

ME-715 Transferencia de Calor por Radiación

Objetivo:

Conocer de manera suficiente el modo de transferencia de calor llamado Radiación Térmica, (que actualmente se trata de manera muy breve y simplificada en los cursos básicos).

Apoyar las líneas de trabajo en energía (especialmente solar, generación termoeléctrica, vivienda) aportando conceptos útiles en esas áreas.

Dar las nociones que permitan definir medidas efectivas de ahorro de energía.

Conocer de manera científica las variables que determinan las propiedades radiativas de los cuerpos sólidos, líquidos y gases, y contribuir a la comprensión y aplicación de sistemas basados en radiación térmica.

Importancia de la Radiación Térmica

-La transferencia de calor entre dos cuerpos no es lineal con su diferencia de temperatura, sino más bien con la diferencia entre las cuartas potencias de sus temperaturas absolutas.

-Por lo anterior, el intercambio de calor por radiación se intensifica a altos niveles de temperatura (hornos y cámaras de combustión)

-Sin embargo, en condiciones adecuadas la radiación puede ser el mecanismo dominante aún a bajas temperaturas (por ej., enfriamiento de cuerpos en la superficie de la tierra mediante radiación nocturna hacia el espacio)

-No se necesita un medio material entre dos cuerpos para que intercambien radiación. En tanto, la convección y conducción dependen de un soporte material.

-La propiedad anterior permite transferir calor desde gases de combustión de alta temperatura hacia tubos de evaporación, un proceso que de realizarse por contacto directo de los gases con los tubos provocaría la fusión de estos.

-En ambientes habitables la incomodidad térmica generalmente se debe a la radiación del cuerpo humano hacia las paredes frías del recinto.

-Pero una radiación solar puede hacer confortable la permanencia en exteriores aún con una baja temperatura del aire.

-El mismo efecto anterior es responsable de los errores en la medida de temperaturas de gases.

-Una aplicación importante es la utilización práctica de la energía solar, transferida hacia la tierra en el vacío y luego a través de las capas atmosféricas. Un colector convierte la radiación en energía térmica o fotovoltaica. Si el colector es plano, en aplicaciones térmicas, las temperaturas a obtener en un fluido de trabajo están limitadas a 60-70° C a lo más. Temperaturas mayores se pueden obtener con colectores concentradores.

Temario del curso:

1) Radiación de cuerpo negro

Definición, Propiedades, características emisivas.

2) Propiedades radiativas de sólidos opacos no negros:

Emisión, absorción y reflexión

Relaciones entre estas propiedades: Leyes de Kirchoff

Resultados empíricos sobre propiedades de diferentes materiales de importancia (sólidos y líquidos).

3) Intercambio directo entre cuerpos

Factores de forma geométricos entre dos superficies (definición y propiedades)

Métodos de evaluación de factores de forma

4) Intercambio radiativo en cavidades compuestas de superficies negras y grises

Método de la radiación neta

Radiación entre áreas de dimensiones finitas

Análisis de radiación entre áreas infinitesimales

5) Radiación en cavidades con propiedades espectralmente dependientes

Radiación en cavidades con propiedades direccionalmente dependientes

6) Radiación combinada con conducción y convección en las paredes

Algunas técnicas numéricas de solución

7) Radiación en medios absorbentes y emisores

Atenuación de intensidad por absorción

Aumento de la intensidad por emisión

Propiedades absorptivas-emisivas de gases

8) Tratamiento ingenieril de la radiación en cavidades con medio absorbente y emisor.

Extensión del método de la radiación neta

Casos resueltos

Actividades

2 Controles (40%)

Ejercicios (para la casa) (30%)

Trabajo final con exposición (que es el examen oral) (30%)

Uso de consol en algunas tareas y en el trabajo final.

El espectro electromagnético

Todas las sustancias emiten radiación electromagnética debida a la agitación atómica y molecular asociada a la energía interna del material.

Las radiaciones electromagnéticas se clasifican por su longitud de onda, λ (radio AM, entre decenas de metros y 10^{-14} m, rayos cósmicos), su frecuencia ($\nu = c/\lambda$) y su número de onda ($1/\lambda$).

Se propagan a la velocidad de la luz, c .

La región de interés como radiación térmica incluye una parte de la franja de onda larga del ultravioleta, la región visible (0.4-0.7 micrometros), y el rango infrarrojo, que se extiende desde el extremo rojo del espectro visible hasta 1000 μm .

En el espectro visible los colores tienen las longitudes de onda aproximadas: 0,43 μm (violeta), 0,53 μm (verde), 0,64 μm (rojo).

Infrarrojo cercano: hasta 25 μm , e infrarrojo lejano es el resto.

Radiación de cuerpo negro

Cuando incide radiación sobre un cuerpo, una parte es reflejada

El resto puede ser absorbida, pero si el espesor del cuerpo es pequeño habrá una parte transmitida.

La parte absorbida pasa a ser energía interna del cuerpo dentro de una delgada capa superficial.

El cuerpo que no transmite energía se llama opaco.

Los metales tienen una alta opacidad, pero también una gran capacidad reflectante.

Cuerpo negro

Un cuerpo negro es el que absorbe toda la radiación incidente. Será por lo tanto, opaco y su capacidad reflectante será nula.

Esto ocurrirá para radiaciones de todas las longitudes de onda y provenientes de todas direcciones.

Es en consecuencia, un absorbedor perfecto para toda radiación incidente.

Otras propiedades del CN

Emisor perfecto

Considerando un cuerpo negro encerrado en una cavidad aislada y evacuada, compuesta también de paredes negras,

El CN y la cavidad alcanzarán la misma temperatura, que será uniforme y constante en el tiempo.

Para que esto ocurra, el CN debe radiar exactamente la misma energía que absorbe.

Esto debe ser así, ya que no puede haber un flujo neto de calor entre dos cuerpos a igual temperatura.

Por lo tanto, ya que el cuerpo por definición absorbe la máxima energía posible, debe estar emitiendo también la máxima energía posible.

(Un absorbedor no perfecto emitiría menos energía para quedar en equilibrio)

Isotropía de radiación en la cavidad negra

Si movemos el CN a otra posición y lo rotamos (dentro de la cavidad) su temperatura no debe variar debido a que la cavidad sigue siendo isoterma.

Por lo tanto el CN debe estar emitiendo la misma radiación que antes.

Además debe estar recibiendo la misma energía radiante desde las paredes.

Luego, la radiación que viaja en cualquier trayectoria dentro de la cavidad es independiente de la posición y dirección.

Esto implica que la radiación de CN que llena la cavidad es isótropa.

Emisor perfecto en cada dirección

Si consideramos un elemento de área en la superficie de la cavidad y un CN elemental dentro de la cavidad,

Parte de la radiación del elemento de área incide sobre el cuerpo, y está en un ángulo con la superficie de éste.

Toda esta radiación, por definición es absorbida

Para mantener el equilibrio térmico y la isotropía de la radiación en la cavidad,

La radiación emitida de vuelta en la dirección de incidencia debe ser igual a la recibida.

Como el cuerpo está absorbiendo la máxima radiación desde cada dirección, debe estar emitiendo el máximo en cada dirección.

Como la radiación de CN que llena la cavidad es isótropa, la radiación recibida o emitida en cualquier dirección por la superficie negra, por unidad de área proyectada normal a esa dirección, debe ser la misma que en cualquier otra dirección.

Emisor perfecto en cada longitud de onda

Supongamos que la cavidad es de tipo especial. Absorbe y emite solo en una longitud de onda λ_1 (en un corto intervalo $d\lambda$ alrededor de ella).

El CN, que es un absorbedor perfecto, absorbe toda la radiación incidente en este intervalo de longitud de onda.

Para mantener el equilibrio térmico en la cavidad, el CN debe reemitir radiación en este mismo rango de longitud de onda; la radiación debe ser absorbida por la cavidad, que solo absorbe en ese intervalo.

Como el CN está absorbiendo un máximo de radiación en el intervalo de longitud de onda $d\lambda$, debe estar emitiendo un máximo en el mismo intervalo.

Si se prepara una segunda cavidad que solo emite y absorbe en otro intervalo $d\lambda$ alrededor de λ_2 , el CN debe entonces emitir un máximo en esa nueva longitud de onda.

Entonces, el CN es el emisor perfecto a cada longitud de onda.

¿Qué diferencia hace el hecho de que la cavidad emite/absorbe en una sola longitud de onda?

Ninguna, ya que estamos caracterizando el comportamiento del cuerpo, no el de la cavidad.

La radiación total del CN es función solo de su temperatura

Si se varía la temperatura de la cavidad, la temperatura del CN encerrado en ella debe ajustarse a la nueva temperatura.

La energía absorbida y la emitida por el CN deberán ser nuevamente iguales, aunque diferentes en magnitud con respecto al valor anterior.

Como por definición el CN absorbe (y emite) la máxima cantidad correspondiente a esta temperatura, las características del ambiente no afectan el comportamiento emisor del cuerpo negro.

Luego, la energía radiante total emitida por el CN en el vacío es función solo de su temperatura

Intensidad de radiación de cuerpo negro

Consideremos una superficie elemental dA rodeada por un hemisferio de radio R

El hemisferio tiene un área $2\pi R^2$, subtendiendo un ángulo sólido 2π (sr)

La dirección está dada por dos ángulos: Uno de altura, θ , medido desde la normal a dA , y, ángulo azimutal φ

La radiación emitida en una dirección se define en términos de intensidad. Hay dos tipos:

Intensidad espectral: radiación en un intervalo $d\lambda$ alrededor de una sola longitud de onda λ

Intensidad total: se refiere a la radiación combinada incluyendo todos los λ .

La intensidad espectral de un cuerpo negro se denota por: $i'_{\lambda b}(\lambda)_{W/(m^2 d\lambda dsr)}$

Los dos subíndices denotan que es una magnitud espectral y de cuerpo negro (b, por black). La prima denota que es una radiación direccional (por unidad de ángulo sólido en una sola dirección).

Es una energía por unidad de tiempo, por unidad de área proyectada en la dirección de propagación, y por unidad de longitud de onda y de ángulo sólido.

Como se vio, la intensidad de cuerpo negro es independiente de la dirección, por lo tanto no hay mención de dependencias con los ángulos

La intensidad total direccional de radiación se obtiene por integración sobre todas las longitudes de onda y es:

$$i'_b = \int_0^{\infty} i'_{\lambda b}(\lambda) d\lambda$$

Luego veremos las propiedades hemisféricas de radiación (El poder emisor hemisférico)

De esta manera las propiedades radiativas de emisión se escalonan en los siguientes niveles, de menos a más agregados:

- espectral direccional
- total direccional
- espectral hemisférico
- total hemisférico

Es con estas últimas propiedades que trabajábamos especialmente en el curso 43B. Aunque su uso da algunas ideas fáciles de captar o de aplicación práctica, no puede servir de base al estudio de aplicaciones como energía solar o generación termoeléctrica, en que las propiedades espectrales y direccionales explican los principios de funcionamiento de los dispositivos.

[Dependencia angular de la intensidad](#)

Esta se puede visualizar si se considera una cavidad isotérmica esférica negra de radio R con un CN elemental dA en su centro.

Nuevamente, la cavidad y el cuerpo están en equilibrio térmico.

Se considera la radiación en un intervalo de longitud de onda $d\lambda$ alrededor de λ , la cual es emitida por un elemento dA_s en la superficie de la cavidad, y viaja hacia el elemento central dA .

La energía emitida en esta dirección por unidad de ángulo sólido y tiempo es $i'_{\lambda b, n}(\lambda)dA_s d\lambda$

(Se considera la energía emitida en dirección normal al elemento dA_s).

La cantidad de energía por unidad de tiempo que incide sobre dA depende del ángulo sólido que dA ocupa cuando se le mira desde la ubicación en dA_s

Este ángulo sólido es el área dA proyectada sobre la normal a la dirección (θ, φ) dividida por el cuadrado del radio:

$$dA_p = dA \cos \theta$$

Y la energía absorbida por dA es:

$$d^3 Q'_{\lambda b}(\lambda, \theta, \varphi) = i'_{\lambda b, n}(\lambda)dA_s d\lambda \frac{dA \cos \theta}{R^2}$$

La energía emitida por dA en la dirección considerada y incidente en dA_s debe ser igual a la absorbida desde dA_s , o el equilibrio se perdería. Entonces:

$$i'_{\lambda b}(\lambda, \theta, \varphi)dA_p d\lambda \frac{dA_s}{R^2} = d^3 Q'_{\lambda b}(\lambda, \theta, \varphi) = i'_{\lambda b, n}(\lambda)dA_s d\lambda \frac{dA \cos \theta}{R^2}$$

Por lo tanto,

$$i'_{\lambda b}(\lambda, \theta, \varphi) = i'_{\lambda b, n}(\lambda) \neq \text{función de } \theta, \varphi$$

Por lo tanto, la intensidad de radiación de un CN, definida en base al área proyectada, es independiente de la dirección de emisión.

Poder emisivo de un cuerpo negro

Debemos tener una magnitud que represente la energía emitida en una dirección por unidad de área real, no proyectada sobre la dirección de propagación.

Este es $e'_{\lambda b}(\lambda, \theta, \varphi)$ = energía emitida por un CN

- ✓ Por unidad de tiempo
- ✓ En un pequeño intervalo de longitud de onda centrado en λ
- ✓ Por unidad de área elemental
- ✓ En dirección a un ángulo sólido elemental centrado en la dirección (θ, φ)

La energía en el intervalo $d\lambda$ emitida por unidad de tiempo en cualquier dirección, se puede expresar de dos formas:

$$d^3 Q'_{\lambda b}(\lambda, \theta, \varphi) = e'_{\lambda b}(\lambda, \theta, \varphi) dA d\lambda d\omega = i'_{\lambda b, n}(\lambda) dA_s d\lambda \cos \theta d\omega$$

En consecuencia, $e'_{\lambda b}(\lambda, \theta, \varphi) = i'_{\lambda b, n}(\lambda) \cos \theta = e'_{\lambda b}(\lambda, \theta)$

Es decir el poder emisor espectral direccional de un CN no tiene dependencia del ángulo azimutal.

Poder emisor hemisférico de un CN

Se obtiene integrando la emisión de CN que pasa por el hemisferio completo en términos de la intensidad de CN.

$$e_{\lambda b}(\lambda) = i'_{\lambda b}(\lambda) \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \pi i'_{\lambda b}(\lambda)$$

Esta relación será de gran utilidad para el intercambio radiativo entre cuerpos.

Hasta aquí se han usado solo argumentos geométricos y termodinámicos para describir la radiación.

Poder emisor de un cuerpo negro.

La dependencia del P. E. de total hemisférico un cuerpo negro con la temperatura superficial fue estudiada durante el siglo 19, dando lugar a la conocida Ley de Stefan-Boltzmann (1879).

$$E = \sigma T^4.$$

En que σ es una constante universal ($5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).

La ley está basada en datos experimentales de Tyndall, elaborados por Stefan para llegar a la ley, la que fue respaldada por una deducción clásica de Boltzmann (la cual todavía se puede ver en el libro de M. Jakob, Heat Transfer, Vol, 2, 1955).

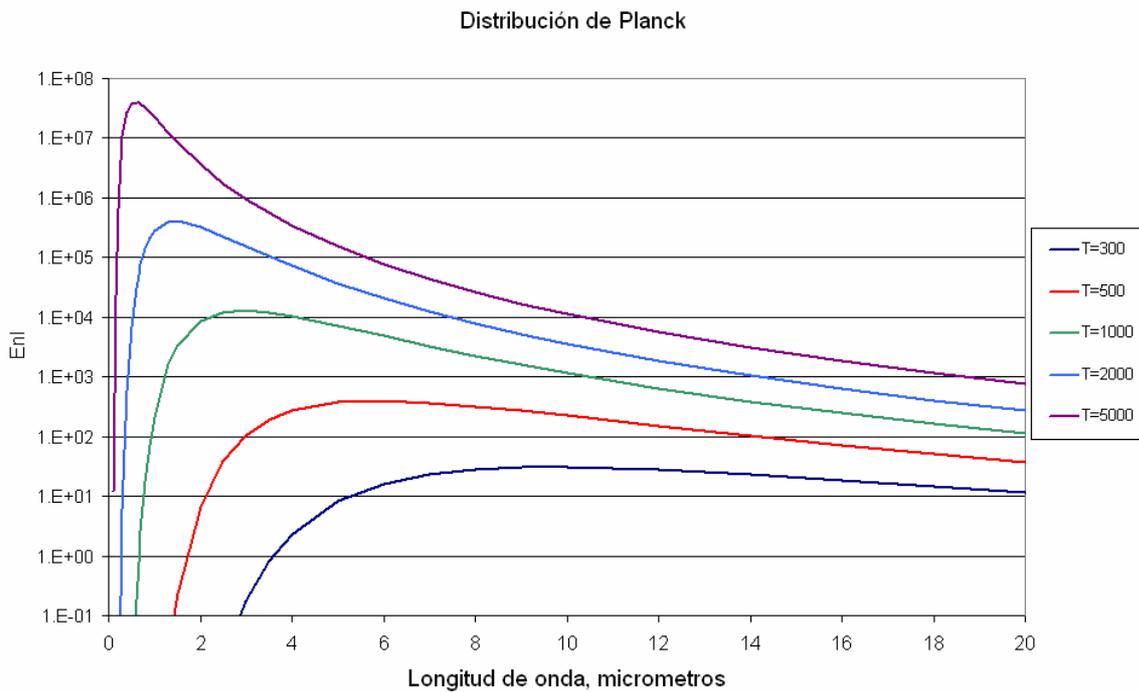
La ley de S. B. se refiere al poder emisor total. La distribución espectral del poder emisor hacia el vacío fue dada por Planck (1903).

$$e_{\lambda b}(\lambda, T) = i'_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)}$$

$$C_1 = 0,59552197 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ sr}$$

$$C_2 = 0,01438769 \text{ m} \cdot \text{K}$$

$e_{n\lambda}$ es el poder emisor espectral, o "monocromático", y se expresa en $\text{W/m}^2 \mu\text{m}$. Su distribución con la longitud de onda se muestra en la Figura siguiente:



$E_{n\lambda}$ representa la energía emitida en un pequeño intervalo $d\lambda$ en torno a una longitud de onda λ .

El poder emisor total se obtiene de integrar el P.E. espectral en el rango completo de λ :

$$E_n = \int_0^{\infty} E_{n\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

Esta igualdad se puede verificar realizando la integración.