

Universidad Nacional de Río Negro

Física III B - 2018

- **Unidad** 04
- **Clase** U04C03 - 22
- **Fecha** 20 Jun 2018
- **Cont** Transferencia de calor
- **Cátedra** Asorey
- **Web** github.com/asoreyh/unrn-f3b
- **YouTube** <https://goo.gl/nNhGCZ>



Contenidos: Termodinámica, alias F3B, alias F4A

Unidad 1

El Calor

Hace calor

Unidad 2

Primer principio

Todo se transforma

Unidad 3

Segundo Principio

Nada es gratis

Unidad 4

Aplicaciones

Es lo que hay

Bloque 2 - Unidad 4: Aplicaciones

- **Transferencia de calor: radiación, conducción y convección. Ley de Newton. Conductores y aislantes del calor. Ley de Fourier. Aplicaciones hogareñas. Energía y humanidad. Calentamiento global.**

De la U01: Principio Cero de la Termodinámica

- **Principio** → es una **regla** que cuyo cumplimiento **se verifica experimentalmente** y que **aún** no ha podido **refutarse**, pero tampoco probarse
- **Principio cero:**

Si dos objetos están en equilibrio térmico con un tercer objeto, entonces los tres están en equilibrio térmico entre sí.

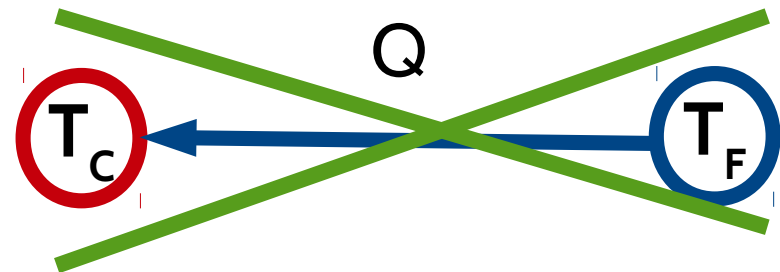
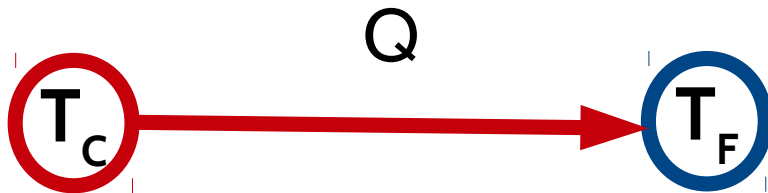
- Esta definición → **escala de temperaturas**

De la U03: Segundo principio

- **Enunciado de Clausius**

No es posible un proceso que tenga como único resultado la transferencia de calor de un cuerpo hacia otro más caliente.

- Expresa un hecho empírico, y va por la negativa: nos dice lo que no es posible hacer



- **Establece un sentido para el flujo espontáneo de calor de los focos calientes a los focos fríos y no al revés**

Observaciones empíricas



- El cuerpo caliente (emisor) entrega calor y se enfría. El cuerpo frío (receptor), recibe calor y se calienta

$$T_c \equiv T_c(t), \frac{dT_c}{dt} < 0 \quad T_f \equiv T_f(t), \frac{dT_f}{dt} > 0$$

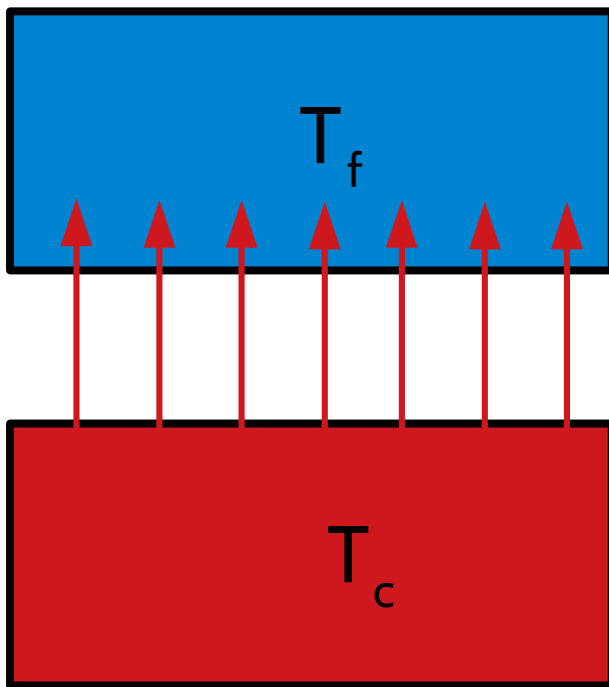
- Mientras exista diferencia de temperatura entre objetos vecinos, la transferencia de calor no puede detenerse.

$$\text{Sí } \Delta T(t) \stackrel{\text{def}}{=} T_c(t) - T_f(t) > 0 \rightarrow dQ > 0$$

- La velocidad de transferencia tiende a cero a medida que las temperaturas de ambos cuerpos se igualan:

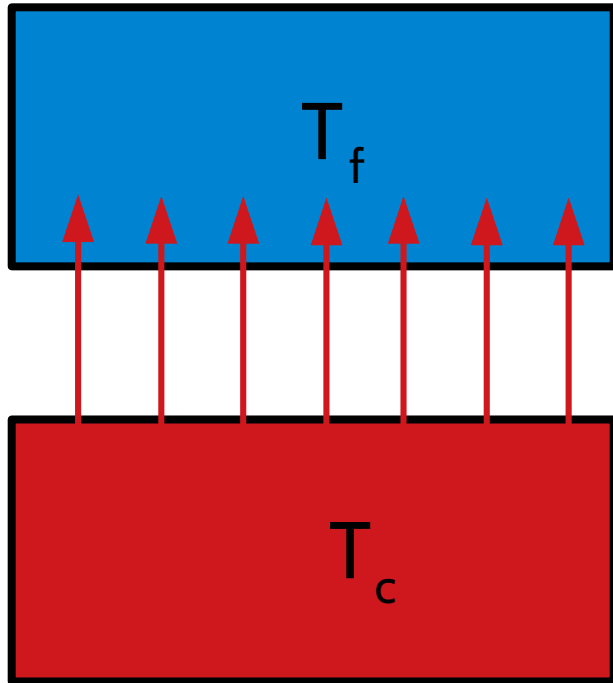
$$\lim_{\Delta T(t) \rightarrow 0} \frac{dQ}{dt} = 0$$

Ley de enfriamiento



- Imaginemos una región caliente y una fría
- ¿Qué variables determinan el flujo de calor?
 $\frac{dQ}{dt}$
 - ¿Área de contacto?
 - ¿Diferencia de temperatura?
 - ¿Materiales?

Ley de enfriamiento



$$\frac{dQ}{dt} \propto A (T_c - T_f)$$

$$\frac{dQ}{dt} = -hA(T_c - T_f)$$

- Imaginemos una región caliente y una fría
- ¿Qué variables determinan el flujo de calor?
 - ¿Área de contacto? A
 - ¿Diferencia de temperatura? $\frac{dQ}{dt}$
 - ¿Materiales?
 - h es el coeficiente de transferencia de calor: $[h] = \text{W} / (\text{m}^2 \text{K})$

El signo - aparece porque miramos el enfriamiento!

Ley de enfriamiento

El flujo de calor de la fuente caliente a la fría.

$$\frac{dQ}{dt} = -hA(T_c - T_f)$$

Ese calor enfría la fuente caliente:

$$\underline{dQ} = m C_v dT \rightarrow \frac{dQ}{dt} = m C_v \frac{dT}{dt}$$

Luego la tasa de enfriamiento será:

$$m C_v \frac{dT}{dt} = -hA(T_c - T_f) \Rightarrow \frac{dT}{dt} = - \overbrace{\left(\frac{hA}{mC} \right)}^r (T_c - T_f)$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{dT}{dt} = -r(T_c - T_f)}$$

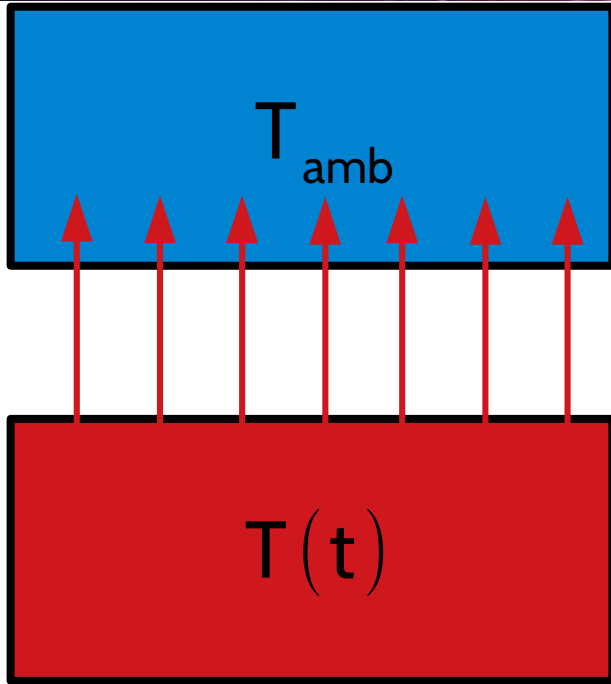
donde T_f es usualmente el ambiente y T_c es la fuente.

r depende del sistema $\rightarrow \frac{1}{r} = \text{tiempo característico}$

$$T_f = cte \equiv T_{amb}$$

$$T_c = T_c(t) \equiv T \Rightarrow \boxed{\frac{dT}{dt} = -r(T - T_{amb})}$$

Ley de enfriamiento de Newton



$$\frac{dT(t)}{dt} = -r(T(t) - T_{amb}) = -r \Delta T(t)$$

$$r = \left(\frac{hA}{mC_v} \right) > 0 \quad \tau \stackrel{\text{def}}{=} r^{-1} = \left(\frac{mC_v}{hA} \right)$$

$$[r] = s^{-1} \quad [\tau] = s$$

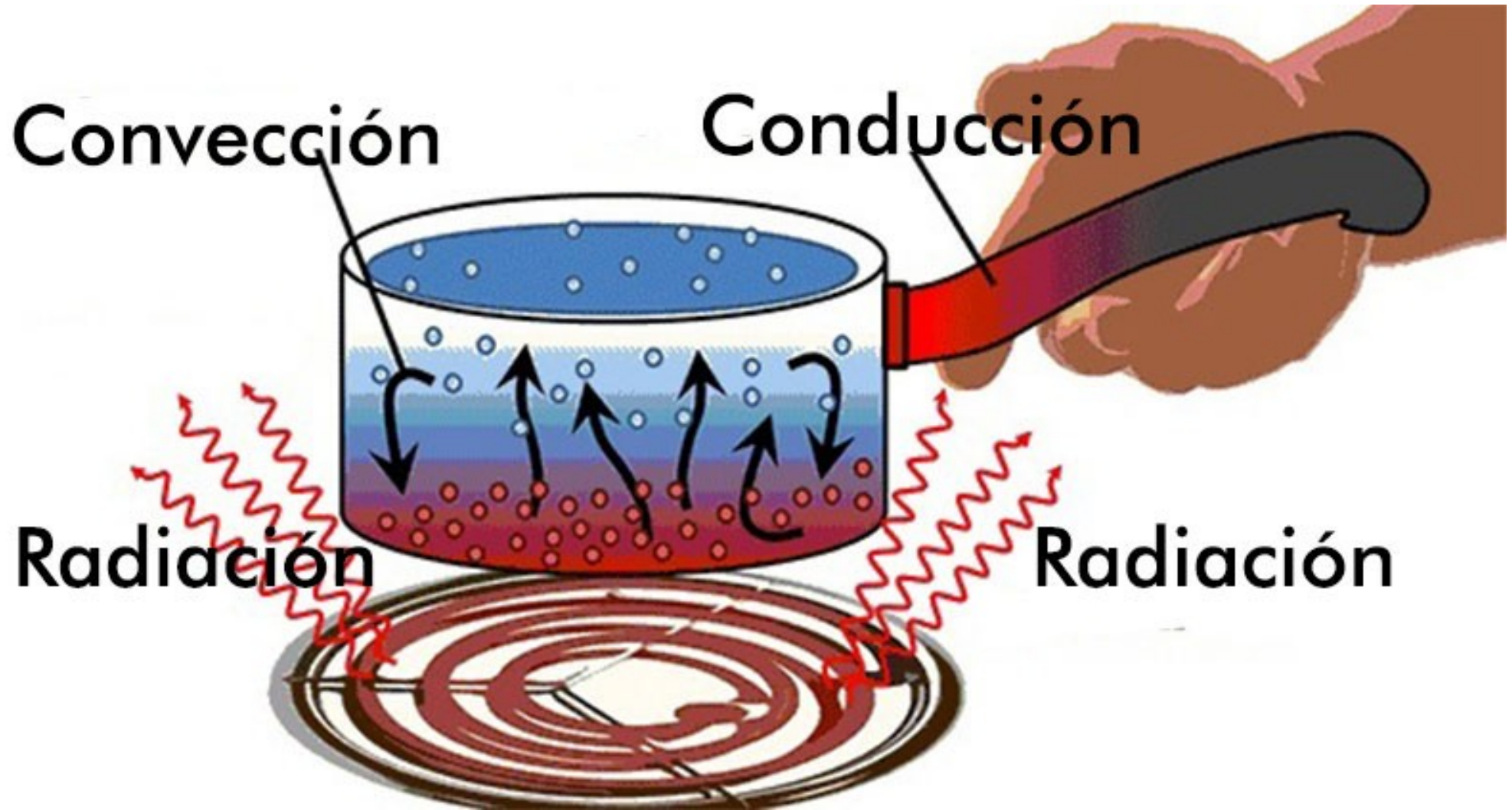
τ es un tiempo característico
(depende del sistema)

$$\frac{dT(t)}{dt} = -r \Delta T(t)$$

$$\Delta T(t) = \Delta T(0) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

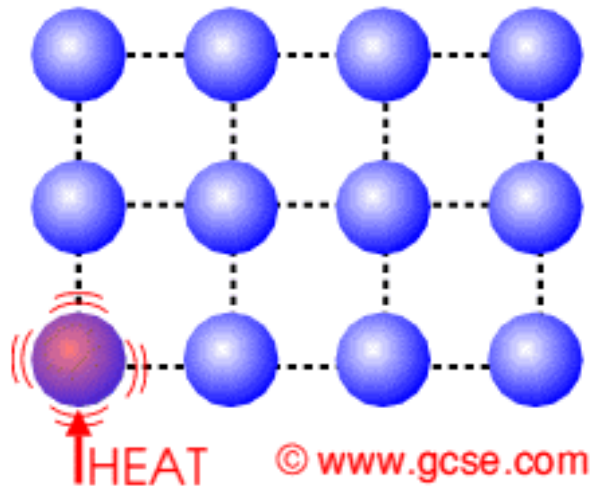
$$T(t) = T_{amb} + (T(0) - T_{amb}) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Conducción, convección y radiación

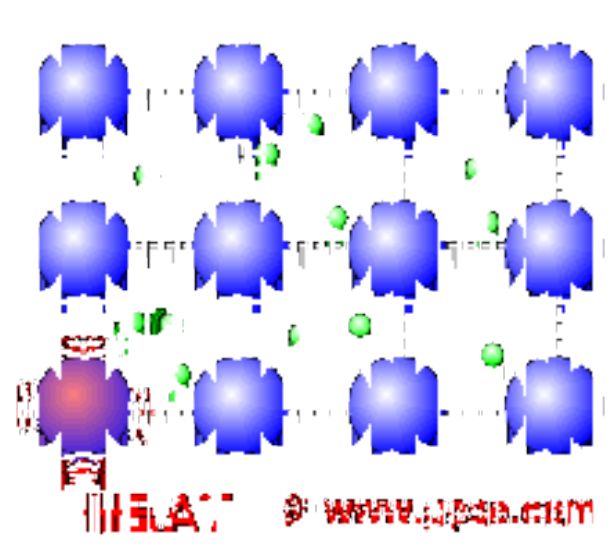


Conducción

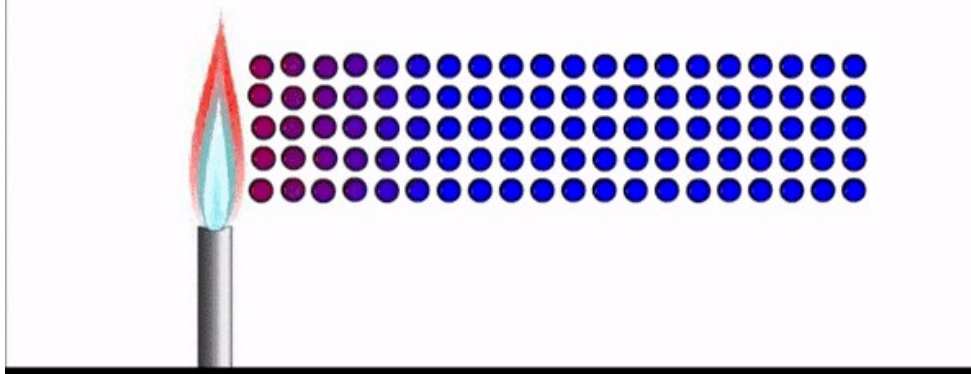
Aislante



Conductor



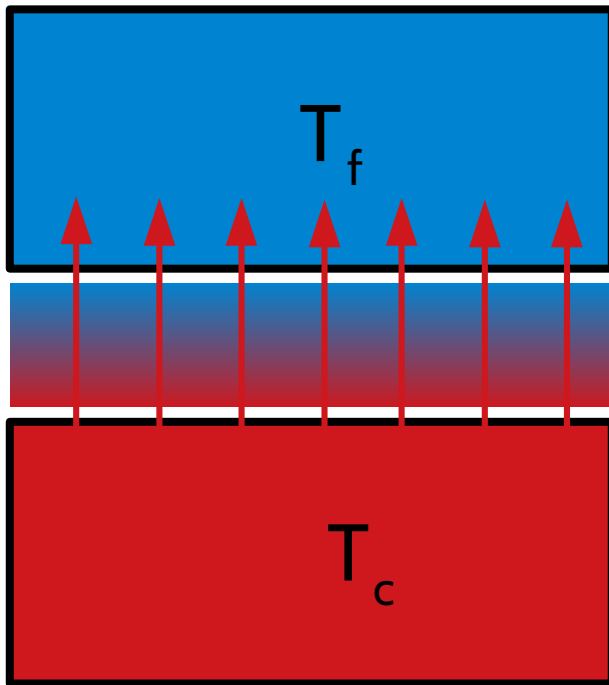
Conduction of Heat



Conducción de calor

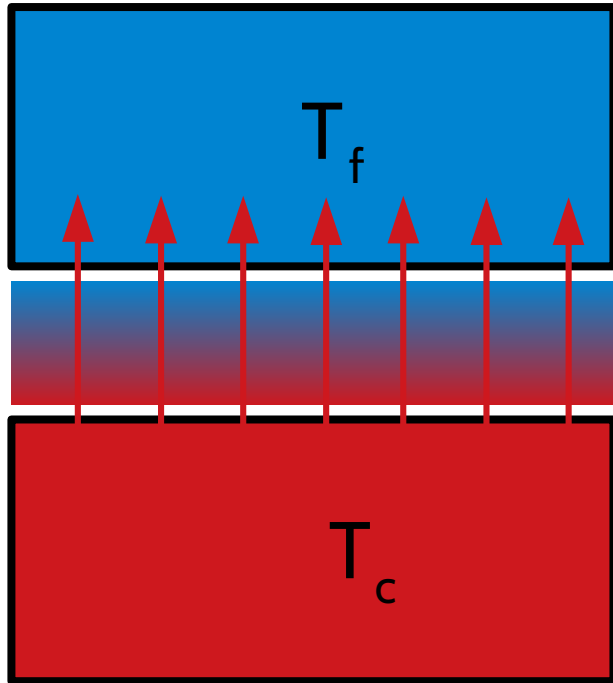
- La distancia entre las moléculas o átomos es mayor que en otros medios →
 - menor tasa de colisiones → menor conducción.
- Aumenta con la temperatura.
- Aumenta con la presión, hasta un punto crítico:
 - Cuando la densidad del gas es muy alta las moléculas están inhibidas de transferir calor.
 - Más allá de ese punto la conductividad aumenta sólo ligeramente al aumentar la presión y la densidad.

Conductividad térmica



- Imaginemos una región caliente y una fría, separadas por una región de transición
- ¿Qué variables determinan el flujo de calor?
 - ¿Área de contacto? A
 - ¿Diferencia de temperatura? $(T_c - T_f)$
 - ¿Materiales? (k)
 - ¿Espesor de la transición? (d)

Conductividad térmica



- Imaginemos una región caliente y una fría...

...separadas por una región de transición

- ¿Qué variables determinan el flujo de calor?
 - ¿Área de contacto? A
 - ¿Diferencia de temperatura? $(T_c - T_f)$
 - ¿Materiales? (κ)
 - ¿Espesor de la región de transición? (d)

$$\frac{dQ}{dt} \propto \frac{A}{d} (T_c - T_f)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \kappa \frac{A}{d} (T_c - T_f)$$

- El flujo de calor por conducción entre una región caliente (T_c) y una fría (T_f) está dado por:

$$I_Q \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dQ}{dt} = \kappa \frac{A}{d} (T_c - T_f) \rightarrow I_Q = \kappa \frac{A}{d} (T_c - T_f)$$

- κ es el coeficiente de conductividad térmica

$$[\kappa] = \frac{\text{Jm}}{\text{m}^2 \text{s K}} = \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

- cantidad de calor transferida por unidad de área, unidad de tiempo por un material de espesor unitario cuando la diferencia de temperatura entre sus caras es de 1 K.

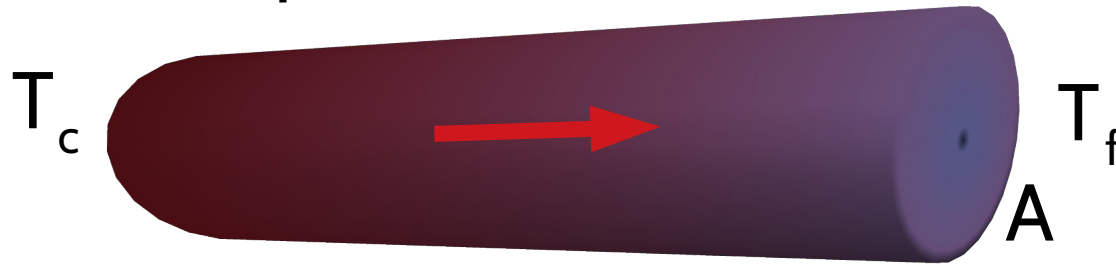
$\kappa \rightarrow$ sólo depende del material

$k > 10 \rightarrow$ conductores, $k < 1 \rightarrow$ aislantes

Material	k	Material	k	Material	k
Acero	47-58	Corcho	0,03-0,04	Mercurio	83,7
Agua	0,58	Estaño	64,0	Mica	0,35
Aire	0,02	Lana de vidrio	0,03-0,07	Níquel	52,3
Alcohol	0,16	Glicerina	0,29	Oro	308,2
Alpaca	29,1	Hierro	80,2	Parafina	0,21
Aluminio	209,3	Ladrillo	0,80	Plata	406,1-418,7
Amianto	0,04	Ladrillo refractario	0,47-1,05	Plomo	35,0
Bronce	116-186	Latón	81-116	Vidrio	0,6-1,0
Zinc	106-140	Litio	301,2	Cobre	372,1-385,2
Madera	0,13	Tierra húmeda	0,8	Diamante	2300

Aplicación: resistencia térmica

- Barra de longitud L , sección A y de conductividad k , aislada en su superficie salvo en los extremos



- El flujo de calor está dado por la Ley de Fourier

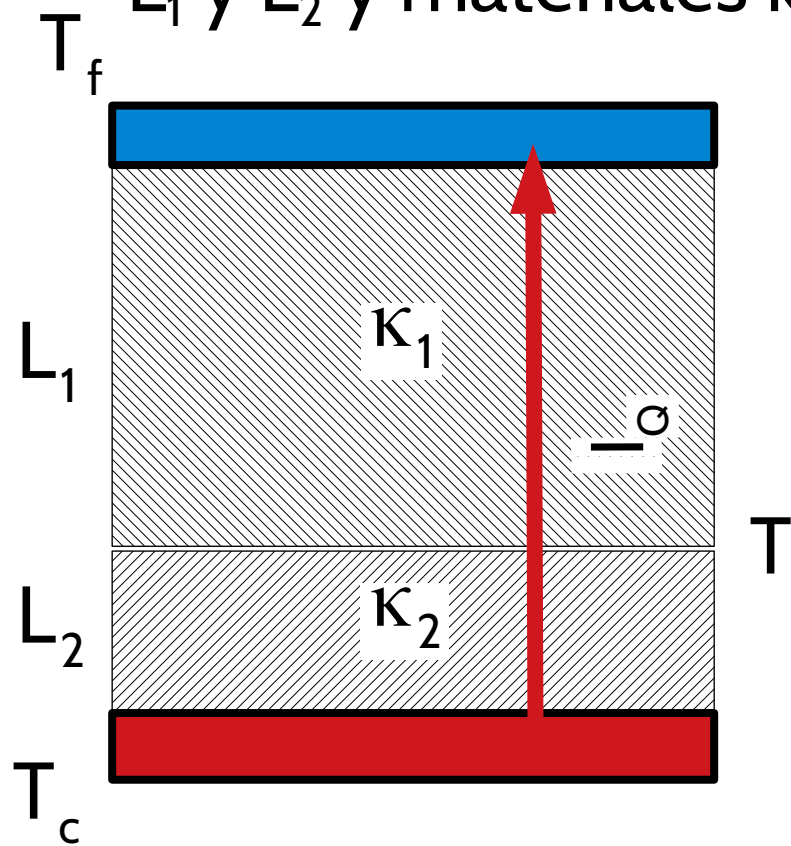
$$I_Q \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dQ}{dt} = \underbrace{\left(\kappa \frac{A}{L} \right)}_{\stackrel{\text{def}}{=} R^{-1}} \Delta T \rightarrow I_Q = \Delta T \frac{1}{R}$$

$$\Delta T = I_Q R$$

Ley de Ohm
 $V = iR$

Aplicación: aislación en paredes

- Pared de área A compuesta por dos placas de espesores L_1 y L_2 y materiales k_1 y k_2 , a temperaturas T_c y T_f .



- Las T_c y T_f se mantienen constantes (fuentes de calor)
- ¿Cuál es la temperatura T en la región de transición una vez se alcanzó el estado estacionario?

Resistencia en serie

$$I_{q1} = \underbrace{\frac{k_1}{L_1}}_{R^{-1}} A (T - T_f) \quad I_{q2} = \frac{k_2}{L_2} A (T_c - T)$$

En el estacionario: $I_{q1} = I_{q2} \Rightarrow \frac{k_1}{L_1} \cancel{A} (T - T_f) = \frac{k_2}{L_2} \cancel{A} (T_c - T)$

$$\Rightarrow \frac{k_1}{L_1} T - \frac{k_1}{L_1} T_f = \frac{k_2}{L_2} T_c - \frac{k_2}{L_2} T \Rightarrow \left(\frac{k_1}{L_1} + \frac{k_2}{L_2} \right) T = \frac{k_2}{L_2} T_c + \frac{k_1}{L_1} T_f$$

$$\Rightarrow \left(\frac{k_1 L_2 + k_2 L_1}{\cancel{k_1 L_2}} \right) T = \frac{k_2 L_1 T_c + k_1 L_2 T_f}{\cancel{L_1 L_2}} \Rightarrow \boxed{T = \frac{k_2 L_1 T_c + k_1 L_2 T_f}{k_1 L_2 + k_2 L_1}}$$

Otra forma:

$$I_{q1} = \frac{T - T_f}{R_1} \quad \text{y} \quad I_{q2} = \frac{T_c - T}{R_2} \Rightarrow \frac{T - T_f}{R_1} = \frac{T_c - T}{R_2} \Rightarrow T R_2 - T_f R_2 = T_c R_1 - T R_1$$

$$\Rightarrow T(R_1 + R_2) = T_c R_1 + T_f R_2 \Rightarrow \boxed{T = \frac{T_c R_1 + T_f R_2}{R_1 + R_2}}$$

$$\text{y } I_{q1} = \frac{1}{R_1} \left[\frac{T_c R_1 + T_f R_2}{R_1 + R_2} - T_f \right] = \frac{1}{R_1} \left[\frac{T_c R_1 + \cancel{T_f R_2} - T_f R_1 - \cancel{T_f R_2}}{R_1 + R_2} \right] = \frac{1}{R_1} \frac{(T_c - T_f) \cancel{R_1}}{R_1 + R_2}$$

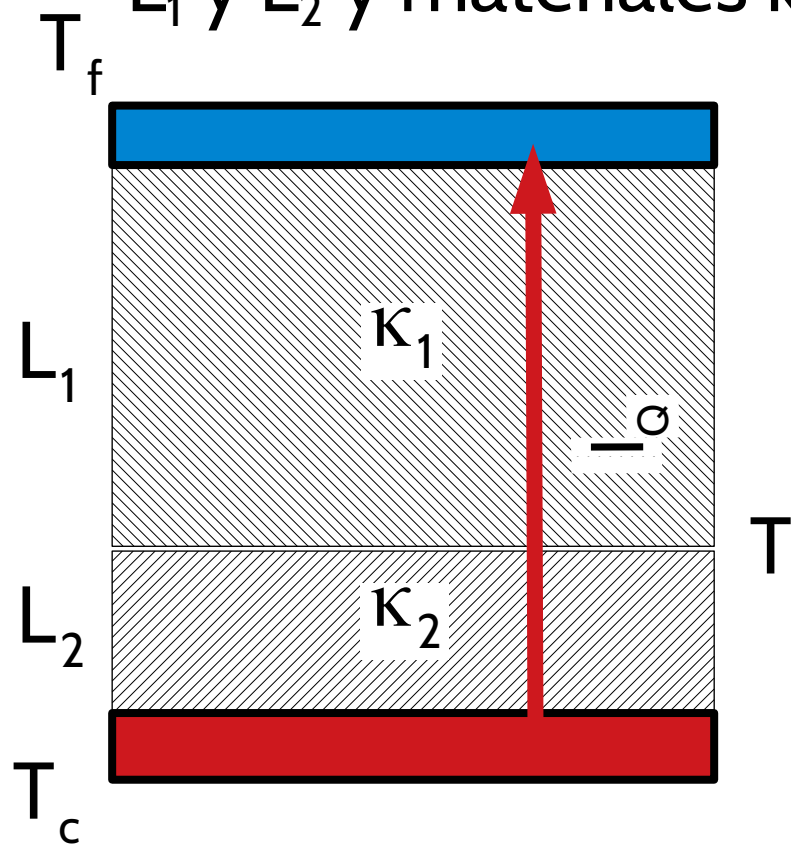
$$\Rightarrow \boxed{I_{q1} = (T_c - T_f) / (R_1 + R_2)}$$

$$\Rightarrow \boxed{R_{eq} = R_1 + R_2}$$

U04-C03-2

Aplicación: aislación en paredes

- Pared de área A compuesta por dos placas de espesores L_1 y L_2 y materiales k_1 y k_2 , a temperaturas T_c y T_f .



$$R_i = \frac{L_i}{k_i A} \rightarrow T = \frac{T_c R_1 + T_f R_2}{R_1 + R_2}$$

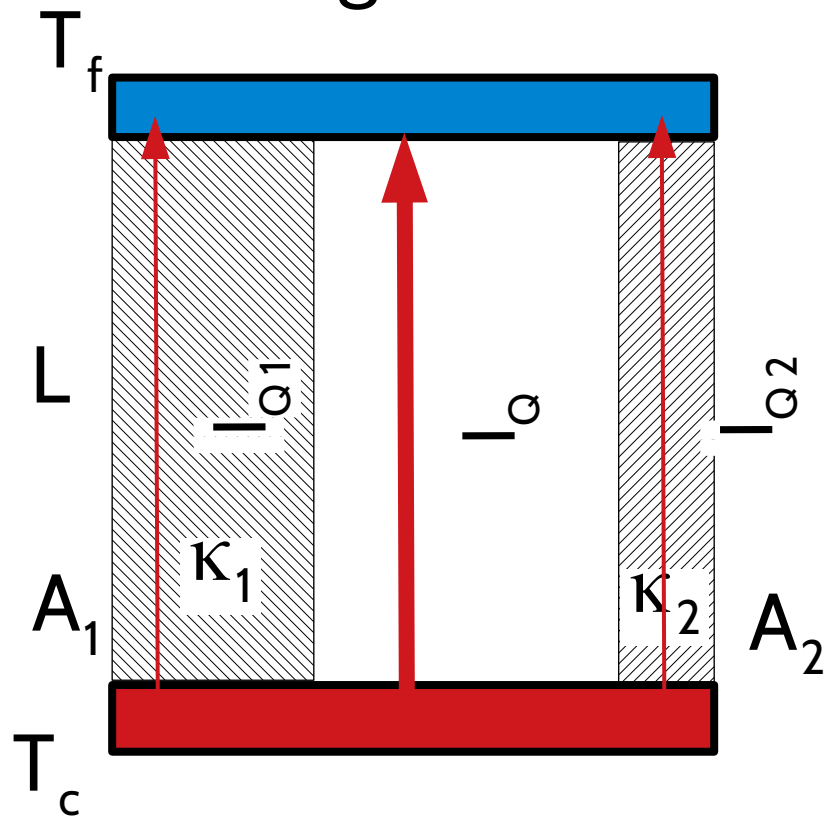
$$I_Q = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2} \rightarrow \Delta T = I_Q R_{eq}$$

Resistencias térmicas en serie

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^N R_i$$

Aplicación: conductos de calor

- Conector térmico entre T_c y T_f compuesto por dos barras de longitud L , áreas A_1 y A_2 y materiales k_1 y k_2

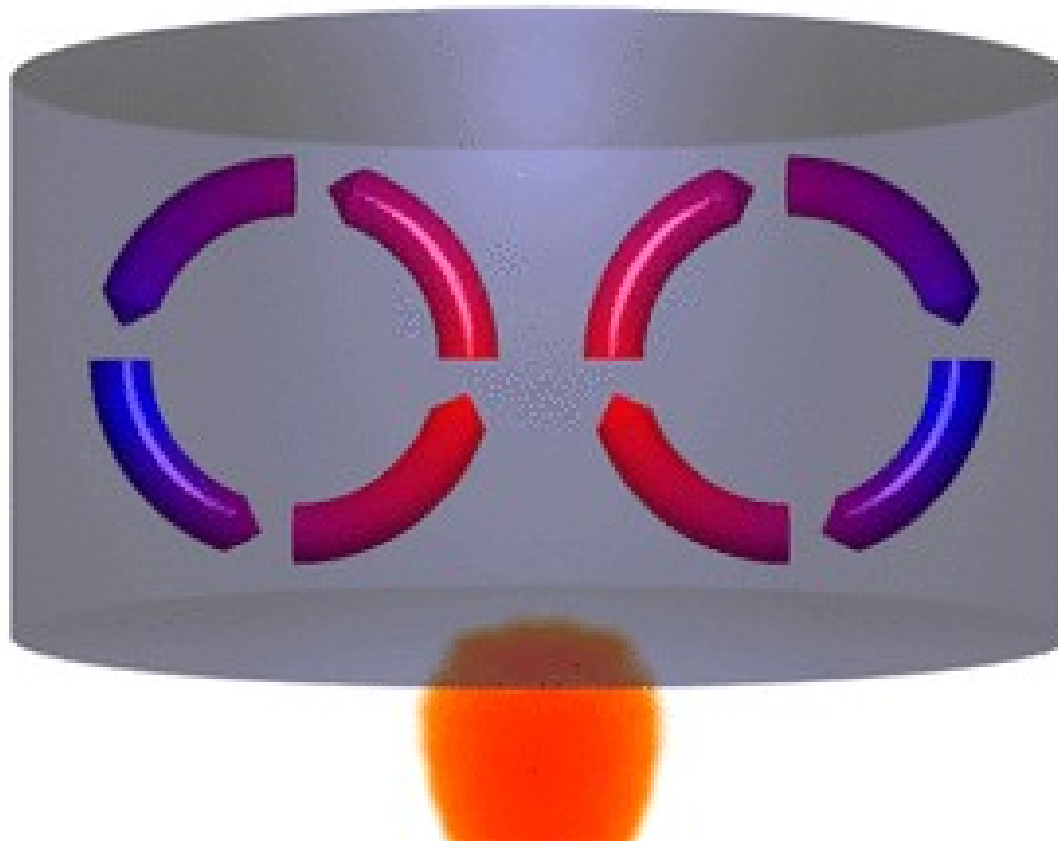


$$R_i = \frac{L_i}{K_i A}, \quad I_{Qi} = \frac{\Delta T}{R_i}, \quad I_Q = \sum_{i=1}^N I_{Qi}$$

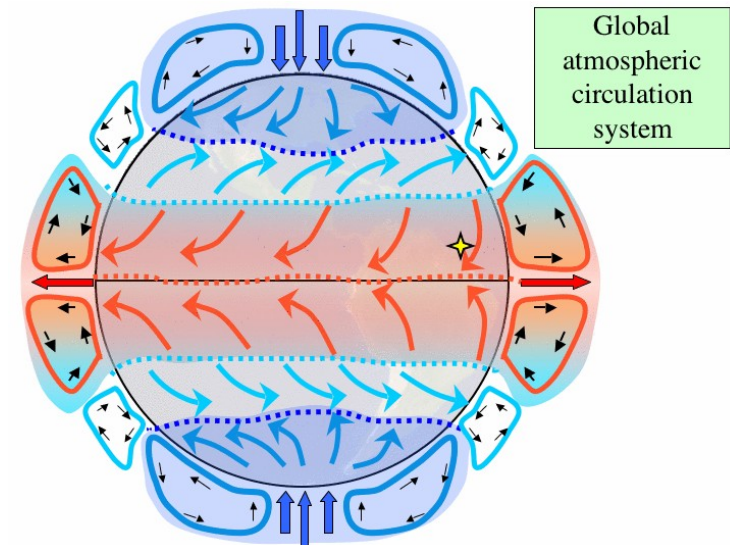
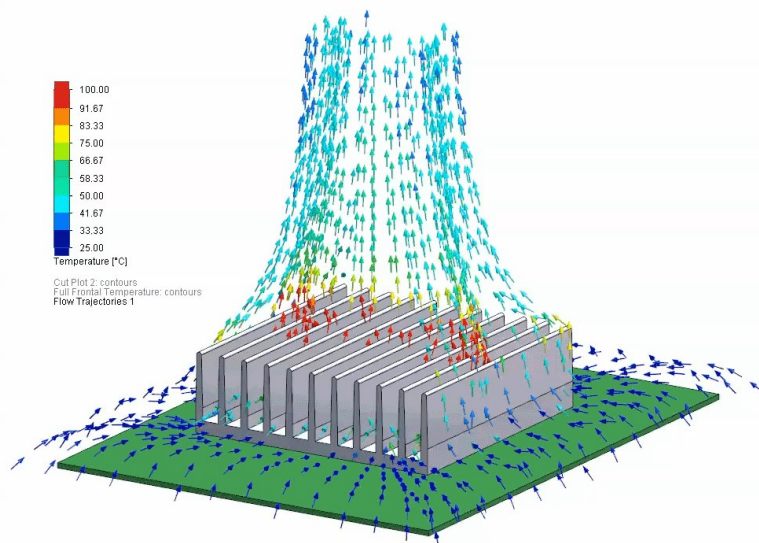
Resistencias térmicas en paralelo

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}$$

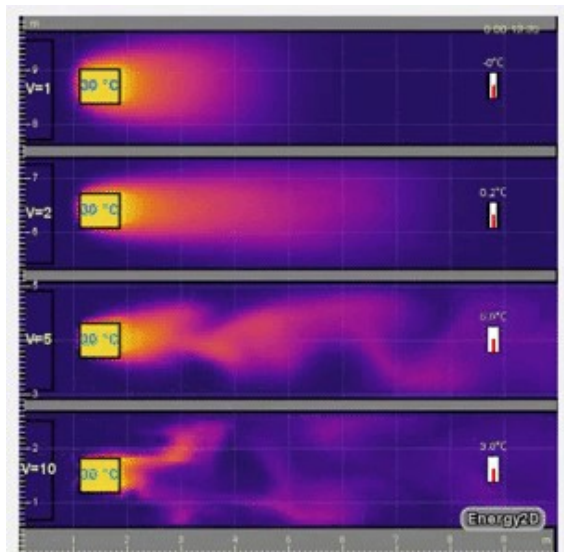
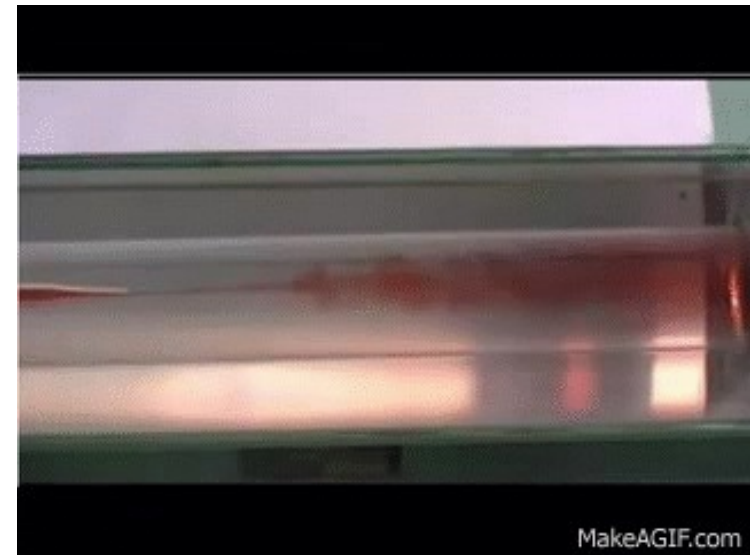
Transferencia de calor mediante el movimiento de un fluido
en contacto con zonas a diferentes temperaturas
calor \rightarrow cambio de densidad \rightarrow empuje \rightarrow flotación



Celdas convectivas



Flujo laminar y turbulento



Transición a flujo turbulento

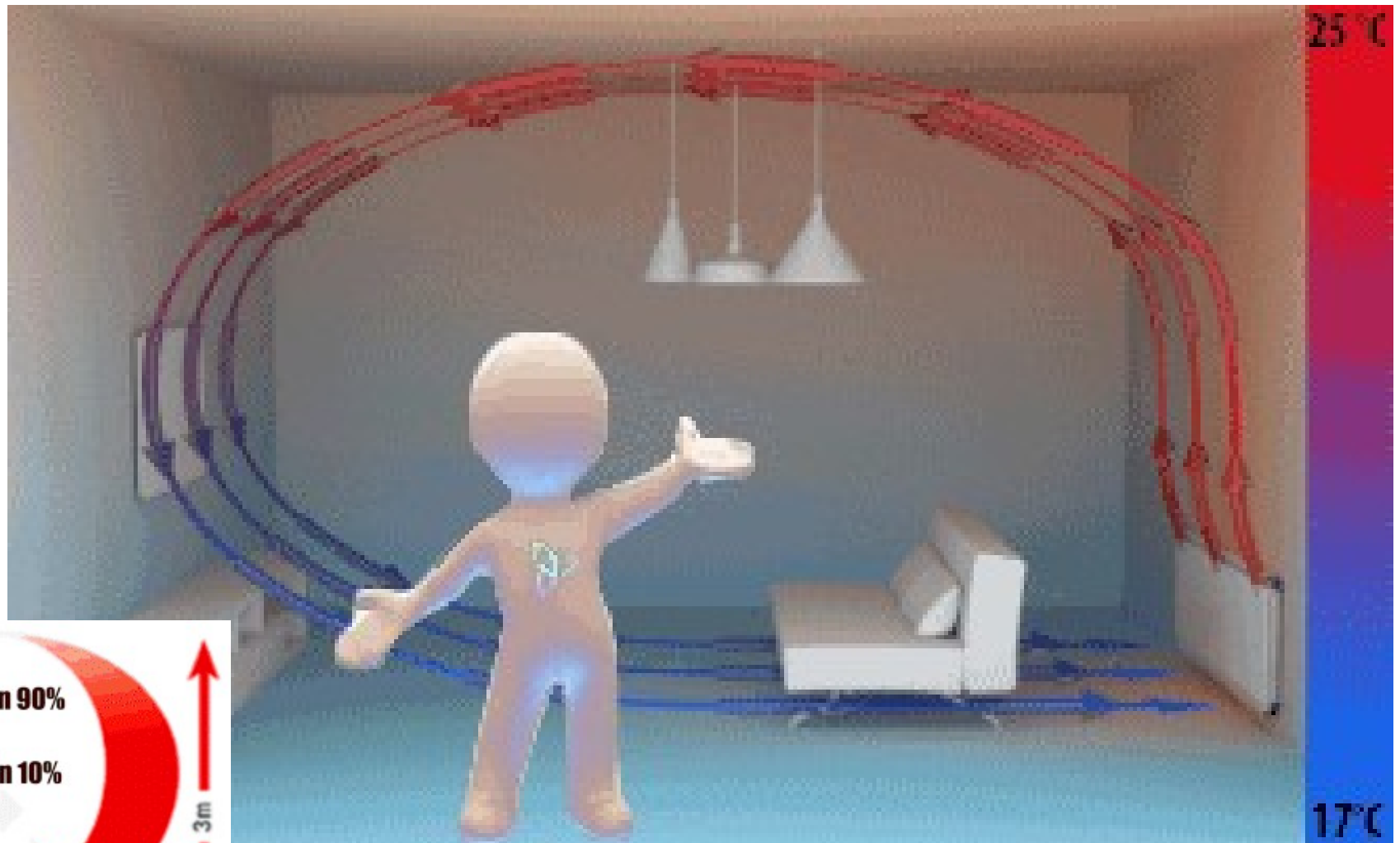


Aplicación: radiadores de calefacción



- ¿Son radiadores?
- En realidad son “conductores+radiadores+convectores”
- ¿Cuánto radian? Acordarse de T^4 .

Convección

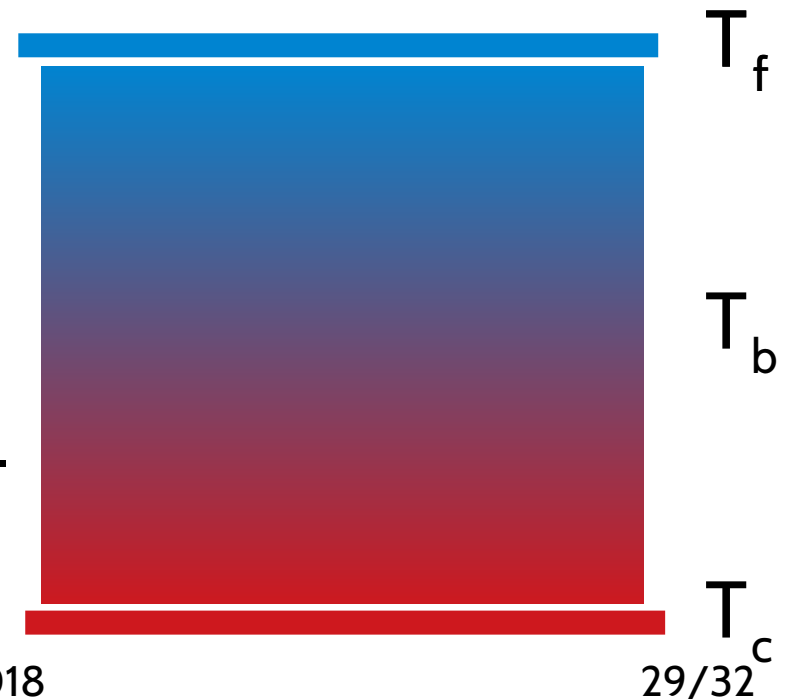


Transferencia por convección: ¿de qué depende?

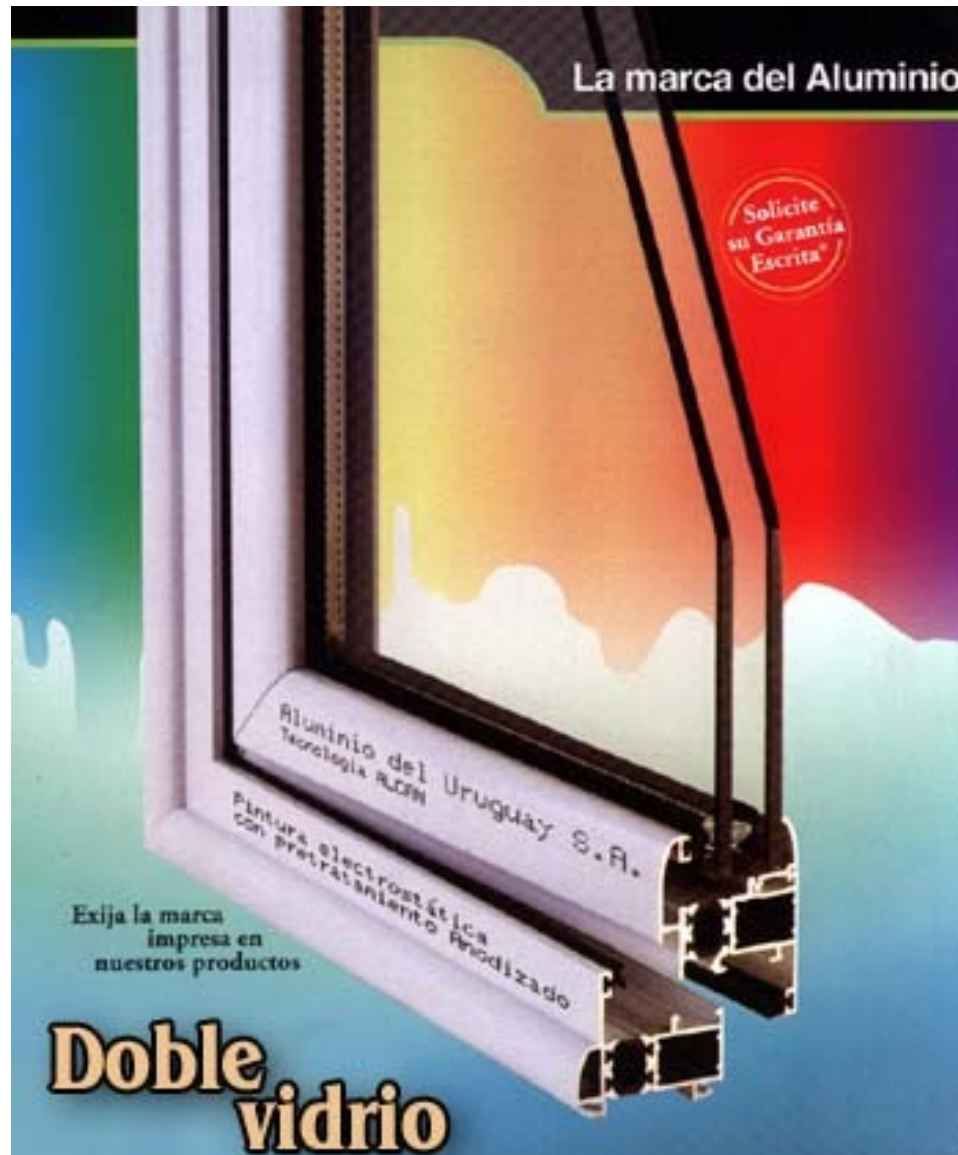
- Tasa de transferencia: $\frac{dQ}{dt}$
- ¿Qué pasa si aumento el **área de contacto**?
- ¿Qué pasa si aumento la **diferencia de temperatura**?
- ¿de qué más dependerá? Ignorancia → Lew de Newton

$$\frac{dQ}{dt} = h A (T_c - T_b)$$

- h depende del fluido, de las superficies de contacto, de las diferencias de temperatura, del flujo...

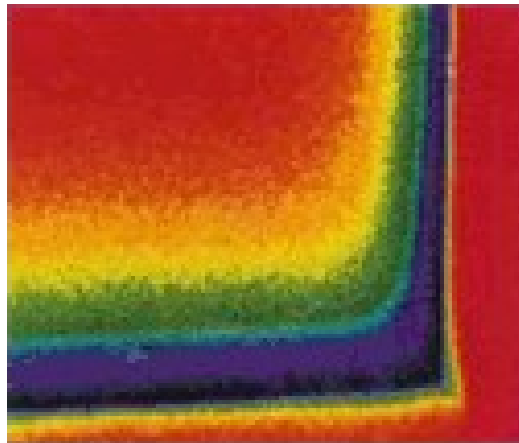


Aplicación → Termopaneles

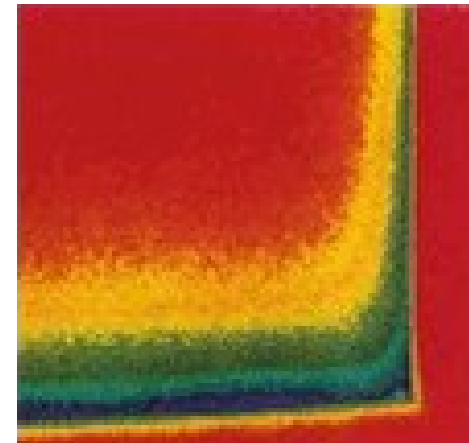


- Es una armadura de vidrios dobles usada en los climas fríos.
- El calor se transfiere de un ambiente hacia el exterior por:
 - Conducción en el vidrio interior
 - Conducción y convección en el aire intermedio
 - Conducción en el vidrio exterior

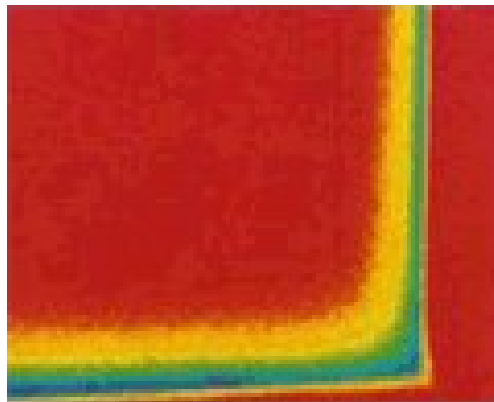
Triple vidrio



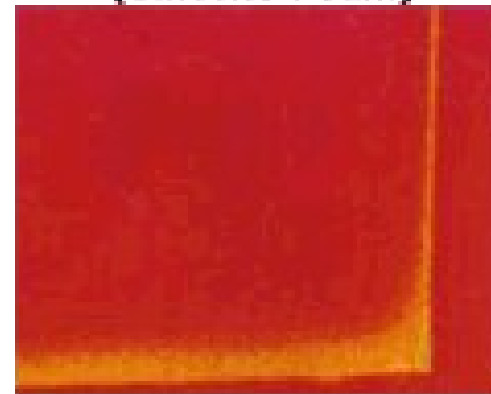
**Double Glazed
Aluminum Spacer**



**Double Glazed
warm edged spacer
(Silicone Foam)**



**Triple Glazed
Aluminum Spacer**



**Triple Glazed
warm edged spacer
(Silicone Foam)**