



Centro
Universitario
de la Defensa

Lección 11

Transmisión de calor por radiación

Tecnología Energética

Profesor: Alejandro López Belchí

Despacho 27 CUD

[alejandro.lopez@cud.upct.es](mailto:alejandro.lopez@ cud.upct.es)



*Centro Universitario de la Defensa de San Javier
MDE-UPCT.*

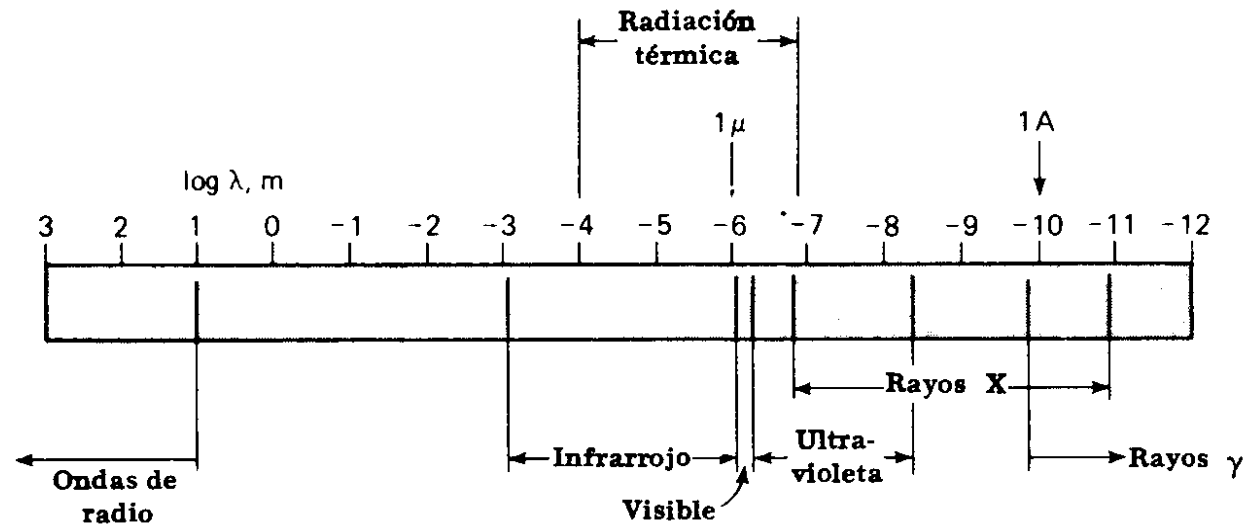
FUNDAMENTOS DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN

Fundamento de la Transmisión de Calor por Radiación



Todo cuerpo a cualquier **temperatura** por encima del **cero absoluto** emite radiación térmica de **todas** las longitudes de onda que se propaga en forma de **ondas electromagnéticas** (no necesita medio de propagación lo puede hacer también en el **vacío**). La energía emitida en cada longitud de onda depende de la temperatura del cuerpo.

La **radiación térmica** se define como la energía radiante emitida por los cuerpos como consecuencia de su propia temperatura en el intervalo de longitudes de onda $0,1\mu\text{m} < \lambda < 100\mu\text{m}$



Ejemplos:

Radiación Solar ($T = 5760\text{ K}$) $0,1\mu\text{m} < \lambda < 3\mu\text{m}$

Luz visible: $0,4\mu\text{m} < \lambda < 0,7\mu\text{m}$

La energía emitida es:

$E = h \cdot \nu$ siendo h cte de Plank, ν la frecuencia de radiación

La velocidad de propagación en un medio es $c = \lambda \cdot \nu$

PROPIEDADES DE LA RADIACIÓN

Propiedades de la radiación



Propiedades radiativas: describen como **absorbe, refleja o transmite la energía** radiante que le llega la superficie de un cuerpo. Estas propiedades varían con cada longitud de onda (**propiedades monocromáticas**).

Para simplificar se utilizan las **propiedades totales** que representan el valor medio de la propiedad promediado para todas las longitudes de onda.

G energía total radiante incidente sobre la superficie

A energía absorbida (aumenta la energía interna del cuerpo)

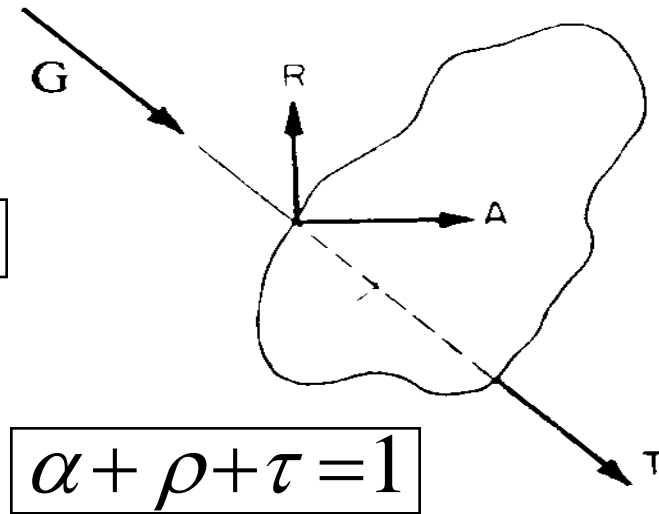
R energía reflejada, **T** energía transmitida

$$\boxed{A + R + T = G}$$

$\alpha = \frac{A}{G} \Rightarrow$ Absortividad: poder absorbente

$\rho = \frac{R}{G} \Rightarrow$ Reflectividad: poder reflexivo

$\tau = \frac{T}{G} \Rightarrow$ Transmisividad: poder transmisivo



Ej: muchos sólidos son **opacos** a la radiación $\tau=0$. Muchos gases y el vidrio tienen una τ muy alta por lo tanto ρ y α son muy bajos.

Emitancia monocromática E_λ : cantidad de energía radiante de una determinada longitud de onda, λ , emitida por un cuerpo por unidad de área y de tiempo

Emitancia o Potencia emisiva E : cantidad de energía radiante total emitida (no la reflejada) por un cuerpo por unidad de área y de tiempo:

$$E = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_\lambda d\lambda$$

Radiosidad J: energía radiante total que por unidad de tiempo y de área abandona una superficie (incluye la emitida originalmente por el cuerpo y la reflejada)

$$J = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} J_{\lambda} d\lambda$$

Irradiación G: energía radiante total que por unidad de tiempo y de área incide sobre una superficie

$$G = \int_0^{\lambda} G_{\lambda} d\lambda$$

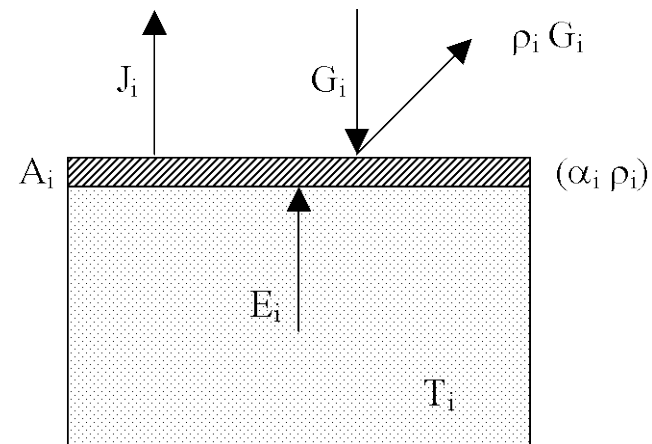
Relación entre magnitudes energéticas en la superficie de un cuerpo:

La radiosidad sería: $J_i = E_i + \rho_i G_i$ (Emitido+reflejado)

El flujo neto de energía es (Wattios): $q_i = A_i (J_i - G_i)$

Para un cuerpo opaco se cumple: $\tau_i = 0$; $\rho_i = 1 - \alpha_i$

$$J_i = E_i + \rho_i G_i = E_i + (1 - \alpha_i) G_i \quad q_i = A_i (E_i - \alpha_i G_i)$$



CUERPO NEGRO: aquel que absorbe toda la radiación incidente (es ideal):

Como no refleja nada, la única radiación que abandona la superficie es la que emite $J_i = E_{ib}$: (se pone b de black)

$$\alpha_i = 1 \quad ; \quad \rho_i = 0 \quad ; \quad \tau_i = 0$$

$$J_i = E_{bi} = \sigma T_i^4$$

$$q_i = A_i (E_{bi} - G_i)$$

LEYES DE RADIACIÓN DE UN CUERPO NEGRO

Leyes de radiación de un cuerpo negro



Ley de Plank:

La potencia emisiva de un cuerpo negro es:

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda T}\right] - 1}$$

- $E_{b\lambda}$ aumenta si T aumenta
- Para $\lambda = 0$ y $\lambda = \infty$, $E_{b\lambda} = 0$
- Para cada T tenemos un máximo
- Al aumentar T el máximo se da a menor λ

Ley de desplazamiento de Wien:

El máximo se da en:

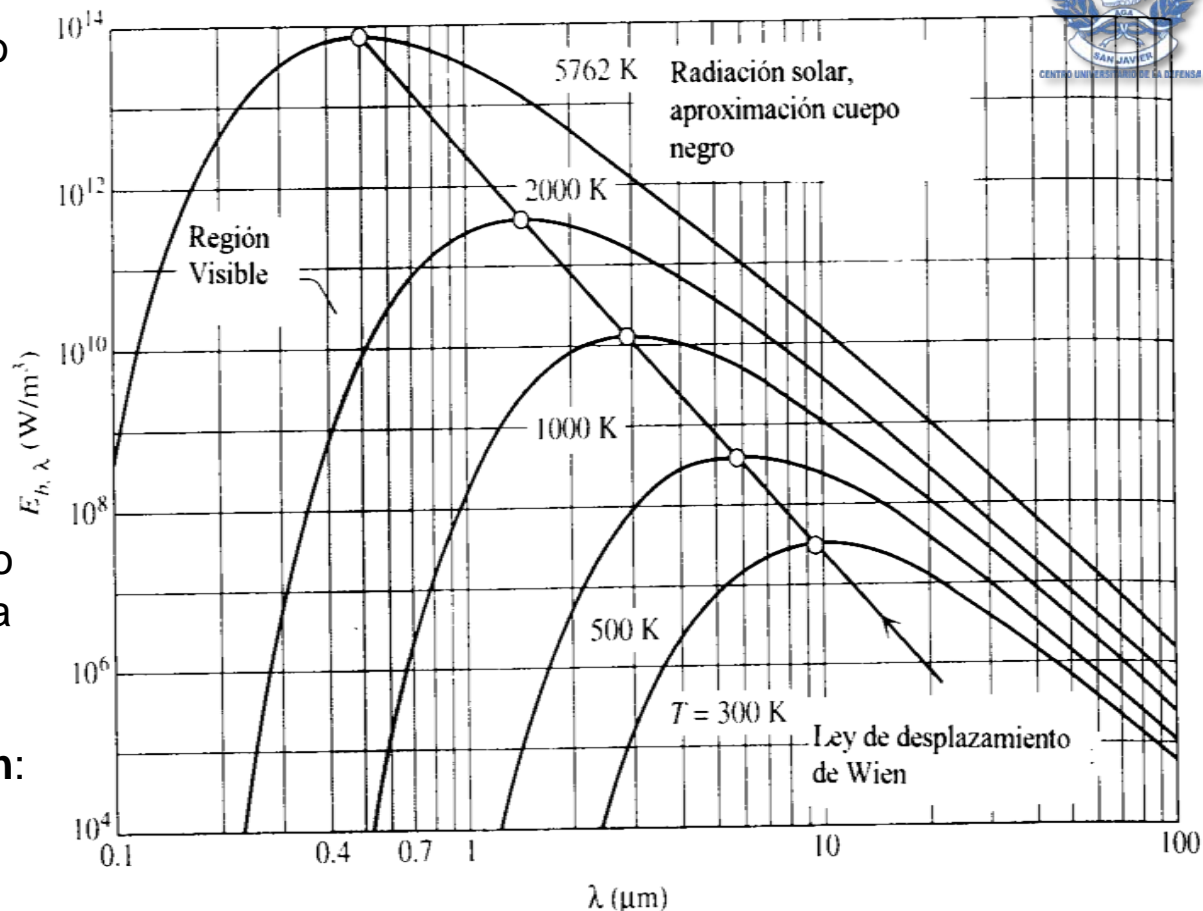
$$(\lambda T)_{m\acute{a}x} = 2,898 \cdot 10^{-3} m.K$$

Ley de Stefan-Boltzmann: La emitancia total del cuerpo negro se obtiene integrando $E_{b\lambda}$ y vale:

$$E_b = \sigma T^4$$

con $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann con T en kelvin K

Como σ es pequeño, en general la transmisión de calor por radiación es despreciable a bajas temperaturas



CARACTERÍSTICAS DE RADIACIÓN DE CUERPOS REALES

Características de radiación de cuerpos reales



Los cuerpos reales tendrán un $\alpha < 1$. Calcularemos su E_λ como la del cuerpo negro multiplicado por un coeficiente llamado **emisividad** ε que es menor que 1:

La emisividad monocromática ε_λ que es función de λ vale:
$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}}$$

La emisividad total media ε :
$$\varepsilon = \frac{E}{E_b}$$

La energía radiante emitida del cuerpo real se obtendría como:
$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4$$

Cuerpo gris: se denomina superficie gris o cuerpo gris a un tipo de superficie, no negra, en la que la emisividad monocromática es independiente de la longitud de onda de la radiación emitida: $\varepsilon = \varepsilon_\lambda$. Cualquier cuerpo real se puede estudiar asumiendo que es un cuerpo gris.

Ley de Kirchhoff: Toda superficie es capaz de absorber aquellas radiaciones que tengan la misma longitud de onda que las que emite.

Para mantener constante la temperatura de un cuerpo es necesario que emita la misma cantidad de energía que absorbe:
$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

Para un cuerpo gris: $\varepsilon = \alpha$

Por tanto el cuerpo negro es el emisor perfecto $\varepsilon = 1$

FACTOR DE FORMA DE LA RADIACIÓN

Factor de Forma de la Radiación



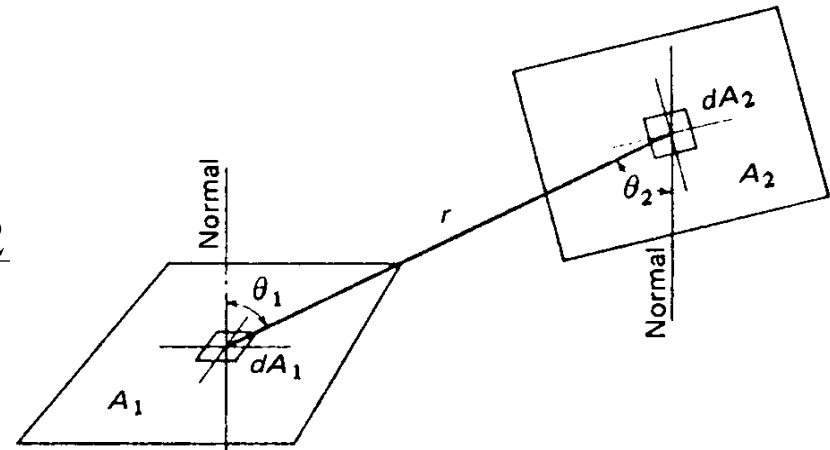
Para analizar el intercambio de energía entre dos superficies se utilizan los **FACTOR DE FORMA (F_{ij})**: Fracción de energía radiante que sale de la superficie “i” y llega directamente a la superficie “j”

Se obtiene integrando el flujo de energía entre las dos superficies:

$$F_{1,2} = \frac{1}{A_1 \pi} \iint_{A_1, A_2} \cos \phi_1 \cos \phi_2 \frac{dA_1 dA_2}{r^2}$$

$$F_{2,1} = \frac{1}{A_2 \pi} \iint_{A_1, A_2} \cos \phi_1 \cos \phi_2 \frac{dA_1 dA_2}{r^2}$$

$$F_{i,j} = \frac{1}{A_i \pi} \iint_{A_i, A_j} \cos \phi_i \cos \phi_j \frac{dA_i dA_j}{r^2}$$



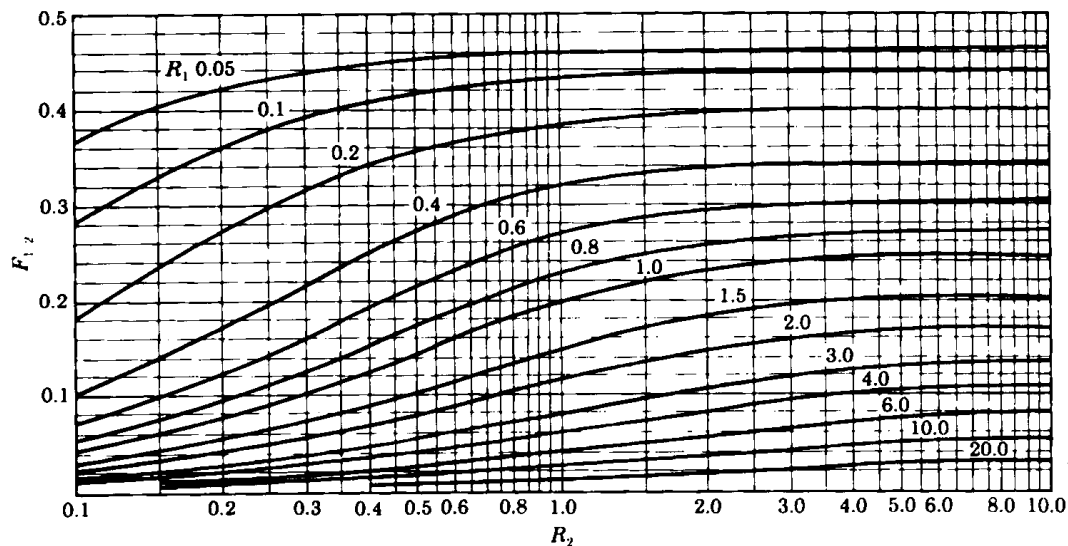
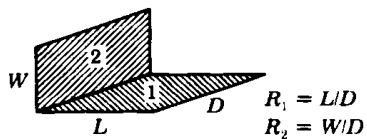
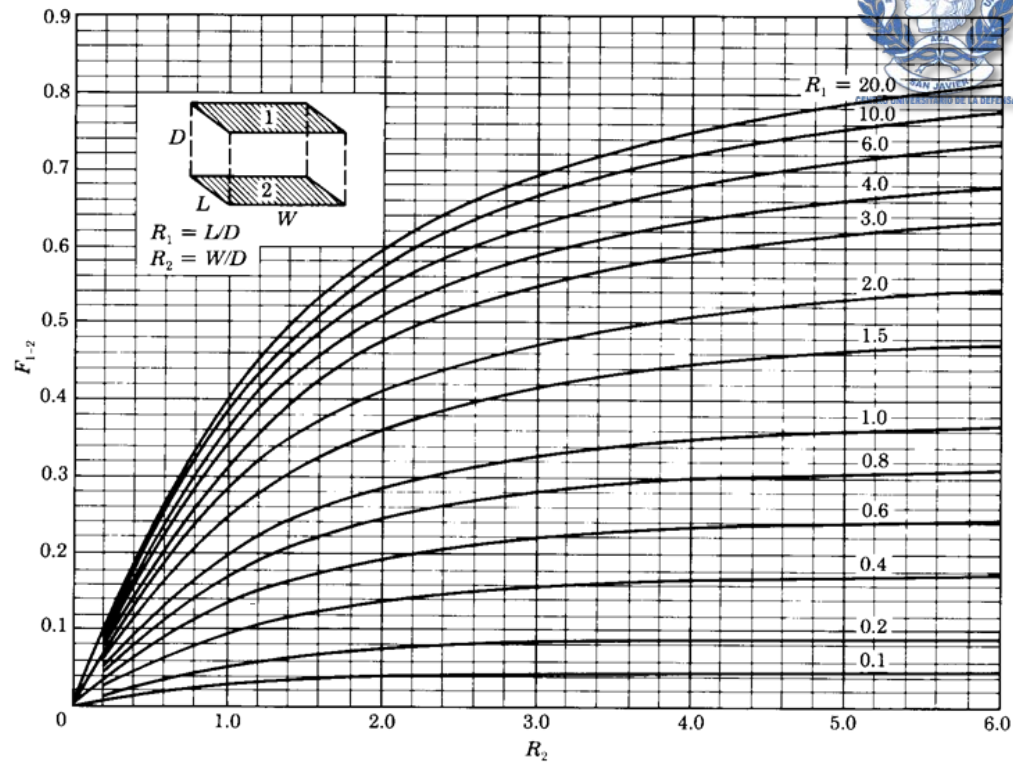
Relación de reciprocidad: $A_1 \cdot F_{1,2} = A_2 \cdot F_{2,1}$

El flujo de energía radiante entre dos superficies consideradas cuerpos negros

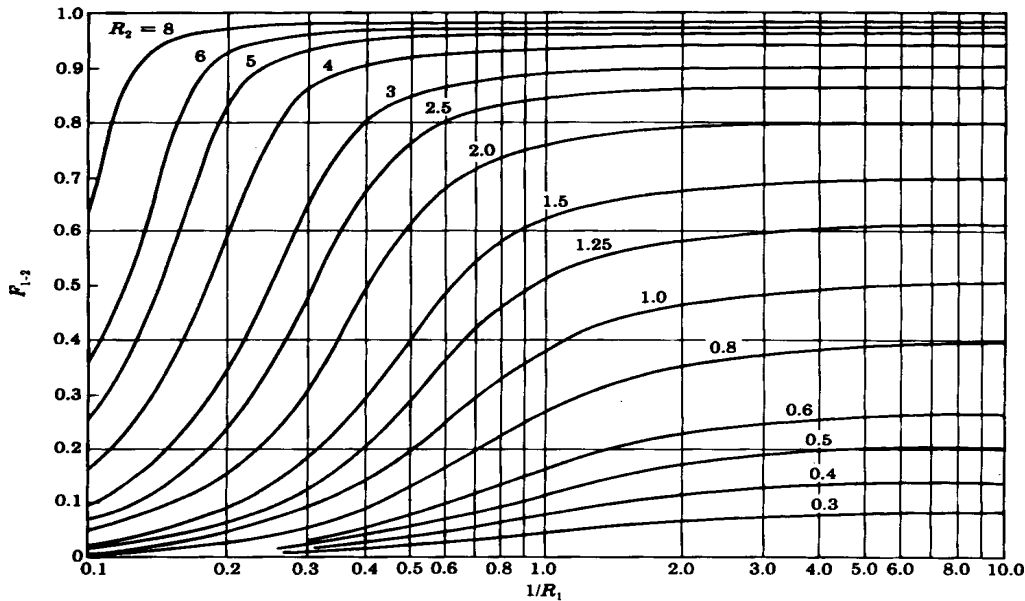
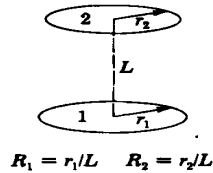
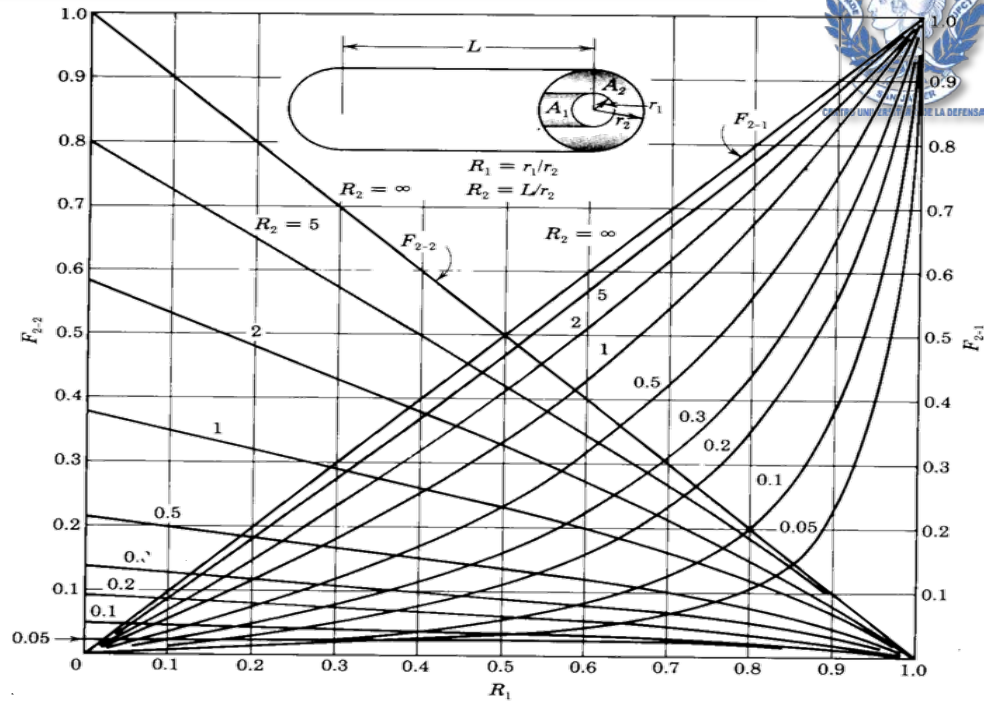
es: $q_{12} = A_1 \cdot F_{1,2} \cdot E_{b1} - A_2 \cdot F_{2,1} \cdot E_{b2}$

$$q_{12} = A_1 \cdot F_{1,2} (E_{b1} - E_{b2}) = \sigma \cdot A_1 \cdot F_{1,2} (T_1^4 - T_2^4)$$

Factores de Forma de Geometrías Sencillas



Factores de Forma de Geometrías Sencillas



INTERCAMBIO DE CALOR POR RADIACIÓN ENTRE SUPERFICIES NEGRAS

Intercambio de calor por radiación entre superficies negras



Si consideramos un sistema de N superficies negras el flujo neto de calor q_i que sale de la superficie A_i es el que emite menos el que recibe del resto:

$$q_i = A_i E_{bi} - \sum_j A_j F_{j,i} E_{bj}$$

si el sistema es cerrado y sólo se intercambia calor entre las superficies negras, por conservación de la energía:

$$\sum_i q_i = 0 \quad ; \quad \sum_j F_{i,j} = 1 \quad \longrightarrow \quad q_i = \sum_j A_j F_{j,i} (E_{bi} - E_{bj})$$

Intercambio de energía radiante entre la superficie "Ai" y la superficie "Aj":

$$q_{i,j} = A_i F_{i,j} (E_{bi} - E_{bj})$$

$$q_i = q_{i,2} + q_{i,3} + \dots + q_{i,j} = \sum_j q_{ij} \quad q_{i,j} = \frac{E_{bi} - E_{bj}}{\frac{1}{A_i F_{i,j}}} = \frac{E_{bi} - E_{bj}}{R_{ij}}$$

Analogía eléctrica: el flujo de calor entre 2 superficies es igual a la diferencia de sus emitancias dividido por la resistencia espacial:

$$R_{ij} = \frac{1}{A_i F_{i,j}} = \frac{1}{A_j F_{j,i}}$$

INTERCAMBIO DE CALOR POR RADIACIÓN ENTRE SUPERFICIES GRISES

Intercambio de calor por radiación entre superficies grises



El flujo neto de calor q_i que sale de una superficie gris de un cuerpo opaco cumple:

$$\tau=0, \text{ según Kirchoff } \alpha=\varepsilon, \quad J_i = E_i + \rho_i G_i = \varepsilon_i E_{bi} + (1-\alpha_i) G_i = \varepsilon_i E_{bi} + (1-\varepsilon_i) G_i$$

$$q_i = A_i (J_i - G_i) \quad \longrightarrow \quad q_i = \frac{A_i \varepsilon_i}{1-\varepsilon_i} (E_{bi} - J_i) = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1-\varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i}}$$

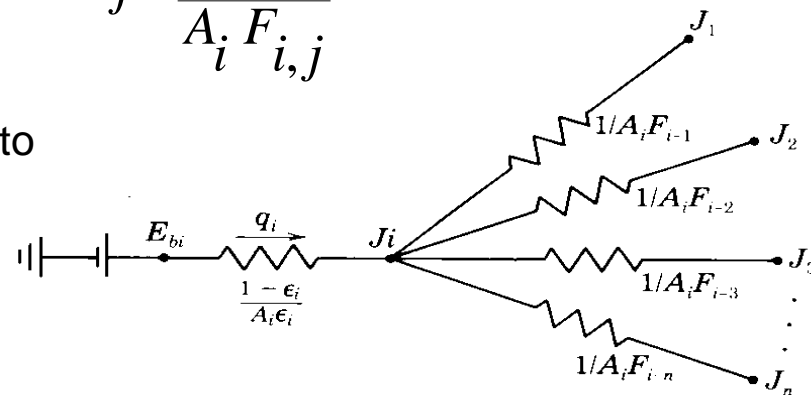
Que podemos poner en forma de analogía eléctrica y definir una resistencia superficial como:

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{R_i} ; \quad R_i = \frac{1-\varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i}$$

El intercambio de energía entre la superficie "Ai" y la "Aj" de un sistema cerrado:

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1-\varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i}} = \sum_j \frac{J_i - J_j}{\frac{1}{A_i F_{i,j}}} \quad q_{i,j} = \sum_j \frac{J_i - J_j}{\frac{1}{A_i F_{i,j}}}$$

El intercambio de calor entre la superficie i y el resto de superficies del sistema se puede poner como:



SISTEMA DE CUERPOS	SUPERFICIES GRISES $\varepsilon_1 \neq 1$; $\varepsilon_2 \neq 1$	SUPERFICIES NEGRAS $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$
General	$q = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \varepsilon_2}}$	$q = A_1 F_{12} (E_{b1} - E_{b2})$
Planos Paralelos indefinidos $A_1 = A_2 = A$ $F_{12} = 1$	$\frac{q}{A} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$	$q/A = (E_{b1} - E_{b2})$
Cilindros indefinidos y concéntricos $F_{12} = 1$ $A_1 = \pi D_1 L$ $A_2 = \pi D_2 L$	$q = \frac{A_1 (E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$ $q/L = \frac{\pi D_1 (E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{D_1}{D_2}\right) \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$	$q = A_1 (E_{b1} - E_{b2})$ $q/L = \pi D_1 (E_{b1} - E_{b2})$

APLICACIONES MILITARES

Aplicaciones

Firmas térmicas

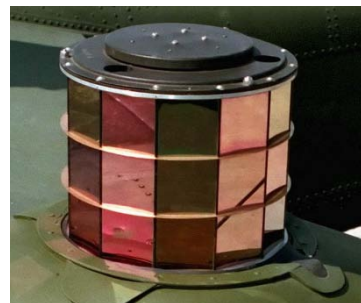
Las firmas de IR miden el brillo infrarrojo aparente del objetivo como una función de la longitud de onda λ . Es decir medimos energía emitida para distintas λ .



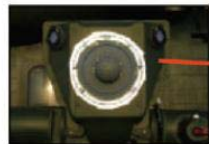
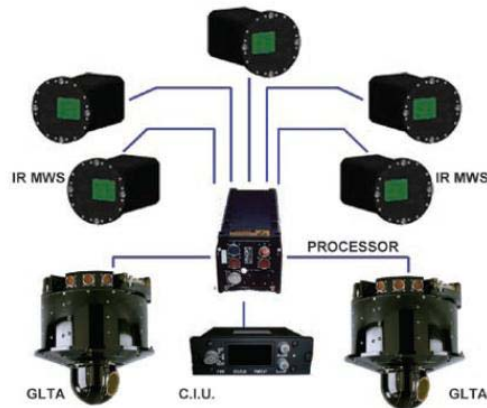
Guiado de Misiles

La distancia a la cual es efectivo un Buscador Infrarrojo para detectar un objetivo depende de la intensidad de la radiación Infrarroja emitida por el objetivo en la **dirección del sensor**, así como la sensibilidad del Buscador en sí. Llegando a su máximo valor en los ataques desde atrás. En los misiles más costosos de guía infrarroja se llega a unos 10 o 15 kilómetros de alcance, aunque en los modelos más simples no alcanzan a los 6.000 metros

- Radiación
 - Sistemas de visión térmicos/infrarrojos
 - Contramedidas (AN/ALQ)



Aplicaciones militares



GLTA (Side-Mounted)



CH-53E Helicopter

C.I.U. - Control Interface Unit
GLTA - Guardian Laser Turret Assembly
MWS - Missile Warning System
IR - Infrared



Aplicaciones militares



Aplicaciones militares

