

TRANSFERENCIA DE CALOR

Curso Obligatorio de Licenciatura, Octavo semestre.

Cátedra, Clases Auxiliares, 3 Tareas, Laboratorio, 3 Controles, 1 Examen.

NC: 60%, Tareas 15%, Laboratorio 25%

Temario:

Libros:

FP Incropera, D. de Witt, Fundamentos de Transferencia de Calor

Y. Cengel: Transferencia de Calor y Masa

JH Lienhard: A Heat Transfer Textbook.

Apuntes del Prof. en U-Cursos

La Transferencia de Calor es

- una Ciencia de la Ingeniería,
- una disciplina práctica

Su objetivo: Conocer los flujos de transporte de calor en procesos naturales y de Ingeniería.

Termodinámica:

Se basa en ciertas leyes generales de la Física (principios)

Predice la cantidad de energía que se requiere para llevar un sistema desde un estado a otro. Se ocupa de diversas formas de energía (calor, trabajo, etc.).

No informa sobre la velocidad de este proceso ni sobre el tiempo necesario para completarlo.

La transferencia de calor se ocupa exclusivamente del calor

Complementa a los principios de la TD, mediante leyes adicionales que permiten calcular la “velocidad” con que el calor se transfiere debido a diferencias de temperatura.

Los fenómenos de los cuales se ocupa la Transferencia de calor son irreversibles.

INGENIERÍA TÉRMICA,

- Mecánica de Fluidos
- Termodinámica
- Transferencia de Calor

En la industria su importancia está en el
Diseño de equipos, procesos y productos,
Generación de energía
Uso eficiente de la energía, en la refrigeración y climatización, etc.

Este curso junto con los anteriores (MF, TD) habilita para el estudio y diseño de máquinas térmicas.

Desde el punto de vista básico, la transferencia de calor forma parte de los **fenómenos de transferencia**, o de transporte, que incluyen además

- el flujo de fluidos,
- la circulación de corrientes eléctricas, y
- la difusión de solutos en solventes (llamada transferencia de masa).

En todos los fenómenos de transferencia identificamos:

- Una diferencia de potencial, o fuerza conductora que causa la transferencia (voltaje, diferencia de presión, temperatura)
- Un flujo de la entidad que se transfiere, entre puntos a potenciales diferentes (intensidad de corriente, caudal, flujo de calor)
- Una resistencia que el medio opone a la transferencia en la región en que existe la diferencia de potencial (fricción en tubos, resistencia eléctrica, resistencia térmica).

El potencial para la transferencia de calor es una diferencia de temperatura ($\Delta T = T_1 - T_2$), en la región en que se realiza la transferencia. El calor se transfiere de alta a baja temperatura.

El flujo de calor se expresa en unidades de energía por unidad de tiempo.

El medio a través del cual el calor se transfiere opone una resistencia a la transferencia (R).

Por ejemplo: si la pared de una casa tiene 22° C por el exterior y a 18°C por el interior, habrá flujo de calor desde el exterior al interior.

La magnitud de este flujo depende de

- la diferencia de temperatura (4°C o 4K en el ejemplo),
- de una propiedad del material llamada "conductividad térmica, y
- del espesor de la pared.

Se tiene entonces la siguiente relación genérica para el flujo de calor Q a través de un medio material:

$$Q = \frac{\Delta T}{R}$$

En que

- ✓ el flujo de calor Q se expresa en Watts,
- ✓ la diferencia de temperatura en K (o en °C)
- ✓ y la resistencia en K / Watt.

El flujo de calor es, entonces la cantidad de calor transferida por unidad de tiempo entre puntos a temperaturas T_1 y T_2 .

La resistencia depende de variables geométricas y propiedades físicas del sólido.

Modos de transferencia de calor:

1.- Conducción: Transferencia de calor en un sólido o un fluido en reposo.

Procede mediante movimientos (rotaciones, vibraciones y choques) a escala molecular.

Energía se transfiere de molécula a molécula.

La posición media de las moléculas es invariante.

Este movimiento es más intenso a mayor temperatura, por lo cual la energía se transfiere de alta a baja temperatura.

2.- Convección: Transferencia de calor dentro de un fluido que fluye con movimientos a escala macroscópica.

Se mezclan porciones de fluido a diferente temperatura.



Película

3.- Radiación: Emisión de radiación electromagnética por cuerpos a temperaturas distintas al cero absoluto.

Las radiaciones en el rango de longitudes de onda entre 0,1 y 100 micrometros tienen efectos térmicos cuando se emiten o absorben.

Estas corresponden al espectro infrarrojo, el visible y una pequeña parte del UV.

CONDUCCION

LEY DE FOURIER

Las leyes generales de la física (principios de la Termodinámica y leyes de movimiento del fluido) no son suficientes para el estudio de la transferencia de calor.

Se necesitan leyes particulares específicas para la conducción y la radiación.

(La convección no requiere leyes extras ya que es un fenómeno que resulta de la combinación entre la conducción de calor y el flujo de un fluido).

Se transfiere calor de alta a baja temperatura. Fourier (en 1822) encontró que



“el flujo de calor al interior de un sólido o fluido en reposo es proporcional al gradiente local de temperatura y a la conductividad térmica del material”.

Esta ley se derivó de observaciones empíricas.

Supone que el material se comporta como un medio continuo. La expresión matemática de la ley es como sigue:

Sea un medio con un campo de temperatura $T(X, Y, Z, t)$.

La ley de Fourier expresa los flujos de calor instantáneos en las tres direcciones por:

$$q_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial X}$$

$$q_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial Y}$$

$$q_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial Z}$$

q_x son flujos de calor por unidad de tiempo y por unidad del área normal a la dirección de propagación.

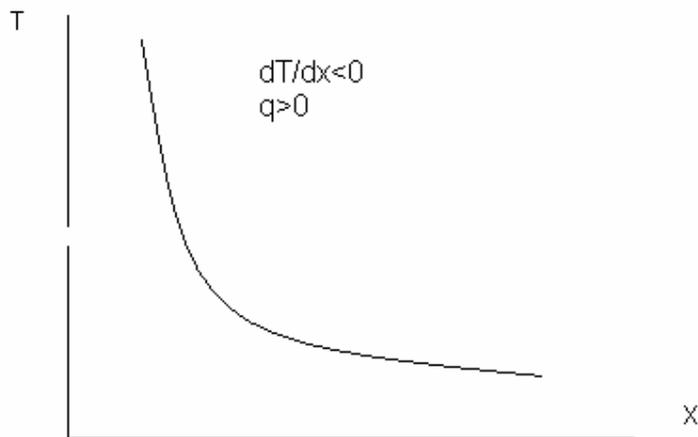
k es la conductividad térmica del material.

Convención de signo:

Los flujos de calor son positivos en el sentido positivo de la coordenada.

Para esto, la temperatura debe decrecer en el sentido positivo de la coordenada, es decir, $\partial T/\partial x < 0$.

Por lo tanto, el signo menos sirve para hacer positivo un flujo que depende de una derivada intrínsecamente negativa.



Unidades de q:

- W/m^2
- $kcal/hr\ m^2$,
- $BTU/hr\ pie^2$

Temperaturas: $^{\circ}C$ o K en SI, $^{\circ}F$ o R en sistema inglés.

Coordenadas en metros o pies

Unidades de conductividad térmica:

- $W/m\ ^{\circ}C$, $W/m\ K$ en sistema SI;
- $Kcal./hr\ m\ ^{\circ}C$ en MKS y
- $BTU/hr\ pie\ ^{\circ}F$ en sistema inglés.

Las conductividades térmicas pueden variar con la dirección en sólidos con fibras (ej. madera, materiales compuestos).

En la mayoría de los metales y aleaciones, y en los fluidos, las conductividades son independientes de la dirección (material isótropo).

Las conductividades pueden depender de la temperatura. La forma más usual de dependencia de k con T es la lineal creciente:

$$k(T) = k_0(1 + bT)$$

Valores seleccionados de conductividad térmica W/m K, a 0°C.

Plata	410	Cuarzo	41.6	Refrig. R- 12	0.073
Cobre	385	Mármol	1.83	Helio	0.141
Aluminio	202	Vidrio	0.78	Aire	0.024
Fierro	73	Agua	0.556	CO2	0.015

$k_{max}/k_{min} < 30000$

Para materiales aislantes: $k < 0.1$ W/m K

Ahorro de Energía en Vivienda.

Control de la resistencia térmica de muros, ventanas y techos.

Control de temperaturas ambientales:

Verano: 21-22 °C: No poner los aires acondicionados a una temperatura en que uno estaría con parka en invierno

Invierno: Similares criterios: La temperatura ambiental interna no debe ser una que en verano se considere de día caluroso.

¿Por qué?

Porque a mayor diferencia de temperatura con el exterior, mayores son las pérdidas o ganancias de calor.

Ecuación de conservación de Energía o Ecuación del Calor.

Expresa el primer principio de la TD para un sólido o un fluido en reposo. En un medio tridimensional con un campo (escalar) de temperatura $T(x, y, z, t)$, el balance instantáneo de energía en un volumen de control fijo en el espacio se escribe:

Energía entra + Energía generada = Energía sale + Energía acumulada

- Las energías entran y salen del volumen de control por conducción.
- Se genera energía dentro de este volumen mediante fuentes que pueden ser eléctricas, químicas o nucleares.
- La energía puede acumularse en el V.C. debido a la capacidad térmica del cuerpo

Se tiene una fuente térmica.

Sea S la tasa de generación de energía por unidad de volumen y de tiempo en el volumen de control.

El balance anterior expresado en forma diferencial se escribe como:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial(q_x)}{\partial x} - \frac{\partial(q_y)}{\partial y} - \frac{\partial(q_z)}{\partial z} + S$$

Reemplazando en los flujos de calor por conducción la ley de Fourier tenemos:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S$$

Si la conductividad es constante e isotrópica, esta ecuación se puede poner en la forma más común:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S$$

Los términos, de izquierda a derecha, representan

- el término transiente o de acumulación de energía en el volumen de control,
- los términos conductivos
- y el término fuente.

Formulación general de problemas de conducción:

OBJETIVO: Determinar los flujos de calor en un material sólido sometido con condiciones externas y con un estado inicial.

En general $T(x, y, z, t)$.

Se determina primero el campo de temperatura resolviendo la ecuación del calor.

Luego se determina los flujos de calor mediante la ley de Fourier.

La ecuación para sólido isótropo y de conductividad constante

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + S$$

Condición inicial para la temperatura:

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z)$$

Condiciones de borde para la temperatura:

Se necesitan dos por cada dirección (ya que la ecuación es de 2º orden en T). Son de varios tipos:

1. Condición de Dirichlet: Temperatura impuesta (T_1) en un borde en $x = 0$:

$$T(0, y, z, t) = T_1$$

2. Condición de Neumann: Flujo de calor impuesto en un borde en $x = 0$:

$$q_o = -k \frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial x}$$

De esta condición se deduce que si el flujo impuesto a una pared es cero, $\partial T / \partial x = 0$, que es la condición de pared perfectamente aislada.

3. Condición mixta: Superficie sólida en contacto con un fluido en movimiento, habrá transferencia de calor por convección en el fluido, que está bien mezclado y tiene una temperatura uniforme, T_1 .

El calor por unidad de área que recibe o entrega una superficie sólida en contacto con un fluido a distinta temperatura es proporcional a la diferencia entre

- la temperatura de la pared, T_p
- y la temperatura media del fluido, T_1 .

Esta es la llamada "Ley de enfriamiento de Newton", (que no es una ley física) se expresa:

$$q = h\Delta T = h(T_p - T_1)$$

h es el "coeficiente convectivo"

Se expresa en $W / m^2 K$ y **no es una propiedad física**, sino que debe determinarse independientemente para cada situación, a partir de información adicional.

h depende de la geometría, del régimen del flujo del fluido y de las propiedades termofísicas de éste.

Se verá su determinación en la parte de convección de este curso.

La condición de borde de convección entre la superficie en $x=0$ (cara izquierda de una placa) a un fluido a temperatura T_1 , a su izquierda:

$$h(T_1 - T(0, y, z, t)) = -k \frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial x}$$

Esta condición iguala el calor transferido a la superficie por el fluido (convección a la izquierda de la superficie) con el calor recibido por la superficie, y que es transferido al resto del sólido por conducción.

La condición para la cara derecha ($x=L$) es:

$$h(T(L, y, z, t) - T_1) = -k \frac{\partial T(L, y, z, t)}{\partial x}$$

La diferencia entre ambas condiciones se deriva de la convención de signo: Flujo da calor positivo en dirección positiva de la coordenada.

PROCESOS TRANSIENTES

A partir de un cambio de condiciones de borde, la temperatura en cada punto evoluciona en el tiempo. $T(x, y, z, t)$

PROCESOS PERMANENTES

Después de un tiempo suficiente desde el cambio de condiciones de borde, se alcanza un "régimen permanente", en que la temperatura ya no varía en el tiempo.

Esta condición se expresa:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

CASOS DE CONDUCCION UNIDIRECCIONAL PERMANENTE

El problema más simple de conducción se describe así:

Se tiene una placa o pared de espesor L ,

- ✓ con dos caras a diferentes temperaturas ($T_1 > T_2$),
- ✓ se ha alcanzado un régimen permanente
- ✓ no hay generación de calor ($S=0$).
- ✓ no hay gradientes de temperatura definidos según las direcciones y y z :
 $\partial T / \partial y = 0$, $\partial T / \partial z = 0$,
- ✓ el régimen es permanente $\partial T / \partial t = 0$,

La ecuación del calor se reduce a:

$$\frac{d^2 T}{d x^2} = 0$$

Condiciones de borde:

$T=T_1$ en $X=0$,

$T=T_2$ en $x = L$

La solución es:

$$T(x) = (T_2 - T_1) \frac{x}{L} + T_1$$

Aplicando la ley de Fourier a esta distribución de Temperatura, se obtiene el flujo de calor a través de la pared, que es:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{k(T_1 - T_2)}{L} = -\frac{k\Delta T}{L}$$

en que $\Delta T = T_2 - T_1$. El flujo de calor es, entonces, independiente de la coordenada x .

Si la placa tiene un área A , normal al flujo de calor, el calor total que la atraviesa es:

$$Q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L}$$

Los dispositivos para la determinación experimental de conductividades térmicas se basan en reproducir esta situación.

Si se escribe la ecuación anterior en la forma:

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{L/kA}$$

Se observa en el denominador un grupo de variables denominado "resistencia térmica" de la placa. Esta ecuación sugiere una analogía entre el flujo de calor y la intensidad de corriente en un circuito.

Continúa...