecanismos de transferencia de calor.

Para simplificar su análisis, se utilizan parámetros adimensionales que caracterizan el fenómeno. Por ejemplo, la convección forzada para flujo externo depende del comportamiento del número de Nusselt, que es función del número de Reynolds y del número de Prandtl, es decir:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad \text{Ec. 6.2}$$

El primero se obtiene como:

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k_f} \quad \text{o} \quad \bar{Nu} = \frac{\bar{h} L}{k_f} \quad \text{Ec. 6.3}$$

Donde k_f es la conductividad térmica del fluido, L es una longitud característica al fenómeno y h es el coeficiente convectivo y es el parámetro utilizado en la Ley de enfriamiento de Newton para calcular el calor transferido por convección. Donde Nu_x y \bar{Nu} representan el valor local y promedio del número de Nusselt respectivamente. Este parámetro depende del régimen de flujo, de las condiciones de frontera térmica y del tipo de fluido utilizado.

El proceso para obtener la función depende del enfoque a elegir: teórico o experimental. En particular, el enfoque experimental implica realizar mediciones en condiciones de laboratorio controladas y correlacionar los datos en términos de los parámetros adimensionales apropiados.

El enfoque experimental es el que se plantea en la presente práctica de manera limitada ya que determinar una función, Ec. 6.2, requiere un número mayor de eventos de los que es posible de realizar en la práctica de laboratorio. Sin embargo, es posible calcular de forma experimental el coeficiente de convección promedio y observar la relación que presenta con el número de Reynolds.

Figura 6.1. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección [1].

Proceso	h (W/m ² K)
Convección Libre:	
De gases	2-25
De líquidos	10-1000
Convección forzada:	
De gases	25-250
De líquidos	50-20,000
Convección con cambio de fase:	
Evaporación o condensación	2500-100,000

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	67/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Parámetros adimensionales para transferencia de calor en una placa plana vertical

Número de Grashof. Es la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas. Este parámetro es relevante en convección natural, donde las fuerzas de flotación activan el movimiento del fluido. Cuando la temperatura en la pared de la placa es constante, este número se define como:

$$Gr = \frac{\text{fuerzas de flotación}}{\text{fuerzas de viscosas}} = \frac{g\beta L^3(T_S - T_\infty)}{\nu^2} \quad \text{Ec. 6.4}$$

Donde g es la aceleración gravitatoria [m/s^2], β el coeficiente de expansión térmica volumétrica [K^{-1}], L es la longitud [m], y ν la viscosidad cinemática [m^2/s].

Número de Reynolds. Es la razón de las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en un fluido. Es un número importante en el estudio de la convección forzada ya que éste depende de las características del flujo. Éste se define como:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \text{(Ec. 6.5)}$$

Siendo ρ la densidad [kg/m^3], v la velocidad [m/s], L la longitud característica [m] y μ la viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$]

Número de Nusselt. Representa la razón de la transferencia de calor de una capa de fluido debido a la convección con respecto a la conducción de calor en la misma capa. Cuando $Nu = 1$ se tiene un fenómeno de conducción pura. Para $Nu > 1$ indica que la convección se incrementa y por lo tanto la transferencia de calor también.

$$Nu = \frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k_f\Delta T/L} = \frac{hL}{k_f} \quad \text{(Ec. 6.6)}$$

h es el coeficiente de convección, L la longitud y k_f la conductividad térmica del fluido [$W/m \cdot K$].

Número de Prandtl. Es la relación de las difusividades moleculares de cantidad de movimiento y la de calor. Cuando $Pr = 1$ indica que la cantidad de movimiento y el calor se disipan de igual forma, para $Pr < 1$ el calor se difunde más rápido que la cantidad de movimiento. Si $Pr > 1$ el calor se difunde más lento.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	68/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$Pr = \frac{\text{difusividad de momentum}}{\text{difusividad de calor}} = \frac{c_p \mu}{k_f} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{Ec. 6.7})$$

Siendo C_p el calor específico a presión constante [J/(kg K)].

Transferencia de calor por convección en una placa plana vertical.

Cuando se tiene un fluido en movimiento sobre una placa plana, ambos a diferente temperatura, se tiene un problema en el que la capa límite de velocidad y la térmica evoluciona a lo largo de la placa, lo anterior tiene como consecuencia que también cambie el coeficiente de convección h en la dirección del flujo. Para indicar la variación con la distancia x se incluye ésta en forma de subíndice, tal como se representa en la figura 6.1.

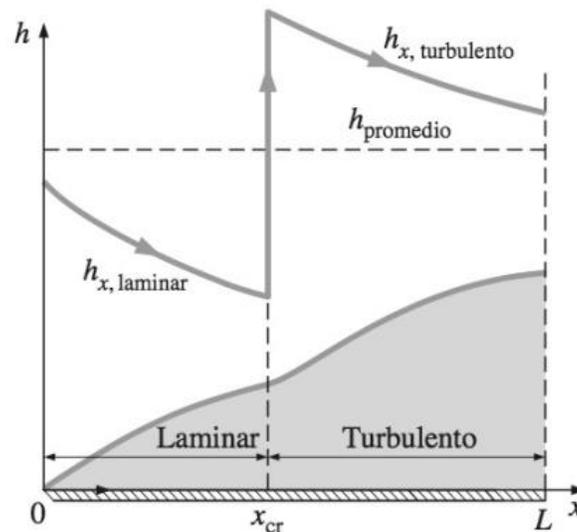


Figura 6.1. Representación gráfica del coeficiente de transferencia de calor para una placa plana [2].

El número de Nusselt local (Nu_x) en una placa plana se puede calcular según el régimen de flujo (laminar, transición o turbulento), las condiciones de frontera térmica (flujo de calor constante o temperatura constante), el tipo de transferencia de convección (natural o forzada) y el tipo de flujo (interno o externo).

Por ejemplo, para un flujo externo laminar o turbulento en convección forzada sobre una placa plana en cuya superficie existe flujo de calor o temperatura constante, el número de Nusselt local se calcula en función de Re_x y Pr mediante:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	69/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$Nu_x = 0.453 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{Ec. 6.7}$$

$$\text{Para } Pr \geq 0.6 \text{ y } Re_x \leq 5 \times 10^5$$

Cabe señalar que en la práctica profesional son más utilizados valores promedios del número de Nusselt Nu_L y del coeficiente de convección promedio h_L . En la figura 6.1 se puede observar una representación del comportamiento local y promedio del coeficiente de convección.

Cuando la convección es libre, el coeficiente de transferencia de calor promedio que engloba el régimen laminar y turbulento, cuando existe flujo de calor constante desde la superficie de la placa, se obtiene a partir del número de Nusselt promedio, utilizando la siguiente correlación [4].

$$Nu_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387(GrPr)^{1/6}}{[1+(0.437/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{Ec. 6.8}$$

$$\text{Para } 1 < GrPr < 10^{11}$$

Finalmente, para convección forzada externa y régimen de flujo laminar cuando existe flujo de calor constante desde la superficie de la placa, la correlación [1] es la siguiente

$$Nu_L = 0.680 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{Ec. 6.9}$$

$$\text{Para } Pr \geq 0.6$$

Es importante señalar que las propiedades del fluido como densidad, calor específico, viscosidad, conductividad térmica y coeficiente de expansión térmica volumétrica, se calculan a temperatura de película, T_f definida como:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad \text{Ec. 6.10}$$

4. Equipo y Material

1. Equipo de convección libre y forzada.
2. Termómetro digital.
3. Anemómetro de hilo caliente.
4. Cronometro.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	70/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 6.2. Aparato de convección libre y forzada.

5. Desarrollo

En la presente práctica se va a determinar experimentalmente el coeficiente de transferencia de calor por convección de una placa plana vertical (calentada eléctricamente) hacia el aire, midiendo las temperaturas cuando se alcanzan las condiciones estacionarias de operación y se conoce la potencia eléctrica suministrada (suponiendo que toda la pérdida de calor de la placa ocurre por convección). El procedimiento anterior se repite para diferentes velocidades del fluido manteniendo fija la potencia eléctrica del calefactor.

El experimento permite obtener el coeficiente de convección promedio h_L , que es un promedio calculado con la ley de enfriamiento de Newton. A partir de las propiedades del fluido se calculan los números de Nusselt, Grashof, Reynolds y Prandtl.

Preparación previa

Encienda el equipo **al inicio de la clase para contar con tiempo suficiente** para realizar un evento de convección libre (actividad 2) y al menos dos eventos para convección forzada (actividad 3).

1. Conectar la clavija de la alimentación general del equipo.
2. Colocar el conjunto calefactor placa plana en la ranura del ducto rectangular y asegurar la placa con los broches de presión que se encuentran al costado. Verificar que la placa plana ajuste en el ducto sin tocar las bordes.
3. Conectar el sensor de temperatura de la placa, la alimentación del ventilador y del calefactor al panel de control.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	71/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Verificar que la perilla de selección de potencia eléctrica del calefactor y la perilla de control de velocidad del ventilador se encuentren ambas en cero.
- Encender el equipo

Actividad 1. Adquisición de datos inicial.

- Registre la temperatura ambiente y la diferencia de alturas del barómetro.

$T_{\text{ambiente}}, T_{\text{amb}}, T_{\infty} = \underline{\hspace{2cm}} [^{\circ}\text{C}]$

$\Delta h_{\text{barómetro}} = \underline{\hspace{2cm}} [\text{cm Hg}]$

- Mida las dimensiones de la placa.

Altura, L : $\underline{\hspace{2cm}}$ [m]

Ancho, W : $\underline{\hspace{2cm}}$ [m]

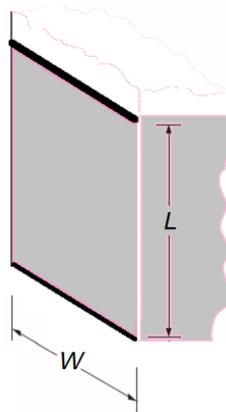


Figura 6.3. Dimensiones de la placa.

De acuerdo con la dirección del flujo, L , es longitud característica del flujo.

Actividad 2. Convección libre.

- Gire la perilla del control de potencia del calefactor, resaltada en cuadro rojo en la figura 6.4, hasta que en la pantalla derecha muestre 95 Watts. Mantenga esta potencia hasta que la temperatura de la placa, T_s , llegue a 50°C , esta última se muestra en la pantalla izquierda del panel de control. El tiempo de espera aproximado para alcanzar la temperatura es de 2 a 3 minutos.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	72/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

NOTA: Es **importante no exceder la temperatura de 50°C** ya que afectará el tiempo en alcanzar el estado estacionario de todos los eventos.



Figura 6.4. Panel de control

- Esperar a que la temperatura alcance el valor indicado en el punto anterior y disminuir la potencia del calefactor a 8 Watts. Esperar a que la temperatura de la placa deje de variar (aproximadamente de 20 a 30 minutos) e iniciar inmediatamente la toma de datos. La potencia del calefactor se debe mantener durante la práctica.
- Llenar la columna 1 de la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Registro de datos experimentales.

Evento	1	2	3	Unidades
V_{∞}	≈ 0			[m/s]
T_s				[°C]
T_{∞}				[°C]
$W_{\text{Calefactor}}$				[W]
	C. Libre	C. Forzada		

Actividad 3 Convección forzada.

- Preparar el anemómetro de hilo caliente para medir la velocidad del fluido v_{∞} . Verificar que los sensores estén cubiertos con la protección. Encender el anemómetro y esperar a que se efectúe la auto calibración.
- Deslizar la protección de los sensores, figura 6.5, e introducir hasta la mitad del ducto. Se recomienda utilizar cinta adhesiva como referencia.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	73/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 6.5. Anemómetro de hilo caliente, indicando la protección de los sensores de velocidad y temperatura.

- Encender el ventilador girando la perilla de control hasta la cuarta línea, figura 6.6.



Figura 6.6. Control de la velocidad del ventilador.

- Medir la velocidad con el anemómetro y posteriormente retirarlo del ducto.
- Esperar a que se estabilice la lectura de la temperatura de la placa (aproximadamente en 20 minutos), indicación de que se ha alcanzado el estado estacionario.
- Registrar los datos en las columnas 2 y 3 de la tabla 6.2, según corresponda.
- Iniciar el segundo evento de convección forzada, girando la perilla de control para aumentar la velocidad del ventilador. Se recomienda la posición 6 de la perilla.
- Repita el procedimiento del paso 4 al 6.

6. Resultados

- Obtener las propiedades del fluido a temperatura de película y llenar la tabla 6.3.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	74/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 6.3. Datos de propiedades del fluido.

Evento	1	2	3	Unidades
T_f				[°C]
ρ				[kg/m ³]
C_p				[J /kg K]
μ				[Pa s]
k				[W/m K]
β		-----		[1/K]
	C. Libre	C. Forzada		

Cálculo del coeficiente de convección h_L experimental para los 3 eventos

2. Calcular el coeficiente de convección experimental h_{exp} , con la ley de enfriamiento de Newton.
3. Calcular el número de Nusselt experimental Nu_{exp} .

Cálculo del coeficiente de convección teórico (a partir de correlaciones) para convección libre

4. Calcular los números de Grashof y de Prandtl.
5. Calcular el número de Nusselt teórico, Nu_{teo} , con las correlaciones apropiadas indicadas en esta práctica para las condiciones del experimento.
6. Calcular el coeficiente de convección teórico h_{teo} a partir del resultado anterior.

Cálculo del coeficiente de convección teórico (a partir de correlaciones) para convección forzada

7. Calcular el número de Prandtl.
8. Calcular el número de Reynolds con la longitud característica e indicar que tipo de régimen de flujo se tiene en la placa (si $Re_{LC} > 5 \times 10^5$ el flujo es turbulento).
9. Calcular el número de Nusselt teórico, Nu_{teo} , con las correlaciones apropiadas indicadas en esta práctica para las condiciones del experimento.
10. Calcular el coeficiente de convección teórico h_{teo} a partir del resultado anterior

Presentar los resultados en la tabla 6.4.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	75/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 6.4. Tabla de resultados.

Evento	1	2	3	Unidades
V_{∞}	0			[m/s]
h_{exp}				[W/m ² K]
Nu_{exp}				
Re	-----			
Pr				
Gr		-----	-----	
Nu_{teo}				
h_{teo}				[W/m ² K]
	C. Libre	C. Forzada		

11. Graficar h_{exp} contra la velocidad V_{∞} .

7. Cuestionario

- ¿Qué tipo de convección presenta los mayores valores del coeficiente de convección?
- ¿Qué tendencia observa en el h_{exp} en relación con el Nu_{exp} ?
- ¿Qué tendencia observa en el Nu_{exp} en relación con el Re_L ?
- ¿Qué tendencia observa de la gráfica h_{exp} contra V_{∞} ?
- ¿Qué sucede con la temperatura de la placa al aumentar la velocidad de aire y a qué se debe?
- Compare los coeficientes de convección experimentales contra los teóricos, ¿Existe diferencia entre ellos? Explique las causas de la diferencia, teniendo en cuenta que los instrumentos funcionan correctamente.
- Compare los valores de los coeficientes de convección experimentales contra los rangos de valores típicos y comente.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

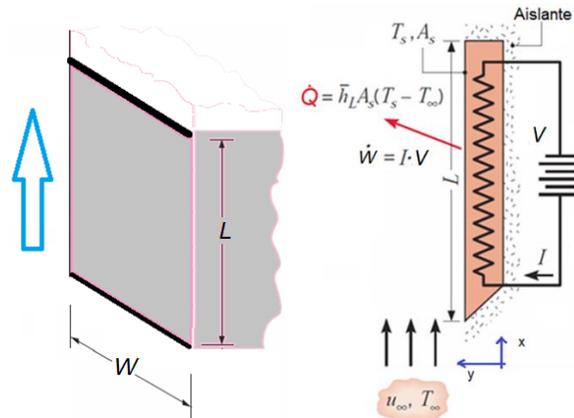
Fuentes básicas

- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera F.P. y DeWitt, D. P. (2011). Introduction to Heat Transfer. 6a Edición. USA: John Wiley & sons.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	76/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Çengel, Y. A, Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones. 4a Edición. México: Mc Graw Hill.
- Martynenko, O.G. y Khramtsov, P.P. (2005). Free-Convective Heat Transfer. Netherlands: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Página 94.
- Armfiel LTD. (1995). Instruction Manual, Free and forced convection. Heat transfer apparatus HT 6. Issue 9. England: Armfield Limited.

10. Anexos



Consideraciones del arreglo experimental:

- Convección externa. (La capa límite térmica crece libremente)
- Convección libre o forzada. (En el caso de convección forzada, si la velocidad de la corriente es mayor a 0.3 m/s, se desprecia la contribución de la convección libre). En el caso de convección libre, la velocidad es menor a 1 m/s. Sin embargo, la importancia relativa de cada modo de transferencia de calor se determina por el valor del coeficiente Gr_L / Re^2_L .
- Estado estacionario. Flujo paralelo ($dp/dx = 0$).
- Flujo de calor uniforme ($Q/A = cte$. flujo de calor constante) a lo largo de la superficie de la placa.
- Flujo libre sin turbulencia (la placa está confinada por paredes).
- Velocidad y temperatura uniforme que se aproxima. Sin embargo, la medición de la velocidad de la corriente corresponde a la máxima del perfil de velocidades que se desarrolla en el ducto, diferente al uniforme.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Termofluidos	Código:	MADO-59
		Versión:	03
		Página	77/77
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

7. Propiedades del fluido constantes. El efecto de propiedades variables se considera cuando se evalúan a temperatura de película.
8. Efectos de radiación despreciables. Sin embargo, en el caso de convección libre puede ser significativa.
9. No hay transferencia de calor por conducción entre la placa y las paredes que la rodean.
10. Se considera, de acuerdo a los supuestos 8 y 9, que la potencia eléctrica del calefactor es igual a la transferencia de calor por convección.
11. Flujo bidimensional. La distribución de velocidad es la misma en cualquier plano al eje z (es decir, paralela a la superficie del plano de la proyección).