



T.C. por Radiación: conceptos básicos

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. EMISIÓN DE LA RADIACIÓN. CUERPO NEGRO**
- 3. FLUJOS DE RADIACIÓN**
- 4. RECEPCIÓN DE LA RADIACIÓN**
- 5. LEY DE KIRCHHOFF. SUPERFICIES GRISES**
- 6. PROPIEDADES DE LAS SUPERFICIES RADIANTES REALES**
- 7. RADIACIÓN ENTRE SUPERFICIES. FACTOR DE VISIÓN.**
- 8. INTERCAMBIO DE RADIACIÓN TÉRMICA POR MEDIOS NO ABSORBENTES NI EMISORES.**
- 9. INTERCAMBIO DE RADIACIÓN POR MEDIOS ABSORBENTES/EMISORES.**
- 10. TRANSMISIÓN DE CALOR COMBINADA POR CONDUCCIÓN-CONVECCIÓN Y RADIACIÓN.**



1. Introducción

Radiación: "T.C. mediante el desplazamiento de ondas electromagnéticas"

- ✓ no necesita de la presencia de un medio material
- ✓ se desarrolla de forma óptima en el vacío

Ejemplos de T.C. por radiación

- ✓ energía que llega a la Tierra procedente del Sol
- ✓ en I.E.: hornos, calderas, calentadores eléctricos, etc.
- ✓ pérdidas de calor de equipos y conducciones hacia el exterior

Propiedades de la radiación → Teoría dualística onda-corpúsculo => explica las propiedades de la radiación considerando de forma separada:

- ✓ **Emisión y recepción** → Fotones (partículas discretas)
Ley de Planck: $E = h \cdot \nu$ (h , cte. Planck = $6,62377 \cdot 10^{-34}$ J·s); $E \neq f(\text{medio tr.})$
- ✓ **Transmisión** → Ondas electromagnéticas caracterizadas por su velocidad (c) y su longitud de onda (λ).

$$c = f(\text{medio de transmisión}); c \neq f(\text{frecuencia de radiación}); c = \lambda \cdot \nu$$

$$\text{vacío} \rightarrow c = 2,99776 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

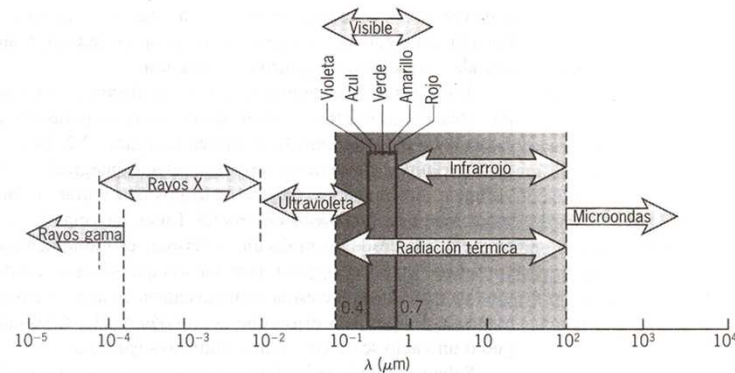
$$\text{medio material} \rightarrow n = c_{0(\text{vacío})} / c; \quad n: \text{índice de refracción (} = 1: \text{ gases)}$$

(= 1,5: líquidos y sólidos transparentes)

1. Introducción

Radiación térmica: energía radiante que emite un cuerpo en virtud de su T

- ✓ cualquier cuerpo, por encima del 0 K, emite radiación térmica. A T bajas los flujos de radiación son muy bajos. Al $\uparrow T \rightarrow \downarrow \lambda \rightarrow \uparrow \nu \rightarrow \uparrow E$ de los fotones emitidos
- ✓ sus propiedades se explican mediante la teoría onda-corpúsculo
- ✓ Localización de la radiación térmica en el espectro electromagnético: incluye parte del UV, todo el visible y todo el IR ($0,1 \mu\text{m} < \lambda < 100 \mu\text{m}$)



- ✓ caudal de calor transmitido por radiación $\propto (T_1^4 - T_2^4) \Rightarrow$ importante a elevadas temperaturas
- ✓ la rad. emitida por una superficie es independiente de la rad. emitida por cualquier otra superficie material a la vista o en contacto con la primera

Cuerpos a diferente T colocados en un recinto, uno a la vista del otro:

- ✓ los calientes pierden energía (se enfrían)
- ✓ los fríos absorben energía (se calientan)

El intercambio de calor por radiación puede ser un fenómeno...

- ✓ volumétrico: gases y algunos líquidos y sólidos transparentes
- ✓ superficial: sólidos no transparentes y el resto de los líquidos

2. Emisión de la radiación. Cuerpo negro.

$T > 0 \text{ K} \Rightarrow$ Emisión de radiación en todas direcciones y en varias λ

Rad. emitida a $\lambda = f(\text{material, superficie, } T) \rightarrow$ diversos cuerpos a $=T$ pueden emitir distinta cantidad de radiación \rightarrow definición de una ref. con la cual comparar las características radiantes de cualquier cuerpo:

Referencia: E máxima emitida a una $T \Rightarrow$ **CUERPO NEGRO**

Def.: cuerpo ideal que emite y absorbe la cantidad máxima posible de radiación con cualquier longitud de onda, a cualquier temperatura

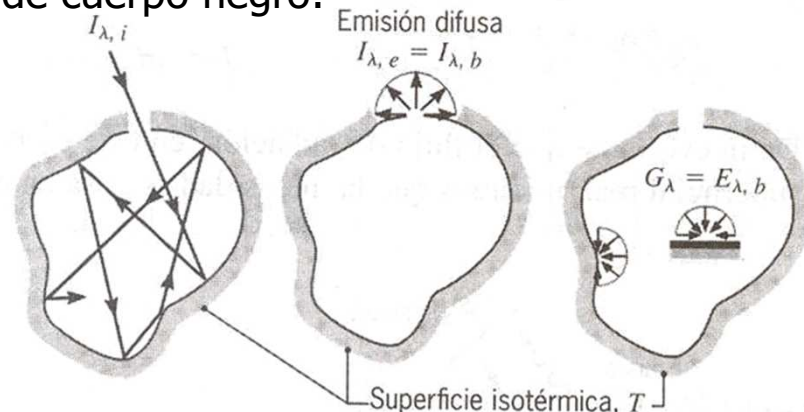
Características del cuerpo negro:

- ✓ Absorbedor ideal: absorbe todo, no refleja nada
- ✓ Emisor ideal: ningún cuerpo emite mayor cantidad de energía, a cada λ y T
- ✓ Emisor difuso: la intensidad de radiación no varía con la dirección

Cuerpos reales que se aproximan al concepto de cuerpo negro:

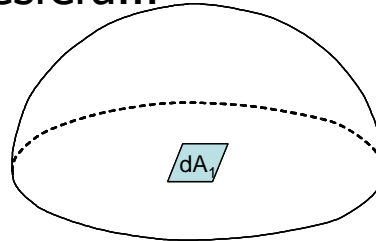
- ✓ ceniza
- ✓ nieve

Cuerpo negro para estudios en laboratorio...



2. Emisión de la radiación. Cuerpo negro.

Considerando una superficie sólida, a T y que la energía se esparce en todas direcciones a través de una hemiesfera...

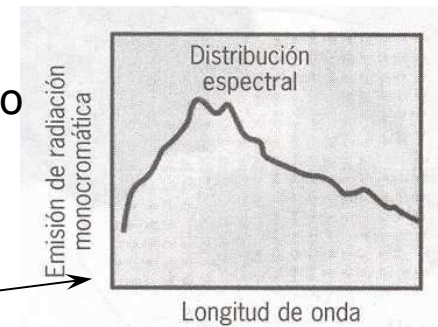


✓ **Poder emisor:** flujo de radiación emitido por una superficie (energía radiante emitida por una superficie por unidad de tiempo y de superficie)

La radiación emitida por una superficie esta formada por una distribución no uniforme de componentes monocromáticos

- Poder emisor monocromático o espectral (E_λ): radiación emitida por una superficie con una única λ (en todas direcciones)
- Poder emisor total: radiación emitida con cualquier λ (en todas direcciones)

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$$



Poder emisor total de un cuerpo negro => ley de Stefan-Boltzman

$$E_N = \sigma T^4 \quad \sigma \equiv \text{cte. de Stefan Boltzmann} = 5,670 \cdot 10^{-8} / \text{m}^2 \cdot \text{K}^4$$

2. Emisión de la radiación. Cuerpo negro.

La **ley de Planck (1901)**: permite calcular el poder emisor monocromático del cuerpo negro:

$$E_{N\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}$$

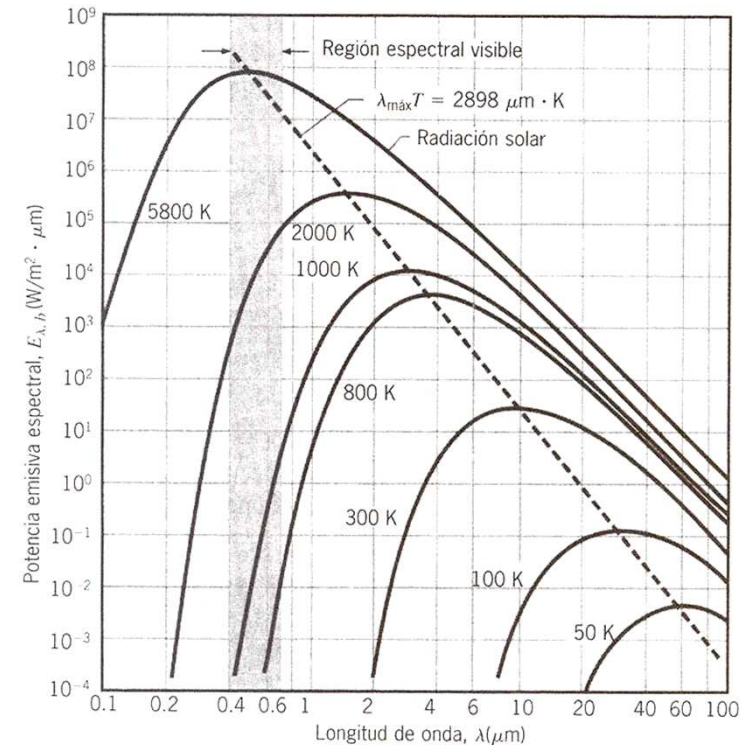
$$\left\{ \begin{array}{l} E_{N\lambda}: \text{W/m}^3 \\ \text{Primera cte. de radiación: } C_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \text{ (vacío y} \\ \sim \text{gases; resto: } C_1/n^2; n: \text{ índice de refracción)} \\ \text{Segunda cte. de radiación: } C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \\ \lambda: \text{ m} \\ T: \text{ K} \end{array} \right.$$

- El intervalo de λ en que emite un cuerpo negro depende de su T ($T < 800 \text{ K} \rightarrow \text{IR}$; $T > 800 \text{ K} \rightarrow \text{UV} \rightarrow$ cambios en coloración y brillo).

rojo pálido \rightarrow rojo brillante \rightarrow amarillo \rightarrow blanco
brillo \uparrow

($T=800\text{K}$) \longrightarrow ($T=1500\text{K}$)

- Para cualquier λ , la cantidad de radiación emitida aumenta con T .
- Para cada T , el poder emisor monocromático presenta un máximo respecto a λ .
- Al aumentar T , el máximo de las curvas se desplaza hacia menores λ , emitiéndose radiación de mayor energía.
- $T=5800 \text{ K}$ (emisión de superficie negra a T del Sol) \Rightarrow máximo en región visible.





2. Emisión de la radiación. Cuerpo negro.

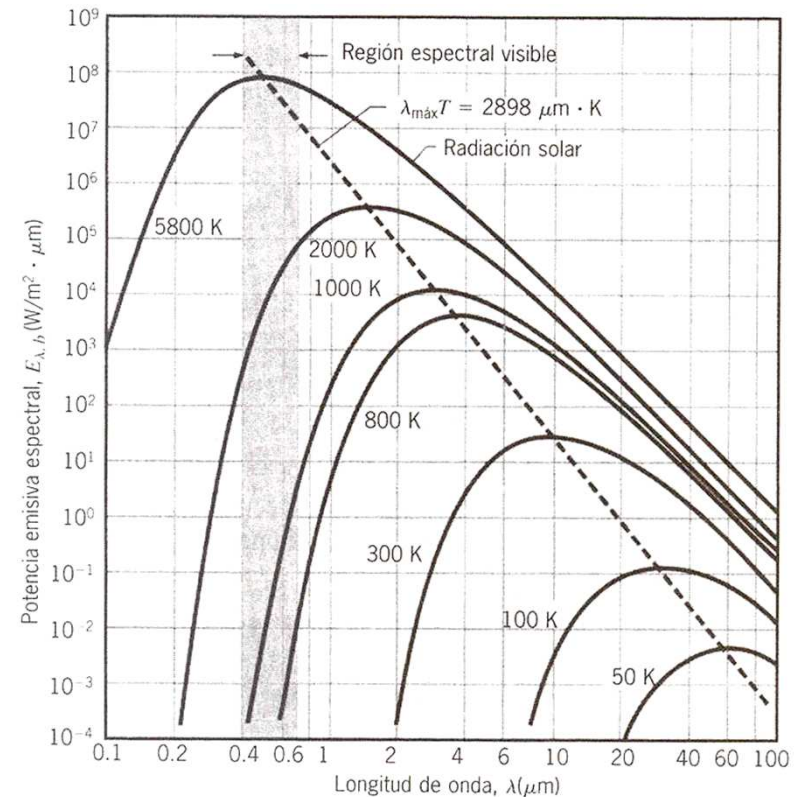
Para cada temperatura, $E_{N\lambda}$ presenta un máximo con respecto a λ ...

... se desplaza a menores λ a medida que aumenta T

$$\frac{dE_{N\lambda}}{d\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_{MAX} = \frac{cte.}{T}$$

$$\lambda_{MAX} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Ley del desplazamiento de Wien



El poder emisor total del cuerpo negro se obtiene: $E = \int_0^{\infty} E_{N\lambda} d\lambda = \sigma \cdot T^4$

... es proporcional a T^4 \longrightarrow Ley de Stefan-Boltzmann



2. Emisión de la radiación. Cuerpo negro.

Emisión en bandas: la fracción de la emisión total de un cuerpo negro en cierto intervalo de longitudes de onda o banda...

$$F_{(0 \rightarrow \lambda)} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{N\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{N\lambda} d\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{N\lambda} d\lambda}{\sigma T^4}$$
$$= \int_0^{\lambda T} \frac{E_{N\lambda}}{\sigma T^5} d(\lambda T) = f(\lambda T)$$

$$F_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} = F_{(0 \rightarrow \lambda_2)} - F_{(0 \rightarrow \lambda_1)}$$

λT	$\frac{E_b(0 \rightarrow \lambda T)}{\sigma T^4}$	λT	$\frac{E_b(0 \rightarrow \lambda T)}{\sigma T^4}$	λT	$\frac{E_b(0 \rightarrow \lambda T)}{\sigma T^4}$
0,2	3,41796e-26	4,2	0,516046	8,5	0,874666
0,4	1,86468e-12	4,4	0,548830	9,0	0,890090
0,6	9,29299e-8	4,6	0,579316	9,5	0,903147
0,8	0,0000164351	4,8	0,607597	10,0	0,914263
1,0	0,00032078	5,0	0,633786	10,5	0,923775
1,2	0,00213431	5,2	0,658011	11,0	0,931956
1,4	0,00779084	5,4	0,680402	11,5	0,939027
1,6	0,0197204	5,6	0,701090	12,0	0,945167
1,8	0,0393449	5,8	0,720203	13,0	0,955210
2,0	0,0667347	6,0	0,737864	14,0	0,962970
2,2	0,100897	6,2	0,754187	15,0	0,969056
2,4	0,140268	6,4	0,769232	16,0	0,973890
2,6	0,183135	6,6	0,783248	18,0	0,980939
2,8	0,227908	6,8	0,796180	20,0	0,985683
3,0	0,273252	7,0	0,808160	25,0	0,992299
3,2	0,318124	7,2	0,819270	30,0	0,995427
3,4	0,361760	7,4	0,829580	40,0	0,998057
3,6	0,403633	7,6	0,839157	50,0	0,999045
3,8	0,443411	7,8	0,848060	75,0	0,999807
4,0	0,480907	8,0	0,856344	100,0	1



2. Emisión de la radiación. Cuerpo negro.

SUPERFICIES NO NEGRAS: la radiación emitida a una temperatura y longitud de onda dadas es inferior a la del cuerpo negro

Emisividad: relación entre el poder emisor de la superficie y la del cuerpo negro (ambas a la misma T)

- Emisividad total hemiesférica (en todas las direcciones del espacio).

$$\varepsilon = \frac{E}{E_N}$$

- Emisividad monocromática hemiesférica

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{N\lambda}}$$

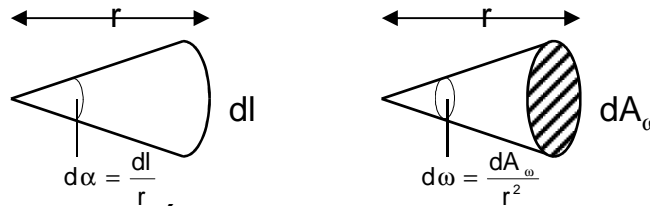
PROBLEMA ADICIONAL: las superficies no negras pueden no ser emisores difusos → hay que tener en cuenta la emisión de radiación con distinta intensidad dependiendo de la dirección espacial.

3. Flujos de radiación

Rad. emitida o recibida por una s. plana → función de la dirección del espacio → **INTENSIDAD DE RADIACIÓN**

Consideraciones geométricas

Ángulo plano: la longitud de un arco es equivalente en magnitud al ángulo plano que subtiende (r=1).



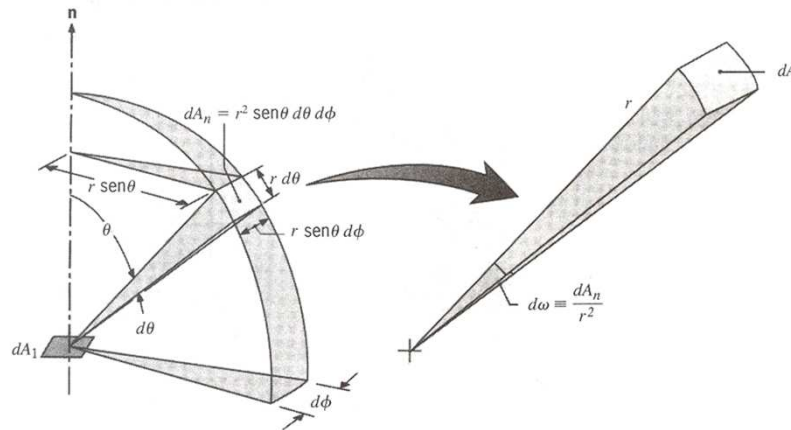
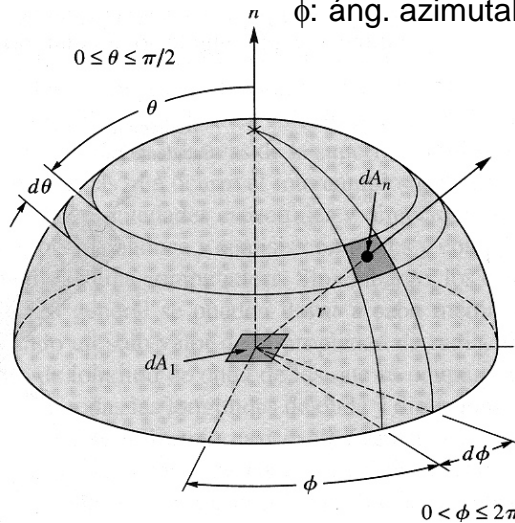
Ángulo sólido: superficie de un casquete esférico sobre una esfera de radio unidad.

Unidades (sr): estereoradianes ($0 < \omega < 4\pi$ $r^2/2 = 2\pi$)

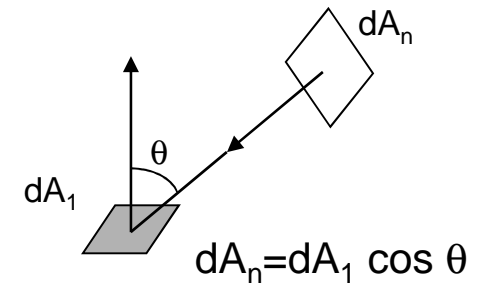
Relación con coordenadas esféricas:

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} = \text{sen}\theta \, d\theta \, d\phi$$

θ : áng. cenital
 ϕ : áng. azimutal



dA_n es perpendicular a dirección (θ, ϕ)
→ relación entre dA_1 (centro de la esfera) y dA_n en la superficie de la hemisfera:

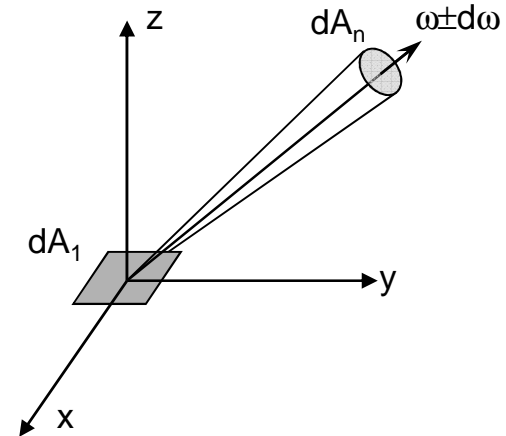


3. Flujos de radiación

Intensidad de radiación emitida

Intensidad de radiación emitida, $I_e(\theta, \phi)$: cantidad de energía radiante (dQ_e) que se emite en la dirección (θ, ϕ) por unidad de área normal a dicha dirección (dA_n) y por unidad de ángulo sólido en torno a esta misma dirección ($d\omega$)

$$I_e(\theta, \phi) = \frac{dQ_e}{dA_n d\omega} = \frac{dQ_e}{dA_1 \cos \theta d\omega} = \frac{dQ_e}{dA_1 \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi} \quad (\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{sr})$$



Poder emisor direccional, $E(\theta, \phi)$: cantidad de energía radiante que se emite en la dirección (θ, ϕ) por unidad de área de emisión (dA_1)

$$dE = \frac{dQ_e}{dA_1} = I_e(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

Poder emisor hemiesférico: $E = \int_{\text{hemisferio}} dE = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_e(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (\text{W} / \text{m}^2)$

Emisor difuso o superficie emisora difusa: la intensidad emitida es independiente de la dirección

$$E = \pi I_e \quad [I_e \neq f(\theta, \phi)] \xrightarrow[\text{Stefan-Boltzmann}]{\text{CUERPO NEGRO}} I_N(T) = \frac{E_N(T)}{\pi} = \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{sr})$$

3. Flujos de radiación

Radiación incidente

Intensidad de radiación incidente, $I_i(\theta, \phi)$: *cantidad de energía radiante (dQ_e) que incide desde la dirección (θ, ϕ) por unidad de área normal a dicha dirección (dA_n) y por unidad de ángulo sólido en torno a esta misma dirección ($d\omega$)*

Irradiación: *flujo de radiación incidente sobre una superficie desde todas direcciones de la hemiesfera*

$$G = \int_{\text{hemisferio}} dG = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_i(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (\text{W / m}^2)$$

Radiación difusa: la intensidad incidente es independiente de la dirección

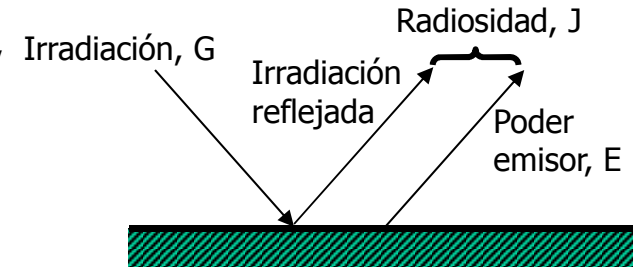
$$G = \pi I_i$$

3. Flujos de radiación

Radiosidad

Radiosidad (J): caudal de calor que abandona una unidad de superficie en todas direcciones

$$J = \int_{\text{hemisferio}} dJ = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_{e+r}(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (\text{W / m}^2)$$



Emisor y reflector difuso: $J = \pi I_{e+r}$

Superficie negra: no hay reflexión $\rightarrow J = E$

Magnitudes espectrales o monocromáticas Magn. referidas a una determinada λ o $d\lambda$

Intensidad monocromática o espectral direccional emitida [$I_{\lambda e}(\lambda, \theta, \phi)$]: caudal de energía radiante emitida con una longitud de onda λ en la dirección (θ, ϕ) por unidad de área perpendicular a esta dirección y por unidad de ángulo sólido en torno a ésta última.

$$I_{\lambda, e}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{dQ_e}{dA_1 \cos \theta \, d\omega \, d\lambda} \quad (\text{W / m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$$

Poder emisor monocromático direccional: $dE_{\lambda e} = \frac{dQ_{\lambda e}}{dA_1} = I_{\lambda e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \, d\omega$

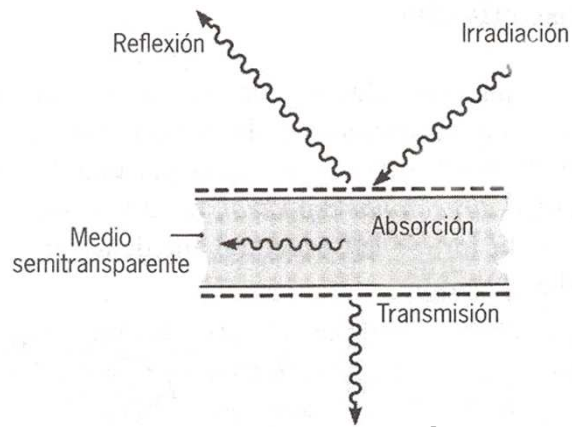
Poder emisor monocromático hemiesférico: $E_\lambda = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_{\lambda e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (\text{W / m}^2)$

Irradiación y radiosidad monocromáticas: tratamiento análogo

Superficies y radiación difusas: $E_\lambda = \pi I_{\lambda e}; G_\lambda = \pi I_{\lambda i}; J_\lambda = \pi I_{\lambda e+r}$

4. Recepción de la radiación.

Absortancia, reflectancia y transmitancia



ABSORTANCIA : $\alpha = \frac{\text{Radiación absorbida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{\text{abs}}}{G}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1$

REFLECTANCIA : $\rho = \frac{\text{Radiación reflejada}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{\text{ref}}}{G}, \quad 0 \leq \rho \leq 1$

TRANSMITANCIA : $\tau = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{\text{tr}}}{G}, \quad 0 \leq \tau \leq 1$

Primer Ppio. Termodinámica: $G_{\text{abs}} + G_{\text{ref}} + G_{\text{tr}} = G \Rightarrow \alpha + \rho + \tau = 1 \rightarrow$ prop. hemisféricas totales

Sólidos opacos: $\tau = 0; \alpha + \rho = 1$

α y ρ monocromática direccional: $\alpha_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda, \text{abs}}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \phi)}$ y $\rho_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda, \text{ref}}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \phi)}$

Absortancia, reflectancia y transmitancia (s. semitransparentes) hemiesférica

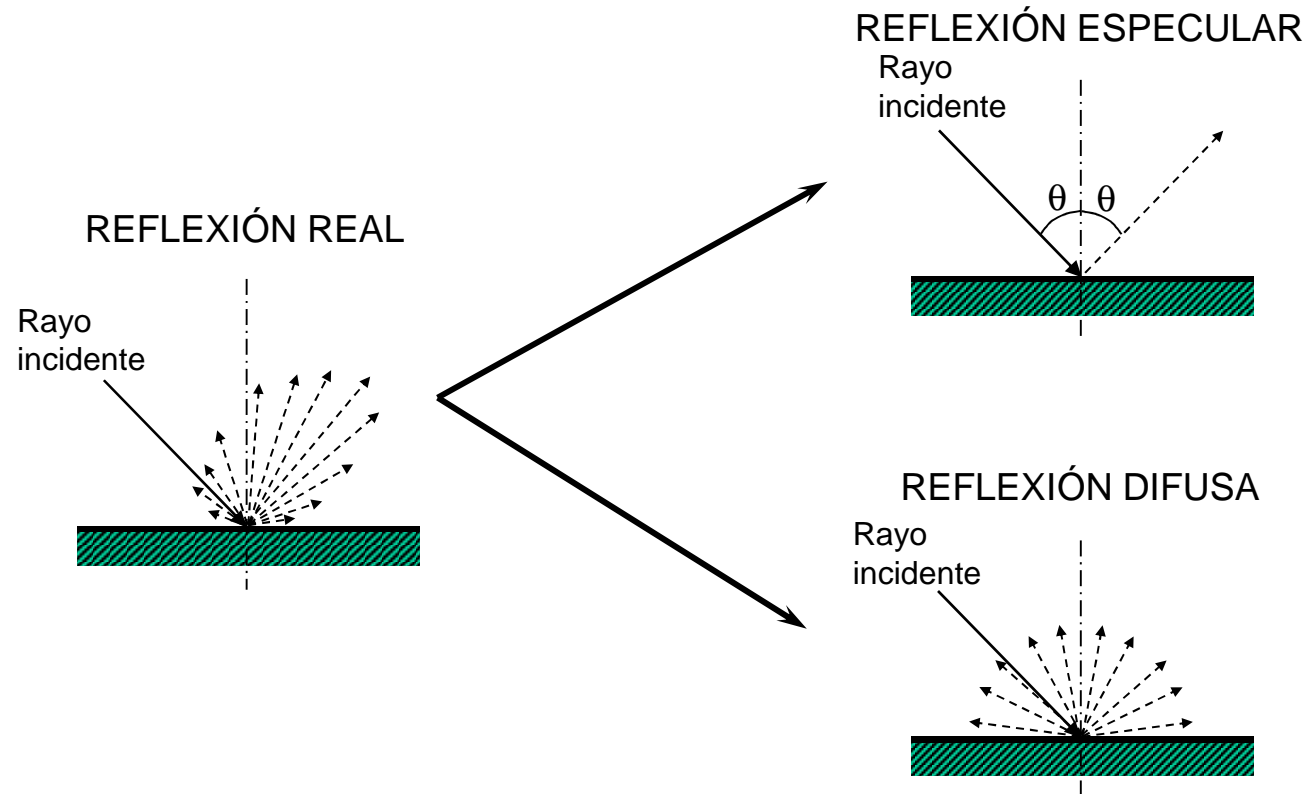
monocromática: $\alpha_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, \text{abs}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$ $\rho_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, \text{ref}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$ $\tau_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda, \text{tr}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}$

Propiedades totales:

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda}, \quad \rho = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda}, \quad \tau = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} G_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda} d\lambda}$$

4. Recepción de la radiación.

Tipos de reflexión



Superficies lisas: reflexión especular (tamaño de las irregularidades superficiales menor que λ de radiación incidente).

Superficies rugosas: reflexión difusa

5. Ley de Kirchhoff. Superficies grises.

Consideremos una superficie negra cerrada con un cuerpo en su interior, cuya superficie es muy pequeña comparada la exterior. La superficie y el cuerpo pequeño se encuentran en equilibrio térmico.

La cavidad grande se comporta como un cuerpo negro.

Rad. emitida por cuerpo negro: $E_N(T) = \sigma T^4$

Rad. absorbida por unidad de área del cuerpo pequeño: $G = \alpha G$

Rad. emitida por cuerpo pequeño: $E_e(T) = \varepsilon \sigma T^4$

Balance de energía en el cuerpo pequeño:

$$A_s \alpha \sigma T^4 = A_s \varepsilon \sigma T^4 \Rightarrow \alpha = \varepsilon$$

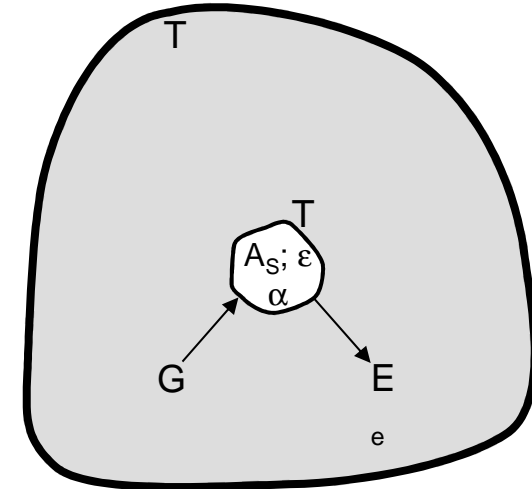
Ley de Kirchhoff: la emisividad hemiesférica total de una superficie a la temperatura T es igual a la absortancia hemiesférica total para la radiación que proviene de un cuerpo negro a la misma temperatura.

Requisitos

- La radiación que recibe es difusa
- El emisor está en equilibrio térmico con la superficie en cuestión

Si la radiación es difusa pero $T_1 \neq T_2$: $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$

Si no se da ninguna de las dos condiciones anteriores: $\varepsilon_{\lambda\omega} = \alpha_{\lambda\omega}$





5. Ley de Kirchhoff. Superficies grises.

Se denominan SUPERFICIES GRISES a aquellas en las que ε_λ y α_λ son independientes de λ .

Por tanto: $\varepsilon = \varepsilon_\lambda$ y $\alpha = \alpha_\lambda$

y si la radiación es difusa: $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad \therefore \quad \varepsilon = \alpha$

Esta relación se cumple sin necesidad de que esté en equilibrio térmico con la superficie emisora de radiación.

El concepto de superficie gris es aplicable a numerosos materiales, sobre todo si su temperatura es inferior a 2000 K.

Las superficies grises difusas o superficies cuasi-grises sólo se comportan como superficies grises en un determinado intervalo de λ .

6. Propiedades radiantes de las superficies reales.

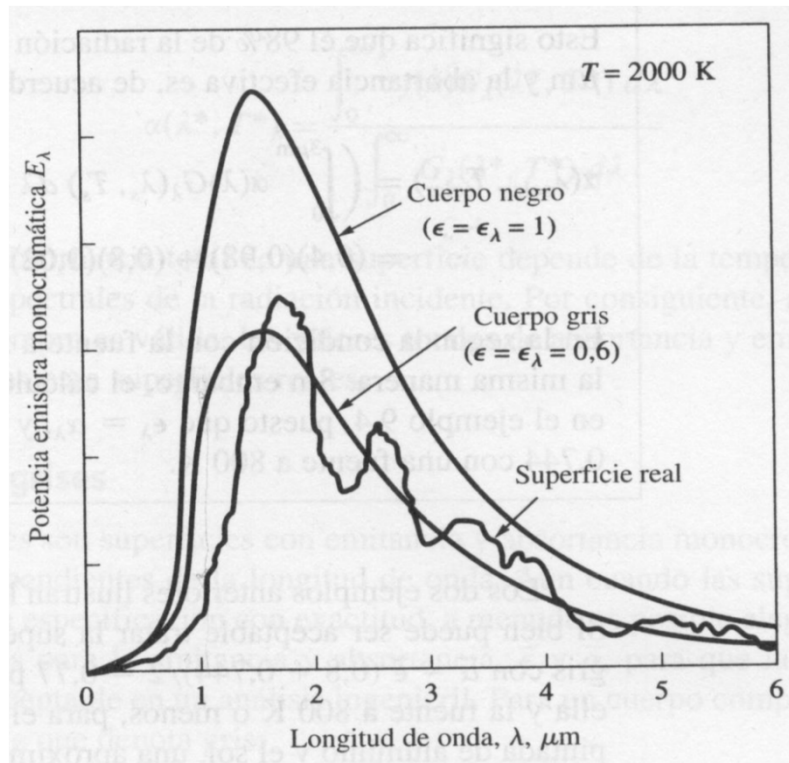
Propiedades: ϵ , α , τ y ρ .

- Sólidos opacos: $\tau=0$ $\alpha + \rho = 1$ \rightarrow $\rho = 1 - \alpha$

- Superficies grises: $\epsilon = \alpha$

Superficies reales: emisividad variable con λ

Comparación de emisividad hemiesférica monocromática de una superficie negra, gris y real



Discrepancias importantes entre E_{gris} y E_{real} para $\lambda < 1,5 \mu\text{m}$
 $T < 2000 \text{ K} \rightarrow$ emisión por encima de $1,5 \mu\text{m}$ errores bajos
 $T > 2000 \text{ K} \rightarrow$ Emisividad de superficies reales menor



6. Propiedades radiantes de las superficies reales.

Emisividades hemiesféricas para distintas superficies en función de la temperatura

Material	Longitud de onda promedio y temperaturas				
	9,3 μm 310 K	5,4 μm 530 K	3,6 μm 800 K	1,8 μm 1700 K	0,6 μm Solar ~6000 K
Metales					
Aluminio	~0,04	0,05	0,08	~0,19	~0,3
pulido	0,11	~0,12	0,18		
oxidado	0,4	0,32	0,27		
expuesto a la intemperie 24-ST	0,22				
cubierta de techo	0,94	0,42	0,60	0,34	
anodizado (a 1000 °F)					
Latón	0,10	0,10			
pulido	0,61				
oxidado					
Cromo	~0,08	~0,17	0,26	~0,40	0,49
Cobre	0,04	0,05	~0,18	~0,17	
pulido	0,87	0,83	0,77		
oxidado					
Hierro	0,06	0,08	0,13	0,25	0,45
pulido	0,63	0,66	0,76		
fundido, oxidado	0,23			0,42	0,66
galvanizado, nuevo	0,28			0,90	0,89
galvanizado, sucio	0,94	0,97	0,98		
placa de acero, rugoso	0,96		0,85		0,74
óxido				0,3-0,4	
fundido				0,24	0,30
Magnesio	0,07	0,13	0,18	~0,15	~0,2 ^b
Filamento de molibdeno			~0,09		
Plata					
pulida	0,01	0,02	0,03		0,11
Acero inoxidable					
18-8, pulido	0,15	0,18	0,22		
18-8, expuesto a la intemperie	0,85	0,85	0,85		
Tubo de acero oxidado		0,94			
Filamento de tungsteno	0,03			~0,18	0,35 ^c
Zinc					
pulido	0,02	0,03	0,04	0,06	0,46
lámina galvanizada	~0,25				

Materiales para construcción y aislantes					
Papel de asbesto	0,93	0,93			
Asfalto	0,93		0,9		0,93
Ladrillo					
rojo	0,93				0,7
arcilla refractaria	0,9		~0,7	~0,75	
sílice	0,9		~0,75	0,84	
magnesita refractaria	0,9			~0,4	
Esmalte, blanco	0,9				
Mármol, blanco	0,95		0,93		0,47
Papel, blanco	0,95		0,82	0,25	0,28
Yeso	0,91				
Cubierta para techo	0,93				
Acero esmaltado, blanco				0,65	0,47
Cemento de asbesto, rojo				0,67	0,66
Pinturas					
Laca aluminizada	0,65	0,65			
Pinturas crema	0,95	0,88	0,70	0,42	0,35
Laca, negra	0,96	0,98			
Pintura de humo negro	0,96	0,97		0,97	0,97
Pintura roja	0,96				0,74
Pintura amarilla	0,95		0,5		0,30
Pinturas de aceite (todos los colores)	~0,94	~0,9			
Blanco (ZnO)	0,95		0,91		0,18
Varios					
Hielo	~0,97 ^d				
Agua	~0,96				
Carbón					
T carbón 0,9% de ceniza	0,82	0,80	0,79		
filamento	~0,72			0,53	
Madera	~0,93				
Vidrio	0,90				

(conclusión)

^a Como la emitancia a una longitud de onda dada es igual a la absorptancia a dicha longitud de onda, los valores en esta tabla pueden utilizarse para representar, de manera aproximada, la absorptancia de radiación emanada de una fuente a la temperatura lista. Por ejemplo, el aluminio pulido absorberá el 30% de radiación solar incidente.

^b A 3.000 K

^c A 3.600 K

^d A 273 °K



7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

$Q = f(T, \text{propiedades superficiales, forma y orientación})$

Radiación total, por unidad de A , emitida desde un cuerpo opaco (A_1, ε_1, T_1) $q = \frac{Q}{A_1} = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4$

A temperaturas elevadas, el objetivo es obtener un flujo controlado de intercambio neto de calor entre una o más fuentes, y uno o más sumideros.

Caso sencillo: dos **superficies negras, planas, infinitas y paralelas** \rightarrow la energía emitida por cada una es interceptada por la otra. La energía emitida se calcula mediante la ecuación de Stephan-Boltzmann: $\sigma \cdot T^4$. Suponiendo $T_1 > T_2$ \rightarrow **caudal neto de calor intercambiado** será:

$$q_{1 \rightarrow 2} = \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de} \\ \text{la superficie 1 e incide en} \\ \text{la superficie 2} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de} \\ \text{la superficie 2 e incide en} \\ \text{la superficie 1} \end{array} \right) \rightarrow q_{1 \rightarrow 2} = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$q_{12} > 0 \rightarrow$ caudal de calor neto desde la superficie 1

$q_{12} < 0 \rightarrow$ caudal de calor neto hacia la superficie 1

Otras geometrías u orientación \rightarrow no toda la radiación es interceptada por las superficies

¿Qué cantidad de radiación difusa que sales de una superficie es interceptada por la otra?

FACTOR DE VISIÓN

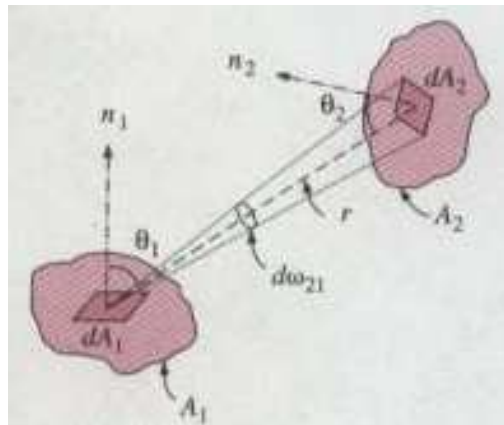


7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

FACTOR DE VISIÓN, o Factor de Forma (F_{ij}): fracción de radiación difusa que sale de la superficie A_i y llega a la superficie A_j

Caudal neto de calor transferido: $Q_{12} = \sigma \cdot A \cdot F_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$

Cálculo de F_{ij} → a partir de I y J.



Cantidad de radiación emitida por dA_1 e interceptada por dA_2 :

$$Q_{dA_1, dA_2} = I_1 \cos \theta_1 dA_1 d\omega_{21} = I_1 \cos \theta_1 dA_1 \frac{dA_2 \cos \theta_2}{r^2}$$

Radiosidad ⇒ energía radiante emitida y reflejada por la superficie :

$$Q_{dA_1} = J_1 dA_1 = \pi I_1 dA_1$$

Factor diferencial de visión : $dF_{dA_1, dA_2} = \frac{Q_{dA_1, dA_2}}{Q_{dA_1}} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2$

Radiación emitida por dA_1 e interceptada por A_2 ⇒ $F_{dA_1, A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_2$

$$\left. \begin{aligned} &\text{Caudal de calor emitido por } A_1 \Rightarrow Q_{A_1} = J_1 A_1 = \pi I_1 A_1 \\ &\text{Caudal de calor emitido por } A_1 \text{ e interceptado por } dA_2 : \\ &Q_{A_1, dA_2} = \int_{A_1} Q_{dA_1, dA_2} = \int_{A_1} \frac{I_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_2}{r^2} dA_1 \\ &\text{Caudal de calor emitido por } A_1 \text{ e interceptado por } A_2 : \\ &Q_{A_1, A_2} = \int_{A_2} Q_{A_1, dA_2} = \iint_{A_2, A_1} \frac{I_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_2}{r^2} dA_1 dA_2 \end{aligned} \right\}$$

Dividiendo por la radiación que abandona A_1 :

$$F_{12} = F_{A_1, A_2} = \frac{Q_{A_1, A_2}}{Q_{A_1}} = \frac{1}{A_1} \iint_{A_2, A_1} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2$$

Integración ya realizada para numerosas geometrías → resultados en forma analítica y gráfica

7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

Factor de visión para geometrías de tamaño finito

Configuración geométrica	Relación
<p>Rectángulos paralelos alineados</p>	$\bar{X} = X/L \text{ y } \bar{Y} = Y/L$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} + \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}} + \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}} - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$
<p>Discos paralelos coaxiales</p>	$R_i = r_i/L \text{ y } R_j = r_j/L$ $S = 1 + \frac{1 + R_j^2}{R_i^2}$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{2} \left\{ S - \left[S^2 - 4 \left(\frac{r_j}{r_i} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$
<p>Rectángulos perpendiculares con una arista común</p>	$H = Z/X \text{ y } W = Y/X$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}} + \frac{1}{4} \ln \left[\frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \times \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \times \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right] \right)$

7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

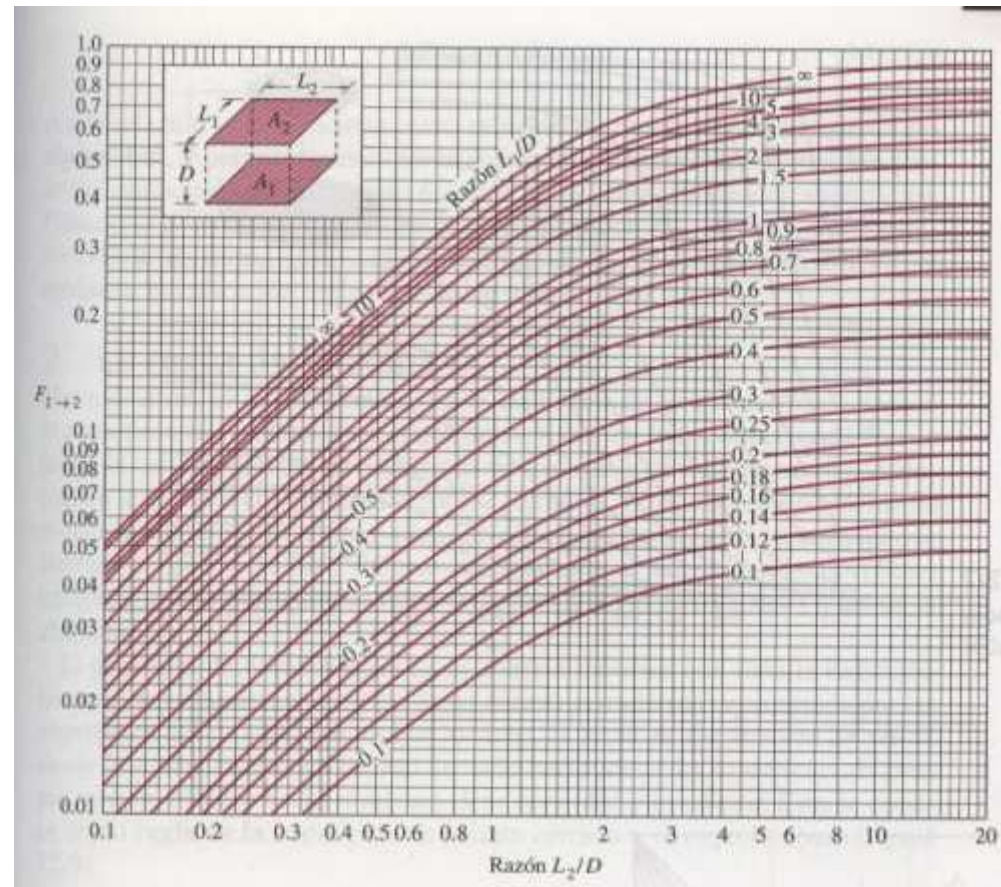
Factor de visión para geometrías de tamaño infinito

Configuración geométrica	Relación
<p>Placas paralelas con sus líneas medias conectadas mediante una recta perpendicular</p>	$W_i = w_i/L \text{ y } W_j = w_j/L$ $F_{i \rightarrow j} = \frac{[(W_i + W_j)^2 + 4]^{1/2} - (W_i - W_j)^2 + 4)^{1/2}}{2W_i}$
<p>Placas inclinadas de anchos iguales y con una arista común</p>	$F_{i \rightarrow j} = 1 - \sin \frac{1}{2} \alpha$
<p>Placas perpendiculares con una arista común</p>	$F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{w_j}{w_i} - \left[1 + \left(\frac{w_j}{w_i} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$
<p>Recinto cerrado de tres lados</p>	$F_{i \rightarrow j} = \frac{w_i + w_j - w_k}{2w_i}$
<p>Plano infinito y fila de cilindros</p>	$F_{i \rightarrow j} = 1 - \left[1 - \left(\frac{D}{s} \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{D}{s} \tan^{-1} \left(\frac{s^2 - D^2}{D^2} \right)^{1/2}$



7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

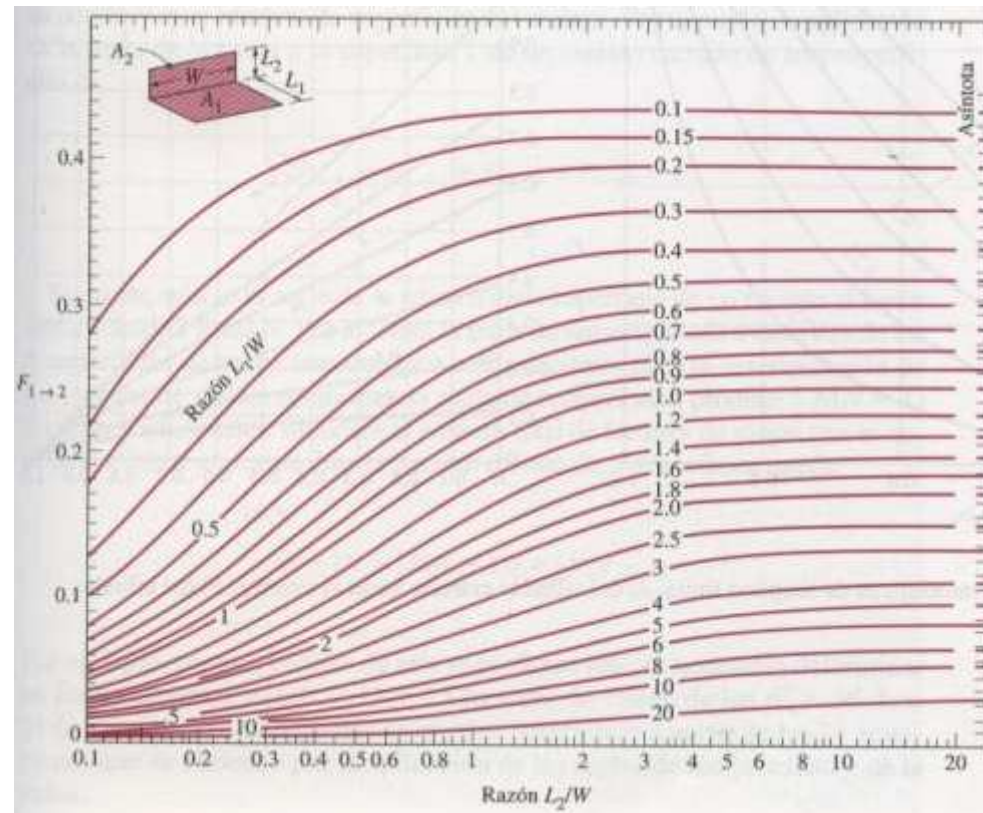
Factor de visión entre dos rectángulos paralelos de igual tamaño





7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

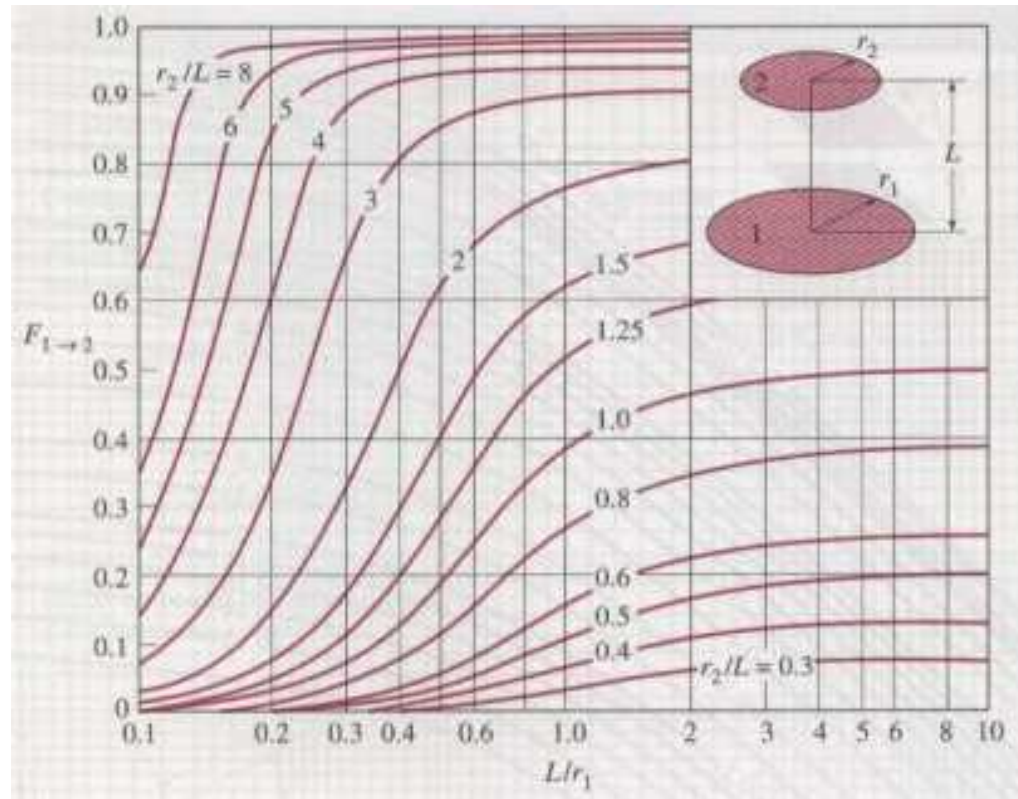
Factor de visión entre dos rectángulos perpendiculares con una arista común





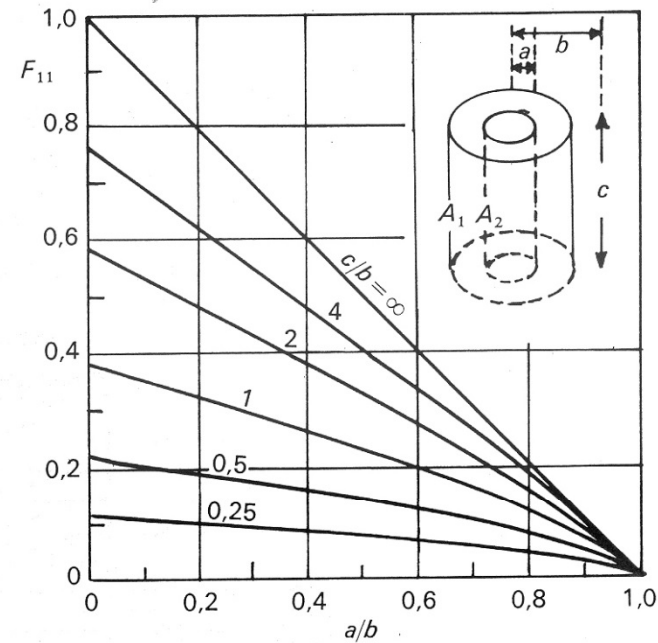
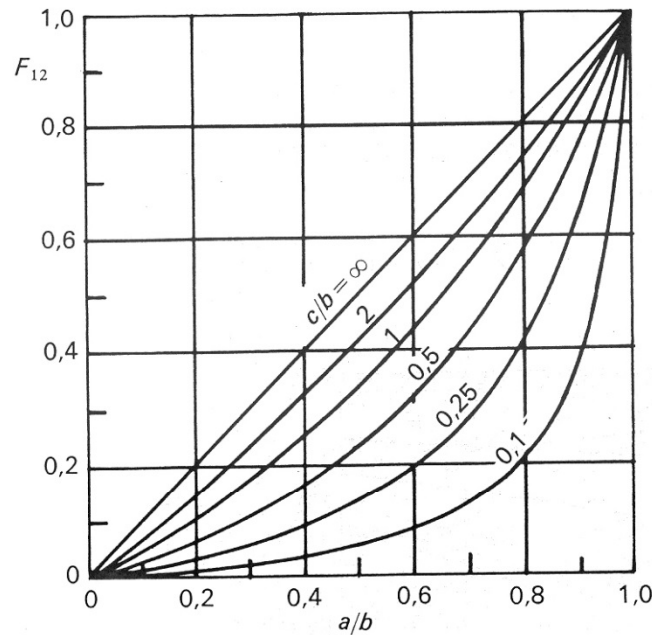
7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

Factor de visión entre dos discos paralelos coaxiales



7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

Factor de visión entre dos cilindros coaxiales de igual longitud



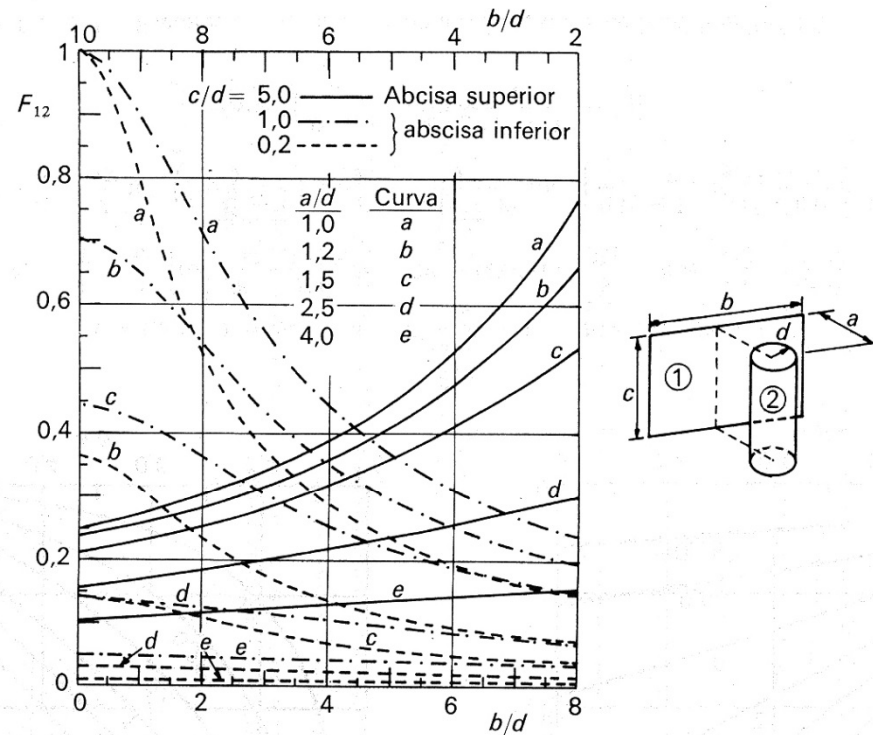
$$X = b/a ; Y = c/a ; A = Y^2 + X^2 - 1 ; B = Y^2 - X^2 + 1$$

$$F_{12} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left\{ \cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left[\sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \cos^{-1} \frac{B}{XA} + B \operatorname{sen}^{-1} \frac{1}{X} - \frac{\pi A}{2} \right] \right\}$$

$$F_{11} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2\sqrt{X^2 - 1}}{Y} \right) - \frac{Y}{2\pi X} \left\{ \frac{\sqrt{4X^2 + Y^2}}{Y} \operatorname{sen}^{-1} \left[\frac{4(X^2 - 1) + (Y^2/X^2)(X^2 - 2)}{Y^2 + 4(X^2 - 1)} \right] - \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{X^2 - 2}{X^2} \right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\sqrt{4X^2 + Y^2}}{Y} - 1 \right) \right\}$$

7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

Factor de visión entre un plano y un cilindro vertical de eje paralelo al mismo



$$X = a/d ; Y = b/d ; Z = c/d ; A = Z^2 + X^2 + \xi^2 - 1 ; B = Z^2 - X^2 - \xi^2 + 1$$

$$F_{12} = \frac{2}{Y} \int_0^{Y/2} f(\xi) d\xi$$

siendo
$$F(\xi) = \frac{X}{X^2 + \xi^2} - \frac{X}{\pi(X^2 + \xi^2)} \left\{ \cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Z} \left[\sqrt{A^2 + 4Z^2} \cos^{-1} \left(\frac{B}{A\sqrt{X^2 + \xi^2}} \right) + B \sin^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{X^2 + \xi^2}} \right) - \frac{\pi A}{2} \right] \right\}$$



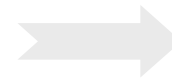
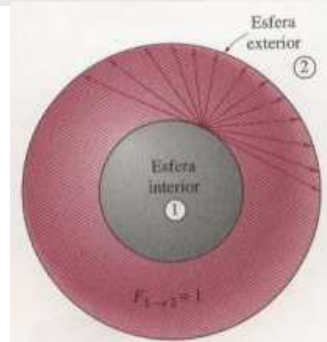
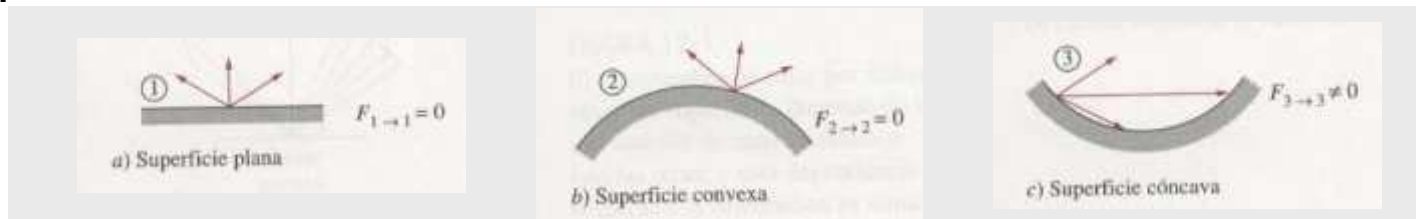
7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

RELACIONES DEL FACTOR DE VISIÓN

Principio de reciprocidad. Dependiendo de la superficie que se considere para calcular el caudal de calor intercambiado:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Considerando } A_1: Q_{12} = \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \\ \text{Considerando } A_2: Q_{21} = \sigma A_2 F_{21} (T_1^4 - T_2^4) \end{array} \right\} A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$$

Principio de no visibilidad. Si una superficie no puede verse a si misma, como es el caso de una superficie plana o convexa, el factor de visión con respecto a ella misma será 0 ($F_{11}=0$).



$$\begin{array}{l} F_{12} = 1 \\ F_{11} = 0 \\ F_{22} \neq 0 \\ F_{21} \end{array}$$

7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

RELACIONES DEL FACTOR DE VISIÓN

Principio de conservación. Sistemas cerrados (muy habitual en casos prácticos): si la superficie A_1 sólo ve a la A_2 el factor de visión es 1, mientras que si A_1 ve a otras superficies la radiación que abandona la superficie A_1 es la suma de los flujos de radiación que llegan a todas las superficies del sistema ($F_{11}+F_{12}+F_{13}+F_{14}+ \dots =1$) => 1^{er} Ppio. de la Termodinámica.

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

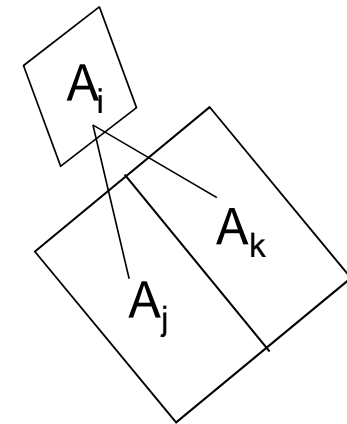
Principio de aditividad: el factor de visión de una superficie i hacia una superficie jk es igual a la suma de los factores de visión desde la superficie i hacia las partes de la superficie jk . Útil en casos en que no se cuenta con el factor de visión para una geometría dada. Ej.

$$F_{i(jk)} = F_{ij} + F_{ik} \quad \text{Sin embargo } F_{(jk)i} \neq F_{ji} + F_{ki}$$

Para obtener $F_{(jk)i}$:

$A_i F_{i(jk)} = A_j F_{ij} + A_k F_{ik}$. Aplicando el principio de reciprocidad:

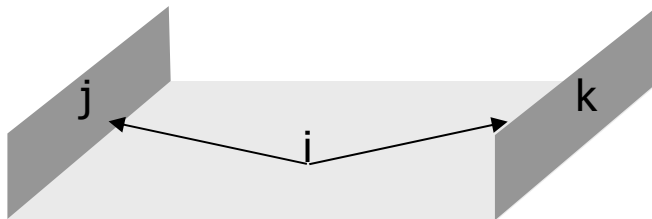
$$(A_j + A_k) F_{(jk)i} = A_j F_{ji} + A_k F_{ki} \quad F_{(kj)i} = \frac{A_j F_{ji} + A_k F_{ki}}{A_j + A_k}$$



7. Radiación entre superficies. Factor de visión.

RELACIONES DEL FACTOR DE VISIÓN

Principio de simetría: dos (o más) superficies que poseen simetría con respecto a una tercera, tendrán factores de visión idénticos desde esa superficie (si las superficies j y k son simétricas con respecto a la superficie i entonces $F_{ij}=F_{ik}$)



$$F_{ij} = F_{ik} \quad (\text{Se puede demostrar: } F_{ji} = F_{ki})$$



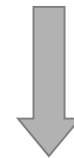
8. Intercambio de radiación térmica por medios no absorbentes ni emisores.

8.1.- Sistemas cerrados de superficies negras

Considerando un sistema con 2 superficies negras con áreas y temperaturas constantes, teniendo en cuenta la ley de Stefan-Boltzmann, los factores de visión y sus principios, el caudal y el flujo de calor por radiación netos de cualquiera de las superficies ...

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de} \\ \text{la superficie 1 e incide en} \\ \text{la superficie 2} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de} \\ \text{la superficie 2 e incide en} \\ \text{la superficie 1} \end{array} \right)$$

$$Q_{12} = A_1 E_{N1} F_{12} - A_2 E_{N2} F_{21} = A_1 \sigma T_1^4 F_{12} - A_2 \sigma T_2^4 F_{21}$$



Principio de reciprocidad: $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$

$$Q_{12} = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Para un recinto cerrado con N superficies negras

$$Q_i = \sum_{j=1}^N Q_{ij} = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4)$$



8. Intercambio de radiación térmica por medios no absorbentes ni emisores.

8.2.- Sistemas formados por superficies grises y difusas

Supondremos:

- superficies opacas (no hay transmisión), difusas y grises (ε y α indept. de λ y ω)
- superficies isotermas

Radiosidad

Para una superficie gris opaca: $\varepsilon_i = \alpha_i$ y $\alpha_i + \rho_i = 1$

La radiosidad se puede expresar como:

$$J_i = \left(\begin{array}{l} \text{Radiación emitida} \\ \text{por la superficie } i \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Radiación reflejada} \\ \text{por la superficie } i \end{array} \right) = \varepsilon_i E_{Ni} + \rho_i G_i = \varepsilon_i E_{Ni} + (1 - \varepsilon_i) G_i$$

Transferencia neta de calor por radiación hacia o desde una superficie

Caudal neto de calor transferido desde una superficie i:

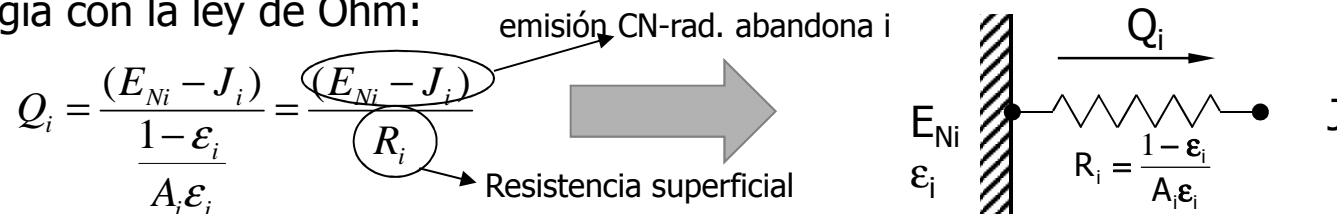
$$Q_i = \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale} \\ \text{de la superficie } i \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que incide} \\ \text{sobre la superficie } i \end{array} \right) = A_i (J_i - G_i)$$

$$Q_i = A_i \left(J_i - \frac{J_i - \varepsilon_i E_{Ni}}{1 - \varepsilon_i} \right) = \frac{A_i \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (E_{Ni} - J_i)$$

8. Intercambio de radiación térmica por medios no absorbentes ni emisores

8.2.- Sistemas formados por superficies grises y difusas

Por analogía con la ley de Ohm:



$E_{Ni} > J_i \rightarrow Q_i > 0 \rightarrow$ transf. de Q desde la superficie

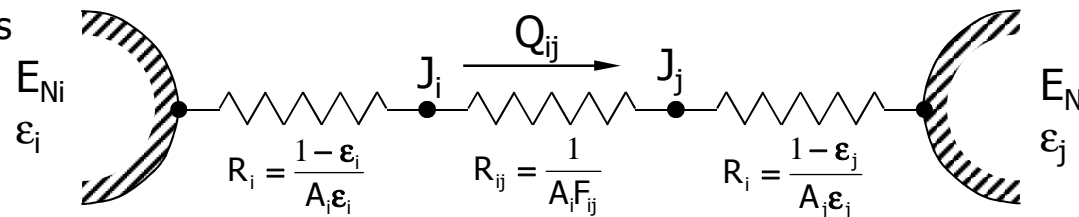
$E_{Ni} < J_i \rightarrow Q_i < 0 \rightarrow$ transf. de Q hacia la superficie

Superficie negra ($E_{Ni} = J_i$) $\rightarrow Q_i = A_i (J_i - G_i)$

Superficies reirradiantes: superficies adiabáticas que re-emiten-reflejan toda la radiación incidente
 $\Rightarrow Q_i = 0 \Rightarrow R_i = 0$

Transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies

Superf. difusas, grises y opacas



Caudal neto de calor transferido desde la superficie i a la superficie j:

$$Q_{i \rightarrow j} = \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de} \\ \text{la superficie i e incide} \\ \text{en la superficie j} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de} \\ \text{la superficie j e incide} \\ \text{en la superficie i} \end{array} \right) = A_i J_i F_{ij} - A_j J_j F_{ji}$$



8. Intercambio de radiación térmica por medios no absorbentes ni emisores

8.2.- Sistemas formados por superficies grises y difusas

Principio de reciprocidad: $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$ \longrightarrow $Q_{ij} = A_i F_{ij} (J_i - J_j)$ \longrightarrow $Q_{ij} = \frac{J_i - J_j}{\frac{1}{A_i F_{ij}}} = \frac{J_i - J_j}{R_{ij}}$

$R_{ij} \Rightarrow$ Resistencia en el espacio a la radiación

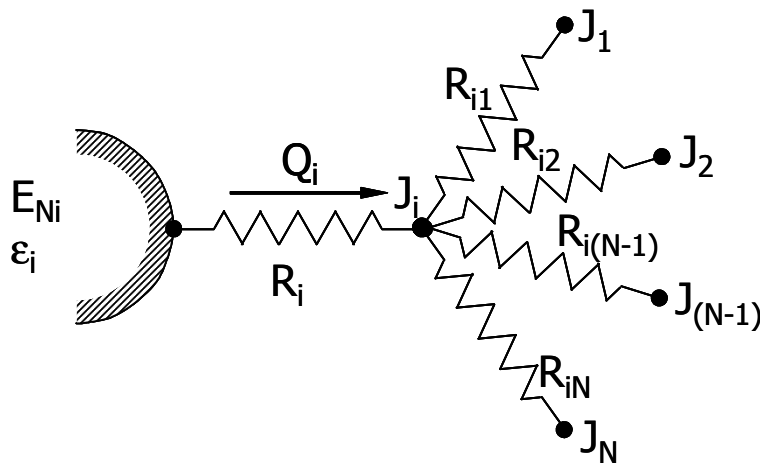
$J_i > J_j \Rightarrow Q_{ij} > 0 \Rightarrow$ transf. de Q desde la superficie i a la j

$J_i < J_j \Rightarrow Q_{ij} < 0 \Rightarrow$ transf. de Q desde la superficie j a la i

Para un recinto cerrado con N superficies \rightarrow Primer Ppio. Termod: transf. neta de Q desde la superf. i debe ser igual a la suma de las transf. netas de Q desde la superf. i hacia las N superf.

$$Q_i = \sum_{j=1}^N Q_{ij} = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} (J_i - J_j) = \sum_{j=1}^N \frac{(J_i - J_j)}{R_{ij}} = Q_i \text{ que abandona la superficie}$$

$$Q_i = \frac{E_{Ni} - J_i}{R_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{ij}}$$



el flujo neto de radiación desde una superficie (a través de su resistencia superficial) es igual a la suma de los flujos de radiación desde esa superficie hacia todas las demás (a través de las resistencias correspondientes del espacio)



8. Intercambio de radiación térmica por medios no absorbentes ni emisores

8.2.- Sistemas formados por superficies grises y difusas

Métodos de resolución de problemas de radiación

Posibles incógnitas: T o flujo de radiación de las superficies que integran un sistema con N superficies

Método matricial o directo

Las ecuaciones para cada superficie se reordenan de diferente manera en función de la variable desconocida:

$$\begin{array}{l} Q = ? \quad \left[Q_i = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{ij}} \right] \rightarrow Q_i = A_i \sum_{j=1}^N F_{ij} (J_i - J_j) \\ T = ? \quad \left[\frac{E_{Ni} - J_i}{R_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{ij}} \right] \rightarrow \sigma T_i^4 = J_i + \frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i} \sum_{j=1}^N F_{ij} (J_i - J_j) \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} Q = ? \\ T = ? \end{array}} \right\} \begin{array}{l} N \text{ ecuaciones con } N \text{ incógnitas} \\ \downarrow \\ \text{MÉTODOS DE ÁLGEBRA LINEAL} \end{array}$$

Método de redes

Esquematizar sistema como una red de resistencias eléctricas $\left\{ \begin{array}{l} \text{Resistencias de superficie} \\ \text{Resistencias en el espacio} \end{array} \right\}$ Resolución como un circuito eléctrico



8. Intercambio de radiación térmica por medios no absorbentes ni emisores

Transferencia de calor por radiación en recintos cerrados de dos superficies

Recinto cerrado:

Superficies difusas, grises y opacas a T_1 y T_2

Q?



$$Q_1 = Q_{12}$$

$$Q_{12} = Q_2$$

$$\frac{E_{N1} - J_1}{R_1} = \frac{J_1 - J_2}{R_{12}} = -\frac{E_{N2} - J_2}{R_2}$$

$$Q_{12} = \frac{E_{N1} - E_{N2}}{R_1 + R_{12} + R_2} = Q_1 = Q_2$$



$$Q_{12} = \frac{E_{N1} - E_{N2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}}$$

Objeto pequeño en una cavidad grande

$$\frac{A_1}{A_2} = 0$$

$$F_{12} = 1$$

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

Placas paralelas infinitamente grandes

$$A_1 = A_2 = A$$

$$F_{12} = 1$$

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

Cilindros concéntricos infinitamente largos

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

$$F_{12} = 1$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$$

Esferas concéntricas

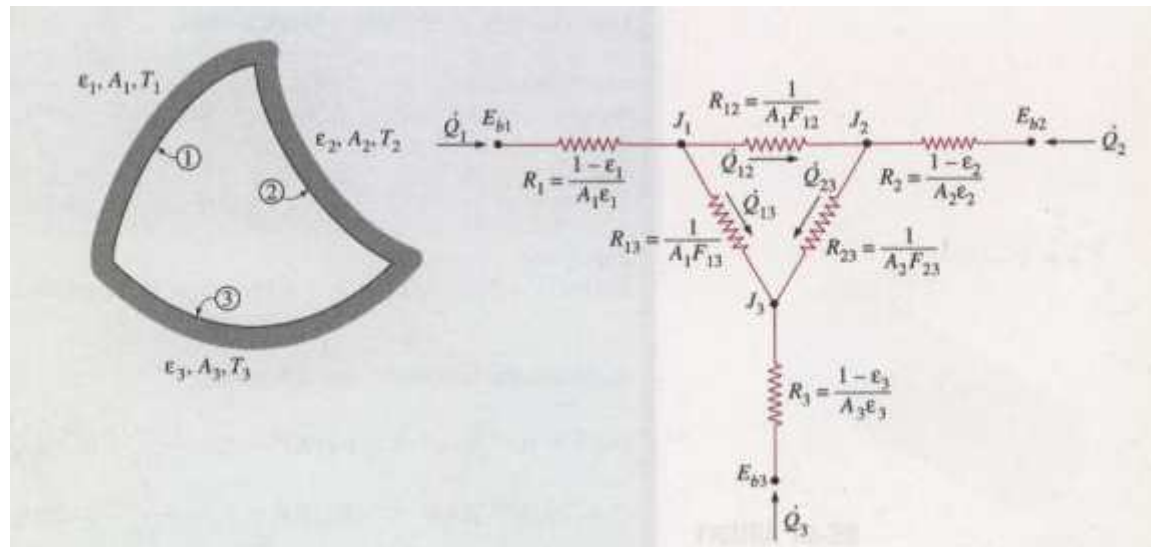
$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

$$F_{12} = 1$$

$$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}$$

8. Intercambio de radiación térmica por medios no absorbentes ni emisores

Transferencia de calor por radiación en recintos cerrados de tres superficies



$$\begin{aligned}
 Q_1 &= Q_{12} + Q_{13} \rightarrow Q_1 - Q_{12} - Q_{13} = 0 \\
 Q_2 + Q_{12} &= Q_{23} \rightarrow Q_2 + Q_{12} - Q_{23} = 0 \\
 Q_3 + Q_{13} + Q_{23} &= 0
 \end{aligned}$$



$$\frac{E_{N1} - J_1}{R_1} + \frac{J_2 - J_1}{R_{12}} + \frac{J_3 - J_1}{R_{13}} = 0$$

$$\frac{J_1 - J_2}{R_{12}} + \frac{E_{N2} - J_2}{R_2} + \frac{J_3 - J_2}{R_{23}} = 0$$

$$\frac{J_1 - J_3}{R_{13}} + \frac{J_2 - J_3}{R_{23}} + \frac{E_{N3} - J_3}{R_3} = 0$$

$$J_i = \epsilon_i E_{Ni} + (1 - \epsilon_i) G_i$$



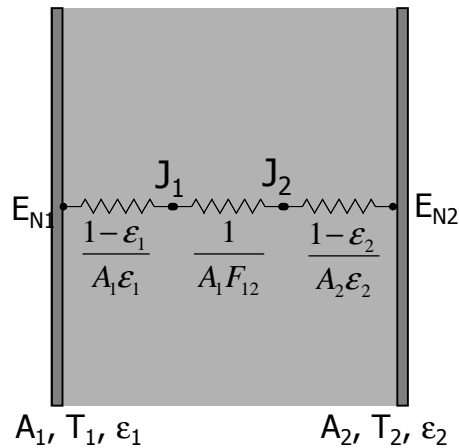
8. Intercambio de radiación térmica por medios no absorbentes ni emisores

8.3.- Cubiertas de radiación

Def. Materiales de baja emisividad (y alta reflectancia) que se usan para reducir la transferencia de calor entre dos superficies (Ej. capa de lámina de Al que recubre equipos a alta T).

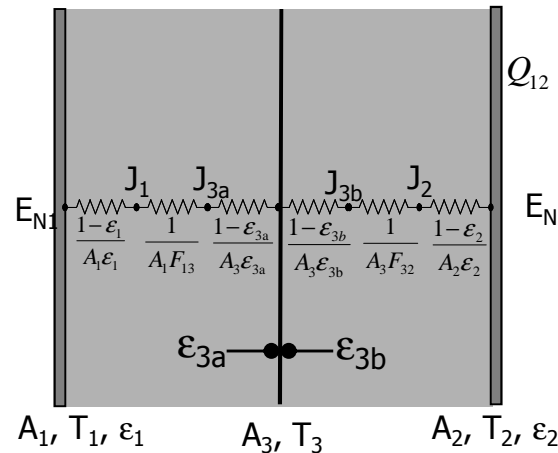
Intercambio de calor entre dos superficies paralelas:

SIN CUBIERTA DE RADIACIÓN



$$Q_{12} = \frac{E_{N1} - E_{N2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}}$$

CON CUBIERTA DE RADIACIÓN



$$Q_{12} = \frac{E_{N1} - E_{N2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{13}} + \frac{1 - \epsilon_{3a}}{A_3 \epsilon_{3a}} + \frac{1 - \epsilon_{3b}}{A_3 \epsilon_{3b}} + \frac{1}{A_3 F_{32}} + \frac{1 - \epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}}$$

Placas planas paralelas infinitas:

$$A_1 = A_2 = A_3 = A$$

$$F_{13} = F_{23} = 1$$

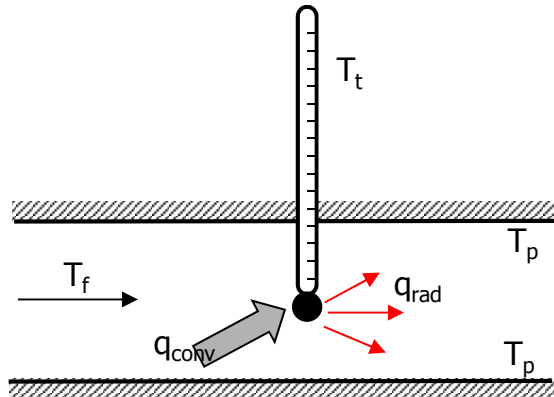
$$Q_{12} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_{3a}} + \frac{1}{\epsilon_{3b}} - 1\right)}$$

Para N blindajes $\epsilon =$ en todas las superficies

$$Q_{12, N \text{ cubiertas}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{N+1 \left(\frac{1}{\epsilon} + \frac{1}{\epsilon} - 1\right)} = \frac{1}{N+1} Q_{12, \text{ sin cubiertas}}$$

8. Intercambio de radiación térmica por medios no absorbentes ni emisores

8.4.- Efecto de la radiación en la medida de la temperatura



Transferencia de calor entre el fluido y el termómetro hasta equilibrio térmico → medida de T

Si T de la pared es distinta a la del fluido → transferencia de Q por radiación entre la pared y el termómetro → la T medida no es la del fluido (T intermedia entre el fluido y la pared).

Cálculo de la corrección:

$$q_{\text{conv.}} = q_{\text{rad.}}$$

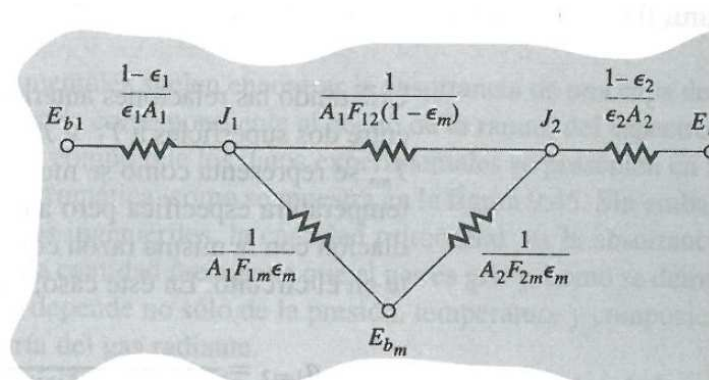
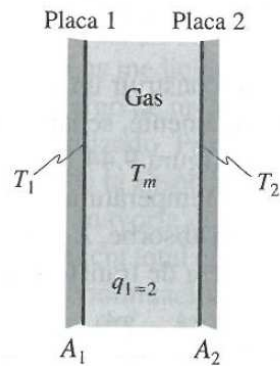
$$h(T_f - T_t) = \varepsilon_t \sigma (T_t^4 - T_p^4)$$

$$T_f = T_t + \frac{\varepsilon_t \sigma (T_t^4 - T_p^4)}{h} \quad [K]$$

9. Intercambio de radiación por medios absorbentes/emisores

9.1.- Recintos cerrados con medios absorbentes y transmisores

Recinto formado por dos superficies entre las que se encuentra un gas con comportamiento gris que no refleja nada de radiación



Por no haber reflexión: $\rho_m = 0 \rightarrow \tau_m = 1 - \alpha_m$
 Aplicando la ley de Kirchoff: $\alpha_m = \epsilon_m \rightarrow \tau_m = 1 - \epsilon_m$

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de} \\ \text{la superficie 1 e incide en} \\ \text{la superficie 2} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de} \\ \text{la superficie 2 e incide en} \\ \text{la superficie 1} \end{array} \right)$$

$$Q_{12} = A_1 F_{12} J_1 \tau_m - A_2 F_{21} J_2 \tau_m = A_1 F_{12} \tau_m (J_1 - J_2)$$

$$Q_{12} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 F_{12} (1 - \epsilon_m)}}$$



9. Intercambio de radiación por medios absorbentes/emisores

9.1.- Recintos cerrados con medios absorbentes y transmisores

También se intercambia calor entre las superficies y el gas. Si el gas se encuentra a T_m , su radiosidad es:

$$J_m = \epsilon_m E_{bm}$$

Fracción de energía emitida por el gas que llega a 1: $A_m F_{m1} J_m = A_m F_{m1} \epsilon_m E_{bm}$

La fracción de radiación emitida por 1 y absorbida por el gas: $A_1 F_{1m} J_1 \alpha_m = A_1 F_{1m} J_1 \epsilon_m$

$$Q_{1 \rightarrow 2} = \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale del gas} \\ \text{e incide en la superficie 1} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Radiación que sale de} \\ \text{la superficie 1 e incide en} \\ \text{el gas} \end{array} \right)$$

$$Q_{12} = A_m F_{m1} J_m = A_m F_{m1} \epsilon_m E_{bm} - A_1 F_{1m} J_1 \epsilon_m \quad Q_{m1} = \frac{E_{bm} - J_1}{A_1 F_{1m} \epsilon_m} \quad Q_{m2} = \frac{E_{bm} - J_2}{A_2 F_{2m} \epsilon_m}$$

$$Q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2} + \frac{1}{A_1 [F_{1-2} \tau_m + 1/(F_{1-m} \epsilon_m + A_1/A_2 F_{2-m} \epsilon_m)]}}$$



9. Intercambio de radiación por medios absorbentes/emisores

9.2.- Medios absorbentes y transmisores

Gases compuestos por especies monoatómicas o apolares → transparentes a la radiación térmica (salvo a T muy elevadas).

Gases formados por compuestos polares (CO, CO₂, H₂O, ...) → absorción a T moderadas y absorción y emisión a T elevadas.

Consideraciones adicionales:

- Fenómeno volumétrico. Debe tenerse en cuenta la forma y tamaño del cuerpo.
- Absorben y emiten en bandas → difícil asumir que se comporten como cuerpos grises.
- Características de emisión y absorción de una mezcla de gases depende de la T, P y composición de la mezcla.

La propagación de la radiación se complica con la presencia de aerosoles → fenómeno de dispersión (cambio de dirección por reflexión, refracción y difracción).

Otros medios participantes: agua, vidrio y plásticos.

ABSORCIÓN VOLUMÉTRICA

ABSORCIÓN = f(coeficiente de absorción y espesor del medio)

Al incidir un haz monocromático de intensidad I en un medio, la intensidad se reduce de forma infinitesimal al atravesar un espesor infinitesimal de medio: $dI_{\lambda}(x) = -k_{\lambda}I_{\lambda}(x)dx$

Integrando para todo el medio: $\frac{I_{\lambda,L}}{I_{\lambda,0}} = e^{-k_{\lambda}L} = \tau_{\lambda}$ **Ley de Beer**



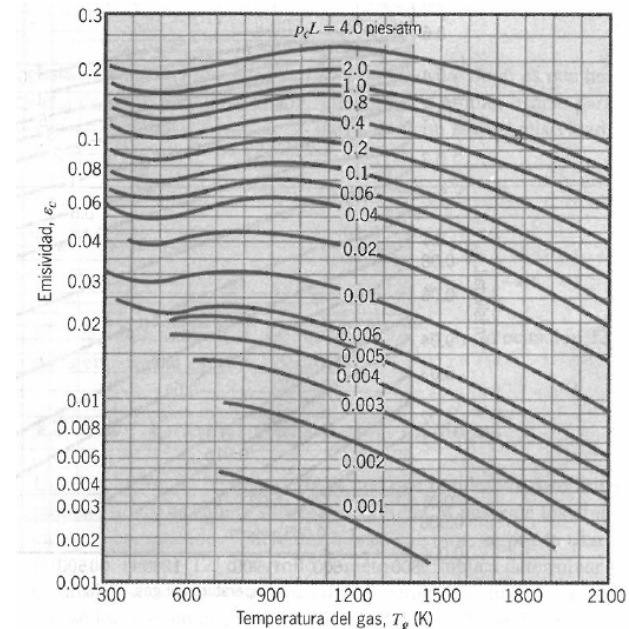
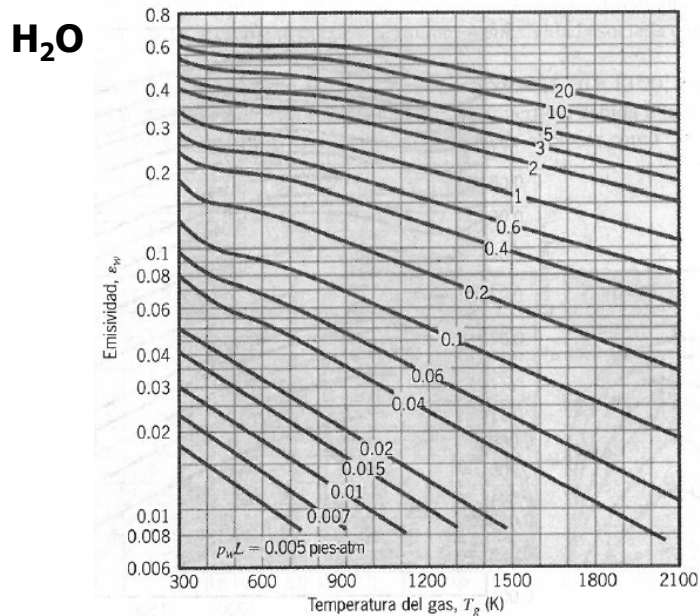
9. Intercambio de radiación por medios absorbentes/emisores

9.2.- Medios absorbentes y transmisores

EMISIÓN Y ABSORCIÓN GASEOSAS

Método simplificado de Hottel para el cálculo del flujo de radiación emitido por un gas a T_g a una superficie dA_1 en el centro de una hemiesfera: $E_g = \epsilon_g \sigma T_g^4$

$\epsilon_g = f(T, P \text{ total}, P_{\text{parcial}} \text{ y espesor del medio}) \rightarrow$ gráficas



Emissividad de H₂O y CO₂ en una mezcla con gases no radiantes a 1 atm de P total y de forma hemiesférica (Incropera)

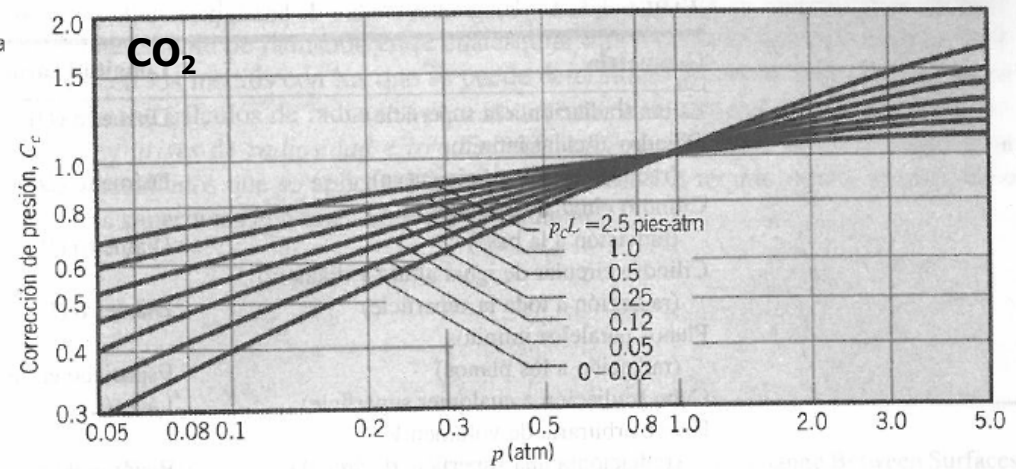
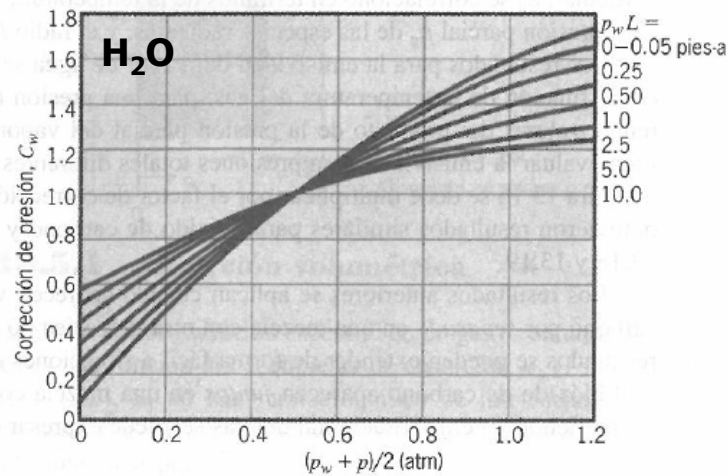


9. Intercambio de radiación por medios absorbentes/emisores

9.2.- Medios absorbentes y transmisores

EMISIÓN Y ABSORCIÓN GASEOSAS

Para el cálculo a otras presiones → multiplicar el valor anterior por factor corrector:



Factores correctores

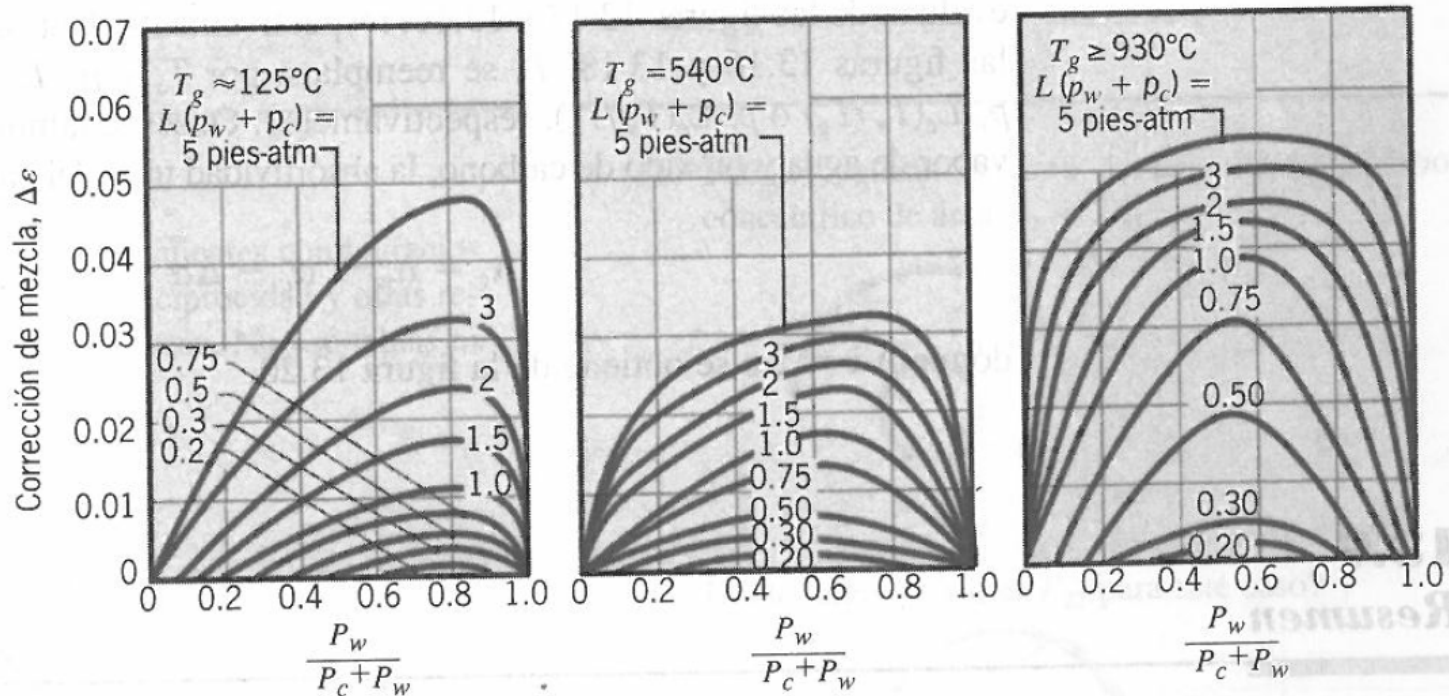
Emisividad en caso de gases en los que existan simultáneamente H₂O y CO₂: $\epsilon_g = \epsilon_w + \epsilon_c + \Delta\epsilon$



9. Intercambio de radiación por medios absorbentes/emisores

9.2.- Medios absorbentes y transmisores

EMISIÓN Y ABSORCIÓN GASEOSAS





9. Intercambio de radiación por medios absorbentes/emisores

9.2.- Medios absorbentes y transmisores

EMISIÓN Y ABSORCIÓN GASEOSAS

Para otras geometrías → Longitud media de haz, L_e . Radio de una masa de gas hemiesférica cuya emisividad es equivalente a la de la geometría de interés.

Tiene en cuenta la dependencia de la emisividad con el tamaño y la forma de la geometría del gas.

Longitudes medias de haz (L_e) para varias geometrías de gas (Incropera)

Geometría	Longitud característica	L_e
Esfera (radiación a la superficie)	Diámetro (D)	$0.65D$
Cilindro circular infinito (radiación a superficie curva)	Diámetro (D)	$0.95D$
Cilindro circular semiinfinito (radiación a la base)	Diámetro (D)	$0.65D$
Cilindro circular de igual altura y diámetro (radiación a toda la superficie)	Diámetro (D)	$0.60D$
Planos paralelos infinitos (radiación a los planos)	Espaciado entre planos (L)	$1.80L$
Cubo (radiación a cualquier superficie)	Lado (L)	$0.66L$
Forma arbitraria de volumen V (radiación a una superficie de área A)	Razón volumen al área (V/A)	$3.6V/A$



10. Transmisión de Calor combinada por Conducción-Convección y Radiación.

La pérdida total de calor desde un cuerpo caliente hacia sus alrededores con frecuencia comprende pérdidas por conducción-convección y por radiación. P. ej. En las conducciones por las que circula vapor de agua a elevadas temperaturas.

El caudal de calor total que se pierde por ambos mecanismos será:

$$Q = h_c \cdot A \cdot (T_e - T_g) + h_r \cdot A \cdot (T_e - T_s)$$

A : Superficie de la conducción.

h_c, h_r : Coeficientes individuales medios de T.C. por convección y radiación.

T_e : Temperatura externa del aislamiento.

T_g : Temperatura del gas de la nave.

T_s : Temperatura de las paredes de la nave que atraviesa la conducción.

En el caso de que T_g y T_s sean muy próximas: $Q = (h_c + h_r) \cdot A \cdot (T_e - T)$

En la bibliografía hay valores experimentales combinados para $(h_c + h_r)$ en función del tamaño de la conducción y de la diferencia de temperaturas $(T_e - T)$, tanto para conducciones aisladas térmicamente como para las que no lo están.