

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	1/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
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. Oscar García Aranda Dr. Edgar Ali Ramos Gómez M. I. Servando Ruíz Rodríguez	Dr. Ian Guillermo Monsivais Montoliu M. I. Mauricio Iván Escalante Camargo M. I. Alejandro Cortés Eslava	Dr. José Melesio Sánchez Huerta	17 de agosto de 2026

Manual de prácticas del laboratorio de Transferencia de Calor

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	2/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Índice de prácticas

Práctica 1. Temperatura.....	3
Práctica 2. Conductividad y resistencia térmica.....	21
Practica 3. Conducción longitudinal con cambio de material y con cambio de área transversal.....	37
Práctica 4 Conducción radial.....	47
Práctica 5. Convección de calor en una placa vertical.....	56
Práctica 6. Transferencia de calor en aletas de sección transversal constante.....	69
Práctica 7. Transferencia de calor en aletas de sección transversal variable.....	87
Práctica 8. Ley del inverso del cuadrado.....	104
Práctica 9. Ley de Stefan-Boltzmann.....	112
Práctica 10. Emisividad.....	119

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	3/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 1

Temperatura

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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	4/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
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.
Depósito de agua en ebullición.	Quemaduras en las manos y rostro. Mantener una distancia prudente del depósito de agua en ebullición (30 cm) para evitar el contacto con el vapor y salpicadura de agua. Realizar con precaución la lectura de los termómetros.
Conector eléctrico del depósito de agua en ebullición.	Riesgo de descarga eléctrica.
Termómetros de vidrio.	Cortaduras e Intoxicación con mercurio. Manipular con precaución los termómetros de mercurio y alcohol.

2. Objetivos

- ✓ Medir la temperatura del punto de ebullición del agua y de su punto de fusión (agua con hielo), empleando los diferentes termómetros del banco de medición de temperatura.
- ✓ Obtener el error estático y el error dinámico de los termómetros utilizados.
- ✓ Obtener la constante de tiempo del termómetro de resistencia de platino.
- ✓ Determinar el mejor termómetro en la medición instantánea de la temperatura del agua, de condiciones ambientales a cambio de fase.

3. Conceptos básicos y definiciones

La medición de temperatura constituye una de las mediciones más comunes y más importantes que se efectúan en los procesos industriales. La temperatura es la variable macroscópica que caracteriza el estado térmico de un sistema o nivel de energía térmica global o de conjunto. Sin embargo, el comportamiento del sistema se ve afectado por la estructura molecular.

La temperatura se define de manera teórica como “es una medida de la tendencia de un objeto a ceder espontáneamente energía hacia su entorno. Cuando dos objetos están en contacto interno, el que tiende espontáneamente a perder energía está a temperatura más alta” [8].

La temperatura es una propiedad termodinámica intensiva; que desde una perspectiva microscópica (termodinámica estadística), está asociada al grado de actividad molecular del sistema: a mayor actividad molecular mayor temperatura, a menor actividad molecular menor temperatura. De tal forma que la temperatura es una medida de la energía cinética media de las partículas, átomos y/o moléculas de las sustancias.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	5/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

El grado de actividad molecular (energías cinéticas de las partículas o energía *sensible*) y la energía *latente* (energía relacionada con la fase de un sistema – fuerza que une las moléculas entre sí) constituyen la energía térmica. Otras formas de energía microscópicas son la energía química y la energía nuclear que, sumadas a las anteriores, conforman la energía interna de un sistema.

También se define de manera indirecta por medio de la Ley cero de la termodinámica (que además sirve como base para la validez de la medición de la temperatura y el establecimiento de escalas termométricas). La Ley cero de la termodinámica se relaciona con el equilibrio térmico: Si dos sistemas están en equilibrio térmico con un tercero, los tres sistemas están en equilibrio térmico entre sí; por tanto, sus temperaturas serán idénticas. Si el tercer cuerpo se sustituye por un termómetro, la ley cero se puede volver a expresar como dos cuerpos están en equilibrio térmico si ambos tienen la misma lectura de temperatura, incluso si no están en contacto físico directo.

Definición de termómetro

Son dispositivos que nos permiten medir la temperatura de equilibrio térmico que se alcanzó entre el sistema en estudio y el termómetro mismo, pero al ser éste generalmente de masa muy pequeña, se puede considerar que la temperatura obtenida es muy similar a la que tenía el sistema antes de que el termómetro entrara en contacto con él. El valor de la temperatura generalmente se obtiene por medición indirecta con instrumentos calibrados. Se encuentra al medir alguna propiedad que cambie con la temperatura de manera repetible y predecible.

Escala empírica de temperaturas

A partir de la ley cero podemos establecer una escala empírica de temperatura, ésta se define mediante la asignación de valores numéricos a puntos fijos conocidos. Generalmente se debe reunir los siguientes elementos:

- 1.- Una propiedad termométrica. Alguna propiedad que varíe de forma continua y medible con la temperatura.
- 2.- Sistema termométrico (sustancia y propiedad termométrica) y el diseño del termómetro.
- 3.- Puntos fijos. Fácilmente reproducibles.
- 4.- Elección de los números que se han de asignar a las temperaturas de los puntos fijos.
- 5.- Elección de la regla de interpolación entre los puntos fijos (que podría ser lineal, cuadrática, logarítmica, etc.). Diferentes propiedades termométricas pueden variar de forma diferente con la temperatura.
- 6.- Una unidad, es decir la magnitud que queremos asociar a un valor de temperatura.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	6/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Cualquier propiedad termométrica se puede emplear para construir un termómetro: Se elige una sustancia y una propiedad termométrica en particular. Entonces se formará un sistema termométrico (termómetro) con la medición de una propiedad sensible a la temperatura. Características deseables para elegir una sustancia termométrica

- 1.- Cambio continuo de la propiedad con la temperatura (determina el rango de temperaturas).
- 2.- Cambio relativamente grande de la propiedad con pequeños cambios de la temperatura (sensibilidad).
- 3.- Relación lineal entre la variación de la propiedad termométrica con la temperatura (se relaciona con la exactitud).
- 4.- Estabilidad de las características de la sustancia termométrica durante su vida útil (se relaciona con el costo).
- 5.- Estabilidad de la sustancia termométrica (sensor) al ambiente de la medición (en general el sensor está encapsulado dentro de una funda o un tubo de protección para tener así una protección mecánica o bien estar aislados del medio a medir) para evitar daños causados por corrosión, erosión o simplemente como protección mecánica.
- 6.- Opcional: tiempo de respuesta pequeño. El tiempo de respuesta se ve afectado por la protección del sensor del termómetro.

Propiedades termométricas de los termómetros utilizados en la práctica

- a) Variaciones en volumen (sólido, líquido o gases):
 - Termómetro de vidrio (de mercurio o de alcohol)
 - Termómetro bimetalico.
- b) Variación de presión de un líquido y su vapor:
 - Termómetro de presión de vapor o de bulbo y capilar.
- c) Variación de resistencia eléctrica de un conductor:
 - Termómetro de resistencia
- d) Variación de resistencia eléctrica de un semiconductor:
 - Termómetro termistor.
- e) La f.e.m. creada por la unión de dos metales distintos:
 - Termómetro termopar.
- f) Radiación térmica emitida por un cuerpo (pirómetro de radiación):
 - Termómetro IR. Cámara infrarroja.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	7/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Escala termodinámica de temperaturas

Es conveniente adoptar una escala de temperaturas que sea independiente de las propiedades termométricas de una sustancia en particular; ya que en cada caso la naturaleza de la sustancia influye en el valor de la temperatura que se determina en una medición. Aunque esta escala puede definirse solamente a través de la Segunda Ley de la Termodinámica en donde la medición de la temperatura es independiente de las propiedades de la sustancia que se utiliza para la medición. Se deduce utilizando una máquina térmica reversible. Esta escala de temperatura recibe el nombre de escala Kelvin y las temperaturas en esta escala se denominan temperaturas absolutas. La temperatura más baja en la escala es 0 K .

Escala de temperatura práctica internacional

Hay convenciones internacionales acerca de cada tipo particular de termómetro, su diseño, las temperaturas que se deben asignar a los varios puntos fijos y las correspondientes fórmulas de interpolación. La escala así definida se denomina escala práctica internacional de temperatura. Esta escala se elige de modo que las mediciones efectuadas con instrumentos correctamente calibrados concuerden con la temperatura termodinámica dentro de un margen de tolerancia de 0.01 K en la mayoría de los casos. Periódicamente se llevan a cabo revisiones de esta escala en lo que respecta a procedimientos y valores [3]. La revisión más reciente es la de 1990 (ITS-90).

Errores en la medición de temperaturas

El error de la medida. Es la desviación que presentan las medidas prácticas de una variable de proceso con relación a las medidas verdaderas (teóricas, ideales o reales) como resultado de las imperfecciones de los aparatos y de las variables parásitas que afectan al proceso. La exactitud de un instrumento nos indica que tan cerca se encuentra el valor medido del valor verdadero. Antes de la aparición de la norma BS ISO 5725-1 en 1994, el error absoluto era una indicación de la exactitud. La exactitud de un instrumento se expresa de varias formas: Tanto por ciento del alcance, en unidades de la variable medida, etc. [5].

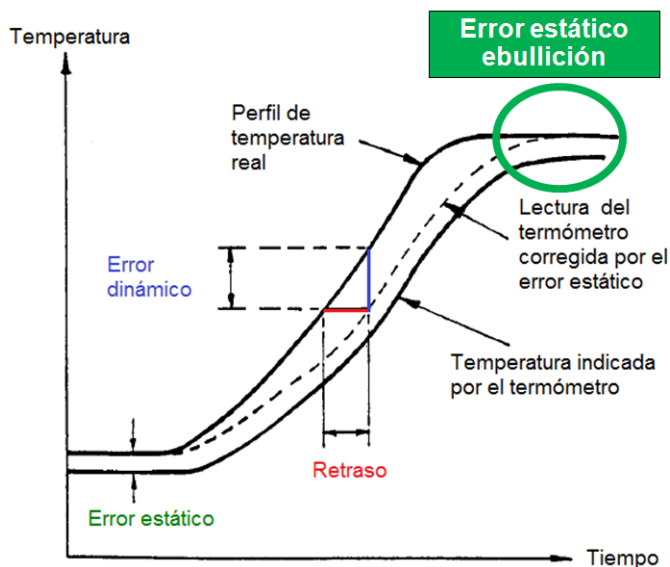
- a) Error = Valor medido o indicado en el instrumento – Valor verdadero de la variable medida.
- b) Error absoluto = $|\text{Valor medido o indicado} - \text{Valor verdadero}|$.
- c) % Error relativo = $(\text{Error absoluto} / \text{Valor verdadero}) \times 100$.
- d) Error estático: Si el proceso está en condiciones de régimen permanente (estado estable).

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	8/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

e) Error Dinámico: En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos; absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos o demora en la lectura del instrumento. Siempre que las condiciones sean dinámicas, existirá en mayor o menor grado el error dinámico, su valor depende del tipo de fluido del proceso, de su velocidad, del elemento primario, de los medios de protección, etc.

Error Dinámico = Valor medido o indicado en el instrumento - Valor real instantáneo.

Un termómetro puede generalmente presentar un error estático y uno dinámico además de otros, el cual resulta en una aplicación incorrecta o mal uso. La figura 1.1 presenta los valores de temperatura de un termómetro sujeto a una condición principalmente dinámica. El término *“temperatura indicada por el termómetro”* es el conjunto de valores medidos o leídos en el termómetro en turno. El término *“perfil de temperatura real”* es el conjunto de valores reales instantáneos. El término *“lectura del termómetro corregida por el error estático”* son los valores que resultan de la diferencia entre los valores medidos o leídos en el termómetro y el error estático del termómetro en turno.



Figura_1.1. Gráfica T vs t, con el error estático y dinámico de un termómetro, [9].

El error estático depende del tipo de termómetro usado, pero para la mayoría de las aplicaciones es deseable que este error sea tan pequeño como sea posible dentro de restricciones de costos. El

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	9/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

error estático es usualmente expresado como un porcentaje del alcance del instrumento, el alcance es la diferencia entre la lectura más alta y más baja de la escala del termómetro.

El error dinámico es independiente del error estático y depende de los factores asociados a su respuesta térmica (velocidad de respuesta o tiempo de respuesta).

Respuesta térmica

La respuesta térmica de un termómetro con la temperatura es probablemente la característica más importante para considerar cuando se selecciona un instrumento para una aplicación particular. Un termómetro puede ser extremadamente exacto y estable en su funcionamiento, pero totalmente inadecuado para utilizarlo en una situación dinámica, debido al tiempo de retraso entre la temperatura del sistema y la lectura del termómetro.

La constante de tiempo del termómetro se define como el tiempo necesario para que alcance el 63,2 % de la variación total de temperatura. Es decir, si un instrumento cuya sonda o elemento primario pasa de un recinto de 70° C a otro de 270° C puede alcanzar el 63,2 % de la diferencia 270 - 70 = 200° en 0,1 minutos; este tiempo será la constante de tiempo del instrumento, figura 1.2.

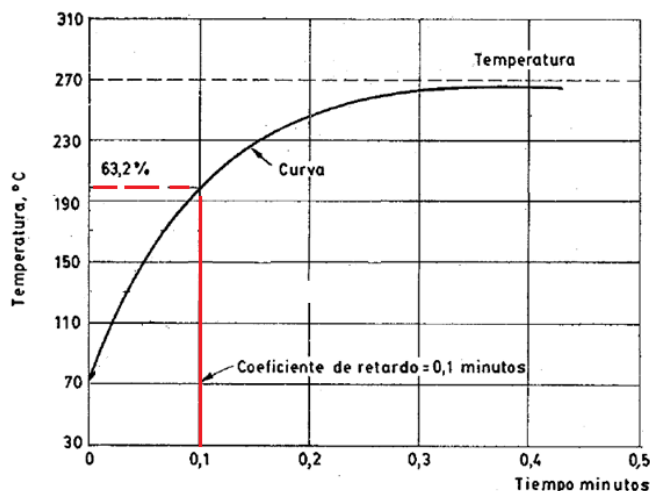


Figura 1.2. Constante de tiempo [5].

4. Equipo y Material

- Unidad de demostración de medición de temperatura, UMT.
- Termopar tipo J y tipo K

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	10/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Termómetro de resistencia de platino
- Termómetro bimetalico
- Termómetro Hg
- Termómetro de OH
- Cronometro
- Cinta masking tape
- Pirómetro
- Hielo



Figura 1.3. a) Unidad de demostración de medición de temperatura, b) 1. Bimetalico, 2. Cámara termográfica, 3. Pirómetro, 4. Termómetro de mercurio y de alcohol, 5. Resistencia de platino, 6. Termopares tipo K y J.

5. Desarrollo

Identificar la mesa de trabajo y sus elementos, identificar los termómetros a utilizar.

Actividad 1 - Obtención de la presión atmosférica local.

1. Obtener la presión atmosférica local empleando el barómetro del laboratorio. Medir y registrar la diferencia de altura de la columna de mercurio del barómetro.

$$\Delta h_{\text{barómetro}} = \quad [\text{cmHg}]$$

Actividad 2 - Error estático en la medición de la temperatura del punto de congelación del agua (mezcla de hielo y agua).

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	11/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Verificar que inicialmente los termómetros indiquen aproximadamente la temperatura ambiente.
2. Llenar con agua un tercio del termo (aproximación a un vaso Dewar) y completar con hielo el resto del recipiente.
3. Introducir los termómetros, uno a la vez, en el termo. Procurar que el sensor del termómetro en turno este rodeado completamente por la mezcla de hielo y agua.
4. Registrar con el cronometro el tiempo que demora el termómetro en turno en alcanzar la temperatura esperada de la mezcla de hielo con agua (0°C). Anotar los datos en la tabla correspondiente.

Termómetro	Temperatura congelación [°C]	Tiempo final congelación [seg]
Termopar tipo K		
Termopar tipo J		
De Platino		
Bimetálico		
De Hg		
De OH		

Tabla 1

Actividad 3 - Tiempo de respuesta del termómetro de resistencia de platino.

1. Verificar que inicialmente el termómetro indique la temperatura ambiente.
2. Conectar el cable general de alimentación de la unidad de demostración de medición de temperatura, UMT.
3. Identificar el recipiente con calefactor eléctrico, retirar la tapa, llenar con un litro de agua (medida marcada dentro del recipiente) y conectarlo al suministro de corriente eléctrica del panel de la UMT. Finalmente colocar la tapa del recipiente.
4. Colocar la perilla de potencia en la 5ª marca.
5. Encender el suministro de energía eléctrica del calefactor del recipiente presionando el interruptor rojo y el del panel de la UMT.
6. Esperar a que el agua en el recipiente alcance la ebullición. Verificar constantemente que el interruptor rojo este en la posición de encendido.
7. Con el agua en ebullición, introducir el sensor del termómetro de resistencia de platino e iniciar el registro de tiempo con el cronometro.
8. Registrar cada 10 segundos la lectura del termómetro en la tabla de datos correspondiente.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	12/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Detener el registro de datos cuando la lectura de temperatura no cambie (aproximadamente a 93 °C).
- Retirar el sensor del termómetro de resistencia de platino. No apague el suministro de energía eléctrica del calefactor.

Temperatura [°C]	Tiempo [seg]
	0
	10
	20
	30
	40
	50
	60
	70
	...

Tabla 2

Actividad 4 - Error estático en la medición de la temperatura del punto de ebullición.

- Esta actividad se realiza inmediatamente después de la anterior, con el agua aún en ebullición.
- Verificar que los restantes termómetros se encuentran inicialmente a la temperatura ambiente.
- Introducir un termómetro en el recipiente e iniciar el registro del tiempo en que demora el termómetro en alcanzar la temperatura de ebullición del agua (la lectura de temperatura ya no debe cambiar). Anotar el tiempo utilizado por el termómetro en alcanzar la temperatura de ebullición y la lectura de temperatura en la tabla correspondiente. Retire el termómetro del recipiente.
- Repita el procedimiento anterior con los restantes termómetros.
- Finalmente, verter el agua del calefactor en la coladera y esperar a que disminuya la temperatura del recipiente agregando un poco de agua de la llave, agitar el agua, verter nuevamente y volver a agregar un poco de agua; tres veces son suficientes para llevar el recipiente a temperatura ambiente. Esta operación debe evitar un choque térmico en el recipiente.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	13/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Termómetro	Temperatura ebullición [°C]	Tiempo final ebullición [seg]
Termopar tipo K		
Termopar tipo J		
De Platino		
Bimetálico		
De Hg		
De OH		

Tabla 3

Actividad 5- Error dinámico en la medición de la temperatura instantánea del agua en el proceso de cambio de fase.

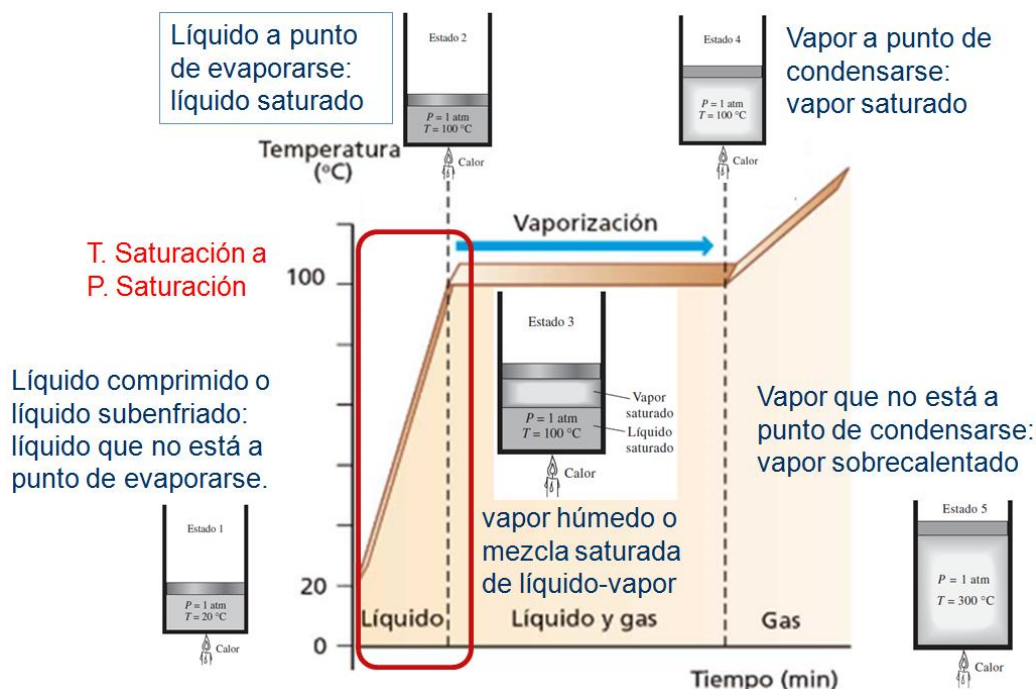


Figura 1.4. Medición de la temperatura del agua en proceso de ebullición.

1. Utilizar nuevamente el recipiente con calefactor eléctrico, retirar la tapa, llenar con un litro de agua (medida marcada dentro del recipiente) y conectarlo al suministro de corriente eléctrica del panel de la UMT. Finalmente colocar la tapa del recipiente.
2. Colocar adecuadamente los termómetros en los orificios de la tapa del recipiente. Utilizar cinta masking tape de ser necesario.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	14/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

3. Conectar las terminales de los termopares y del termómetro de resistencia de platino en los puertos indicados en el panel de la UMT. Evitar el contacto entre los termómetros en el interior del recipiente o el contacto con las paredes del recipiente, o con el elemento calefactor.
4. Registrar la temperatura inicial de todos los termómetros en la tabla de datos.
5. Seleccionar una potencia del calefactor eléctrico (se recomienda utilizar la tercera o quinta marca de la perilla de potencia). En caso de elegir la tercera marca, registrar cada 30 segundos las lecturas de temperatura. Si se elige la quinta marca, registrar cada 15 segundos las lecturas.
6. Accionar el calefactor eléctrico oprimiendo el interruptor rojo del panel de la UMT y enseguida el interruptor rojo del recipiente con agua.
7. Registrar las lecturas de todos los termómetros, cada 30 segundos (se asume que se elige la 3ª marca de potencia), hasta que la lectura del termómetro alcance el punto de ebullición del agua, es decir cuando la temperatura del termómetro no cambia, permaneciendo constante. La operación se aplica a todos los termómetros utilizados.
8. Una vez concluido el experimento, llevar la perilla de potencia al origen, apagar los interruptores rojos y desconectar la clavija de alimentación de la UMT
9. Retirar los termómetros uno a uno y secarlos con una franela; guardarlos o entregarlos al laboratorista.
10. Retirar la tapa del recipiente y verter el agua en la rejilla amarilla del drenaje.
11. Secar la mesa de trabajo.
12. Entregar material.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	15/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tiempo [min]	Tiempo [seg]	Termómetro. Temperatura [°C]					
		Termopar tipo K	Termopar tipo J	T. de platino	T. bimetálico	T. de Hg	T. de OH
0	0						
0.5	30						
1	60						
1.5	90						
2	120						
2.5	150						
3	180						
3.5	210						
4	240						
4.5	270						
5	300						
5.5	330						
6	360						
6.5	390						
7	420						
7.5	450						
8	480						
8.5	510						
9	540						
9.5	570						
10	600						
10.5	630						
11	660						
11.5	690						
12	720						
12.5	750						

Tabla 4. Datos para perilla de potencia del calefactor en la tercera marca.

6. Resultados

1.- Obtener la temperatura real de ebullición del agua (temperatura de saturación) a partir de Tablas termodinámicas.

A partir de las tablas termodinámicas del agua y la presión atmosférica local se obtiene la temperatura real de ebullición. Esta temperatura será la de referencia para calcular el error estático de la medición de la temperatura de ebullición. $T_{\text{ebullición real}} = T_{\text{saturación}}$

$P_{\text{atm}} =$ [Pa]

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	16/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

T ebullición real = T saturación [°C]

T congelación real = [°C]

2.- Calcular el error estático en valor y %Error relativo en la medición de la temperatura de congelación (Tabla A2) y de ebullición del agua (Tabla A4).

Termómetro	Tiempo final congelación [seg]	Punto de congelación del agua		
		Temperatura medición [°C]	Error estático en valor	% Error relativo
Termopar tipo K				
Termopar tipo J				
De Platino				
Bimetálico				
De Hg				
De OH				

Tabla de resultados A2.

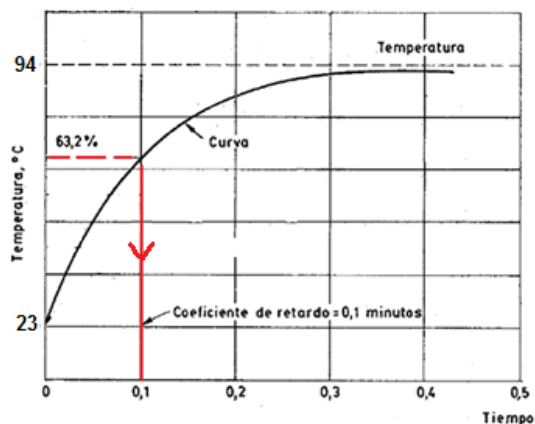
Termómetro	Tiempo final ebullición [seg]	Punto de ebullición del agua		
		Temperatura medición [°C]	Error estático en valor	% Error relativo
Termopar tipo K				
Termopar tipo J				
De Platino				
Bimetálico				
De Hg				
De OH				

Tabla de resultados A4.

3.- Elaborar la gráfica de tiempo de respuesta del termómetro de resistencia de platino, Tabla 2. A partir de la gráfica obtener la constante de tiempo, τ , del termómetro.

τ = segundos

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	17/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



4.- Graficar *Temperatura medida* contra *tiempo* de todos los termómetros empleados.

5.- A partir de la información de los incisos anteriores, indique qué tipo de termómetro utilizaría para medir la temperatura instantánea del agua desde temperatura ambiente hasta cambio de fase del agua. ¿Qué información utilizaría para justificar su elección? Explique. (Nota: Tome en cuenta el proceso al que se sujeta la medición de temperatura).

6.- Indique la siguiente información para el termómetro seleccionado en el inciso 5:

Termómetro seleccionado:

Error estático en valor (ebullición): [°C]

Tiempo final: seg.

7.- Con los datos del termómetro seleccionado, calcular sus valores de temperatura corregidos por el error estático en valor. ($T_{\text{corregida}} = T_{\text{medición}} - \text{Error estático en valor}$). Verificar que el último valor de $T_{\text{corregida}}$ debe ser igual al valor de $T_{\text{ebullición real}}$.

8.- El conjunto de valores de $T_{\text{corregida}}$, del termómetro seleccionado, se consideran como los valores que formaran el "*perfil de temperatura real*". Explique si es correcta o no está consideración. Analice la figura 1.1.

9.- Ahora, para cada uno de los termómetros restantes, obtener los valores de temperatura corregidos tomando en cuenta el error estático de cada uno de ellos ($T_{\text{corregida}} = T_{\text{medición}} - \text{Error estático en valor}$). Generar la Tabla A5.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	18/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tiempo [seg]	Temperaturas corregidas. Lectura del termómetro corregida por el error estático. [°C]						Perfil Temp. Verdadero
	Termopar tipo K	Termopar tipo J	T. de platino	T. bimetálico	T. de Hg	T. de OH	
0							
30							
60							
90							
120							
150							
180							
210							
240							
270							
300							
330							
360							
390							
420							
450							
480							
510							
540							
570							
600							
630							
660							
690							
720							

Tabla de resultados A5.

10.- Graficar para cada termómetro los valores del perfil de temperatura verdadero y los valores de temperatura ya corregidos contra tiempo.

11.- Calcular los errores dinámicos de cada termómetro. Se utilizará la definición del error dinámico ya indicado, pero en lugar de utilizar “Valor medido o indicado en el instrumento” se utilizarán los valores de temperatura corregidos. Expresar el error dinámico en % Error relativo. Generar Tabla A5b. Indique qué termómetro presenta el menor y mayor %Error relativo promedio dinámico.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	19/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tiempo [seg]	% Error relativo dinámico					
	Termopar tipo K	Termopar tipo J	T. de platino	T. bimetálico	T. de Hg	T. de OH
0						
30						
60						
90						
120						
150						
180						
210						
240						
270						
300						
330						
360						
390						
420						
450						
480						
510						
540						
570						
600						
630						
660						
690						
720						
Promedio						

Tabla de resultados A5b.

7. Cuestionario

Contestar las siguientes preguntas con la información obtenida de la práctica.

1. Analice visualmente y describa la gráfica obtenida para inciso 4 de resultados “*Temperatura medida contra tiempo*” de todos los termómetros empleados. ¿Puede descartar de ante mano algunos termómetros del análisis posterior?

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	20/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- ¿Qué termómetro de los utilizados en la práctica es el más adecuado para condiciones de régimen permanente? Justifique su respuesta.
- ¿Qué termómetro de los utilizados en la práctica es el más adecuado para condiciones dinámicas? Justifique su respuesta.
- De los termómetros utilizados, ¿Existe uno que cumple para condiciones de régimen permanente y condiciones dinámicas? Justifique su respuesta.
- Calcular la potencia eléctrica suministrada al calefactor. ¿Qué termómetro utilizaría? Para el cálculo de la potencia utilice los datos del termómetro que eligió.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes electrónicas:

- Una visión más general de la temperatura. Fecha de consulta: 26/05/2019
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/heatrf.html#c1>
- Medición de temperatura, bases. Fecha de consulta: 26/05/19
<http://thermopedia.com/content/1184/>
- Termodinámica e introducción a la mecánica estadística. Fecha de consulta: 26/05/2019
<http://www.lfp.uba.ar/es/notas%20de%20cursos/notastermodinamica/Termodinamica.pdf>
- Descripción de diferentes tipos de termómetros. Fecha de consulta: 26/05/2019
http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Documentos/I6_Medicion_temperatura.pdf

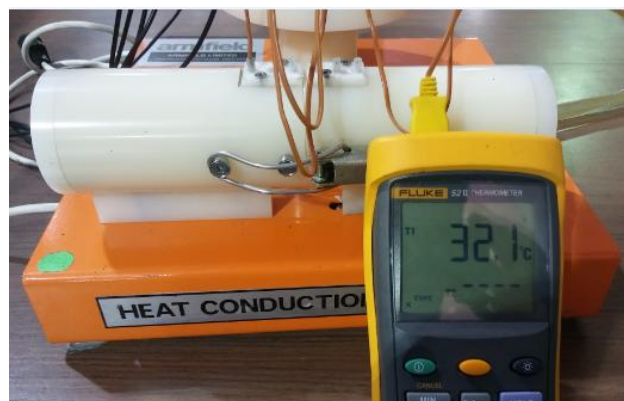
Fuentes básicas:

- Creus, A. (2005). Instrumentación industrial. 7ª Ed. México: Marcombo.
- Holman, J.P. (1986). Métodos experimentales para Ingenieros. 4ª Ed. México: McGraw-Hill.
- Cengel, Y. A. Boles, M. A. (2009). Termodinámica. 7ª Ed. México: McGraw-Hill.
- Schroeder, D. V. (2000). An Introduction to Thermal Physics. United States: Addison Wesley.
- Armfield LTD. (1996). Instruction Manual, Temperature Measurement Bench HT 2. Issue 11. United Kingdom: Armfield Limited.
- Venkateshan S.P. (2015). Mechanical Measurements. 2ª Ed. John Wiley & Sons Ltd.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	21/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 2

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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	22/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
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. Concepto 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. 2.1.

$$q = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde q es la rapidez de la conducción de calor en el medio (W), k es la conductividad térmica ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$), A es el área perpendicular a la transferencia de calor (m^2) y dT/dx es el gradiente de temperatura ($^\circ\text{C}/\text{m}$) el cual es el de cambio de la temperatura con respecto a la distancia en esa dirección.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	23/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

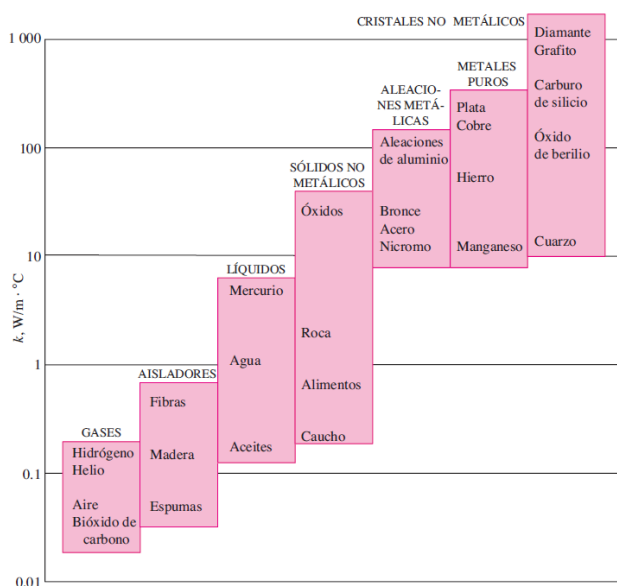


Figura 2.1. Conductividad térmica de materiales a temperatura ambiente [2].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	24/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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. 2.2.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(kr \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

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.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

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

$$\frac{d}{dz} \left(k \frac{dT}{dz} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Para conductividad térmica constante

$$\frac{d^2 T}{dz^2} = 0 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Cuya solución general es

$$T(z) = C_1 z + C_2 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

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.

$$\text{En } z = L: \quad T(L) = T_f, \text{ mostradas en la figura 2.2}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	25/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

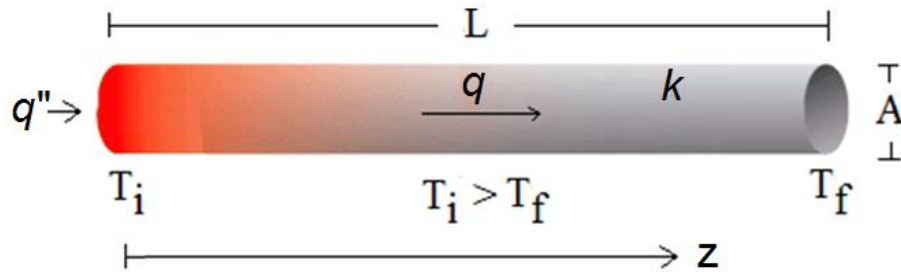


Figura 2.2. Condiciones de frontera en un cilindro para conducción de calor unidimensional en estado estacionario y sin generación interna de calor.

Para encontrar C_1 se deriva la Ec. 2.6 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. 2.6 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. 2.6 y reduciendo términos, se obtiene la Ec. 2.7 que representa la distribución de temperatura teórica en un cuerpo de geometría cilíndrica. Cabe destacar que esta ecuación es lineal.

$$T(z) = \frac{q''}{k}(L - z) + T_f \quad (\text{Ec. 2.7})$$

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 2.3. Para estas condiciones la temperatura varía de forma lineal con la coordenada espacial, por ejemplo x .

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	26/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

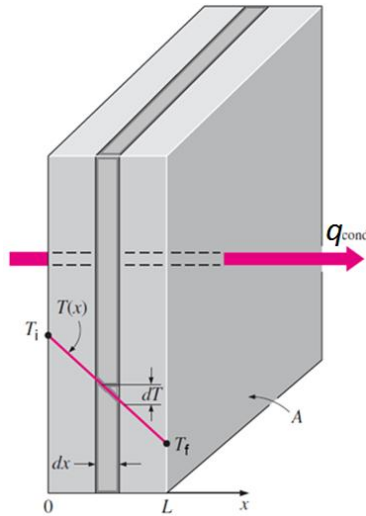


Figura 2.3. Transferencia de calor a través de una pared plana, [2]

$$T(x) = \frac{(T_f - T_i)x}{L} + T_i \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Derivando:

$$\frac{d}{dx} T(x) = \frac{(T_f - T_i)}{L} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Sustituyendo la Ec. 2.9 en la Ec. 2.1, la transferencia de calor es:

$$q = -kA \frac{(T_f - T_i)}{L} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

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 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, $R_{t, \text{conducción}}$.

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

Transferencia de calor, reordenando la Ec. 2.10:

$$q = (T_i - T_f)/R_{t, \text{conducción}} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

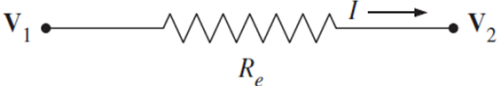
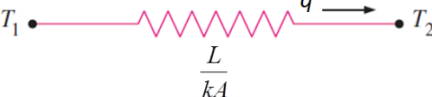
	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	27/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Donde la resistencia térmica a la conducción de calor es:

$$R_{t,conducción} = \frac{L}{kA} = R_{pared} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

La Ec. 2.12 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 2.1 se relaciona la parte eléctrica con su equivalente térmico.

Tabla 2.1: 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: $\Delta V = (T_1 - T_2)$
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 2.4.



Figura 2.4. 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 2.5.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	28/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

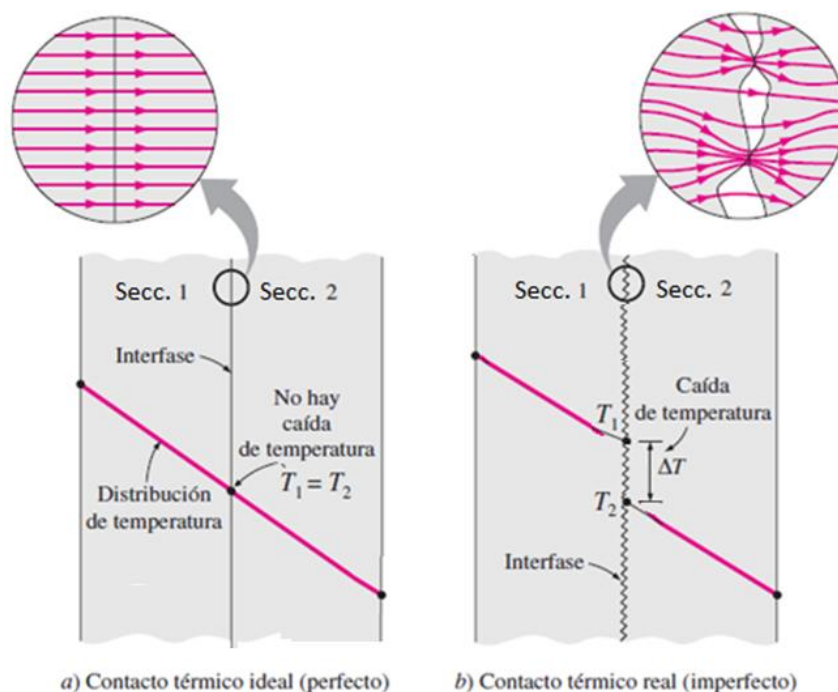


Figura 2.5. Distribución de temperatura y líneas de flujo de calor a lo largo de dos secciones del cilindro para contacto perfecto e imperfecto. Adaptado de [2].

La Ec. 2.7 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 2.5a. 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 formaran espacios con aire, figura 2.5b 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, $R_{t,\text{contacto}}$.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	29/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 2.6. 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%.

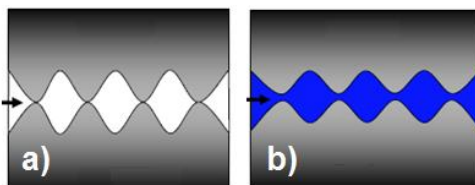


Figura 2.6. a) Cavidades con aire y b) cavidades con grasa térmica

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.

La figura 2.7 y 2.8 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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	30/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

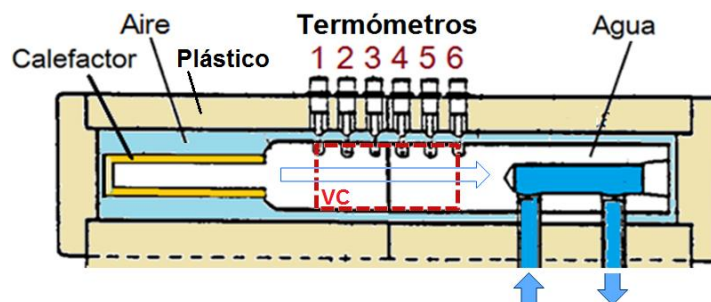


Figura 2.7. Esquema del arreglo experimental indicando el volumen de control. Adaptado de [3].

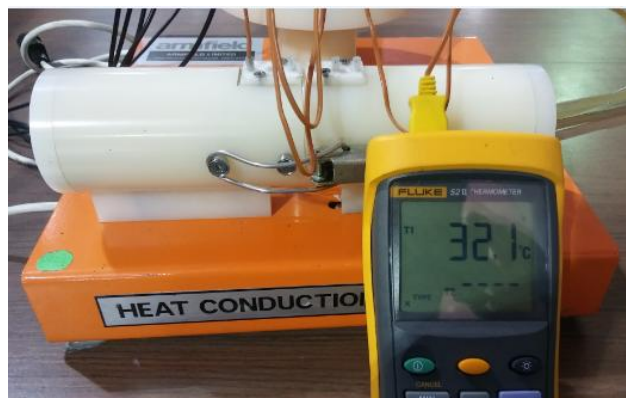


Figura 5.8. Arreglo experimental.

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 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.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	31/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 2.2 con las lecturas obtenidas.

Tabla 2.2: 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.
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 2.3.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	32/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 2.3. 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 2.1 para incrementos de temperatura (excepto el par formado por las temperaturas 3 y 4).

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

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

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta z} \right)_{1-2} = \frac{(T_2 - T_1)}{(z_2 - z_1)} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

La conductividad térmica local se obtiene de la Ec. 2.13.

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.

$$k_{prom} = \{(k_{4-5} + k_{5-6})_{Actividad\ 1} + (k_{4-5} + k_{5-6})_{Actividad\ 2}\} / 4 \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Los resultados se presentan en la tabla 2.4.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	33/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 2.4. 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						
2	0.01						
3	0.02						
4	0.03						
5	0.04						
6	0.05						

k promedio local =

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.

$$\%E_{rel} = \frac{|k_{ref} - k_{prom}|}{k_{ref}} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Distribución de temperaturas teórica

Se obtiene a partir de la Ec. 2.7, sustituyendo valores experimentales conocidos de la actividad 2.

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

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

$$T(z) = \frac{q''}{k_{prom}} (L - z) + T_f \quad (\text{Ec. 2.17})$$

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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	34/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 2.5. 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 2.9.

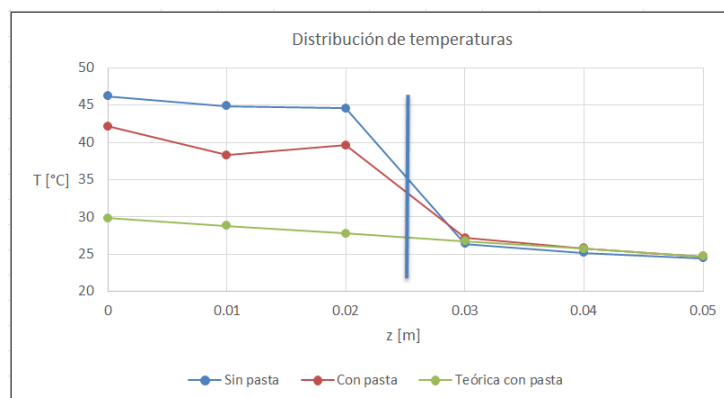


Figura 2.9. Ejemplo de gráfica de distribución de temperatura.

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 2.10.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	35/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

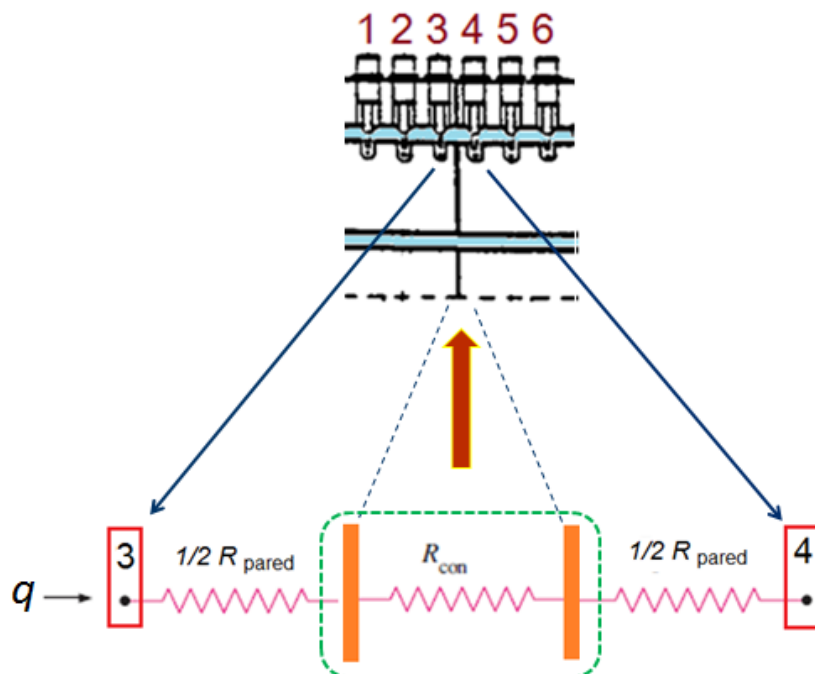


Figura 2.10. Red de resistencias térmicas del arreglo experimental entre los puntos 3 y 4.

$$R_{Total} = 1/2 R_{pared} + R_{contacto} + 1/2 R_{pared} = R_{pared} + R_{contacto} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

A partir de la Ec. 2.11 y 2.12 se pueden conocer la resistencia térmica total y de pared respectivamente.

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

Tabla 2.6. 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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	36/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 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.
- 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?
- ¿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
- ¿Tiene algún significado físico el que los valores obtenidos para la conductividad térmica local sean diferentes? Argumente su respuesta.
- 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

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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	37/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 3

Conducción longitudinal con cambio de material y con cambio de área transversal

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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	38/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
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	No ingerir. Evitar contacto físico de la pasta con ojos.

2. Objetivos

- ✓ Determinar experimentalmente el efecto en la distribución de temperatura al introducir un material diferente en una sección de una barra cilíndrica.
- ✓ Determinar experimentalmente el efecto en la distribución de temperatura al modificar la sección transversal del dispositivo experimental.
- ✓ Plantear la solución analítica, examinar cual es el efecto del cambio de área transversal y del cambio del material.
- ✓ Comparar los resultados analíticos con los experimentales.

3. Conceptos básicos y definiciones

En esta práctica se analizará la transferencia de calor unidimensional en una barra cilíndrica compuesta por secciones de diferentes materiales y diámetros. Este análisis sirve para representar con una aproximación adecuada numerosos sistemas de ingeniería como pueden ser, sistemas de aislamiento compuestos, intercambiadores de calor con restricciones de peso, etc.

Recordar que la restricción de conducción unidimensional se refiere a que solo se necesita una coordenada para describir la variación espacial de las variables dependientes. En particular, la transferencia de calor, la distribución y gradiente de temperaturas a lo largo de la longitud de las diferentes secciones de la barra.

Se considera que la conductividad térmica de los diferentes materiales de las secciones de la barra no cambia con la temperatura. La temperatura máxima no supera los 100 °C y la mínima es mayor a 20 °C, por lo que es adecuado considerar constante a la conductividad térmica.

Conviene recordar que la conducción unidimensional en estado estable sin generación interna de calor y conductividad térmica constante, la temperatura varía de forma lineal con la coordenada espacial, por ejemplo x.

$$T(x) = \frac{(T_f - T_i)x}{L} + T_i \quad \text{Ec.3.1}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	39/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Derivando:

$$\frac{d}{dx}T(x) = \frac{(T_f - T_i)}{L} \quad \text{Ec.3.2}$$

Por otro lado, tenemos que la velocidad de la transferencia de calor está definida como:

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec.3.3}$$

Sustituyendo el gradiente tenemos que:

$$\dot{Q} = -kA \frac{(T_f - T_i)}{L} \quad \text{Ec.3.4}$$

Esta última ecuación indica que la velocidad de la transferencia de calor es constante e independiente de x . A partir de esta ecuación se ha propuesto una analogía entre la transferencia de calor y la corriente eléctrica. De la misma manera que se asocia una resistencia eléctrica con la conducción de electricidad en un conductor, se asocia una resistencia térmica con la conducción de calor.

Reacomodando:

$$\dot{Q} = \frac{(T_i - T_f)}{L/kA} = \frac{(T_i - T_f)}{R_{\text{térmica}}} \quad \text{Ec.3.5}$$

En donde:

$$R_{\text{térmica}} = \frac{(T_i - T_f)}{\dot{Q}} = \frac{L}{kA} \quad \text{Ec.3.6}$$

La representación de circuitos equivalentes proporciona una herramienta útil para conceptualizar y resolver problemas más complejos de transferencia de calor. En el arreglo experimental que nos ocupa, tenemos un circuito con resistencias térmicas en serie y la transferencia de calor es:

$$\dot{Q} = \frac{(T_i - T_f)}{\sum R_{\text{térmica}}} = \frac{\Delta T_{\text{total}}}{R_{\text{total}}} \quad \text{Ec.3.7}$$

En dónde la diferencia $(T_i - T_f)$ es la diferencia total de temperaturas (ΔT_{total}) y la sumatoria abarca todas las resistencias térmicas involucradas (resistencia térmica total), ver figura 1, por lo tanto:

$$\dot{Q} = \frac{(T_i - T_f)}{[(L_1/k_1A_1) + (L_2/k_2A_2) + (L_3/k_3A_3)]} \quad \text{Ec.3.8}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	40/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Es importante resaltar que se asume contacto perfecto entre las 3 secciones de la barra. Sin embargo, está presente el efecto de la resistencia térmica de contacto entre las interfaces y puede alterar la distribución de temperaturas experimental.

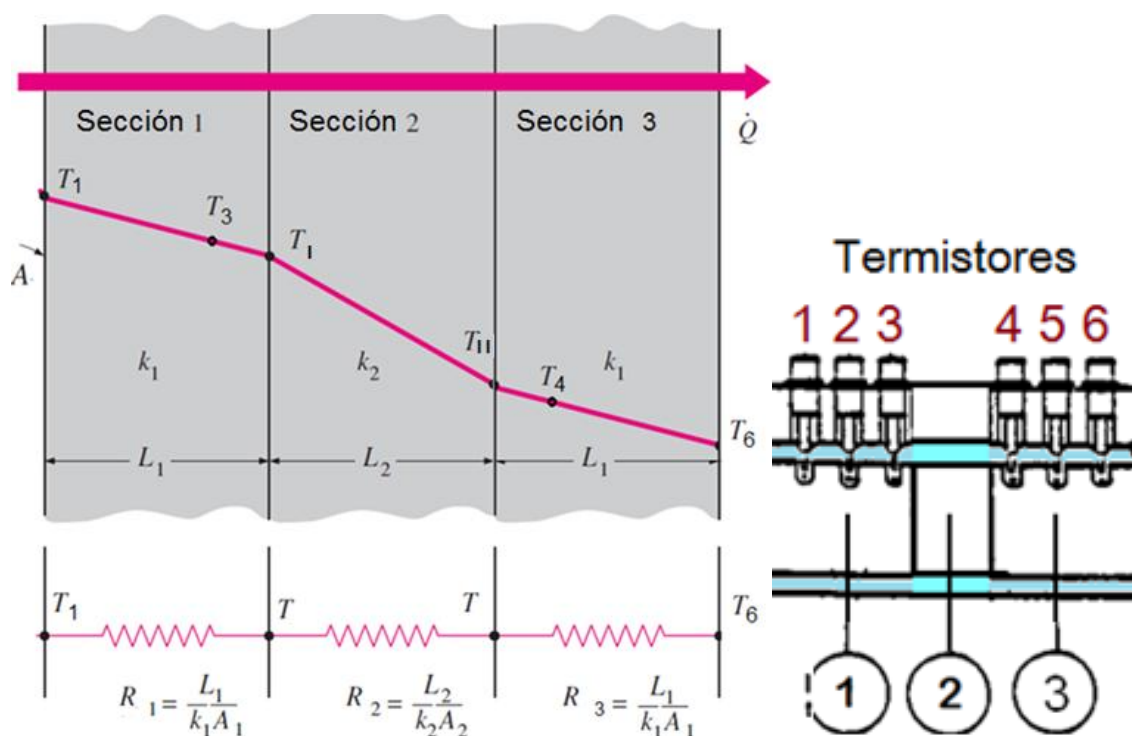
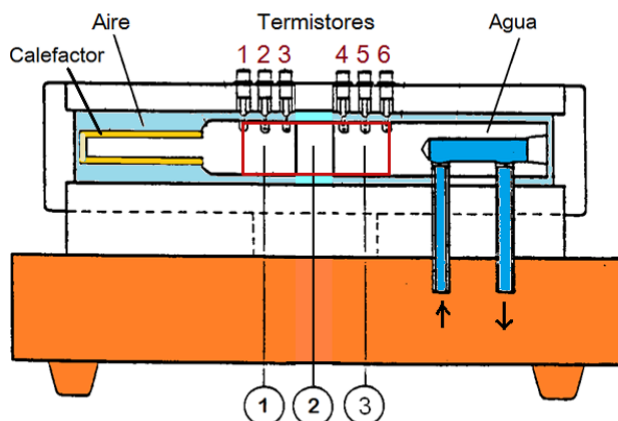


Figura 3.1. Red de resistencias térmicas del arreglo experimental [2].

Si modificamos L , A o k , entonces modificaremos la resistencia térmica y se observará un cambio en la pendiente de la gráfica de la distribución de temperaturas y por consiguiente, un cambio en el gradiente de temperaturas, como se muestra en la figura 3.1.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	41/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Arreglo experimental



Actividad	Potencia eléctrica calefactor [W]
1 y 2	

Sección 2: Muestra de material de conductividad térmica desconocida o área reducida de latón.

Sección 1 y 3: material de conductividad térmica conocida, latón.

Separación de 10 mm entre termistores antes de colocar la sección 2.

Actividad 1 (**Acero inoxidable**)

- Diámetro de la barra: $D_2 = 2.5$ cm
- Longitud de la muestra: $L_2 = 3$ cm

Actividad No. 2 (**Área reducida, latón**)

- Diámetro de la barra: $D_2 = 1.3$ cm
- Longitud de la muestra: $L_2 = 3$ cm.

Figura 3.2. Arreglo experimental [3].

4. Equipo y Material

Equipo Armfield para conducción, pasta térmica y cronometro.

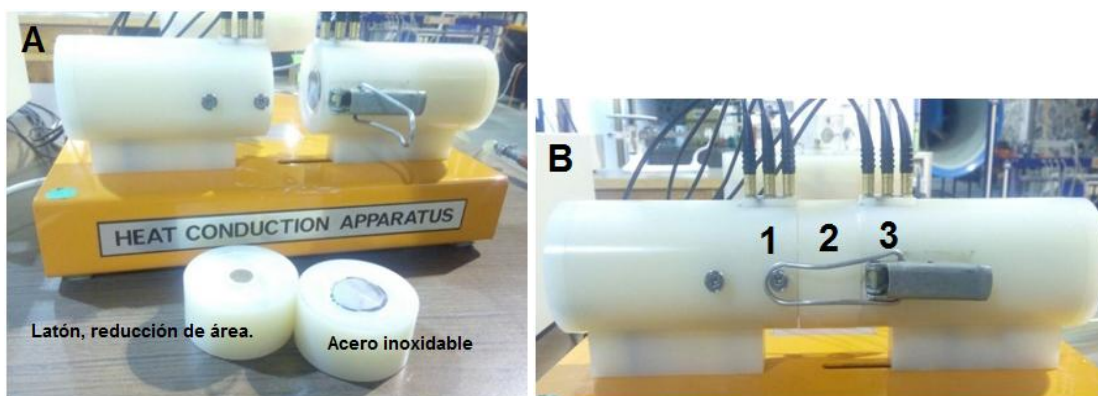


Figura 3.3. A) Secciones de pruebas, B) sección de prueba montada.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	42/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Desarrollo

Actividad 1 - Muestra de acero inoxidable.

2. Antes de encender el equipo verificar que las lecturas de los seis termistores registren la misma temperatura, para descartar falla en los mismos.
3. Identificar la muestra de acero inoxidable y aplicar en los extremos pasta térmica.
4. Colocar la muestra de acero inoxidable entre las dos secciones de latón.
5. Colocar los seguros, verificar que estos estén firmes. Aplicar una presión uniforme en la muestra de acero inoxidable. Esta tarea es crítica por lo que se recomienda que el profesor realice esta actividad.
6. Colocar la manguera de descarga del agua en la rejilla de desagüe. Abrir el suministro de agua para la pared fría del modelo, se recomienda abrir una vuelta la llave de paso.
7. Fijar la potencia suministrada al calefactor. Se sugiere utilizar la misma potencia en ambas actividades, la potencia recomendada es de 9 W a 12 W.
8. Esperar por aproximadamente 25 minutos, que es el tiempo necesario para que el dispositivo experimental alcance el estado estable. Si después de este tiempo existen variaciones de temperatura mayores a 0.5 °C/min verificar el acoplamiento del dispositivo experimental.
9. Se recomienda colocar la perilla selectora de visualización de la temperatura en el primer termistor para verificar el estado estable.
10. Una vez que se consigue el estado estable, registrar las temperaturas en la siguiente tabla de datos.

Actividad 1	
Potencia = ____ [W]	
Sección: acero inoxidable	
x[m]	T [°C]
0	_____
0.01	_____
0.02	_____
0.06	_____
0.07	_____
0.08	_____

Tabla 1.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	43/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Datos de la muestra: Diámetro de 2.5 cm. Longitud de 3 cm.

Actividad 2

Muestra de latón de área transversal menor.

1. Identificar la muestra de latón de área transversal reducida.
2. Seguir las indicaciones de la actividad anterior, pasos 4 a 8.
3. Una vez que se consigue el estado estable, registrar las temperaturas en la siguiente tabla de datos.

Actividad 2	
Potencia = ____ [W]	
Sección: área reducida, latón	
x[m]	T [°C]
0	_____
0.01	_____
0.02	_____
0.06	_____
0.07	_____
0.08	_____

Tabla 2.

Datos de la muestra: Diámetro de 1.3 cm. Longitud de 3 cm

6. Resultados

1. Graficar los datos experimentales de las dos actividades en una sola gráfica T contra x .

Actividad 1 - Muestra de acero inoxidable.

2. Graficar los datos experimentales, T contra x .
3. Graficar de manera separada T contra x , para las secciones 1 y 3.
4. Realizar una correlación de datos a partir de las gráficas de las secciones 1 y 3. Estas serán las funciones de distribución de temperaturas de las secciones 1 y 3.
5. Calcular la temperatura de contacto (T_i) entre las secciones 1 y 2. La temperatura T_i se obtiene por extrapolación a partir de la función de distribución de temperaturas de la sección 1 a la distancia de contacto entre la sección 1 y 2.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	44/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Calcular la temperatura de contacto (T_{II}) entre las secciones 2 y 3. La temperatura T_{II} se obtiene por extrapolación a partir de la función de distribución de temperaturas de la sección 3 a la distancia de contacto entre la sección 2 y 3.
- Con las temperaturas T_I y T_{II} calcular el gradiente de temperaturas en la sección 2.
- Calcular la conductividad térmica del acero a partir de la ley de Fourier.
- Calcular la resistencia térmica del acero.
- Calcular la resistencia térmica total de la barra compuesta.

Actividad 2 - Muestra de latón de área transversal menor.

- Graficar los datos experimentales, T contra x .
- Graficar de manera separada T contra x , para las secciones 1 y 3.
- Realizar una correlación de datos a partir de las gráficas de las secciones 1 y 3. Estas serán las funciones de distribución de temperaturas de las secciones 1 y 3.
- Calcular la temperatura de contacto (T_I) entre las secciones 1 y 2. La temperatura T_I se obtiene por extrapolación a partir de la función de distribución de temperaturas de la sección 1 a la distancia de contacto entre la sección 1 y 2.
- Calcular la temperatura de contacto (T_{II}) entre las secciones 2 y 3. La temperatura T_{II} se obtiene por extrapolación a partir de la función de distribución de temperaturas de la sección 3 a la distancia de contacto entre la sección 2 y 3.
- Con las temperaturas T_I y T_{II} calcular el gradiente de temperaturas en la sección 2.
- Calcular la resistencia térmica del latón, asumiendo como dato la conductividad térmica del latón obtenida de la bibliografía.
- Calcular la resistencia térmica total de la barra compuesta.

Tabla de resultados.

Sección	T_I [°C]	T_{II} [°C]	dT/dx [°C/m]	$R_{\text{térmica sección}}$ [°C/W]	$R_{\text{térmica total}}$ [°C/W]
Acero inoxidable					
Latón, reducción					

Tabla 3

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	45/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

7. Cuestionario

Contestar las siguientes preguntas con la información obtenida de la práctica.

1. Analice las gráficas de temperatura obtenidas experimentalmente (resultado 1). ¿Qué puede concluir?
2. Compare los valores de resistencia térmica total y los valores de resistencia térmica de la sección 2 obtenidos para las dos actividades. Describa el resultado de la comparación.
3. Compare las gráficas obtenidas en las actividades 1 y 2. ¿Existe alguna diferencia entre ellas?
4. Para la actividad 1 o 2. ¿Qué variables cambiarían si ahora solo aumentos la transferencia de calor? Argumente su respuesta con razonamientos y/o ecuaciones.
5. ¿La resistencia térmica, de las secciones o de la barra total, dependen de cambios en la temperatura? Argumente su respuesta.
6. ¿Qué ocurriría al realizar esta práctica en estado transitorio en lugar de estado estable?
7. Existen dos factores que pueden afectar fuertemente los datos y resultados experimentales alejándose de los teóricos. ¿Cuáles son y qué datos o resultados, de los obtenidos en la práctica, apoyan estos factores?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

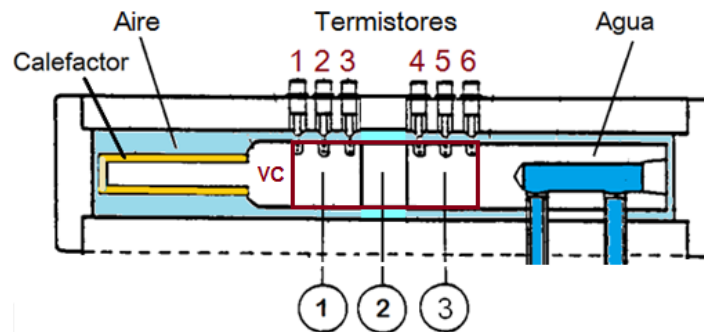
Fuentes básicas

1. Incropera, F. P. DeWitt, D. P. (1999). Fundamentos de transferencia de Calor. 4ª. Ed. México: Prentice Hall.
2. Cengel, Y. A. Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa. 4ª Ed. México: McGraw-Hill.
3. Armfiel LTD. 1996. Instruction Manual, Heat Conduction Apparatus HT 1. Issue 12. United Kingdom.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	46/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

10. Anexos

Arreglo experimental.



Consideraciones del arreglo experimental:

1. La conducción de calor en las tres secciones de la barra (zona de análisis) es en estado estable o estacionario. Cualquier temperatura en una posición definida de la barra, no cambia con el tiempo.
2. No hay generación de calor en el interior de las secciones de la barra.
3. Conducción de calor unidimensional. La conducción del calor es significativa solamente a lo largo de la barra y es despreciable en la dirección radial si se evita el contacto de la barra con los alrededores. La periferia de la barra se aísla de los alrededores para reducir la transferencia de calor a niveles despreciables con el exterior. Por consiguiente, se evita la transferencia de calor por convección.
4. Es despreciable la transferencia de calor por radiación. Las temperaturas registradas en la barra son pequeñas para que sea relevante la transferencia de calor por radiación.
5. Se considera contacto perfecto entre las secciones de la barra. Se aplica una pasta o grasa térmica para minimizar el efecto de resistencia térmica por contacto mecánico.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	47/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 4

Conducción radial



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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	48/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

<i>Fuente de riesgo.</i>	<i>Riesgo asociado.</i>
No existe	Ninguno.

2. Objetivos

- ✓ Analizar la transferencia de calor por conducción en dirección radial en un disco metálico delgado.
- ✓ Obtener experimentalmente la distribución de temperatura en el disco y comparar con los resultados del modelo teórico.

3. Conceptos básicos y definiciones

La transferencia de calor en un disco es un ejemplo de sistemas cilíndricos que experimentan gradientes de temperatura sólo en la dirección radial, y se analiza como conducción de calor unidimensional.

El disco, figura 4.1, de radio interior r_i , radio exterior r_o y longitud L con temperatura constante T_i y T_o respectivamente. En el análisis no hay generación de calor en la pared y se considera que su conductividad térmica, k , es constante. Entonces la transferencia de calor por conducción en la pared del disco es estacionaria.

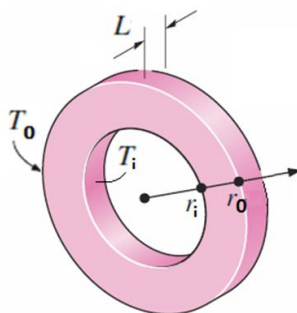


Figura 4.1. Disco. Adaptado de [2].

Distribución de temperaturas teórica

La distribución de temperaturas en la pared del disco se puede obtener a partir de un balance de energía sobre un elemento de volumen diferencial. Por lo que la ecuación de difusión de calor en coordenadas cilíndricas es:

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	49/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(kr \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Esta se puede simplificar aplicando las consideraciones indicadas en párrafos anteriores, es decir: (1) conducción de calor unidimensional en dirección r , (2) estado estacionario, (3) sin generación interna de calor en el medio y (4) propiedades constantes. Es importante subrayar que el calor transferido será constante en toda la pared del disco. Aplicando las simplificaciones, la Ec. 4.1 se reduce y queda como:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

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

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Integrando la Ec. 4.3, la solución general es:

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Para obtener el valor de las constantes, se aplica las condiciones de frontera, para el interior del disco, $T(r_i) = T_i$ y en el exterior $T(r_o) = T_o$ en la solución general. Resolviendo para C_1 y C_2 y sustituyendo en la solución general, se obtiene la distribución de temperaturas

$$T(r) = \frac{T_o - T_i}{\ln(r_o/r_i)} \ln(r/r_i) + T_i \quad (\text{Ec. 4.5})$$

A partir de la ley de Fourier se determina que el calor transferido a través de la pared del disco puede calcularse como:

$$q_r = -kA_r \frac{dT}{dr} = -k(2\pi r)(L) \frac{dT}{dr} = 2\pi kL \frac{T_i - T_o}{\ln(r_o/r_i)}, \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Mientras que el Flujo de calor se determina como:

$$q''_r = q_r/A_r = q_r/(2\pi r)(L) \quad (\text{Ec. 4.7})$$

A diferencia del calor transferido, el flujo de calor, q_r , disminuye con el área perpendicular al aumentar el radio en la dirección de la transferencia de calor. Por lo que es función del radio y disminuye a medida que r aumenta, como indica la Ec. 4.7

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	50/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

4. Equipo y Material

1. Equipo de conducción de calor, módulo radial.
2. Cronómetro.
3. Termopar (opcional).

La figura 4.2 muestra el equipo de conducción de calor, a la izquierda se encuentra la unidad de control y a la derecha los modelos de conducción lineal y radial.



Figura 4.2. Equipo experimental para analizar transferencia de calor por conducción.

La figura 4.3 y 4.4 muestran el esquema y fotografía del arreglo experimental, respectivamente, para analizar la conducción de calor. El modelo de conducción radial consta de un disco con la ventaja experimental de medir la temperatura en diferentes puntos a lo largo del radio.

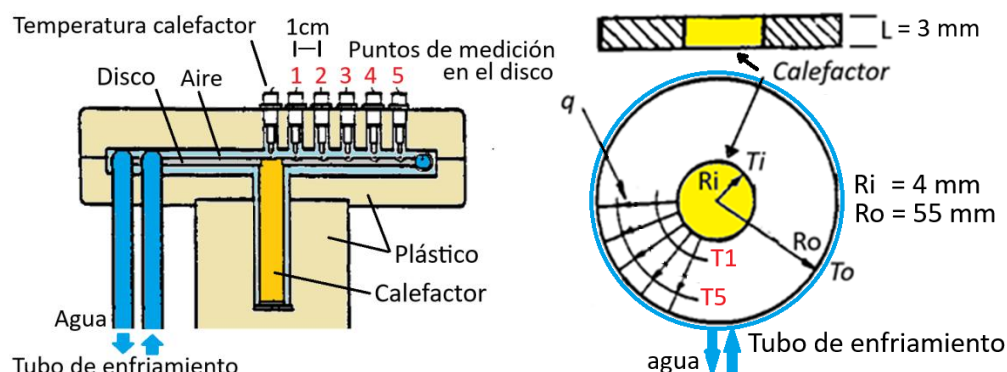


Figura 4.3. Esquema del arreglo experimental. Adaptado de [3].

El material del disco es una aleación del latón que se encuentra en el rango de 60 a 65% de cobre con conductividad térmica conocida. El disco tiene un diámetro de 110 mm y 3 mm de espesor, L . En el centro del disco se encuentra un calefactor eléctrico que idealmente disipa calor de forma uniforme y constante, de tal forma que eleva y mantiene constante la temperatura en todo el radio

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	51/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

interior del disco. Mientras que en el exterior circula agua a temperatura ambiente con un gasto tal que permite que la temperatura en el exterior del disco sea constante e igual a T_o , logrando el estado estacionario en aproximadamente 25 minutos.



Figura 4.4. Módulo de conducción radial.

Es importante señalar que solo una porción del calor generado por el calefactor (resistencia eléctrica) se transfiere por conducción al disco en la zona de contacto. Por lo tanto $q < \dot{W}$.

Existen dos condiciones de frontera experimentales que pueden alejar la distribución de temperatura de la teórica:

- Temperatura T_i , en el radio interior del disco, depende de la forma en como el calefactor disipa calor. Se considera que la generación de calor del calefactor es uniforme y constante.
- Temperatura T_o , en el radio exterior del disco, depende del gasto de agua que circula por el tubo de enfriamiento. Se considera que el gasto de agua es tal que la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del tubo, es pequeña.

Es conveniente subrayar que el disco del modelo experimental existe la tendencia a transferir calor en la dirección longitudinal a pesar de la envolvente de plástico que rodea al disco.

Si bien, la conducción de calor ocurre en toda la pared, el análisis se aplicará a una porción del disco, donde las temperaturas son conocidas. Por lo que sólo se consideran los puntos de medición de temperatura 1 a 5 y sus correspondientes radios, figura 4.3.

5. Desarrollo

Actividad 1. Medición de temperatura en el modelo experimental, calefactor y disco.

- Verificar la correcta conexión de los cables de los termistores a la unidad de control, figura 4.5.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	52/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 4.5. Conectores del módulo de conducción radial y conectores de la unidad de control.

2. Verificar que el módulo de conducción radial esté conectado a la unidad de control.
3. Verificar que la perilla de potencia en la unidad de control esté en cero, y posteriormente encender el equipo.
4. Asignar una potencia del calefactor, se sugiere iniciar con una potencia similar a la utilizada en la Práctica 2 “Conductividad y resistencia térmica”.
5. Abrir totalmente la válvula de alimentación del agua de enfriamiento.
6. Esperar de 20 a 25 minutos para que la temperatura del disco se estabilice y se alcance el estado estacionario. Transcurrido este tiempo, se sugiere monitorear la temperatura del punto 1 por dos minutos, si la temperatura no cambia, se pueden tomar datos.
7. Registrar la lectura de temperatura de cada punto de medición en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Datos experimentales.

Ubicación	Punto	Distancia r [m]	T [°C]		
			Evento 1	Evento 2	Evento 3
Calefactor		0			
Disco	1	0.01			
	2	0.02			
	3	0.03			
	4	0.04			
	5	0.05			
Potencia eléctrica calefactor [W]					

8. Efectuar dos eventos más, modificando la potencia eléctrica del calefactor en incrementos iguales, por ejemplo 16 y 24 W.
9. Repetir los pasos 6 y 7.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	53/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Resultados

1. Graficar la distribución de temperatura experimental en el disco, del punto de medición 1 al punto 5, obteniendo una gráfica similar a la mostrada en la figura 4.6.

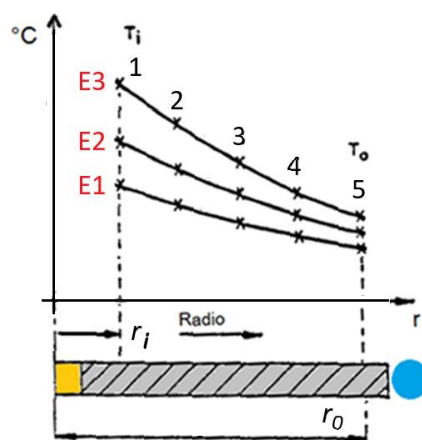


Figura 4.6. Ejemplo de distribución de temperatura en el disco. Adaptado de [3]

2. Obtener a partir de la Ec. 4.5 la distribución de temperatura teórica en el disco para cada uno de los eventos sustituyendo parámetros experimentales del evento correspondiente, es decir T_1 y T_5 . Presentar los valores de temperatura teórica en la tabla 4.2 y las ecuaciones teóricas para cada evento.

Tabla 4.2. Temperatura teórica.

Ubicación	Punto	Distancia r [m]	Temperatura teórica [°C]		
			Evento 1	Evento 2	Evento 3
Disco	1	0.01			
	2	0.02			
	3	0.03			
	4	0.04			
	5	0.05			

3. Para cada evento realizar una gráfica comparativa de los datos experimentales y teóricos, Obtenga una gráfica similar a la mostrada en la figura 4.7.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	54/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

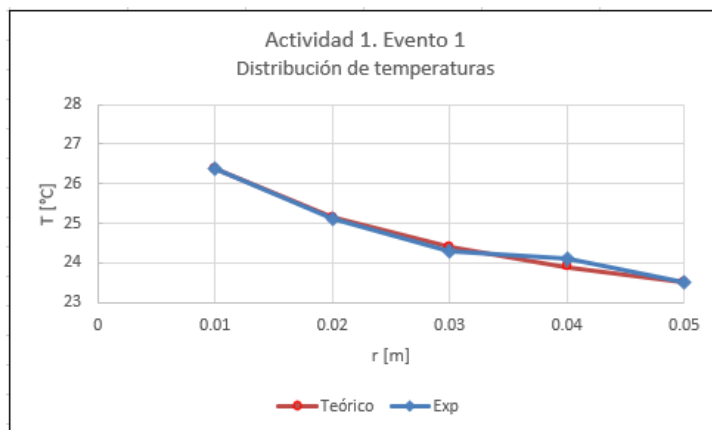


Figura 4.7. Ejemplo de gráfica de Distribución de temperatura para el evento 1.

4. Calcule la transferencia de calor en el disco y presente los resultados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Transferencia de calor en el disco para cada evento.

Evento	Transferencia de calor en el disco, q_r [W]	Potencia eléctrica calefactor [W]
1		
2		
3		

5. De acuerdo a las gráficas del resultado 3, seleccionar el evento cuya gráfica presente la mejor coincidencia de las temperaturas experimentales con las teóricas. Para el cual calcule la transferencia de calor en diferentes puntos del disco y escriba los resultados en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Transferencia de calor en diferentes puntos del disco.

Evento elegido:		#		
Punto de medición	Distancia r [m]	Temperatura experimental [°C]	Transferencia de calor q_r [W]	Pares de puntos
1	0.01			
2	0.02			q_{r2-1}
3	0.03			q_{r3-2}
4	0.04			q_{r4-3}
5	0.05			q_{r5-4}

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	55/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Calcule el flujo de calor en el disco y presentar los resultados en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Flujo de calor a través del disco.

Punto de medición	Distancia r [m]	Área de Transferencia de calor, A_r [m ²]	Flujo de calor q_r [W/m ²]		
			Evento		
			1	2	3
1	0.01				
2	0.02				
3	0.03				
4	0.04				
5	0.05				

7. Graficar el flujo de calor a través del disco.

7. Cuestionario

Contestar las siguientes preguntas con la información obtenida de la práctica.

- De acuerdo al resultado 1, describir la tendencia de la temperatura experimental con respecto al radio.
- ¿La distribución de temperaturas experimental observada es función de la geometría del medio por donde se conduce el calor? Argumente su respuesta.
- ¿Los perfiles de temperatura experimental coinciden con los teóricos? Argumente su respuesta.
- ¿Cómo es la transferencia de calor a través del disco? Argumente su respuesta.
- Explica el comportamiento del flujo de calor observado en el modelo experimental.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera F.P. y DeWitt, D. P. (2011). Introduction to Heat Transfer. 6th edition. USA: John Wiley & sons.
- Çengel, Y. A, Ghajar, A. J. (2020). Heat and Mass Transfer: Fundamentals. 6th edition. USA: McGraw Hill.
- Armfiel LTD. (1996). Instruction Manual, Heat Conduction Apparatus HT 1. Issue 12. United Kingdom: Armfield Limited.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	56/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 5

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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	57/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
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

$$q_{conv} = h_L A_s (T_s - T_{\infty}), \quad (\text{Ec. 5.1})$$

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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	58/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

como de la superficie (geometría y rugosidad). Por lo anterior, el estudio de 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:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (\text{Ec. 5.2})$$

El primero se obtiene como:

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k_f} \quad \text{o} \quad \overline{Nu} = \frac{\bar{h} L}{k_f}, \quad (\text{Ec. 5.3})$$

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 $\overline{Nu}$ 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. 5.2, 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 5.1. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección [1].

Proceso	$h \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$
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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	59/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
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:

$$Gr = \frac{\text{fuerzas de flotación}}{\text{fuerzas de viscosas}} = \frac{g\beta L^3(T_s - T_\infty)}{\nu^2}, \quad (\text{Ec. 5.4})$$

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:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

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

$$Nu = \frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k_f\Delta T/L} = \frac{hL}{k_f}, \quad (\text{Ec. 5.6})$$

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

$$Pr = \frac{\text{difusividad de momentum}}{\text{difusividad de calor}} = \frac{c_p\mu}{k_f} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{Ec. 5.7})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	60/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 5.2.

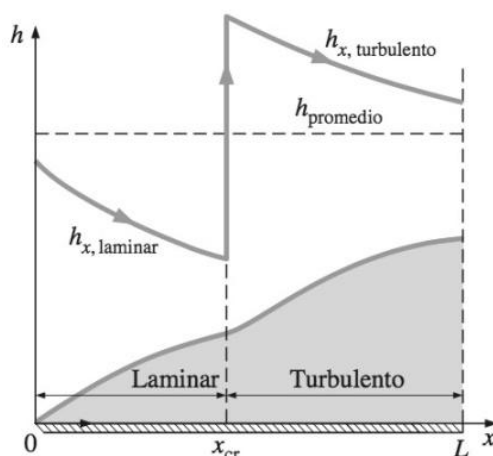


Figura 5.2. Representación gráfica del coeficiente de transferencia de calor para una placa plana [2].

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:

$$Nu_x = 0.453 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	61/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 5.2 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].

$$Nu_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387(GrPr)^{1/6}}{[1 + (0.437/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (\text{Ec. 5.9})$$

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

$$Nu_L = 0.680 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{Ec. 5.10})$$

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:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (\text{Ec. 5.11})$$

4. Equipo y Material

1. Equipo de convección libre y forzada, figura 5.3.
2. Anemómetro de hilo caliente.
3. Cronómetro.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	62/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 5.3. 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 como mínimo 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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	63/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
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.

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

$T_{\text{ambiente}}, T_{\text{amb}}, T_{\infty} = \text{_____} [^{\circ}\text{C}]$

$\Delta h_{\text{barómetro}} = \text{_____} [\text{cm Hg}]$

- Medir las dimensiones de la placa.

Altura, L : _____ [m]

Ancho, W : _____ [m]

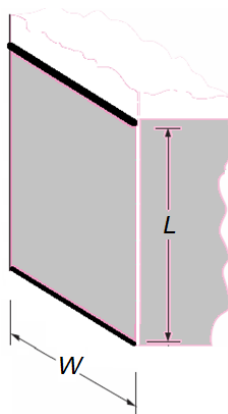


Figura 5.4. Dimensiones de la placa.

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

Actividad 2. Convección libre.

- Girar la perilla de control de potencia del calefactor, resaltada en cuadro rojo en la figura 5.5, hasta que en la pantalla derecha muestre 95 W. Mantener 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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	64/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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



Figura 5.5. Panel de control

- Esperar a que la temperatura alcance el valor indicado en el punto anterior y disminuir la potencia del calefactor a 8 W. Esperar a que la temperatura de la placa deje de variar (aproximadamente en 20 o 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 5.1.

Tabla 5.1. Registro de datos experimentales.

Evento	1	2	3	Unidades
V_{∞}	≈ 0			[m/s]
T_s				[°C]
T_{∞}				[°C]
$\dot{W}_{calefactor}$				[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 5.6, e introducir hasta la mitad del ducto. Se recomienda utilizar cinta masking como referencia.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	65/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 5.6. 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 después de off, figura 5.7.



Figura 5.7. Control de la velocidad del ventilador.

- Medir la velocidad con el anemómetro y posteriormente retirarlo del ducto.
- Esperar a que se establezca 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 5.1, 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.
- Repetir el procedimiento del paso 4 al 6.

6. Resultados

- Obtener las propiedades del fluido a temperatura de película y llenar la tabla 5.2.

Tabla 5.2. 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		

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	66/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Cálculo del coeficiente de convección h_L experimental para los 3 eventos

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

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

- Calcular los números de Grashof y de Prandtl.
- Calcular el número de Nusselt teórico, Nu_{teo} , con las correlaciones apropiadas indicadas en esta práctica para las condiciones del experimento.
- 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

- Calcular el número de Prandtl.
- 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).
- Calcular el número de Nusselt teórico, Nu_{teo} , con las correlaciones apropiadas indicadas en esta práctica para las condiciones del experimento.
- Calcular el coeficiente de convección teórico h_{teo} a partir del resultado anterior

Presentar los resultados en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. 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		

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

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	67/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

7. Cuestionario

1. ¿Qué tipo de convección presenta los mayores valores del coeficiente de convección?
2. ¿Qué tendencia observa en el h_{exp} en relación con el Nu_{exp} ?
3. ¿Qué tendencia observa en el Nu_{exp} en relación con el Re_L ?
4. ¿Qué tendencia observa de la gráfica h_{exp} contra V_{∞} ?
5. ¿Qué sucede con la temperatura de la placa al aumentar la velocidad de aire y a qué se debe?
6. 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.
7. Compare los valores de los coeficientes de convección experimentales contra los rangos de valores típicos y comente.

8. Conclusiones

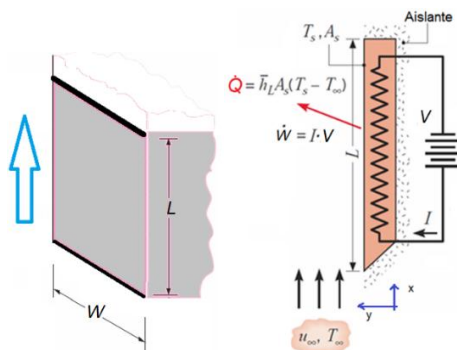
9. Bibliografía

Fuentes básicas

1. Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera F.P. y DeWitt, D. P. (2011). Introduction to Heat Transfer. 6th edition. 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. Martynenko, O.G. y Khramtsov, P.P. (2005). Free-Convective Heat Transfer. Netherlands: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Página 94.
4. Armfiel LTD. (1995). Instruction Manual, Free and forced convection. Heat transfer apparatus HT 6. Issue 9. England: Armfield Limited.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	68/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

10. Anexos



Consideraciones del arreglo experimental:

1. Convección externa. (La capa límite térmica crece libremente)
2. 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_L^2 .
3. Estado estacionario. Flujo paralelo ($dp/dx = 0$).
4. Flujo de calor uniforme ($Q/A = \text{cte.}$ flujo de calor constante) a lo largo de la superficie de la placa.
5. Flujo libre sin turbulencia (la placa está confinada por paredes).
6. 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.
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).

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	69/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 6

Transferencia de calor en aletas de sección transversal constante



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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	70/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
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.
No existe	Ninguno

2. Objetivos

- ✓ Obtener la distribución de temperatura experimental a lo largo de la aleta.
- ✓ Determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección del arreglo de aletas.
- ✓ Obtener la eficiencia y efectividad de una aleta.

3. Conceptos básicos y definiciones

La ley de enfriamiento de Newton muestra que la transferencia de calor se puede intensificar incrementando la diferencia de temperaturas, el coeficiente de transferencia de calor o el área de transferencia de calor, como se establece en la Ec. 6.1.

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

En algunos problemas las temperaturas T_s y T_∞ son fijas, por lo que es posible incrementar la rapidez de transferencia de calor aumentando el coeficiente de transferencia de calor por convección, h_L , o aumentando el área a través de la cual ocurre la convección, A_s .

Incrementar h_L no es tarea sencilla por lo que la mejor alternativa es aumentar el área superficial original agregando elementos secundarios que se extienden desde la superficie primaria al fluido circundante, se les conoce como superficies extendidas o aletas. Este “aumento” en la superficie se muestra en la figura 6.1.

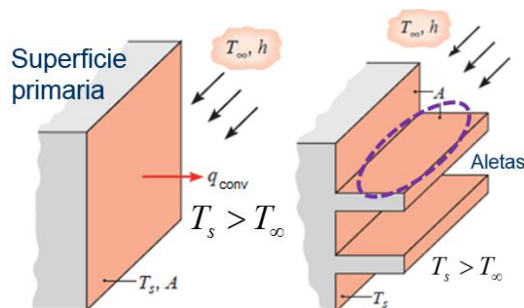


Figura 6.1. Superficie primaria y superficies extendidas. Adaptado de [1].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	71/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Al Incorporar las aletas a la superficie primaria se establece una continuidad entre estas, por lo que el calor se transfiere por conducción, de la superficie primaria hacia y a lo largo del material de la aleta y luego de la aleta al fluido circundante por convección, como se muestra en la figura 6.2.

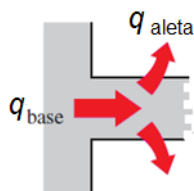


Figura 6.2. Transferencias de calor en la base de la aleta. Adaptado de [1].

Existe gran variedad de diseños de aletas, un tipo en particular, son las aletas cilíndricas de sección uniforme o área transversal constante, figura 6.3

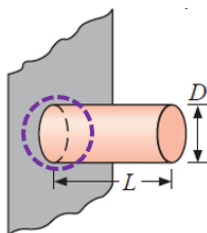


Figura 6.3. Aleta cilíndrica. Adaptado de [1].

Análisis general

Para determinar la transferencia de calor en una aleta, es necesario obtener primero la distribución de temperaturas a lo largo de esta. Para ello se realiza un balance de energía en un elemento diferencial de una aleta, como se muestra en la figura 6.4.

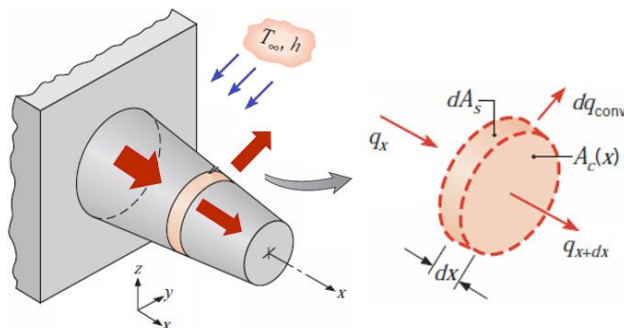


Figura 6.4. Balance de energía para una aleta. Adaptado de [1].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	72/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Considerando las siguientes suposiciones: no hay generación interna de calor en la aleta, conducción de calor unidimensional en la dirección x , estado estacionario, conductividad térmica del material de la aleta k constante, contacto perfecto entre la base de la aleta y la superficie primaria, coeficiente de transferencia de calor por convección h constante y uniforme sobre toda la superficie de la aleta, temperatura del fluido uniforme y la radiación desde la superficie es despreciable. El balance de energía se expresa como

$$\left(\begin{array}{c} \text{Conducción} \\ \text{hacia el diferencial} \\ \text{de volumen en } x \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Conducción} \\ \text{desde el diferencial de} \\ \text{volumen en } x + dx \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Convección del calor} \\ \text{desde elemento} \\ \text{hacia el fluido} \end{array} \right)$$

$$q_{cond, x} = q_{cond, x+dx} + dq_{conv},$$

donde

$$q_{cond, x} = -kA_c \frac{dT}{dx}$$

$$dq_{conv} = h dA_s(T_s - T_\infty)$$

Sustituyendo las ecuaciones en el balance de energía y reduciendo términos, se obtiene la ecuación diferencial general de las aletas

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c} \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} \right) (T - T_\infty) = 0, \quad (\text{Ec. 6.2})$$

donde A_s es el diferencial de área de intercambio de calor por convección y A_c es el área transversal de la aleta por la que el calor se transfiere por conducción.

Solución para aletas de sección transversal uniforme

Para el caso de aletas cilíndricas de área de sección transversal constante, figura 6.3, A_c es constante y $A_s = px$, donde x y p es el perímetro de la aleta. Por consiguiente $dA_c/dx = 0$ y $dA_s/dx = p$. La Ec. 6.2 se reduce a

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hp}{kA_c} (T - T_\infty) = 0 \quad (\text{Ec. 6.3})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	73/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Para solucionar esta ecuación se realiza el siguiente cambio de variable θ como

$$\theta(x) = T(x) - T_{\infty}$$

Puesto que T_{∞} es una constante, $d\theta/dx = dT/dx$, sustituyendo en la Ec. 6.3, se obtiene

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0, \quad (\text{Ec. 6.4})$$

donde

$$m^2 = \frac{hp}{kA_c} \quad (\text{Ec. 6.5})$$

La ecuación 6.4 es una ecuación diferencial lineal homogénea de segundo orden con coeficientes constantes, cuya solución general es

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

Las constantes C_1 y C_2 se determinan a partir de las condiciones de frontera en la base ($x = 0$) y en el extremo de la aleta ($x = L$), figura 6.5.

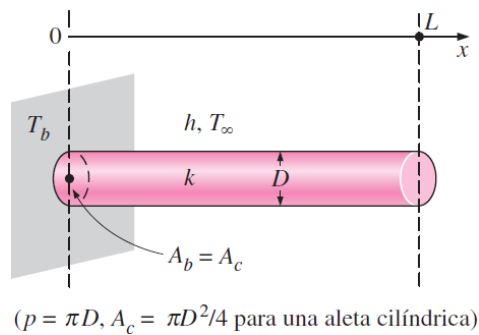


Figura 6.5. Aleta cilíndrica [2].

Generalmente la temperatura de la superficie primaria T_b se conoce y por lo tanto se tiene una condición de frontera de temperatura conocida. De acuerdo al cambio de variable se tiene que la condición de frontera en la base es θ_b que se define como:

$$\theta(0) = \theta_b = T_b - T_{\infty} \quad (\text{Ec. 6.7})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	74/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

En el extremo de la aleta se puede presentar cuatro condiciones de frontera:

1. Temperatura en el extremo es conocida, $\theta(L) = \theta_L = T_L - T_\infty$
2. Extremo adiabático, $\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} = 0$.
3. Convección en el extremo de la aleta, $\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} = h\theta(L)$.
4. Aleta de longitud infinita, $\lim_{L \rightarrow \infty} \theta(L) = 0$.

La condición de frontera se elige de acuerdo a la situación física presente, para el modelo experimental del laboratorio se puede considerar que la transferencia de calor por convección en la punta es insignificante. Esta aproximación se justifica porque el fluido se desplaza con dificultad en la punta de la aleta debido al estrecho espacio entre ésta y la pared de acrílico. El flujo de aire se restringe severamente por lo que el coeficiente de convección disminuye drásticamente. La figura 6.6 muestra el arreglo de aletas con la tapa de visualización.



Figura 6.6. Detalle de la separación (4 mm) entre el extremo de las aletas y la placa de acrílico del dispositivo experimental.

Aplicando la condición de frontera de extremo adiabático, para la base ($x = 0$), $\theta_b = T_b - T_\infty$ y el extremo de la aleta ($x = L$)

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} = 0 \quad (\text{Ec. 6.8})$$

La solución de la Ec. 6.6 proporciona la distribución de temperatura en la aleta:

$$\frac{\theta(x)}{\theta_b} = \frac{T(x) - T_\infty}{T_b - T_\infty} = \frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL} \quad (\text{Ec. 6.9})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	75/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

El calor transferido por la aleta se calcula como

$$q_{aleta} = -kA_c \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0},$$

donde

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = -m\theta_b \tanh(mL)$$

Por lo que

$$q_{aleta} = kA_c m \theta_b \tanh(mL) = \sqrt{hp k A_c} (T_b - T_\infty) \tanh(mL) \quad (\text{Ec. 6.10})$$

Eficiencia de una aleta

Una medida del desempeño térmico de la aleta es la eficiencia de la aleta η_{aleta} , ésta se define como la relación de la transferencia de calor por convección que se obtiene de la aleta con el máximo teórico o ideal ($q_{máximo}$).

$$\eta_{aleta} = \frac{q_{aleta}}{q_{aleta \text{ máximo}}} \quad (\text{Ec. 6.11})$$

La máxima transferencia de calor por convección en la aleta se obtiene de la Ec. 6.1 al considerar al coeficiente de convección h constante a lo largo de la aleta, la temperatura del fluido circundante uniforme, para un área superficial de aleta definida. Para transferir la cantidad máxima de calor la temperatura de la aleta debe ser uniforme e igual a la temperatura de la base, es decir T_b , figura 6.7a.

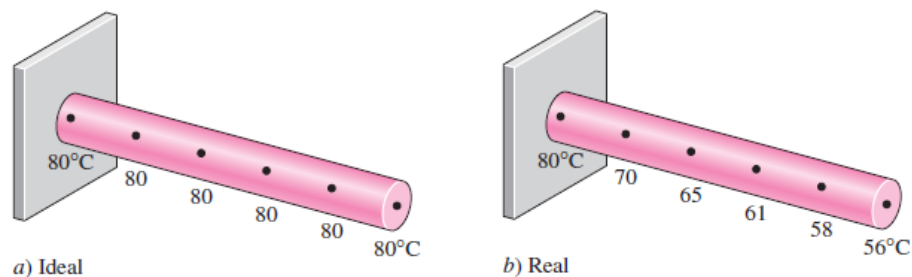


Figura 6.7. Distribución de temperaturas (a) Ideal, (b) Real. Adaptado de [2].

Lo anterior sería posible si la resistencia térmica a la conducción de calor en la aleta fuera cero. Recordando la definición de resistencia térmica, Ec. 2.12 L/kA_c , se utilizaría un material para la

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	76/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

aleta con conductividad térmica infinita. De esta forma se tendría un valor máximo de referencia para la convección de calor en la aleta.

$$q_{aleta\ máximo} = hA_{aleta}(T_b - T_{\infty}) = hA_{aleta}\theta_b \quad (\text{Ec. 6.12})$$

Mientras que q_{aleta} dependerá de la condición de frontera de la aleta. Otra opción es despejar q_{aleta} de la Ec. 6.11

$$q_{aleta} = q_{aleta\ máximo}\eta_{aleta} = hA_{aleta}(T_b - T_{\infty})\eta_{aleta} \quad (\text{Ec. 6.13})$$

La eficiencia puede obtenerse de gráficas si se conocen los parámetros de la aleta, el material del cual está fabricado y el coeficiente convectivo. Este método gráfico permite obtener la eficiencia para las aletas de geometría más común, tanto de sección constante como variable.

Por lo tanto, la eficiencia se define como la relación entre al calor de la aleta y el calor máximo que disiparía si estuviera a la temperatura de la base, Ec. 6.11.

Sustituyendo la Ec. 6.10 en la Ec. 6.11 se obtiene la eficiencia para una aleta cilíndrica de sección transversal constante con punta aislada.

$$\eta_{aleta\ punta\ aislada} = \frac{q_{aleta}}{q_{aleta\ máx}} = \frac{\sqrt{hpkA_c}(T_b - T_{\infty}) \tanh(mL)}{hA_{aleta}(T_b - T_{\infty})} = \frac{\tanh(mL)}{mL} \quad (\text{Ec. 6.14})$$

La utilización de las aletas suele justificarse económicamente para eficiencias superiores al 90%.

Efectividad de una aleta

Otra forma de estimar el beneficio de una aleta es por medio de la efectividad.

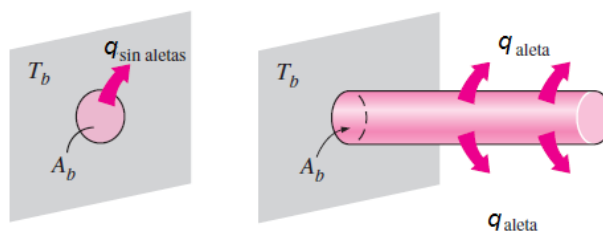


Figura 6.8. Efectividad de una aleta. Adaptado de [2].

Esta se define como la razón de la transferencia de calor por convección de la aleta a la transferencia de calor entre la convección que existiría sin la aleta en la superficie primaria, figura 6.8.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	77/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\varepsilon_{aleta} = \frac{q_{aleta}}{q_{sin aleta}} = \frac{q_{aleta}}{hA_b(T_b - T_{\infty})}, \quad (\text{Ec. 6.15})$$

donde A_b es el área de la sección transversal en la base de la aleta. Es deseable en cualquier diseño q_{aleta} sea mayor que $q_{sin aleta}$, lo que indica que la aleta está aumentando la transferencia de calor desde la superficie primaria. El uso de una aleta se justifica para $\varepsilon_{aleta} \geq 2$.

Sustituyendo la Ec. 6.13 en la ecuación Ec. 6.15 se obtiene:

$$\varepsilon_{aleta} = \frac{hA_{aleta}(T_b - T_{\infty}) \eta_{aleta}}{hA_b(T_b - T_{\infty})} = \frac{A_{aleta}}{A_b} \eta_{aleta} \quad (\text{Ec. 6.16})$$

Como puede observarse, la eficiencia y la efectividad de la aleta están relacionadas con el desempeño de la misma, pero son cantidades diferentes.

La Ec. 6.16 no proporciona información sobre las variables que afectan la transferencia de calor de la aleta y su efecto en la efectividad, por lo que es conveniente sustituir la ecuación apropiada para la transferencia de calor de la aleta.

Realizando el análisis para una aleta infinitamente larga se puede llegar a la Ec. 6.17

$$\varepsilon_{aleta larga} = \frac{q_{aleta larga}}{q_{sin aleta}} = \frac{\sqrt{hpkA_c}(T_b - T_{\infty})}{hA_b(T_b - T_{\infty})} = \sqrt{\frac{kp}{hA_c}}, \quad (\text{Ec. 6.17})$$

donde $A_c = A_b$.

De la cual se obtienen las siguientes conclusiones para aumentar la efectividad, que también aplican a todas las aletas:

1. Alta conductividad térmica k del material de la aleta.
2. Alto valor del cociente entre el perímetro y el área de la sección transversal de la aleta, p/A_c como sucede en las aletas de placa delgada y las de espiga esbelta.
3. El uso de aletas es más efectivo en aplicaciones que comprenden un bajo coeficiente de convección. Por lo tanto, el uso de las aletas se justifica cuando el medio es un gas en lugar de un líquido y cuando la transferencia de calor es por convección natural en lugar de convección forzada, ver figura 5.1.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	78/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Cálculo experimental del coeficiente de convección

El cálculo de la eficiencia y de la efectividad de la aleta requiere conocer el coeficiente de convección. El coeficiente de convección se obtiene a partir del arreglo de aletas del equipo experimental empleado en la presente práctica, figura 6.9.



Figura 6.9. Arreglo de aleta de sección transversal constante y la superficie base.

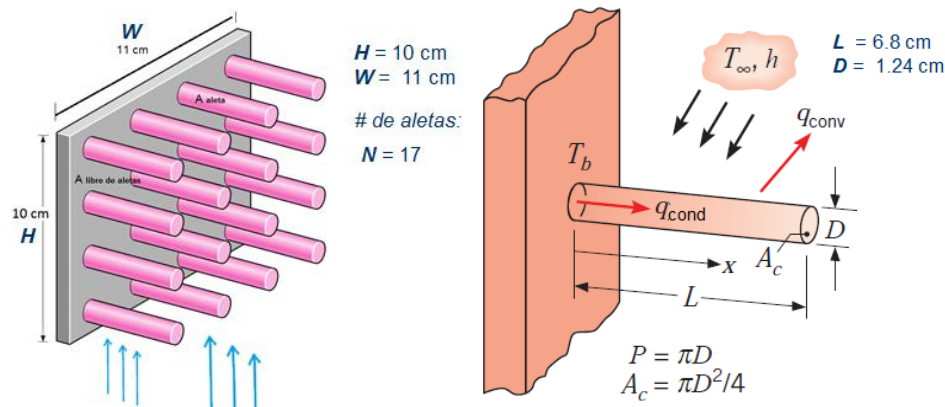


Figura 6.10. Dimensiones del arreglo experimental de aletas del laboratorio. Adaptado de [2] y [1].

El modelo experimental está diseñado para asumir que la transferencia de calor del arreglo de aletas y base (q_{Total}) es igual al calor que disipa el calefactor, ubicado por debajo de la placa base, e igual a la potencia eléctrica suministrada ($\dot{W}_{calefactor}$).

$$q_{Total} = \dot{W}_{calefactor} \quad (\text{Ec. 6.18})$$

La transferencia total de calor por convección es la suma de la transferencia de calor por convección de la superficie primaria libre de aletas y de la superficie de las aletas

$$q_{total} = q_{\text{superficie libre de aletas}} + Nq_{aleta} = q_{\text{superficie libre de aletas}} + N(\eta_{aleta}q_{aleta \text{ máx}})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	79/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$q_{total} = hA_{\text{libre de aletas}}(T_b - T_{\infty}) + N\eta_{aleta}hA_{aleta}(T_b - T_{\infty}) \quad (\text{Ec. 6.19})$$

Donde h es el coeficiente de convección que se considera uniforme en todo el arreglo, N es el número de aletas del arreglo, A_{aleta} es el área superficial de una aleta y η_{aleta} es la eficiencia de una sola aleta.

$$A_{\text{libre de aleta}} = A_{\text{superficie primaria}} - NA_b \quad (\text{Ec. 6.20})$$

$$A_{\text{superficie primaria}} = WH \quad (\text{Ec. 6.21})$$

$$\eta_{aleta} = \frac{\tanh(mL)}{mL} \quad (\text{Ec. 6.22})$$

$$m = \sqrt{\frac{hp}{kA_c}} \quad (\text{Ec. 6.23})$$

Para obtener h se puede resolver la Ec. 6.19 de forma numérica o de forma iterativa. Un proceso iterativo inicia con la propuesta de un valor inicial de h , por ejemplo valores obtenidos de la Práctica 5, para calcular q_{Total} , y comparar el resultado con la potencia suministrada al calefactor $\dot{W}_{calefactor}$. Si no coinciden, se propone un nuevo valor de h hasta lograr la convergencia.

4. Equipo y Material

1. Equipo de convección libre y forzada. Figura 6.11.
2. Aletas cilíndricas.
3. Termopar.
4. Anemómetro de hilo caliente.
5. Cronómetro.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	80/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

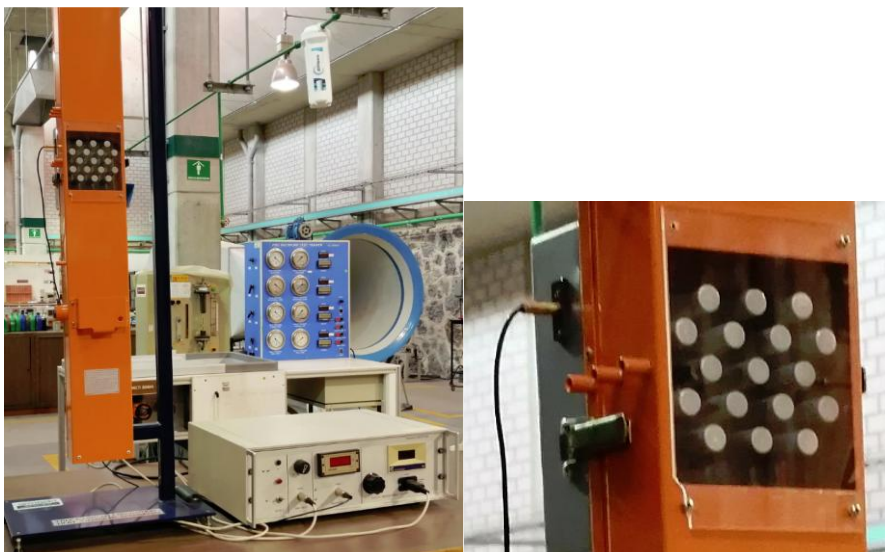


Figura 6.11. Aparato de convección libre y forzada con aletas.

5. Desarrollo

Las dimensiones del arreglo y de las aletas se indican en la figura 6.10.

En la presente práctica se va a determinar experimentalmente las ventajas que ofrecen las aletas cilíndricas para aumentar la transferencia de calor por convección comparada con una placa sin aletas, utilizada en la práctica 5. Es recomendable utilizar las mismas velocidades del fluido en ambas prácticas para facilitar la comparación.

Preparación previa

Registrar la temperatura ambiente. Este dato se tomará del termómetro instalado en el laboratorio.

$$T_{\text{ambiente}}, T_{\text{amb}}, T_{\infty} = \text{_____} [^{\circ}\text{C}]$$

Encienda el equipo **al inicio de la clase para contar con tiempo suficiente** para realizar un evento de convección libre (actividad 1) y como mínimo dos eventos para convección forzada (actividad 3).

1. Colocar el conjunto calefactor-aletas en la ranura del ducto rectangular y asegurar la placa con los broches de presión que se encuentran a los lados. Verificar que el arreglo de aletas ajuste en el ducto sin tocar los bordes.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	81/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Conectar el sensor de temperatura del arreglo de aletas y los cables de la alimentación eléctrica del ventilador y del calefactor al panel de control.
- Verificar que la perilla del control de potencia eléctrica del calefactor y del control de velocidad del ventilador se encuentren ambas en apagado, figura 6.12.
- Conectar la clavija de alimentación del equipo.
- Encender el equipo.
- Iniciar actividad 1.

Actividad 1. Convección libre.

- Girar la perilla de control de potencia del calefactor, figura 6.12, hasta que la pantalla de potencia muestre 95 W. Mantener la potencia hasta que la temperatura de la base, T_b , alcance 50°C, indicada en la pantalla de temperatura. El tiempo de espera aproximado en alcanzar dicha temperatura es de 5 minutos.

Posteriormente disminuir la potencia del calefactor a 23 W. Esperar a que la temperatura de la base deje de variar. El tiempo de estabilización es de 20 o 30 minutos. Posteriormente, tomar los datos del experimento.

No se recomienda que la temperatura de la placa exceda de 50°C. Si lo hace, se extiende el tiempo de estabilización de temperatura, que afectará el tiempo para realizar las actividades.

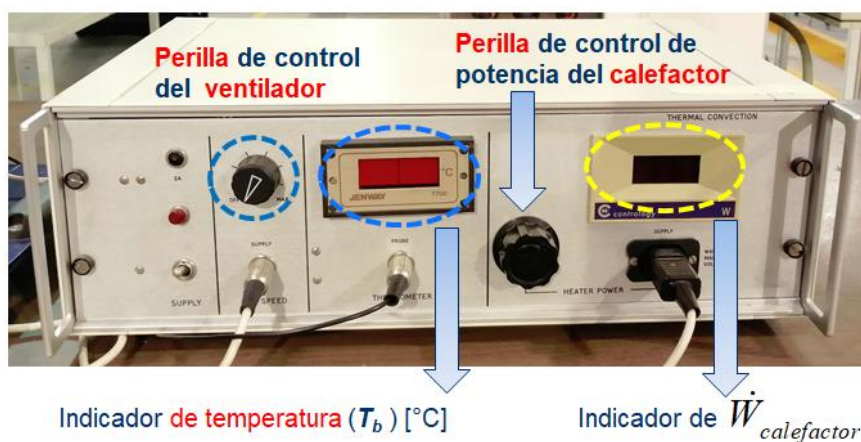


Figura 6.12. Panel de control

- Llenar la columna 1 de la tabla 6.1.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	82/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 6.1. Registro de datos experimentales.

Evento	1	2	3	Unidades
V_{∞}	≈ 0			[m/s]
T_b				[°C]
T_{∞}				[°C]
$\dot{W}_{calefactor}$				[W]
	C. Libre	C. Forzada		

Actividad 2. Medición de temperatura a lo largo de la aleta para convección libre.

1. Medir la temperatura con el termopar en 4 diferentes puntos de la aleta central. Se incluye la base, el extremo de la aleta y tres puntos asociados a los orificios de toma de temperatura que se encuentran en el equipo de convección, figura 6.13.

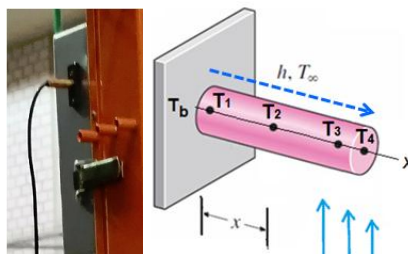


Figura 6.13. Medición de temperatura en la aleta.

2. Anotar los datos de temperatura en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Registro de temperatura a lo largo de la aleta central.

Distancia x [m]	0	0.010	0.036	0.060	0.067
Punto de medición	Tb	T1	T2	T3	T4
Temperatura [°C]					

Actividad 3. Convección forzada.

1. Encender el ventilador y girar la perilla de control hasta la cuarta línea después de off. En esta posición la velocidad es de aproximadamente 0.9 m/s, figura 6.14. **Se recomienda incrementar lentamente la velocidad para no dañar el ventilador.**

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	83/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 6.14. Control de la velocidad del ventilador.

2. Medir la velocidad con el anemómetro y posteriormente retirarlo del ducto.
3. Aumentar la potencia del calefactor a 47 W. Esperar a que la temperatura de la base se estabilice, el tiempo aproximado es de 30 minutos.
4. Llenar la columna 2 de la tabla 6.1.
5. Repita el procedimiento desde el punto 1, pero ahora con 56 W y la perilla del ventilador en la sexta línea. Con estos parámetros la velocidad del flujo al interior del canal es de 1.8 m/s.
6. Llenar la columna 3 de la tabla 6.1.

6. Resultados

1. Investigar la conductividad térmica del material de las aletas de aluminio.
 $k_{aleta} = \text{_____} \text{ [W/m K]}$
2. Calcular y presentar el área de las superficies en la tabla 6.3 con los datos de la figura 6.10.

Tabla 6.3. Registro de áreas.

Área	[m ²]
A_b	
A_{aleta}	
$A_{superficie\ primaria}$	
$A_{libre\ de\ aletas}$	
$A_{total\ de\ aletas}$	

3. Calcular el cociente p/A_b que muestra que tan delgada es la aleta. Se utilizará para propósitos de comparación con la aleta de la práctica 7. Recordar que p es el perímetro de la aleta en la base.
4. Calcular el coeficiente de convección experimental. Presentar el cálculo inicial del proceso iterativo en la tabla 6.4 a criterio del profesor.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	84/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 6.4. Cálculo inicial.

Parámetro	Convección libre Evento 1	Convección Forzada Evento 2	Convección Forzada Evento 3	Unidades
$\dot{W}_{calefactor}$				[W]
h				[W/m ² k]
m				
η_{aleta}				%
q_{total}				[W]
ε_{aleta}				

5. Efectuar el proceso iterativo modificando h hasta lograr que $q_{Total} \approx \dot{W}_{calefactor}$ y presentar los resultados finales en la tabla 6.5.

Tabla 6.5. Cálculo final.

	Evento	q_{total} [W]	T_b [°C]	h [W/m ² k]	η_{aleta}	ε_{aleta}
Convección libre	1					
Convección forzada	2					
	3					

6. Comparar los valores de la eficiencia y efectividad obtenidos en la práctica con los de referencia recomendados y presentarlos en la tabla 6.6.

Tabla 6.6. Desempeño térmico de la aleta.

Parámetro de desempeño de la aleta	Calculado C. Libre Evento 1	Calculado C. Forzada Evento 2	Calculado C. Forzada Evento 3	Valor Referencia
Eficiencia				
Efectividad				

7. Comparación de la transferencia de calor de la práctica 5 y 6. Llenar tabla 6.7 con los datos experimentales de las prácticas, en el entendido que se utilizó la misma velocidad en eventos correspondientes.

Tabla 6.7. Convección libre y forzada.

Práctica	Convección libre Evento 1		Convección forzada Evento 2		Convección forzada Evento 3		Unidades
	P5	P6	P5	P6	P5	P6	
Ts o Tb							[°C]
$q_{conv} (\approx \dot{W}_{calefactor})$							[W]
V_{∞}							[m/s]

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	85/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

8. Graficar la distribución de temperatura experimental.
9. Graficar la distribución de temperatura analítica dada por la Ec. 6.9 con los parámetros de la aleta para convección libre.

7. Cuestionario

En base a los resultados obtenidos argumente su respuesta.

1. ¿El agregar aletas a la superficie primaria mejoró la transferencia de calor? Revise los resultados y argumente.
2. ¿En qué tipo de convección se desempeña mejor las aletas en esta práctica? Argumente.
3. Describa la tendencia de la efectividad con los eventos ¿Por qué se observa esta tendencia?
4. ¿Recomendaría la utilización de las aletas de esta práctica? Argumente.
5. ¿Por qué la temperatura en la base de la aleta va disminuyendo si la transferencia de calor va aumentando?
6. Describa la tendencia de la temperatura a lo largo de la aleta. Argumente.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes básicas

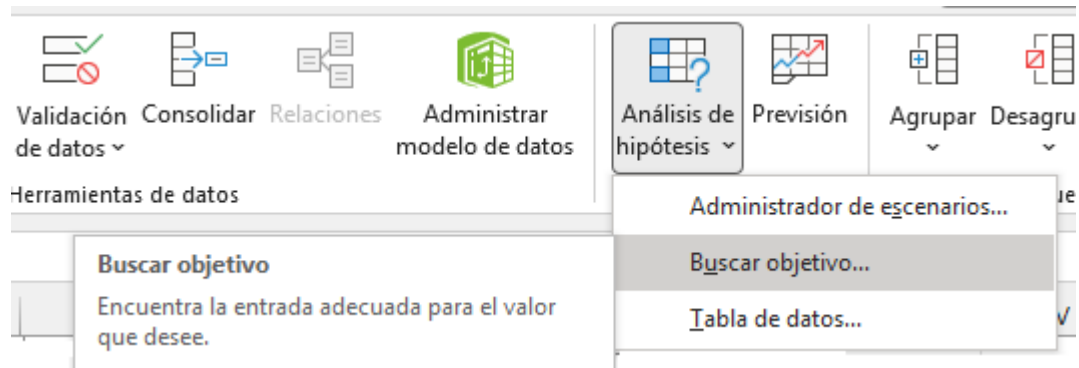
1. Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera F.P. y DeWitt, D. P. (2011). Introduction to Heat Transfer. 6th edition. USA: John Wiley & sons.
2. Çengel, Y. A, Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones. 4a edición. México: Mc Graw Hill.
3. Armfiel LTD. (1995). Instruction Manual, Free and forced convection. Heat transfer apparatus HT 6. Issue 9. England: Armfield Limited.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	86/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

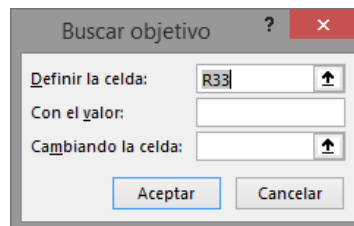
10. Anexos

El proceso iterativo puede realizarse con la función <Buscar objetivo> de Excel.

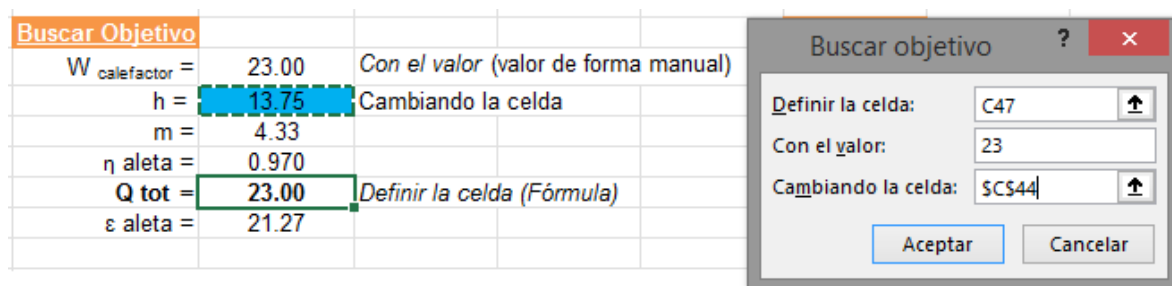
1. Menú: Datos /Análisis de hipótesis/Buscar objetivo...



2. Al seleccionar < Buscar objetivo > aparece la ventana emergente:



3. La función <Buscar objetivo> realiza de manera automática el cambio del coeficiente de convección, calcula el calor total y lo compara con la potencia eléctrica del calefactor hasta lograr la convergencia. Ejemplo:



	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	87/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 7

Transferencia de calor en aletas de sección transversal variable



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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	88/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

<i>Fuente de riesgo.</i>	<i>Riesgo asociado.</i>
No existe	Ninguno

2. Objetivos

- ✓ Obtener la distribución de temperatura experimental a lo largo de la aleta.
- ✓ Determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección del arreglo de aletas.
- ✓ Obtener la eficiencia y efectividad de una aleta.

3. Conceptos básicos y definiciones

El tipo de aleta a analizar en esta práctica se clasifica como una aleta recta. Se denomina aleta recta a cualquier superficie prolongada que se une a una superficie plana o superficie curva de gran radio de curvatura, puede ser de sección transversal uniforme o variable. La segunda se caracteriza porque su sección transversal y área superficial cambian con la distancia, desde la base a la punta, como se muestra en la figura 7.1.

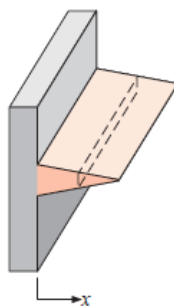


Figura 7.1. Aleta recta de perfil triangular [1].

Solución para aletas de sección transversal variable

La Ec. 6.2 es la ecuación diferencial general de las aletas. Ahora se obtendrá la solución para aletas rectas de área de sección transversal variable.

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c} \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (\text{Ec. 6.2})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	89/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Debido a que el área de la sección transversal A_c , el área superficial A_s y el perímetro de la aleta p varían con la distancia x , no es posible simplificar los términos dA_c/dx y dA_s/dx de la Ec. 6.2 complicando su solución.

Para obtener la solución es necesario deducir las expresiones para A_c , A_s y sus derivadas; Posteriormente se sustituyen en la ecuación diferencial general de las aletas. Entonces se analiza la forma de la ecuación diferencial resultante y se obtiene la solución general. Adicionalmente, hay que determinar los parámetros constantes a partir de las condiciones de frontera. Para finalmente obtener la distribución de temperatura y el calor transferido para evaluar tanto la eficiencia como la efectividad de la aleta.

Para el análisis, se realizan las siguientes consideraciones: (a) el origen del sistema coordenado se ubica en el extremo de la aleta, (b) se desprecia el calor transferido en los costados de la aleta, resaltado en color verde en la figura 7.2. De la primera, debido a que el área en el extremo de la aleta tiende a cero, el calor transferido también. La segunda se justifica debido a que el ancho de las aletas (t) es pequeño y por tanto su área es pequeña en comparación de las otras superficies de la aleta. Las dimensiones de la aleta se muestran en la figura 7.2.

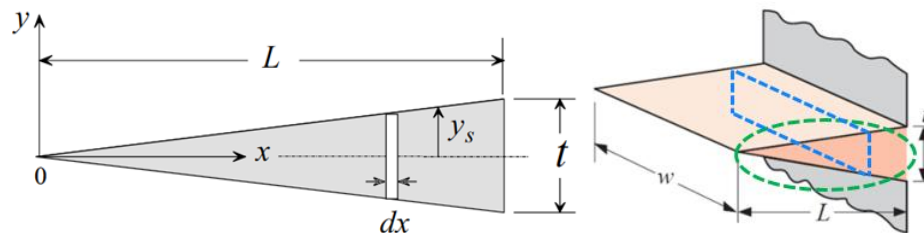


Figura 7.2. Aleta de sección transversal variable. Adaptado de [3,1]

Seleccionando un elemento diferencial de ancho dx y alto y_s ; éste último es función de x y proporcional a $(t/2)$. Por lo que el área de transferencia de calor por conducción en la aleta es:

$$A_c = 2y_s W = 2 \left(\frac{t x}{2L} \right) W = \left(\frac{tW}{L} \right) x \quad (\text{Ec. 7.1})$$

Derivando la Ec. 7.1 respecto a x

$$\frac{A_c}{dx} = \frac{tW}{L} \quad (\text{Ec. 7.2})$$

El área de transferencia de calor por convección se define como:

$$A_s = (\text{perímetro} \cdot s)/2, \quad (\text{Ec. 7.3})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	90/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

donde s es la longitud de una de las caras de la aleta. Debido a que el área de la aleta únicamente cambia en dirección x , el perímetro es igual a W . Mientras que s

$$s = (l^2 + y_s^2)^{1/2} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Definiendo para un diferencial de área, se tiene que

$$ds = (dx^2 + dy_s^2)^{1/2} = dx \left[1 + \left(\frac{dy_s}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (\text{Ec. 7.5})$$

donde $\frac{dy_s}{dx}$ representa la pendiente del perfil de la aleta, considerado constante para el análisis.

$$\frac{dy_s}{dx} = \frac{(t/2)}{L} = \frac{t}{2L} \quad (\text{Ec. 7.6})$$

Finalmente se tiene que

$$\frac{dA_s}{dx} = 2W \left[1 + \left(\frac{t}{2L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Ec. 7.7})$$

Finalmente sustituyendo la Ec. 7.1, Ec. 7.2 y Ec. 7.7 en la Ec. 6.2, simplificando términos y reordenando se obtiene

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dT}{dx} - (2hL/kt) \left[1 + \left(\frac{t}{2L} \right)^2 \right]^{1/2} \frac{1}{x} (T - T_\infty) = 0 \quad (\text{Ec. 7.8})$$

Debido que t es mucho menor a W el término entre corchetes es igual a 1 y la Ec. 7.8 se reduce a

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dT}{dx} - (2hL/kt) \frac{1}{x} (T - T_\infty) = 0 \quad (\text{Ec. 7.9})$$

La Ec. 7.9 es una ecuación diferencial ordinaria lineal con coeficientes variables. Multiplicando por x^2 , introduciendo una variable de temperatura $\theta = (T - T_\infty)$ y $\beta = \sqrt{(2hL/kt)}$, la ecuación se transforma en

$$x^2 \frac{d^2\theta}{dx^2} + x \frac{d\theta}{dx} - \beta^2 x \theta = 0 \quad (\text{Ec. 7.10})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	91/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Que es conocida como ecuación diferencial de Bessel, cuya solución involucra funciones de Bessel. La solución se obtiene comparando los coeficientes de la Ec. 7.10 con sus contrapartes en la forma general de la ecuación diferencial de Bessel. Del resultado de la comparación se obtiene la solución

$$\theta(x) = (T(x) - T_{\infty}) = C_1 I_0(2\beta\sqrt{x}) + C_2 K_0(2\beta\sqrt{x}) \quad (\text{Ec. 7.11})$$

Donde I_0 Representa una función de Bessel modificada de primera clase y orden 0. Mientras que K_0 representa una función de Bessel modificada de segunda clase y orden 0. C_1 y C_2 son constantes de integración.

Para obtener estas constantes, se aplican las condiciones de frontera en la punta ($x = 0$), $T(0) = T$ finita por lo tanto $\theta(0) =$ finita. En la base de la aleta ($x = L$), $T(L) = T_b$ por lo tanto $\theta(L) = (T_b - T_{\infty}) = \theta_b$. Para la condición de frontera en la punta ($x = 0$), $C_2 = 0$ ya que la función $K_0(0)$ tiende a infinito cuando el argumento tiende a cero, por lo tanto la Ec. 7.11 se reduce a

$$\theta(x) = C_1 I_0(2\beta\sqrt{x}) \quad \text{Ec. 7.12}$$

Aplicando la condición de frontera en la base en la Ec. 7.12 se obtiene $\theta(L) = \theta_b = C_1 I_0(2\beta\sqrt{L})$. Despejando C_1 se obtiene que $C_1 = \theta_b / I_0(2\beta\sqrt{L})$. Sustituyendo las constantes en la Ec. 7.11, se obtiene

$$\theta(x) = \frac{\theta_b}{I_0(2\beta\sqrt{L})} I_0(2\beta\sqrt{x}) \quad (\text{Ec. 7.13})$$

Puesto que $\beta = \sqrt{(2hL/kt)} = \sqrt{(2h/kt)}\sqrt{L} = m\sqrt{L}$, expresando la Ec. 7.13 en términos de la variable m , se obtiene

$$\theta(x) = \theta_b \frac{I_0(2m\sqrt{Lx})}{I_0(2mL)}, \quad (\text{Ec. 7.14})$$

$$\text{donde } m = \sqrt{\frac{hp}{kA_c}} = \sqrt{\frac{h2W}{kWt}} = \sqrt{(2h/kt)} \quad (\text{Ec. 7.15})$$

Finalmente la distribución de temperatura en función de $T(x)$ es

$$T(x) = (T_b - T_{\infty}) \frac{I_0(2m\sqrt{Lx})}{I_0(2mL)} + T_{\infty} \quad (\text{Ec. 7.16})$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	92/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

La transferencia de calor por convección de la aleta en estado estacionario se calcula a partir de la transferencia de calor por conducción en la base. Por lo que

$$q_{aleta} = q_{base\ aleta} = -kA_c \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} = -ktW \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L}$$

Para calcular $d\theta/dx$ se aplica la fórmula $\frac{d}{dx}[I_0(\alpha x)] = \alpha I_1(\alpha x)$. Resultando en

$$q_{aleta} = -ktW \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} = -ktWm(T_b - T_\infty) \frac{I_1(2mL)}{I_0(2mL)}$$

Puesto que el origen del sistema de coordenadas se ubicó en la punta de la aleta, el signo negativo de la ecuación anterior se elimina, quedando la transferencia de calor por convección en la aleta como

$$q_{aleta} = ktWm(T_b - T_\infty) \frac{I_1(2mL)}{I_0(2mL)}, \quad (\text{Ec. 7.17})$$

donde I_0 y I_1 son funciones de Bessel de primera clase modificadas de orden 0 y de orden 1 respectivamente.

Eficiencia de una aleta

La eficiencia de una la aleta se define como la relación de la transferencia de calor por convección que se obtiene de la aleta con el máximo teórico o ideal ($q_{\text{máximo}}$).

$$\eta_{aleta} = \frac{q_{aleta}}{q_{aleta\ \text{máximo}}}$$

Sustituyendo la Ec. 7.17 y el área de la aleta $A_{aleta} = 2LW$ en la ecuación de la eficiencia, se obtiene

$$\eta_{aleta} = \frac{ktWm(T_b - T_\infty) \frac{I_1(2mL)}{I_0(2mL)}}{2hLW(T_b - T_\infty)} = \frac{kt}{2h} \frac{m}{L} \frac{I_1(2mL)}{I_0(2mL)} = \frac{1}{m^2} \frac{m}{L} \frac{I_1(2mL)}{I_0(2mL)} = \frac{1}{mL} \frac{I_1(2mL)}{I_0(2mL)} \quad \text{Ec. 7.18}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	93/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Efectividad de una aleta

La efectividad de una la aleta se define como la razón de la transferencia de calor por convección de la aleta a la transferencia de calor entre la convección que existiría sin la aleta en la superficie primaria.

$$\varepsilon_{aleta} = \frac{q_{aleta}}{q_{sin\ aleta}} = \frac{q_{aleta}}{hA_b(T_b - T_{\infty})},$$

donde el área de la sección transversal de la aleta en la base es

$$A_b = tW \quad \text{Ec. 7.19}$$

Finalmente la efectividad de una aleta es

$$\varepsilon_{aleta} = \frac{q_{aleta}}{q_{sin\ aleta}} = \frac{hA_{aleta}(T_b - T_{\infty}) \eta_{aleta}}{hA_b(T_b - T_{\infty})} = \frac{A_{aleta}}{A_b} \eta_{aleta} \quad \text{Ec. 7.20}$$

Las conclusiones que se presentaron en la Práctica 6, relacionadas con los factores que aumentan la efectividad de las aletas, se aplican también a este tipo de aleta.

Cálculo experimental del coeficiente de convección

El cálculo de la eficiencia y de la efectividad de la aleta requiere conocer el coeficiente de convección. El coeficiente de convección se obtiene a partir del arreglo de aletas del equipo experimental empleado en la presente práctica, figura 7.3.



Figura 7.3. Arreglo de aleta de sección transversal variable y la placa base.

El arreglo de aletas se indica en la figura 7.4

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	94/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

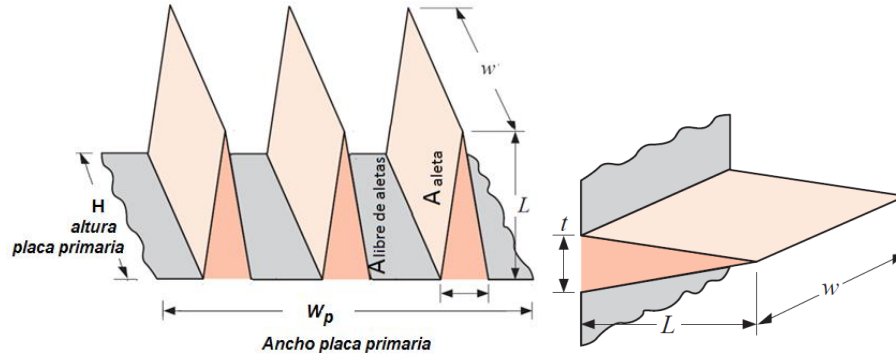


Figura 7.4. Arreglo de aletas triangulares. Adaptado de [1].

El modelo experimental está diseñado para asumir que la transferencia de calor del arreglo de aletas y base (q_{Total}) es igual al calor que disipa el calefactor, ubicado por debajo de la placa base, e igual a la potencia eléctrica suministrada ($\dot{W}_{calefactor}$).

$$q_{Total} = \dot{W}_{calefactor} \quad (\text{Ec. 7.21})$$

La transferencia total de calor por convección es la suma de la transferencia de calor por convección de la superficie primaria libre de aletas y de la superficie de las aletas, ver figura 7.4.

$$q_{total} = q_{\text{superficie libre de aletas}} + Nq_{\text{aleta}} = q_{\text{superficie libre de aletas}} + N(\eta_{\text{aleta}}q_{\text{aleta máx}})$$

$$q_{total} = hA_{\text{libre de aletas}}(T_b - T_{\infty}) + N\eta_{\text{aleta}}hA_{\text{aleta}}(T_b - T_{\infty}) \quad (\text{Ec. 7.22})$$

Donde h es el coeficiente de convección que se considera uniforme en todo el arreglo de aletas, N es el número de aletas del arreglo, A_{aleta} es el área superficial de una aleta y η_{aleta} es la eficiencia de una sola aleta definida en la Ec. 7.18.

$$A_{\text{libre de aleta}} = A_{\text{superficie primaria}} - NA_b \quad (\text{Ec. 7.23})$$

$$A_{\text{superficie primaria}} = W_p H \quad (\text{Ec. 7.24})$$

$$A_{\text{aleta}} = 2W_{\text{aleta}}(\sqrt{L^2 + (t/2)^2}) \quad (\text{Ec. 7.25})$$

Para obtener h se puede resolver la Ec. 7.22 de forma numérica o de forma iterativa. Un proceso iterativo inicia con la propuesta de un valor inicial de h , por ejemplo valores obtenidos de la Práctica 5, para calcular q_{Total} , y comparar el resultado con la potencia suministrada al calefactor

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	95/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$\dot{W}_{calefactor}$. Si no coinciden, se propone un nuevo valor de h hasta lograr la convergencia. El primer cálculo del proceso iterativo se presenta en la tabla 7.6.

4. Equipo y Material

1. Equipo de convección libre y forzada. Figura 7.5.
2. Arreglo de aletas triangulares.
3. Termopar.
4. Anemómetro de hilo caliente.
5. Cronómetro.



Figura 7.5. Aparato de convección libre y forzada con aletas triangulares.

5. Desarrollo

Se recomienda utilizar las mismas velocidades del fluido de la Práctica 6 para facilitar la comparación de resultados.

En la presente práctica se va a determinar experimentalmente que tipo de aleta se desempeña mejor para aumentar la transferencia de calor por convección, comparada con la placa plana utilizada en la práctica 5.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	96/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Preparación previa

Registrar la temperatura ambiente. Este dato se tomará del termómetro instalado en el laboratorio.

$$T_{\text{ambiente}}, T_{\text{amb}}, T_{\infty} = \text{_____} [^{\circ}\text{C}]$$

Las dimensiones del arreglo de aletas son: (a) Placa primaria: $H = 10$ cm, $W_p = 11$ cm. (b) Aleta: $L = 6.8$ cm, $w = 10$ cm, $t = 4.3$ mm, número de aletas $N = 9$. Las aletas son de aluminio.

Encienda el equipo **al inicio de la clase para contar con tiempo suficiente** para realizar un evento de convección libre (actividad 1) y como mínimo dos eventos para convección forzada (actividad 3).

1. Colocar el conjunto calefactor-aletas en la ranura del ducto rectangular y asegurar la placa con los broches de presión que se encuentran a los lados. Verificar que el arreglo de aletas ajuste en el ducto sin tocar las bordes.
2. Conectar el sensor de temperatura del arreglo de aletas y los cables de la alimentación eléctrica del ventilador y del calefactor al panel de control.
3. Verificar que la perilla del control de potencia eléctrica del calefactor y del control de velocidad del ventilador se encuentren ambas en apagado, figura 7.6.
4. Conectar la clavija de alimentación del equipo.
5. Encender el equipo.
6. Iniciar actividad 1.

Actividad 1. Convección libre.

1. Girar la perilla de control de potencia del calefactor, figura 7.6, hasta que la pantalla de potencia indique 95 W. Mantener la potencia hasta que la temperatura de la base, T_b , alcance 50°C , indicada en la pantalla de temperatura. El tiempo de espera aproximado en alcanzar dicha temperatura es de 5 minutos.

Posteriormente disminuir la potencia del calefactor a 29 W. Esperar a que la temperatura de la base deje de variar. El tiempo de estabilización es de 20 a 30 minutos. Posteriormente, tomar los datos del experimento.

No se recomienda que la temperatura de la placa exceda 50°C . Si lo hace, se extiende el tiempo de estabilización de temperatura, que afectará el tiempo para realizar las actividades.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	97/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

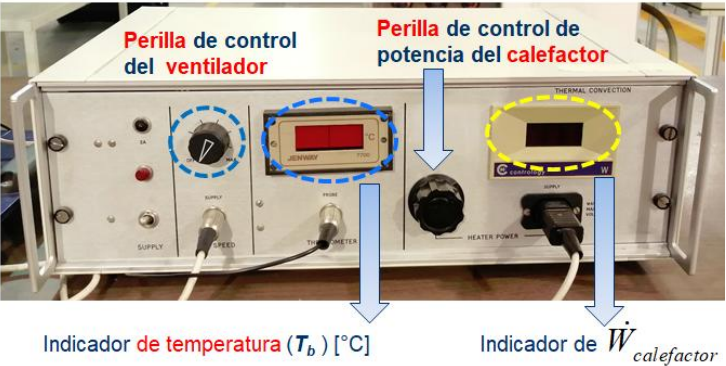


Figura 7.6. Panel de control

2. Llenar la columna 1 de la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Registro de datos experimentales.

Evento	1	2	3	Unidades
V_{∞}	≈ 0			[m/s]
T_b				[°C]
T_{∞}				[°C]
$\dot{W}_{calefactor}$				[W]
	C. Libre	C. Forzada		

Actividad 2 Medición de temperatura a lo largo de la aleta para convección libre.

1. Medir la temperatura de la aleta en 4 diferentes puntos que incluye a la base, el extremo de la aleta y tres puntos intermedios. Para los últimos, el termopar se introduce por los orificios que se encuentran al costado del canal del equipo de convección, como se muestra en la figura 7.7.

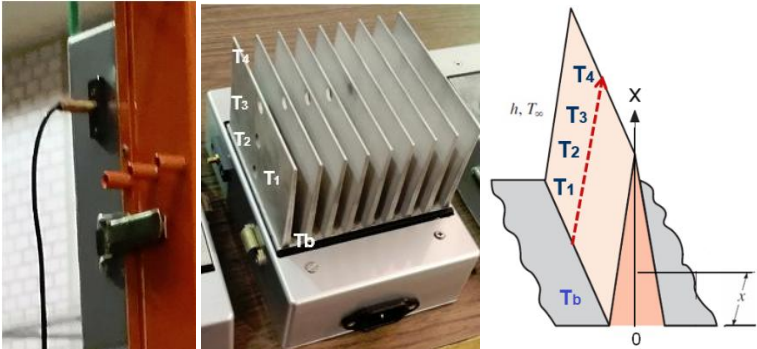


Figura 7.7. Medición de temperatura en la aleta.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	98/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Anotar los datos de temperatura en la tabla 7.2.

Tabla 7.2. Registro de temperatura a lo largo de la aleta central.

Distancia x [m]	0	0.010	0.036	0.060	0.067
Punto de medición	Tb	T1	T2	T3	T4
Temperatura [°C]					

Actividad 3 Convección forzada.

Las velocidades y potencias que se recomiendan en las siguientes actividades tienen el propósito de mantener la misma temperatura de la superficie y hacer más fácil la comparación de las diferentes aletas.

- Encender el ventilador y girar la perilla de control hasta la cuarta línea después de off. En esta posición la velocidad es de aproximadamente de 0.9 m/s , figura 7.8. **Se recomienda incrementar lentamente la velocidad para no dañar el ventilador.**



Figura 7.8. Control de la velocidad del ventilador.

- Medir la velocidad con el anemómetro y posteriormente retirarlo del ducto.
- Aumentar la potencia del calefactor a 56 W. Esperar a que la temperatura de la base se estabilice, el tiempo aproximado es de 30 minutos.
- Llenar la columna 2 de la tabla 7.1.
- Repita el procedimiento desde el punto 1, pero ahora con 61 W y la perilla del ventilador en la sexta línea. Con estos parámetros la velocidad del flujo al interior del canal es de 1.8 m/s .
- Llenar la columna 3 de la tabla 7.1.

El propósito de estas velocidades y potencias es realizar una comparación entre los diferentes tipos de aletas y la mejora que se genera en cuanto a la eficiencia, la efectividad y la variación del coeficiente convectivo para cada una de las configuraciones.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	99/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. Resultados

- Investigar la conductividad térmica del material de las aletas.

$$k_{aleta} = \text{_____} [\text{W/m K}]$$

- Calcular las áreas de las superficies de las aletas con los datos suministrados. Anotar los resultados en la tabla 7.4.

Tabla 7.4. Registro de áreas.

Área	[m ²]
A_b	
A_{aleta}	
$A_{superficie\ primaria}$	
$A_{libre\ de\ aletas}$	
$A_{total\ de\ aletas}$	

- Calcular la relación p/A_b que muestra que tan delgada es la aleta. Recordar que p es el perímetro de la aleta en la base. Llenar la tabla 7.5 con los datos de la Práctica 6, columna 2, para realizar la comparación con la Práctica 7, columna 3.

Tabla 7.5. Parámetros de la aleta.

Práctica	P6	P7
p/A_b [1/m]		
$A_{total\ de\ aletas}$ [m ²]		

- Calcular el coeficiente convectivo experimental. Presentar el cálculo inicial del proceso iterativo en la tabla 7.6. a criterio del profesor.

Tabla 7.6. Cálculo inicial.

Parámetro	Convección libre Evento 1	Convección forzada Evento 2	Convección forzada Evento 3	Unidades
$\dot{W}_{calefactor}$				[W]
h				[W/m ² K]
m				
$x = (2\text{mL})$				
$I_0(x)$				
$I_1(x)$				
η_{aleta}				%
q_{total}				[W]
ε_{aleta}				

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	100/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Efectuar el proceso iterativo modificando h hasta lograr que $q_{total} \approx \dot{W}_{calefactor}$ y presentar los resultados finales en la tabla 7.7.

Tabla 7.7. Cálculo final.

	Evento	q_{total} [W]	T_b [°C]	h [W/m²k]	η_{aleta}	ε_{aleta}
Convección libre	1					
Convección forzada	2					
	3					

6. Comparar los valores de la eficiencia y efectividad obtenidos en esta Práctica con los valores de referencia reportados en la literatura y presentarlos en la tabla 7.8.

Tabla 7.8. Desempeño térmico de la aleta.

Parámetro de desempeño de la aleta	Calculado C. Libre Evento 1	Calculado C. Forzada Evento 2	Calculado C. Forzada Evento 3	Valor Referencia
Eficiencia				
Efectividad				

7. Comparar los valores de la eficiencia y efectividad obtenidos en la Práctica 6 con los obtenidos en la presente Práctica, en el entendido que se utilizó la misma velocidad en eventos correspondientes y potencias recomendadas. Llenar la tabla 7.9.

Tabla 7.9. Desempeño térmico de la aleta.

Práctica	Convección libre Evento 1		Convección forzada Evento 2		Convección forzada Evento 3	
	P6	P7	P6	P7	P6	P7
Eficiencia						
Efectividad						

8. Comparación de la transferencia de calor de la práctica 5, 6 y 7. Llenar tabla 7.10 con los datos experimentales, en el entendido que se utilizó la misma velocidad recomendada en eventos correspondientes.

Tabla 7.10. Convección libre y forzada.

Práctica	Convección libre. Evento 1			Convección forzada. Evento 2			Unidades
	P5	P6	P7	P5	P6	P7	
Ts o Tb							[°C]
q_{total}							[W]
V_{∞}	≈ 0	≈ 0	≈ 0				[m/s]

9. Graficar la distribución de temperatura experimental.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	101/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

10. Graficar la distribución de temperatura analítica dada por la Ec. 7.16 con los parámetros de la aleta para convección libre.

7. Cuestionario

En base a los resultados obtenidos argumente su respuesta.

1. ¿El agregar aletas a la superficie primaria aumento la transferencia de calor? Revise los resultados y argumente.
2. ¿En qué tipo de convección se tiene la mayor efectividad de las aletas de esta práctica? Argumente.
3. Para esta Práctica, describa la tendencia de la efectividad con los eventos ¿Por qué se observa esta tendencia?
4. Comparando con los resultados de la Práctica 5 ¿Se justifica el uso de este tipo de aletas de esta práctica para disipar calor? Argumente.
5. De las aletas analizadas en la Práctica 6 y en la Práctica 7 ¿Qué tipo de aleta transfiere más calor considerando la temperatura de la superficie constante?

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. 6th edition. 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. Jiji, L. M. (2009). Heat Conduction. 3rd Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
4. Kakac, S, Yener, Y, Naveira-Cotta, C. P. (2018). Heat Conduction. 5th edition. USA: CRC Press.
5. Armfiel LTD. (1995). Instruction Manual, Free and forced convection. Heat transfer apparatus HT 6. Issue 9. England: Armfield Limited.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	102/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

10. Anexos

El cálculo de las funciones de Bessel modificadas de primera clase, orden cero y uno, se pueden calcular con las funciones incorporadas de Excel:

=BESSELI(x,0)

=BESSELI(x,1)

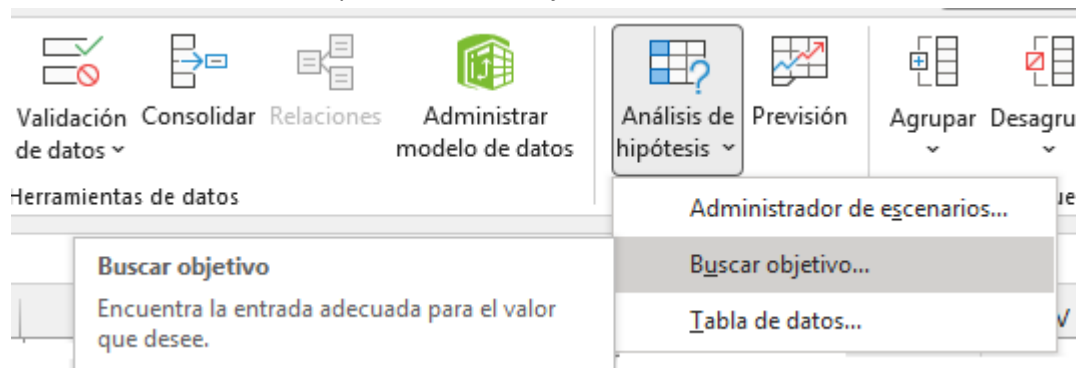
También se puede utilizar la siguiente tabla (cubre los valores de las funciones para coeficientes de convección de 1 a 50 [W/m²k]).

Valores de las funciones de Bessel modificadas de primera y segunda especie, órdenes de cero y uno								
x	I ₀ (x)	I ₁ (x)	x	I ₀ (x)	I ₁ (x)	x	I ₀ (x)	I ₁ (x)
0.00	1.0000	0.0000	0.52	1.0688	0.2689	1.04	1.2892	0.5935
0.02	1.0001	0.0100	0.54	1.0742	0.2800	1.06	1.3013	0.6080
0.04	1.0004	0.0200	0.56	1.0800	0.2911	1.08	1.3136	0.6227
0.06	1.0009	0.0300	0.58	1.0859	0.3024	1.10	1.3262	0.6375
0.08	1.0016	0.0400	0.60	1.0920	0.3137	1.12	1.3391	0.6525
0.10	1.0025	0.0501	0.62	1.0984	0.3251	1.14	1.3523	0.6677
0.12	1.0036	0.0601	0.64	1.1051	0.3367	1.16	1.3658	0.6832
0.14	1.0049	0.0702	0.66	1.1119	0.3483	1.18	1.3796	0.6988
0.16	1.0064	0.0803	0.68	1.1190	0.3600	1.20	1.3937	0.7147
0.18	1.0081	0.0904	0.70	1.1263	0.3719	1.22	1.4082	0.7308
0.20	1.0100	0.1005	0.72	1.1339	0.3838	1.24	1.4230	0.7470
0.22	1.0121	0.1107	0.74	1.1417	0.3959	1.26	1.4381	0.7636
0.24	1.0145	0.1209	0.76	1.1497	0.4081	1.28	1.4535	0.7803
0.26	1.0170	0.1311	0.78	1.1580	0.4204	1.30	1.4693	0.7973
0.28	1.0197	0.1414	0.80	1.1665	0.4329	1.32	1.4854	0.8146
0.30	1.0226	0.1517	0.82	1.1753	0.4454	1.34	1.5019	0.8321
0.32	1.0258	0.1621	0.84	1.1843	0.4581	1.36	1.5187	0.8498
0.34	1.0291	0.1725	0.86	1.1936	0.4710	1.38	1.5359	0.8678
0.36	1.0327	0.1829	0.88	1.2032	0.4840	1.40	1.5534	0.8861
0.38	1.0364	0.1935	0.90	1.2130	0.4971	1.42	1.5713	0.9046
0.40	1.0404	0.2040	0.92	1.2231	0.5104	1.44	1.5896	0.9235
0.42	1.0446	0.2147	0.94	1.2334	0.5239	1.46	1.6082	0.9426
0.44	1.0490	0.2254	0.96	1.2440	0.5375	1.48	1.6273	0.9620
0.46	1.0536	0.2361	0.98	1.2549	0.5512	1.50	1.6467	0.9817
0.48	1.0584	0.2470	1.00	1.2661	0.5652	1.52	1.6666	1.0017
0.50	1.0635	0.2579	1.02	1.2775	0.5793	1.54	1.6868	1.0220

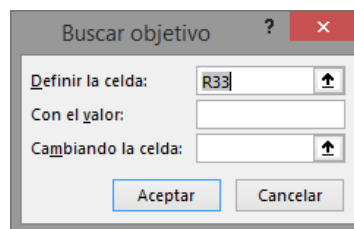
	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	103/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

El proceso iterativo puede realizarse con la función <Buscar objetivo> de Excel.

1. Menú: Datos /Análisis de hipótesis/Buscar objetivo...

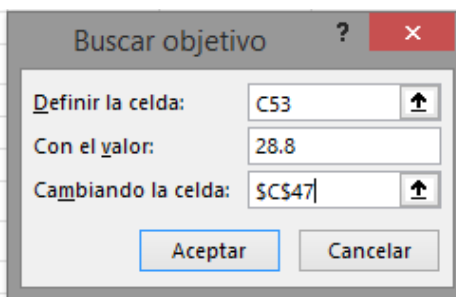


2. Al seleccionar < Buscar objetivo > aparece la ventana emergente:



3. Ejemplo:

Buscar Objetivo		
$W_{\text{calefactor}}$	28.80	Con el <u>valor</u>
$h =$	7.28	Para <u>cambiar la celda</u>
$m =$	3.78	
$x =$	0.51	
$I_0(x) =$	1.0672	
$I_1(x) =$	0.2657	
$\eta_{\text{aleta}} =$	0.9683	
$Q_{\text{tot}} =$	28.80	Definir la celda (Fórmula)
ϵ_{aleta}	30.64	



	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	104/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 8

Ley del inverso del cuadrado

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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	105/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro	Riesgo asociado
1	Fuente de radiación infrarroja	Evitar el contacto físico con la placa de la fuente ya que puede provocar quemaduras al alumno. Posibles quemaduras si no se guarda distancia entre la placa de la fuente y el alumno.
2	Placa de vidrio	Manipular con precaución para evitar heridas.

2. Objetivos de aprendizaje

- ✓ Observar el fenómeno de propagación direccional de la radiación térmica.
- ✓ Encontrar la relación con la distancia y el ángulo de emisión de la radiación que incide en el radiómetro.

3. Conceptos básicos y definiciones

La transferencia de calor por radiación térmica ocurre cuando dos cuerpos a distinta temperatura están separados por el vacío. De este modo, la radiación emitida por un cuerpo, debido a su temperatura, es transmitida en el espacio o el vacío mediante ondas electromagnéticas de Maxwell o en forma de fotones discretos de Planck, y ambos conceptos están aún vigentes. Esta transferencia de energía radiante se transmite a la velocidad de la luz en el vacío y no es atenuada en su desplazamiento a través de dicho medio.

Para el estudio experimental de la transferencia de calor por radiación, se utilizan principalmente los radiómetros, que se definen como aquellos aparatos que obtienen una señal de salida (principalmente eléctrica, aunque también puede ser visual, o temperatura) a partir de energía térmica incidente en el sensor del aparato.

Los detectores térmicos se basan principalmente en la termometría de contacto, medido con un termopar o un termistor. Para ello, la radiación que entra a la apertura del radiómetro se concentra (con lentes y espejos) en la punta del termómetro. La curva de calibración se resume a un análisis de transferencia de calor por conducción, convección (cuando no hay vacío) y radiación. Los radiómetros que miden la energía térmica de radiación para longitudes de onda larga necesitan temperaturas bajas en las paredes del sensor, para ello, se refrigeran criogénicamente las paredes.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	106/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Los detectores ópticos son aquellos instrumentos que comparan la intensidad monocromática del objeto a medir con una fuente calibrada. Se usa cuando se quieren medir temperaturas superiores a los 800 K.

Para el desarrollo de las prácticas de radiación, se utiliza un radiómetro de termopila (detector térmico). Estos radiómetros utilizan el efecto termoeléctrico, es decir, transformar una diferencia de temperatura a un voltaje.

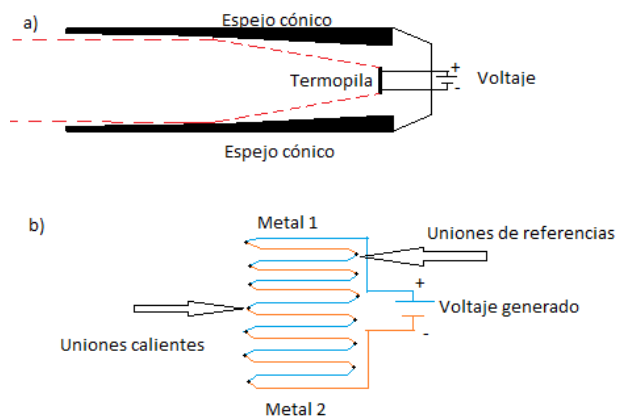


Figura 8.1 a) Esquema de un radiómetro de termopila, b) Diseño común de una termopila.

4. Equipo y Material

- Fuente de radiación infrarroja.
- Radiómetro.
- Cámara termográfica.
- Cronómetro.
- Placa de vidrio.

5. Desarrollo

ACTIVIDAD I. LEY DEL INVERSO DEL CUADRADO DE LA DISTANCIA.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	107/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

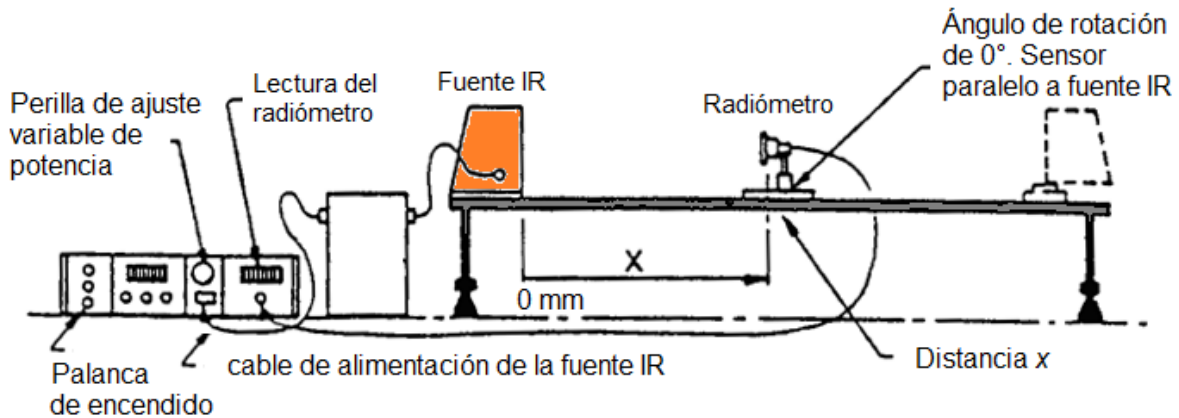


Figura 8.2 Equipo completo para realizar la práctica

- 1 Conecte la clavija de la alimentación general del equipo de radiación térmica.
- 2 Conecte la fuente de radiación infrarroja al panel de control del equipo.
- 3 Encienda el panel de control del equipo.
- 4 Gire la perilla de ajuste variable de potencia desde la división 4 y 6. (**“NO USAR 7 Y 8 PARA CUIDADO DE LA FUENTE DE RADIACION”**)
- 5 Esperar 15 minutos después de fijar una potencia específica de la perilla.
- 6 Para cada potencia registre la temperatura de la placa de la fuente de radiación infrarroja con la cámara termográfica, enfocándola al centro de la placa manteniendo la misma distancia entre la fuente y la cámara.
- 7 Coloque el radiómetro en el riel de desplazamiento alejándolo de la fuente de radiación infrarroja y sin retirar aún la cubierta de protección.
- 8 Fije el radiómetro de tal forma que el plano del sensor sea paralelo a la placa de la fuente de radiación infrarroja; ya que la perpendicular del sensor debe coincidir con la dirección de emisión de la fuente de radiación infrarroja.
- 9 Retire la cubierta de protección del radiómetro y acérquelo hasta que efectúe la medición del flujo de radiación térmica.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	108/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 10 Desplace el radiómetro en incrementos fijos desde la distancia mínima de 100 mm hasta la distancia máxima de 900 mm; realice lo anterior para cada valor de perilla de potencia seleccionado. Anote la lectura de flujo de radiación térmica para cada desplazamiento del radiómetro.
- 11 Las tres primeras lecturas se deben registrar con un tiempo de 60 segundos y las restantes con un tiempo de 30 segundos.

Actividad II. DIRECCIÓN DE EMISIÓN O DE VISIÓN. MODIFICACIÓN DEL ÁNGULO SÓLIDO.

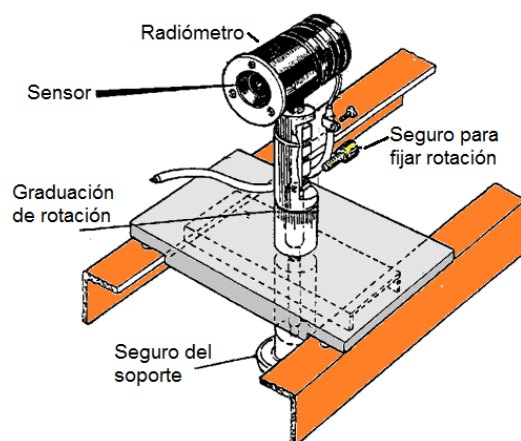


Figura 8.3. Radiómetro y accesorios.

- 1 Mantenga la perilla de ajuste variable de potencia en la división 6.
- 2 Retire la protección del radiómetro y acérquelo a 200 mm de distancia de la fuente de radiación infrarroja. A continuación, asegure el radiómetro con la perilla correspondiente.

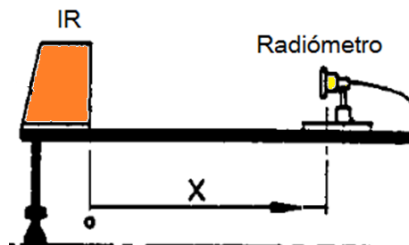


Figura 8.4. Radiómetro

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	109/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

3 Gire la base del radiómetro desde su valor mínimo de 0° hasta su valor máximo de 90°.

Actividad III. Cámara termográfica.

1. En el último valor de potencia de la perilla y a una distancia de 200 mm del radiómetro; colocar la placa de vidrio en un punto medio entre la fuente de radiación infrarroja y el radiómetro. Observar que ocurre con el valor del flujo de radiación térmica antes y después.
2. Direccione la cámara termográfica al vidrio de las ventanas del salón.
3. Apunte sus observaciones.

6. Resultados

Tabla de la actividad 1

Referencia de potencia =			
r[m]	R[W/m ²]	LN (r)	LN (R)
0.1			
0.2			
0.3			
0.4			
0.5			
0.6			
0.7			
0.8			
0.9			
m mínimos	% Error mínimos		

En clase se tomará datos para 1 o 2 potencias diferentes. El resto de los datos serán dados por el profesor.

Realizar las gráficas de R [W/ m²] vs r [m].

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	110/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla actividad 2

α [°]	R [W/m ²]
0	
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	

Realizar la gráfica R [W /m²] vs α [°]



Figura 8.5. El radiómetro y la fuente de radiación térmica.

7. Cuestionario

Contestar tomando en cuenta, los resultados obtenidos y su análisis.

1. Describa que ocurre al variar la distancia entre el radiómetro y la fuente de radiación infrarroja ¿Por qué sucede? Argumente.
2. ¿Qué tipo de lugar geométrico (gráfica) describe el flujo de radiación térmica con la distancia? Justifique su respuesta.
3. Analice las pendientes de las curvas obtenidas. Explique los resultados obtenidos.
4. Qué relación observa entre los valores del flujo de radiación con la potencia seleccionada en la perilla. Justifique su respuesta.
5. Qué relación observa entre los valores del flujo de radiación con la potencia seleccionada en la perilla y la temperatura de la placa de la fuente de radiación infrarroja. Justifique su respuesta.
6. ¿Por qué los valores del flujo de radiación cambian al colocar la placa de vidrio? Justifique su respuesta.
7. Describa que ocurre al variar el ángulo de la base del radiómetro.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	111/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

8. ¿Qué relación se presenta entre la lectura del radiómetro y el ángulo de rotación del radiómetro? Justifique su respuesta.

9. ¿Por qué el valor mínimo de la lectura del radiómetro no se presenta a 90° ? Justifique su respuesta.

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Fuentes que necesitan los alumnos:

- Cengel, Yunus A. y Ghajar, Afshin J. (2011). Transferencia de calor y masa. 4ª Ed. México: McGraw-Hill.
- Incropera, Frank P. y DeWitt, David P. (1999). Fundamentos de transferencia de Calor. 4ª. Ed. México: Prentice Hall Hispanoamericana.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	112/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 9

Ley de Stefan-Boltzmann

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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	113/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro	Riesgo asociado
1	Fuente de radiación infrarroja	Guardar distancia y evitar el contacto físico y con la placa de la fuente ya que puede provocar quemaduras.

2. Objetivos

- ✓ Comprender el concepto de radiación de un cuerpo negro
- ✓ Demostrar que la radiación térmica que emite un cuerpo negro varía con la potencia de la fuente de radiación.

3. Conceptos básicos y definiciones

La figura 8.1 muestra el espectro electromagnético de esta radiación térmica que, como puede verse, está comprendida en el espectro del infrarrojo hasta el ultravioleta. De todo el espectro electromagnético, es la radiación térmica la que genera incrementos apreciables de temperatura debido a que no tiene mucho poder de penetración en comparación de los otros tipos de radiación que son más energéticos.

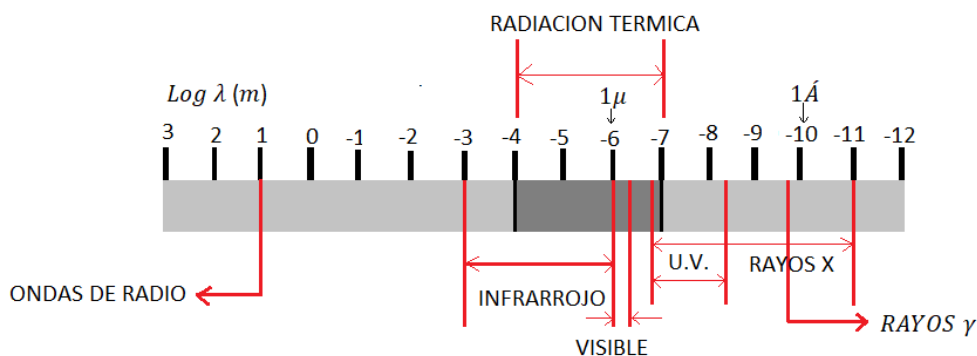


Figura 9.1 Espectro electromagnético

Existe una cantidad máxima de energía radiante, dentro la radiación térmica, que un cuerpo puede emitir a una temperatura absoluta T dada y a una longitud de onda λ . El emisor de esta energía recibe el nombre de cuerpo negro y la energía radiante está representada por la intensidad de radiación

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	114/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

espectral de un cuerpo negro $I_{\lambda b}(T)$, que es independiente de la dirección, pero función de la longitud de onda λ y de la temperatura absoluta T . Ésta se obtiene mediante la ley de Planck:

$$I_{\lambda b}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]}$$

Donde $h = 6.6256 \times 10^{-34}$ [J s] y $k = 1.38054 \times 10^{-23}$ [J/K] son respectivamente las constantes de Planck y de Boltzmann y c es la velocidad de la luz en el vacío.

Por otro lado, el flujo emisivo espectral de un cuerpo negro se obtiene de la integración de $I_{\lambda b}(T)$ sobre una superficie mediante

$$q_{\lambda b}(T) = I_{\lambda b}(T) \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi = \pi I_{\lambda b}(T) \quad \text{Ec. 9.2}$$

Obteniendo entonces que:

$$q_{\lambda b}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \quad \text{Ec. 9.3}$$

La figura 8.2 representa la distribución de energía espectral para un cuerpo negro, dada por la ecuación anterior. En ella puede notarse que, a cualquier longitud de onda dada, la energía radiante emitida por un cuerpo negro aumenta al aumentar la temperatura. Se puede observar también que el pico de cada curva se desplaza hacia menor longitud de onda cuando la temperatura aumenta.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	115/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

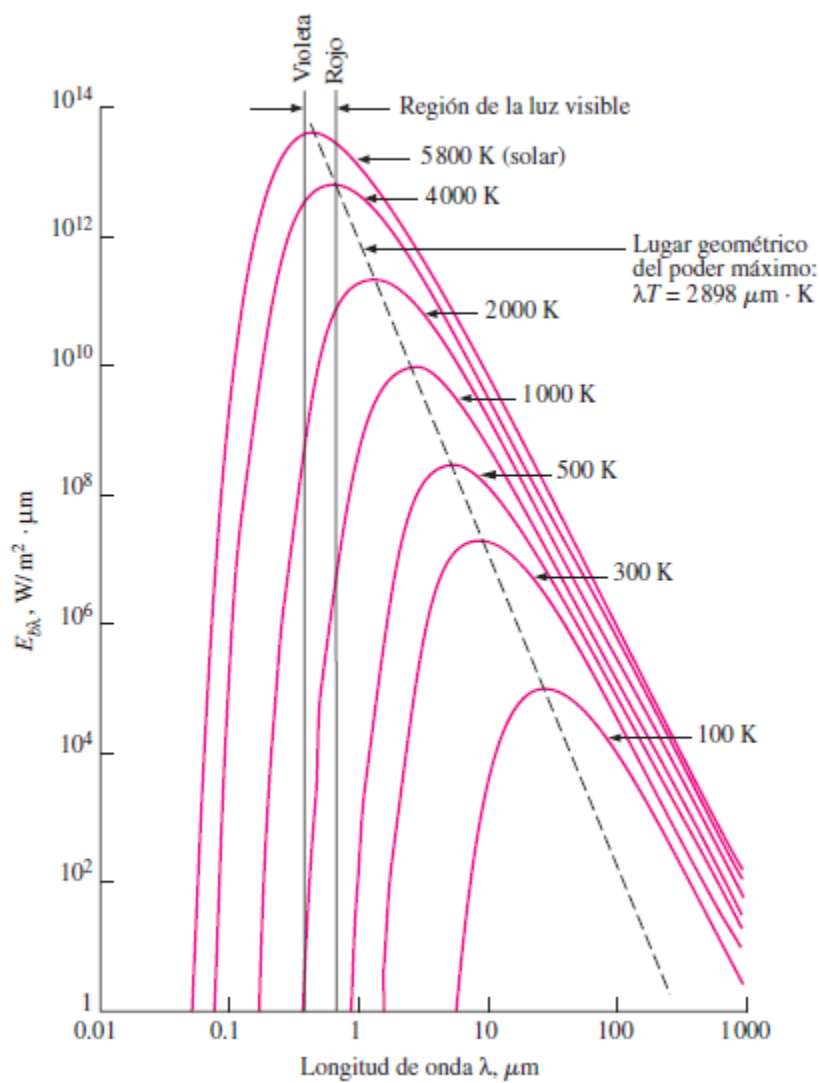


Figura 9.2 Distribución de energía espectral de un cuerpo negro en función de la longitud de onda a diferentes temperaturas [1]

Al integrar la anterior ecuación sobre todas las longitudes de onda, se obtiene el flujo emisor de un cuerpo negro $q_b(T)$ a una temperatura T determinada:

$$q_b(T) = \int_{\lambda=0}^{\infty} q_{\lambda b}(T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4 T^4}{15c^2 h^3} \quad \text{Ec. 9.4}$$

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	116/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Es decir:

Ec. 9.5

$$q_b = \sigma T^4$$

Esta ecuación representa la ley de Stefan-Boltzmann, y establece que la energía radiada por un cuerpo negro, por unidad de tiempo y por unidad de superficie, es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, siendo σ ($=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) la constante de Stefan Boltzmann.

Por otro lado, si este cuerpo negro está emitiendo energía radiante a una temperatura T_1 dentro de un recinto o entorno frío que también emite energía radiante a una temperatura T_2 , el

intercambio de energía radiante neta en el cuerpo negro (energía que emite menos energía que absorbe de su entorno) será:

$$q_b = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

Ec. 9.6

De este modo, si suponemos que una placa metálica pintada de negro se comporta como un cuerpo negro y se encuentra a una temperatura T_1 , su energía radiada q_b que intercambia con el entorno a T_2 , está dada por la ecuación anterior, pero la energía radiada medida por un radiómetro R será diferente a la emitida por ese cuerpo negro porque varía de acuerdo a la ley del cuadrado inverso respecto a la distancia entre ambos. Tendremos entonces una relación α entre la energía radiante emitida por el cuerpo negro q_b y la medida por el radiómetro R , dada por:

$$\alpha_b = \frac{q_b}{R_b}$$

Ec. 9.7

La práctica consiste en demostrar la ley de Stefan-Boltzman para una superficie negra. Esto se logra si se obtiene el mismo valor de α_b para la placa metálica negra, independientemente de R y de T para una distancia determinada entre la placa y el radiómetro.

4. Equipo y Material

- Equipo de radiación térmica
- Radiómetro
- Placa negra

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	117/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5. Desarrollo

1. Montar el equipo de radiación térmica y conectarlo a la línea de corriente
2. Colocar la placa negra a 5 cm de distancia respecto a la fuente de calor,
3. Colocar el radiómetro a 11 cm de distancia respecto a la misma fuente de calor o 6 cm respecto a la placa negra
4. Encender el equipo y colocar la perilla de la potencia eléctrica del calefactor en la 5ta posición.
5. Esperar 10 minutos aproximadamente para que la temperatura se estabilice
6. Medir temperatura de la placa y del ambiente
7. Repetir el experimento para potencias caloríficas medias y altas, posición 6 y 7.
8. Apagar y desconectar con precaución
9. Retirar placa con precaución para no quemarse.

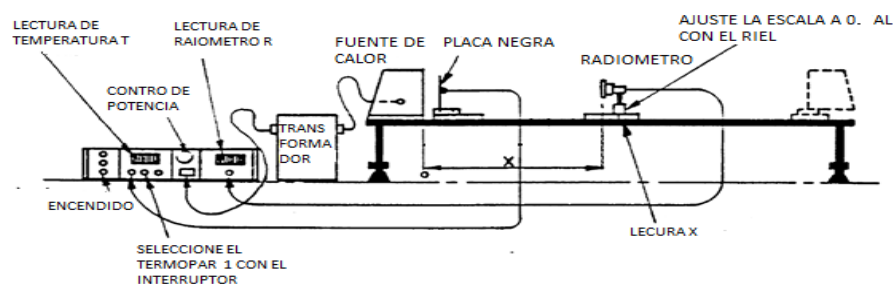


Figura 9.3. Equipo de radiación térmica

6. Resultados

Obtener los datos y cálculos que se indican, interpretar resultados y comentar.

Radiómetro a 11 cm de distancia

Lecturas para					Cálculos	
Temperatura de superficie T_s (°C)	Temperatura ambiente T_a (°C)	Radiómetro R (W/m ²)	Temperatura superficie T_s (K)	Temperatura ambiente T_a (K)	Calor radiación q_b (W/m ²)	coeficiente Z

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	118/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

7. Cuestionario

Contestar tomando en cuenta, los resultados obtenidos y su análisis.

1. ¿Cómo cambia la lectura del radiómetro respecto a la energía emitida por la placa negra y por qué?
2. ¿Cómo se interpreta el valor de Z ?

8. Conclusiones

9. Bibliografía

1. Necati Ozisik M., Transferencia de calor. Mc Graw Hill Latinoamérica. 1999..
2. Kreith, F., Radiation Heat Transfer. International Textbook Co. 1980.
3. Yunus A Cengel, *Transferencia de calor y masas*, 3° edición ,2007,P 666.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	119/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 10

Emisividad

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 Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	120/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro	Riesgo asociado
1	Fuente de radiación infrarroja	Guardar distancia y evitar el contacto físico con la placa de la fuente ya que puede provocar quemaduras al alumno.

2. Objetivos

- ✓ Entender el concepto de emisividad y determinarla para diferentes superficies.
- ✓ Obtener la relación de intensidad entre la radiación emitida por la fuente y la captada por el radiómetro de cada una de las superficies empleadas

3. Conceptos básicos y definiciones

Asociamos la radiación térmica a la materia como resultado de su temperatura, y está regida por la ecuación de Stefan Boltzmann cuando se trata de un cuerpo negro, y es el máximo de energía que puede emitir o absorber un cuerpo.

En superficies distintas a la negra, la radiación térmica incidente sobre una superficie, como la mostrada en la figura 9.1, puede ser absorbida, reflejada o transmitida. Si ρ , α y τ son las fracciones de radiación incidente que se refleja (reflectividad), absorbe (absortividad) y transmite (transmitividad), respectivamente, entonces:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad \text{Ec. 10.1}$$

El fenómeno de reflexión depende de la radiación incidente, de la longitud de onda, de la dirección, características del material (rugoso o liso, pulido u oxidado, etc.), de la temperatura, etc. Existen dos tipos de reflexión, la especular y la difusa. En la reflexión especular, el ángulo de reflexión es idéntico al de incidencia. La mayoría de los cuerpos no refleja en forma especular sino en todas direcciones, ésta es la radiación difusa, donde la dirección en la que se refleja la radiación es independiente del ángulo de incidencia. Un ejemplo de reflexión es un espejo perfecto donde $\rho=1$ porque refleja toda la energía.

El fenómeno de absorción ocurre en la mayoría de cuerpos. En un cuerpo negro $\alpha=1$ porque absorbe la máxima cantidad de radiación térmica, es decir, no refleja ni transmite radiación térmica y es utilizado como referencia en cualquier otro material.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	121/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Finalmente, la transmitividad es común en la mayoría de vidrios. En un vidrio totalmente transparente $\tau=1$ porque deja pasar toda la radiación térmica a través de él. En la mayoría de sólidos, la y transmitividad es cero, y por ello se les llama opacos, de modo que la ecuación anterior se transforma en $\rho + \alpha=1$.

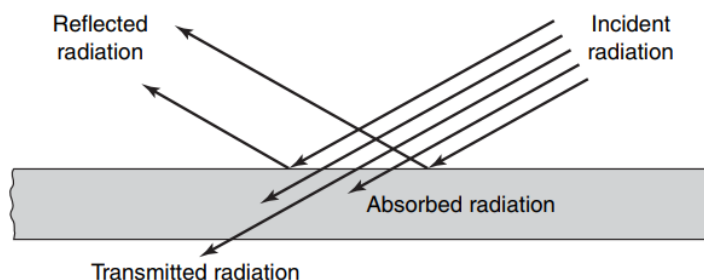


Fig. 10.1. Destino de radiación incidente en una superficie [1]

Finalmente, emisividad ϵ se define como la relación entre la potencia emisiva total de una superficie y la potencia emisiva total de una superficie negra a la misma temperatura, es decir:

$$\epsilon = \frac{q}{q_b} = \frac{q}{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}$$

Ec. 10.2

Siendo T_1 la temperatura de una superficie negra y T_2 la temperatura de sus alrededores, q la potencia emisiva total y q_b la potencia emisiva total de un cuerpo negro, de modo que:

$$q = \epsilon q_b = \epsilon \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

Ec.10.3

Si tenemos un dispositivo experimental donde sea posible medir la radiación térmica de cualquier material, R , mediante un radiómetro colocado a cualquier distancia, q es posible obtenerlo mediante

$$q = \alpha_b R$$

Ec. 10.4

Siendo α_b la relación entre la la energía radiante emitida por el cuerpo negro q_b y la medida por el radiómetro en el mismo cuerpo negro. Esta relación es la misma para cualquier cuerpo no negro colocado a la misma distancia del radiómetro.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	122/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

4. Equipo y Material

- Equipo de radiación térmica
- Radiómetro
- Placa negra con sensor de temperatura
- Placa pulida con sensor de temperatura
- Placa opaca anodizada de plata con sensor de temperatura

5. Desarrollo

- 1 Colocar el radiómetro como se muestra en la imagen 10.3.
- 2 Colocar la placa negra a 10 cm de distancia de la fuente de calor y el radiómetro (con todo y tapa protectora) a 5 cm de la placa.
- 3 Conectar la placa y el radiómetro al panel de control.
- 4 Encender el equipo, girar el potenciómetro hasta la posición 7.
- 5 Volver a cubrir el radiómetro y modificar la potencia hasta la posición 6.
- 6 Esperar 15 minutos y volver a medir.
- 7 Repetir desde el punto 2 con la placa pulida.
- 8 Apagar y desconectar con precaución de no quemarse con las placas o la fuente de calor.

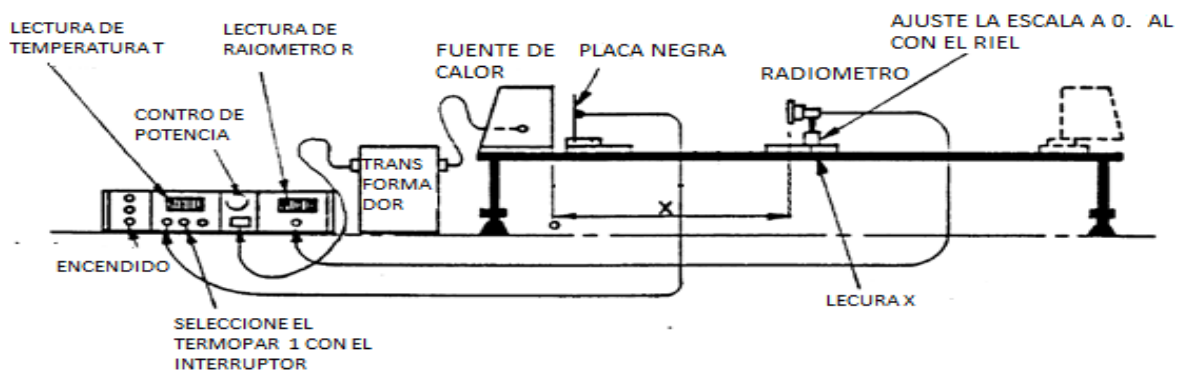


Figura 10.2 Arreglo experimental.

6. Resultados

La emisividad ϵ , se define como la relación de la energía total emitida por la superficie, a la total emitida por un cuerpo negro, a la misma temperatura.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	123/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

El flujo de calor de radiación esta dado por:

$$q = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) [W/m^2]$$

$$\dot{Q}_{emit,max} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 [W]$$

$$0 \leq \varepsilon \leq 1$$

Actividad 1 Placa Negra

Obtener la relación α promedio y el calor máximo emitido.

Lecturas					Cálculos	
Temperatura ambiente T_a	Temperatura de la fuente T_s	Radiómetro R	Temperatura ambiente T_a	Temperatura de la fuente T_s	Calor radiación q	Relación $Z = q/R$
°C	°C	W/m ²	K	K	W/m ²	

Actividad 2. Placa pulida

Obtener la relación ε promedio y el calor máximo emitido.

Lecturas					Cálculos		
Temp ambiente T_a	Temp de la fuente T_s	Radiómetro R	Temp ambiente T_a	Temp de la fuente T_s	Calor de radiación q_1	Calor radiación $q_2 = \alpha_{prom} R$	emisividad $\varepsilon = q_2/q_1$
°C	°C	W/m ²	K	K	W/m ²		

Actividad 3. Placa opaca

Obtener la relación ε promedio y el calor máximo emitido.

	Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor	Código:	MADO-58
		Versión:	06
		Página	124/124
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	17 de agosto de 2026
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Lecturas					Cálculos		
Temp ambiente T_a	Temp de la fuente T_s	Radiómetro R	Temp ambiente T_a	Temp de la fuente T_s	Calor de radiación q_1	Calor radiación $q_2 = \alpha_{prom} R$	emisividad $\varepsilon = q_2 / q_1$
°C	°C	W/m ²	K	K	W/m ²		

7. Cuestionario

Contestar tomando en cuenta, los resultados obtenidos y su análisis.

1. ¿Cuáles son los cambios de emisividad que observa con respecto a la temperatura y por qué?
2. ¿Cómo afecta a la emisividad a cada placa?
3. ¿El valor de emisividad es el esperado en cada placa? Explique
4. ¿Cómo cambia la emisividad respecto a la potencia calorífica suministrada?
5. ¿Cómo varía el coeficiente α_b y por qué?
6. ¿Por qué la placa de metal pulida tiene una temperatura más baja que la placa opaca (bajo las mismas condiciones) si tiene una emisividad más baja?, es decir, está disipando menos energía ¿Debería de tener más temperatura porque pierde menos energía por radiación? (vale por 3 preguntas)

8. Conclusiones

9. Bibliografía

Incropera Frank P., DeWitt David P., 1999, Fundamentos de Transferencia de Calor, 4ª ed., PrenticeHall, México, 912 pg.