

# Elementos de Transferencia de calor

## Fundamentos de Energía Solar Térmica – 2010

Horacio Failache

Instituto de Física

Facultad de Ingeniería  
Universidad de la República

9 de octubre de 2012

# Outline

- 1 Medios transparentes
- 2 Transferencia radiativa entre superficies
- 3 Transferencia de calor por conducción y convección



# Transmisión interfaz simple

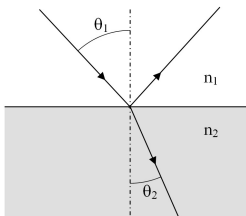
Ley de Snell

$$n_1 \operatorname{sen}(\theta_1) = n_2 \operatorname{sen}(\theta_2)$$

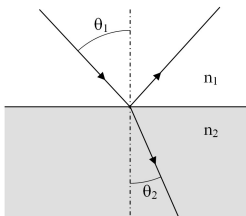
Coefficientes de reflexión (según polarización):

$$r_{\parallel} = \left( \frac{n_2 \cos(\theta_1) - n_1 \cos(\theta_2)}{n_2 \cos(\theta_1) + n_1 \cos(\theta_2)} \right)^2$$

$$r_{\perp} = \left( \frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \right)^2$$



# Transmisión interfaz simple



Ley de Snell

$$n_1 \operatorname{sen}(\theta_1) = n_2 \operatorname{sen}(\theta_2)$$

Coefficientes de reflexión (según polarización):

$$r_{\parallel} = \left( \frac{n_2 \cos(\theta_1) - n_1 \cos(\theta_2)}{n_2 \cos(\theta_1) + n_1 \cos(\theta_2)} \right)^2$$

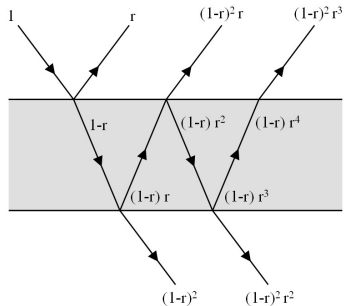
$$r_{\perp} = \left( \frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \right)^2$$

Luz NO polarizada

$$r(\theta_1) = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2}$$



# Transmisión interfaz doble

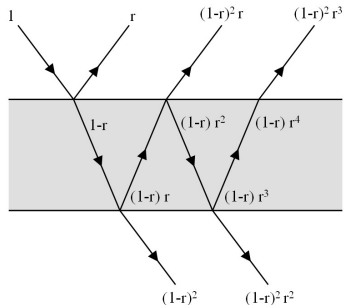


Coefficiente transmisión ventana

$$\tau_{\parallel} = (1 - r_{\parallel})^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\parallel}^{2n} = \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}}$$

(idem polarización  $\perp$ )

# Transmisión interfaz doble



Coefficiente transmisión ventana

$$\tau_{\parallel} = (1 - r_{\parallel})^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\parallel}^{2n} = \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}}$$

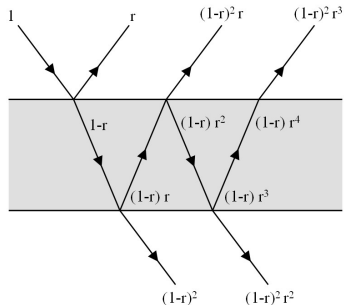
(idem polarización  $\perp$ )

Luz NO polarizada

$$\tau(\theta_1) = \frac{\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}}{2}$$



# Transmisión interfaz doble



Coefficiente transmisión ventana

$$\tau_{\parallel} = (1 - r_{\parallel})^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_{\parallel}^{2n} = \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}}$$

(idem polarización  $\perp$ )

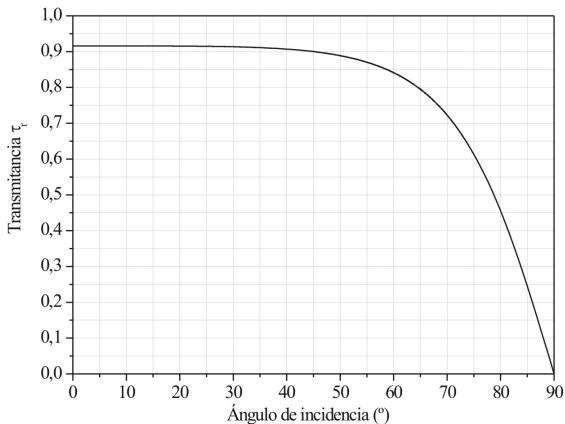
Luz NO polarizada

$$\tau(\theta_1) = \frac{\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}}{2}$$

Por ejemplo, para vidrio con  $n_v \simeq 1.53$

$$\tau_r = \frac{1-r}{1+r} \simeq 0,92$$

# Transmisión interfaz doble



Salvo ángulos de incidencia importantes ( $\theta_1 > 30^\circ$ ), la transmisión no sufre variaciones apreciables.

# Absorción

Absorción relativa es proporcional a la longitud de propagación,

$$\frac{\delta I}{I} = -\kappa \delta X,$$

$\kappa$ : coeficiente de absorción del medio.

# Absorción

Absorción relativa es proporcional a la longitud de propagación,

$$\frac{\delta I}{I} = -\kappa \delta X,$$

$\kappa$ : coeficiente de absorción del medio.

Ley de Beer,

$$\tau_a = e^{-\kappa X}$$

## Absorción

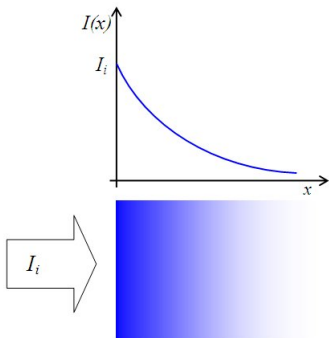
Absorción relativa es proporcional a la longitud de propagación,

$$\frac{\delta I}{I} = -\kappa \delta X,$$

$\kappa$ : coeficiente de absorción del medio.

Ley de Beer,

$$\tau_a = e^{-\kappa X}$$



# Absorción

Por ejemplo, para el vidrio,

- Bajo contenido  $Fe_2O_3$  :

$$\kappa_V \sim 4m^{-1}$$

- Alto contenido  $Fe_2O_3$  :

$$\kappa_V > 30m^{-1}$$

# Absorción

Por ejemplo, para el vidrio,

- Bajo contenido  $Fe_2O_3$  :

$$\kappa_V \sim 4m^{-1}$$

- Alto contenido  $Fe_2O_3$  :

$$\kappa_V > 30m^{-1}$$

Para una capa de vidrio de  
6 mm de espesor

- $\kappa_V \sim 4\frac{1}{m} \Rightarrow \tau_a \simeq 0,98$

- $\kappa_V > 30\frac{1}{m} \Rightarrow \tau_a \simeq 0,84$

# Absorción

Por ejemplo, para el vidrio,

- Bajo contenido  $Fe_2O_3$  :

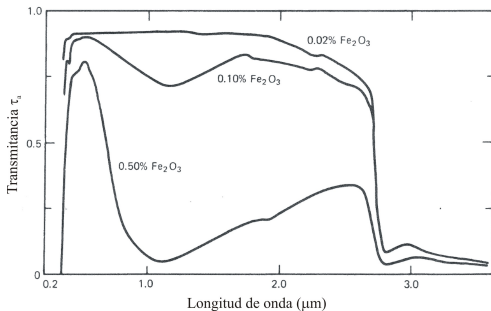
$$\kappa_V \sim 4 m^{-1}$$

- Alto contenido  $Fe_2O_3$  :

$$\kappa_V > 30 m^{-1}$$

Para una capa de vidrio de  
6 mm de espesor

- $\kappa_V \sim 4 \frac{1}{m} \Rightarrow \tau_a \simeq 0,98$
- $\kappa_V > 30 \frac{1}{m} \Rightarrow \tau_a \simeq 0,84$





## Absorción

Por ejemplo, para el vidrio,

- Bajo contenido  $Fe_2O_3$  :

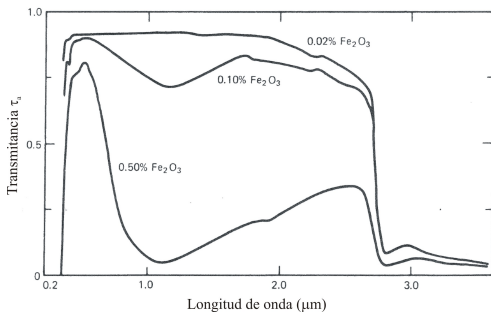
$$\kappa_V \sim 4m^{-1}$$

- Alto contenido  $Fe_2O_3$  :

$$\kappa_V > 30m^{-1}$$

Para una capa de vidrio de  
6 mm de espesor

- $\kappa_V \sim 4 \frac{1}{m} \Rightarrow \tau_a \simeq 0,98$
- $\kappa_V > 30 \frac{1}{m} \Rightarrow \tau_a \simeq 0,84$



Como en realidad  $\kappa = \kappa(\lambda)$ , es necesario utilizar  $\kappa_{ef}$

# Cálculo propiedades interfaz doble

Cálculo de transmitancia, reflectancia y absorptancia resulta complicado.

# Cálculo propiedades interfaz doble

Cálculo de transmitancia, reflectancia y absortancia resulta complicado.

Sin embargo, si  $\alpha \ll 1$ , es posible utilizar los valores aproximados,

$$\tau \cong \tau_r \cdot \tau_a$$

# Cálculo propiedades interfaz doble

Cálculo de transmitancia, reflectancia y absortancia resulta complicado.

Sin embargo, si  $\alpha \ll 1$ , es posible utilizar los valores aproximados,

$$\tau \cong \tau_r \cdot \tau_a$$

$$\alpha \cong 1 - \tau_a$$

# Cálculo propiedades interfaz doble

Cálculo de transmitancia, reflectancia y absortancia resulta complicado.

Sin embargo, si  $\alpha \ll 1$ , es posible utilizar los valores aproximados,

$$\tau \cong \tau_r \cdot \tau_a$$

$$\alpha \cong 1 - \tau_a$$

$$\rho \cong 1 - \alpha - \tau \cong \tau_a - \tau$$

$$\rho \cong \tau_a - \tau$$

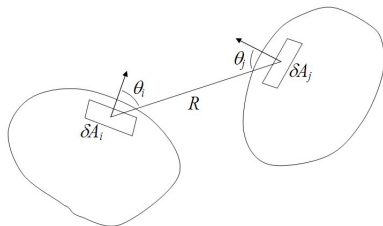
# Outline

- 1 Medios transparentes
- 2 Transferencia radiativa entre superficies
- 3 Transferencia de calor por conducción y convección

# Factor de vista

## Factor de vista

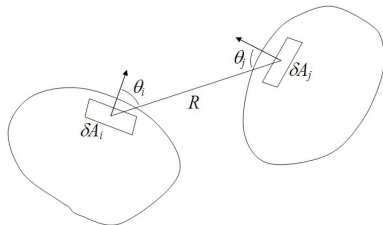
$F_{ij}$ : fracción de la energía radiada por una superficie  $i$  incidente sobre una superficie  $j$ .



# Factor de vista

## Factor de vista

$F_{ij}$ : fracción de la energía radiada por una superficie  $i$  incidente sobre una superficie  $j$ .



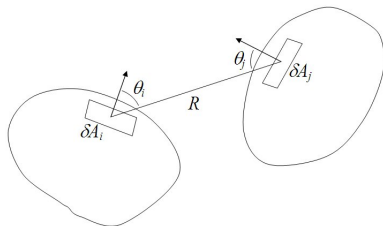
$$\delta q_{ij} = I_i \cos(\theta_i) dA_i d\omega_{ij}$$



## Factor de vista

## Factor de vista

$F_{ij}$ : fracción de la energía radiada por una superficie  $i$  incidente sobre una superficie  $j$ .



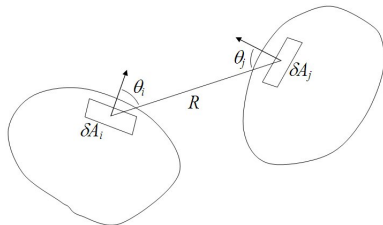
$$\delta q_{ij} = I_i \cos(\theta_i) dA_i d\omega_{ij}$$

$$d\omega_{ij} = (\cos(\theta_j) dA_j) / R^2$$

# Factor de vista

## Factor de vista

$F_{ij}$ : fracción de la energía radiada por una superficie  $i$  incidente sobre una superficie  $j$ .



$$\delta q_{ij} = I_i \cos(\theta_i) dA_i d\omega_{ij}$$

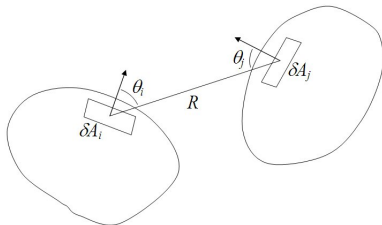
$$d\omega_{ij} = (\cos(\theta_j) dA_j) / R^2$$

$$\delta q_{ij} = I_i \frac{\cos(\theta_i) \cos(\theta_j)}{R^2} dA_i dA_j$$

# Factor de vista

## Factor de vista

$F_{ij}$ : fracción de la energía radiada por una superficie  $i$  incidente sobre una superficie  $j$ .



$$\delta q_{ij} = I_i \cos(\theta_i) dA_i d\omega_{ij}$$

$$d\omega_{ij} = (\cos(\theta_j) dA_j) / R^2$$

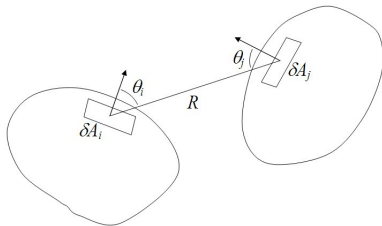
$$\delta q_{ij} = I_i \frac{\cos(\theta_i) \cos(\theta_j)}{R^2} dA_i dA_j$$

$$q_{ij} = J_i \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos(\theta_i) \cos(\theta_j)}{\pi R^2} dA_i dA_j$$

## Factor de vista

## Factor de vista

$F_{ij}$ : fracción de la energía radiada por una superficie  $i$  incidente sobre una superficie  $j$ .



$$\delta q_{ij} = I_i \cos(\theta_i) dA_i d\omega_{ij}$$

$$d\omega_{ij} = (\cos(\theta_j) dA_j) / R^2$$

$$\delta q_{ij} = I_i \frac{\cos(\theta_i) \cos(\theta_j)}{R^2} dA_i dA_j$$

$$q_{ij} = J_i \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos(\theta_i) \cos(\theta_j)}{\pi R^2} dA_i dA_j$$

$$F_{ij} = \frac{q_{ij}}{A_i J_i} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos(\theta_i) \cos(\theta_j)}{\pi R^2} dA_i dA_j.$$

# Factor de vista

## Reciprocidad

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

# Factor de vista

## Reciprocidad

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

Considerando las superficies cerrando un determinado recinto, entonces,

## Suma

$$1 = \sum_{j=1}^N F_{ij}$$

# Factor de vista

## Reciprocidad

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

Considerando las superficies cerrando un determinado recinto, entonces,

## Suma

$$1 = \sum_{j=1}^N F_{ij}$$

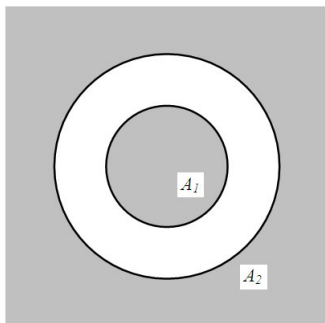
Si se considera una superficie compuesta  $A_{jk} = A_j \cup A_k$ , entonces

## Composición

$$F_{i(jk)} = F_{ij} + F_{ik}$$

# Factor de vista

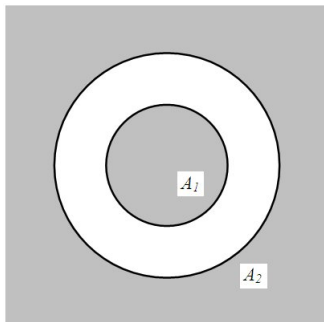
Ejemplo:





# Factor de vista

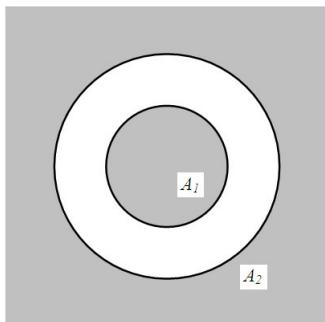
Ejemplo:



Obviamente  $F_{12} = 1$  y  $F_{11} = 0$ .

# Factor de vista

Ejemplo:



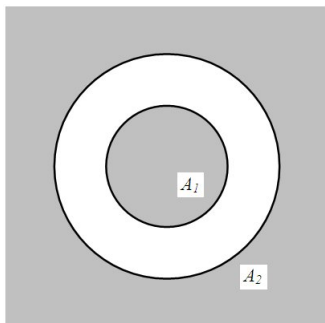
Obviamente  $F_{12} = 1$  y  $F_{11} = 0$ .

Por reciprocidad

$$F_{21} = \frac{A_1}{A_2} F_{12} = \frac{A_1}{A_2}.$$

# Factor de vista

Ejemplo:



Obviamente  $F_{12} = 1$  y  $F_{11} = 0$ .

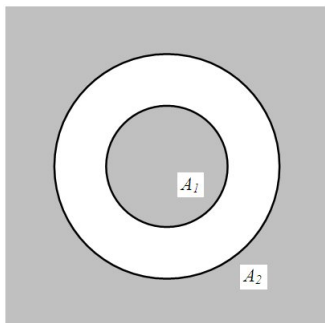
Por reciprocidad

$$F_{21} = \frac{A_1}{A_2} F_{12} = \frac{A_1}{A_2}$$

Como  $1 = F_{21} + F_{22}$ ,

# Factor de vista

Ejemplo:



Obviamente  $F_{12} = 1$  y  $F_{11} = 0$ .

Por reciprocidad

$$F_{21} = \frac{A_1}{A_2} F_{12} = \frac{A_1}{A_2}.$$

Como  $1 = F_{21} + F_{22}$ ,

$$F_{22} = 1 - \frac{A_1}{A_2}.$$

# Transferencia radiativa entre cuerpos negros

Se consideran dos *cuerpos negros* de superficies  $A_i$  y  $A_j$ , respectivamente a temperaturas  $T_i$  y  $T_j$ .

# Transferencia radiativa entre cuerpos negros

Se consideran dos *cuerpos negros* de superficies  $A_i$  y  $A_j$ , respectivamente a temperaturas  $T_i$  y  $T_j$ .

La potencia radiada por  $A_i$  e interceptada por  $A_j$  vale,

$$q_{ij} = J_i A_i F_{ij}.$$

# Transferencia radiativa entre cuerpos negros

Se consideran dos *cuerpos negros* de superficies  $A_i$  y  $A_j$ , respectivamente a temperaturas  $T_i$  y  $T_j$ .

La potencia radiada por  $A_i$  e interceptada por  $A_j$  vale,

$$q_{ij} = J_i A_i F_{ij}.$$

Como se trata de cuerpos negros  $J = E$ , entonces utilizando la ley de Stefan-Boltzmann,

$$q_{ij} = A_i F_{ij} \sigma T_i^4.$$

# Transferencia radiativa entre cuerpos negros

Se consideran dos *cuerpos negros* de superficies  $A_i$  y  $A_j$ , respectivamente a temperaturas  $T_i$  y  $T_j$ .

La potencia radiada por  $A_i$  e interceptada por  $A_j$  vale,

$$q_{ij} = J_i A_i F_{ij}.$$

Como se trata de cuerpos negros  $J = E$ , entonces utilizando la ley de Stefan-Boltzmann,

$$q_{ij} = A_i F_{ij} \sigma T_i^4.$$

La transferencia neta entre los dos cuerpos negros vale entonces

$$q_{ij} - q_{ji} = A_i F_{ij} \sigma T_i^4 - A_j F_{ji} \sigma T_j^4 = A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4)$$



# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

Hipótesis:

- Superficies isotermas.

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

Hipótesis:

- Superficies isotermas.
- Radiosidad e irradiación uniformes.

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

Hipótesis:

- Superficies isotermas.
- Radiosidad e irradiación uniformes.
- Superficies opacas, grises y difusoras.

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

Hipótesis:

- Superficies isotermas.
- Radiosidad e irradiación uniformes.
- Superficies opacas, grises y difusoras.

$$\bar{q}_i = A_i(J_i - G_i)$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

Hipótesis:

- Superficies isotermas.
- Radiosidad e irradiación uniformes.
- Superficies opacas, grises y difusoras.

$$\bar{q}_i = A_i(J_i - G_i)$$

$$J_i = E_i + \rho_i G_i$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

Hipótesis:

- Superficies isotermas.
- Radiosidad e irradiación uniformes.
- Superficies opacas, grises y difusoras.

$$\bar{q}_i = A_i(J_i - G_i)$$

$$J_i = E_i + \rho_i G_i = \epsilon_i E_{bi} + (1 - \epsilon_i) G_i$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

Hipótesis:

- Superficies isotermas.
- Radiosidad e irradiación uniformes.
- Superficies opacas, grises y difusoras.

$$\bar{q}_i = A_i(J_i - G_i)$$

$$J_i = E_i + \rho_i G_i = \epsilon_i E_{bi} + (1 - \epsilon_i) G_i$$

$$\bar{q}_i = A_i \left( J_i - \frac{J_i - \epsilon_i E_{bi}}{1 - \epsilon_i} \right)$$



# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

Hipótesis:

- Superficies isotermas.
- Radiosidad e irradiación uniformes.
- Superficies opacas, grises y difusoras.

$$\bar{q}_i = A_i(J_i - G_i)$$

$$J_i = E_i + \rho_i G_i = \epsilon_i E_{bi} + (1 - \epsilon_i) G_i$$

$$\bar{q}_i = A_i \left( J_i - \frac{J_i - \epsilon_i E_{bi}}{1 - \epsilon_i} \right) = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i)/(\epsilon_i A_i)}$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

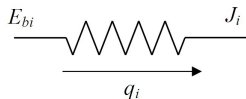
Hipótesis:

- Superficies isotermas.
- Radiosidad e irradiación uniformes.
- Superficies opacas, grises y difusoras.

$$\bar{q}_i = A_i(J_i - G_i)$$

$$J_i = E_i + \rho_i G_i = \epsilon_i E_{bi} + (1 - \epsilon_i) G_i$$

$$\bar{q}_i = A_i \left( J_i - \frac{J_i - \epsilon_i E_{bi}}{1 - \epsilon_i} \right) = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i) / (\epsilon_i A_i)}$$



# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

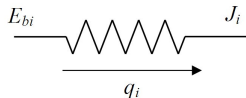
Hipótesis:

- Superficies isotermas.
- Radiosidad e irradiación uniformes.
- Superficies opacas, grises y difusoras.

$$\bar{q}_i = A_i(J_i - G_i)$$

$$J_i = E_i + \rho_i G_i = \epsilon_i E_{bi} + (1 - \epsilon_i) G_i$$

$$\bar{q}_i = A_i \left( J_i - \frac{J_i - \epsilon_i E_{bi}}{1 - \epsilon_i} \right) = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i)/(\epsilon_i A_i)}$$

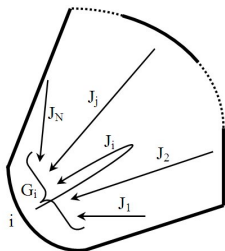


"Potencial ":  $(E_{bi} - J_i)$

Resistencia ":  $(1 - \epsilon_i)/(\epsilon_i A_i)$

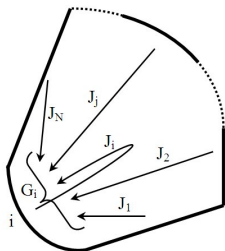
# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado



$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} A_j J_j$$

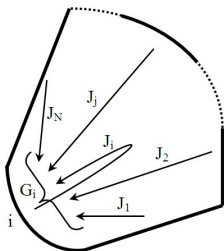
# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado



$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} A_j J_j$$

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} A_i J_j$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

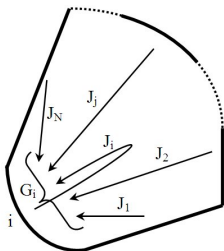


$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} A_j J_j$$

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} A_i J_j$$

$$\bar{q}_i = A_i (J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j)$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado



$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} A_j J_j$$

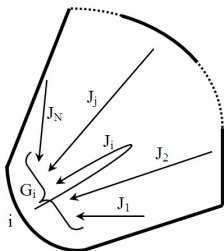
$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} A_i J_j$$

$$\bar{q}_i = A_i (J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j)$$

$$= A_i (\sum_{j=1}^N F_{ij} J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j)$$



# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado



$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} A_j J_j$$

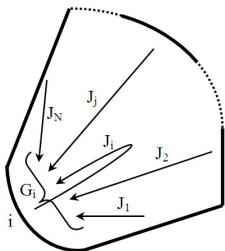
$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} A_i J_j$$

$$\bar{q}_i = A_i (J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j)$$

$$= A_i (\sum_{j=1}^N F_{ij} J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j)$$

$$= \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} (J_i - J_j)$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado



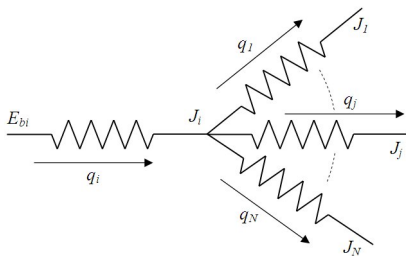
$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} A_j J_j$$

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} A_i J_j$$

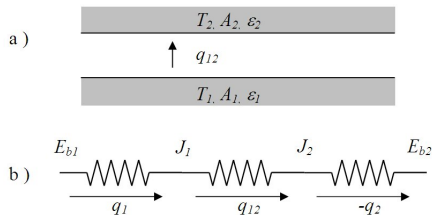
$$\bar{q}_i = A_i (J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j)$$

$$= A_i (\sum_{j=1}^N F_{ij} J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j)$$

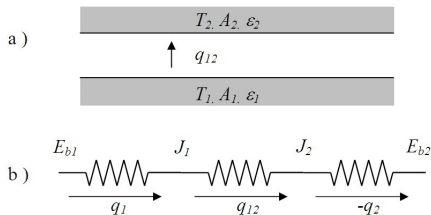
$$= \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} (J_i - J_j)$$



# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

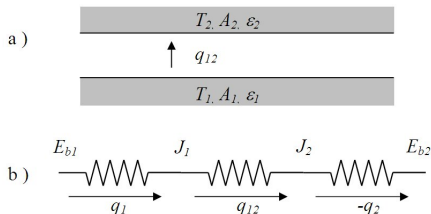


# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado



$$\bar{q}_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{(1 - \epsilon_1) / (\epsilon_1 A_1)}$$

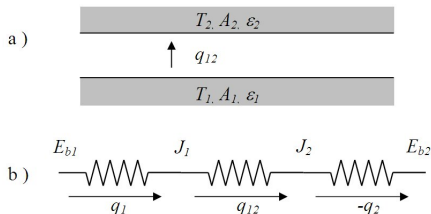
# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado



$$\bar{q}_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{(1 - \epsilon_1) / (\epsilon_1 A_1)}$$

$$\bar{q}_1 = -\bar{q}_2 = \frac{J_2 - E_{b2}}{(1 - \epsilon_2) / (\epsilon_2 A_2)}$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

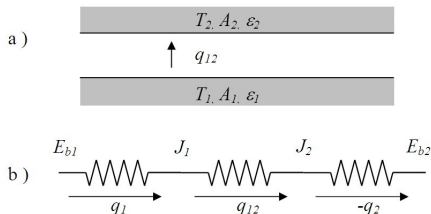


$$\bar{q}_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{(1 - \epsilon_1) / (\epsilon_1 A_1)}$$

$$\bar{q}_1 = -\bar{q}_2 = \frac{J_2 - E_{b2}}{(1 - \epsilon_2) / (\epsilon_2 A_2)}$$

$$\bar{q}_1 = A_1 F_{12} (J_1 - J_2) = A_2 F_{21} (J_1 - J_2)$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado



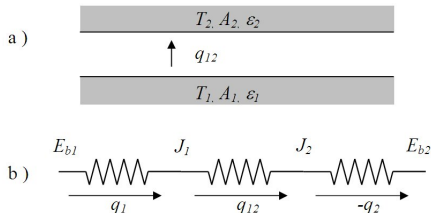
$$\bar{q}_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{(1 - \epsilon_1)/(\epsilon_1 A_1)}$$

$$\bar{q}_1 = -\bar{q}_2 = \frac{J_2 - E_{b2}}{(1 - \epsilon_2)/(\epsilon_2 A_2)}$$

$$\bar{q}_1 = A_1 F_{12}(J_1 - J_2) = A_2 F_{21}(J_1 - J_2)$$

$$\bar{q}_1 = \bar{q}_{12} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado



$$\bar{q}_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{(1 - \epsilon_1) / (\epsilon_1 A_1)}$$

$$\bar{q}_1 = -\bar{q}_2 = \frac{J_2 - E_{b2}}{(1 - \epsilon_2) / (\epsilon_2 A_2)}$$

$$\bar{q}_1 = A_1 F_{12} (J_1 - J_2) = A_2 F_{21} (J_1 - J_2)$$

$$\bar{q}_1 = \bar{q}_{12} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$$

$$\bar{q}_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$$



# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

## Ejemplo 1:

Superficies paralelas muy próximas, despreciando los efectos de borde

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

## Ejemplo 1:

Superficies paralelas muy próximas, despreciando los efectos de borde

$$\Rightarrow F_{12} = 1 ; A_1 = A_2 = A,$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

## Ejemplo 1:

Superficies paralelas muy próximas, despreciando los efectos de borde

$\Rightarrow F_{12} = 1 ; A_1 = A_2 = A,$

$$\bar{q}_{12} = \frac{\sigma A(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

## Ejemplo 1:

Superficies paralelas muy próximas, despreciando los efectos de borde

$\Rightarrow F_{12} = 1 ; A_1 = A_2 = A,$

$$\bar{q}_{12} = \frac{\sigma A(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

## Ejemplo 2:

Cuerpo, de superficie convexa, dentro de un recinto cerrado muy grande,

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

## Ejemplo 1:

Superficies paralelas muy próximas, despreciando los efectos de borde

$$\Rightarrow F_{12} = 1 ; A_1 = A_2 = A,$$

$$\bar{q}_{12} = \frac{\sigma A(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

## Ejemplo 2:

Cuerpo, de superficie convexa, dentro de un recinto cerrado muy grande,

$$\Rightarrow F_{12} = 1 ; A_1 \ll A_2,$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

## Ejemplo 1:

Superficies paralelas muy próximas, despreciando los efectos de borde  
 $\Rightarrow F_{12} = 1 ; A_1 = A_2 = A,$

$$\bar{q}_{12} = \frac{\sigma A(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

## Ejemplo 2:

Cuerpo, de superficie convexa, dentro de un recinto cerrado muy grande,  
 $\Rightarrow F_{12} = 1 ; A_1 \ll A_2,$

$$\bar{q}_{12} = \epsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

# Transferencia radiativa entre superficies grises-difusoras en un recinto cerrado

## Ejemplo 1:

Superficies paralelas muy próximas, despreciando los efectos de borde

$$\Rightarrow F_{12} = 1 ; A_1 = A_2 = A,$$

$$\bar{q}_{12} = \frac{\sigma A(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

## Ejemplo 2:

Cuerpo, de superficie convexa, dentro de un recinto cerrado muy grande,

$$\Rightarrow F_{12} = 1 ; A_1 \ll A_2,$$

$$\bar{q}_{12} = \epsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

Modelo para un cuerpo irradiando al cielo. En este caso  $T_2$  es la temperatura de cuerpo negro efectiva para el cielo.

# Outline

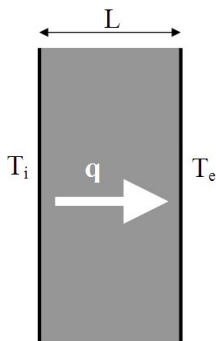
- 1 Medios transparentes
- 2 Transferencia radiativa entre superficies
- 3 Transferencia de calor por conducción y convección



# Conducción y convección - Generalidades

## Conducción

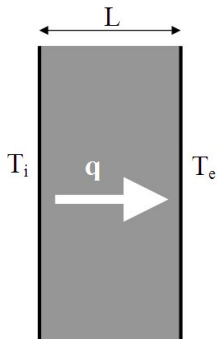
$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$



# Conducción y convección - Generalidades

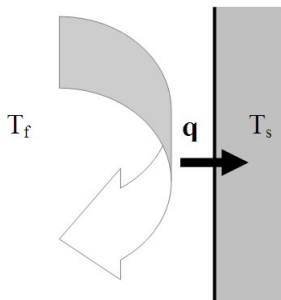
## Conducción

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

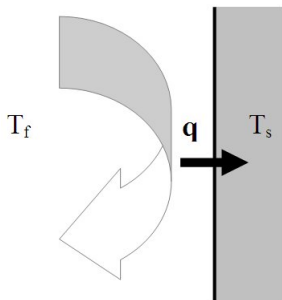


$$q = k_m(T_i - T_e)/L$$

# Convección - Generalidades



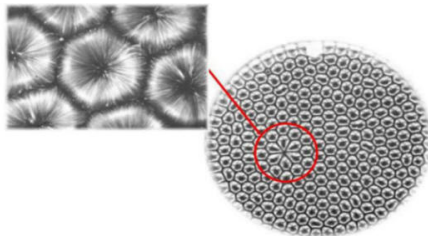
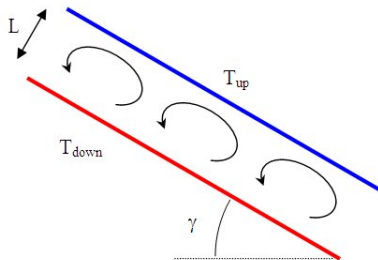
# Convección - Generalidades



Convección

$$Q = h_c A (T_f - T_s)$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas



# Convección natural entre superficies planas paralelas

# Convección natural entre superficies planas paralelas

Nusselt

$$Nu = \frac{h L}{k}$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

Nusselt

$$Nu = \frac{h L}{k}$$

Rayleigh

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha}$$



# Convección natural entre superficies planas paralelas

Nusselt

$$Nu = \frac{h L}{k}$$

Rayleigh

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha}$$

Prandtl

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

Nusselt

$$Nu = \frac{h L}{k}$$

Rayleigh

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha}$$

Prandtl

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

$h$ : coeficiente de transferencia de calor (convección),

$L$ : distancia característica del sistema (distancia entre las placas),

$k$ : conductividad térmica del fluido considerado,

$g$ : aceleración de la gravedad,

$\beta$ : coeficiente de expansión volumétrico ( $\beta = \frac{1}{T}$ , gas diluido)

$\Delta T$ : diferencia de temperatura (entre las placas),

$\nu$ : viscosidad cinemática,

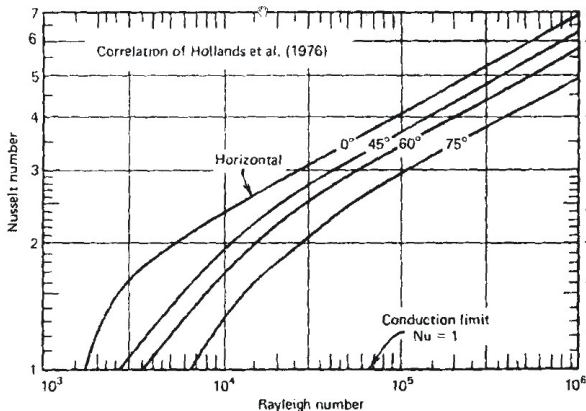
$\alpha$ : difusividad térmica.

# Convección natural entre superficies planas paralelas

# Convección natural entre superficies planas paralelas

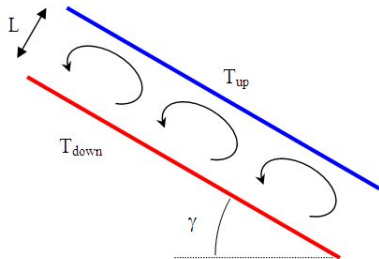
$$Nu = 1 + 1,44 \left( 1 - \frac{1708 (\sin(1,8\gamma))^{1,6}}{Ra \cos\gamma} \right) \left( 1 - \frac{1708}{Ra \cos\gamma} \right)^+ + \left[ \left( \frac{Ra \cos\gamma}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+$$

$$(0 \leq \gamma \leq 75^\circ)$$



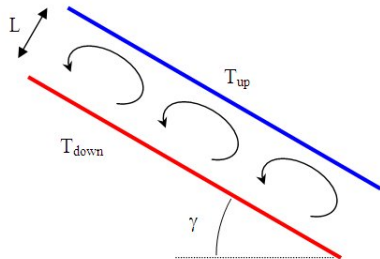
# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Aire

$$L = 1''$$

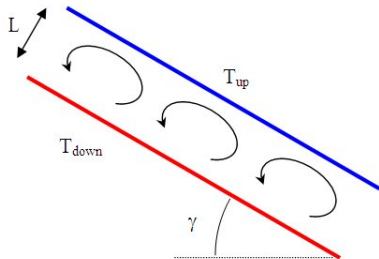
$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Aire

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

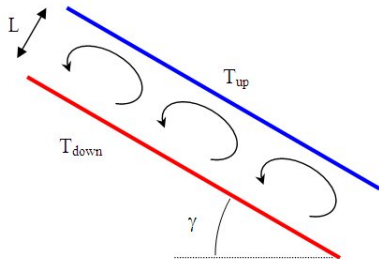
$$\nu = 20,93 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$\alpha = 29,9 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$k = 30,0 \times 10^{-3} W/m.K$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Aire

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

$$\nu = 20,93 \times 10^{-6} m^2/s$$

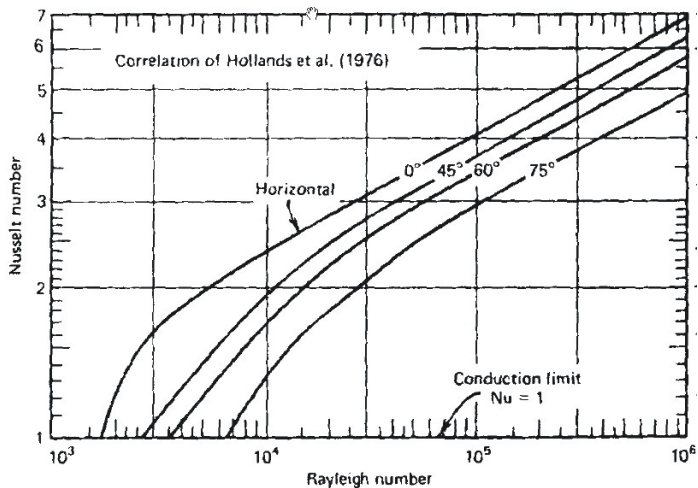
$$\alpha = 29,9 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$k = 30,0 \times 10^{-3} W/m.K$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = 5,8 \times 10^4$$

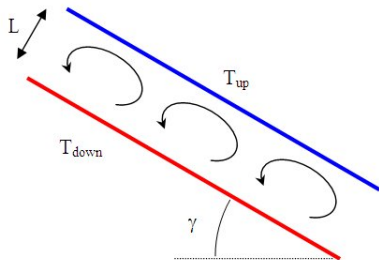


# Convección natural entre superficies planas paralelas



# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Aire

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

$$\nu = 20,93 \times 10^{-6} m^2/s$$

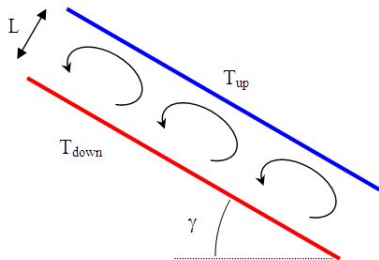
$$\alpha = 29,9 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$k = 30,0 \times 10^{-3} W/m.K$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = 5,8 \times 10^4$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Aire

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

$$\nu = 20,93 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$\alpha = 29,9 \times 10^{-6} m^2/s$$

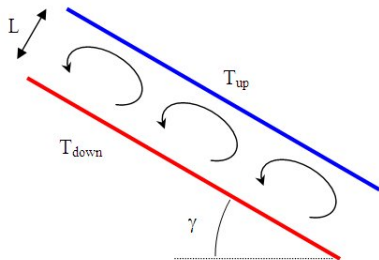
$$k = 30,0 \times 10^{-3} W/m.K$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = 5,8 \times 10^4 \Rightarrow$$

$$Nu \simeq 3,3$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Aire

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

$$\nu = 20,93 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$\alpha = 29,9 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$k = 30,0 \times 10^{-3} W/m.K$$

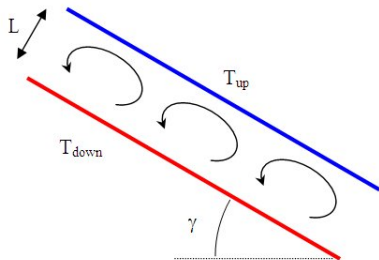
$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = 5,8 \times 10^4 \Rightarrow$$

$$Nu \simeq 3,3$$

$$h = Nu.k/L = 3,9 W/m^2.K$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Aire

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

$$\nu = 20,93 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$\alpha = 29,9 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$k = 30,0 \times 10^{-3} W/m.K$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = 5,8 \times 10^4 \Rightarrow$$

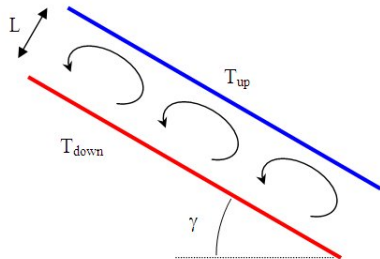
$$Nu \simeq 3,3$$

$$h = Nu.k/L = 3,9 W/m^2.K$$

$$q = 311 W/m^2$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Helio

$$L = 1''$$

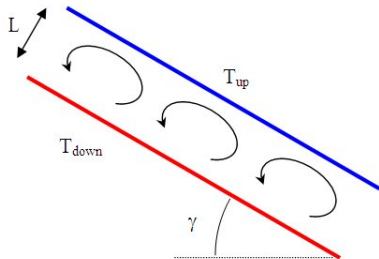
$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Helio

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

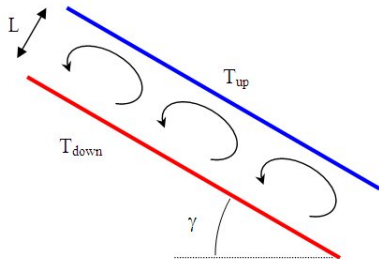
$$\nu = 160 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$\alpha = 240 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$k = 170 \times 10^{-3} W/m.K$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Helio

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

$$\nu = 160 \times 10^{-6} m^2/s$$

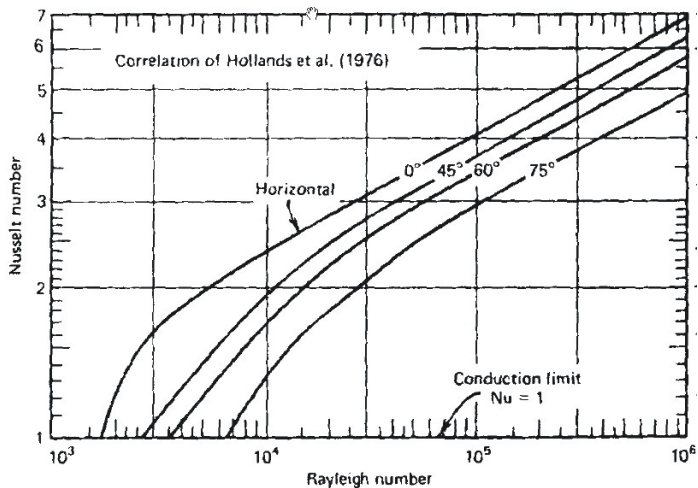
$$\alpha = 240 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$k = 170 \times 10^{-3} W/m.K$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = 948$$

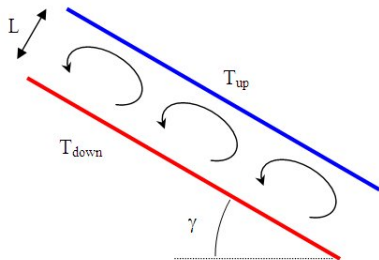


# Convección natural entre superficies planas paralelas



# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Helio

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

$$\nu = 160 \times 10^{-6} m^2/s$$

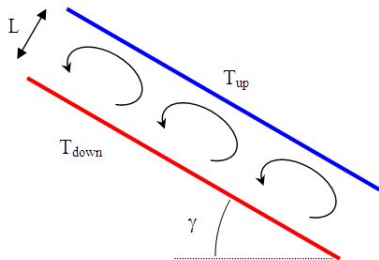
$$\alpha = 240 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$k = 170 \times 10^{-3} W/m.K$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = 948$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Helio

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

$$\nu = 160 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$\alpha = 240 \times 10^{-6} m^2/s$$

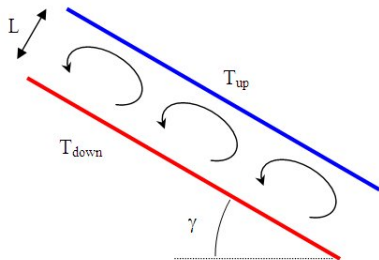
$$k = 170 \times 10^{-3} W/m.K$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = 948 \Rightarrow$$

$$Nu = 1$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Helio

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

$$\nu = 160 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$\alpha = 240 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$k = 170 \times 10^{-3} W/m.K$$

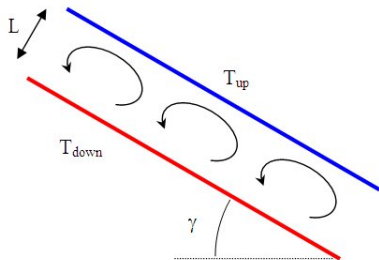
$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = 948 \Rightarrow$$

$$Nu = 1$$

$$h = k/L = 6,7 W/m^2.K$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

**Ejemplo:**



Helio

$$L = 1''$$

$$T_{down} = 120^{\circ}C$$

$$T_{up} = 40^{\circ}C$$

$$\gamma = 30^{\circ}$$

$$\nu = 160 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$\alpha = 240 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$k = 170 \times 10^{-3} W/m.K$$

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} = 948 \Rightarrow$$

$$Nu = 1$$

$$h = k/L = 6,7 W/m^2.K$$

$$q = 535 W/m^2$$

# Convección natural entre superficies planas paralelas

Importantes pérdidas por convección.

# Convección natural entre superficies planas paralelas

Importantes pérdidas por convección.

Estrategias para reducirlas.

# Convección natural entre superficies planas paralelas

Importantes pérdidas por convección.

Estrategias para reducirlas.

- Eliminar fluido convectivo  $\rightarrow$  vacío.



# Convección natural entre superficies planas paralelas

Importantes pérdidas por convección.

Estrategias para reducirlas.

- Eliminar fluido convectivo  $\rightarrow$  vacío.
- Sustituir fluido convectivo  $\rightarrow$  (aerogel?).

# Convección natural entre superficies planas paralelas

Importantes pérdidas por convección.

Estrategias para reducirlas.

- Eliminar fluido convectivo  $\rightarrow$  vacío.
- Sustituir fluido convectivo  $\rightarrow$  (aerogel?).
- Compartimentar  $\rightarrow$  reducir convección (delicado!).

# Convección natural entre superficies planas paralelas

Importantes pérdidas por convección.

Estrategias para reducirlas.

- Eliminar fluido convectivo  $\rightarrow$  vacío.
- Sustituir fluido convectivo  $\rightarrow$  (aerogel?).
- Compartimentar  $\rightarrow$  reducir convección (delicado!).