

# 2. El Sol y su Radiación

*Petros Axaopoulos TEI de Atenas Grecia*

## Resultados del aprendizaje

Después de estudiar este capítulo, los lectores podrán comprender:

- La estructura básica del sol
- La distribución espectral de la radiación extraterrestre y a nivel del mar
- Los principales factores que afectan la radiación solar durante su paso por la atmósfera terrestre
- Las definiciones de masa de aire y de la constante solar
- La distinción entre extraterrestre, haz y radiación solar difusa
- El funcionamiento de dispositivos para la medición de radiación solar y la duración de la sol

El propósito de este capítulo es introducir las características básicas del sol y su radiación, la radiación solar fuera de la atmósfera y su influencia en la atmósfera terrestre. Por otra parte, que se definen los componentes de la radiación solar alcanza la superficie de la tierra y la noción de masa de aire. Puesto que todas las aplicaciones de energía solar requieren datos de radiación solar, los instrumentos para la medición de la radiación solar también se están discutiendo.

### 2.1 El Sol

El sol es una gran esfera de materia gaseosa muy caliente con un diámetro de  $1.39 \times 10^6$  km, masa de  $2 \times 10^{30}$  kg y una distancia media de  $150 \times 10^6$  km de la tierra. Una comparación a la tierra, que tiene un diámetro de 12700 km y una masa de  $6 \times 10^{24}$  kg, puede verse en la figura 2.1.

El sol se compone de 74% hidrógeno ( $H_2$ ), 25% helio ( $He$ ) y el resto 1% es una mezcla de más de 100 elementos químicos. Gira sobre su propio eje de oeste a este y su período de rotación depende de la latitud solar. Visto desde la tierra, la región ecuatorial gira dentro de un período de cerca de 27 días, mientras que el período de rotación más cerca a los polos es de unos 32 días.

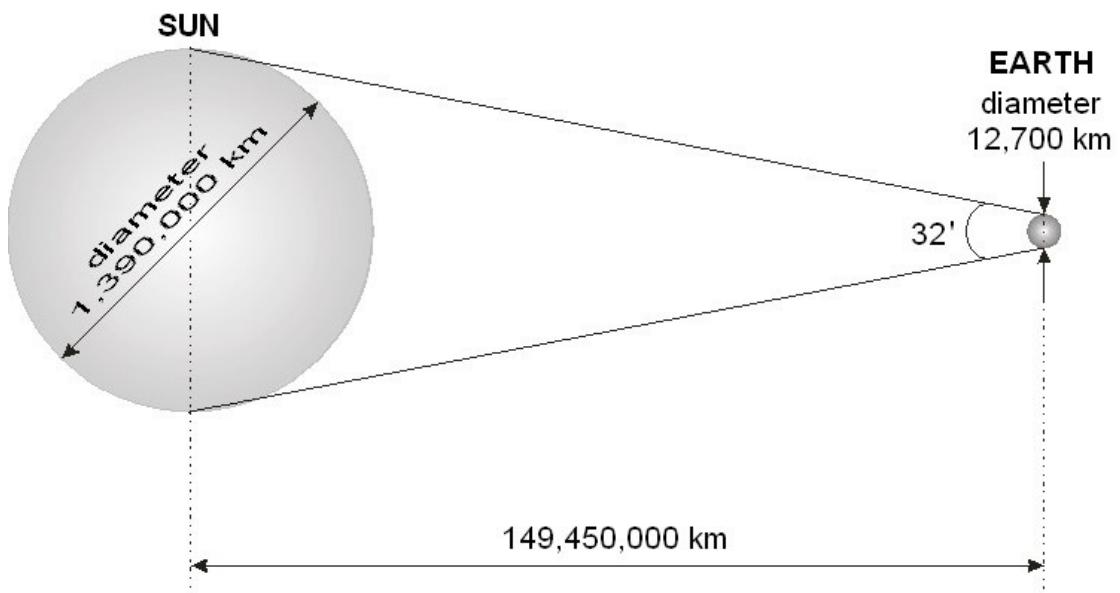


Figura 2.1 geometría de sol a la tierra

La temperatura cerca del centro del sol se estima ser muy alta, del orden de  $15 \times 10^6$  K. En este régimen de temperatura, la energía se genera por las reacciones de fusión termonuclear, donde se convierte hidrógeno en helio. Este proceso libera energía inmensa dentro de la base, que es transferida hacia el exterior por irradiación y convección procesos y, posteriormente, irradiada al espacio. La mayor parte de la salida de energía del sol es en forma de radiación electromagnética centrada cerca de la porción visible del espectro. El tiempo necesario para que la radiación viajar la distancia Sol-Tierra es aproximadamente 8 minutos.

El interior del sol se compone de la base, la capa radiactiva y la conectiva. Fig. 2.2 muestra una representación esquemática de la estructura del sol. La capa radiactiva circundante une a la energía producida en el núcleo. Esta capa tiene un efecto aislante que ayuda a la base para mantener la temperatura alta. Fuera de esta capa se inicia el proceso conectivo y la capa se denomina capa conectiva. En esta capa la temperatura es menor, y la radiación es menos significativa, con la energía transportada hacia el exterior principalmente por convección. Debido a la muy alta densidad del núcleo, la energía producida en el núcleo puede tardar tanto como 50 millones de años para llegar a la capa de irradiación, lo que significa que incluso si los procesos en el núcleo del sol repentinamente dejan su superficie seguirá brillando durante millones de años.

La parte externa del sol consiste en tres capas: la fotosfera, la cromosfera y la corona. La fotosfera es la más estable de los tres y una de las más frías capas del sol, con una temperatura de unos 6000 K. Es la parte del sol visible a simple vista como un disco brillante. Este disco no es uniformemente brillante porque la luz del borde proviene de capas superiores y más frías que del centro. Por encima de la fotosfera es una capa gaseosa denominada cromosfera, con temperatura más alta que la de la fotosfera y la de menor

densidad. Por último, la capa de la corona contiene gases altamente ionizados de muy baja densidad y una temperatura muy alta de  $10^6$  K. La corona es una importante fuente de rayos x que penetran la atmósfera terrestre. La cromosfera y la corona son la variante con más tiempo que la fotosfera. Para obtener más información sobre la estructura del sol son proporcionados por [1].

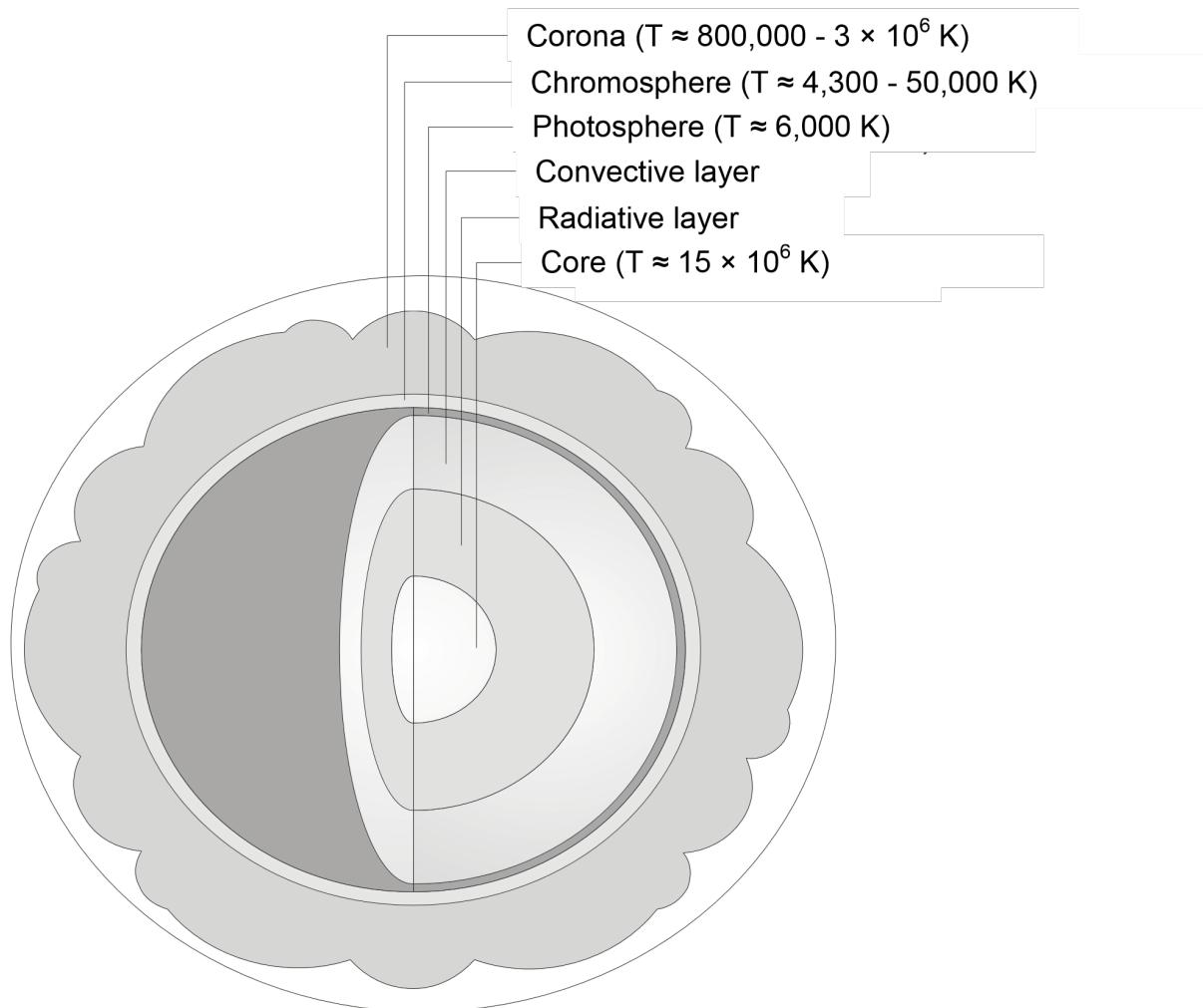


Figura 2.2 estructura del sol con tres capas diferentes

El porcentaje de radiación solar recibida en el límite superior de la atmósfera terrestre, conocida como radiación extraterrestre y la radiación de cuerpo negro 5760 k, en el ultravioleta, visible e infrarroja de región, se muestran en el cuadro 2.1. Esta tabla muestra claramente que la desviación entre la distribuciónpectral de la radiación solar extraterrestre y la radiación de cuerpo negro es inferior al 3%. Así, para problemas de ingeniería en aplicaciones de energía solar, la radiación extraterrestre puede considerarse aproximadamente equivalente a la de un cuerpo negro a una temperatura de K. 5760

Tabla 2.1 porcentaje de radiación solar extraterrestre y la radiación del cuerpo negro.  $\Lambda$  es la longitud de onda de la radiación.

Región espectral	Porcentaje de extraterrestres radiación solar	Porcentaje de cuerpo negro radiación
	%	%
ULTRAVIOLETA $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$	7	9.9
Visible $0,38 < < 0,78 \mu\text{m} \lambda$	47.3	46.4
Infrarrojos $0,78 < \lambda < 15 \mu\text{m}$	45.1	43.6

La tasa de emisión de energía del sol ( $P$ ), puede obtenerse en la siguiente ecuación de Stefan-Boltzmann, suponiendo que el diámetro del sol como  $d = 1,39 \times 10^6 \text{ km}$  y su temperatura efectiva  $k T = 5760$ .

$$P = \pi d^2 \sigma T^4 = 3.8 \times 10^{23} \text{ kW} \quad (2.1)$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann con un valor de  $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .

De esta cantidad, la superficie de la tierra recibe alrededor de  $1,7 \times 10^{14} \text{ kW}$ , lo que significa que en menos de una hora suficiente energía llega a la tierra para satisfacer la demanda energética total de la población humana durante todo un año. La distribución media de esta enorme cantidad se muestra en la figura 2.3., 23% de la radiación se refleja y se dispersa, principalmente por las nubes, 8% se refleja por la superficie de la tierra, 47% es convertido en calor de baja temperatura y en el espacio, y sobre 20% da energía al ciclo de la evaporación y la precipitación de la Biosfera; menos de un por ciento se transforma en la energía cinética del viento y las olas y almacenamiento fotosintético en las plantas verdes.

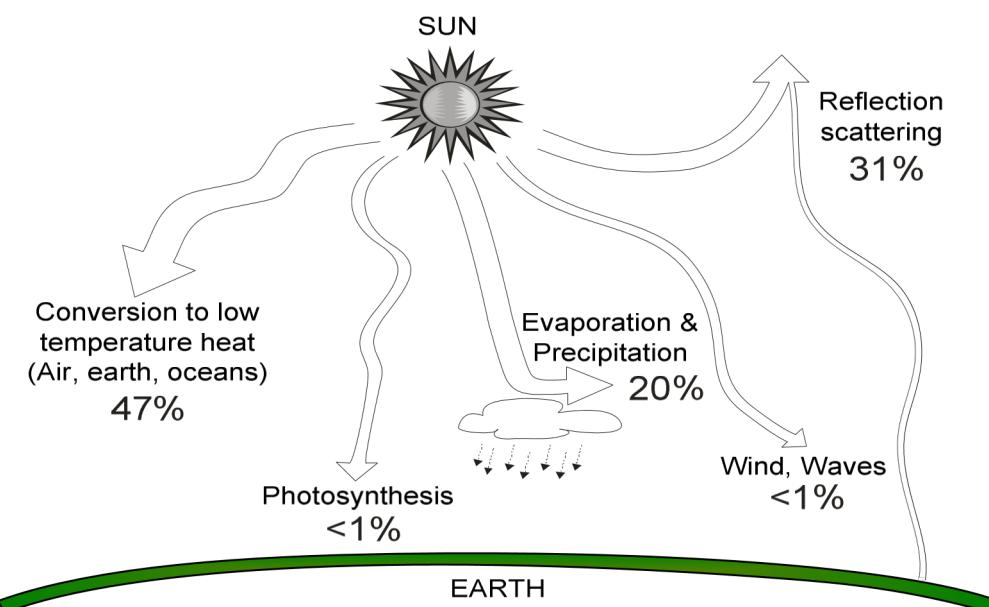


Figura 2.3 distribución promedio de la irradiación solar en la tierra.

## 2.2 Radiación Solar Extraterrestre y Efectos Atmosféricos

La radiación solar recibida en el límite superior de la atmósfera terrestre se llama radiación solar extraterrestre. La distribuciónpectral de la radiación solar extraterrestre sigue aproximadamente la distribución de un cuerpo negro a una temperatura de K 5760, mientras que los valores del espectro de radiación solar a nivel del mar son siempre más bajos, debido a la influencia de la atmósfera terrestre (Figura 2.4).

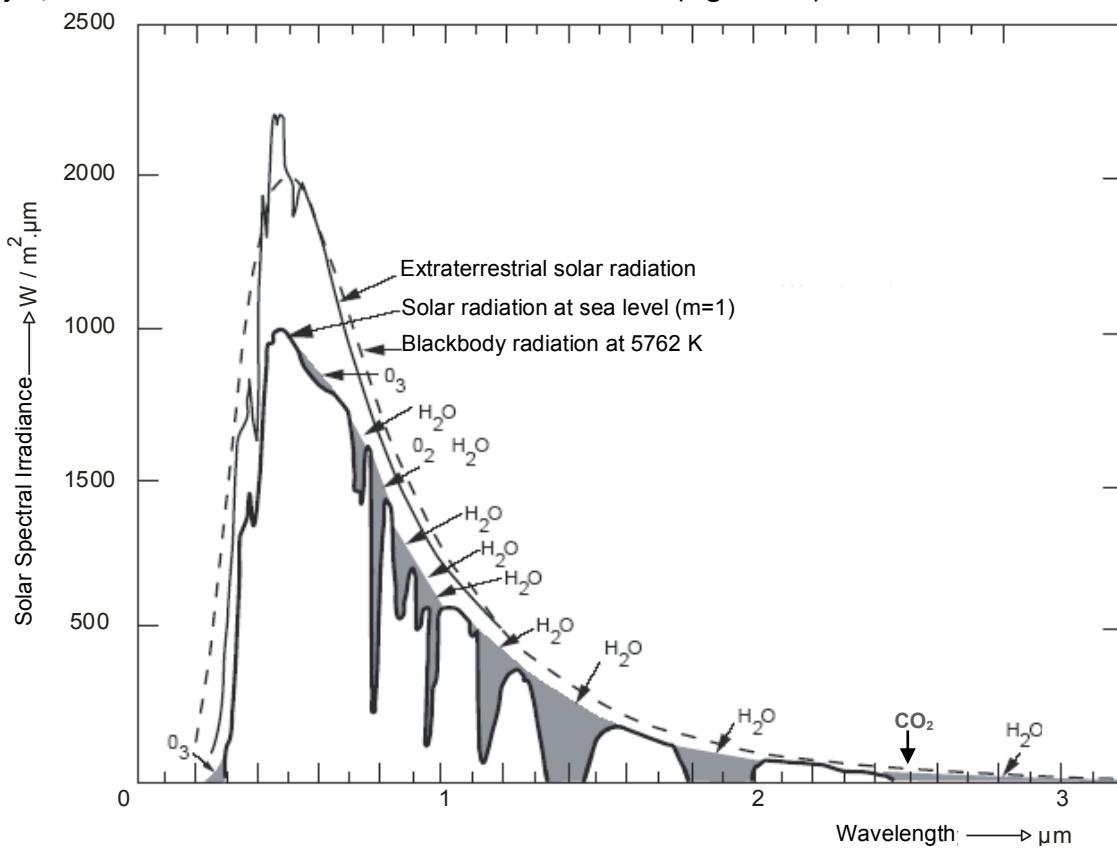


Figura 2.4 la distribución espectral de la radiación extraterrestre y a nivel del mar, en comparación con la radiación de cuerpo negro.

Radiación solar extraterrestre es disponible en todas las regiones de la tierra, pero sólo una fracción de esta radiación llega a la tierra. Esta fracción puede variar dependiendo de las condiciones climáticas y puede ser tan alta como 85% en un día claro a tan bajo como 5% en un día muy nublado.

La reducción de la radiación solar durante su paso por la atmósfera terrestre está influida por los siguientes componentes:

### **Absorción** por constituyentes atmosféricos

**Dispersión** las moléculas de aire y partículas de aerosol. Estas partículas de aerosoles se originan de un número de diversas fuentes. Consisten principalmente de partículas de polvo de las gotitas de agua y tierra o cristales de hielo de las nubes finas. Además, puede haber humo o vapores, contaminantes fotoquímicos, gotitas de ácido sulfúrico o cualquiera de una variedad de sólidos, líquido o materiales heterogéneos que son lo suficientemente pequeños como para ser aerotransportada. Los efectos anteriores se realizan simultáneamente, son muy complejos y dependen en gran medida de la composición de la atmósfera, la longitud de onda de la radiación solar y su longitud de la ruta a través de la atmósfera antes de llegar a la superficie de la tierra.

### **Reflexión** por las nubes que es independiente de la longitud de onda.

La absorción de la radiación solar por las moléculas de gases en la atmósfera ocurre selectivamente. Ozono ( $O_3$ ), oxígeno ( $O_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y vapor de agua ( $H_2O$ ) absorben la radiación solar de cierta longitud de onda y causan las bandas características de absorción del espectro solar a nivel del mar. En la figura 2.4, el área sombreada indica las varias bandas de absorción. La forma y anchura de estas bandas dependen de la temperatura y la presión del gas.

Absorción de ozono de la radiación solar en la región ultravioleta es muy alta, entre 0.2 y 0.29  $\mu\text{m}$ , mientras que la absorción es insignificante en 0.35  $\mu\text{m}$ . Otra banda de absorción se extiende desde acerca de 0.44 a 0,7  $\mu\text{m}$ .

Oxígeno tiene una banda de absorción de radiación solar estrecho de 0.762 a 0.69  $\mu\text{m}$ .

Absorción de dióxido de carbono es alta en longitudes de onda mayores que 2,2  $\mu\text{m}$ , mientras que hay una absorción selectiva en el 0.7-gama de longitud de onda de 2,2  $\mu\text{m}$ .

Absorción de vapor de agua es alta en longitudes de onda mayores que 2,3  $\mu\text{m}$ , mientras que hay varias bandas de absorción en el 0.7-2.3  $\mu\text{m}$  Rango de longitud de onda.

Más allá de 2,5  $\mu\text{m}$  la radiación solar alcanza la tierra es muy poco debido a la alta absorción de dióxido de carbono, junto con la radiación extraterrestre baja (fig. 2.4). Para longitudes de onda menores a 0,3  $\mu\text{m}$ , la radiación solar alcanza la tierra es insignificante desde el punto de vista energético, debido a la alta absorción por el ozono y por lo tanto no puede desempeñar cualquier función en aplicaciones terrestres como la utilización de la energía solar. Para aplicaciones de energía solar terrestres relacionados con problemas ingeniería sólo las radiación longitudes de onda desde 0,3 a 2,5  $\mu\text{m}$  se pueden considerar interesantes.

El segundo factor que afecta a la reducción de la radiación solar durante su paso por la atmósfera terrestre es la dispersión de las moléculas de aire y partículas de aerosol. La radiación dispersa se distribuye en todas las direcciones sin cambiar su longitud de onda. De la radiación dispersada se dispersa en el espacio y algo de él alcanza la superficie terrestre. Longitudes más cortas de la dispersión de las moléculas de aire ligeramente y más longitudes de onda fuertemente. También dispersan más la luz azul y ésta es la razón que el cielo parece azul. Se proporciona más información sobre la atenuación atmosférica de la radiación solar en [2-5].

El grado de absorción y dispersión de la radiación por la atmósfera dependen de la longitud de la trayectoria de los rayos solares y su composición. En general, más radiación solar está presente durante el mediodía de la mañana o la tarde. Al mediodía, el sol esté alto en el cielo y se acorta la trayectoria de los rayos del sol a través de la atmósfera terrestre. En consecuencia, menos radiación solar se dispersa o es absorbida y más radiación solar alcanza la superficie terrestre. Para tener en cuenta el efecto de la inclinación en la longitud del camino a través de la atmósfera, una cantidad adimensional  $m$ , llamado la masa de aire, se define como el cociente de la masa de la atmósfera en la ruta del sol de la tierra real de la viga a la masa de la atmósfera que existiría si el sol estuviera directamente arriba nivel del mar. Por lo tanto,  $m = 1$  corresponde al caso cuando el sol está directamente arriba y  $m = 0$  en la parte superior de la atmósfera ya que no existen gases o aerosoles en el espacio entre el sol y la parte superior de la atmósfera terrestre. Para los usos más prácticos un modelo de tierra plana aproxima a la masa de aire  $m$ . En este caso, la curvatura de la tierra y la refracción no se toman en cuenta así como las líneas del triángulo ABC, se puede considerar como líneas rectas (Figura 2.5). Por lo tanto, el triángulo ABC es un triángulo rectángulo y la tasa de masas es igual a la tasa de caminos  $(AB)/(BC)$ .

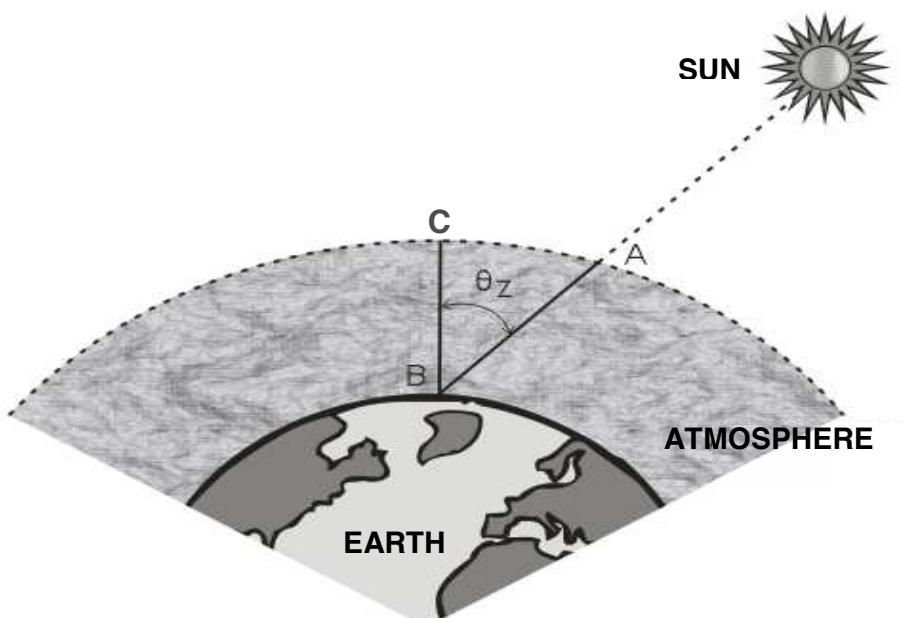


Figura 2.5 longitud de trayectoria atmosférica para la determinación de la masa de aire

En consecuencia, la masa de aire para el ángulo cenital solar de más de unos  $10^\circ$ , se relaciona con el zenith solar ángulo  $\theta_z$ , por la siguiente relación simple:

$$m = \frac{(AB)}{(BC)} \cong \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.2)$$

Discusiones más detalladas de la masa de aire se encuentran en [6], [7] y [1].

## 2.3 componentes de la radiación solar

La radiación dispersa alcanza la superficie terrestre proveniente de todas partes del cielo, aparte del sol directo, se llama **radiación difusa**. Debe ser distinguido claramente de la radiación térmica atmosférica que, si bien también es difuso en la naturaleza, consiste en mucho más de largo longitudes de onda.

La magnitud de la radiación difusa del cielo depende de altitud solar, la cantidad y tipo de nubes y aerosoles. También está influenciada por la fracción de la radiación solar que es reflejada desde el suelo, ya que la radiación reflejada de la superficie de la tierra se dispersa detrás de la atmósfera hasta cierto punto. El componente difuso de la radiación solar es una fracción significativa de la radiación solar total que alcanza la superficie terrestre, y esta radiación difusa anisótropa se distribuye a través del cielo.

En un día nublado, casi toda la radiación solar en la tierra es difusa, y en un día claro, cerca de 15-20% de la radiación solar total llegar al suelo es difuso.

La radiación que llega a la superficie terrestre directamente del disco del sol se denomina **radiación del haz** (Fig. 2.6).

La magnitud de la radiación del haz depende de la atenuación por la atmósfera debido a la dispersión y absorción. En un día claro, cerca de 80% de la radiación que llega a la tierra es del haz. Estas distinciones son importantes para las aplicaciones de energía solar, porque los colectores solares de concentración sólo pueden utilizar la radiación solar del haz, mientras la placa de colectores solares planos pueden utilizar la radiación solar total.

Las nubes absorben muy poca radiación solar, lo que explica por qué no se evaporan en la luz del sol. El efecto de las nubes sobre la radiación solar es principalmente dispersión y reflexión. También contaminación atmosférica urbana, humo de incendios forestales y aerotransportado de ceniza resultante de la actividad volcánica reduce la radiación solar, aumentando la dispersión y la absorción de la radiación solar. Esto tiene un impacto más grande en radioterapia que en la radiación solar total.

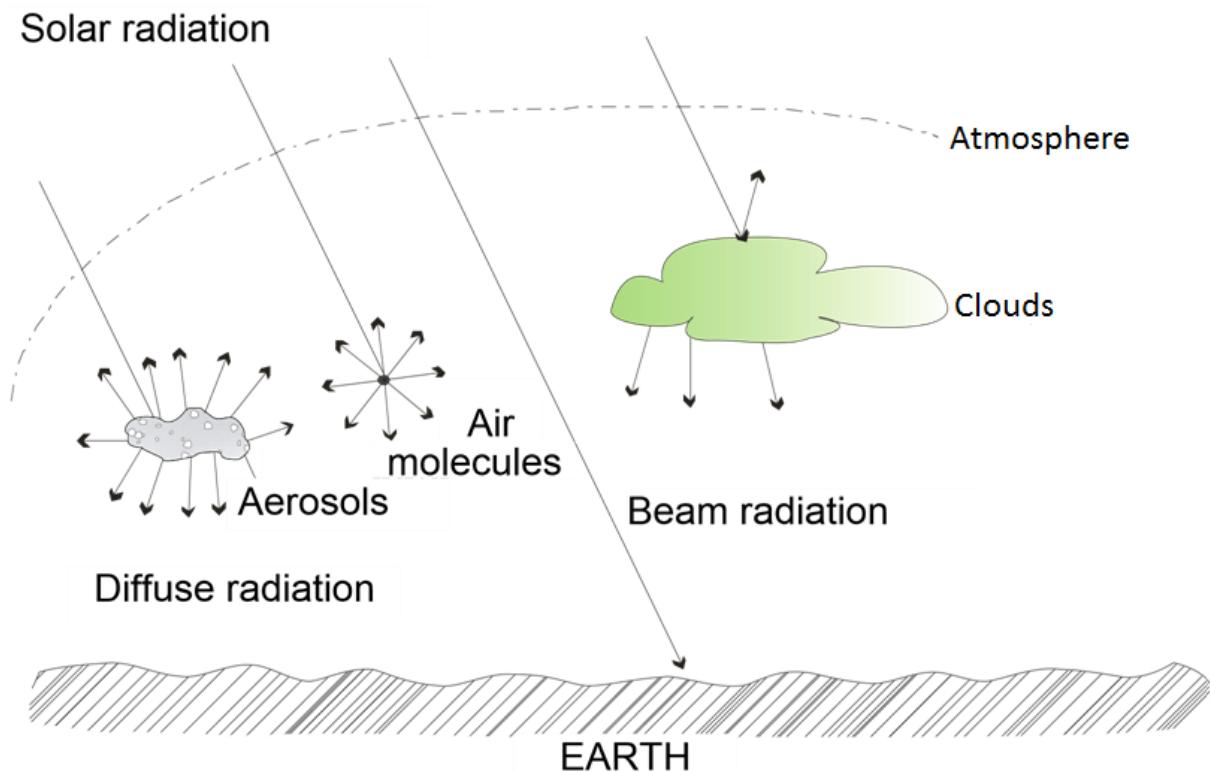


Figura 2.6 efectos atmosféricos sobre la radiación solar

La palabra radiación se utiliza generalmente para la energía del sol, y una distinción entre potencia y energía se requiere, se utilizan los términos de irradiación o irradiación. La irradiación es una medida de la proporción de la energía solar recibida por unidad de área y tiene unidades de vatios por metro cuadrado ( $\text{W/m}^2$ ), donde 1 vatio (W) es igual a 1 Joule (J) por segundo. La irradiación integrada con respecto al tiempo durante un intervalo de tiempo especificado. Por lo tanto, la irradiación es una medida de la energía solar recibida por metro cuadrado durante un período de una hora. Por ejemplo: una irradiación promedio de  $500 \text{ W/m}^2$  durante 1 hora produce una irradiación de  $500 \text{ Wh/m}^2$  o  $1800 \text{ KJ/m}^2$ .

Los símbolos utilizados generalmente para la radiación solar son las siguientes: G se utiliza para valores instantáneos, que se utiliza para valores por hora y H se usa para valores diarios, semanales, mensuales y anuales. Estos símbolos se utilizan a veces junto con subíndices b para radioterapia, d para la radiación difusa, o de radiación por encima de la atmósfera terrestre, T de la radiación sobre un plano inclinado y n para la radiación sobre un plano normal a la dirección de propagación.

La suma del haz  $G_b$  y la radiación difusa  $G_d$  desde el cielo, sobre una superficie horizontal se denomina **radiación solar total**, (G) y se puede escribir como:

$$G = G_b + G_d \quad (2.3)$$

La radiación solar total a menudo se denomina radiación solar global. Figura 2.7 muestra la irradiación solar total medida en una superficie horizontal para un claro y un día nublado en noviembre en Atenas ( $37^{\circ} 58' N$ ). La irradiación solar total llega a la tierra, en este día totalmente nublado sólo es difusa.

Cabe señalar que, en Europa central, aproximadamente el 50% de la irradiación solar total anual es difusa.

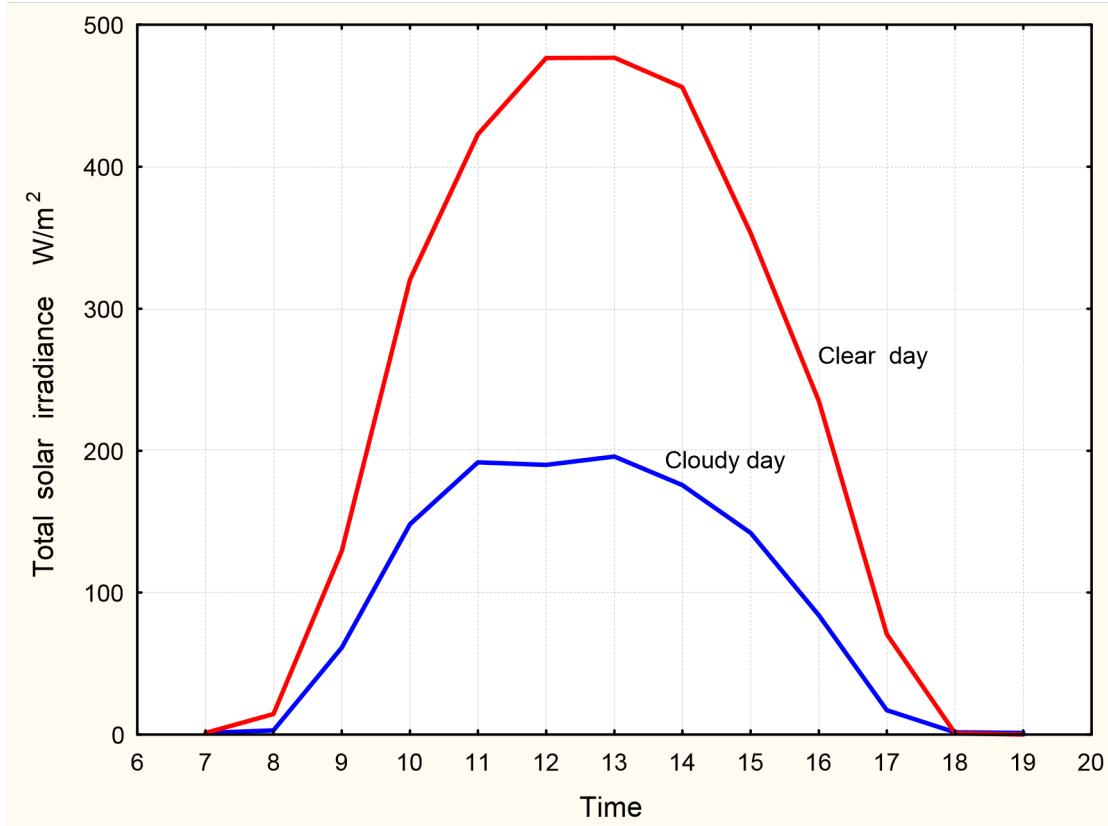


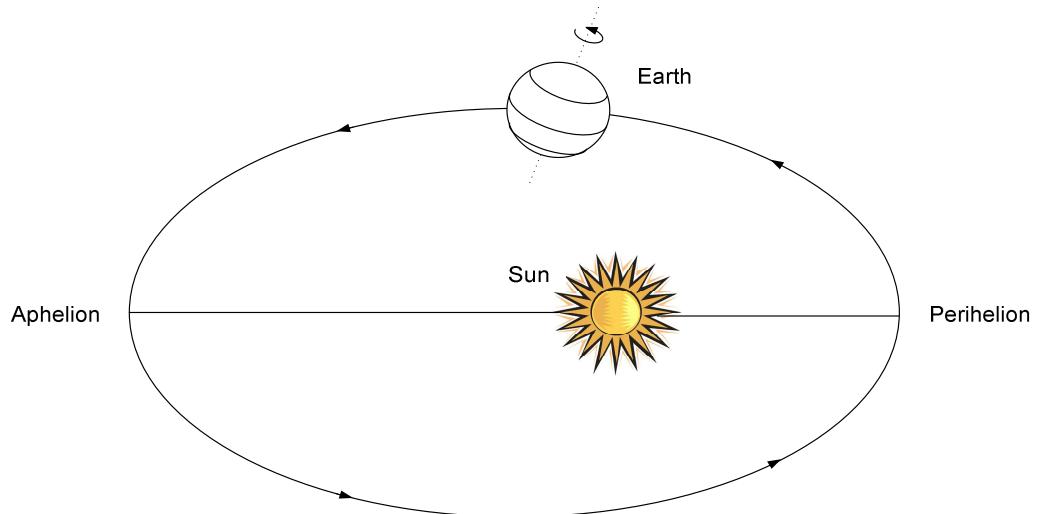
Figura 2.7 irradiación solar Total medida en una superficie horizontal para un claro y un día nublado en noviembre en Atenas ( $37^{\circ} 58' N$ ).

El incidente de la irradiación solar sobre una superficie por unidad, orientación normal a los rayos del sol, fuera de la atmósfera de la tierra, a la distancia media sol-tierra, se llama **constante solar** ( $G_{sc}$ ). Se han hecho esfuerzos considerables [8]-[14] para determinar los valores de la constante solar. Un valor en la literatura de la energía solar es  $1353 \text{ Wm}^{-2}$ . Sin embargo, el valor actualmente aceptado basado en mediciones recientes y análisis de detalle de datos, es:

$$G_{sc} = 1367 \text{ Wm}^{-2} \quad (2.4)$$

Después de décadas de constante monitoreo por sensores a bordo de varios satélites, ahora se reconoce que esta "constante solar" es mal llamada porque la salida energética solar varía con el tiempo. Sin embargo, las variaciones no son lo suficientemente grandes

como para ser motivo de preocupación práctica. Hoy en día, esta salida solar diferente debe ser referida a como la irradiación solar total (TSI), mientras que el término "constante solar" debe usarse sólo para describir el largo plazo *medio* TSI. Teóricamente, se emite radiación del sol en longitudes de onda de todos, para que la integración de la irradiación solar sobre todas las longitudes de onda es igual a la constante solar. Sin embargo, el 95% de la radiación extraterrestre se encuentra en el rango 0.2 a 2.6  $\mu\text{m}$  de longitud de onda y 99% en el  $\mu\text{m}$  de la gama 0.217 a 10.94.



## 2.8 anual de la figura de la tierra órbita elíptica alrededor del sol

Debido a la órbita elíptica de la tierra alrededor del sol (Fig. 2.8), la distancia entre el sol y la tierra varía ligeramente a lo largo del año, desde un mínimo conocido como perihelio y ocurre alrededor de 3 de enero, hasta un máximo, conocido como afelio, alrededor de 5 de julio. Hay un tiempo donde la tierra está más cerca al sol durante el invierno del hemisferio norte y más alejada del sol durante el verano del hemisferio norte. En consecuencia, varía también la irradiación solar extraterrestre y su valor de  $G_{en}$  en un plano normal a la radiación en el <sup>el día ndel año</sup>, contados a partir de Enero 1<sup>st</sup>, puede calcularse por [15]:

$$G_{on} = G_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \quad (2.5)$$

La variación anual de la irradiación solar extraterrestre se muestra en la figura 2.9.

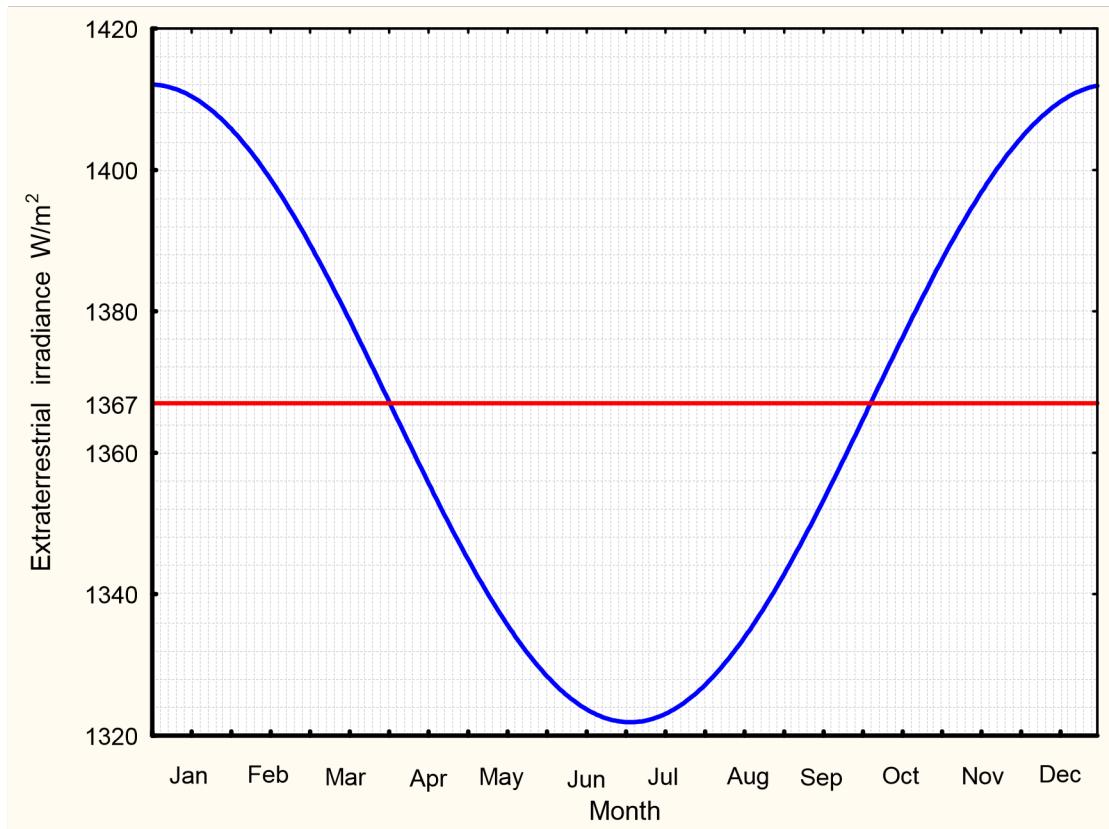


Figura 2.9 variación anual de la radiación solar extraterrestre

## 2.4 Distribución Europea de radiación solar

Los mapas son una de las formas más fáciles para obtener información sobre datos de radiación solar. Los mapas dan una impresión general de las características a gran escala de la disponibilidad y distribución de la radiación solar sin entrar en detalles sobre las condiciones meteorológicas locales. Por esta razón estos datos deben utilizarse con cuidado. Radiación solar se mide por las redes de tierra de estaciones de medición. Figura 2.10 muestra un mapa de la radiación solar total anual sobre una superficie horizontal, en toda Europa. Este mapa ofrece conocimiento sobre la radiación solar disponible a nivel del suelo, que es de vital importancia para aplicaciones de ingeniería solares. Este mapa de "MeteoNorm" [16] se basa en numerosas bases de datos climatológicos y modelos computacionales. Recientemente, se han producido mapas similares, usando también imágenes de satélite para las mediciones de la radiación solar para zonas con baja densidad de medidas de tierra basado. De este mapa, queda claro que los niveles de radiación solar generalmente disminuyen con el aumento de latitud, porque los rayos del sol tienen un camino más corto a través de la atmósfera en latitudes más bajas que en altas latitudes. Por lo tanto, en países del sur europeos la disponibilidad de la energía solar es más favorable que en países del norte de Europa. Además del efecto latitudinal, puede verse desde este mapa que también es una variación de la radiación solar debido a las condiciones climatológicas locales en una zona de latitud sola.

Una base de datos de radiación solar muy importante para Europa también está disponible en el "Atlas de radiación Solar Europeo" [17, 18]. Esta es una poderosa herramienta para

ingenieros solares, investigadores y estudiantes. Este atlas proporciona, entre otras cosas, mapas coloreados del total media mensual, haz y radiación difusa sobre superficie horizontal.

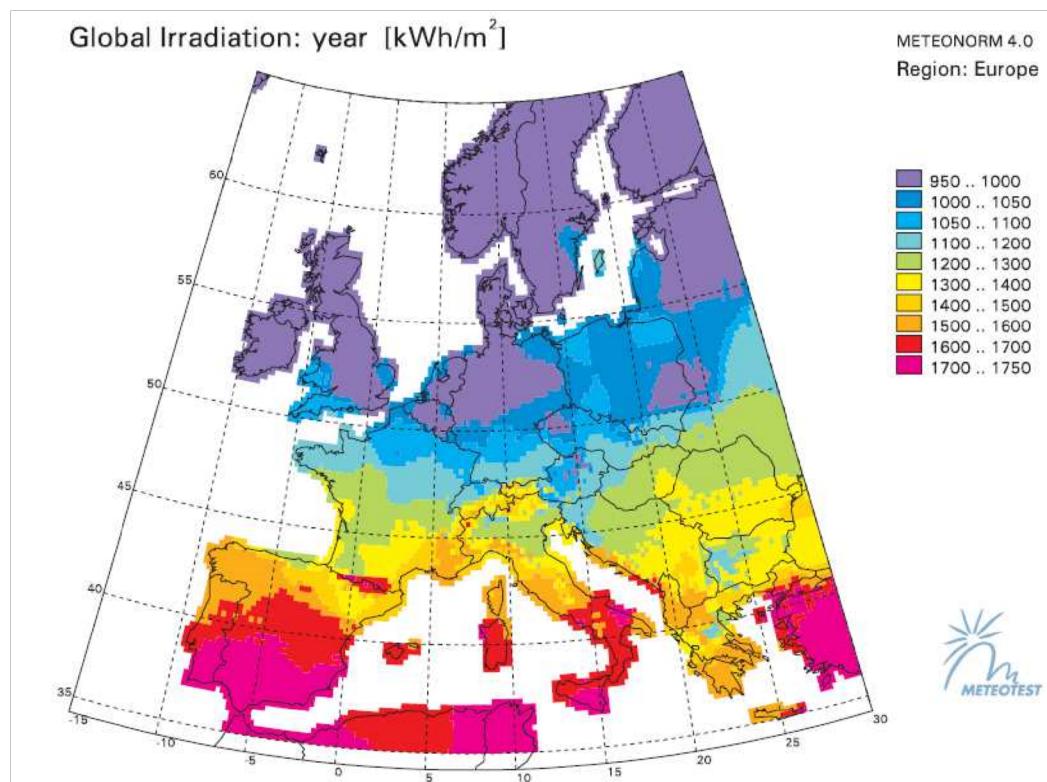


Figura 2.10 total irradiación anual solar de Europa en superficie horizontal (METEONORM).

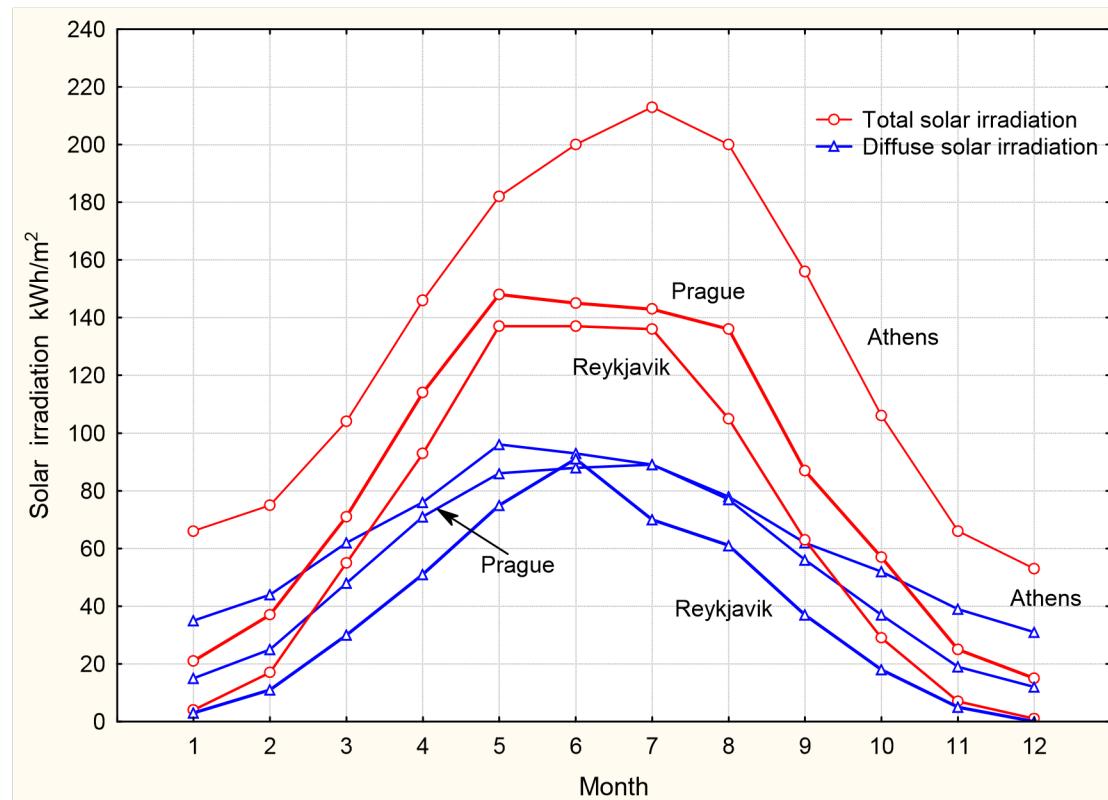


Figura 2.11 mensual total y difusa de la radiación solar sobre superficie horizontal en Atenas ( $37^{\circ} 58' N$ ), Praga ( $50^{\circ} 06' N$ ) y Reikiavik ( $64^{\circ} 08' N$ ).

De figura de 2.11 puede verse la influencia de la latitud en la total irradiación solar sobre superficie horizontal de tres ciudades europeas. Por lo tanto, la anual irradiación solar total sobre superficie horizontal en Atenas ( $37^{\circ} 58' N$ ) es de  $1564 \text{ kWh/m}^2$ , en Praga ( $50^{\circ} 06' N$ ) es  $996 \text{ kWh/m}^2$  y en Reikiavik ( $64^{\circ} 08' N$ ) es  $781 \text{ kWh/m}^2$ . Además, la porción de la irradiación solar total que es difusa aumenta en periodo de invierno. Así, en diciembre en Praga, la porción de la irradiación solar total que es difusa es 86%, mientras que en junio es del 61%. Esta figura muestra también que la latitud afecta la irradiación difusa muy poco en el período de verano.

## 2.5. La medición de la radiación solar

Diseño, dimensionamiento, evaluación del desempeño e investigación de aplicaciones de energía solar, se necesitan parámetros de radiación solar. Estos parámetros incluyen la radiación solar total, radioterapia, radiación difusa y la duración del sol. Los instrumentos para la medición de los parámetros de radiación solar se describen brevemente en las secciones posteriores. Hay muchas versiones de estos instrumentos y la selección depende de su costo, nivel de precisión y complejidad.

De la radiación solar total se realizan mediante piranómetros, mientras que la radioterapia puede ser medida por un instrumento llamado Pirheliómetro. El piranómetro también puede medir la radiación solar difusa, si el elemento de detección está sombreado de la radiación del haz. La radiación solar total es la variable principal para el diseño de sistemas de energía solar. Medidas Pirheliómetras son esenciales para dar los datos necesarios y para predecir el rendimiento de colectores solares de concentración. Además, la medición de la duración del sol, utiliza una grabadora de sol. Las mediciones de la duración del sol pueden entrar en modelos para estimar la irradiación solar total [19, 20].

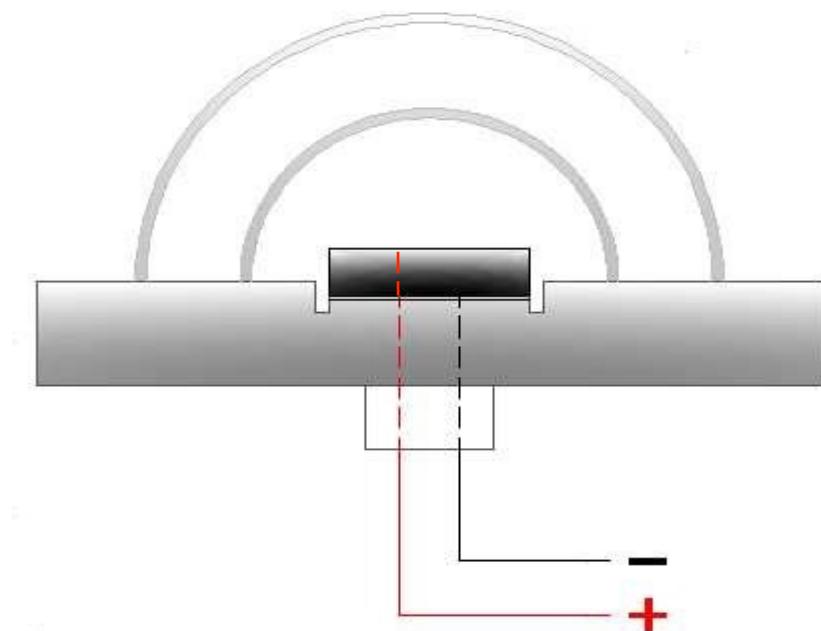
### 2.5.1 piranómetro

El instrumento de medición de la irradiación solar total desde un ángulo sólido  $2\pi$  en una superficie plana se llama piranómetro. La mayoría de los pirómetros utilizados hoy en día se basa en la termoeléctrica o el efecto fotoeléctrico.

El efecto termoeléctrico consiste en la generación de una fuerza electromotriz en presencia de una diferencia de temperatura entre dos cruces que se hacen con sus extremos conectados entre sí por dos conductores diferentes. Esto causa una corriente continua al flujo en los conductores si forman un lazo completo. La tensión creada es del orden de varios micros voltios por grado de diferencia.

El pirómetro, que se basa en el efecto termoeléctrico, generalmente consta de una superficie negra que se calienta cuando está expuesto a la radiación solar. Las ensambladuras calientes se unen a la superficie negra, mientras que las uniones frías están situadas de tal manera que no reciben la radiación. La fuerza electromotriz resultante

generada por la diferencia de temperatura entre el negro y la superficie no expuesta se relaciona con la cantidad de la radiación incidente. La superficie negra está protegida de la intemperie por dos cúpulas de vidrio óptico hemisférico concéntrico con características de transmisión excelente. La respuesta es lineal y calibrada, para que la salida eléctrica puede ser fácilmente detectada, registrada e integrada con el tiempo. En la figura 2.12 se muestra una sección esquemática de un piranómetro.



Sección de figura 2.12 diagrama del piranómetro

Hay algunos pirómetros con alta exactitud. Constan de un disco de cerámica negra ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que actúa como un elemento de detección, absorción de energía radiante. Cien termopares se imprimen en este disco. Sólo la frontera del disco está en contacto térmico con el cuerpo del pirómetro, que actúa como un dissipador de calor. Cien ensambladuras frías se encuentran cerca de esta frontera. Las cien ensambladuras calientes se encuentran cerca del centro del disco en un arreglo rotación simétrica. Cuando se irradia el pirómetro, los resultados de la energía absorbida en un calor fluyen desde el centro hasta el borde del disco. La diferencia de temperatura a través de la resistencia térmica del disco crea una fuerza electromotriz que se mide por un voltímetro. Dos cúpulas de vidrio protegen el elemento de detección de tiempo. Algunos piranómetros están equipados con escudos de radiación que reducen el calentamiento del cuerpo del instrumento por la irradiación solar. Los pirómetros más baratos con menor precisión están disponibles para el uso más general. Uno de tal instrumentos se alterna (negro) de absorción y reflexión (blanco) secciones (fig. 2.13). Cuando estos son expuestos a la irradiación solar, las secciones absorbentes se calentarán a una temperatura más alta que las secciones que reflejan y la irradiación solar se mide mediante la medición de la tensión eléctrica producida.

Los piranómetros que se basan en el efecto fotoeléctrico tienen una célula solar fotovoltaica de silicio como elemento de detección. La célula es un semiconductor que convierte la luz directamente en electricidad de corriente directa. Aunque la exactitud no es alta, puede ser adecuado para muchas aplicaciones integración de períodos de un día o más. Inexactitudes en las mediciones provienen de varias características indeseables de las células de silicio, como su respuesta espectral selectiva.



Figura 2.13 el piranómetro blanco y negro

El pirómetro también puede utilizarse para la medición de la irradiación solar difusa, si está equipada con una banda de sombra especial para excluir a la irradiación solar del haz de la cúpula de vidrio entero del piranómetro. La banda de sombra se monta con su eje titulado a un ángulo con la horizontal igual a la latitud del sitio, tal que el plano de la banda es paralelo al plano definido por el movimiento diario del sol. Porque la banda de sombra actual como una pantalla en una porción considerable del cielo, las mediciones requieren correcciones por parte de la radiación difusa obstruida por la banda. La exactitud de esta corrección es importante ya que cualquier cálculo posterior del componente directo se ve afectada, especialmente para altos ángulos cenitales. Las correcciones deben aplicarse según las instrucciones del fabricante.

## 2.5.2 Pirhelíometro

El instrumento de medición de la radiación solar de haz se llama pirhelíometro. El elemento de detección de pirhelíometro se coloca en la parte inferior de un tubo cilíndrico con una serie de diafragmas anulares así la radiación solar incidente sólo puede llegar a la parte inferior del tubo. Como uso en general el pirhelíometro el elemento de detección se basa

en el efecto termoeléctrico, con la abertura circular del otro lado del tubo con un ángulo de apertura de unos  $6^\circ$  al recibir la radiación solar. Puesto que el disco del sol subtende un ángulo de aproximadamente  $0.5^\circ$ , es evidente que el Pirheliómetro mide una pequeña porción del cielo alrededor del sol. Una sección de dibujo de la Pirheliómetro se muestra en la figura 2.14.

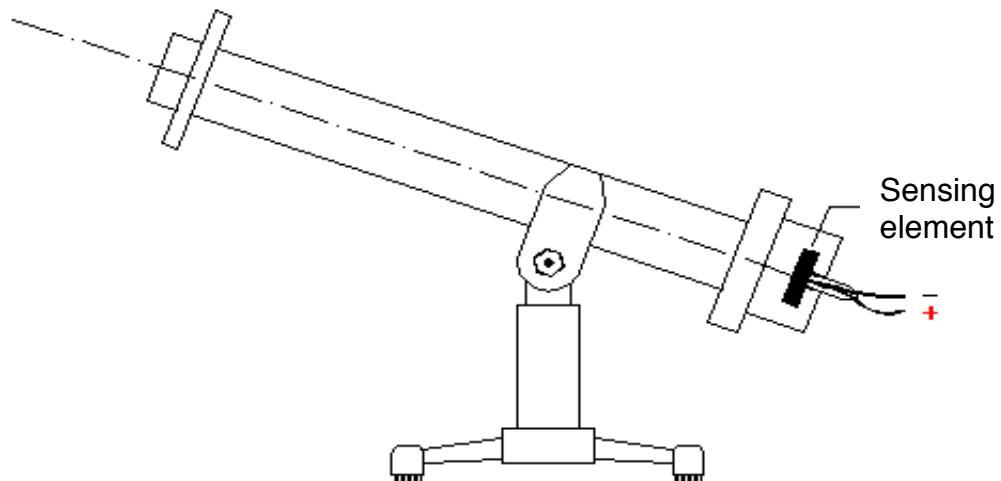


Figura 2.14 esquemático del Pirheliómetro

Un tal Pirheliómetro utiliza una ensambladura 40 diferentes conductores (constantanmanganin) con las junturas caliente son calentadas por la radiación y la juntura fría en buen contacto térmico con el caso. Cuando estos son expuestos a la radiación solar calientan las ensambladuras calientes a una temperatura más alta que las uniones frías y la diferencia en las temperaturas proporciona una medida de la radiación incidente. Desde el ángulo de apertura de pirheliómetro es pequeño, y para proporcionar mediciones continuas, el tubo debe ser constantemente señalado directamente al sol. Por esta razón que algunos pirheliómetros están montados sobre un sistema de seguimiento solar, para seguir el movimiento aparente diario y estacional del sol.

### 2.5.3 El Registrador de Sol

El registrador de sol es un instrumento para medir la duración del sol... La duración de la sol se define como el tiempo durante el sol es lo suficientemente intenso para dar sombra. La Organización Meteorológica Mundial define el mismo como el tiempo durante que el haz de irradiación solar supera el nivel de  $120 \text{ W/m}^2$ . Dos tipos de registradores de sol son esencialmente en uso amplio. El primero es el enfoque y el segundo se basa en el efecto fotoeléctrico. El enfoque del registrador de sol consiste en un cristal sólido esfera aproximadamente 10 cm de diámetro, montado concéntricamente en una sección de un recipiente esférico, cuyo diámetro es tal que los rayos del sol se pueden centrar en una tarjeta especial con el tiempo marcado, en su lugar por surcos en el recipiente (Fig. 2.15). La

tarjeta se quema siempre que exista un sol brillante. Así, la porción de la traza quemada proporcionará la duración de la sol para el día. Hay tres juegos de tarjetas de registro: tarjetas de curva larga son para el verano, tarjetas de corta curva son para el invierno y tarjetas rectas para períodos cerca de los equinoccios.



Figura 2.15 el registrador del sol

Este tipo de registrador de sol no responde en la parte del día de temprano y de tarde porque intensidades de los rayos del sol son demasiado bajos. También, la humedad puede afectar el papel de la tarjeta de registro. Por lo tanto, en un ambiente seco la quemadura puede comenzar en cerca de  $70 \text{ W/m}^2$  mientras que en un ambiente muy húmedo la quemadura no se inicie hasta  $280 \text{ W/m}^2$ .

El grabador de sol, que se basa en el efecto fotoeléctrico, consta de dos células fotovoltaicas con una célula expuesta a la radiación solar del haz y la otra célula sombreada de ella por un anillo cortinado. En el caso de radiación difusa, las dos células tienen la misma salida. La radioterapia produce una salida de la célula expuesta que es mayor que la de la célula sombreada. La diferencia de radiación entre las dos células es una medida de la duración del sol.

## Referencias

- [1] Robinson, N. 1966. (ed.), *Solar Radiation*, Elsevier, Amsterdam.
- [2] Iqbal, M. 1983. "An introduction to Solar Radiation". Academic Press, Toronto.
- [3] Mani A. and O. Chacko. 1980. "Attenuation of solar radiation in the atmosphere" *Solar Energy* 24, 347-349.
- [4] Boer K.W. 1977. "The solar spectrum at typical clear weather days". *Solar Energy*, 19, 525-538.
- [5] Thekaekara, M. P. 1977. "Solar irradiance, total and spectral" In *Solar Energy engineering*, ed. Sayigh, A.A.M., Academic Press, London.
- [6] Garg, H. P. 1982. *Treatise on Solar Energy*, Vol. I, Wiley-Interscience, Chichester.

- [7] Kondratyev, K. Y. 1969. *Radiation in the Atmosphere*, Academic, New York.
- [8] ASTM, 2000. Standard solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables. Standard E490-00. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [9] Duncan, C. H., R. C. Willson, J. M. Kendall, R. G. Harrison, and J. R. Hickey. 1982. "Latest Rocket Measurements of the Solar Constant." *Solar Energy*, 28, 385.
- [10] Hickey, J. R., B. M. Alton, F. J. Griffin, H. Jacobowitz, P. Pelligrino, R. H. Maschhoff, E. A. Smith, and T. H. Vonder Haar. 1982. "Extraterrestrial Solar Irradiance Variability: Two and One-Half Years of Measurements from Nimbus 7." *Solar Energy*, 28, 443.
- [11] Thekaekara, M. P. 1976. "Solar Radiation Measurement: Techniques and Instrumentation" *Solar Energy*, 18, 309-325.
- [12] Thekaekara M.P. 1973. "Solar energy outside the earth's atmosphere". *Solar Energy*, 14, 109-127. [13] Thekaekara, M. P. and A. J. Drummond. 1971. "Standard Values for the Solar Constant and Its Spectral Components." *Natl. Phys. Sci.*, 229, 6.
- [13] Gueymard A. Christian. 2004. "The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models". *Solar Energy*, 76:4, 423-453.
- [14] Duffie, J. A. and W. A. Beckman. 2006. "Solar Engineering of thermal Processes" John Wiley & Sons, Inc.
- [16] Meteonorm . Information available at [www.meteonorm.com](http://www.meteonorm.com)
- [17] Page J., M. Albuission, L. Wald. 2001. "The European solar radiation atlas: A valuable digital tool". *Solar Energy* 71:1, 81-83.
- [18] European Solar Radiation Atlas. Information available at <http://www.ensmp.fr>
- [19] Latimer J.R. 1980. "Solar radiation measurement methods". An Introduction to meteorological measurements and data handling for solar energy applications IEA, DOE/ER-0084.
- [20] Perrin de Brichambaut C., G. Lamboley. 1974. Le rayonnement solaire au sol et ses mesures. Cahier AFEDES, No 1, Ed. Europeennes Thernique et Industrie.

## Lectura addicional

- Bernard, R., G. Menguy, M. Schwartz. 1980. Le Rayonnement solaire. Conversion thermique et applications. 2e edition, Technique & Documentation Lavoisier.
- Bird, R. E., R. L. Hulstrom, A.W.Kliman, and H.G. Eldering 1982. "Solar spectral measurements in the terrestrial environment" *Applied Optics* 21, 1430 -1436.
- Braslau N. and J. V. Dave. 1973. "Effect of aerosols on the transfer of solar energy through realistic model atmospheres" *J. Appl. Meteor.* 12, 601-619.
- Brunger, A. P. and F.C. Hooper, "Anisotropic sky radiance model based on narrow field of view measurements of shortwave radiance", *Solar Energy*, 51:1, 53-64, 1993.
- Coulson K. L. 1975. "Solar and Terrestrial Radiation". Academic Press, New York.
- Dickinson, W.C. and P. N. Cheremisinoff (eds). 1982. *Solar Energy Technology Handbook*, Butterworths, London.
- Gueymard, C., 1993. "Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data" *Solar Energy* 51,121-138.
- Kierkus, W. T. and Colborne W. G. 1989. "Diffuse solar radiation-daily and monthly values as affected by snow cover". *Solar Energy* 42, 143-147.
- Le Baron, B. A., J. J. Michalsky, and R. Perez. 1990. "A simple procedure for correcting shadow band data for all sky conditions" *Solar Energy* 44, 249-256.
- National Renewable Energy Laboratory <http://rredc.nrel.gov>
- Nick Strobel's Astronomy Notes. Go to his site at <http://www.astronomynotes.com/>
- Painter H. E. 1981. "The shade ring correction for diffuse irradiance measurements" *Solar Energy* 26, 361-363.
- Shettle E. P., and A. E. S. Green 1974. "Multiple scattering calculation of the middle ultraviolet reaching the ground" *Applied Optics* 13, 1567-1581.
- Van Heuklon T. K. 1979. "Estimating atmospheric ozone for solar radiation models" *Solar Energy* 22, 63-68.