

Capítulo I

Carlos A. Cadena
Miguel Condorí
Judith Franco
Jaime A. Moragues
Luis R. Saravia

CONVERSIÓN FOTOTÉRMICA



de la ENERGÍA SOLAR



La impresión de este libro fue realizada en la imprenta del Congreso de la Nación (Argentina) a través de la gestión de la Presidenta de la Comisión de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, diputada Sandra Castro.



CAPITULO 1: CONCEPTOS GENERALES

1. Introducción
 - 1.1. Radiación solar
 - 1.1.1. Origen de la radiación solar y su composición espectral
 - 1.1.2. Radiación solar incidente sobre la superficie terrestre
 - 1.2. Conversión fototérmica de la energía solar
 - 1.2.1. Efecto invernadero
 - 1.2.2. Superficies selectivas

CAPITULO 1

CONCEPTOS GENERALES

INTRODUCCIÓN

La energía que proviene del Sol es fundamental para la Vida en nuestro planeta pues determina la temperatura sobre la superficie de la tierra y provee toda la energía necesaria para los procesos naturales tanto a nivel de superficie como en la atmósfera. Un ejemplo bien conocido de estos procesos es la fotosíntesis, fenómeno que posibilita el crecimiento de las plantas y que no sería posible sin el aporte de la energía solar. Pero también se puede utilizar convirtiéndola artificialmente en energía térmica y eléctrica a fin de satisfacer las necesidades cotidianas.

Desde épocas remotas el hombre la ha aprovechado mediante tecnologías muy simples; basta mencionar el secado de carnes y frutas y el cultivo en invernaderos. Sin embargo su uso intensivo requiere del empleo de una serie de tecnologías de conversión más elaboradas que se estuvieron desarrollando en los últimos 30 años y que todavía se encuentran en etapa de perfeccionamiento, fundamentalmente para disminuir sus costos. La energía solar tiene baja densidad y su suministro es intermitente, por lo que es necesario captarla sobre superficies relativamente grandes y acumular, de alguna forma, la energía necesaria para las horas sin sol.

La energía solar tiene dos características importantes: su condición de energía prácticamente inagotable y el hecho de no ser contaminante en si misma, si bien su aprovechamiento debe ser analizado desde el punto de vista ambiental por el tipo de equipamiento empleado. Además está disponible, en mayor o menor medida, en cualquier lugar del planeta. Tiene la ventaja de poder ser colectada y transformada en el lugar mismo de utilización. Esto último ofrece ventajas económicas considerables, particularmente en áreas remotas y aisladas para las cuales los costos de transporte de combustibles convencionales o de distribución de electricidad pueden ser muy elevados.

El quemado de energéticos de origen fósil (petróleo, gas y carbón) cuestionado por sus consecuencias constantes tanto a nivel local (por la formación de smog) cuanto regional (producción de lluvia ácida) y global (incremento del efecto invernadero y disminución de la capa de ozono) puede ser paulatinamente reemplazado, aunque sea parcialmente, por energía solar que no produce ninguno de dichos efectos, contribuyendo a atenuarlos en forma creciente.

RADIACIÓN SOLAR

1.1.1. Origen de la radiación solar y su composición espectral

El Sol es esencialmente una esfera de gas calentada por reacciones complejas de fusión nuclear que se producen en su interior. La temperatura cerca de su centro se estima en veinte millones de grados centígrados (20.000.000 °C). La mayor parte de la radiación que se emite desde el centro del Sol es absorbida por la capa de iones de hidrogeno que están cerca de su superficie.

La capa superficial, responsable de la emisión de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, se denomina fotosfera y su temperatura es de 5.730 °C ($\approx 6.000 \text{ K}$)^[1], muy inferior a la del centro.

Todo cuerpo caliente emite radiación electromagnética con una distribución espectral que depende de su temperatura. Para el caso de un absorbente perfecto o "cuerpo negro"^[2], esa distribución espectral se comporta según la denominada ley de radiación de Planck ^[3]. En la Figura 1.1. se muestra la distribución espectral para diferentes temperaturas de un cuerpo emisor.

Si integramos la ecuación de Planck desde la longitud de onda cero hasta la longitud de onda infinito, o sea el área bajo las curvas de la Figura 1.1., se tiene la energía total emitida por un cuerpo que está dada por:

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

donde E se expresa en W m^{-2} y la temperatura en K, siendo

$$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot \text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4) = \text{constante de Stefan-Boltzmann}$$

El cuerpo negro tiene tanto el mayor coeficiente de absorción como el de emisión para todas las longitudes de onda. La ley de radiación de Planck (Figura 1.1.) indica que cuando un cuerpo es calentado aumenta la energía total de la radiación electromagnética emitida en forma proporcional con la temperatura a la cuarta (T^4), corriéndose simultáneamente el pico de emisión hacia longitudes de onda menores. Este corrimiento responde a la ley de Wien que dice que el producto de la temperatura por la longitud de onda máxima ($\lambda_{\text{máx}}$) es una constante.

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = 2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K} = \text{Constante}$$

[1] Un grado Kelvin (K) es igual a un grado centígrado (°C) más 273,15 ($\text{K} = ^\circ\text{C} + 273,15$)

[2] Por definición un cuerpo negro es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Se lo llama así porque al no reflejar radiación alguna el ojo humano lo ve negro. Si bien se trata de una idealización, existen algunos cuerpos reales que se aproximan bastante (como por ej., un trozo grueso de carbón que puede absorber el 99% de toda la radiación incidente).

[3] Ley de Planck: $E_{\lambda} = A / [(e^{B/\lambda T} - 1) \lambda^5 n^2]$, donde E_{λ} (energía emitida por unidad de área, tiempo y longitud de onda) se expresa en $\text{W} / (\text{m}^2 \mu\text{m})$, siendo $A = 3,7413 \cdot 10^{-4} \cdot \text{W} \cdot \mu\text{m} / \text{m}^2$, $B = 1,4386 \cdot 10^{-4} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{K}$. La longitud se mide en micrómetros = $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$.

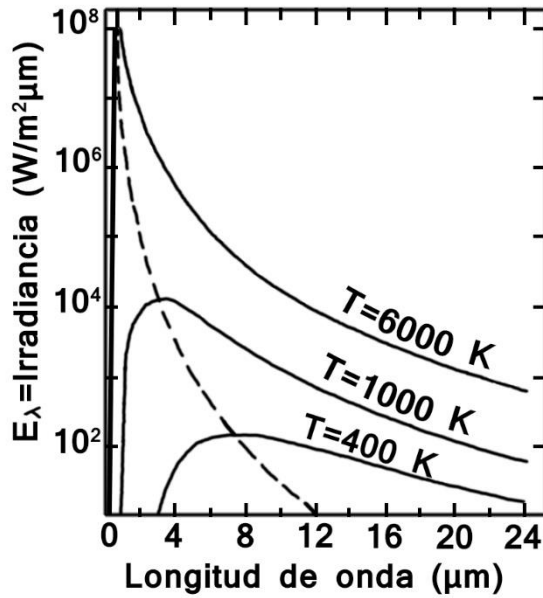


Fig. 1.1. E_λ =Energía emitida en la unidad de tiempo [en Watt(W)] que atraviesa la unidad de superficie (m^2) para cada longitud de onda en función de la longitud de onda para diferentes temperaturas de emisión de acuerdo con la ley de Planck. La línea cortada indica el desplazamiento de Wien. Observar que la escala de abscisa es logarítmica.

Si se divide E_λ por la energía máxima emitida $E(\text{máx})$ para cada temperatura y se grafica en función de la longitud de onda (Figura 1.2.) se ve claramente el corrimiento en la longitud de onda de los espectros de emisión para las diferentes temperaturas. En particular para el espectro solar ($\sim 6.000\text{ K}$) y el espectro de emisión de un cuerpo a 130°C (400 K) casi no hay superposición.

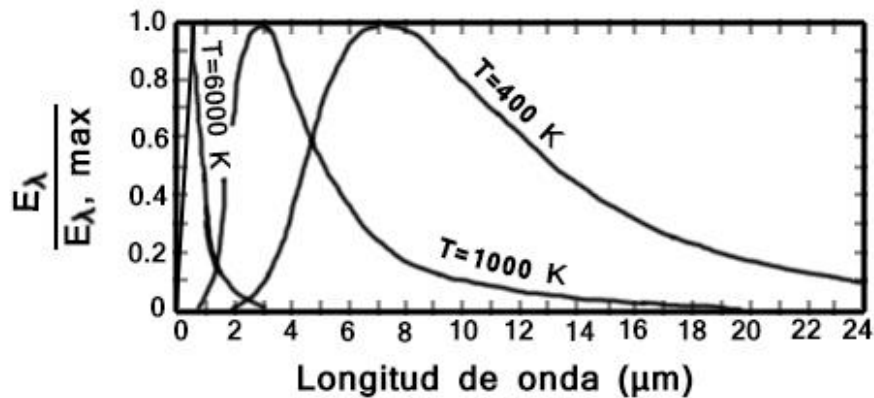


Fig. 1.2. Irradiancia E_λ dividida el valor máximo $E_{\lambda, \text{max}}$ para cada temperatura en función de la longitud de onda.

El corrimiento en longitudes de onda de los espectros de emisión en función de la temperatura es un fenómeno importante en la conversión térmica de la energía solar cuando se utilizan colectores que aprovechan el denominado efecto invernadero.

La radiación emitida por el Sol corresponde, por lo tanto y muy aproximadamente al espectro emitido por un cuerpo negro a 6.000 K como puede verse en la Figura 1.3. donde se muestra la energía contenida en las distintas longitudes de onda. De acuerdo con la longitud de onda de los fotones que componen la radiación solar, ésta se divide en radiación ultravioleta entre 0,2 μ y 0,38 μ (que constituyen el 8 % del espectro solar total antes de atravesar la atmósfera), luz visible (entre 0,38 μ y 0,78 μ ; 41 % del espectro) y radiación infrarroja (más de 0,78 μ ; 51 % del espectro).

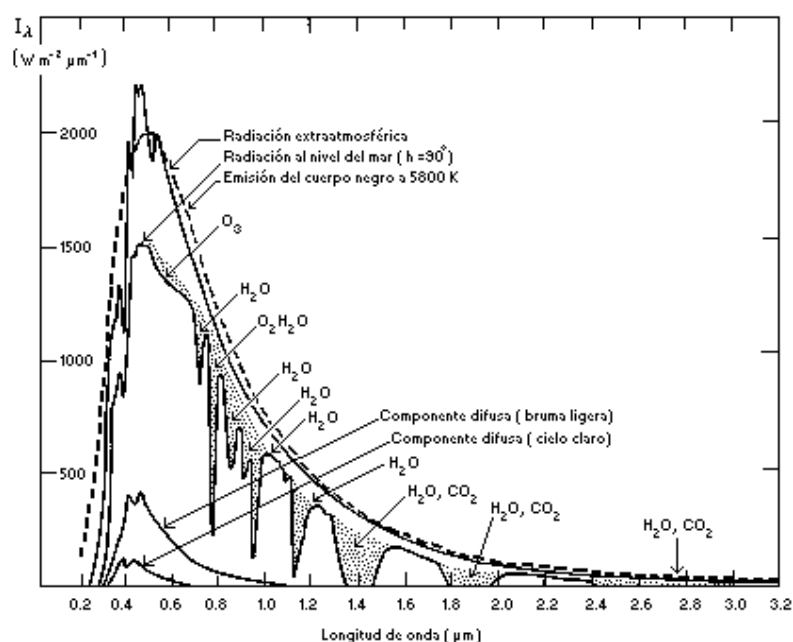


Fig. 1.3. Distribución espectral de la radiación solar extra atmósfera. La ordenada está dada en $\text{W/m}^2 \mu\text{m}$. Observar la similitud con la curva de emisión de un cuerpo negro a 5.800 K. (Chassériaux ^[4]).

1.1.2. Radiación solar incidente sobre la superficie terrestre

La órbita que describe la tierra al girar alrededor del Sol es elíptica y, por lo tanto, la distancia Tierra-Sol varía a lo largo del año. Se ha dado en llamar *constante solar* a la radiación solar que llega al tope de la atmósfera terrestre cuando la distancia Tierra-Sol está en su valor medio (149,5 millones de km); se la mide en unidades de energía por unidad de tiempo (W) incidente sobre la unidad de superficie (m^2). El valor aceptado por la Organización Meteorológica Mundial en 1982^[5] es:

$$I_{sc} = (1367 \pm 7) \text{ W/m}^2$$

[4] Chassériaux, J.M. (1990) *Conversión térmica de la radiación solar*, primera edición, pp. 136-143. Librería Agropecuaria S.A., Buenos Aires, Argentina.

[5] Informe final abreviado de la Octava Reunión de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación, OMM, N° 590. Anexo II, Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza.

El vapor de agua, el ozono, el dióxido de carbono, las nubes y las partículas de polvo (aerosoles) y/o contaminantes absorben y dispersan (difunden) parte de la radiación solar que atraviesa la atmósfera haciendo que su intensidad sea bastante menor a nivel del suelo que la constante solar. Un valor típico de radiación en un día despejado y al mediodía solar es 1.000 W/m^2 .

La radiación solar que llega a la superficie terrestre sin sufrir desviaciones se denomina *radiación solar directa* (I) y se la mide sobre un plano perpendicular a la dirección de los rayos solares (ver Figura 1.4.). Se denomina *radiación solar difusa* (D) a la radiación solar que es dispersada o difundida por la atmósfera y que incide sobre la superficie terrestre sin una dirección definida; se la mide en un plano horizontal.

Finalmente, la *radiación global o total* (G), que es también medida en un plano horizontal, es la suma de las dos anteriores ^[6] y se la expresa matemáticamente como:

$$G = D + I \cdot \sin h = D + I \cdot \cos \alpha$$

donde h es la altura solar, entendiendo por tal al ángulo formado por la dirección de los rayos solares y el plano horizontal y α el ángulo de incidencia.

La proporción de radiación solar directa y difusa varía según la hora del día y las características de la atmósfera de cada lugar. En atmósferas muy limpias la radiación solar directa puede alcanzar valores del orden del 80-85 %, mientras que en atmósferas muy contaminadas y en ausencia de nubes puede reducirse a valores cercanos al 50 %.

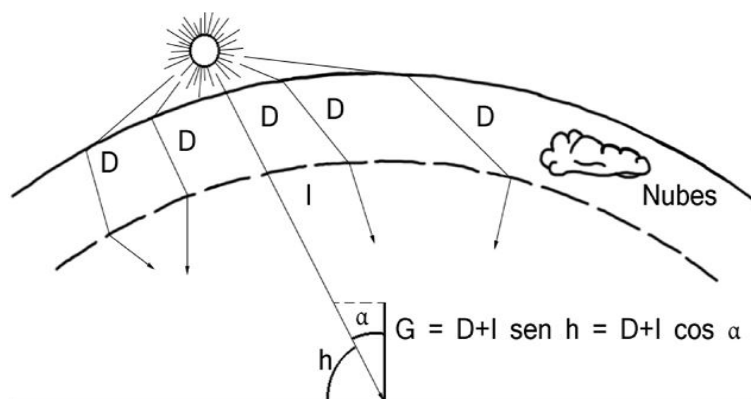


Fig. 1.4. Diferentes componentes de la radiación solar.

Con cielos completamente cubiertos la radiación solar es totalmente difundida por la atmósfera llegando a la superficie terrestre sólo radiación difusa.

Esta distinción entre las dos componentes básicas de la radiación solar es muy importante para ciertos equipos solares.

[6] La radiación difusa (D) y global (G) se miden en un plano horizontal. Como la radiación directa (I) se mide en un plano perpendicular a la dirección de la radiación incidente, se proyecta sobre la normal al plano horizontal para poder sumarla, siendo su proyección $I \cdot \sin h$.

Tal es el caso de aquellos que funcionan sobre la base de concertadores de la radiación solar que solo utilizan la componente directa y, por lo tanto, no serán recomendables en regiones con altos porcentajes de radiación difusa.

Tanto la posición relativa del Sol cuanto las condiciones atmosféricas afectan la radiación solar disponible en cada instante a nivel del suelo. También la latitud, la altura del lugar y la estación del año son factores que determinan la energía solar disponible.

Un instrumento que registre estos valores a lo largo del día, desde que sale hasta que se pone el Sol, nos daría en un día claro o muy nublado las gráficas del tipo mostrado en la Figura 1.5., donde se representan los valores de radiación global como la energía que atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo (W/m^2).

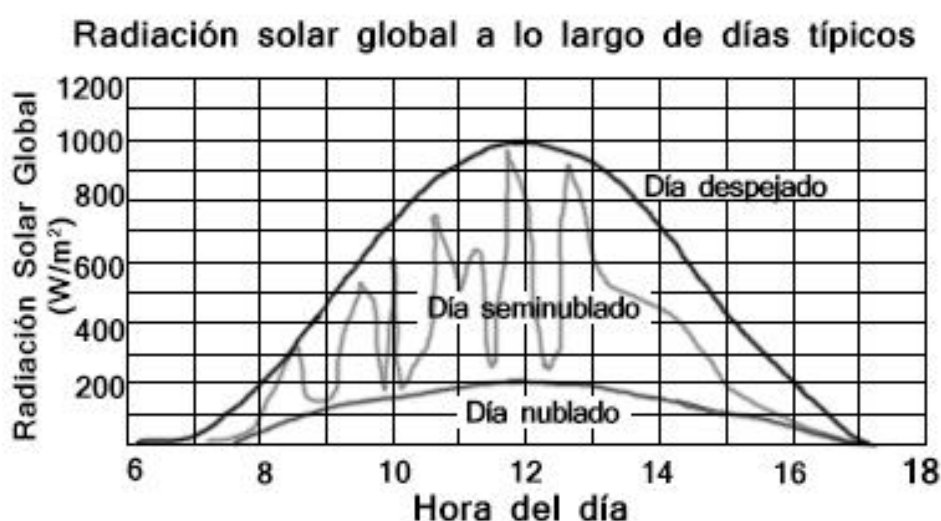


Fig. 1.5. Radiación solar global según nivel de nubosidad

Sumando los valores instantáneos de todo el día se obtiene la energía diaria, comúnmente expresada watt hora (Wh)^[7] por metro cuadrado y por día ($\text{Wh/m}^2\cdot\text{día}$) o en algunos de sus múltiplos por tratarse de valores muy grandes ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{día}$ o $\text{MWh/m}^2\cdot\text{día}$).

Promediando los valores diarios para todo un mes se obtiene la radiación solar media diaria mensual. Como ejemplo se muestran en la Figura 1.6. las cartas de radiación solar media mensual sobre plano horizontal para los meses de diciembre y junio para la República Argentina^[8]. En el año 2007 se publicó el “Atlas de energía solar de la República Argentina”, con la misma información para los doce meses del año, en colores^[9].

^[7] Otras unidades de energía que se emplean son $\text{kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J (Joule)} = 859,845 \text{ kcal}$

^[8] H. Grossi Gallegos, Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 5, pp. 33-42 (1998).

^[9] Atlas de energía solar de la República Argentina”. H. Grossi Gallegos y R. Righi, 1ra. edición mayo 2007, Editado por la Universidad Nacional de Luján con el apoyo de la SECyT.

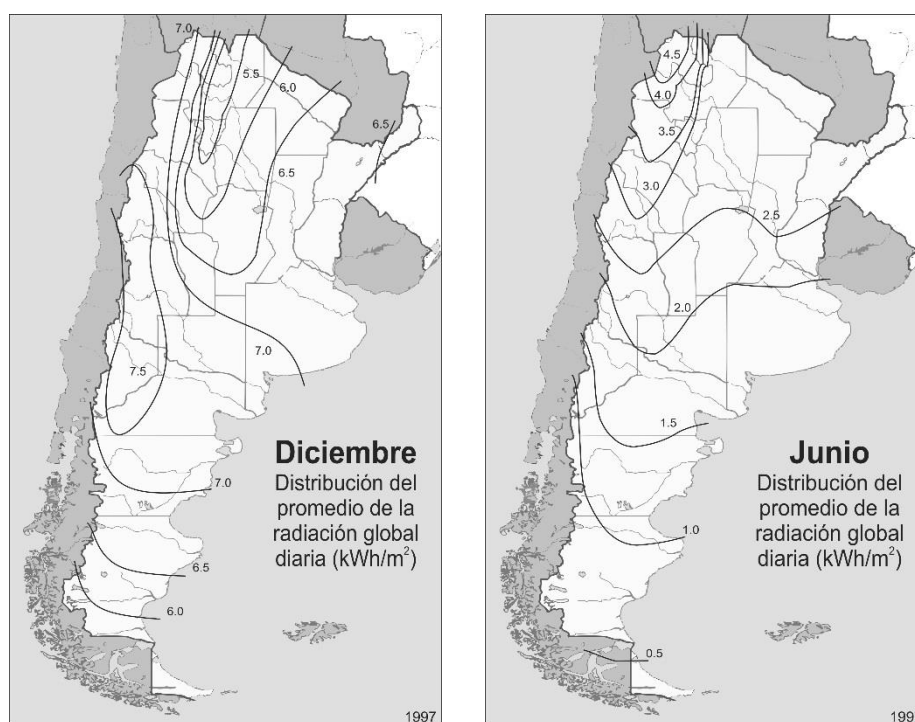


Fig. 1.6. Radiación solar mes de diciembre y de junio.

Al recurso energético solar no se lo puede cuantificar en la misma forma que los recursos energéticos convencionales como petróleo, gas, carbón y uranio. Estos recursos no son renovables y se puede determinar la cantidad de energía almacenada en los reservorios y la que es extraíble periódicamente y a voluntad mediante una tecnología dada. Al tratar de cuantificar el recurso solar deberá tenerse en cuenta su característica de energía renovable, inagotable pero de disponibilidad cíclica y de baja densidad energética. Desde el punto de vista del recurso energético la energía solar es abundante y su empleo masivo dependerá de los costos relativos que se alcancen para un uso integral de la misma, incluyendo los costos de los sistemas de acumulación en los casos necesarios.

1.2. CONVERSIÓN FOTOTÉRMICA DE LA ENERGÍA SOLAR.

Parte de la radiación solar que llega a nuestro planeta es colectada y convertida en otras formas de energía por el gran sistema termodinámico que integran la Tierra y su atmósfera (entre ellas las más conocidas son la energía eólica y la energía disponible a través de procesos de bioconversión). Pero además es posible aprovechar la energía solar a través de diferentes tecnologías que la convierten en energía térmica o eléctrica. En el presente libro nos referiremos solamente a la conversión solar en energía térmica, o conversión fototérmica, y sus diferentes aplicaciones.

Cuando los fotones que componen la radiación inciden sobre un cuerpo receptor los electrones de los átomos que los integran se excitan. El decaimiento del electrón excitado a su estado normal se produce liberando la energía absorbida, que es transferida a los vínculos interatómicos lo que genera vibraciones en toda la estructura del sólido.

Esto quiere decir que en el proceso de conversión de la energía solar en energía térmica, el fotón absorbido es utilizado para aumentar la temperatura del cuerpo a través de las vibraciones de los átomos que lo componen. Este proceso se denomina conversión fototérmica.

1.2.1. Efecto invernadero

Casi todos los colectores que convierten la energía solar en térmica utilizan el denominado "efecto invernadero" de una u otra forma. Como su nombre lo indica, se trata del mismo principio que se aplica en los invernaderos en los que se cultivan plantas que requieren temperaturas superiores a la ambiente, especialmente en invierno, y cuyo interior se calienta aprovechando la radiación solar. Para analizar el fenómeno producido por el efecto invernadero veamos los espectros que aparecen en la Figura 1.7. donde se grafican: el espectro de transmisión de la radiación electromagnética de un vidrio de 6 mm de espesor en función de la longitud de onda, el espectro de la radiación solar cuyo máximo de emisión se encuentra en la longitud de onda de 0,5 micrones y el de emisión de un cuerpo negro calentado a la temperatura de ebullición del agua, 100 °C (373 K), estando el máximo de emisión en 8,5 micrones (se han dibujado $E_{\lambda} / E_{\lambda \max}$ para ambos espectros). Observamos que la radiación solar atraviesa el vidrio siendo absorbida sólo en el porcentaje que indica la curva correspondiente; en cambio la radiación emitida por el cuerpo caliente a 100 °C (373 K) no podrá atravesar el vidrio.

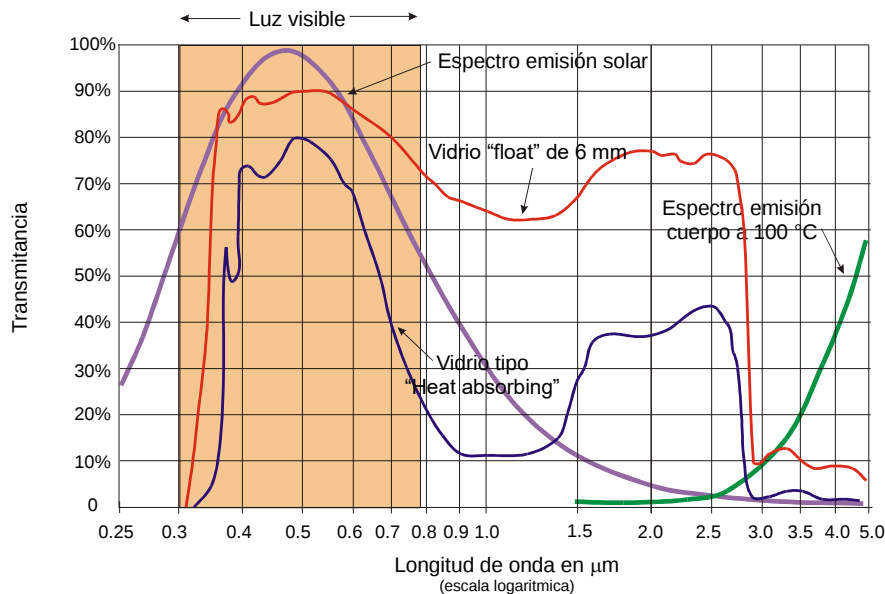


Fig. 1.7. Espectro de transmisión de un vidrio de 6 mm de espesor. Se ha superpuesto el espectro solar y el de emisión de un cuerpo negro a 373 K (100 °C). En ambos casos se los ha normalizado dividiéndolos por $E_{\lambda \max}$.

En el dispositivo que se muestra en la Figura 1.8. la radiación solar atraviesa el vidrio incidiendo sobre la superficie absorbente (por ejemplo una chapa pintada de negro). Esta se calienta y emite radiación infrarroja, cuya longitud de onda se encuentra en la zona de valores superiores a los 5 micrones y para las cuales el vidrio es opaco, reflejándose una parte y absorbiéndose otra.

La porción absorbida por el vidrio es reemitida en todas direcciones; la mitad emitida hacia arriba se pierde rumbo al exterior, y la mitad emitida hacia abajo es absorbida nuevamente por la superficie negra.

Al quedar la radiación infrarroja "atrapada" por efecto del vidrio, la temperatura del absorbedor se va elevando hasta que se equilibra la energía que entrega la radiación solar con las pérdidas que se producen hacia el medio exterior (cabe recordar que a medida que la temperatura de la superficie absorbente se eleva la longitud de onda de la radiación infrarroja que emite se acerca a los valores donde el vidrio es transmisor).

Por otro lado una superficie caliente expuesta al aire pierde energía tanto por conducción térmica (entre las partículas de aire) como por convección (el aire que está en contacto con ella se calienta y asciende, descendiendo el aire frío e iniciándose nuevamente el ciclo). La cubierta de vidrio del dispositivo impide la libre circulación del aire ambiente de modo que quedan sólo las pérdidas por convección interna (producidas por diferencia de temperatura entre la superficie caliente y el vidrio) y las pérdidas por conducción. Es posible reducir unas y otras originando un vacío entre ambas capas.

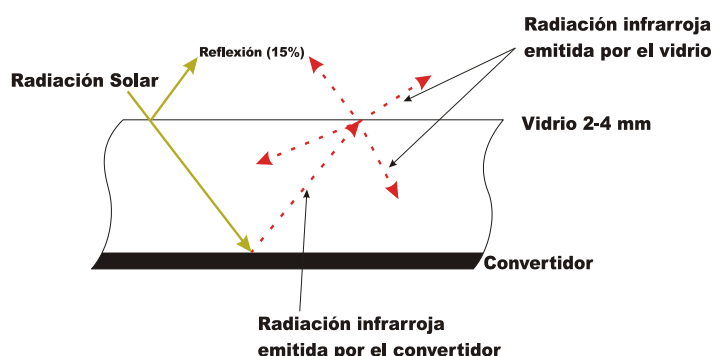


Fig. 1.8. Principio de funcionamiento del efecto invernadero.

Para incrementar el efecto invernadero se puede colocar una segunda cobertura transparente con lo cual las pérdidas radiativas y convectivas se reducen en un 40%. No es práctico usar más de dos cubiertas ya que cada una de ellas reduce alrededor del 15% la radiación incidente.

1.2.2. Superficies selectivas

Existe otro tipo de efecto que permite la absorción de la radiación solar y limita la emisión de radiación infrarroja a semejanza del efecto invernadero pero a partir de principios diferentes. Se produce mediante la utilización de superficies cuyas propiedades de absorción y emisión son selectivas en longitud de onda. Estas tienen un elevado coeficiente de absorción (o su equivalente de emisión) para las longitudes de onda del espectro visible y el infrarrojo cercano, pero poseen un coeficiente de emisión muy bajo para longitudes de onda del infrarrojo lejano ($\lambda > 3 \mu$).

En la Figura 1.9. se muestran el espectro solar (5.800 K) y el de un cuerpo a 700 K y la emitancia en función de la longitud de onda.

Existen compuestos que poseen características selectivas naturales como metales, óxidos, sulfuros o carburos. El metal intrínsecamente selectivo más conocido es el tungsteno puro. Entre los óxidos se pueden citar el MoO_3 dopado con Mo, el sulfuro de cobre (Cu_2S) y de plomo (PbS).

Se pueden formar por superposición de semiconductores absorbentes sobre metal muy reflectivo. La película semiconductor a aplicar sobre el metal puede obtenerse a partir de un sulfuro como en el caso de Cu_2S , el que puede ser fácilmente formado sobre un sustrato de Cu.

Un conveniente texturado superficial puede generar distintos efectos en el rango visible y en el infrarrojo. Es posible generar superficies cuya textura produzca la absorción del espectro visible y la reflexión del infrarrojo. Los tipos de geometrías superficiales propuestas para lograr estos efectos pueden ser dendritas, cavidades o poros.

También se puede usar el efecto de interferencia utilizando capas de metales y dieléctricos. La superposición de un metal semitransparente y un dieléctrico en un metal logra el efecto de absorción de los rayos solares y, complementariamente, la reflexión de las otras frecuencias del espectro.

Se las utiliza combinadas con dispositivos con superficies absorbentes recubiertas para producir el efecto invernadero.

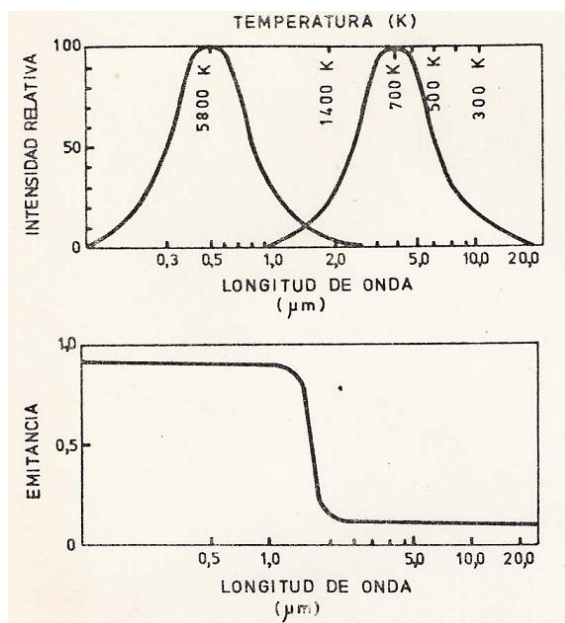


Fig. 1.9. Comportamiento de superficies selectivas. Alta absorbancia (alta emitancia) en el espectro de radiación solar y baja emitancia en el espectro de emisión térmica