

OPERACIONES UNITARIAS

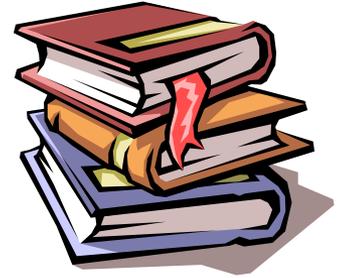
2023



UT 1 - *CALOR*



BIBLIOGRAFIA



- **Apuntes de la cátedra de Operaciones Unitarias.**
- **OPERACIONES UNITARIAS EN ING. QUIMICA-**
McCabe – Smith- Harriot
- **PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR – Kern.**
- **TRANSMISIÓN DEL CALOR - Cao. Ed 3**
- **PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS – FOUST Y**
OTROS Ed. 2- R-10

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Prácticamente en todas las operaciones que realiza el ingeniero interviene la producción o absorción de energía en forma de calor. Por lo tanto, las leyes que rigen la transferencia de calor y el tipo de aparatos, cuyo fin principal es el control del flujo de calor, tienen una gran importancia

Cuando dos objetos que están a temperaturas diferentes se ponen en contacto térmico, el calor fluye desde el objeto de temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja. El flujo neto se produce siempre en el sentido de la temperatura decreciente.

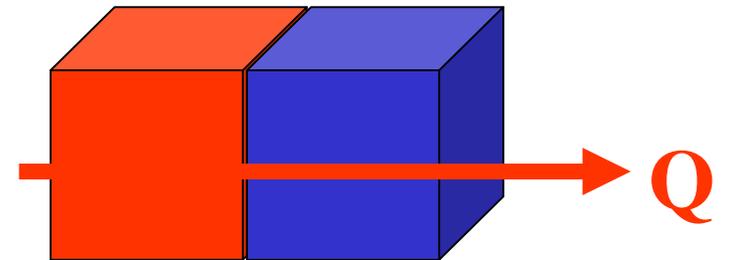
MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE CUERPOS CALIENTES Y FRIOS

- El calor, es una forma de transmisión de energía de un cuerpo a otro.
- Otra forma es el trabajo.
- El calor se puede definir como la energía en tránsito producida por una diferencia de temperaturas.

Es decir, la energía (el calor) se transferirá de un cuerpo a otro mientras las temperaturas sean diferentes. Si los cuerpos están a la misma temperatura, cesa la transferencia del calor.

$$T^{\circ} > T^{\circ}$$



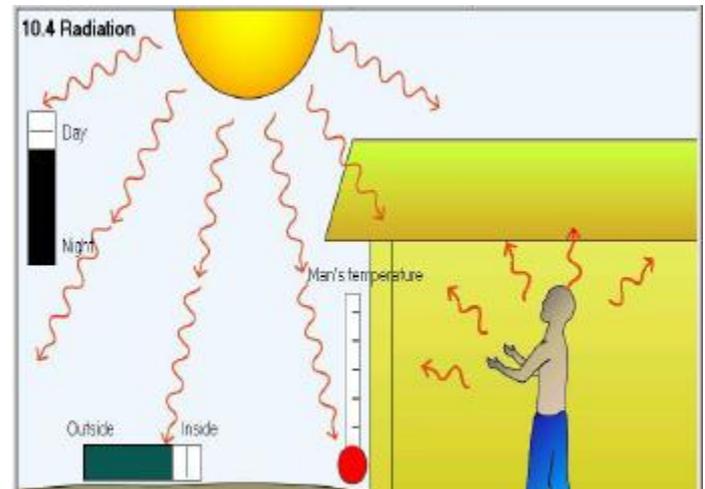
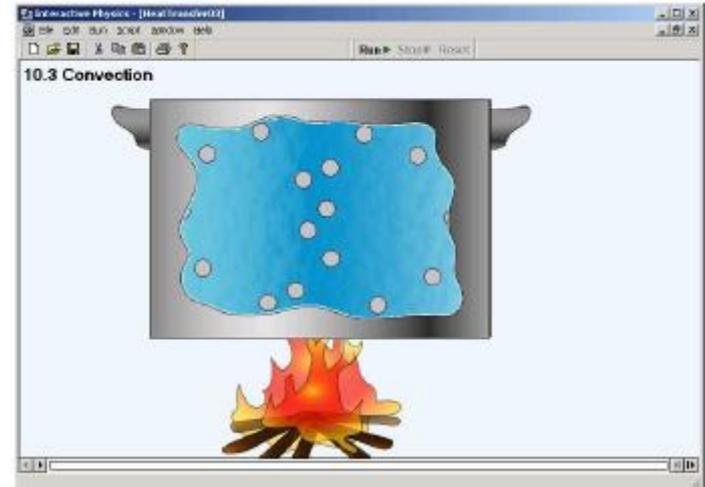
FUENTE

RECEPTOR

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

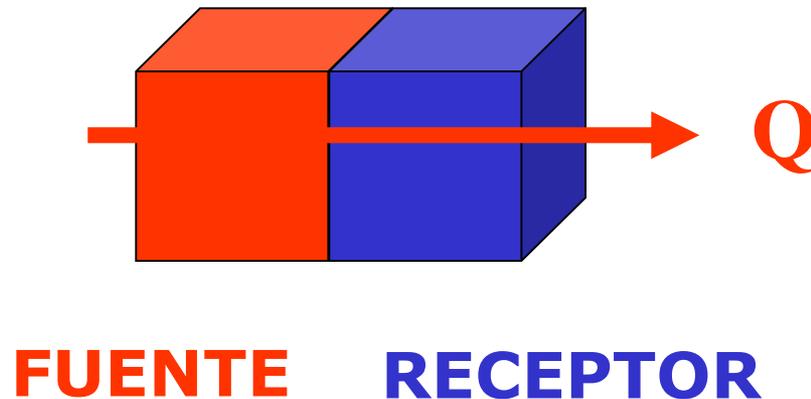
En cualquier industria de procesamiento de materia son numerosos los equipos que emplean la transferencia de calor.

Esos equipos pueden emplearse para calentar, enfriar, evaporar, condensar o para cambiar el estado físico de las corrientes líquidas o gaseosas que se emplean para procesarlos.



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

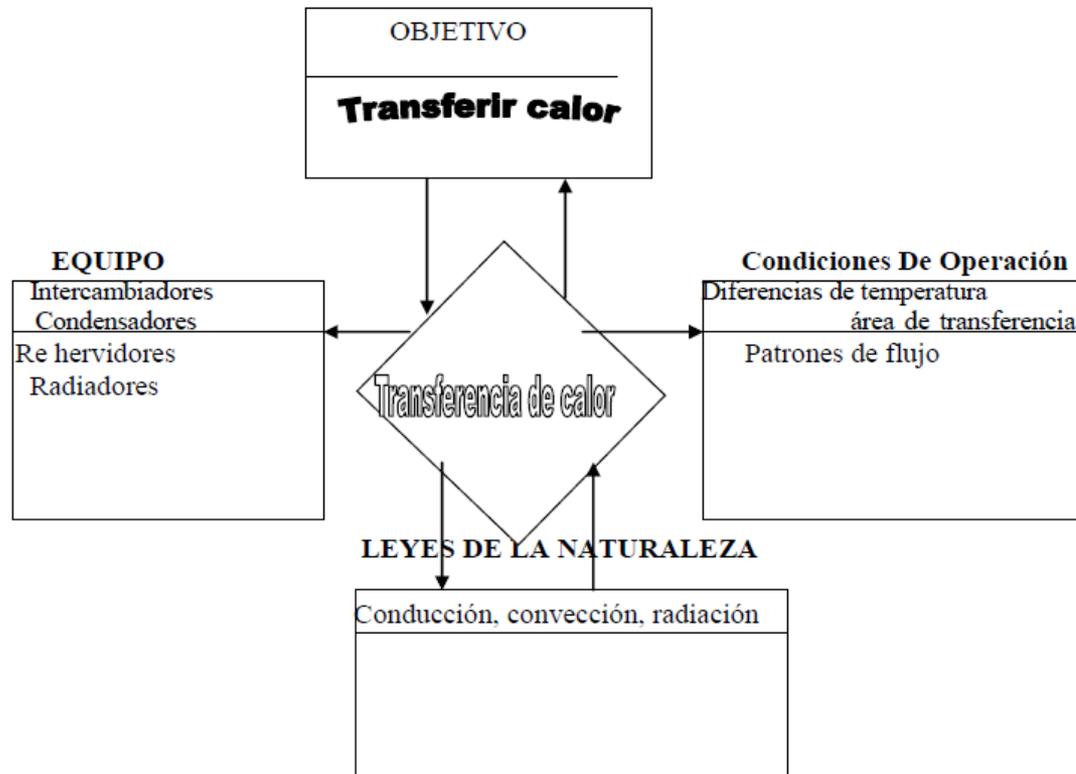
ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES A LAS QUE EL CALOR SE INTECAMBIA ENTRE FUENTES Y RECEPTORES DE CALOR



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor puede transferirse de un cuerpo a otro mediante tres mecanismos:

conducción, convección y radiación.



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Objetivo

Mediante las operaciones de transferencia de calor se desea cambiar el contenido térmico de las corrientes de un proceso ya sea enfriando, calentando, evaporando, o condensando la corrientes.

Leyes de la naturaleza

Temperatura: se puede definir como una medida de la intensidad del calor. El calor y la temperatura están relacionados entre sí, pero son diferentes. La temperatura no es energía en tránsito, el calor sí.

Calor y trabajo: Son dos las formas en que se puede transmitir la energía a un objeto: el calor y el trabajo: El trabajo es la forma de transferir energía de un cuerpo a otro mediante una diferencia de presiones. El calor se transfiere a un objeto cuando existe una diferencia de temperaturas

Energía: es todo aquello capaz de producir movimiento en un cuerpo. La energía no se crea ni se destruye sólo se transforma. El calor se puede transferir mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación

MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE *CALOR POR CONDUCCION*



MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE *CALOR*

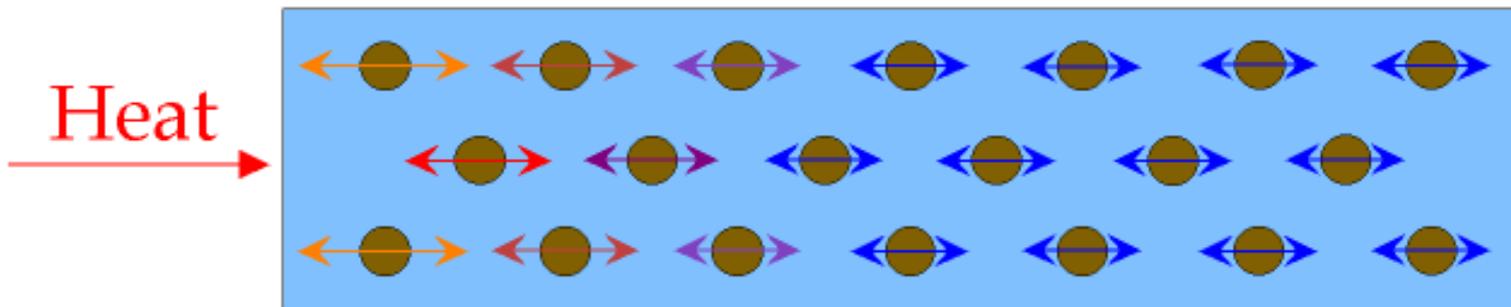


- El calor es energía en tránsito (en movimiento) de un cuerpo o sistema a otro debido a una diferencia de temperaturas entre los cuerpos o los sistemas.
- Esta transferencia ocurre por:
 - conducción
 - convección
 - radiación.

CONDUCCIÓN

La *conducción* es el único mecanismo de transmisión del calor posible en los medios sólidos opacos.

Cuando en tales medios existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura debido al contacto directo entre moléculas.



CONDUCCIÓN



- El calor se conduce preferentemente a través de los sólidos, pero también a través de los líquidos y los gases.
- A los materiales que son malos conductores del calor se les llama aislantes, (plásticos, maderas).
- Los materiales que conducen bien el calor son conductores, (metales).
- .La facilidad para conducir el calor se mide mediante la conductividad térmica k, a mayor conductividad térmica mejor transmisor de calor por conducción.
- La cantidad de calor que se transmite por conducción está dada por la ley de Fourier:

$$Q = -k A \frac{dT}{dx}$$

Q = flujo de calor transmitido por unidad de tiempo (kcal / h) o (W).

k = conductividad térmica en (kcal / h m °C) o (W / m °K).

A = área de transferencia en m².

T = temperatura °C o °K

LEY DE FOURIER



$$\text{FLUJO} \propto \frac{\Delta \text{ POTENCIAL}}{\text{RESISTENCIA}}$$

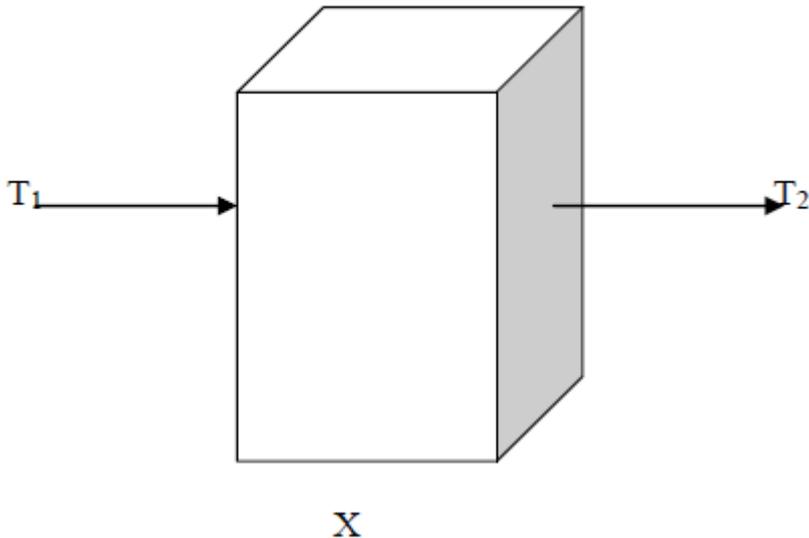
$$\frac{dq}{dA} = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{Estado estacionario}$$

$$\frac{dq}{dA} = -k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dt \quad \text{Estado no estacionario}$$

CONDUCCIÓN

La ecuación de Fourier debe integrarse según la geometría del cuerpo.

Por ejemplo la conducción a través de paredes está dada por:



$$Q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{x} = \frac{\Delta T}{R}$$

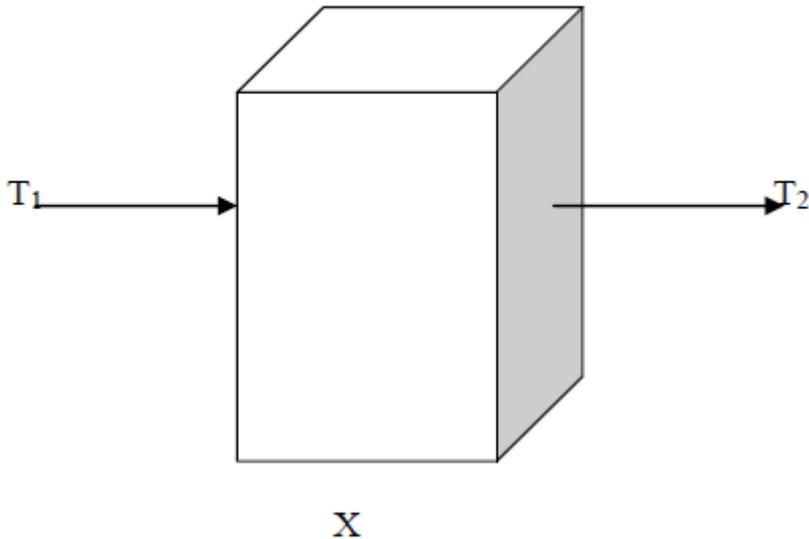
En donde R es la resistencia

$$R = \frac{1}{\frac{x}{kA}}$$

CONDUCCIÓN

La ecuación de Fourier debe integrarse según la geometría del cuerpo.

Por ejemplo la conducción a través de paredes está dada por:



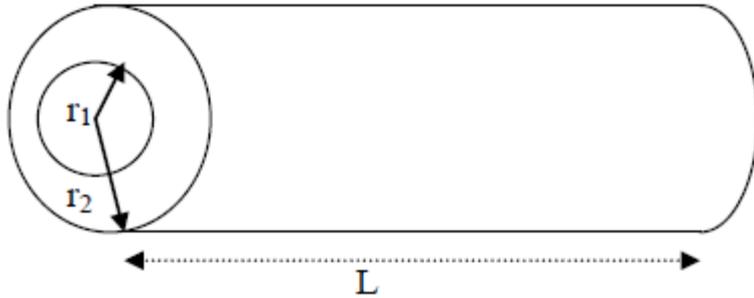
$$Q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{x} = \frac{\Delta T}{R}$$

En donde R es la resistencia

$$R = \frac{x}{kA}$$

CONDUCCIÓN

La conducción en cuerpos cilíndricos está dada por:

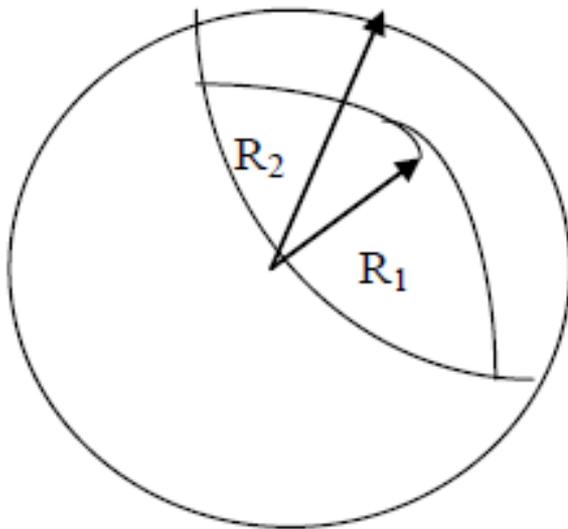


$$Q = \frac{k2\pi L(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\Delta T}{R}$$

$$R = \frac{1}{\ln \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{1}{2\pi Lk} \right)}$$

CONDUCCIÓN

La conducción a través de cuerpos esféricos estaría dada por:



$$Q = 4\pi k r_1 r_2 \frac{(T_1 - T_2)}{r_2 - r_1} = \frac{\Delta T}{R}$$

CONDUCCIÓN



La integración de la ecuación de Fourier para cuerpos homogéneos de cualquier forma es complicada. Una aproximación satisfactoria puede obtenerse a partir de:

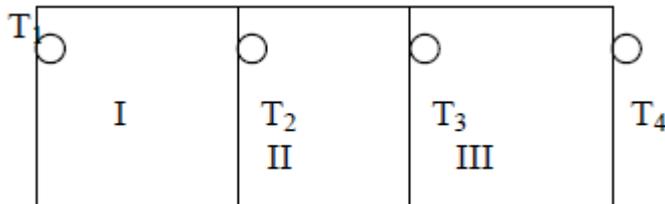
$$Q = A_{media} k \frac{\Delta T}{x}$$

$$\text{En donde } A_{media} = \frac{A_{externa} + A_{interna}}{2}$$

CONDUCCIÓN

Transferencia de calor por conducción a través de varias resistencias

- Con frecuencia se suelen poner varios cuerpos de materiales diferentes en serie (uno a continuación del otro) por lo que el calor debe atravesar cada uno de ellos.
- A régimen permanente el calor que fluye a través de cada pared debe ser el mismo.



$$Q_1 = \frac{k_1 A_1 \Delta T_1}{x_1} = \frac{k_2 A_2 \Delta T_2}{x_2} = \frac{k_3 A_3 \Delta T_3}{x_3}$$

$$\text{Si } R = \frac{x}{kA}$$

$$Q = \frac{\Delta T_1}{R_1} = \frac{\Delta T_2}{R_2} = \frac{\Delta T_3}{R_3} = \frac{\Sigma T}{\Sigma R} = \frac{T_1 - T_4}{\Sigma R}$$

En donde:

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$\text{Si } A_1 = A_2 = A_3$$

$$Q = \frac{(T_1 - T_4)A}{\frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3}}$$

CONDUCCIÓN



Transferencia de calor por conducción a través de varias resistencias

Para superficies cilíndricas

$$R = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi Lk}$$

Para superficies concéntricas esféricas

$$R = \frac{r_2 - r_1}{4\pi k r_1 r_2}$$

CONDUCCIÓN



Transferencia de calor simultánea por convección, convección y radiación

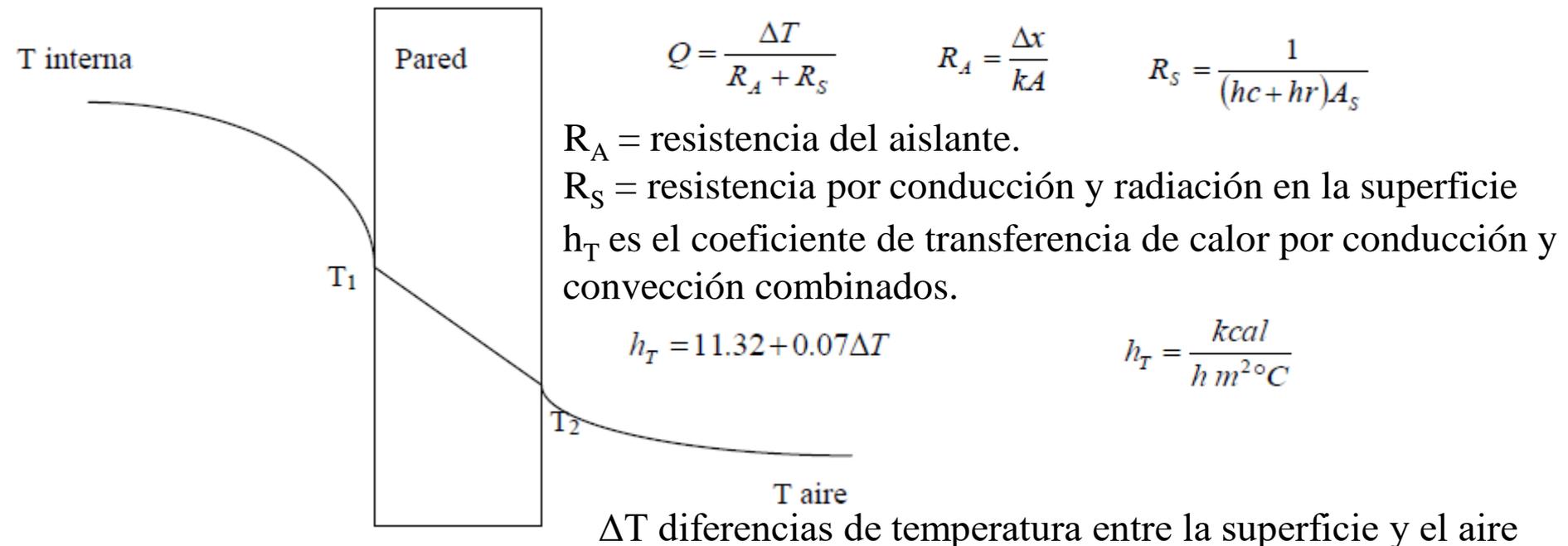
- Con frecuencia además de la conducción se presenta también la convección y la radiación.
- La convección es la transferencia de calor mediante el movimiento de corrientes de un fluido, (desarrollaremos mas adelante).
- La radiación es la transferencia de calor por medio de radiación térmica.

CONDUCCIÓN

Transferencia de calor simultánea por convección, convección y radiación

Considérese el caso de la pared de un equipo:

Las pérdidas simultáneas por conducción, convección y radiación se puede calcular mediante:



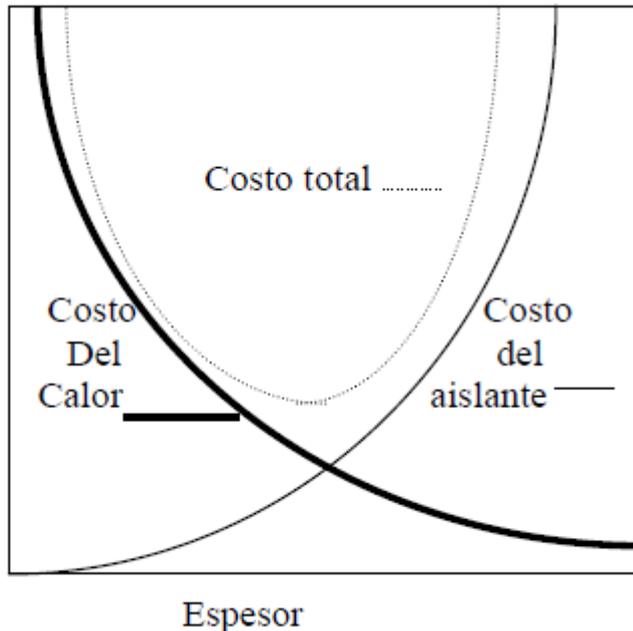
CONDUCCIÓN

Espesor óptimo de aislantes

- Al aumentar el espesor del aislante, la cantidad de calor que sale de una superficie decrece, pero el costo del aislante aumenta.
- El espesor más económico, es aquel para el cual la suma del costo anual de pérdidas por calor más el costo anual del aislante (depreciación) sea mínimo

El espesor óptimo para superficies planas está dado por :

$$E = \left[\sqrt{\frac{nQk(T_s - T_a)}{A C(10^6)} - \frac{k}{h_T}} \right]$$



E = espesor óptimo (m)

n = horas de operación por año

C = costo del aislante aplicado (pesos / m^3)

k = conductividad térmica del material ($kcal / h m^{\circ}C$)

A = fracción del costo que debe amortizarse en un año

T_s = temperatura de la superficie (sin aislar)

T_a = temperatura ambiente

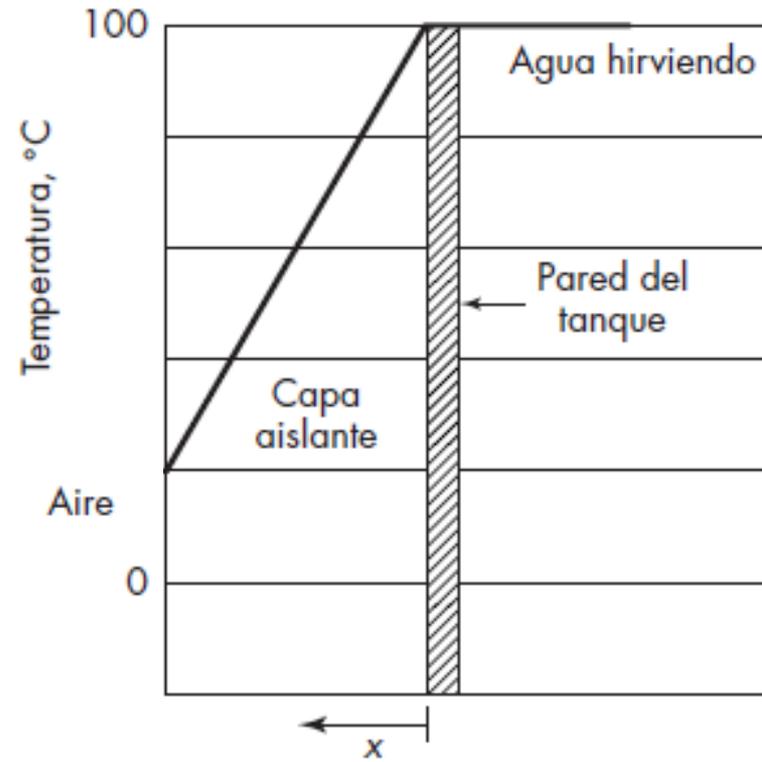
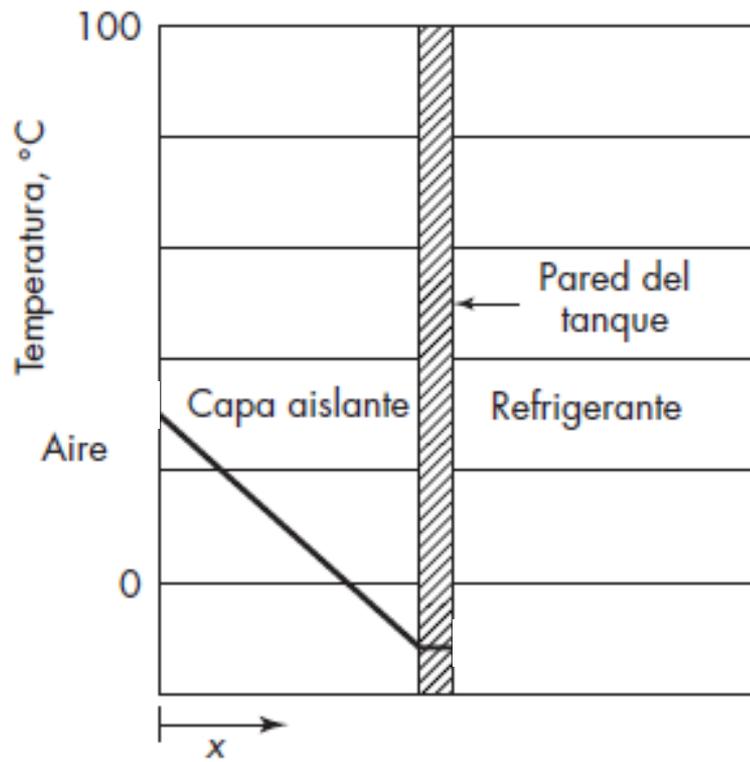
Q = el costo del calor perdido en pesos / millón de kilocalorías

h_T = coeficiente total de convección y radiación.

FLUJO DE CALOR

CONDUCCIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

Gradientes de temperatura en el exterior de tanques aislados:
a) flujo de calor hacia el tanque; b) flujo de calor desde el tanque.



COEFICIENTE DE CONDUCTIBILIDAD TERMICA

k; PROPIEDAD DE TRANSPORTE DE LA MATERIA

a) SUSTANCIA ISOTROPICA

b) T° O RANGO DE T°

$$k = k_0 + a \Delta T$$

c) MATERIAL COMPUESTO

d) MATERIAL AMORFO

PESO ESPECIFICO

e) SUSTANCIA HIGROSCOPICA

% HUMEDAD

f) SUSTANCIA GASEOSA

PRESION

Conductividades térmicas de algunos materiales a temperatura ambiente

Material	k ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)		
Vapor de agua		} Malos conductores	
Aire	0.026		
Agua líquida			
Mercurio	8.4		}
Espuma de poliestireno	0.036		}
Papel	0.13		
Vidrio	0.35-1.3		
Hielo		} Buenos conductores	
Plomo	34		
Acero	45		
Aluminio	204		
Cobre	380		

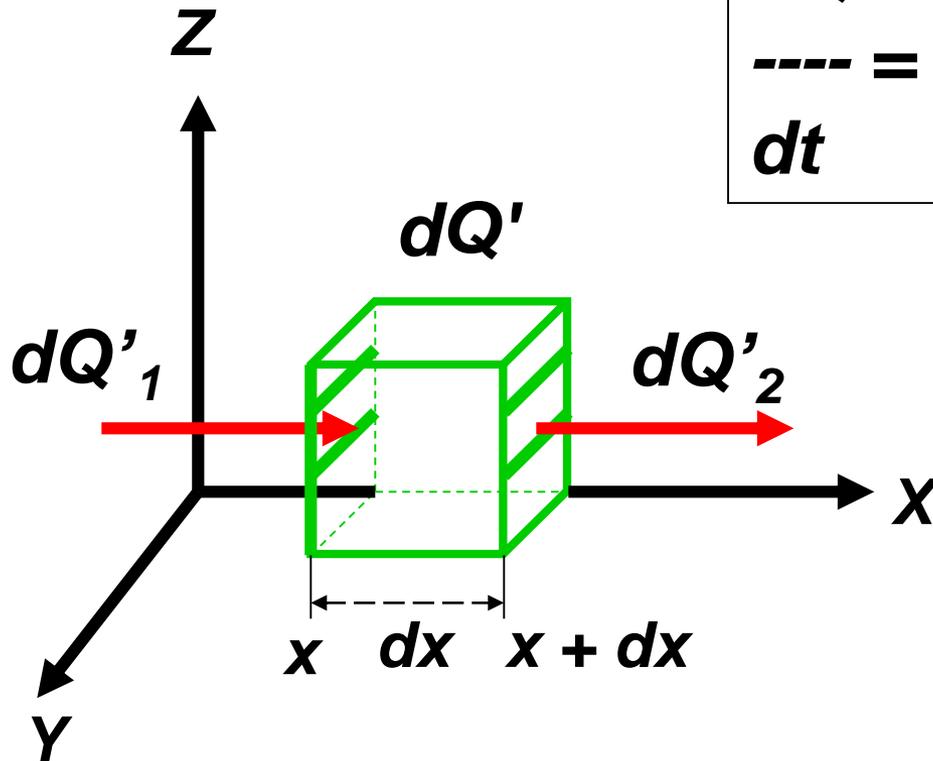
La conductividad térmica cambia con el estado de agregación

... pero la capacidad de transporte de calor no depende sólo de la conducción

ECUACION GENERAL DE LA CONDUCCION

CONDUCCIÓN DE CALOR EN ESTADO ESTACIONARIO

$$\frac{dQ'}{dt} = kdA \frac{dT}{dx}$$



$$Q = k \frac{A}{L} \Delta T$$

FLUJO DE CALOR

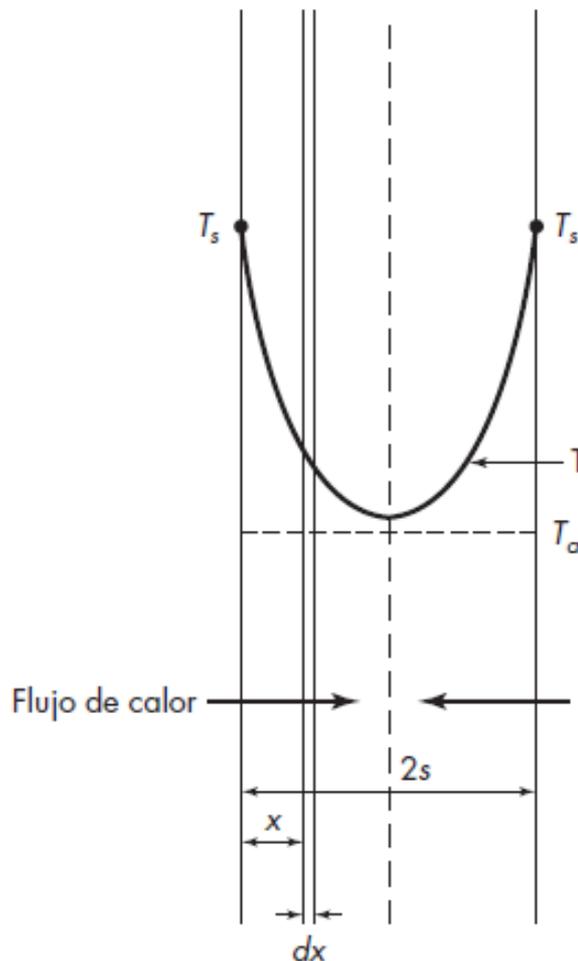
CONDUCCIÓN DE CALOR EN ESTADO NO ESTACIONARIO

Bloque de material de espesor $2s$

Temperatura inicial uniforme T_θ

Temperatura final T_s en un tiempo corto t_T

Las dos superficies son isotérmicas



Temperatura Gradiente de temperatura en x $\frac{\partial T}{\partial x}$,

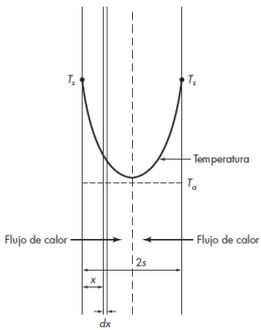
El calor que entra en el intervalo de tiempo dt en x

$$-kA \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) dt$$

El gradiente a la distancia $x + dx$

$$\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} dx$$

FLUJO DE CALOR



CONDUCCIÓN DE CALOR EN ESTADO NO ESTACIONARIO

El flujo de calor que sale de la capa a la distancia $x + dx$

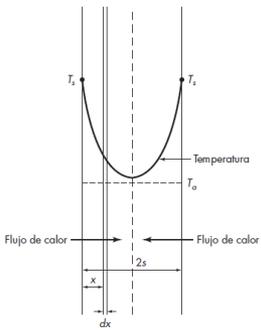
$$-kA \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) dt$$

Exceso de calor que entra y que sale, correspondiente a la acumulación de calor en la capa dx

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} dt + kA \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \right) dt = kA \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dt$$

La acumulación de calor en la capa provoca un aumento de temperatura de la misma

FLUJO DE CALOR



CONDUCCIÓN DE CALOR EN ESTADO NO ESTACIONARIO

c_p = calor específico

ρ = densidad de la capa

$$(\rho A dx) c_p (\partial T / \partial t) dt$$

Calor acumulado = al producto de la masa (volumen por densidad) por el calor específico y por el incremento de temperatura

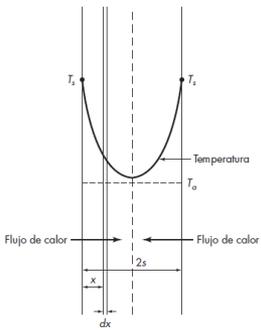
Aplicando un balance de calor

$$kA \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dt = \rho c_p A dx \frac{\partial T}{\partial t} dt$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

α = *difusividad térmica* del sólido y es una propiedad del material

FLUJO DE CALOR



CONDUCCIÓN DE CALOR EN ESTADO NO ESTACIONARIO

calentamiento o enfriamiento, por ambos lados, de un bloque infinito de espesor conocido, con temperatura constante de las superficies

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_a} = \frac{4}{\pi} \left[e^{-a_1 Fo} \operatorname{sen} \frac{\pi x}{2s} + \frac{1}{3} e^{-9a_1 Fo} \operatorname{sen} \frac{3\pi x}{2s} + \frac{1}{5} e^{-25a_1 Fo} \operatorname{sen} \frac{5\pi x}{2s} + \dots \right]$$

T_s = temperatura constante media de la superficie del bloque

T_a = temperatura inicial del bloque

T_b = temperatura local en el sitio x y en el tiempo t_T

Fo = número de Fourier, definido como $\alpha t_T / s^2$

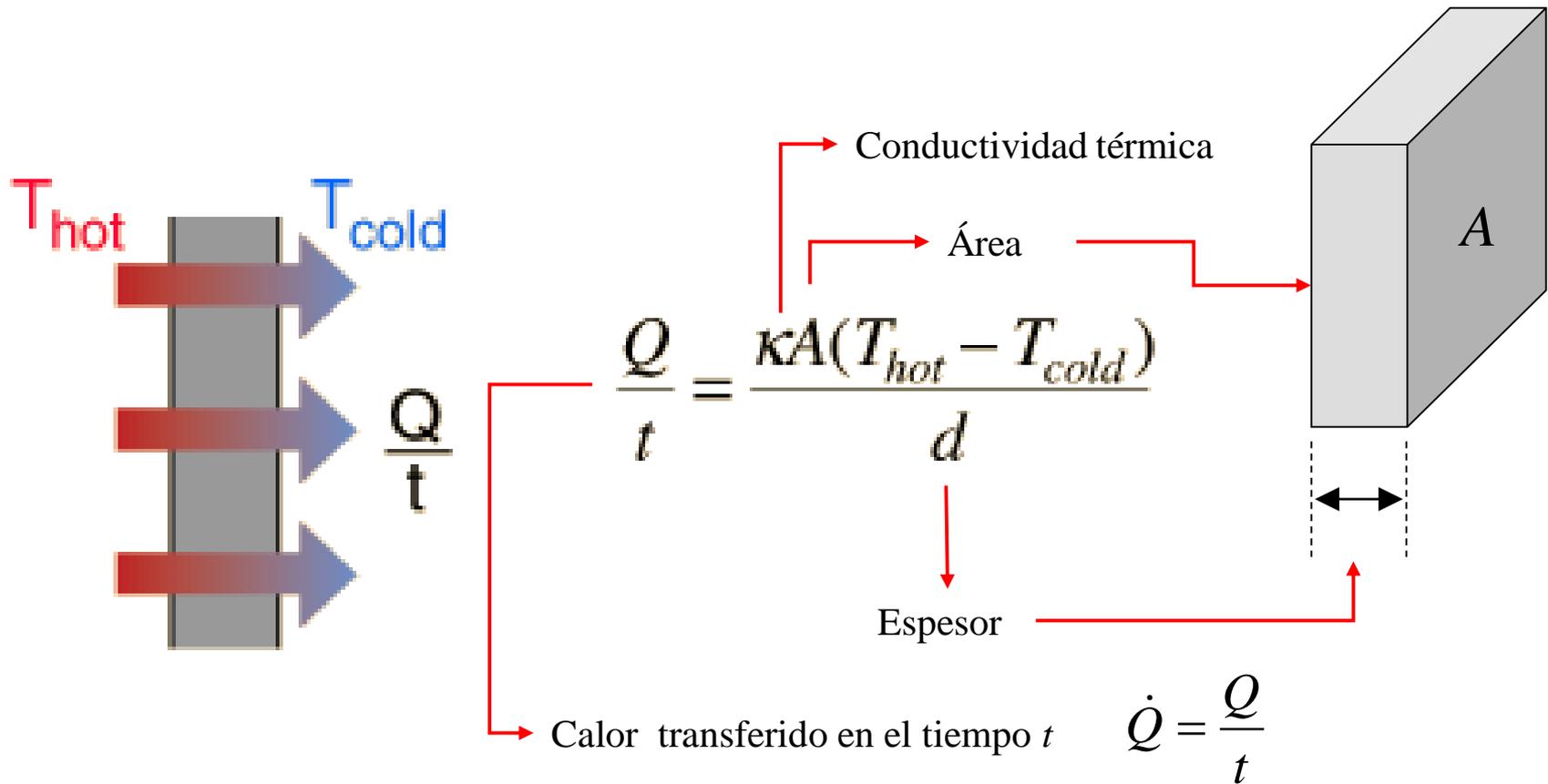
α = difusividad térmica

t_T = tiempo de calentamiento o enfriamiento

s = mitad del espesor del bloque

$a_1 = (\pi/2)^2$

EJEMPLO 1: CONDUCCIÓN DEL CALOR (Placa plana)



EJEMPLO 2: CONDUCCIÓN DEL CALOR (tabique)

Flujo de calor a través del tabique de una habitación, de 34 cm de espesor, siendo las temperaturas interior y exterior de 22 °C y 5 °C respectivamente. Tómesese como valor de la conductividad $k = 0.25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Gradiente de temperaturas

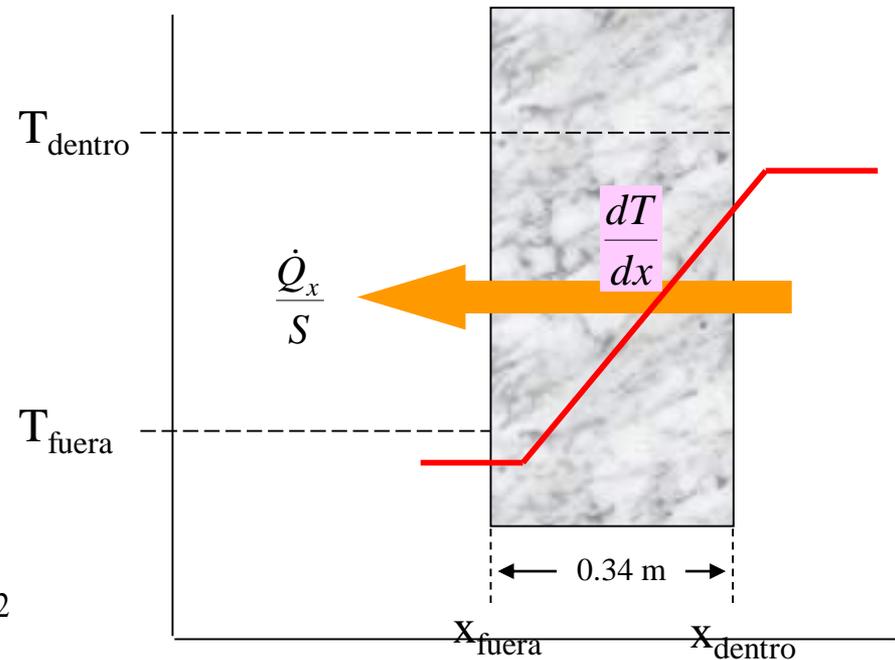
$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_{dentro} - T_{fuera}}{x_{dentro} - x_{fuera}} = \frac{22 - 5}{0.34} = 50 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$$

Gradiente de temperaturas constante →
→ la temperatura varía linealmente

Densidad de flujo

$$\frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \frac{dT}{dx} = -0.25 \cdot 50 = -12.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

Gradiente de temperaturas constante → densidad de flujo constante



RESISTENCIA TERMICA

Cuando el calor se transfiere a través de una pared aparece una resistencia a la conducción



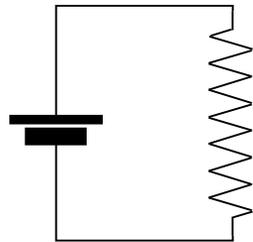
← x →

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{x} = -\frac{T_2 - T_1}{x/\lambda} = -\frac{T_2 - T_1}{R} = \frac{\Delta T}{R}$$

↑
Conductividad

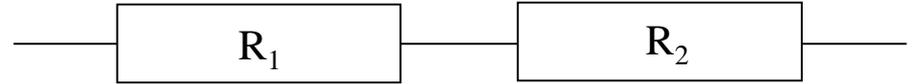
↓
Resistencia térmica en $W^{-1} \cdot m^2 \cdot K$

Similitud con circuitos eléctricos



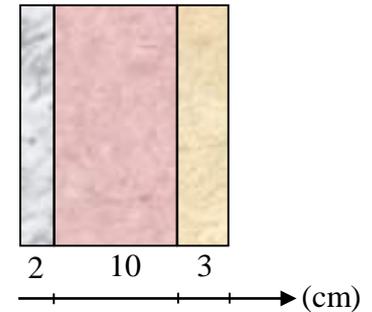
$$I = \frac{V_0}{R} \quad \Rightarrow \quad \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\Delta T}{R}$$

EJEMPLO 3: RESISTENCIAS EN SERIE



Ejemplo

Calcúlese la resistencia térmica de la pared de un refrigerador, formada por tres capas de material, cuyos espesores son, de dentro afuera 2 cm, 10 cm y 3 cm. Las conductividades térmicas de los tres materiales son, respectivamente, 0.25, 0.05 y 0.20 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.



$$R_1 = \frac{\Delta x_1}{\lambda_1} = \frac{0.02}{0.25} = 0.08 \quad \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

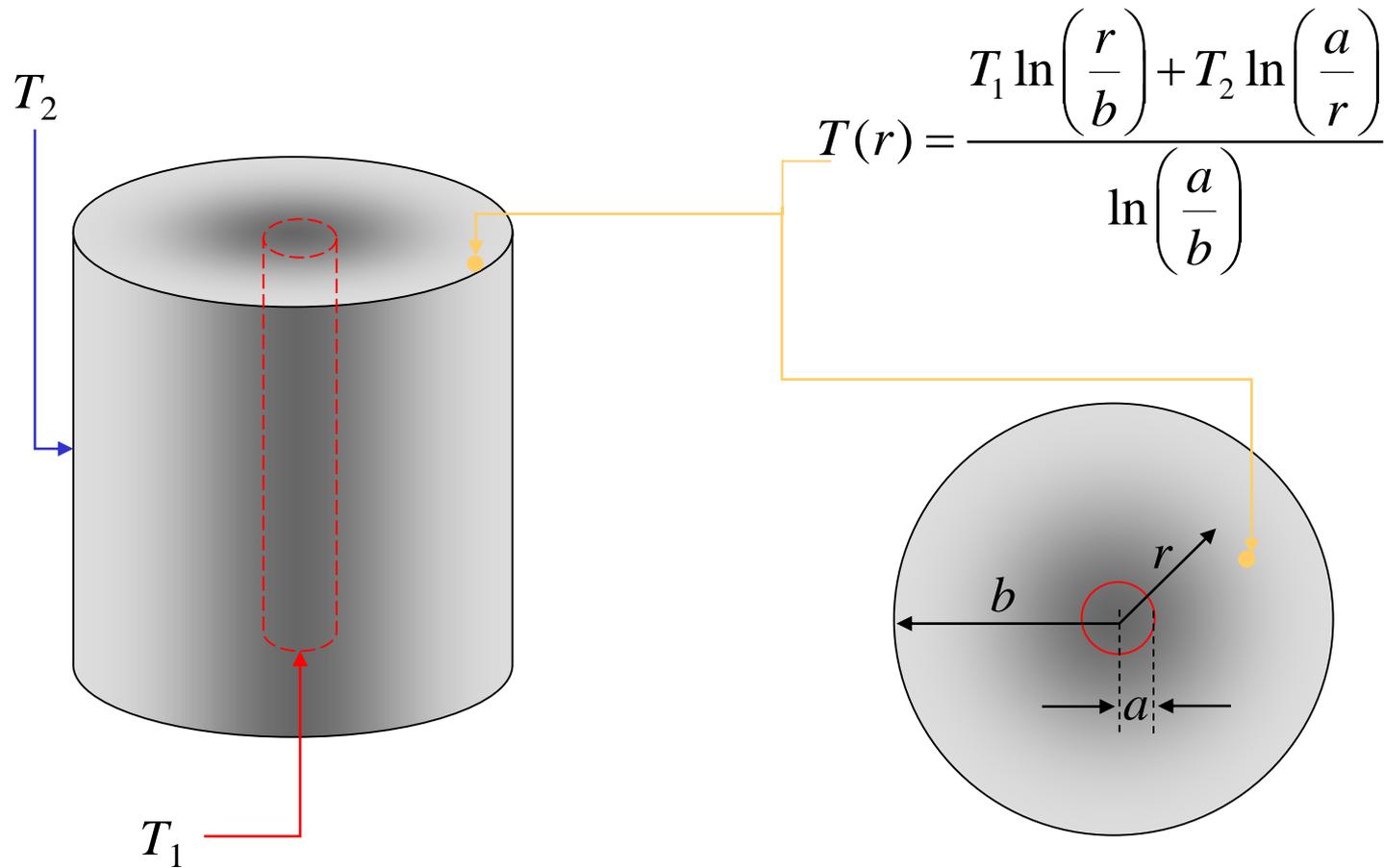
$$R_2 = \frac{\Delta x_2}{\lambda_2} = \frac{0.10}{0.05} = 2.00 \quad \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$R_3 = \frac{\Delta x_3}{\lambda_3} = \frac{0.03}{0.20} = 0.15 \quad \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

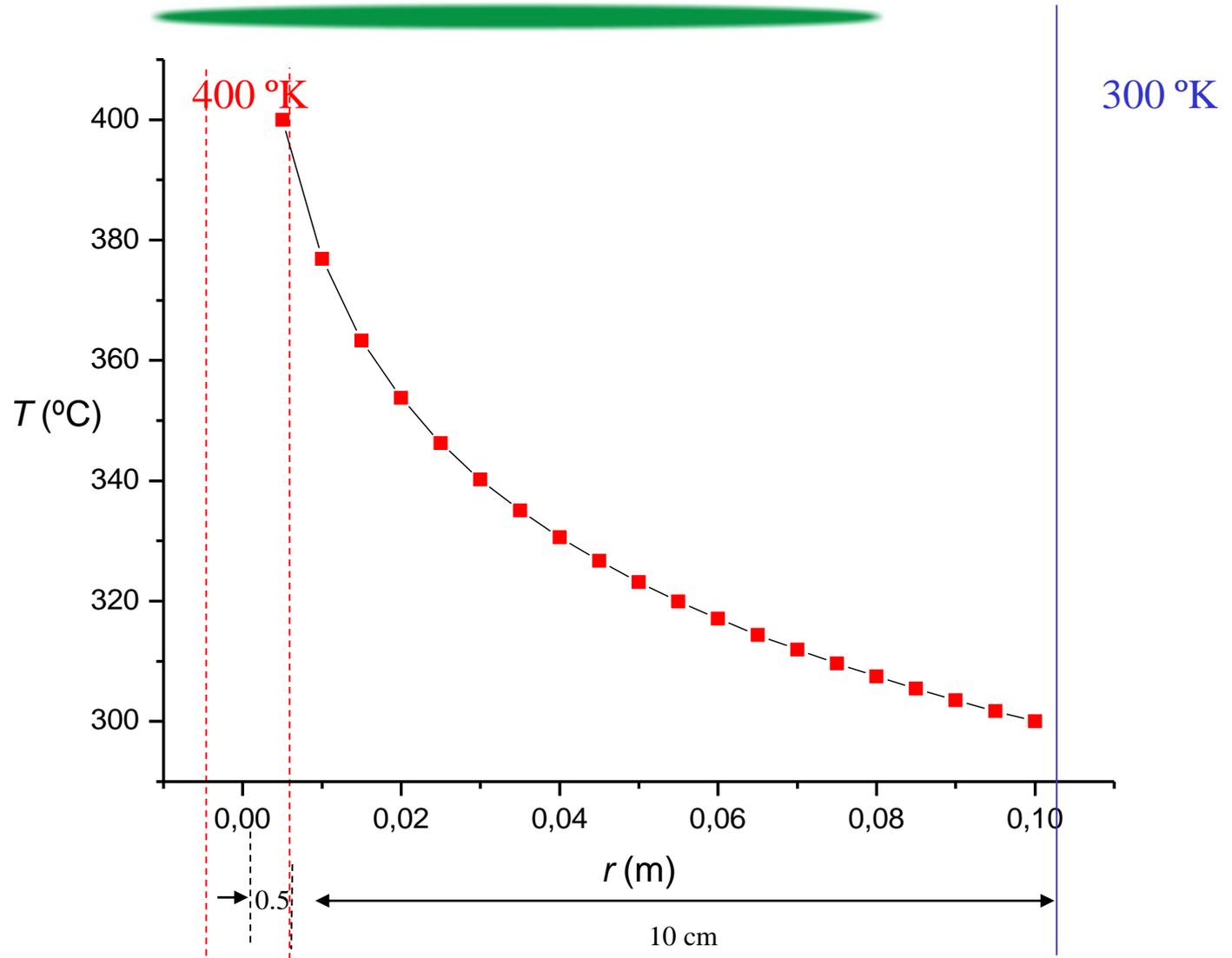
Resistencias en serie

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 2.23 \quad \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

EJEMPLO 4: CONDUCCION EN EL AISLAMIENTO DE UNA TUBERIA



EJEMPLO 4: CONDUCCION EN EL AISLAMIENTO DE UNA TUBERIA





**MUCHAS GRACIAS
POR SU ATENCIÓN**

