

INGENIERÍA DE CALOR

INGENIERÍAS.

Dr. Omar Martínez Alvarez.



Propiedades termodinámicas de las sustancias puras.

Griego

Termodinámica

Thermos (calor)

Dynamics (potencia)

Es el estudio de la energía, sus formas y transformaciones, así como sus interacciones con la materia.

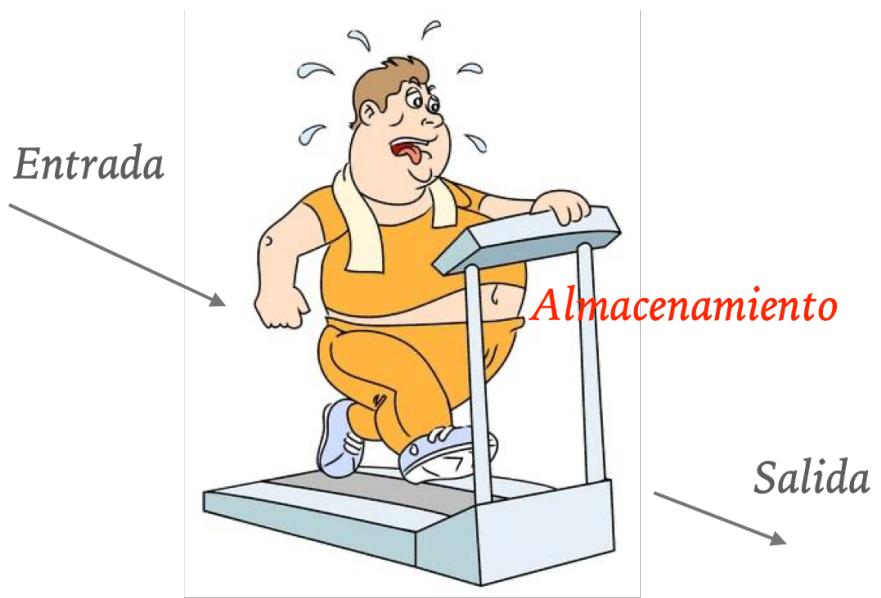
Conservación de la energía

E_{potencial}



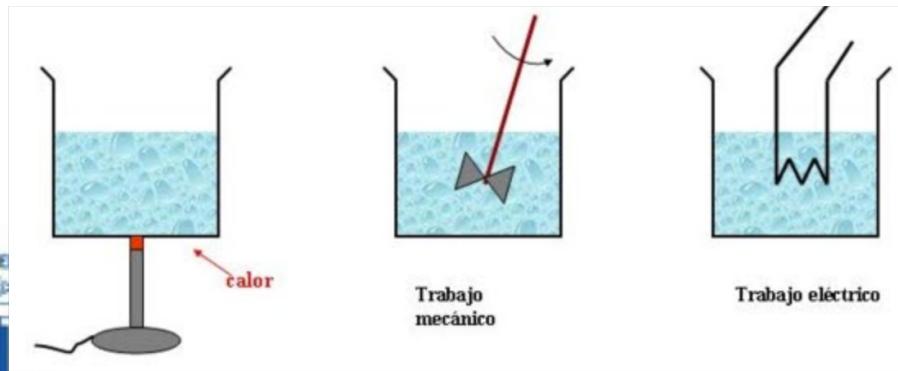
$$E_{\text{mecánica}} = E_{\text{potencial}} + E_{\text{cinética}}$$





Primera ley de la termodinámica.

La energía es una propiedad termodinámica.



$$\Delta U = Q - W$$

Calor y trabajo son formas equivalentes de variar la energía de un sistema termodinámico.

El Primer Principio de la Termodinámica

- Un sistema puede intercambiar energía con su entorno cuando
 - Recibe trabajo (W), o trabaja ($-W$)
 - Recibe calor (Q), o cede calor ($-Q$)
- La energía interna (U) se ve afectado por estos dos procesos
 - El cambio de la energía interna (ΔU) se puede determinar en función de los puntos extremos de un proceso termodinámico

$$\Delta U = Q + W$$

- Para cambios infinitésimos

$$dU = dQ + dW$$

Cambio de
energía interna

Trabajo recibido
Calor recibido

El Primer Principio de la Termodinámica

¡ CUIDADO !

- Hay maneras diferentes de definir la 1^a Ley

$$dU = dQ + dW$$

Cambio de
energía interna

Trabajo recibido
Calor recibido

$$dU = dQ - dW$$

Cambio de
energía interna

Trabajo realizado
Calor recibido

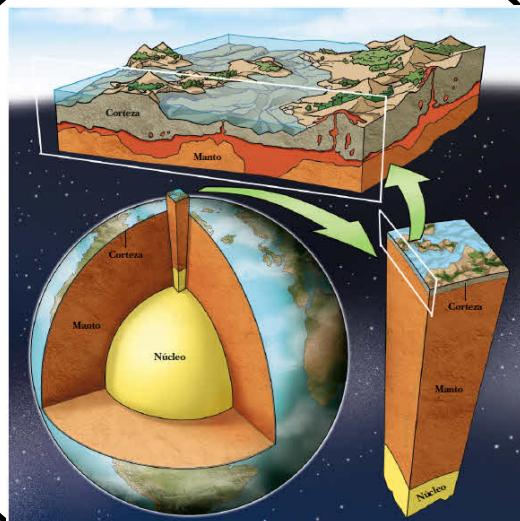
- Clave:

- NO memorizar ecuaciones
- Dominar los principios de la 1^a Ley:

conservación de la energía
calor como una forma de energía

Energía interna

Sistema



- ❖ Energía nuclear
- ❖ Energía química
- ❖ Energía térmica

Estacionario

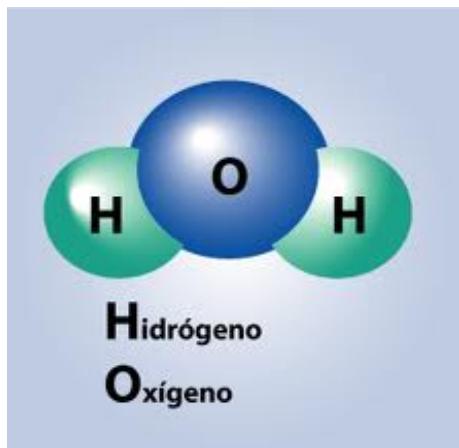
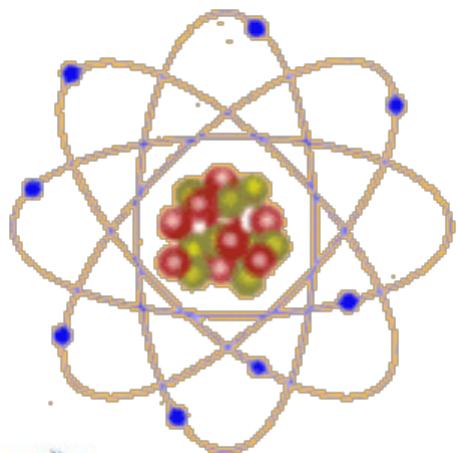


$$\Delta T$$

➤ Calor: **transferencia de energía** por los límites de un sistema *debido a la diferencia de Temperatura (T)*.

- Capacidad calorífica
- Calor latente

➤ Energía interna: = Energía térmica + Energía de enlace



Energía cinética
y
“Temperatura”

Capacidad calorífica y calor específico

- Una relación fundamental:
 - La capacidad calorífica: C
 - La energía añadida (el calor): Q
- Dado que C depende de la masa, definimos el "calor específico"

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT}$$

$$Q = mc\Delta T$$

$c \approx \text{cte.}$

$c = c(T)$

$$Q = C\Delta T \quad C \equiv \frac{dQ}{dT}$$

25°C

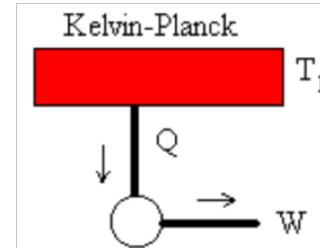
Sustancia	$c \text{ (J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$
Plomo	128
Oro	129
Mercurio	140
Plata	234
Silicio	703
Vidrio	837
Mármol	860
Alcohol	2400
Agua	4186

Segunda ley de la termodinámica.

Determinar la conservación de la calidad de la energía así como la degradación que sufre durante un proceso. Cuantifica y señala la dirección de un proceso.

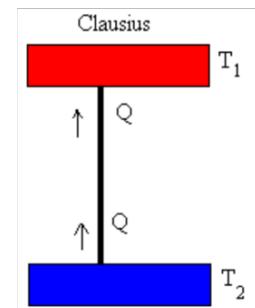
Kelvin

Es imposible realizar una transformación cuyo único resultado sea convertir en trabajo todo el calor absorbido a partir de una sola fuente.



Clausius

Es imposible realizar una transformación cuyo único resultado sea transferir calor de un cuerpo a otro que tenga una temperatura mayor o igual que la del primero.



Calor



Unidades energéticas, magnitudes y cálculos

Unidades de calor

Caloría (cal)

Calor necesario para calentar 1 g de H₂O

SI

Joule (J)

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

1er Principio

EXPERIMENTO DE JOULE

E_{entrada}



E_{sistema}

E_{salida}

$$\Delta U = Q + W$$



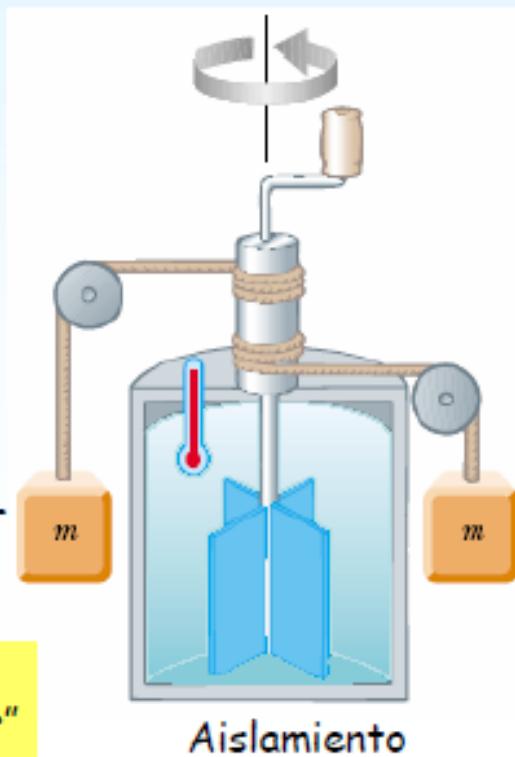
El experimento de Joule

- La energía potencial se reduce (caída de **dos masas**)
- Incrementa la energía cinética
 - De las varillas y del agua
- La fricción
 - Reduce la energía cinética del agua
 - Aumenta la T del agua
- Variando las condiciones del experimento, Joule observó

$$(m+m)gh = 4.186 \Delta T m_{\text{agua}}$$

4.186 J de energía mecánica aumenta la T de 1 g de agua por 1°C

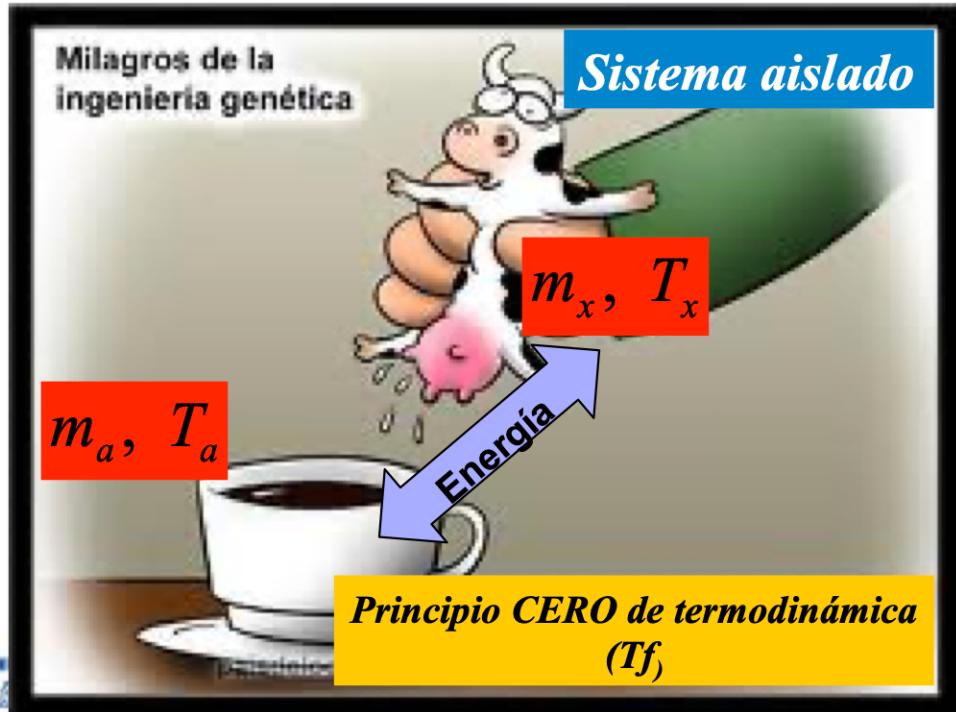
"El equivalente mecánica del calor"



Temperatura y ley cero de la termodinámica.

Cómo determinar C_p de una materia

Calorimetría



+

$$Q_x = m_x c_x (t_f - T_x)$$

-

$$Q_a = m_a c_a (t_f - T_a)$$

$$C_a = \frac{m_x c_x (t_f - T_x)}{m_a (T_a - T_f)}$$

Comparación entre los mecanismos de Transferencia de Calor



Conducción: el calor se desplaza desde el extremo caliente del atizador hacia el extremo frío.

Ocurren de un medio a T alta hacia otro de T mas baja



Radiación: el calor atraviesa el espacio en forma de rayos infrarrojos.

Convección: el agua calentada por la placa asciende mientras el agua más fría desciende.

Puede ocurrir entre dos cuerpos separados por un medio mas frío que ambos

Mecanismos de transmisión de calor

Conducción: transferencia de energía desde cada porción de materia a la materia adyacente por contacto directo, sin intercambio, mezcla o flujo de cualquier material.

Convección: transferencia de energía mediante la mezcla íntima de distintas partes del material: se produce mezclado e intercambio de materia.

Convección natural: el origen del mezclado es la diferencia de densidades que acarrea una diferencia de temperatura.

Convección forzada: la causa del mezclado es un agitador mecánico o una diferencia de presión (ventiladores, compresores...) impuesta externamente

Radiación: transferencia de energía mediada por ondas electromagnéticas, emanadas por los cuerpos calientes y absorbidas por los cuerpos fríos.



MODOS BASICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

- **CONDUCCION:** Ley de Fourier

$$q_x^n = -k \frac{dT}{dx}$$

- **CONVECCION** Ley de Newton.

$$q^n = h(T_s - T_\infty)$$

- **RADIACION:** Ley de Stefan Boltzman



$$E_b = \sigma T_s^4$$

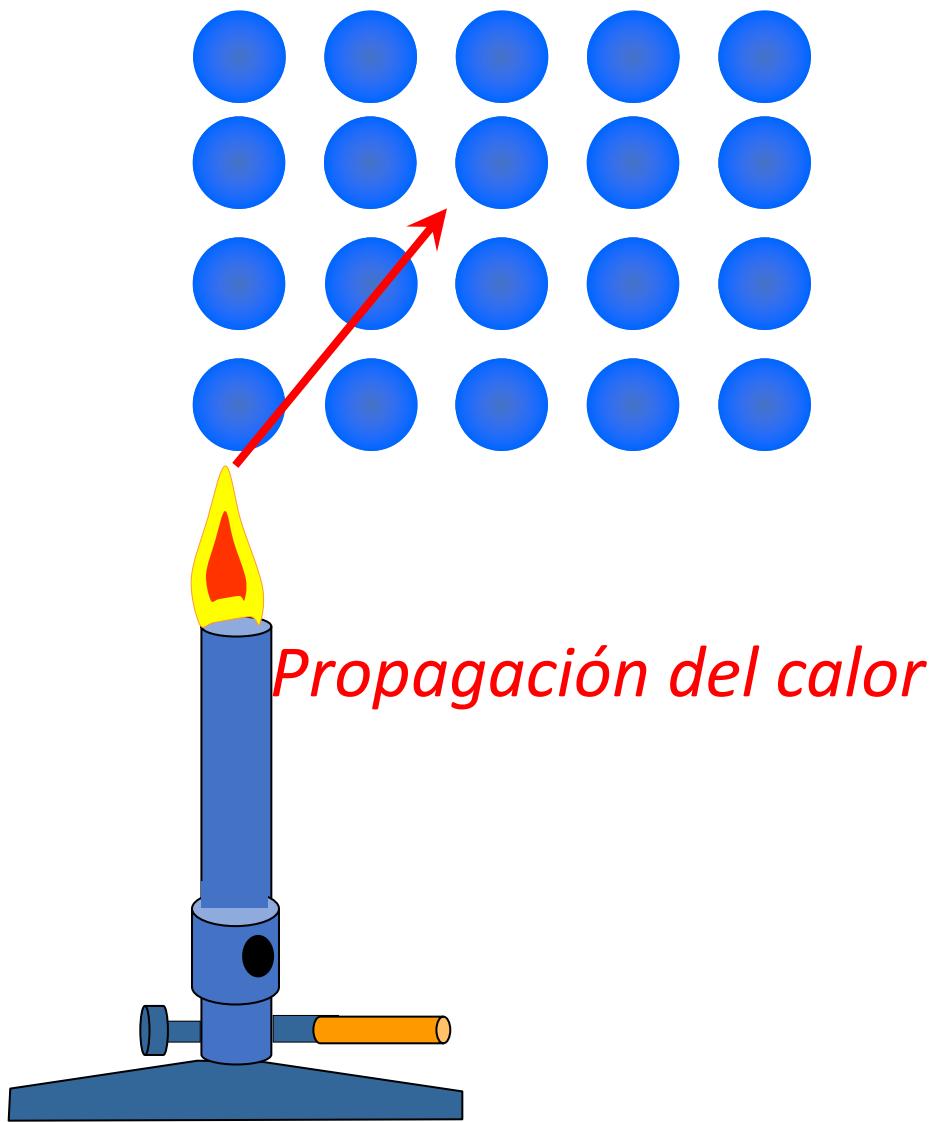


Resumen de los procesos de transferencia de calor

Modo	Mecanismo(s)	Ecuación o modelo	Propiedad de transporte o coeficiente
Conducción	Difusión de energía debido al movimiento molecular aleatorio	$q_x^n (W / m^2) = -k \frac{dt}{dx}$	K(W/m·K)
Convección	Difusión de energía debido al movimiento molecular aleatorio más transferencia de energía debido al movimiento global	$q^n (W / m^2) = h(T_s - T_\infty)$	h(W/m ² ·K)
Radiación	Transferencia de energía por ondas electromagnéticas	$q^n (W / m^2) = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{aire}^4)$ $q(W) = h_r A(T_s - T_{aire})$	$\varepsilon h_r (W/m^2·K)$

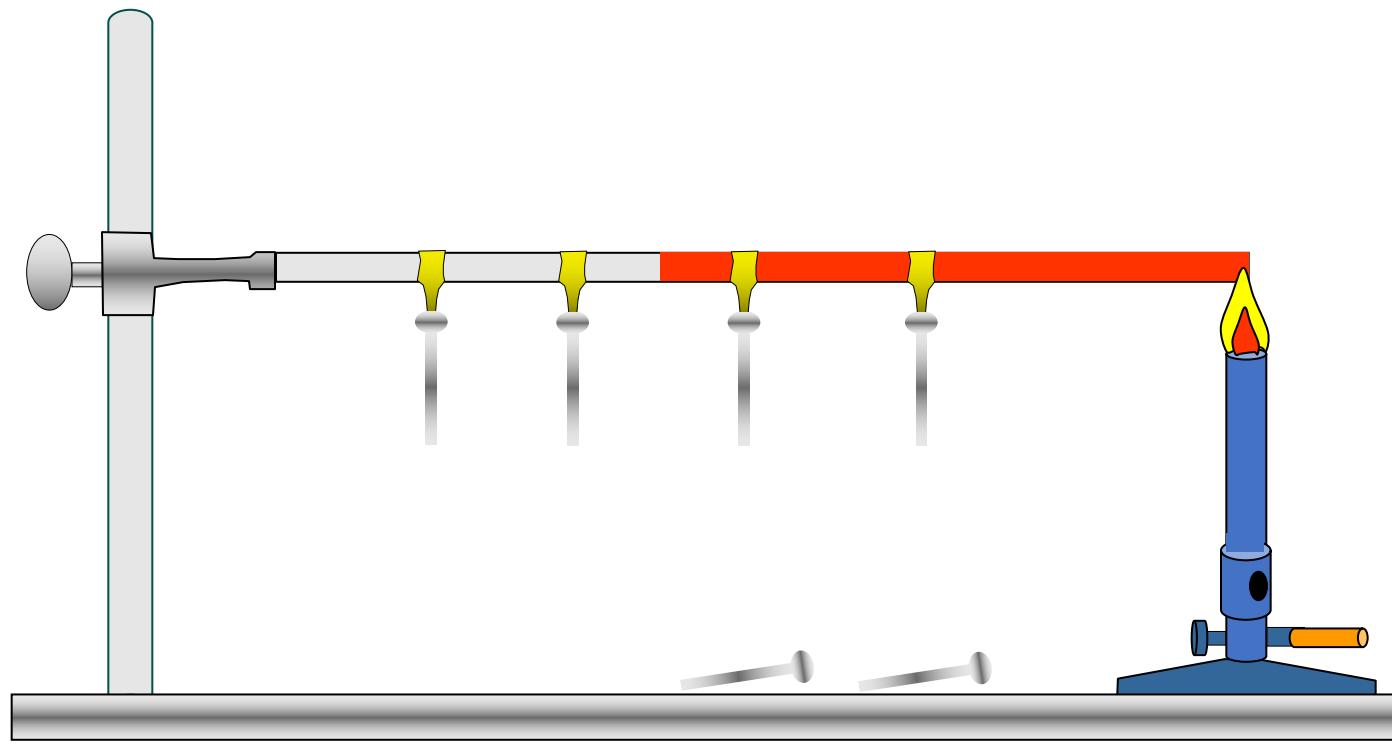
Conducción

- En el fenómeno de conducción las moléculas colisionan contra las vecinas de modo que comparten energía cinética.
- **Aislante térmico** es un material que no permite el paso del calor entre dos sistemas que no están en equilibrio térmico.
- **Un conductor térmico** es un material que facilita el paso del calor entre dos sistemas térmicos que están a diferentes temperaturas.



Conducción del calor

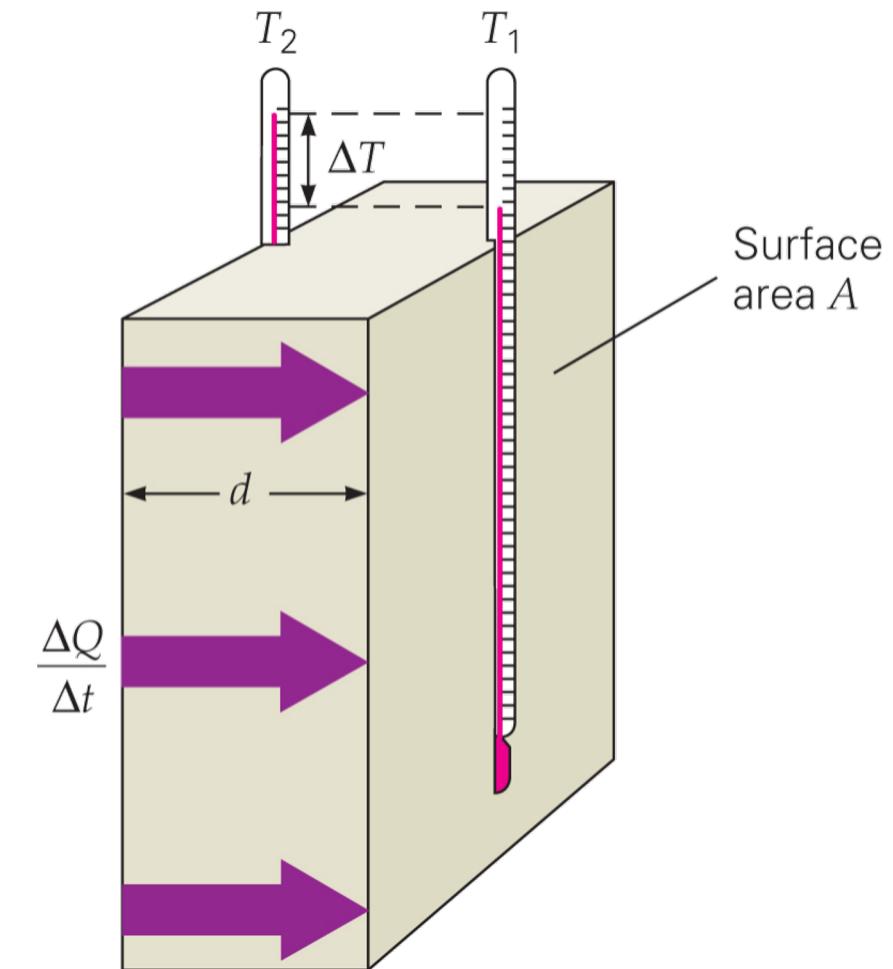
Cuando se calienta una barra de hierro a la cual hay sujetas con cera unas puntas o unos clips.



Conducción del calor

- Cuando los dos extremos de una barra tienen diferentes temperaturas, se produce conducción de calor de uno a otro extremo.
- Experimentalmente, se deduce que el flujo calorífico es directamente proporcional a la sección S del cuerpo y a la diferencia de temperatura por unidad de longitud.
- S – área transversal de flujo
- K – conductividad térmica
- H se mide en J/s, W o cal/s .
- Otra magnitud importante es la resistencia térmica, que se define como

$$R=d/kA$$



$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \left(\frac{T_2 - T_1}{d} \right)$$

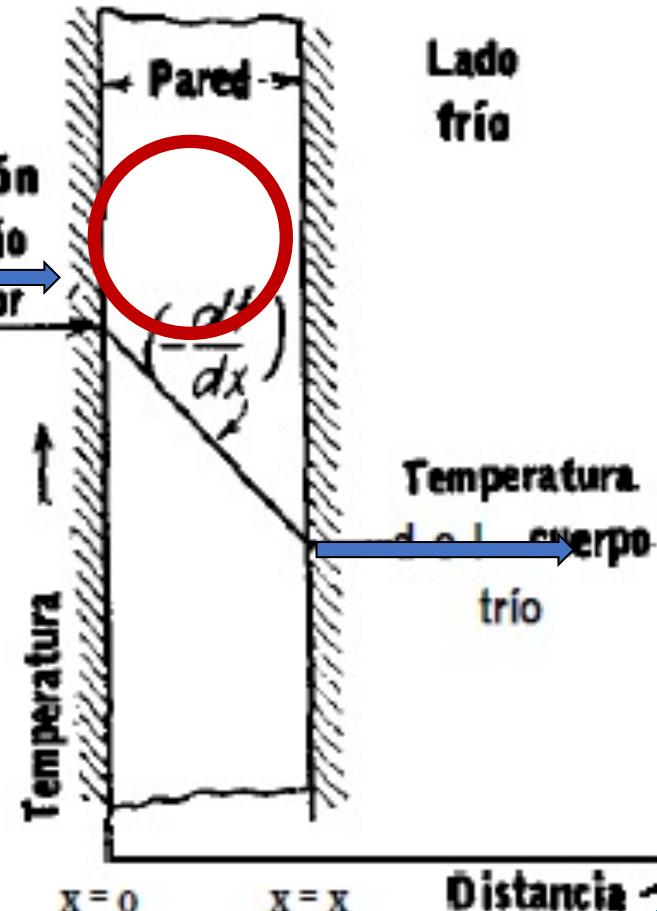
Fourier

- Flujo de calor
- Flujo de fluido
- Flujo de electricidad

Conductividad térmica



Flujo $\propto \frac{potencial}{resistencia}$



Flujo $\propto potencial \times resistencia$

Conductancia

■ **CONDUCCION:** Ley de Fourier

$$q_x^n = -k \frac{dT}{dx}$$

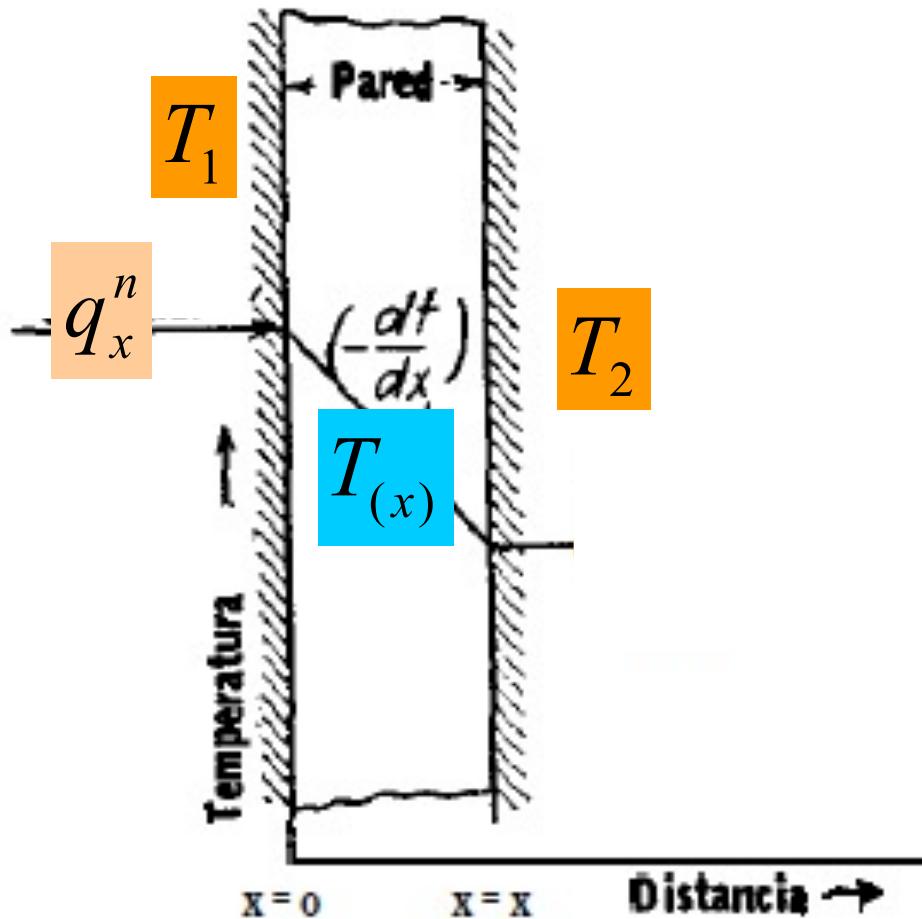
$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$q_x^n = -k \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Flujo de calor



$$q_x^n = -k \frac{\Delta T}{L}$$



$$q_x = q_x^n \cdot A$$

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

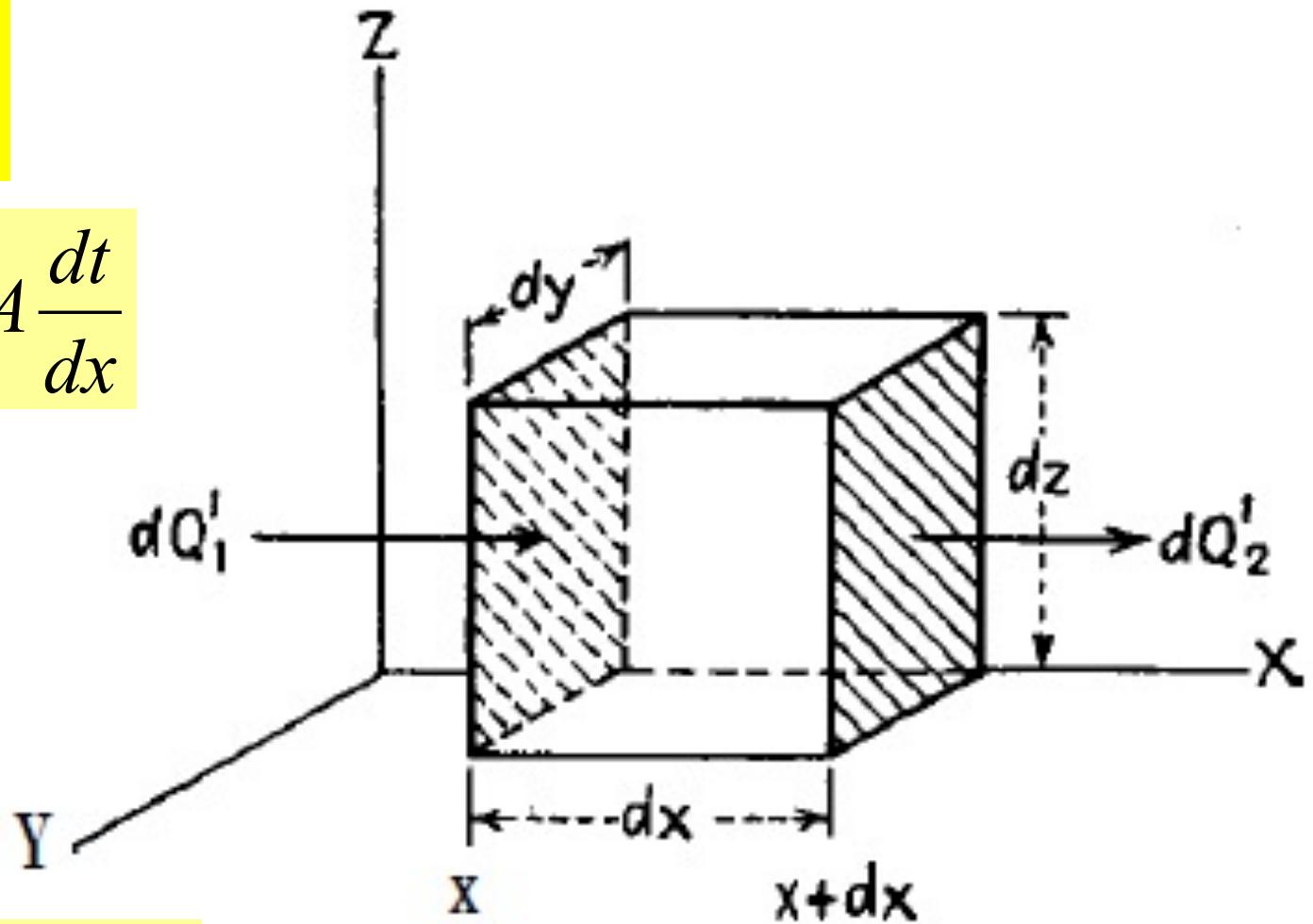
$$Q = k \frac{A}{L} \Delta t$$

$$\frac{dQ'}{d\theta} = kdA \frac{dt}{dx}$$

$$dQ'_1 > dQ'_2$$

$$dQ'_1 < dQ'_2$$

$$dQ'_1 = dQ'_2$$



$$dQ' = dQ'_1 - dQ'_2$$

$$\frac{dQ'}{d\theta} = kdA \frac{dt}{dx}$$

$$\frac{dQ'_1}{d\theta} = kdydz \left(-\frac{\partial t}{\partial x} \right)$$

$$\left(-\frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad \text{Como } f(x)$$

$$dQ'_1 < dQ'_2$$

$$-\frac{\partial(\partial t/\partial x)}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial(\partial t/\partial x)}{\partial x} dx$$

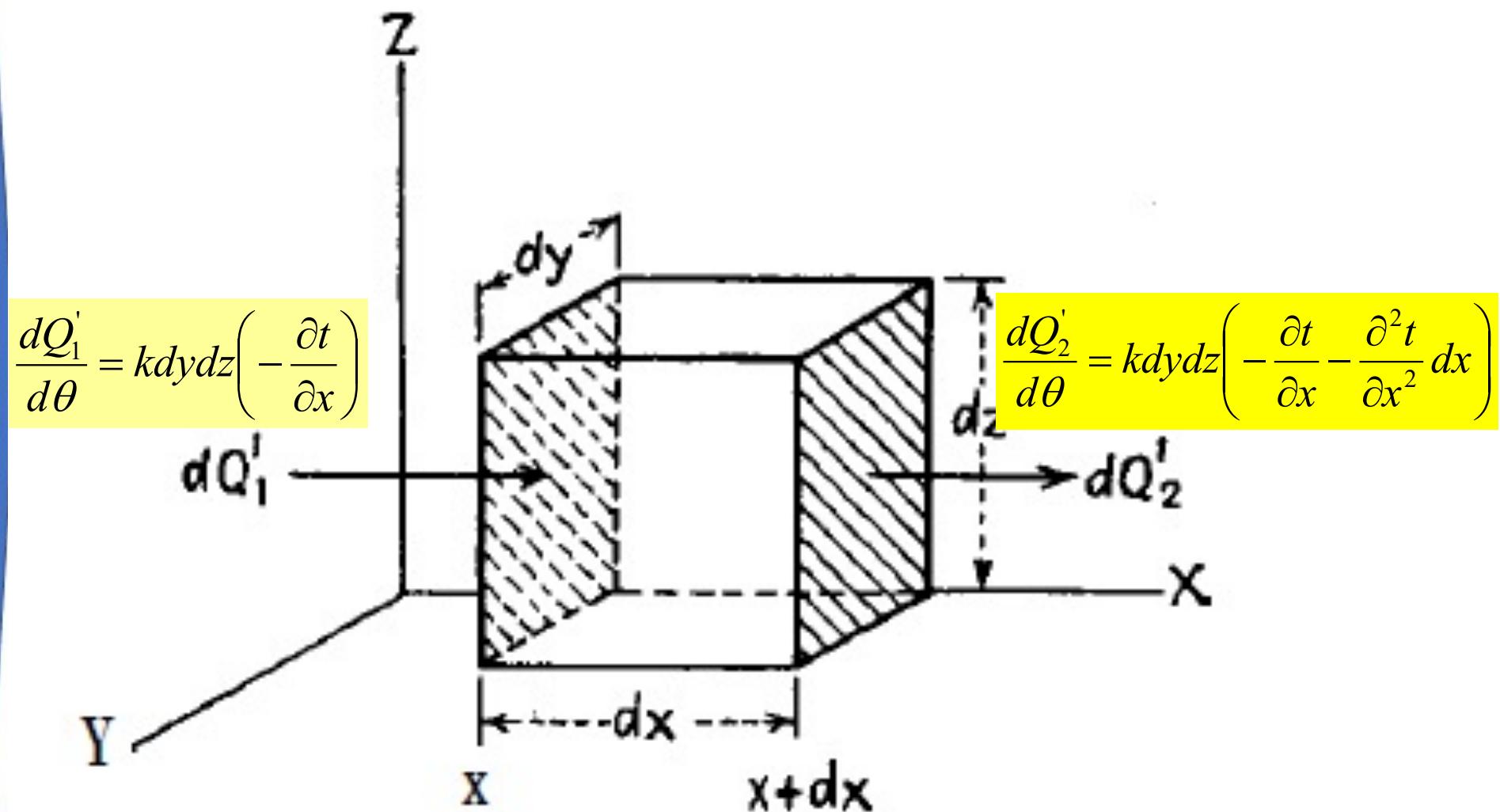
$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx$$

$$x + dx$$



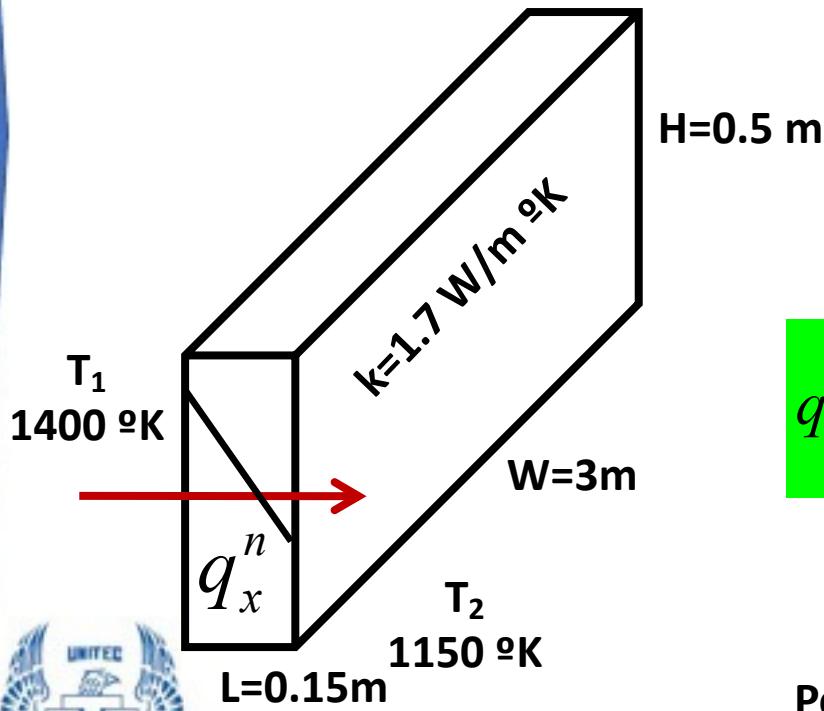
$$\frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx$$

$$\frac{dQ'_2}{d\theta} = kdydz \left(-\frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \right)$$



EJEMPLO:

La pared de un horno industrial se construye con ladrillos de arcilla refractaria de 0.15 m de espesor que tiene una conductividad térmica de 1.7 W/m²K. Mediciones realizadas durante la operación en estado estable revelan temperaturas de 1400 y 1150 °K en las superficies interna y externa, respectivamente. ¿Cuál es la velocidad de pérdida de calor a través de una pared que tiene 0.5m por 3m de lado



- **CONDUCCION:** Ley de Fourier

$$q_x^n = k \frac{\Delta T}{L}$$

$$q_x^n = (1.7 \text{ W/m} \cdot \text{°K}) \left(\frac{250 \text{ °K}}{0.15 \text{ m}} \right) = 2833 \text{ W/m}^2$$

El flujo de calor en una sección unitaria

Pérdida de calor en la pared

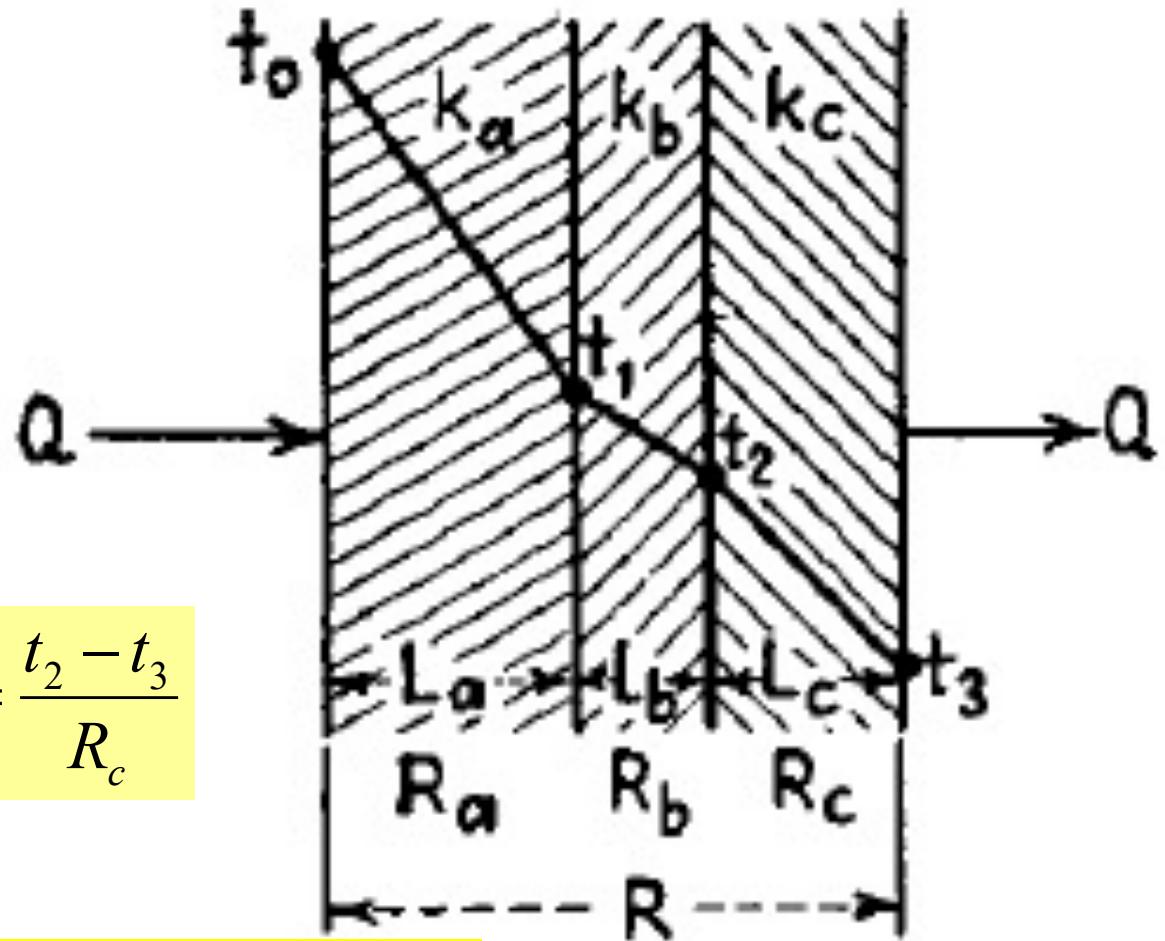
$$q_x = (HW)q_x^n = (0.5 \text{ m})(3 \text{ m})2833 \text{ W/m}^2 = 4250 \text{ W}$$

Flujo de calor a través de una pared compuesta

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

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

$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_o - t_1}{R_a} = \frac{t_1 - t_2}{R_b} = \frac{t_2 - t_3}{R_c}$$



$$Q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_o - t_3}{(L_a/k_a A) + (L_b/k_b A) + (L_c/k_c A)}$$

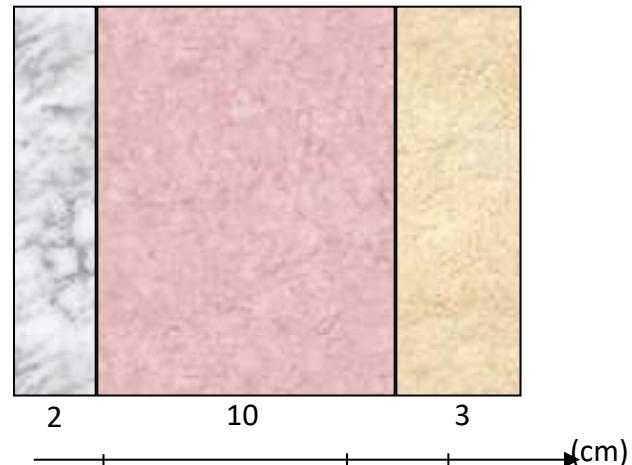
EJEMPLO:

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 W·m⁻¹·K⁻¹.

$$R_1 = \frac{\Delta x_1}{k_1} = \frac{0.02}{0.25} = 0.08 \text{ W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$$

$$R_2 = \frac{\Delta x_2}{k_2} = \frac{0.10}{0.05} = 2.00 \text{ W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$$

$$R_3 = \frac{\Delta x_3}{k_3} = \frac{0.03}{0.20} = 0.15 \text{ W}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$$



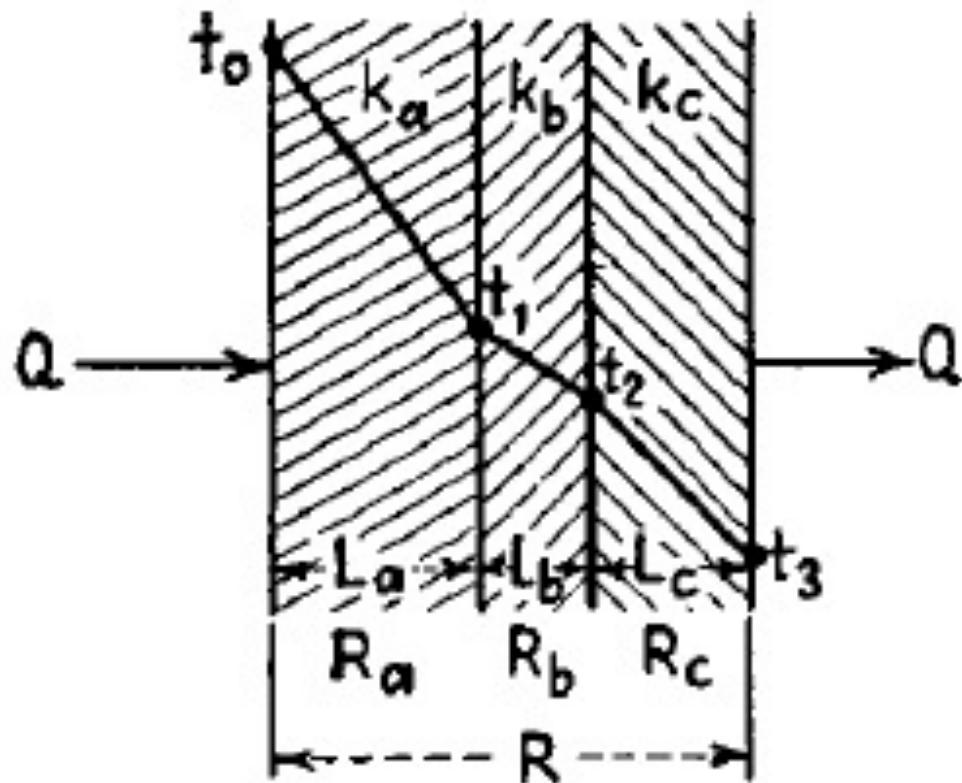
Resistencias en serie

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

EJEMPLO:

La pared de un horno está constituida de tres capas de ladrillo. La interior se construye de 8 plg de ladrillo refractario, $k=0.68 \text{ BTU}/(\text{h})(\text{pie}^2)(^\circ\text{F}/\text{pie})$, seguida de 4 plg de ladrillo aislante, $k=0.15$ y una capa externa de 6 plg de ladrillo de construcción, $k=0.40$. El horno opera a 1600°F y se sabe que la pared externa puede ser mantenida a 125°F circulando aire. ¿cuánto calor se perderá por pie² de superficie y cuáles son las temperaturas en las interfasas de las capas?

$$Q = \Delta t / R$$



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

Para el refractario

$$R_a = L_a/k_a A = 8/12 * 0.68 * 1 = 0.98 (h)(^{\circ}F)/(BTU)$$

Ladrillo aislante

$$R_b = L_b/k_b A = 4/12 * 0.15 * 1 = 2.22 (h)(^{\circ}F)/(BTU)$$

Ladrillo de construcción

$$R_c = L_c/k_c A = 6/12 * 0.40 * 1 = 1.25 (h)(^{\circ}F)/(BTU)$$

Pérdida de calor/pie² de pared

$$R = 4.45 (h)(^{\circ}F)/(BTU)$$

$$Q = \Delta t/R = (1600 - 125)/4.45 = 332 \text{ Btu/h}$$

Para las capas individuales

$$\Delta t = QR$$

$$\Delta t = 332 * 0.98 = 325^{\circ}F$$

$$t_1 = 1600 - 325 = 1275^{\circ}F$$

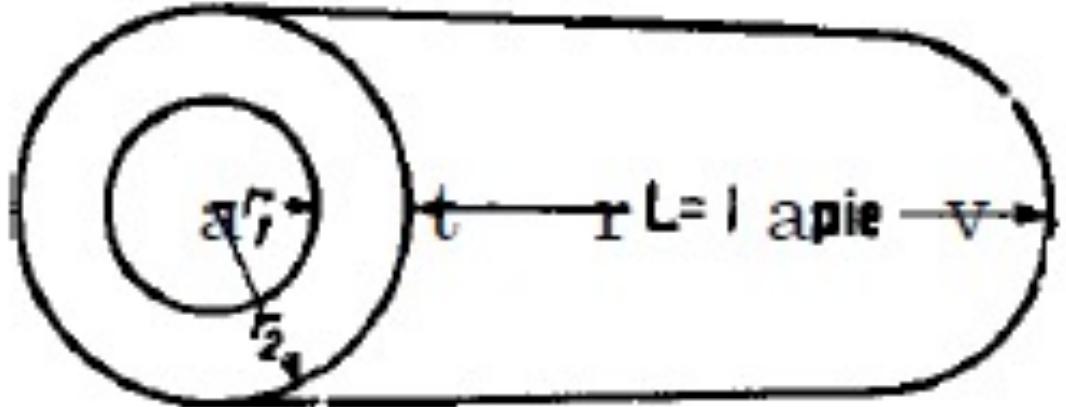


$$\Delta t_b = 332 * 2.22 = 738^{\circ}F$$

$$t_2 = 1275 - 738 = 537^{\circ}F$$

Flujo de calor a través de la pared de un tubo.

$$dQ = k dA \frac{dt}{dx}$$



$$q = 2\pi rk \left(-\frac{dt}{dr} \right) \text{ Btu/(h)(pielineal)}$$

integrando

$$t = -\frac{q}{2\pi k} \ln r + C_1$$

$$q = \frac{2\pi k(t_i - t_o)}{2.3 \log r_o / r_i}$$

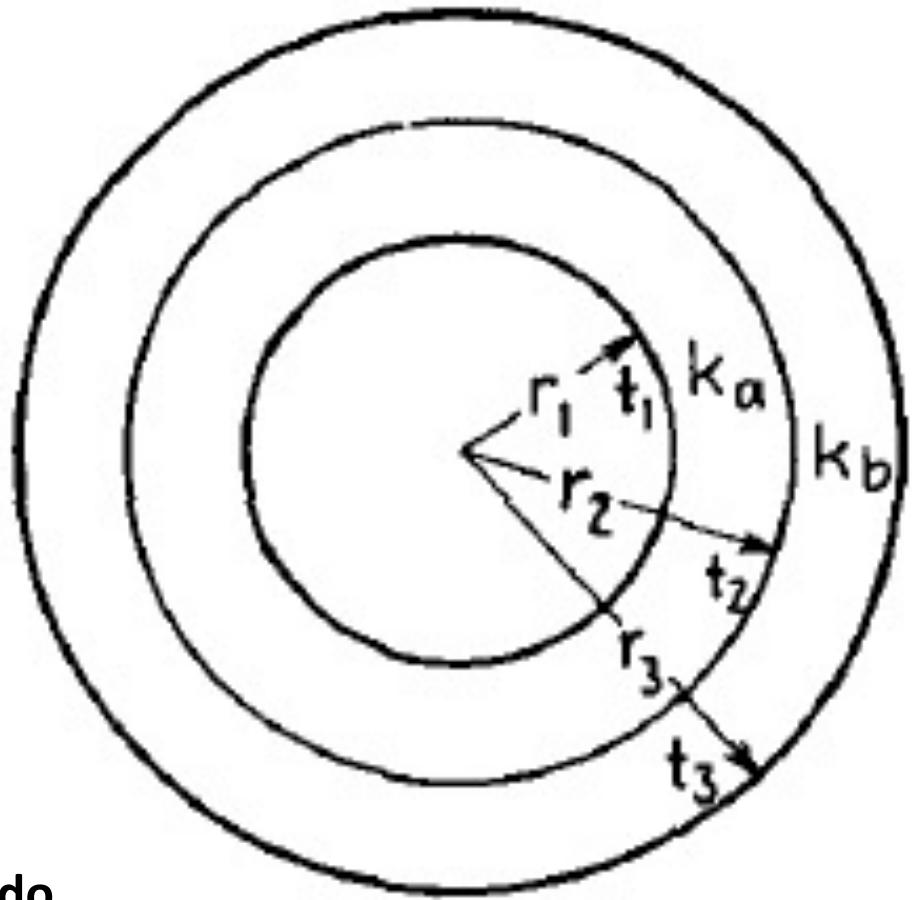
- | | | |
|-----------|-----------|---------|
| $r = r_i$ | $t = t_i$ | interna |
| $r = r_o$ | $t = t_o$ | externa |

$$\frac{r_o}{r_i} = \frac{D_o}{D_i}$$

Resistencia cilíndrica compuesta

$$t_1 = t_2 + \frac{2.3q}{2\pi k_a} \log \frac{D_2}{D_1}$$

$$t_2 = t_3 + \frac{2.3q}{2\pi k_b} \log \frac{D_3}{D_2}$$



sumando

$$t_1 - t_2 = \frac{2.3q}{2\pi k_a} \log \frac{D_2}{D_1} + \frac{2.3q}{2\pi k_b} \log \frac{D_3}{D_2}$$

EJEMPLO:

Un tubo de vidrio tiene un diámetro exterior de 6.0 plg y un diámetro interior de 5.0 plg. Se usará para transportar un fluido que mantiene la superficie interna a 200°F. Se espera que la parte externa del tubo se mantenga a 175°F. ¿Cuál será el flujo de calor?

$$k = 0.63 \text{Btu}/(h)(\text{pie}^2)(^\circ\text{F}/\text{pie})$$

$$q = \frac{2\pi k(t_i - t_o)}{2.3 \log D_o/D_i}$$

$$q = \frac{(2)(3.14)(0.63)(200 - 175)}{2.3 \log 6.0/5.0} = 538 \text{ Btu / pie líneal}$$



Ejemplos

Un flujo de calor de 3 KW se conduce a través de una sección de un material aislante de área de sección transversal 10 m^2 y espesor 2.5 cm. Si la temperatura de la superficie interna (caliente) es de 415°C y la conductividad térmica del material es de $0.2 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. ¿Cuál es la temperatura de la superficie externa?

Las temperaturas de las superficies interna y externa de una ventana de vidrio de 5 mm de espesor son 15 y 5°C . ¿cuál es la pérdida de calor a través de una ventana que mide $1 \times 3 \text{ m}$ de lado?. La conductividad térmica del vidrio es de $1.4 \text{ W/m}^\circ\text{K}.$.

Se determina que el flujo de calor a través de una tabla de madera de 50mm de espesor, cuyas temperaturas sobre las superficies interna y externa son 40 y 20°C respectivamente, el flujo de calor es 40 W/m^2 . ¿Cuál es la conductividad térmica de la madera?



El compartimiento de un congelador consiste en una cavidad cúbica que tiene 2 m de lado. Suponga que el fondo está perfectamente aislado. ¿Cuál es el espesor mínimo de aislante de espuma de poliuretano ($k = 0.030 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) que debe aplicarse en las paredes superior y laterales para asegurar una carga de calor de menos de 500 W, cuando las superficies interior y exterior están a -10 y 35°C?

Un chip cuadrado de silicio ($k = 150 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) tiene un ancho $w = 5 \text{ mm}$ de lado y espesor $t = 1 \text{ mm}$. El chip se monta en un sustrato de modo que sus lados y la superficie inferior quedan aisladas, mientras que la superficie frontal se expone a un fluido refrigerante. Si se disipan 4 W de los circuitos montados en la superficie posterior del chip, ¿cuál es la diferencia de temperaturas de estado estable entre las superficies inferior y frontal?



Un flujo de calor de 3 KW se conduce a través de una sección de un material aislante de área de sección transversal 10 m² y espesor 2.5 cm. Si la temperatura de la superficie interna (caliente) es de 415ºC y la conductividad térmica del material es de 0.2 W/mºK. ¿Cuál es la temperatura de la superficie externa?

$$\dot{Q}_A = \dot{q}_A'' A = q_{\text{wind}}' = k A \frac{\Delta T}{L} = \kappa \alpha \frac{T_1 - T_2}{L}$$

$$\bar{T}_2 = T_1 - \frac{q_{\text{wind}} L}{\kappa \alpha} = 415^\circ\text{C} - \left(\frac{3000 \text{ W} \times 0.025 \text{ m}}{6 \text{ m}^2/\text{W K} \times 10 \text{ m}^2} \right)$$

$$= 415^\circ\text{C} - 37.5$$

$$T_2 = \underline{377.5^\circ\text{C}}$$



Las temperaturas de las superficies interna y externa de una ventana de vidrio de 5 mm de espesor son 15 y 5°C. ¿cuál es la pérdida de calor a través de una ventana que mide 1x3 m de lado?. La conductividad térmica del vidrio es de 1.4 W/mºK..

$$q' \times A = k \frac{\Delta T}{L} = 1.4 \times 3 \left(\frac{15 - 5}{0.005} \right) \quad \Delta T = \frac{10^{\circ}\text{C}}{m} \\ =$$

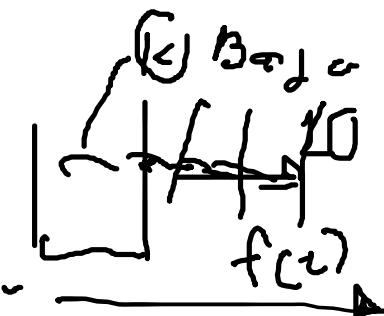
$$2800 \text{ w/m}^2 \times 3 \text{ m}^2 = 8400 \text{ w}$$



Se determina que el flujo de calor a través de una tabla de 50mm de espesor, cuyas temperaturas sobre las superficies interna y externa son 40 y 20°C respectivamente, el flujo de calor es 40 W/m². ¿Cuál es la conductividad térmica de la madera?

$$q = k \frac{\Delta T}{L}$$

$$+ T_1 - T_2 \sqrt{40}$$



$$k = q \frac{L}{T_1 - T_2}$$

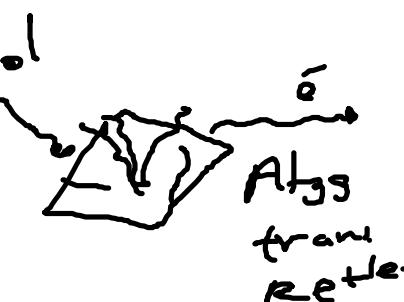
$$- T_2 - T_1 \sqrt{ }$$

Cond k
Conv h
Ract E

$$k = 40 \frac{0.05}{20}$$



$$k = 0.1 \text{ W/m°C}$$



Cond f term.

$$q = \frac{k}{L} \frac{\Delta T_2 - T_1}{A}$$

$$E = S + S_{int}$$

$$B_C = \frac{e}{f} \frac{e}{e}$$

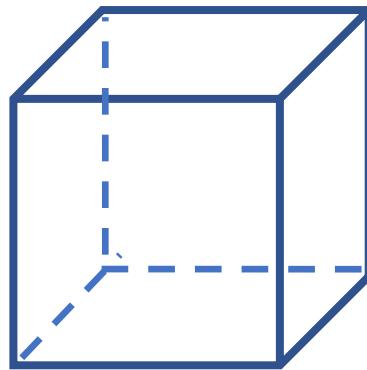


El compartimiento de un congelador consiste en una cavidad cúbica que tiene 2 m de lado. Suponga que el fondo está perfectamente aislado. ¿Cuál es el espesor mínimo de aislante de espuma de poliuretano ($k = 0.030 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) que debe aplicarse en las paredes superior y laterales para asegurar una carga de calor de menos de 500 W, cuando las superficies interior y exterior están a -10 y 35°C?

$$q = q'' A = K A \frac{\Delta T}{L}$$

$$L = \frac{K A \Delta T}{q}$$

$$L = \frac{0.030 \frac{W}{m\text{ }^{\circ}K} * (5 * 4)m^2 * (35 - (-10))\text{ }^{\circ}C}{500 \text{ W}}$$



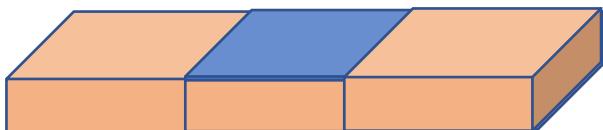
$$L = 0.054 \text{ m}$$

Un chip cuadrado de silicio ($k = 150 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) tiene un ancho $w = 5 \text{ mm}$ de lado y espesor $t = 1 \text{ mm}$. El chip se monta en un sustrato de modo que sus lados y la superficie inferior quedan aisladas, mientras que la superficie frontal se expone a un fluido refrigerante. Si se disipan 4 W de los circuitos montados en la superficie posterior del chip, ¿cuál es la diferencia de temperaturas de estado estable entre las superficies inferior y frontal?

$$q = q'' A = K A \frac{\Delta T}{L}$$

$$\Delta T = \frac{q L}{K A}$$

$$\Delta T = \frac{4 \text{ W} * 0.001 \text{ m}}{150 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}} * 2.5 \times 10^{-5} \text{ m}}$$



$$\Delta T = 1.06^\circ\text{C}$$

