

Elementos de Transferencia de calor

Fundamentos de Energía Solar Térmica – 2010

Horacio Failache

Instituto de Física

Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

2 de septiembre de 2010

Unidad II: Elementos de Transferencia de Calor - Objetivos

- Transferencia radiativa de calor
 - Radiación: caracterización.
 - Superficies: cuerpo negro, superficies grises, difusivas, ley de Kirchhoff, superficies selectivas, medios transparentes.
 - Transferencia entre superficies: factor de vista, transferencia entre *cuerpos negros*, transferencia entre superficies grises.
- Transferencia por conducción y por convección
 - Generalidades
 - Abordaje de ejemplos específicos

Outline

- 1 Radiación térmica
- 2 Cuerpo Negro
- 3 Emisividad
- 4 Absortividad, reflectividad
- 5 Ley de Kirchhoff
- 6 Superficies selectivas

Espectro de radiación térmica

Transferencia radiativa de calor mediada por radiación, sin necesidad de materia vinculante.

Espectro de radiación térmica

Transferencia radiativa de calor mediada por radiación, sin necesidad de materia vinculante.

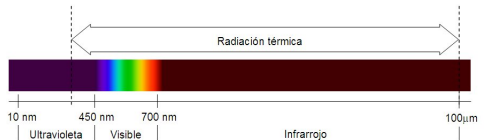
Radiación térmica

$$0,1\mu m < \lambda < 100\mu m$$

$$C = \lambda \cdot \nu$$

$$C = C_o/n$$

$$C_o = 2,998 \times 10^8 m/s$$



Espectro de radiación térmica

Transferencia radiativa de calor mediada por radiación, sin necesidad de materia vinculante.

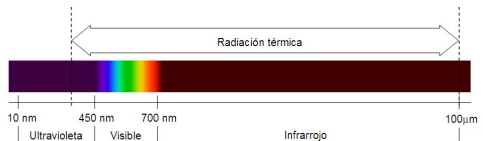
Radiación térmica

$$0,1\mu m < \lambda < 100\mu m$$

$$C = \lambda \cdot \nu$$

$$C = C_0/n$$

$$C_0 = 2,998 \times 10^8 m/s$$



Espectro UV : $100nm < \lambda < 450nm$

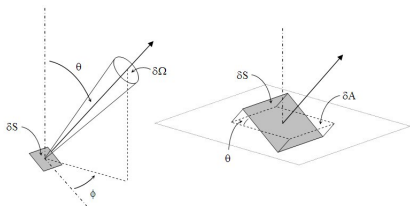
Especto visible : $450nm < \lambda < 700nm$

Espectro IR : $700nm < \lambda < 100\mu m$

Excitación térmica de niveles atómicos, moleculares y/o fonones del material.

Intensidad e irradiancia

Intensidad espectral: energía (emitida) por unidad de tiempo y de área (flujo), por unidad de ángulo sólido $\delta\Omega$ y por unidad de longitud de onda $\delta\lambda$.

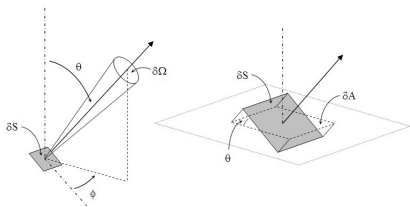


Intensidad espectral de emisión
$$I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{\delta Q}{\delta A \delta \lambda \delta \Omega}$$

$$\delta\Omega = \text{sen}(\theta)\delta\theta\delta\phi$$
$$\delta S = \delta A \cdot \text{cos}(\theta)$$

Intensidad e irradiancia

Intensidad espectral: energía (emitida) por unidad de tiempo y de área (flujo), por unidad de ángulo sólido $\delta\Omega$ y por unidad de longitud de onda $\delta\lambda$.



$$\delta\Omega = \text{sen}(\theta)\delta\theta\delta\phi$$
$$\delta S = \delta A \cdot \text{cos}(\theta)$$

Intensidad espectral de emisión

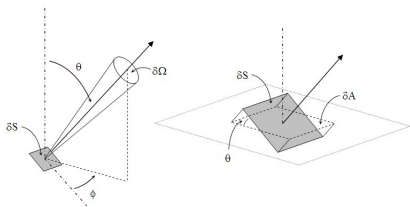
$$I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) = \frac{\delta Q}{\delta A \delta \lambda \delta \Omega}$$

Intensidad de emisión

$$I(\theta, \phi) = \int_0^\infty I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) d\lambda$$

Intensidad e irradiancia

Intensidad espectral: energía (emitida) por unidad de tiempo y de área (flujo), por unidad de ángulo sólido $\delta\Omega$ y por unidad de longitud de onda $\delta\lambda$.



$$\delta\Omega = \text{sen}(\theta)\delta\theta\delta\phi$$

$$\delta S = \delta A \cdot \text{cos}(\theta)$$

Intensidad espectral de emisión

$$I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) = \frac{\delta Q}{\delta A \delta \lambda \delta \Omega}$$

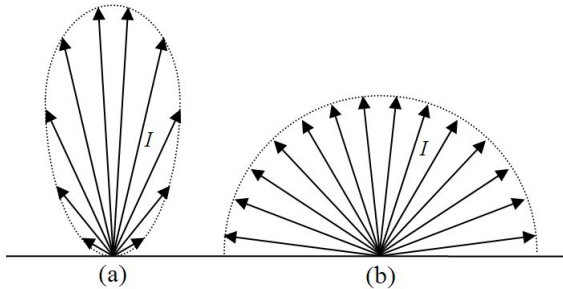
Intensidad de emisión

$$I(\theta, \phi) = \int_0^\infty I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) d\lambda$$

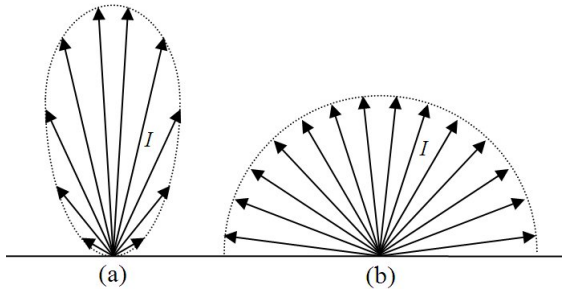
Emisión

$$E = \int I(\theta, \phi) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\theta, \phi) \text{cos}(\theta) \text{sen}(\theta) d\theta d\phi$$

Superficie difusora



Superficie difusora



Emisión difusa

$$E_d = \int I_d d\Omega = I_d \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi = \pi I_d$$

Irradiancia

Análogamente se define la intensidad incidente sobre una superficie, y en función de ella la irradiancia G .

Irradiancia

Análogamente se define la intensidad incidente sobre una superficie, y en función de ella la irradiancia G .

Intensidad espectral incidente

$$I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{\delta Q}{\delta A \delta \lambda \delta \Omega}$$

Irradiancia

Análogamente se define la intensidad incidente sobre una superficie, y en función de ella la irradiancia G .

Intensidad espectral incidente

$$I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{\delta Q}{\delta A \delta \lambda \delta \Omega}$$

Intensidad incidente

$$I(\theta, \phi) = \int_0^{\infty} I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) d\lambda$$

Irradiancia

Análogamente se define la intensidad incidente sobre una superficie, y en función de ella la irradiancia G .

Intensidad espectral incidente

$$I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{\delta Q}{\delta A \delta \lambda \delta \Omega}$$

Intensidad incidente

$$I(\theta, \phi) = \int_0^{\infty} I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) d\lambda$$

Irradiancia

$$G = \int I(\theta, \phi) d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\theta, \phi) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi$$

Outline

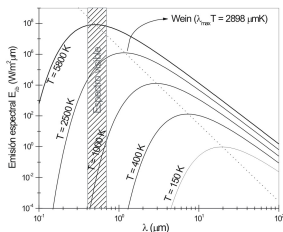
- 1 Radiación térmica
- 2 Cuerpo Negro**
- 3 Emisividad
- 4 Absortividad, reflectividad
- 5 Ley de Kirchhoff
- 6 Superficies selectivas

Modelo de *Cuerpo Negro*

- Absorbe toda la energía radiativa incidente (reflexión nula).
- Emisor ideal, emite toda energía que recibe.
- Ninguna superficie puede emitir más energía.
- Emisor difusor perfecto.

Modelo de *Cuerpo Negro*

- Absorbe toda la energía radiativa incidente (reflexión nula).
- Emisor ideal, emite toda energía que recibe.
- Ninguna superficie puede emitir más energía.
- Emisor difusor perfecto.

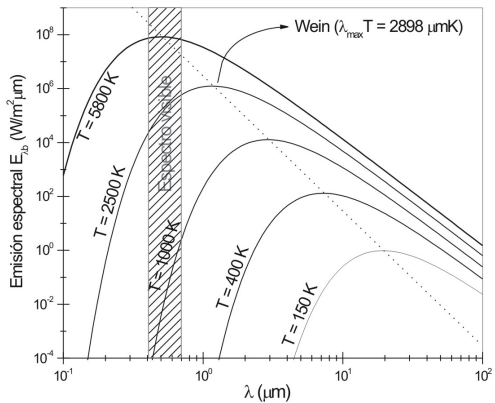


Espectro de emisión (ecuación de Planck):

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [e^{hc_0/\lambda kT} - 1]}$$

(Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, Boltzmann
 $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

Radiación de cuerpo negro



Cuerpo negro

La radiación como flujo de partículas o cuantos de energía (fotones), $E_f = h\nu$.

Cuerpo negro

La radiación como flujo de partículas o cuantos de energía (fotones), $E_f = h\nu$.

Ley de Wein

$$\lambda_{max} = C_W T^{-1} \quad (C_W = 2897,8 \mu m.K)$$

Cuerpo negro

La radiación como flujo de partículas o cuantos de energía (fotones), $E_f = h\nu$.

Ley de Wein

$$\lambda_{max} = C_W T^{-1} \quad (C_W = 2897,8 \mu m.K)$$

Ley de Stefan-Boltzmann

$$E_b = \sigma T^4$$

$$(\sigma = 5,670 \times 10^{-8} W/m^2.K^4)$$

Outline

- 1 Radiación térmica
- 2 Cuerpo Negro
- 3 Emisividad**
- 4 Absortividad, reflectividad
- 5 Ley de Kirchhoff
- 6 Superficies selectivas

Emisividad espectral

$$\epsilon_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda, b}(\lambda, T)}.$$

Emisividad

Emisividad espectral

$$\epsilon_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda, b}(\lambda, T)}.$$

Emisividad direccional

$$\epsilon_{\theta} = \frac{I(\theta, \phi, T)}{I_b(\lambda, T)}.$$

Emisividad

Emisividad espectral

$$\epsilon_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda, b}(\lambda, T)}.$$

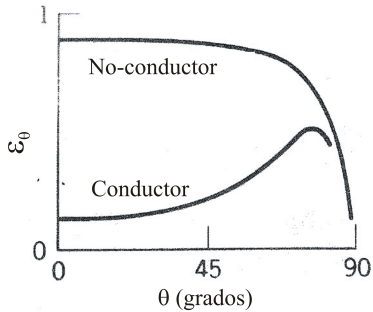
Emisividad direccional

$$\epsilon_{\theta} = \frac{I(\theta, \phi, T)}{I_b(\lambda, T)}.$$

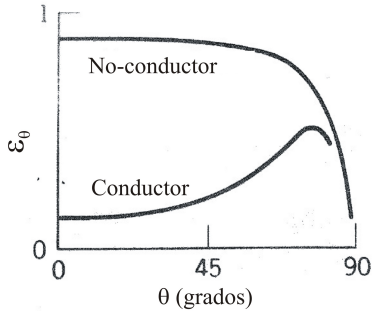
Emisividad total

$$\epsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)}.$$

Emisividad - Modelo difusivo

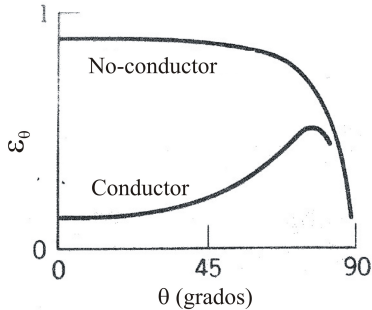


Emisividad - Modelo difusivo



Emisividad normal ($\epsilon_n = \epsilon_\theta(\theta = 0)$).

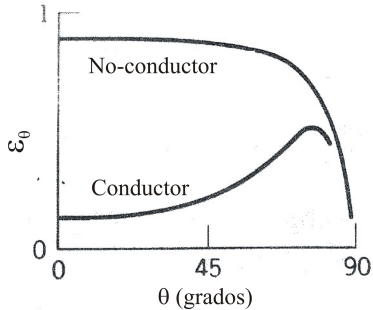
Emisividad - Modelo difusivo



Emisividad normal ($\epsilon_n = \epsilon_\theta(\theta = 0)$).

- Conductor : $1 \leq (\epsilon/\epsilon_n) \leq 1,3$

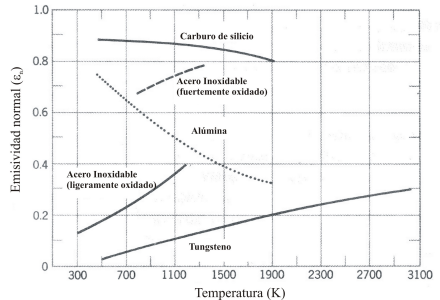
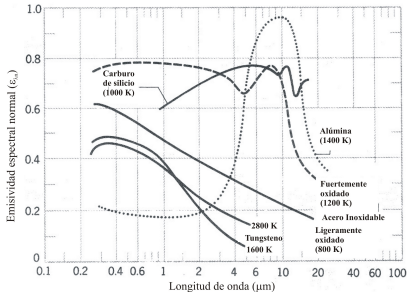
Emisividad - Modelo difusivo



Emisividad normal ($\epsilon_n = \epsilon_{\theta}(\theta = 0)$).

- Conductor : $1 \leq (\epsilon/\epsilon_n) \leq 1,3$
- No-conductoras : $0,95 \leq (\epsilon/\epsilon_n) \leq 1,0$

Emisividad espectral



- Metales bien pulidos, ϵ_{λ} baja.
- Metales con óxido, etc., ϵ_{λ} crece.
- No-conductores, $\epsilon_{\lambda} > 0,6$.

- Metales, ϵ_{λ} crece con T.
- No-conductores, ϵ_{λ} crece o decrece con T.

Outline

- 1 Radiación térmica
- 2 Cuerpo Negro
- 3 Emisividad
- 4 Absortividad, reflectividad**
- 5 Ley de Kirchhoff
- 6 Superficies selectivas

Absortividad, reflectividad

Absortividad, reflectividad

Absortividad espectral direccional

$$\alpha_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda \text{ abs}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}$$

Absortividad, reflectividad

Absortividad espectral direccional

$$\alpha_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda \text{ abs}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}$$

Absortividad espectral

$$\alpha_{\lambda} = \frac{G_{\lambda \text{ abs}}}{G_{\lambda}}$$

Absortividad, reflectividad

Absortividad espectral direccional

$$\alpha_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda, \text{abs}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}$$

Absortividad espectral

$$\alpha_{\lambda} = \frac{G_{\lambda, \text{abs}}}{G_{\lambda}}$$

Absortividad (total)

$$\alpha = \frac{G_{\text{abs}}}{G}$$

Absortividad, reflectividad

Absortividad espectral direccional

$$\alpha_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda \text{ abs}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}$$

Reflectividad espectral direccional

$$\rho_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda \text{ ref}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}$$

Absortividad espectral

$$\alpha_{\lambda} = \frac{G_{\lambda \text{ abs}}}{G_{\lambda}}$$

Absortividad (total)

$$\alpha = \frac{G_{\text{abs}}}{G}$$

Absortividad, reflectividad

Absortividad espectral direccional

$$\alpha_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda \text{ abs}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}$$

Absortividad espectral

$$\alpha_{\lambda} = \frac{G_{\lambda \text{ abs}}}{G_{\lambda}}$$

Absortividad (total)

$$\alpha = \frac{G_{\text{abs}}}{G}$$

Reflectividad espectral direccional

$$\rho_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda \text{ ref}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}$$

Reflectividad espectral

$$\rho_{\lambda} = \frac{G_{\lambda \text{ ref}}}{G_{\lambda}}$$

Absortividad, reflectividad

Absortividad espectral direccional

$$\alpha_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda \text{ abs}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}$$

Absortividad espectral

$$\alpha_{\lambda} = \frac{G_{\lambda \text{ abs}}}{G_{\lambda}}$$

Absortividad (total)

$$\alpha = \frac{G_{\text{abs}}}{G}$$

Reflectividad espectral direccional

$$\rho_{\lambda, \theta} = \frac{I_{\lambda \text{ ref}}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}$$

Reflectividad espectral

$$\rho_{\lambda} = \frac{G_{\lambda \text{ ref}}}{G_{\lambda}}$$

Reflectividad (total)

$$\rho = \frac{G_{\text{ref}}}{G}$$

Absortividad, reflectividad

Conservación de la energía (material opaco, $\tau = 0$)

$$I_{\lambda} = I_{\lambda \text{ abs}} + I_{\lambda \text{ ref}}$$

Absortividad, reflectividad

Conservación de la energía (material opaco, $\tau = 0$)

$$I_{\lambda} = I_{\lambda \text{ abs}} + I_{\lambda \text{ ref}}$$

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1$$

Absortividad, reflectividad

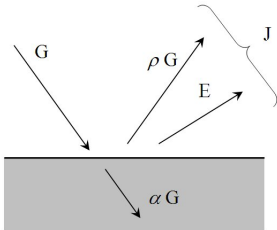
Conservación de la energía (material opaco, $\tau = 0$)

$$I_\lambda = I_{\lambda \text{ abs}} + I_{\lambda \text{ ref}}$$

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

$$\alpha + \rho = 1.$$

Radiosidad



Se define la radiosidad como,

$$J = \rho G + E$$

Outline

- 1 Radiación térmica
- 2 Cuerpo Negro
- 3 Emisividad
- 4 Absortividad, reflectividad
- 5 Ley de Kirchhoff**
- 6 Superficies selectivas

Ley de Kirchhoff

Demostración no-rigurosa:

Ley de Kirchhoff

Demostración no-rigurosa:

Hipótesis : pequeños cuerpos dentro de un gran recinto isotérmico. Equilibrio termodinámico.

Ley de Kirchhoff

Demostración no-rigurosa:

Hipótesis : pequeños cuerpos dentro de un gran recinto isotérmico. Equilibrio termodinámico.

$$G = E_b(T)$$

Ley de Kirchhoff

Demostración no-rigurosa:

Hipótesis : pequeños cuerpos dentro de un gran recinto isotérmico. Equilibrio termodinámico.

$$G = E_b(T)$$

$$\alpha_i G = E_i(T_i)$$

Ley de Kirchhoff

Demostración no-rigurosa:

Hipótesis : pequeños cuerpos dentro de un gran recinto isotérmico. Equilibrio termodinámico.

$$G = E_b(T)$$

$$\alpha_i G = E_i(T_i)$$

$$\frac{E_i(T)}{\alpha_i} = E_b(T)$$

Ley de Kirchhoff

Demostración no-rigurosa:

Hipótesis : pequeños cuerpos dentro de un gran recinto isotérmico. Equilibrio termodinámico.

$$G = E_b(T)$$

$$\alpha_j G = E_j(T_j)$$

$$\frac{E_j(T)}{\alpha_j} = E_b(T)$$

$$\epsilon_j = \alpha_j$$

Ley de Kirchhoff

Hipótesis : $\epsilon_{\lambda,\theta} = \alpha_{\lambda,\theta}$

Ley de Kirchhoff

Hipótesis : $\epsilon_{\lambda,\theta} = \alpha_{\lambda,\theta}$

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda,\theta} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = ? = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda,\theta} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = \alpha_{\lambda}$$

Ley de Kirchhoff

Hipótesis : $\epsilon_{\lambda, \theta} = \alpha_{\lambda, \theta}$

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda, \theta} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} \stackrel{?}{=} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda, \theta} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = \alpha_{\lambda}$$

- Radiación incidente difusa.

Ley de Kirchhoff

Hipótesis : $\epsilon_{\lambda, \theta} = \alpha_{\lambda, \theta}$

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda, \theta} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = ? = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda, \theta} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = \alpha_{\lambda}$$

- Radiación incidente difusa.
(Mala aproximación tratándose de radiación solar directa)

Ley de Kirchhoff

Hipótesis : $\epsilon_{\lambda,\theta} = \alpha_{\lambda,\theta}$

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda,\theta} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = ? = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda,\theta} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = \alpha_{\lambda}$$

- Radiación incidente difusa.
(Mala aproximación tratándose de radiación solar directa)
- Superficie difusora.

Ley de Kirchhoff

Hipótesis : $\epsilon_{\lambda, \theta} = \alpha_{\lambda, \theta}$

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda, \theta} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} \stackrel{?}{=} \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda, \theta} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = \alpha_{\lambda}$$

- Radiación incidente difusa.
 (Mala aproximación tratándose de radiación solar directa)
- Superficie difusora.

$$\epsilon = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} E_{b, \lambda} d\lambda}{E_b} \stackrel{?}{=} \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{G} = \alpha$$

Ley de Kirchhoff

Hipótesis : $\epsilon_{\lambda, \theta} = \alpha_{\lambda, \theta}$

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda, \theta} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} \stackrel{?}{=} \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda, \theta} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = \alpha_{\lambda}$$

- Radiación incidente difusa.
(Mala aproximación tratándose de radiación solar directa)
- Superficie difusora.

$$\epsilon = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} E_{b, \lambda} d\lambda}{E_b} \stackrel{?}{=} \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{G} = \alpha$$

- $E_{b, \lambda} = G_{\lambda}$.

Ley de Kirchhoff

Hipótesis : $\epsilon_{\lambda, \theta} = \alpha_{\lambda, \theta}$

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda, \theta} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} \stackrel{?}{=} \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda, \theta} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = \alpha_{\lambda}$$

- Radiación incidente difusa.
(Mala aproximación tratándose de radiación solar directa)
- Superficie difusora.

$$\epsilon = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} E_{b, \lambda} d\lambda}{E_b} \stackrel{?}{=} \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{G} = \alpha$$

- $E_{b, \lambda} = G_{\lambda}$.
- ϵ_{λ} y α_{λ} independientes de λ .

Ley de Kirchhoff

Hipótesis : $\epsilon_{\lambda, \theta} = \alpha_{\lambda, \theta}$

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda, \theta} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} \stackrel{?}{=} \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\lambda, \theta} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi} = \alpha_{\lambda}$$

- Radiación incidente difusa.
(Mala aproximación tratándose de radiación solar directa)
- Superficie difusora.

$$\epsilon = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} E_{b, \lambda} d\lambda}{E_b} \stackrel{?}{=} \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{G} = \alpha$$

- $E_{b, \lambda} = G_{\lambda}$.
- ϵ_{λ} y α_{λ} independientes de λ . ← **superficie gris**

Ley de Kirchhoff

Conclusión :

$$\epsilon = \alpha$$

para una superficie gris difusora.

Outline

- 1 Radiación térmica
- 2 Cuerpo Negro
- 3 Emisividad
- 4 Absortividad, reflectividad
- 5 Ley de Kirchhoff
- 6 Superficies selectivas

Superficies selectivas

Superficie colector solar:

Superficies selectivas

Superficie colector solar:

- Máxima absortividad α para la radiación solar.

Superficies selectivas

Superficie colector solar:

- Máxima absortividad α para la radiación solar.
- Mínima emisividad ϵ de radiación térmica.

Superficies selectivas

Superficie colector solar:

- Máxima absortividad α para la radiación solar.
- Mínima emisividad ϵ de radiación térmica.

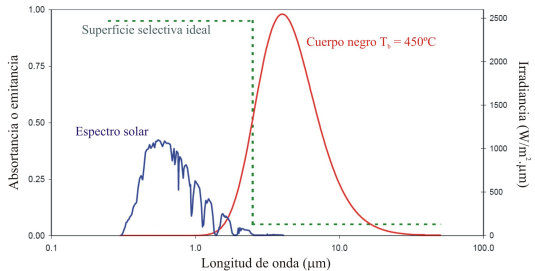
Aparente contradicción con ley de Kirchhoff ($\alpha = \epsilon$)!

Superficies selectivas

Superficie colector solar:

- Máxima absortividad α para la radiación solar.
- Mínima emisividad ϵ de radiación térmica.

Aparente contradicción con ley de Kirchhoff ($\alpha = \epsilon$)!

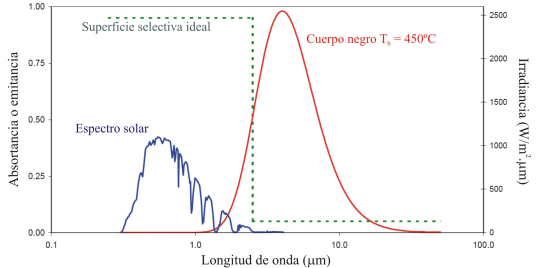


Superficies selectivas

Superficie colector solar:

- Máxima absortividad α para la radiación solar.
- Mínima emisividad ϵ de radiación térmica.

Aparente contradicción con ley de Kirchhoff ($\alpha = \epsilon$)!



Superficie selectiva: superficie gris a tramos.

Superficies selectivas

- *Intrínsecas*: la selectividad es una propiedad intrínseca del material.

Superficies selectivas

- *Intrínsecas*: la selectividad es una propiedad intrínseca del material.
- *Semiconductor-metal*: Si o Ge (absorción en longitudes de onda cortas), sustrato metálico (emitancia en longitudes de onda grandes).

Superficies selectivas

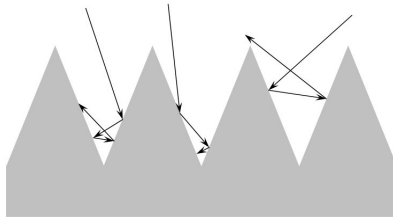
- *Intrínsecas*: la selectividad es una propiedad intrínseca del material.
- *Semiconductor-metal*: Si o Ge (absorción en longitudes de onda cortas), substrato metálico (emitancia en longitudes de onda grandes).
- *Multicapa*: se fabrican con varias capas metálicas y semiconductoras.

Superficies selectivas

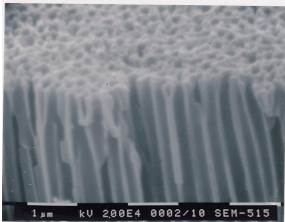
- *Intrínsecas*: la selectividad es una propiedad intrínseca del material.
- *Semiconductor-metal*: Si o Ge (absorción en longitudes de onda cortas), sustrato metálico (emitancia en longitudes de onda grandes).
- *Multicapa*: se fabrican con varias capas metálicas y semiconductoras.
- *Composite metal-dieléctrico*: capa con alta absortividad para la irradiancia solar sobre un sustrato metálico que presenta baja emitancia térmica.

Superficies selectivas

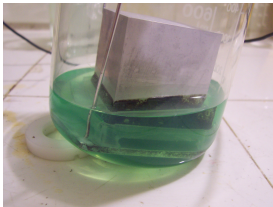
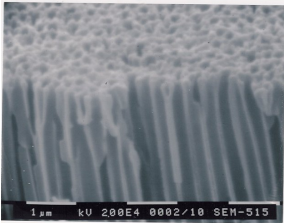
- *Intrínsecas*: la selectividad es una propiedad intrínseca del material.
- *Semiconductor-metal*: Si o Ge (absorción en longitudes de onda cortas), sustrato metálico (emitancia en longitudes de onda grandes).
- *Multicapa*: se fabrican con varias capas metálicas y semiconductoras.
- *Composite metal-dieléctrico*: capa con alta absortividad para la irradiancia solar sobre un sustrato metálico que presenta baja emitancia térmica.
- *Texturado*: radiación solar aprisionada por cavidades. Nano-estructurado.



Superficies selectivas



Superficies selectivas



Superficies selectivas

