

MASTER: ENERGÍAS RENOVABLES **EN INGENIERÍA QUÍMICA**

FUNDAMENTOS DE LA RADIACIÓN SOLAR

NORBERTO LÓPEZ GIL
Edificio D (Campus de Espinardo)
Universidad de Murcia
30100 MURCIA
Norberto@um.es
Tel.: 968367222

FUNDAMENTOS DE LA RADIACIÓN SOLAR

ÍNDICE

1. Radiometría.
2. La radiación solar.
3. Medida de la radiación solar.
4. Radiación solar que llega a una superficie plana e inclinada.
5. Bibliografía.

1. Radiometría: magnitudes radiométricas

La *Radiometría* tiene como fin la medida de la energía radiante en su emisión, propagación y recepción, desde un punto de vista puramente energético. Para ello se han establecido una serie de magnitudes que pasamos a exponer. En estas magnitudes suele aparecer el subíndice e que distingue de las magnitudes fotométricas que se tratarán en el siguiente apartado.

Nuestro punto de partida será la *energía radiante* (U_e) generada por una fuente, que se mide en julios (J) y se define como:

$$U_e \equiv \int_0^{\infty} U_\lambda d\lambda \quad (1)$$

donde U_λ es la energía emitida correspondiente a una λ determinada.

Supongamos la fuente que **emite** una cierta cantidad de energía por unidad de tiempo. A esa magnitud la denominamos *flujo o potencia radiante* (ϕ_e) y se define como:

$$\phi_e \equiv \frac{dU_e}{dt} \quad (2)$$

Este flujo se mide en vatios (W) y no hemos de confundirlo con la potencia eléctrica consumida que también tiene las mismas unidades (W=julio/segundo). Además, el flujo radiante se puede medir en la propagación, en la emisión o en la detección por lo que no siempre se hablará de flujo emisor propiamente dicho. El flujo puede depender de la longitud de onda y de la dirección hacia la que se emita. Cuando el flujo emisor se mide en todas direcciones se obtiene el denominado *flujo total* ($\phi_e T$). Cuando se mide para una determinada longitud de onda se llama *flujo espectral* ($\phi_e \lambda$).

El ángulo sólido subtendido por un cono de base A y altura d , se define como (figura 1):

$$\Omega \equiv \frac{\cos \theta' A'}{d^2} \quad (3)$$

siendo θ es el ángulo que forma la dirección del eje del cono (dirección de propagación de la luz considerada para cada caso) con el vector normal a la base de éste (N). La unidad de medida de ángulo sólido es el estereorradián (sr).

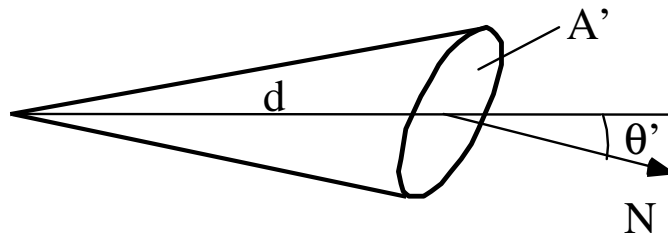


Figura 1. Definición de ángulo sólido.

El flujo **emitido** en una dirección para un determinado ángulo sólido se conoce como *intensidad radiante* (I_e):

$$I_e \equiv \frac{d\phi_e}{d\Omega} \tag{4}$$

que se mide en vatios/estereorradián (W/sr). Si la fuente emite uniformemente en todas las direcciones del espacio con un flujo ϕ_e , la intensidad radiante para toda la esfera será $\phi_e/4\pi$ w/sr.

En general, un punto en Física no tiene existencia sino como límite de una superficie o volumen. La intensidad radiante **emitida** por elemento de área dA , se denomina *radiancia* (L_e):

$$L_e \equiv \frac{d^2\phi_e}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta} = \frac{d^2\phi_e}{d\Omega \cdot dA_p} \tag{5}$$

siendo θ el ángulo que forma la normal al dA respecto a la dirección del ángulo sólido y dA_p la proyección del área sobre la normal a la dirección considerada (figura 2). La radiancia se mide en vatios/m² · sr.

Cada punto P (rodeado de un área elemental) de la fuente extensa podrá tener una radiancia diferente pudiendo ésta variar para las diferentes direcciones. L_e será en general función tanto del punto emisor como de la dirección considerada. Conocida la radiancia de un punto en una fuente extensa, el cálculo de la emitancia de dicha fuente en ese punto es la suma de los flujos emitidos por un área elemental dA (que rodea al punto) en todas las direcciones posibles. La radiancia desempeña un papel especial en Radiometría, porque es una magnitud que se conserva en la propagación a través de los medios ópticos generalmente considerados. El concepto de radiancia es también aplicable a un receptor de flujo o a una superficie a través de la cual pasa dicho flujo. Se tratará entonces no del flujo emitido, sino del flujo recibido que pasa por un área elemental dA' , en un ángulo sólido elemental $d\Omega'$ con vértice en dicha área.

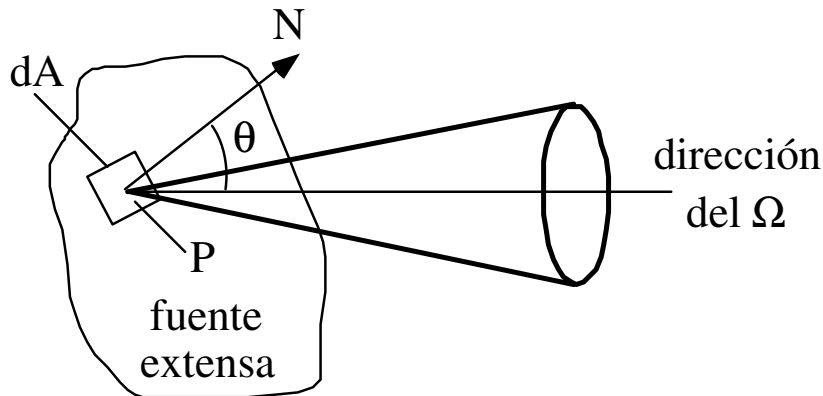


Figura 2. Emisión de una fuente extensa.

De igual forma que se han definido las magnitudes referidas al emisor, también se podrá hablar del flujo **recibido** por una unidad de superficie (pared, mesa, retina, detector) en todas las direcciones posibles. Esa magnitud es la denominada *irradiancia* (E_e) y que se define como el flujo por unidad de área receptora (que designaremos con "prima") y se mide en vatios/m².

$$E_e \equiv \frac{d\phi_e}{dA'} \tag{6}$$

Si por un cono de ángulo sólido Ω se propaga un flujo radiante ϕ_e procedente de una fuente puntual P, la intensidad correspondiente viene dada por la ecuación (6). Si este flujo incide sobre una superficie A' cuya normal forma un ángulo θ con la dirección de propagación (eje del cono) la irradiancia sobre A' será:

$$E = \frac{d\phi_e}{dA'} = I_e \frac{d\Omega}{dA'} = \frac{I}{dA'} \frac{dA' \cdot \cos\theta'}{d^2} \Rightarrow E = \frac{I \cdot \cos\theta'}{d^2} \quad (7)$$

Esta ecuación se conoce como *ley del inverso del cuadrado de la distancia* y se puede relacionar directamente con la ecuación (2). De ella se puede deducir:

1. La irradiancia que sobre un elemento de superficie produce el flujo procedente de una fuente puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y la superficie receptora.
2. La irradiancia es directamente proporcional al coseno del ángulo formado por la dirección de propagación de la luz y la superficie receptora.

2. La radiación solar

El Sol es una estrella, formada casi toda por hidrógeno y un poco de helio, en la que se generan continuamente reacciones termo-nucleares de fusión debido a las altas temperaturas y presiones que se alcanzan en su interior (densidad= $1 \times 10^5 \text{ Kg/m}^3$ y temperatura de 8 a 40 millones de grados Kelvin). Su radio es de 695.000 km, con una masa de $2 \times 10^{30} \text{ Kg}$. Está situado a una distancia media de $1,495 \times 10^8 \text{ km}$ de la Tierra. Por tanto desde la Tierra se ve el diámetro aparente de Sol bajo un ángulo de $0,53^\circ$ (este dato será utilizado para determinados cálculos de sistemas concentradores). La fotosfera tiene una temperatura de unos 6000 K, aunque debido a la falta de transparencia de la cromosfera y la corona,, el sol no se comporta como un perfecto cuerpo negro. Sin embargo, a efectos prácticos, se considera que el espectro de emisión del sol se asemeja bastante a la radiación un cuerpo negro a 5900 K.

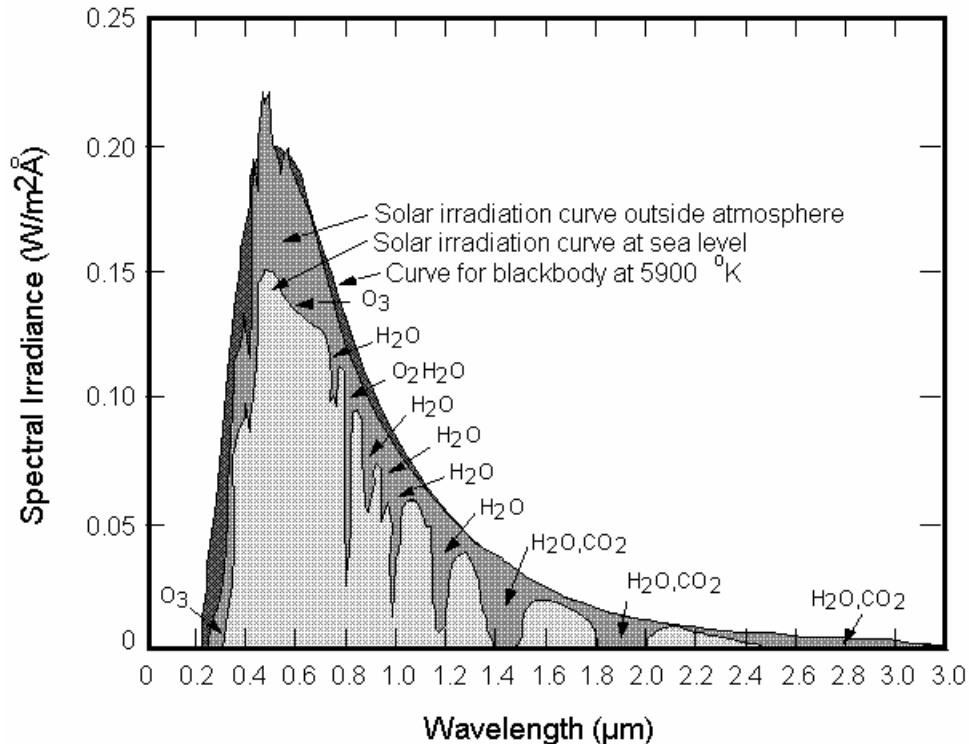


Figura 3. Distribución espectral de la radiación solar fuera de la atmósfera y a nivel del mar. Se muestra también la distribución de un cuerpo negro a 5900 K.

Como muestra la figura 3 existe un máximo para longitudes de onda en torno a los 460nm y que en el intervalo de 0 a 1.1mm, la irradiación integrada representa aproximadamente el 75% del total.

Por otro lado, el diámetro angular de la Tierra vista desde el Sol es de aproximadamente 1/11.000 de [radián](#), así que el ángulo sólido de la Tierra desde el Sol es de 1/140.000 [esterorradianes](#). Eso implica que la Tierra intercepta sólo una parte entre 2.000 millones de la radiación que el Sol emite (aproximadamente $3,86 \times 10^{26}$ vatios).

La constante solar viene representada por la [integral](#) de la curva de la figura 1 y representa la cantidad de energía recibida en forma de [radiación solar](#) por unidad de superficie (irradiancia solar), medida en la parte externa de la [atmósfera](#) en un plano perpendicular a los rayos. Los resultados de su medición por satélites indican un valor de 1366 [vatios](#) por metro cuadrado. (A veces se suele tomar la constante solar como 1370 W/m^2). Así que, para la [Tierra](#) en su conjunto, dada su sección transversal de 127,4 millones de kilómetros cuadrados, la energía es del orden de $1,740 \times 10^{17} \text{ W}$. Como se ha comentado anteriormente en realidad la «constante solar» no es propiamente una [constante](#), pero sí un parámetro que a corto y medio plazo varía dentro de márgenes estrechos debido a que:

1.- La aleatoriedad de la radiación solar, que hace imposible determinar dicha radiación de una forma definitiva o exacta. La radiación emitida por el Sol no es exactamente constante, sino que sufre de fluctuaciones caóticas de muy pequeña amplitud y de oscilaciones periódicas descritas como [ciclos de actividad](#), así como de variaciones tendenciales por las cuales el brillo del Sol ha ido creciendo lentamente a lo largo de su historia. Las variaciones periódicas parecen consistir en varias [oscilaciones](#) de período (duración) diferente, de las que la más conocida es la de 11 años que se manifiesta como ciclo de variación de la abundancia de [manchas solares](#) en la [fotosfera](#). Los ciclos recientes muestran una variación del brillo solar dentro de los límites de un 0,1%; sin embargo desde el [mínimo de Maunder](#), una época sin manchas entre 1650 y 1700, la radiación solar podría haber crecido hasta en un 0,6%.

2.- La excentricidad de la tierra, o de la variación de la distancia Tierra-Sol debido a la órbita elíptica de la Tierra. Ésta no afecta en sí a la energía media recibida a largo plazo, pero sí a las variaciones estacionales. La pequeña excentricidad de la elíptica (0.01673) hace que la distancia entre el Sol y la Tierra varíe de acuerdo con la ecuación que mostramos a continuación:

$$\xi_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1.0001110 + \\ + 0.0034221 \cdot \cos \Gamma + \\ + 0.001280 \cdot \text{sen} \Gamma + \\ + 0.000719 \cdot \cos 2\Gamma + \\ + 0.000077 \cdot \text{sen} 2\Gamma$$

donde:

$$\Gamma = 2\pi \cdot \frac{(dn - 1)}{365}$$

donde dn representa el día del año (no bisiesto) comenzando a contar desde el 1 de enero.

La expresión anterior tiene en cuenta el hecho de que la velocidad angular de la Tierra en su camino sobre la elíptica es variable y se ajusta a la conocida ley de Kepler, según la cual, los planetas barren áreas iguales en tiempos iguales. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones de la ingeniería, la aproximación de considerar que la Tierra gira alrededor del Sol con velocidad angular constante es muy cómoda y conduce a una exactitud suficiente.

$$\xi_0 = 1 + 0.33 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot dn}{365}\right)$$

3. Medida de la radiación solar.

La medida de la radiación solar se puede hacer de muchas formas. En general una buena medida debe tener en cuenta la radiación difusa y si es posible la del albedo. Para ello se utilizan diferentes aparatos de medida.

a) Piranómetro (también llamado solarímetro): Es un medidor de radiación total (directa, difusa y de albedo). Se trata de un sistema de medición muy utilizado que se basa en la idea siguiente: se expone a la radiación solar una lámina metálica con una superficie reflectante y junto a ella otra cuya superficie es absorbente; la lámina absorbente estará mas caliente que la reflectante y, admitiendo que la diferencia de temperaturas es proporcional a la radiación recibida, midiendo este salto térmico sabremos la radiación. Para medir esta diferencia de temperaturas se utiliza un termopar.



Figura 4. Piranómetro.

El piranómetro consta de un sensor análogo al descrito más arriba y colocado bajo una cubierta semiesférica, normalmente de cristal de cuarzo, que debe ser transparente para cualquier longitud de onda. Si el piranómetro se instala sobre la superficie considerada, su lectura nos proporciona la radiación total incidente. Si se sitúa sobre una superficie horizontal y se tiene la precaución de eliminar las reflexiones del entorno, medirá la radiación global. Si se cubre con un pequeño disco opaco de tal manera que elimine la radiación directa, medirá solamente la radiación difusa. Algunas casas comerciales suministran equipos formados por dos piranómetros, acoplados de tal manera que uno está orientado hacia arriba, en dirección al Sol, y el otro, en sentido opuesto. El orientado hacia arriba mide la radiación total, el orientado hacia abajo, el albedo y la diferencia entre ambos, la radiación global. Este tipo de piranómetro, basado en la medición por diferencia de temperatura y termopar, se conoce como piranómetro tipo Eply o Moll-Goroczynski. En el mercado existen otros tipos, unos basados en la dilatación diferencial de una lámina bimetálica y otros basados en la señal proporcionada por una célula fotoeléctrica expuesta a la luz.

b) Pirheliómetro (también llamado actinómetro): Es un instrumento destinado a medir solamente la radiación solar directa; en esencia es un piranómetro que se ha situado en el fondo de un tubo. Este tubo está recubierto interiormente con una pintura absorbente, a fin de reducir al mínimo cualquier reflexión, y es lo suficientemente estrecho y largo como para que, desde el fondo, se vea el Sol y la menor porción posible de cielo. Un instrumento de este tipo sólo proporciona medidas correctas cuando está enfocado directamente al Sol, en consecuencia, cuando se desea disponer de una lectura continua a lo largo del día, el equipo consta del instrumento medidor más un sistema de seguimiento del Sol.

c) Heliógrafo

Este instrumento se utiliza para medir la insolación, que es el número de horas de sol brillante que se producen a lo largo del día.



Figura 5. Heliógrafo.

Existen distintos modelos, pero el más utilizado es el de Campbell-Stockes o de bola que, en esencia (véase fig. 5), consiste en una bola de cristal transparente interpuesta entre el Sol y una banda semicircular de papel sensible a la luz. La bola esférica concentra la luz sobre la banda de papel y deja una marca, cuya intensidad, es cualitativamente proporcional a la intensidad de la radiación solar. Esta marca se mueve sobre el papel a medida que el Sol recorre su camino de Este a Oeste; cuando el Sol se oculta tras las nubes, la intensidad de la radiación que llega al papel es débil y no deja señal alguna. Sobre estas tiras de papel se marcan las horas, y midiendo la longitud de la huella dejada por el Sol se calcula la insolación.

Nota: Normalmente se acepta como insolación aquel tiempo durante el cual la irradiancia solar directa es igualo mayor que 100 W/m².

4. Radiación solar que llega a una superficie plana e inclinada.

Se da en formato Windows Journal.

4. BIBLIOGRAFÍA

1. <http://solar.ujaen.es/cursolar.HTM>.
2. Casanova Colás, J. “Curso de Energía Solar”, SP-UV, 1993.
3. Energía Solar. Lluís Jutglar. 2004.
4. Energías para el desarrollo. José María de Juana (coordinador). 2003
5. Óptica Geométrica. Norberto López Gil y Juan Manuel Bueno. Editorial Diego Marín 2002.