

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	1/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Elaborado por:	Revisado por:	Autorizado por:	Vigente desde:
Dr. Rafael Chávez Martínez M.I. Oscar García Aranda M.I. 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	<b>10 de febrero de 2025</b>

# Manual de prácticas del laboratorio de Transferencia de Calor

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	2/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## Índice de prácticas

Práctica 1. Temperatura.....	3
Práctica 2. Conductividad y resistencia térmica.....	22
Practica 3. Conducción longitudinal con cambio de material y con cambio de área transversal....	38
Práctica 4 Conducción radial.....	48
Práctica 5. Convección de calor en una placa vertical.....	55
Práctica 6. Transferencia de calor en aletas con área constante.....	69
Práctica 7. Transferencia de calor en aletas con área variable.....	81
Práctica 8. Ley del inverso del cuadrado.....	87
Práctica 9. Ley de Stefan-Boltzmann.....	95
Práctica 10. Emisividad.....	102

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	3/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

# Práctica 1

## 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	4/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad en la ejecución

<b>Fuente de riesgo.</b>	<b>Riesgo asociado.</b>
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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	5/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

El 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, está 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	6/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

5.- 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.

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	7/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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.

#### *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  $0\text{ K}$ .

#### *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  $0.01\text{ K}$  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 cierto del alcance, en unidades de la variable medida, etc. [5].

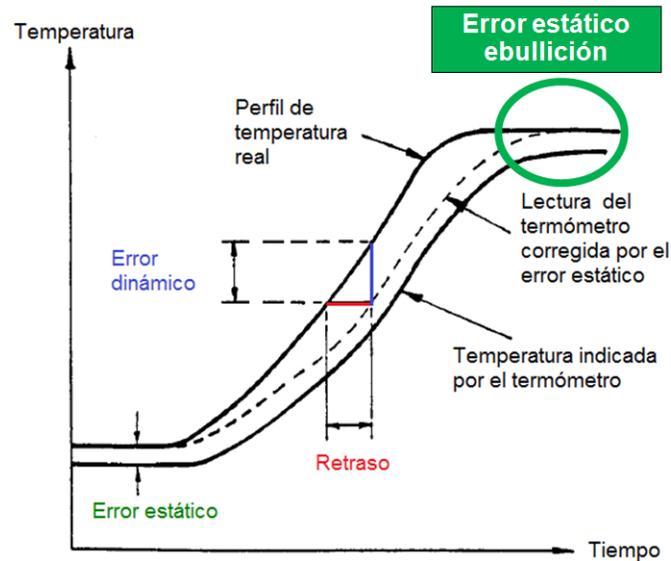
	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	8/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	9/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura\_1.1. Grafica 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 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  $270 - 70 = 200^\circ$  en 0,1 minutos; este tiempo será la constante de tiempo del instrumento, figura 1.2.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	10/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

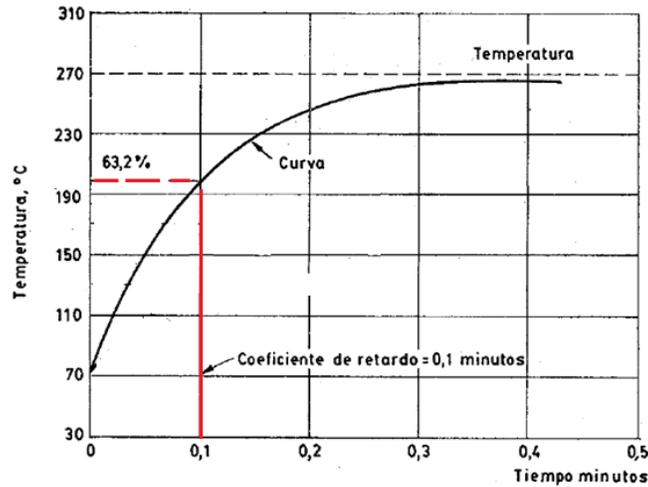


Figura 1.2. Constante de tiempo [5].

## 4. Equipo y Material

- Unidad de demostración de medición de temperatura, UMT.
- Termopar tipo J y tipo K
- Termómetro de resistencia de platino
- Termómetro bimetalico
- Termómetro Hg
- Termómetro de OH
- Cronometro
- Cinta masking tape
- Pirómetro
- Hielo

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	11/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 1.3. a) Unidad de demostración de medición de temperatura, b) 1. Bimetálico, 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.

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

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

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	12/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	13/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Temperatura [°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.

1. Esta actividad se realiza inmediatamente después de la anterior, con el agua aún en ebullición.
2. Verificar que los restantes termómetros se encuentran inicialmente a la temperatura ambiente.
3. 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.
4. Repita el procedimiento anterior con los restantes termómetros.
5. 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	14/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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.

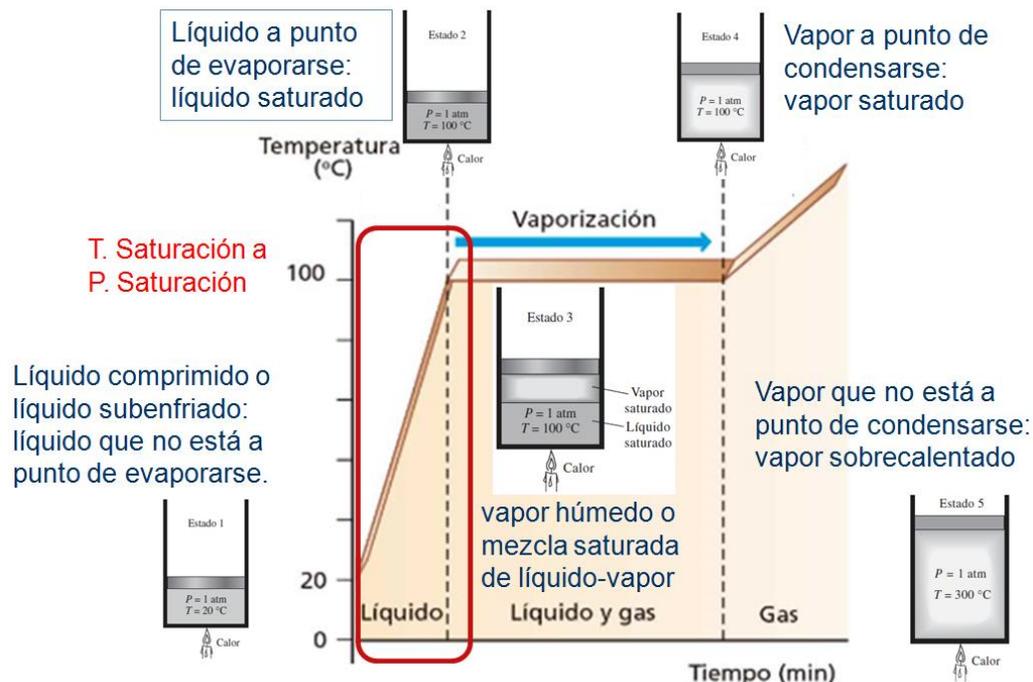


Figura 1.4. Medición de la temperatura del agua en proceso de ebullición.

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	15/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	16/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tiempo [min]	Tiempo [seg]	Termómetro. Temperatura [°C]					
		Termopar tipo K	Termopar tipo J	T. de platino	T. bimetalico	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]

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	17/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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,  $\tau$ , del termómetro.

$\tau =$             segundos



	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	19/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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. bimetalico	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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	20/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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?

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	21/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

2. ¿Qué termómetro de los utilizados en la práctica es el más adecuado para condiciones de régimen permanente? Justifique su respuesta.
3. ¿Qué termómetro de los utilizados en la práctica es el más adecuado para condiciones dinámicas? Justifique su respuesta.
4. De los termómetros utilizados, ¿Existe uno que cumple para condiciones de régimen permanente y condiciones dinámicas? Justifique su respuesta.
5. 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:

1. Una visión más general de la temperatura. Fecha de consulta: 26/05/2019  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/heatrf.html#c1>
2. Medición de temperatura, bases. Fecha de consulta: 26/05/19  
<http://thermopedia.com/content/1184/>
3. 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>
4. 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](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Documentos/I6_Medicion_temperatura.pdf)

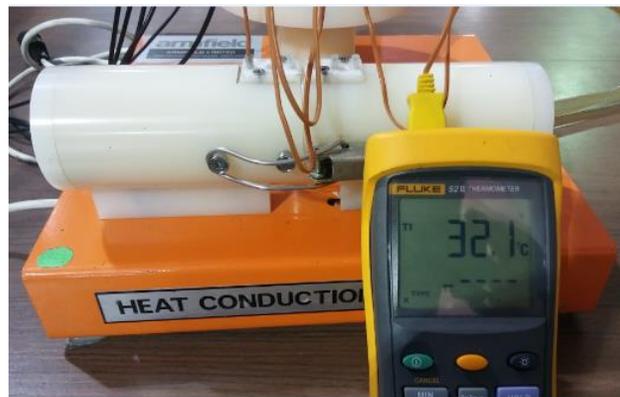
Fuentes básicas:

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	22/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

# Práctica 2

## 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	23/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad en la ejecución

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

## 2. Objetivos

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

## 3. Conceptos básicos y definiciones

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

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

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

La rapidez a la que se da la conducción de calor en el sólido depende de la diferencia de temperaturas, de la configuración geométrica, del espesor y del material de que está hecho. Su relación está definida en la ley de Fourier, definida en la Ec. 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 ( $W/m \cdot ^\circ C$ ),  $A$  es el área perpendicular a la transferencia de calor ( $m^2$ ) y  $dT/dx$  es el gradiente de

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	24/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

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

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

### Conductividad térmica

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

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	25/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

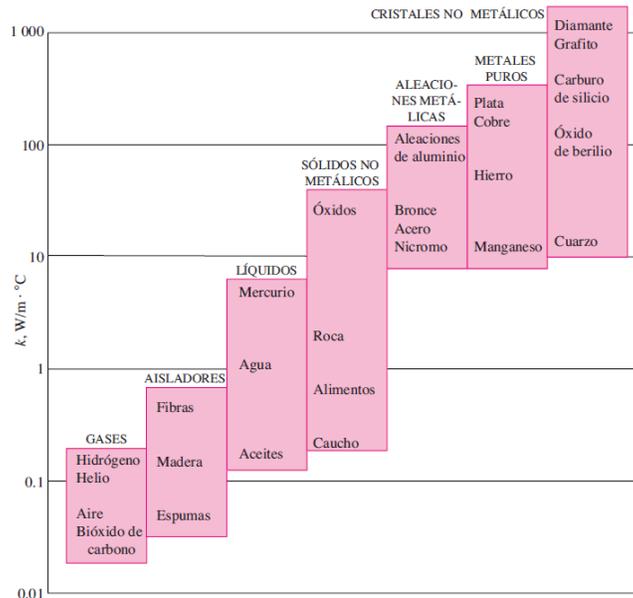


Figura 2.1. Conductividad térmica de materiales a temperatura ambiente [2].

### Distribución de temperaturas teórica en un cilindro

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	26/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

Cuya solución general es

$$T(z) = C_1z + C_2 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

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.

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

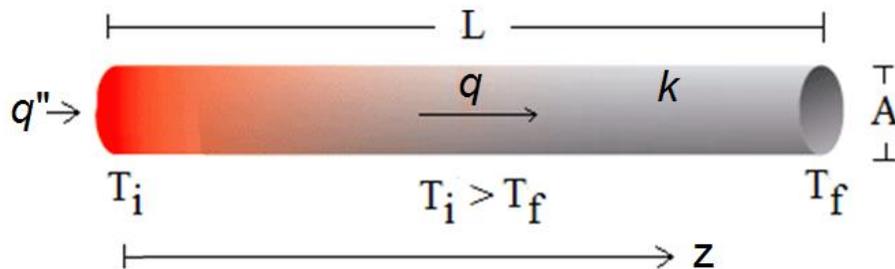


Figura 2.2. Condiciones de frontera en un cilindro para conducción de calor unidimensional en estado estacionario y sin generación interna de calor.

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.

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	27/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Concepto de resistencia térmica

Tomando como referencia la conducción de calor unidireccional en estado estacionario en paredes planas sin generación interna de calor y conductividad térmica constante, como se representa en la figura 2.3. Para estas condiciones la temperatura varía de forma lineal con la coordenada espacial, por ejemplo  $x$ .

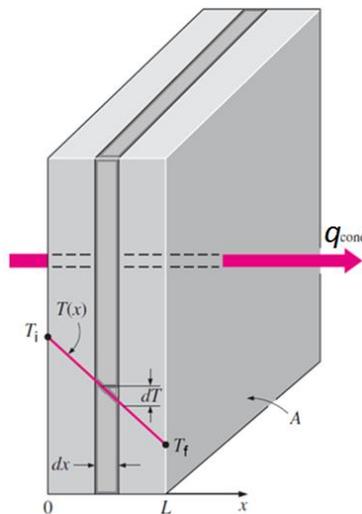


Figura 2.3. Transferencia de calor a través de una pared plana, [2]

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

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	28/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

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

Transferencia de calor, reordenado la Ec. 2.10:

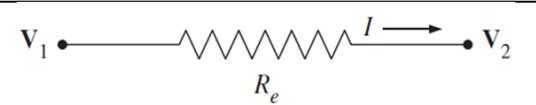
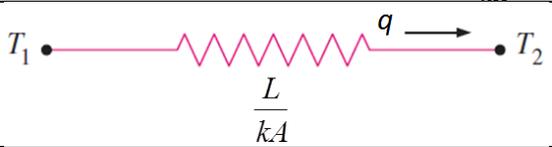
$$q = (T_i - T_f)/R_{t,conducción} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	29/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 2.4. 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.

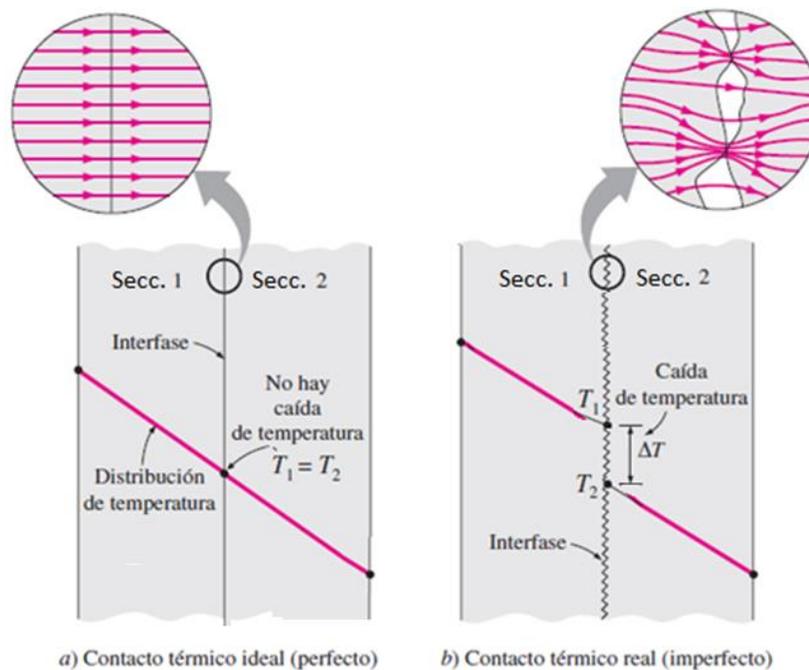


Figura 2.5. Distribución de temperatura y líneas de flujo de calor a lo largo de dos secciones del cilindro para contacto perfecto e imperfecto. Adaptado de [2].

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 formarían espacios con aire,

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	30/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

figura 2.5b que actúan como aislamiento debido a la baja conductividad térmica del aire,  $k_{\text{aire}} < 0.1 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ .

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

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

### Pasta térmica

La pasta térmica generalmente es un fluido viscoso con conductividad térmica mayor al aire que promueve el acoplamiento térmico efectivo entre dos superficies sólidas. Su objetivo es llenar los huecos que hay entre los valles en la interface de los sólidos, como se presenta en la figura 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%.

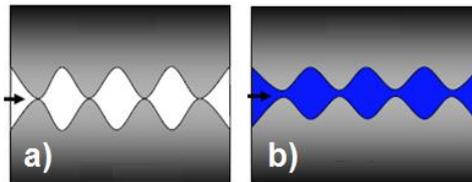


Figura 2.6. a) Cavidades con aire y b) cavidades con grasa térmica

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	31/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

La figura 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.

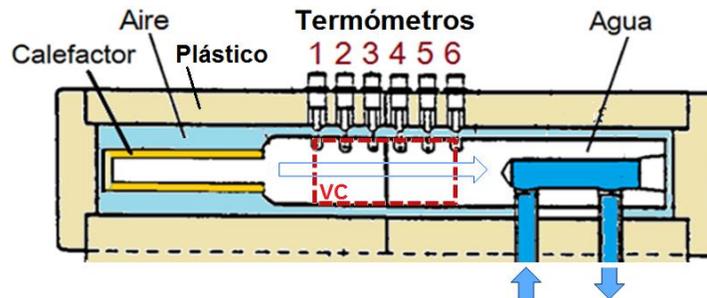


Figura 2.7. Esquema del arreglo experimental indicando el volumen de control. Adaptado de [3].

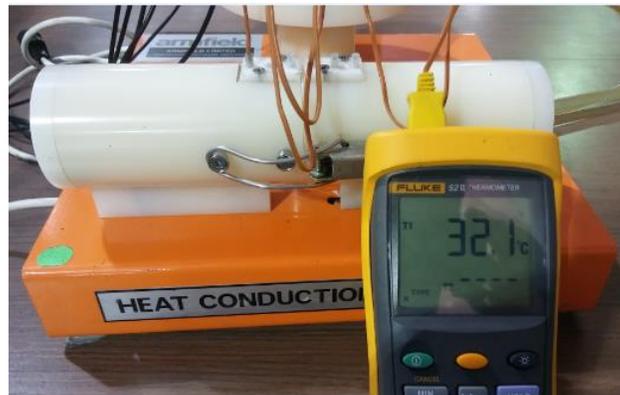


Figura 5.8. Arreglo experimental.

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	32/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

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

## 5. Desarrollo

### Actividad 1. Conducción de calor sin pasta térmica.

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	33/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

2. Mantener la misma potencia eléctrica del calefactor de la actividad 1.
3. Repetir los pasos 4 y 5 de la actividad 1.
4. Anotar las lecturas en la tabla 2.3.

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	34/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 2.4. Tabla de resultados.

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

$$k \text{ promedio local} = \boxed{\phantom{000}}$$

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	35/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 2.5. 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.

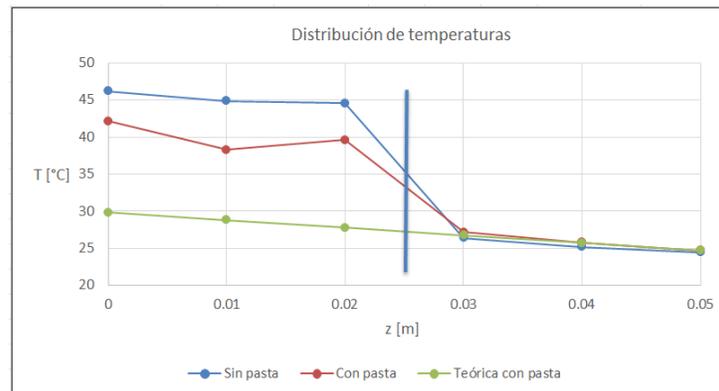


Figura 2.9. Ejemplo de gráfica de distribución de temperatura.

### 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	36/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

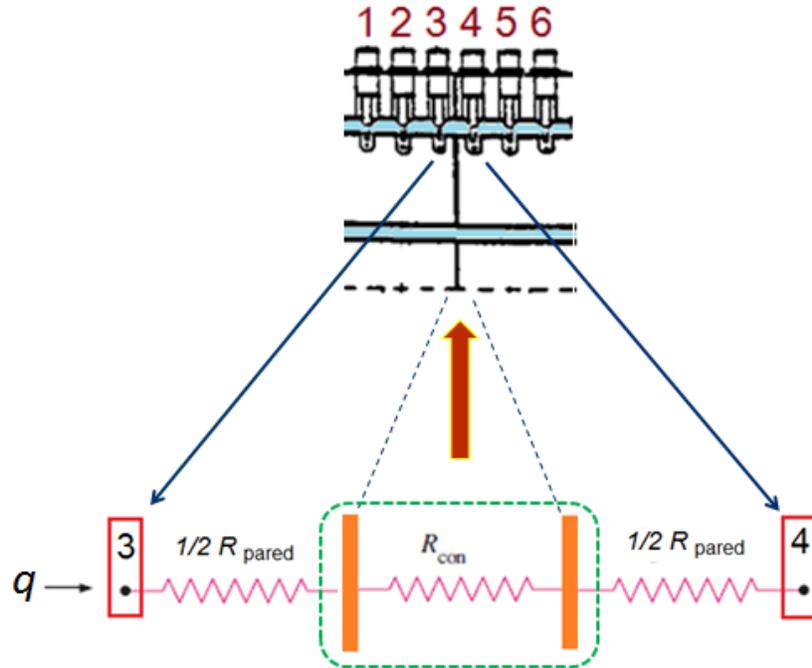


Figura 2.10. Red de resistencias térmicas del arreglo experimental entre los puntos 3 y 4.

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

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	37/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

## 8. Conclusiones

## 9. Bibliografía

### Fuentes básicas

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	38/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

# Práctica 3

## 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	39/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad en la ejecución

<b>Fuente de riesgo.</b>	<b>Riesgo asociado.</b>
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  $x$ .

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	40/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 ( $\Delta T_{\text{total}}$ ) y la sumatoria abarca todas las resistencias térmicas involucradas (resistencia térmica total), ver figura 1, por lo tanto:

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	41/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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.

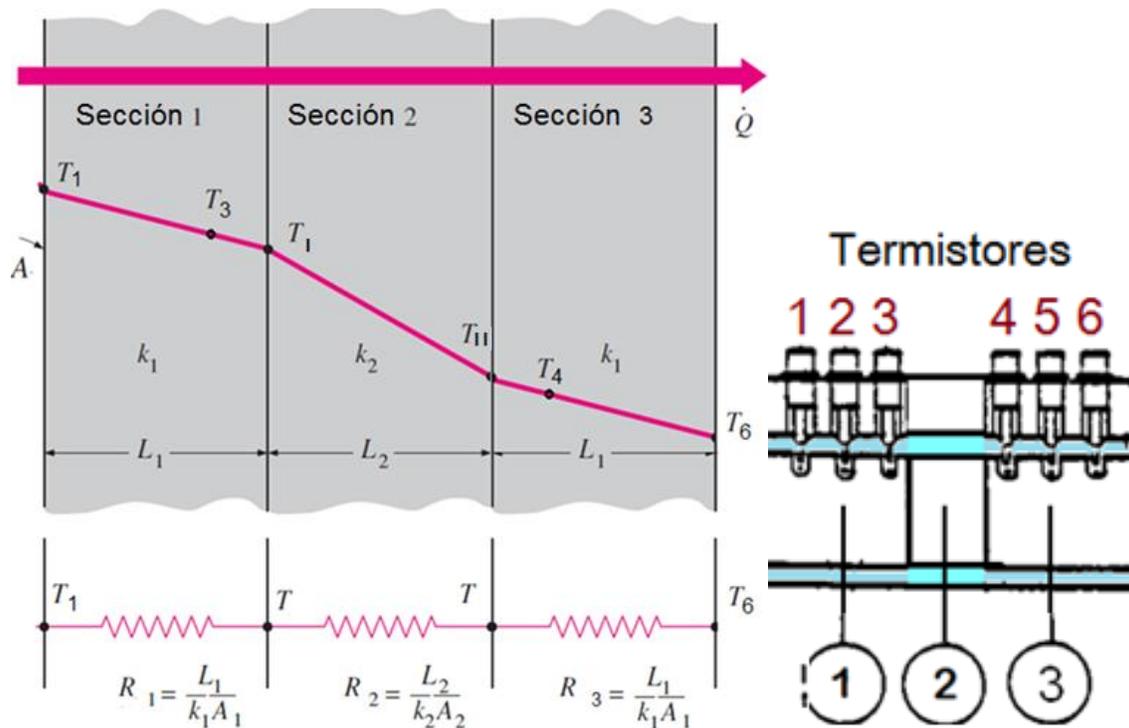
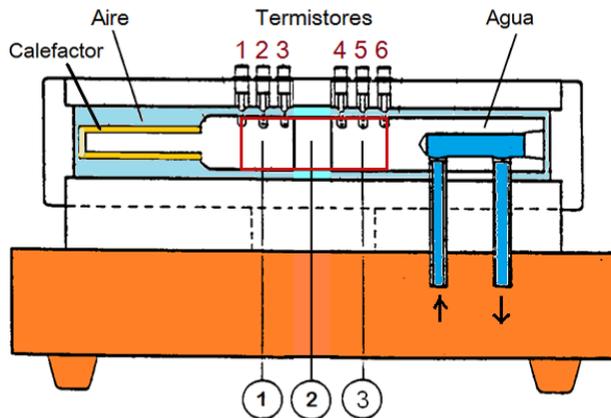


Figura 3.1. Red de resistencias térmicas del arreglo experimental [2].

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	42/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

### 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.

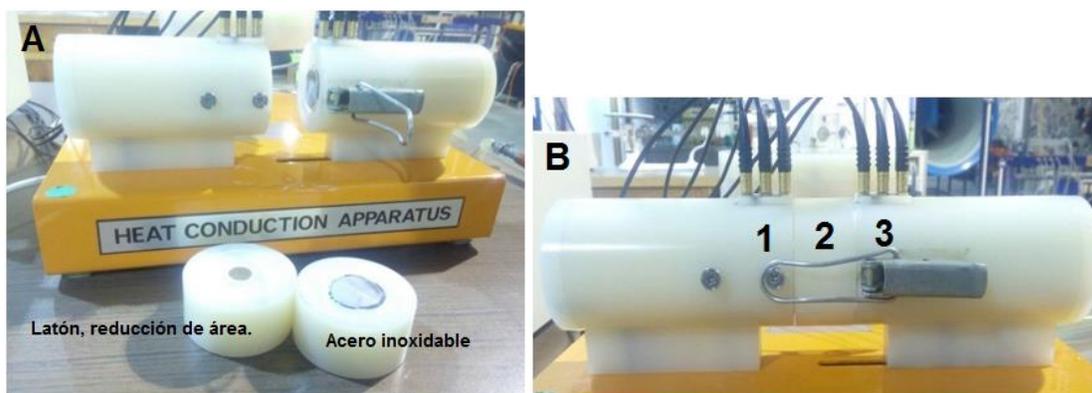


Figura 3.3. A) Secciones de pruebas, B) sección de prueba montada.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	43/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 5. Desarrollo

### 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	44/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	45/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

6. 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.
7. Con las temperaturas  $T_I$  y  $T_{II}$  calcular el gradiente de temperaturas en la sección 2.
8. Calcular la conductividad térmica del acero a partir de la ley de Fourier.
9. Calcular la resistencia térmica del acero.
10. Calcular la resistencia térmica total de la barra compuesta.

**Actividad 2** - Muestra de latón de área transversal menor.

1. Graficar los datos experimentales,  $T$  contra  $x$ .
2. Graficar de manera separada  $T$  contra  $x$ , para las secciones 1 y 3.
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.
4. 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.
5. 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.
6. Con las temperaturas  $T_I$  y  $T_{II}$  calcular el gradiente de temperaturas en la sección 2.
7. Calcular la resistencia térmica del latón, asumiendo como dato la conductividad térmica del latón obtenida de la bibliografía.
8. 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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	46/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 7. Cuestionario

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

1. Analice las graficas 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 graficas 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

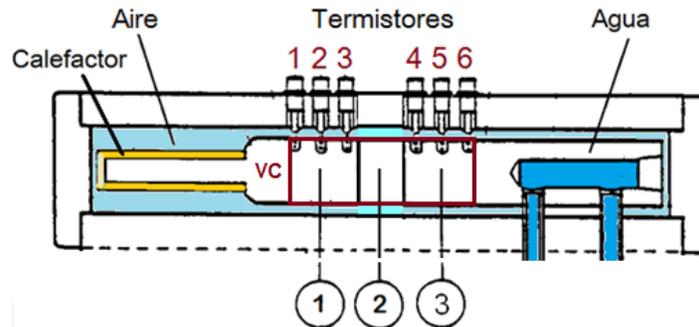
### Fuentes básicas

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	47/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	48/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

# Práctica 4

## 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	49/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad en la ejecución

<b>Fuente de riesgo.</b>	<b>Riesgo asociado.</b>
Salida de agua	Derrame de agua. Asegurarse que la manguera de salida de agua este colocada hacia el drenaje
Dispositivo de medición	No encender el equipo sin abrir el agua de enfriamiento.
Aparato conductor de calor	No permitir que el extremo caliente sobrepase los 100°C.

## 2. Objetivos

- ✓ Comprender el fenómeno de transferencia de calor por conducción en dirección radial, en un disco metálico delgado.
- ✓ Obtener experimentalmente la distribución de temperatura en un disco.
- ✓ Obtener teóricamente la distribución de temperatura en un disco.
- ✓ Comparar resultados teóricos y experimentales.

## 3. Conceptos básicos y definiciones

La difusividad térmica es un parámetro que nos relaciona la cantidad de calor que es conducido con el calor almacenado, generalmente se le asigna la letra griega alfa minúscula ( $\alpha$ ), sus unidades son  $m^2/s$ , y se define como:

$$\alpha = k/(\rho \cdot c_p) \quad (4.1)$$

Este parámetro aparece en la ecuación general de conducción, que se expresa de la siguiente forma en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2)$$

o en coordenada radiales

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.3)$$

El lado derecho de ambas ecuaciones nos indica que, si la difusividad térmica del material es grande, el sistema rápidamente va a llegar al equilibrio, es decir, la temperatura dejará de variar en el tiempo.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	50/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

La difusividad térmica tiende a ser muy alta en los metales y baja en los materiales aislantes térmicos, como se muestra en la Tabla 4.1.

Una configuración geométrica muy utilizada en ingeniería es el cilindro. Por ejemplo, en flujos en tuberías, flujo alrededor de cilindros, intercambiadores de calor, etc. Al resolver la ecuación 4.3 considerando que se tiene solamente flujo de calor en dirección radial, en estado permanente, sin generación de calor, se obtiene una ecuación que describe un perfil de temperatura logarítmico, ver ecuación 3.4. Se puede obtener un resultado similar utilizando el método de resistencias eléctricas.

$$T_1 - T_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{(2 \cdot \pi \cdot L \cdot k)} (2 \cdot \pi \cdot L \cdot k) \cdot Q \quad (4.4)$$

Tabla 4.1. Difusividad térmica para varios materiales a 300 K.

Material	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]x 10 <sup>-6</sup>	Material	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]x 10 <sup>-6</sup>	Material	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]x 10 <sup>-6</sup>
Diamante	1290	Hierro puro	23.1	PVC	0.15
Carburo de silicio	230	Platino puro	25.1	Agua	0.14
Plata	174	Mercurio líquido	4.7	Baquelita	0.73
Oro	127	Hielo	1.2	Algodón	0.5769
Cobre puro	113	Madera dura	1.77	Piel humana	0.109
Aluminio puro	97.1	Vidrio	0.56	Uretano	0.35

## 4. Equipo y Material

- Equipo Armfield para conducción radial, Fig. 4.1
- Vernier.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	51/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

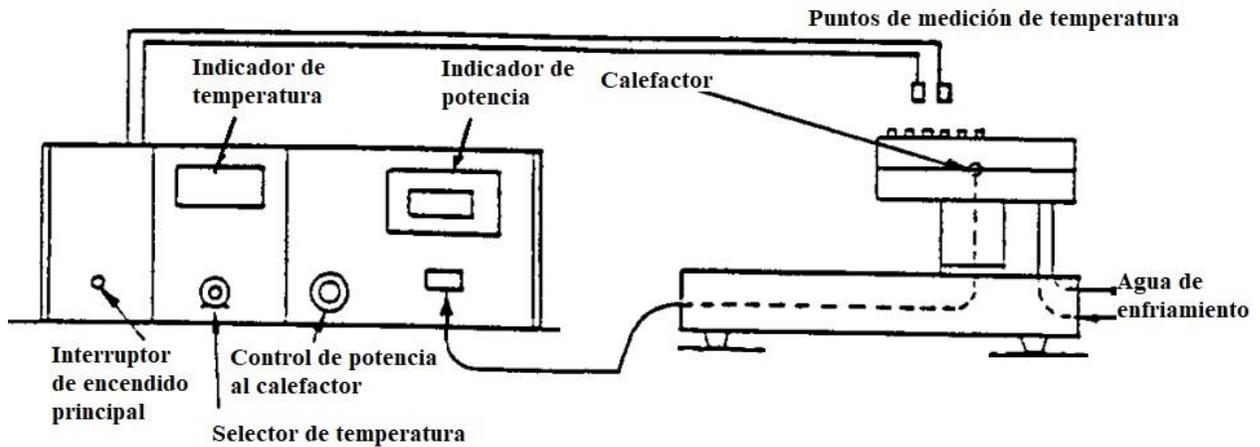


Figura 4.1 Arreglo experimental. Izquierda: unidad de control, derecha: espécimen de conducción radial.

## 5. Desarrollo

### Actividad 1. Perfil de temperatura

1. Conectar los cables de los termistores a la unidad de control. La distribución de los puntos de medición se muestra en la Fig. 4.2. Colocar la perilla selectora de temperatura en el termopar 1, una vez que la temperatura en el indicar no varíe se ha alcanzado el estado estable, 45 minutos aproximadamente.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	52/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

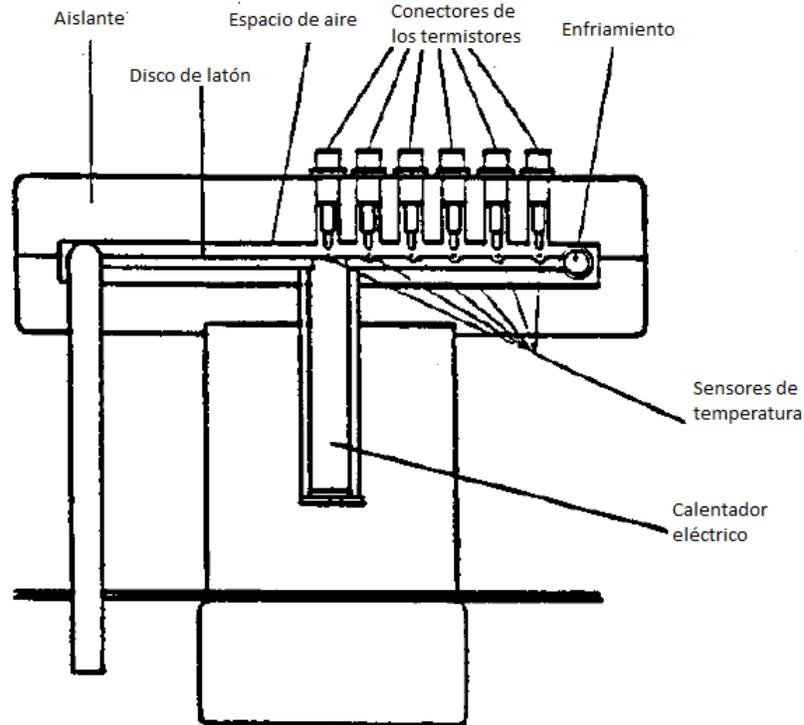


Fig. 4.2. Configuración de aparato experimental. Posición de los termopares.

2. Encender el aparato de conducción radial. Abrir la llave que suministra el agua de enfriamiento a la pared de fría del equipo, y establecer  $T_f$ . Fijar la potencia a suministrar a la resistencia eléctrica, y establecer  $T_c$ .
3. Establecido el gradiente de temperatura tomar la lectura de potencia, así como la temperatura de los termistores. Incrementar la potencia suministrada a la resistencia y esperar a que se alcancen condiciones estables nuevamente, y se toman los datos nuevamente.

### Actividad 2

El profesor y los alumnos discutirán el diseño del aparato experimental (Figura 4.2).



	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	54/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 7. Cuestionario

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

1. Bajo las mismas condiciones, si deseamos que el transitorio sea más corto ¿qué nos conviene utilizar, un disco de hierro o un disco de aluminio? Argumente su respuesta.
2. ¿Cuáles son los defectos del diseño del dispositivo experimental?
3. ¿Mencione por lo menos 3 formas de generación de calor?
4. ¿Es posible alcanzar el estado permanente en un cilindro sólido si este presenta generación de calor y su superficie externa es un aislante perfecto? Argumente su respuesta, utilice las ec. 4.3.
5. Desde tu punto de vista ¿el factor corrige el error de diseño? Argumente.
6. ¿Qué le pasa a la conductividad térmica al usar el factor?

## 8. Conclusiones

## 9. Bibliografía

1. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P. y Dewitt D. P., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, sexta edición en Inglés, John Wiley & Sons, USA, 2007.
2. Çengel Y. A., Ghajar A. J., “Transferencia de calor y masa”, cuarta edición, Mc Graw Hill, 2011.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	55/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

# Práctica 5

## 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	56/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad en la ejecución

<b>Fuente de riesgo.</b>	<b>Riesgo asociado.</b>
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 [ $\text{m}^2$ ],  $h_L$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección o coeficiente convectivo para toda la superficie [ $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$ ],  $T_s$  es la temperatura de la superficie de transferencia [ $^{\circ}\text{C}$ ] y  $T_\infty$  es la temperatura del fluido lejos de la superficie [ $^{\circ}\text{C}$ ].

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

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	57/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

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

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

El primero se obtiene como:

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

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  $\bar{Nu}$  representan el valor local y promedio del número de Nusselt respectivamente. Este parámetro depende del régimen de flujo, de las condiciones de frontera térmica y del tipo de fluido utilizado.

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

El enfoque experimental es el que se plantea en la presente práctica de manera limitada ya que determinar una función, Ec. 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	$h$ (W/m <sup>2</sup> 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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	58/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Parámetros adimensionales para transferencia de calor en una placa plana vertical

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

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

Donde  $g$  es la aceleración gravitatoria [ $m/s^2$ ],  $\beta$  el coeficiente de expansión térmica volumétrica [ $K^{-1}$ ],  $L$  es la longitud [ $m$ ], y  $\nu$  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  $\rho$  la densidad [ $kg/m^3$ ],  $v$  la velocidad [ $m/s$ ],  $L$  la longitud característica [ $m$ ] y  $\mu$  la viscosidad dinámica [ $Pa \cdot s$ ]

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

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

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

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	59/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

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

### Transferencia de calor por convección en una placa plana vertical.

Cuando se tiene un fluido en movimiento sobre una placa plana, ambos a diferente temperatura, se tiene un problema en el que la capa límite de velocidad y la térmica evoluciona a lo largo de la placa, lo anterior tiene como consecuencia que también cambie el coeficiente de convección  $h$  en la dirección del flujo. Para indicar la variación con la distancia  $x$  se incluye ésta en forma de subíndice, tal como se representa en la figura 5.1.

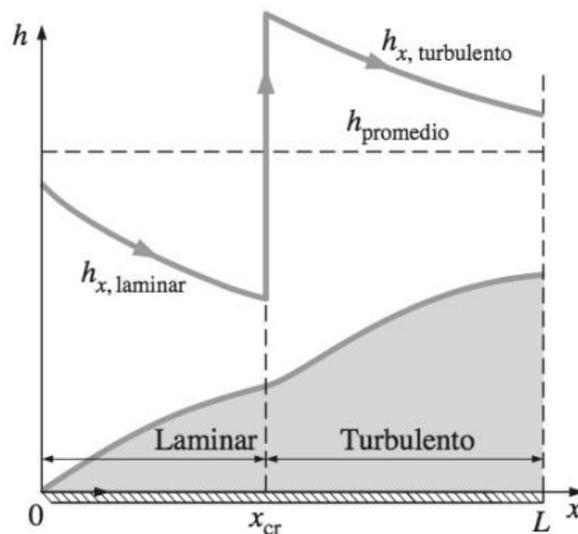


Figura 5.1. Representación gráfica del coeficiente de transferencia de calor para una placa plana [2].

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

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	60/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$Nu_x = 0.453 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{Ec. 5.7}$$

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

Cabe señalar que en la práctica profesional son más utilizados valores promedios del número de Nusselt  $Nu_L$  y del coeficiente de convección promedio  $h_L$ . En la figura 5.1 se puede observar una representación del comportamiento local y promedio del coeficiente de convección.

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

$$Nu_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387(GrPr)^{1/6}}{[1+(0.437/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{Ec. 5.8}$$

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

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

$$Nu_L = 0.680 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{Ec. 5.9}$$

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

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

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad \text{Ec. 5.10}$$

## 4. Equipo y Material

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	61/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 5.2. Aparato de convección libre y forzada.

## 5. Desarrollo

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

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

### Preparación previa

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

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	62/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

**Actividad 1.** Adquisición de datos inicial.

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

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

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

- Mida las dimensiones de la placa.

Altura,  $L$ : \_\_\_\_\_ [m]

Ancho,  $W$ : \_\_\_\_\_ [m]

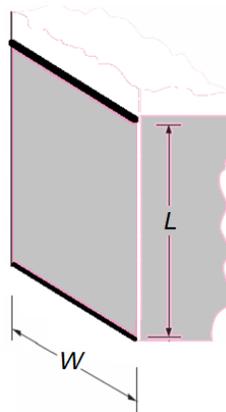


Figura 5.3. Dimensiones de la placa.

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

**Actividad 2.** Convección libre.

- Gire la perilla del control de potencia del calefactor, resaltada en cuadro rojo en la figura 5.4, hasta que en la pantalla derecha muestre 95 Watts. Mantenga esta potencia hasta que la temperatura de la placa,  $T_s$ , llegue a  $50^{\circ}\text{C}$ , 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	63/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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



Figura 5.4. Panel de control

- Esperar a que la temperatura alcance el valor indicado en el punto anterior y disminuir la potencia del calefactor a 8 Watts. Esperar a que la temperatura de la placa deje de variar (aproximadamente de 20 a 30 minutos) e iniciar inmediatamente la toma de datos. La potencia del calefactor se debe mantener durante la práctica.
- Llenar la columna 1 de la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Registro de datos experimentales.

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

### Actividad 3 Convección forzada.

- Preparar el anemómetro de hilo caliente para medir la velocidad del fluido  $v_{\infty}$ . 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 5.5, e introducir hasta la mitad del ducto. Se recomienda utilizar cinta adhesiva como referencia.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	64/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 5.5. Anemómetro de hilo caliente, indicando la protección de los sensores de velocidad y temperatura.

- Encender el ventilador girando la perilla de control hasta la cuarta línea, figura 5.6.



Figura 5.6. Control de la velocidad del ventilador.

- Medir la velocidad con el anemómetro y posteriormente retirarlo del ducto.
- Esperar a que se estabilice la lectura de la temperatura de la placa (aproximadamente en 20 minutos), indicación de que se ha alcanzado el estado estacionario.
- Registrar los datos en las columnas 2 y 3 de la tabla 5.2, según corresponda.
- Iniciar el segundo evento de convección forzada, girando la perilla de control para aumentar la velocidad del ventilador. Se recomienda la posición 6 de la perilla.
- Repita el procedimiento del paso 4 al 6.

## 6. Resultados

- Obtener las propiedades del fluido a temperatura de película y llenar la tabla 5.3.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	65/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 5.3. Datos de propiedades del fluido.

Evento	1	2	3	Unidades
$T_f$				[°C]
$\rho$				[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_p$				[J /kg K]
$\mu$				[Pa s]
$k$				[W/m K]
$\beta$		-----		[1/K]
	C. Libre	C. Forzada		

Cálculo del coeficiente de convección  $h_L$  experimental para los 3 eventos

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

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

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

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

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

Presentar los resultados en la tabla 5.4.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	66/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Tabla 5.4. Tabla de resultados.

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

11. Graficar  $h_{exp}$  contra la velocidad  $V_{\infty}$ .

## 7. Cuestionario

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

## 8. Conclusiones

## 9. Bibliografía

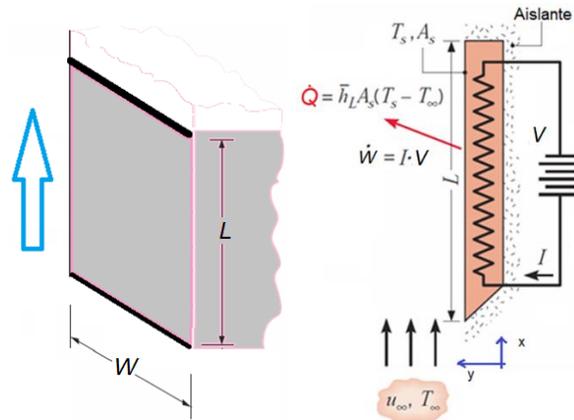
### Fuentes básicas

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	67/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

## 10. Anexos



Consideraciones del arreglo experimental:

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	68/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	69/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

# Práctica 6

## Transferencia de calor en aletas con área 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	70/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad en la ejecución

<b>Fuente de riesgo.</b>	<b>Riesgo asociado.</b>
En el equipo	Tener cuidado de no quemarse con el equipo, debido a que se pueden obtener temperaturas mayores a los 90 grados
En el equipo	Tener cuidado de no subir abruptamente la velocidad del ventilador.
Anemómetro	No quitar la funda protectora del hilo metálico caliente mientras no se utilice, taparlo al finalizar su uso.

## 2. Objetivos

- ✓ Entender la importancia de las superficies extendidas.
- ✓ Comprender el mecanismo combinado de conducción y convección en dichas superficies.
- ✓ Entender el concepto de eficiencia y efectividad de una aleta y calcularlas.
- ✓ Entender el concepto de efectividad de la aleta y calcularla.
- ✓ Obtener la distribución de temperatura a lo largo de la aleta.

## 3. Conceptos básicos y definiciones

La razón de la transferencia de calor desde una superficie que está a una temperatura  $T_s$  hacia el medio circundante que está a  $T_\infty$  se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty), \quad \text{Ec. 6.1}$$

siendo  $A_s$  el área superficial de transferencia de calor y  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección. Cuando las temperaturas  $T_s$  y  $T_\infty$  son fijas, existen dos maneras de incrementar la transferencia de calor, aumentando el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $h$ , o aumentando el área superficial,  $A_s$ . El aumento de  $h$  puede requerir la instalación de una bomba o un ventilador, pero, en la mayoría de los casos, la mejor alternativa es aumentar el área superficial agregando superficies extendidas. El término superficies extendidas (también conocido como aletas) es usado cuando un sólido experimenta transferencia de calor por conducción dentro de sus límites con extensiones, pero a la vez experimenta transferencia de calor por convección (o radiación) entre sus límites y los alrededores.

### Eficiencia de aleta

La distribución de temperatura a lo largo de una aleta no es uniforme, esto se debe a que la aleta pierde calor por convección a lo largo de ella. Sin estas pérdidas, la temperatura máxima en una

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	71/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

la temperatura de la aleta sería igual a la temperatura de la base. Esto ocurriría en un caso ideal en el que la resistencia térmica al flujo de calor fuera cero o la conductividad térmica fuera infinita ( $k \rightarrow \infty$ ). En este caso, la temperatura de la aleta será uniforme e igual a la temperatura de la base,  $T_b$ , y el flujo de calor será máximo y se expresa mediante:

$$\dot{Q}_{aleta\ máximo} = hA_{aleta}(T_b - T_{\infty})$$

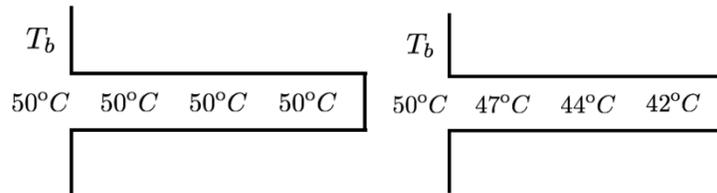


Fig. 6.1. Distribución de temperatura (a) ideal (izquierdo) y (b) real (derecho).

Sin embargo, al perderse calor por convección a lo largo de ella, la transferencia de calor conductiva hacia su borde será menor y con una diferencia decreciente en la temperatura,  $T(x) - T_{\infty}$ , como se muestra en la figura 1b. En este caso, el calor real de la aleta es el calor máximo multiplicado por la eficiencia de la aleta, donde la eficiencia toma valores entre 0 y 1, y dependerá del tipo de aleta y del sistema, esto es:

$$\dot{Q}_{aleta} = \dot{Q}_{aleta\ máximo} \eta_{aleta} = hA_{aleta}(T_b - T_{\infty}) \eta_{aleta} \quad \text{Ec. 6.3}$$

Por lo tanto, la eficiencia se define como la relación entre el calor de la aleta y el calor máximo que disiparía si estuviera a la temperatura de la base, es decir:

$$\eta_{aleta} = \frac{\dot{Q}_{aleta}}{\dot{Q}_{aleta\ máximo}} \quad \text{Ec. 6.4}$$

La efectividad se define como la relación entre el calor de la aleta y el calor de base sin aleta. Este parámetro nos indica la mejora en la transferencia de calor al adicionar superficies extendidas.

$$\varepsilon_{aleta} = \frac{\dot{Q}_{aleta}}{\dot{Q}_{sin\ aleta}} = \frac{hA_{aleta}(T_b - T_{\infty}) \eta_{aleta}}{hA_{sin\ aleta}(T_b - T_{\infty})} = \frac{A_{aleta}}{A_{sin\ aleta}} \eta_{aleta} \quad \text{Ec. 6.5}$$

### Ecuación de la aleta

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	72/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

En el análisis de aletas, se considera que no hay generación de calor, además de estado estacionario, conductividad térmica  $k$  uniforme y coeficiente de transferencia convectivo  $h$  uniforme sobre toda la superficie de la aleta.

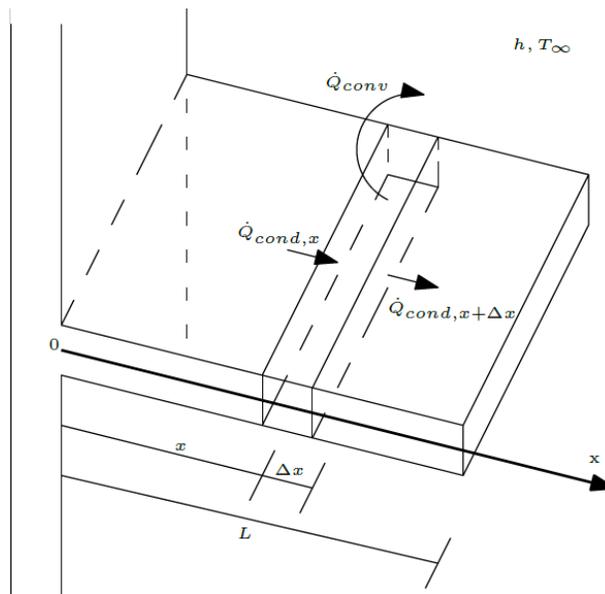


Fig. 6.2. Esquema del balance de calor en una aleta.

En condiciones estacionarias

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_s$$

$$\left( \begin{array}{c} \text{Conducción} \\ \text{hacia el} \\ \text{elemento } x \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Conducción} \\ \text{desde elemento} \\ x + \Delta x \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Convección} \\ \text{desde elemento} \\ \text{hacia ambiente} \end{array} \right) \quad \text{Ec.6.6}$$

$$\dot{Q}_{cond, x} = \dot{Q}_{cond, x+\Delta x} + \dot{Q}_{conv} \quad \text{Ec.6.7}$$

donde 
$$\dot{Q}_{conv} = h(p\Delta x)(T - T_\infty)$$

$$\dot{Q}_{cond, x} = \dot{Q}_{cond, x+\Delta x} + h(p\Delta x)(T - T_\infty)$$

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	73/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\dot{Q}_{cond, x+\Delta x} - \dot{Q}_{cond, x} + h(p\Delta x)(T - T_{\infty}) = 0$$

$$\frac{\dot{Q}_{cond, x+\Delta x} - \dot{Q}_{cond, x}}{\Delta x} + h(p\Delta x)(T - T_{\infty}) = 0 \quad \text{Ec.6.8}$$

al tomar el límite cuando  $\Delta x \rightarrow 0$ , se tiene:

$$\frac{d\dot{Q}_{cond}}{dx} + hp(T - T_{\infty}) = 0 \quad \text{Ec.6.9}$$

donde 
$$\dot{Q}_{cond} = -kA_{cond} \frac{dT}{dx}$$

$$\frac{d}{dx} \left( -kA_{cond} \frac{dT}{dx} \right) + hp(T - T_{\infty}) = 0$$

Considerando que  $k$  y  $A_{cond}$  son constantes:

$$kA_{cond} \frac{d^2T}{dx^2} - hp(T - T_{\infty}) = 0 \quad \text{Ec.6.10}$$

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hp}{kA_{cond}} (T - T_{\infty}) = 0 \quad \text{Ec. 6.11}$$

Proponiendo a  $\theta = T - T_{\infty}$  y  $a^2 = \frac{hp}{kA_{cond}}$

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - a^2\theta = 0 \quad \text{Ec. 6.12}$$

Resolviendo la ecuación diferencial, su solución general es:

$$\theta(x) = c_1 e^{ax} + c_2 e^{-ax} \quad \text{Ec. 6.13}$$

en donde  $c_1$  y  $c_2$  son constantes arbitrarias cuyos valores deben de ser determinados a partir de las condiciones de frontera en la base y en el borde de la aleta.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	74/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

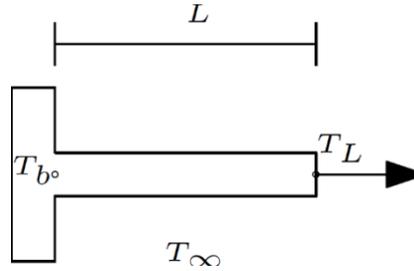


Fig. 6.3. Esquema de una aleta.

### Condición de frontera en la base de la aleta

Esta condición corresponde a la temperatura correspondiente a la base de la aleta, es decir, la temperatura de la placa.

$$\theta(0) = \theta_b = T_b - T_\infty \quad \text{Ec. 6.13}$$

### Condición de frontera en la punta de la aleta

En la punta de la aleta se tiene varias posibilidades, que incluyen temperatura específica, pérdida de calor despreciable, convección o convección y radiación combinadas. Para esta práctica haremos uso únicamente de la condición de frontera de temperatura específica en la punta, es decir,  $\theta(L) = \theta_L = T_L - T_\infty$ . Utilizando esta condición en la ecuación diferencial se obtiene la siguiente expresión para la distribución de temperatura,

$$\frac{T(x) - T_\infty}{T_b - T_\infty} = \frac{[(T_L - T_\infty)/(T_b - T_\infty)] \sinh[ax] + \sinh[a(L-x)]}{\sinh[aL]} \quad \text{Ec. 6.14}$$

Las expresiones para el flujo de calor y la eficiencia son:

$$\dot{Q}_{\text{temperatura específica}} = \sqrt{hpkA_{\text{cond}}}(T_b - T_\infty) \frac{\cosh[aL] - [(T_L - T_\infty)/(T_b - T_\infty)]}{\sinh[aL]} \quad \text{Ec. 6.15}$$

$$\eta_{\text{aleta}} = \frac{\dot{Q}_{\text{aleta}}}{\dot{Q}_{\text{aleta, máx}}} = \frac{\sqrt{hpkA_{\text{cond}}}(T_b - T_\infty) \frac{\cosh[aL] - [(T_L - T_\infty)/(T_b - T_\infty)]}{\sinh[aL]}}{hA_{\text{aleta}}(T_b - T_\infty)}$$

$$\eta_{\text{aleta}} = \frac{1}{aL} \frac{\cosh[aL] - [(T_L - T_\infty)/(T_b - T_\infty)]}{\sinh[aL]} \quad \text{Ec. 6.16}$$

donde  $\dot{Q}_{\text{aleta, máx}} = hA_{\text{aleta}}(T_b - T_\infty)$



	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	76/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

	40000-400000	$Nu = 0.027 Re^{0.805} Pr^{\frac{1}{3}}$
<b>Correlaciones sistema de aletas circulares para conveccion forzada</b>		
Escalonada	0-500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25}$
	100-1000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25}$
	1000-2 x 10 <sup>5</sup>	$Nu_D = 0.35 \left(\frac{S_T}{S_L}\right)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25}$
	2 x 10 <sup>5</sup> -2 x 10 <sup>6</sup>	$Nu_D = 0.031 \left(\frac{S_T}{S_L}\right)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25}$

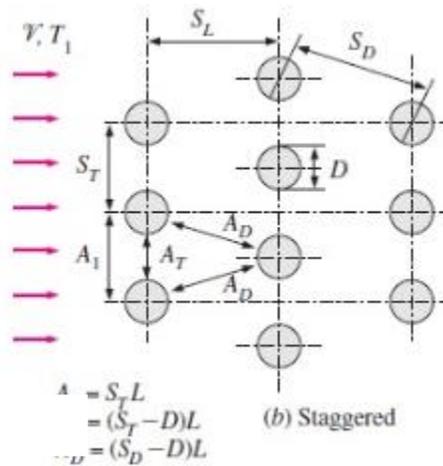


Fig. 6.4 Esquema Aletas escalonadas [2]

### Efectividad

La efectividad es la relación entre el calor disipado con la ayuda del sistema de aletas ( $\dot{Q}_{total}$ ) y el calor disipado por la placa plana sin aletas, manteniendo la misma temperatura de la base en ambos casos.

$$Efectividad = \frac{\dot{Q}_{total}}{\dot{Q}_{placa\ plana}}$$

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	77/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

donde  $\dot{Q}_{placa\ plana}$  es la potencia utilizada en la práctica anterior.

## 4. Equipo y Material

- Equipo Armfield para convección
- Placa con aletas de área transversal constante
- Anemómetro de hilo caliente
- Termopar
- Vernier
- Flexómetro

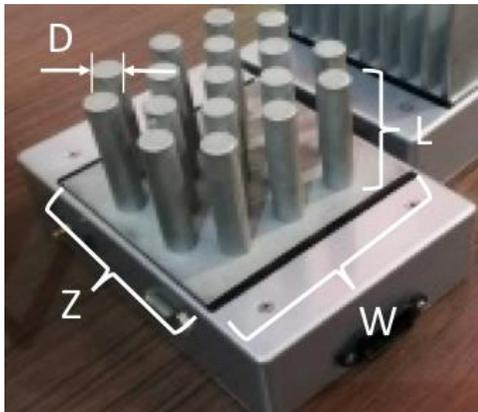


Figura 6.4. Aletas a utilizar en la práctica.

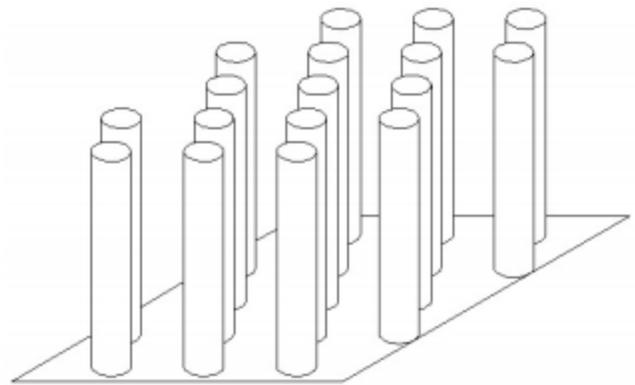


Figura6.4.1 aletas a utilizar en la práctica.

## 5. Desarrollo

- Tomar cada una de las dimensiones de la placa con aletas con ayuda del Vernier o del flexómetro en caso de que el profesor no se las proporcione (las dimensiones de la placa y las distancias entre aletas). Tomar lectura de la temperatura ambiente.
- Conectar el termopar del equipo en la base de la placa.
- Gire la perilla del control de potencia del calefactor hasta que en la pantalla muestre 95 Watts y mantenga esta potencia hasta que la temperatura de la base llegue a 50°C (el tiempo de espera aproximado es alrededor de 5 minutos).
- Una vez alcanzada la temperatura indicada en el punto anterior, gire nuevamente la perilla de potencia del calefactor reduciendo la potencia a 23 Watts y espere a que la temperatura de la placa deje de variar y registre ese valor de temperatura.
- Aumente la potencia a 47 [W] y encienda el ventilador con la perilla de control girándola hasta la cuarta línea; mida la velocidad con el anemómetro de hilo caliente. Retire el anemómetro del

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	78/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

ducto y espere hasta que se alcance el estado estable, debería alcanzarse la misma temperatura que en el experimento de placa plana a esta misma velocidad.

f) Se realiza el mismo procedimiento del inciso anterior para las velocidades restantes, de acuerdo con la siguiente tabla:

Línea de la perilla del ventilador	Potencia [W]
Quinta línea	53
Sexta línea	52
Séptima línea	56
Octava línea ( max velocidad)	57

NOTA: Estas potencias son aproximadas, ya que lo que se pretende es alcanzar la misma temperatura de base que se obtuvo para la práctica de placa plana. Es necesario utilizar las mismas velocidades.

g) Para la última velocidad utilizada, medir la temperatura en 5 diferentes puntos de la aleta central. Se consideran la base, la punta y tres puntos intermedios de acuerdo con los orificios de toma de temperatura que se encuentran en el equipo de convección.

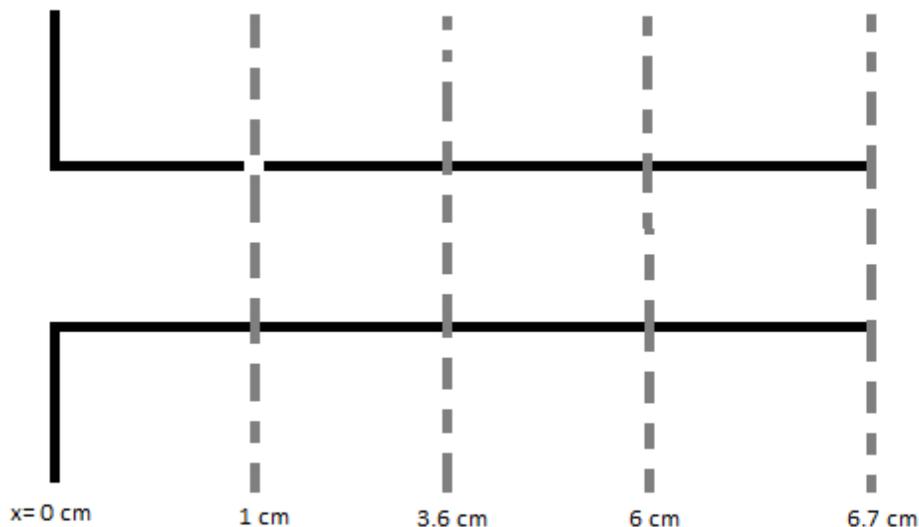


Figura 6.5 Imagen que muestra las diferentes distancias en las cuales van a medir las temperaturas de la aleta central

## 6. Resultados

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	79/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Dimensiones de placa plana:

W \_\_\_\_ (cm)

Z \_\_\_\_ (cm)

Dimensiones aletas:

Número de aletas \_\_\_\_

L \_\_\_\_ (cm)

D \_\_\_\_ (cm)

S<sub>T</sub> \_\_\_\_ (cm)

S<sub>L</sub> \_\_\_\_ (cm)

X[m]	T <sub>exp</sub> [°C]	T <sub>teo</sub> [°C]
0		
0.01		
0.036		
0.06		
0.067		

Tipo de Convección	V[m/s]	Q[W]	T <sub>base</sub> [°C]	T <sub>aire</sub> [°C]	h [W/m <sup>2</sup> K]	η	ε
Natural							
Forzada							
Forzada							
Forzada							
Forzada							
Forzada							

## 7. Cuestionario

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

1. ¿Qué puede decir de la temperatura de la base con respecto al de la temperatura de la placa plana de la práctica anterior? Argumente.
2. ¿Qué puede decir del coeficiente convectivo obtenido iterativamente con respecto al obtenido con las correlaciones? Argumente.
3. ¿Qué significado tienen la eficiencia y la efectividad obtenidas?

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	80/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 8. Conclusiones

## 9. Bibliografía

1. Bergman, Bavine, Incropera y Dewitt; "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", séptima edición, John Wiley & sons, Estados Unidos de America, 2011.
2. Yunus A. Çengel; "Transferencia de calor y masa", tercera edición, Mac Graw Hill, 2007.
3. Holman; "Transferencia de calor", octava edición, Mac Graw Hill, 1998.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	81/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

# Práctica 7

## Transferencia de calor en aletas con área 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	82/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad en la ejecución

<b>Fuente de riesgo.</b>	<b>Riesgo asociado.</b>
En el equipo	Tener cuidado de no quemarse con el equipo, debido a que se pueden obtener temperaturas mayores a los 90 grados
En el equipo	No subir abruptamente la velocidad del ventilador.
Anemómetro	No quitar la funda protectora anemómetro de hilo caliente, cuando este no se utilice.

## 2. Objetivos

- ✓ Obtener el coeficiente convectivo de transferencia de calor.
- ✓ Obtener la eficiencia de la aleta.
- ✓ Obtener la efectividad de la aleta.

## 3. Conceptos básicos y definiciones

Algunas definiciones explicadas en la práctica anterior que serán útiles en esta práctica son:

Eficiencia de la aleta:

$$\eta_{aleta} = \frac{\dot{Q}_{aleta}}{\dot{Q}_{aleta \text{ máximo}}} \quad \text{Ec. 7.1}$$

Efectividad de aleta:

$$\varepsilon_{aleta} = \frac{\dot{Q}_{total}}{\dot{Q}_{placa \text{ plana}}} \quad \text{Ec. 7.2}$$

El calor total disipado por un sistema con aletas está dado por:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{superficie \text{ sin aletas}} + \dot{Q}_{aletas}$$

$N$  = número de aletas

$\theta$  = diferencias de temperatura.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	83/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

$$\dot{Q}_{total} = hA_{sin\ aleta}(T_b - T_{\infty}) + NA_{aleta}(T_b - T_{\infty})\eta_{aleta} \quad \text{Ec. 7.4}$$

$$\dot{Q}_{tot} = hA_{tot}\theta_b \left[ 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - \eta_{aleta}) \right] \quad \text{Ec 7.5}$$

La ecuación general de la aleta para el caso en que el área conductiva es variable está dada por:

$$-k \frac{d}{dx} \left( A_{cond} \frac{dT}{dx} \right) + hp(T - T_{\infty}) = 0 \quad \text{Ec. 7.6}$$

La solución analítica de esta ecuación no es directa, por ello se hace uso de la siguiente gráfica para la aleta de sección variable de esta práctica.

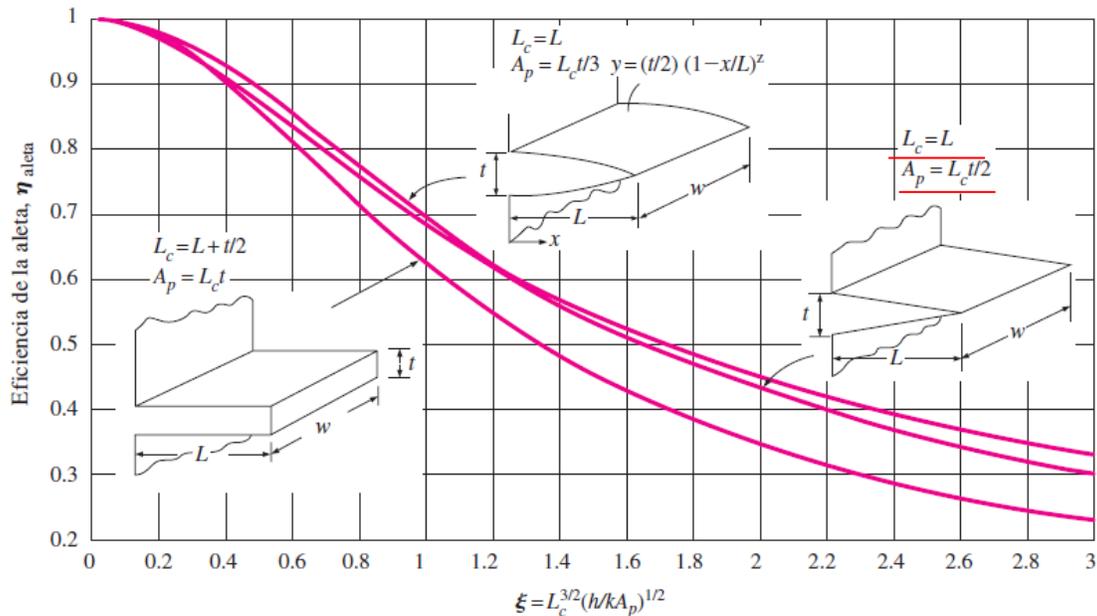


Fig.7.1. Eficiencias de diferentes tipos de aletas. *Transferencia de calor y masa, Yunus Çengel.*

De este modo, se proponen valores para  $h$  y se calcula el parámetro  $\xi$  que permitirá obtener la eficiencia  $\eta$  mediante la gráfica anterior. Esto permitirá calcular  $\dot{Q}_{total}$ , que debe coincidir con la potencia suministrada en el equipo a analizar.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	84/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 4. Equipo y Material

- Equipo Armfield para convección
- Placa con aletas de área variable
- Anemómetro de hilo caliente
- Termopar
- Vernier

## 5. Desarrollo

- a) Tomar cada una de las dimensiones de la placa con aletas triangulares con ayuda del Vernier. Tomar lectura de la temperatura ambiente.
- b) Conectar la placa con aletas triangulares al aparato de convección, conectar el cable de suministro de energía y el termopar que mida la temperatura de pared.
- c) Gire la perilla del control de potencia del calefactor hasta que en la pantalla muestre 95 Watts y mantenga esta potencia hasta que la temperatura de la base llegue a 50°C (el tiempo de espera aproximado es alrededor de 7 minutos).
- d) Una vez alcanzada la temperatura indicada en el punto anterior, gire nuevamente la perilla de potencia del calefactor reduciendo la potencia a 29 Watts y espere a que la temperatura de la placa deje de variar y registre ese valor de temperatura.
- e) Aumente la potencia a 56 [W] y encienda el ventilador con la perilla de control girándola hasta la cuarta línea; mida la velocidad con el anemómetro de hilo caliente. Retire el anemómetro del ducto y espere hasta que se alcance el estado estable, debería alcanzarse la misma temperatura que en el experimento de placa plana a esta misma velocidad. Tomar lectura de la temperatura ambiente.
- f) Se realiza el mismo procedimiento del inciso anterior para las velocidades restantes, de acuerdo con la siguiente tabla:

Línea de la perilla del ventilador	Potencia [W]
Quinta línea	61
Sexta línea	58
Séptima línea	63
Octava línea ( max velocidad)	65

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	85/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- g) NOTA: Estas potencias son aproximadas, ya que lo que se pretende es alcanzar la misma temperatura de base que se obtuvo para la práctica de placa plana. Es necesario utilizar las mismas velocidades.

## 6. Resultados

Dimensiones de placa plana:

W \_\_\_\_ (cm)

Z \_\_\_\_ (cm)

Dimensiones aletas:

Número de aletas \_\_\_\_

t \_\_\_\_ (cm)

L \_\_\_\_ (cm)

W \_\_\_\_ (cm)

Tipo de Convección	V[m/s]	Q[W]	Tbase [°C]	Taire [°C]	h [W/m <sup>2</sup> K]	$\eta$	$\varepsilon$
Natural							
Forzada							
Forzada							
Forzada							
Forzada							
Forzada							

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	86/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 7. Cuestionario

1. ¿Qué puede decir de la temperatura en la base de la placa con respecto a la obtenida en las dos prácticas anteriores? Argumente.
2. ¿Qué indica el valor de la efectividad obtenido? Además, compare el resultado con los obtenidos para aletas cilíndricas.

## 8. Conclusiones

## 9. Bibliografía

1. Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman y Adrienne S. Lavine, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Séptima edición, Jhon Wiley & Sons, 2011
2. Yunus A. Çengel; "Transferencia de calor y masa", tercera edición, Mac Graw Hill, 2007.
3. Holman; "Transferencia de calor", octava edición, Mac Graw Hill, 1998.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	87/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

# Práctica 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	88/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad en la ejecución

	Peligro	Riesgo asociado
<b>1</b>	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.
<b>2</b>	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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	89/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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.

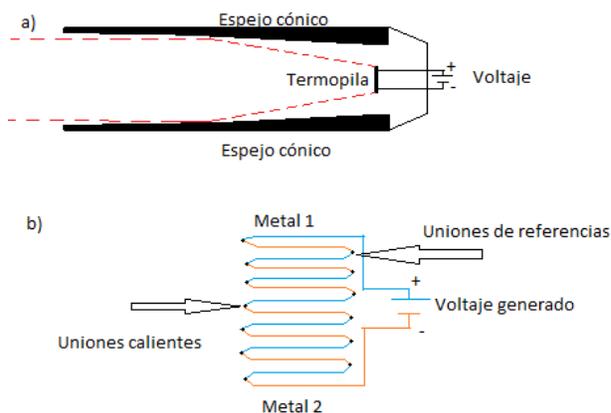


Figura 8.1 a) Esquema de un radiómetro de termopila, b) Diseño común de una termopila.

## 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	90/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

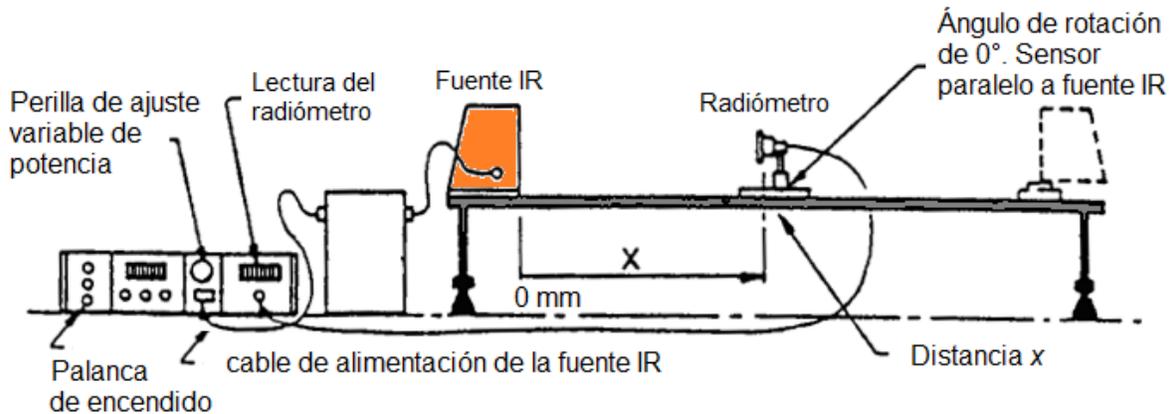


Figura 8.2 Equipo completo para realizar la práctica

- 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	91/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 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.

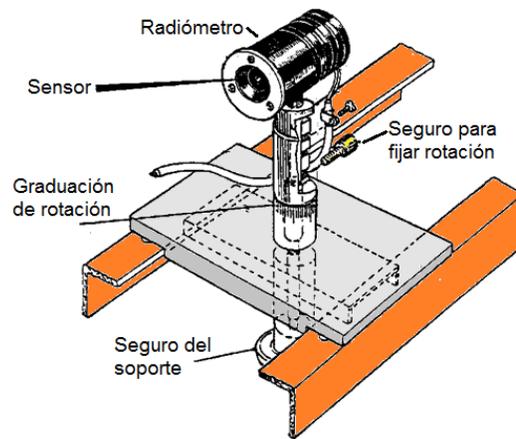


Figura 8.3. Radiómetro y accesorios.

- 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.

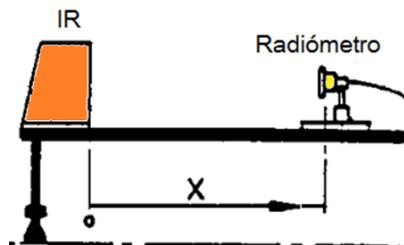


Figura 8.4. Radiómetro

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	92/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 <sup>2</sup> ]	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/ m<sup>2</sup>] vs r [m].

Tabla actividad 2

$\alpha$ [°]	R [W/m <sup>2</sup> ]
0	
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	

Realizar la gráfica R [W /m<sup>2</sup>] vs  $\alpha$  [°]

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	93/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			



Figura 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.
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:

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	94/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	95/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

# Práctica 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	96/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad en la ejecución

	Peligro	Riesgo asociado
<b>1</b>	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.

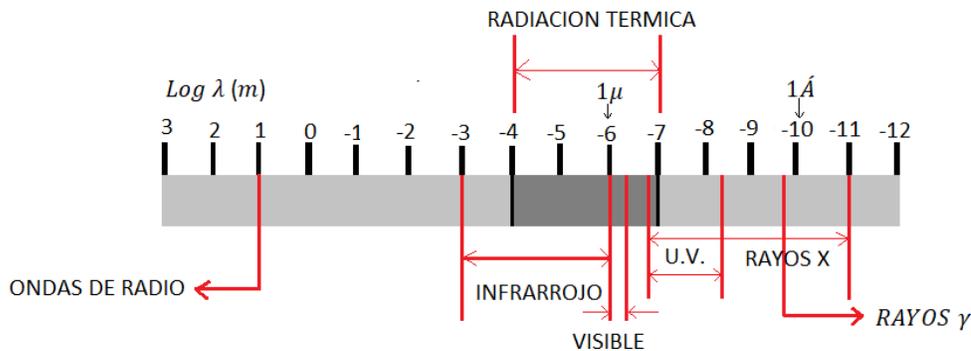


Figura 9.1 Espectro electromagnético

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  $\lambda$ . El emisor de esta energía recibe el nombre de cuerpo negro y la energía radiante está representada por la intensidad de

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	97/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

radiación espectral de un cuerpo negro  $I_b(T)$ , que es independiente de la dirección, pero función de la longitud de onda  $\lambda$  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  $I_b(T)$  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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	98/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

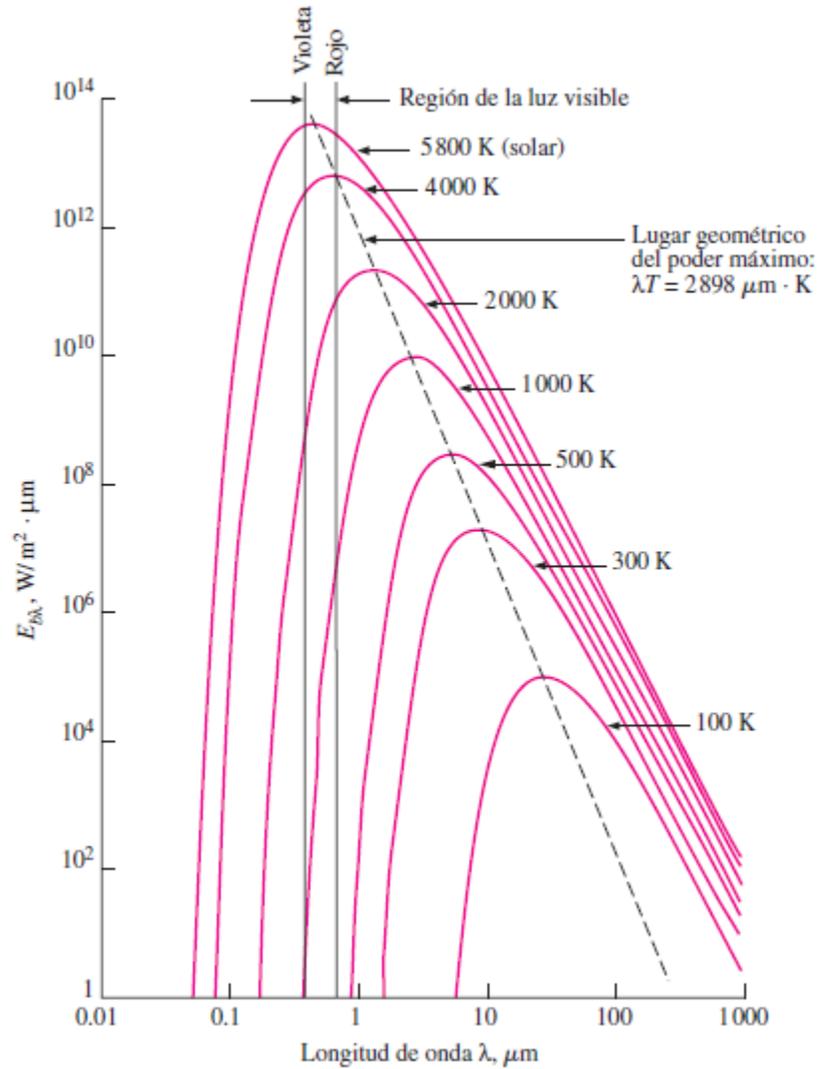


Figura 9.2 Distribución de energía espectral de un cuerpo negro en función de la longitud de onda a diferentes temperaturas [1]

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:

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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	99/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Es decir:

$$q_b = \sigma T^4$$

Ec. 9.5

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  $\sigma$  ( $=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ) 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  $\alpha$  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-Boltzmann para una superficie negra. Esto se logra si se obtiene el mismo valor de  $\alpha_b$  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

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	100/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 5. Desarrollo

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.

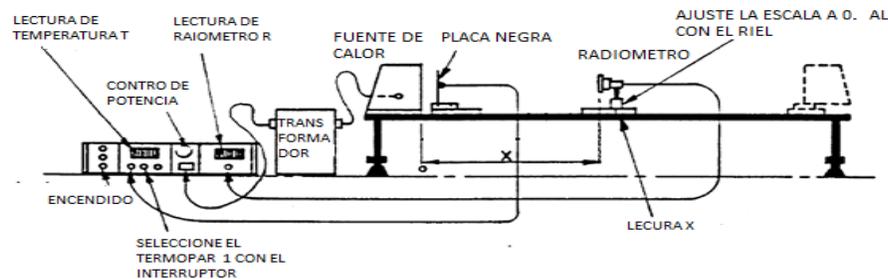


Figura 9.3. Equipo de radiación térmica

## 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 <sup>2</sup> )	Temperatura superficie $T_s$ (K)	Temperatura ambiente $T_a$ (K)	Calor radiación $q_b$ (W/m <sup>2</sup> )	coeficiente $Z$

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	101/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 7. Cuestionario

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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	102/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

# Práctica 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	103/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 1. Seguridad en la ejecución

	Peligro	Riesgo asociado
<b>1</b>	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  $\rho$ ,  $\alpha$  y  $\tau$  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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	104/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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  $\tau$  y transmitividad es cero, y por ello se les llama opacos, de modo que la ecuación anterior se transforma en  $\rho + \alpha=1$ .

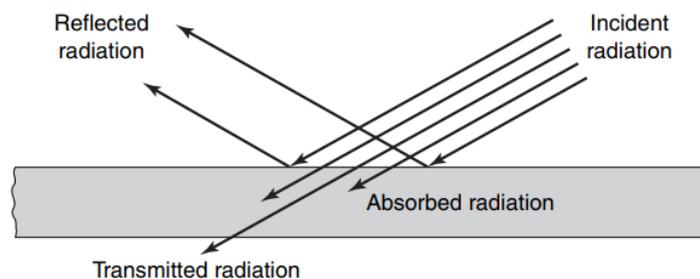


Fig. 10.1. Destino de radiación incidente en una superficie [1]

Finalmente, emisividad  $\epsilon$  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  $\alpha_b$  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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	105/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

## 4. Equipo y Material

- 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.

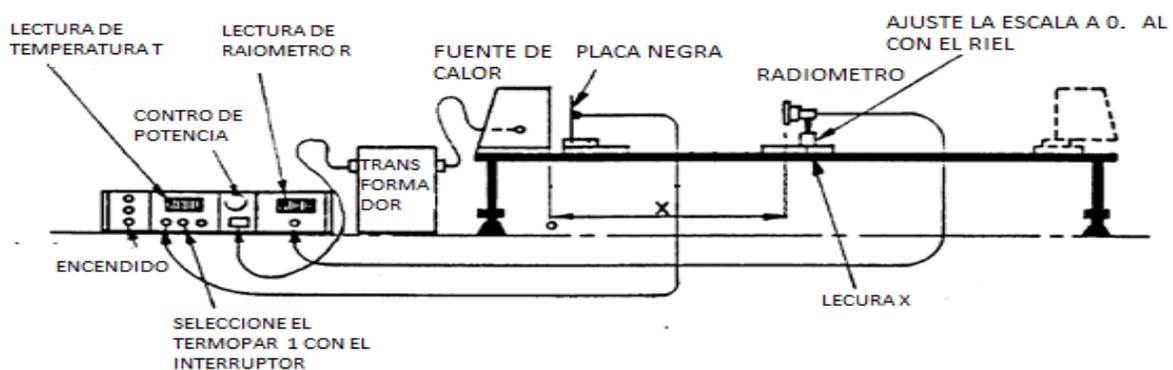


Figura 10.2 Arreglo experimental.

## 6. Resultados

La emisividad  $\epsilon$ , 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.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	106/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

El 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  $\alpha$  promedio y el calor máximo emitido.

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

Actividad 2. Placa pulida

Obtener la relación  $\varepsilon$  promedio y el calor máximo emitido.

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

Actividad 3. Placa opaca

Obtener la relación  $\varepsilon$  promedio y el calor máximo emitido.

	<b>Manual de prácticas del Laboratorio de Transferencia de Calor</b>	Código:	MADO-58
		Versión:	03
		Página	107/107
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	10 de febrero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Termofluidos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

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 <sup>2</sup>	K	K	W/m <sup>2</sup>		

## 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  $\alpha_b$  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.