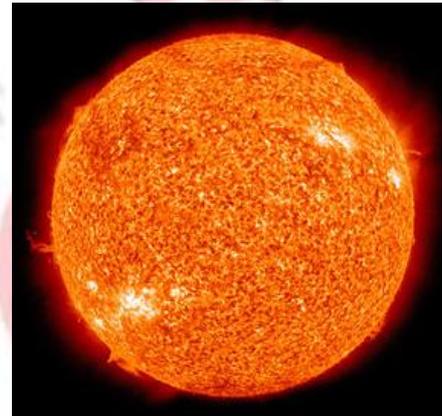


Energía Solar_ Radiación Solar

1 El Sol

El Sol (del latín sol, solis, a su vez de la raíz protoindoeuropea sauel-) es una estrella de tipo-G de la secuencia principal y clase de luminosidad V que se encuentra en el centro del sistema solar y constituye la mayor fuente de radiación electromagnética de este sistema planetario. Es una bola esférica casi perfecta de plasma, con un movimiento convectivo interno que genera un campo magnético a través de un proceso de dinamo. Cerca de tres cuartas partes de la masa del Sol constan de hidrógeno; el resto es principalmente helio, con cantidades mucho más pequeñas de elementos, incluyendo el oxígeno, carbón, neón y hierro.



Se formó hace aproximadamente 4600 millones de años a partir del colapso gravitacional de la materia dentro de una región de una gran nube molecular. La mayor parte de esta materia se acumuló en el centro, mientras que el resto se aplanó en un disco en órbita que se convirtió en el Sistema Solar. La masa central se volvió cada vez más densa y caliente, dando lugar con el tiempo al inicio de la fusión nuclear en su núcleo. Se cree que casi todas las estrellas se forman por este proceso. El Sol es más o menos de edad intermedia y no ha cambiado drásticamente desde hace más de cuatro mil millones de años, y seguirá siendo bastante estable durante otros cinco mil millones de años más. Sin embargo, después de que la fusión del hidrógeno en su núcleo se haya detenido, el Sol sufrirá cambios severos y se convertirá en una gigante roja. Se estima que el Sol se volverá lo suficientemente grande como para engullir las órbitas actuales de Mercurio, Venus y posiblemente la Tierra.

La Tierra y otros cuerpos (incluidos otros planetas, asteroides, meteoroides, cometas y polvo) orbitan alrededor del Sol. Por sí solo, representa alrededor del 99,86 % de la masa del sistema solar. La distancia media del Sol a la Tierra fue definida exactamente por la Unión Astronómica Internacional en 149 597 870 700 metros (aproximadamente 150 millones de kilómetros). Su luz recorre esta distancia en 8 minutos y 19 segundos.

La energía del Sol, en forma de luz solar, sustenta a casi todas las formas de vida en la Tierra a través de la fotosíntesis, y determina el clima de la Tierra y la meteorología.

Es la estrella del sistema planetario en el que se encuentra la Tierra; por lo tanto, es el astro con mayor brillo aparente. Su visibilidad en el cielo local determina, respectivamente, el día y la noche en diferentes regiones de diferentes planetas. En la Tierra, la energía radiada por el Sol es aprovechada por los seres fotosintéticos que constituyen la base de la cadena trófica, siendo así la principal fuente de energía de la vida. También aporta la energía que mantiene en funcionamiento los procesos climáticos.

El Sol es una estrella que se encuentra en la fase denominada secuencia principal, con un tipo espectral G2 y clase de luminosidad V, por tanto, también es denominada como enana amarilla, se formó entre 4567,9 y 4570,1 millones de años y permanecerá en la secuencia principal aproximadamente 5000 millones de años más. El Sol, junto con todos los cuerpos celestes que orbitan a su alrededor, incluida la Tierra, forman el sistema solar.



El vasto efecto del Sol sobre la Tierra ha sido reconocido desde tiempos prehistóricos y ha sido considerado por algunas culturas como una deidad. El movimiento de la Tierra alrededor del Sol es la base del calendario solar, el cual es el calendario predominante en uso hoy en día.

Los datos más interesantes acerca del Sol son los siguientes:

- El Sol = Estrella = Horno Nuclear.
- Su diámetro es 1.400.000 km.
- Su Masa es 2,227 toneladas; 300.000 veces la masa de la tierra.
- Formado por hidrógeno y helio.
- Su temperatura superficial es de 5.600°K.
- Su vida estimada es de 5.000 millones de años.
- La distancia Tierra - Sol es de 150 millones de km.
- La luz solar tarda 8 minutos en llegar a la tierra.
- El Sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión que se llevan a cabo en su núcleo.
- La generación de energía proviene de la pérdida de masa del Sol, que se convierte en energía de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein, $E=m \cdot c^2$, donde "E" es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa "m"; "c" es la velocidad de la luz.
- Su flujo radiante es de $3,8 \times 10^{26} \text{W}$ equivalente a una densidad de 62,5MW por cada metro cuadrado de superficie solar. De toda ella solo una pequeña parte, 1,37KW por metro cuadrado aproximadamente, llega a la superficie de la tierra

como consecuencia de la distancia que los separa. La radiación que llega varía de forma aleatoria debido a muy diversos efectos que provoca sobre ella la atmósfera terrestre. Una gran parte es absorbida y dispersa por los propios agentes variables que allí se encuentran, tales como la polución y la nubosidad.

La energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la denominada radiación solar. El espectro de la radiación solar está compuesto por:

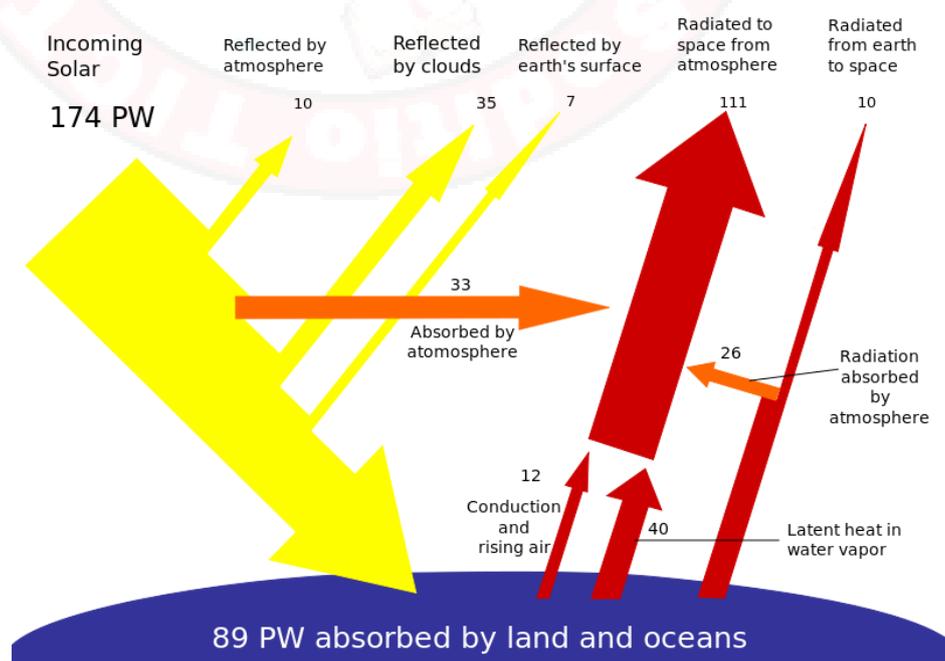
1. Luz ultravioleta [7%]
2. Luz visible [47%]
3. Luz infrarroja [46%]

La Tierra es sólo un mundo pequeño en la órbita de una estrella que, aunque es de lo más corriente en la inmensidad del universo, resulta fundamental para nuestra existencia. Y es que casi toda la energía de que disponemos proviene del Sol. Él es la causa de las corrientes de aire, de la evaporación de las aguas superficiales, de la formación de nubes, de las lluvias y, por consiguiente, el origen de otras formas de energía renovable, como el viento, las olas o la biomasa. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de la vida.

La Tierra recibe 174 petavattios de radiación solar entrante (insolación) desde la capa más alta de la atmósfera. Aproximadamente el 30 % regresa al espacio, mientras que las nubes, los océanos y las masas terrestres absorben la restante. El espectro electromagnético de la luz solar en la superficie terrestre lo ocupa principalmente la luz visible y los rangos de infrarrojos con una pequeña parte de radiación ultravioleta.

La potencia de la radiación varía según el momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. En

condiciones de radiación aceptables, la potencia equivale aproximadamente a 1000 W/m^2 en la superficie terrestre. Esta potencia se denomina irradiancia. Nótese que en términos globales prácticamente toda la radiación recibida es reemitida al espacio



(de lo contrario se produciría un calentamiento abrupto). Sin embargo, existe una diferencia notable entre la radiación recibida y la emitida.

2 Radiación solar

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. La energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la radiación solar.

El Sol transfiere su energía por medio de ondas electromagnéticas como la luz. Pero a menudo pensamos que la luz (que podemos ver con nuestros ojos.) es la única parte de la radiación emitida por el sol.

El Sol también transfiere energía aún más energética que la luz visible, como la radiación ultra violeta (UV). Demasiada luz UV daña las células de plantas, de humanos y de animales. Afortunadamente, la capa de ozono en una altitud de 15-40 km absorbe una importante fracción de esta radiación sumamente energética y peligrosa.

El Sol también emite la radiación térmica con una energía más baja que la luz visible, la cual llamamos luz infrarroja o radiación infrarroja.



El flujo de radiación solar que llega al nivel del suelo depende de múltiples factores. Algunos de ellos son de tipo determinista como la ubicación del observador, la época del año, el momento del día, la orientación de la superficie receptora o la atenuación y dispersión de la radiación debida a una atmósfera estándar en un día claro. Otros factores, asociados al estado de la atmósfera varían de acuerdo al lugar o al momento del día en forma difícil de predecir, como la nubosidad, el nivel de actividad solar, el contenido y tipo de aerosoles o la cantidad de vapor de agua precipitable en la atmósfera.

En conjunto, estos factores determinan la radiación solar incidente en la superficie en un punto y momento dados. El factor que más incide en el nivel de radiación en la superficie es la nubosidad.



Debido a la disparidad entre el radio medio terrestre y la distancia media tierra-sol, solo una pequeña fracción de la potencia emitida por el sol incide sobre la Tierra. De la energía solar incidente sobre la Tierra, una parte importante es reflejada al espacio o absorbida en la atmósfera. En general, llega a la superficie menos del 80 % de

la potencia incidente fuera de la atmósfera. Un cálculo elemental muestra que bastaría con la energía solar incidente en una muy pequeña porción de la superficie de nuestro planeta para abastecer la demanda global de energía. Sin embargo, la energía solar llega a la superficie en forma muy diluida y con gran variabilidad temporal. Pero, por otro lado, es una fuente de energía sin costo a priori. El desafío para la ingeniería es concentrarla,

almacenarla y aprovecharla eficientemente a menor costo que otras fuentes de energía. Dado que los precios de los combustibles fósiles, la biomasa y la energía basada en sustancias fisionables tienen a nivel mundial una tendencia al alza en el largo y mediano plazo, la energía solar, junto a la eólica, están llamadas a tener un rol de importancia creciente en los próximos años.

La atmósfera refleja y absorbe parte de la radiación incidente, de modo que una parte de la que finalmente llega al nivel del suelo lo hace en forma de radiación difusa, después de la interacción con diferentes componentes de la atmósfera. Separamos entonces la radiación global incidente en dos partes: directa y difusa, y ésta última proviene de todas partes del cielo y superficies circundantes. La radiación directa es de especial interés para sistemas con concentración. En condiciones de cielo claro, en torno al 85 % de la radiación solar es directa

2.1 Cantidad de energía transferida

Las cantidades de energía son medidas en Joules o Julios. El Sol transfiere en cada segundo la cantidad de 1367 J en cada metro cuadrado del diámetro de la Tierra. Esto corresponde a una potencia de 1367 W (vatios o watts) [1 Vatio = 1 Joule por segundo]. Este valor recibe el nombre de "constante solar".

Por dos razones esta energía no alcanza continuamente cada metro cuadrado de la superficie terrestre. Las razones son:

- 1) la geometría de la Tierra
- 2) la influencia de la atmósfera.

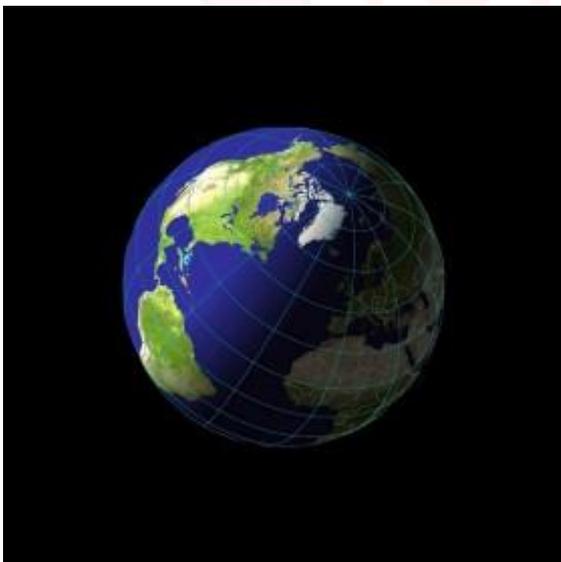


Figura La superficie terrestre "S" se aproxima a la superficie de una esfera con radio "r" y su área es:

$$S = 4 \pi r^2$$

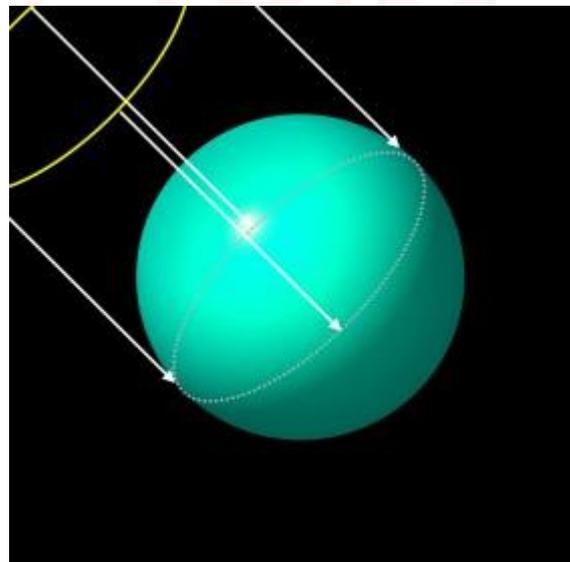
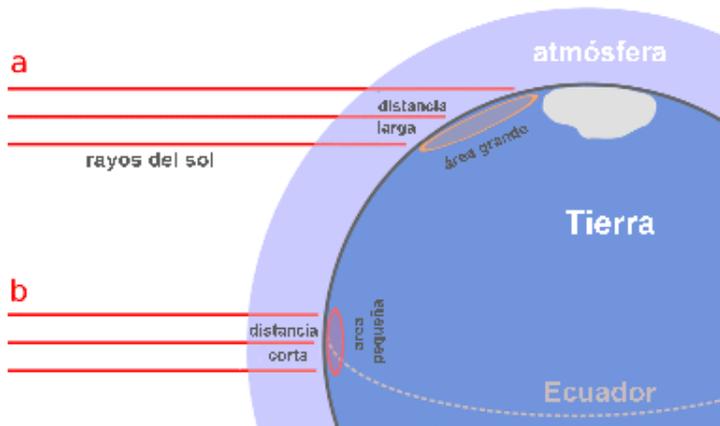


Figura El área que es golpeada verticalmente por el Sol es sólo la sección circular transversal "D" de esta esfera con un área de:

$$D = \pi r^2$$

La Tierra no es un disco frente al Sol sino una esfera. Por lo tanto, el sol no irradia a la Tierra verticalmente sino que en la mayoría de las regiones lo hace con un cierto ángulo. Cuando es de noche de un lado de la Tierra, no hay irradiación alguna. La sección transversal de una esfera, que es golpeada verticalmente por el sol, es sólo un cuarto de su superficie. Por lo tanto alcanza sólo $\frac{1}{4} \times 1367$ Vatios = 342 vatios por metro cuadrado de la atmósfera superior.

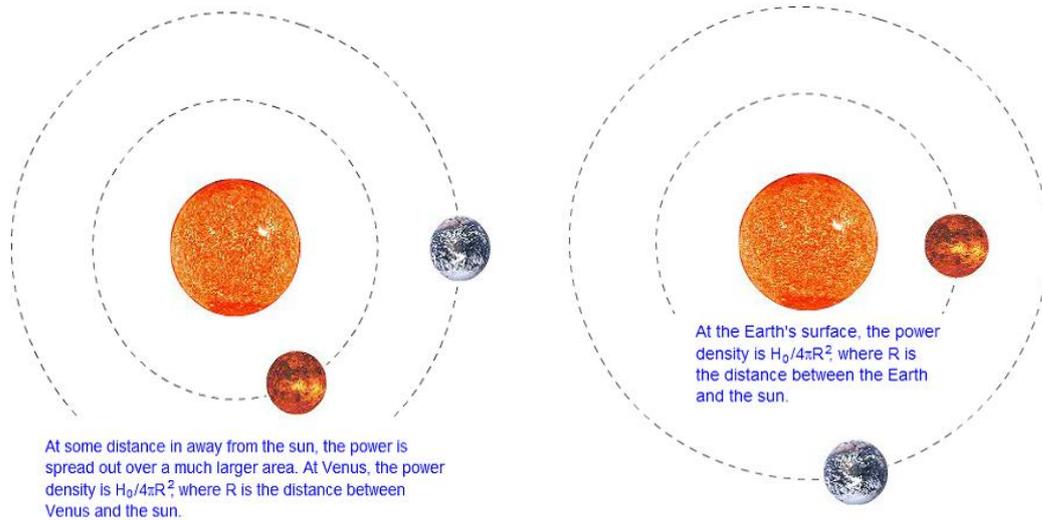


*Figura: La energía transferida por los rayos paralelos del sol a la Tierra es la misma, pero dependiendo del ángulo de incidencia, el área impactada es diferente. Así mismo ocurre con la atmósfera, de tal manera que los rayos llegan a ser más débiles mientras más grande sea la porción de atmósfera.
© GNU Licence Wikipedia, modificada*

La luz del sol no puede pasar la atmósfera y alcanzar la superficie de la Tierra sin trabas. Las nubes, el hielo y áreas nevadas lo reflejan. Los gases y el polvo en el aire toman la energía y remiten en todas direcciones, también de regreso al espacio. Al final, aproximadamente 168 Vatio de un promedio de 342 Vatio son absorbidos por la Tierra.

2.2 Radiación solar en el espacio

Sólo una fracción de la potencia total emitida por el sol incide sobre un objeto en el espacio que está a cierta distancia del sol. La radiación solar (H_0 in W/m^2) es la densidad de potencia incidente en un objeto debido a la iluminación del sol. En la superficie del Sol, la densidad de potencia es la de un cuerpo negro a aproximadamente 6000K y la potencia total del sol es este valor multiplicado por el área de la superficie del sol. Sin embargo, a cierta distancia del sol, la potencia total del sol se extiende sobre un área de superficie mucho más grande y por lo tanto la irradiación solar sobre un objeto en el espacio disminuye a medida que el objeto se mueve más lejos del sol.

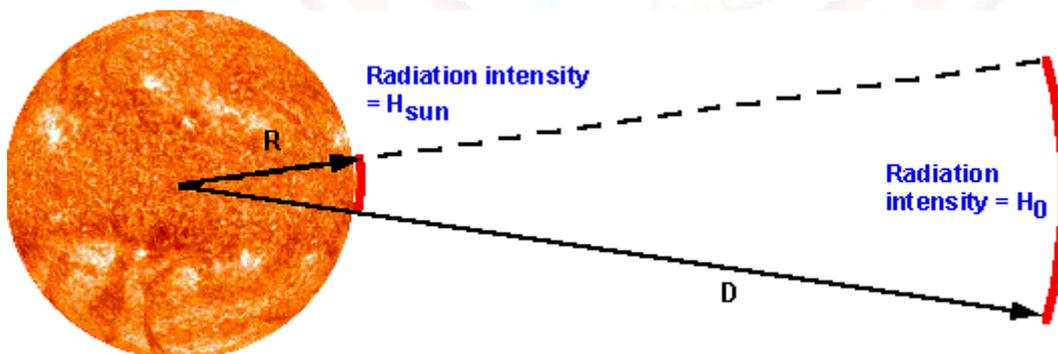


La radiación solar sobre un objeto a cierta distancia D del sol se halla dividiendo la potencia total emitida por el sol y la superficie sobre la que la luz del sol impacta. La radiación solar total emitida por el sol está dada por el producto de σT^4 y el área superficial del sol ($4\pi R_{sun}^2$) dónde R_{sun} es el radio del sol. El área de la superficie sobre la cual la energía del sol impacta será $4\pi D^2$. Dónde D es la distancia del objeto al sol. Por lo tanto, la intensidad de la radiación solar, H_0 en (W/m^2), que incide sobre un objeto es:

$$H_0 = \frac{R_{sun}^2}{D^2} H_{sun}$$

dónde :

- H_{sun} es la densidad de potencia en la superficie del Sol (in W/m^2) según lo determinado por la ecuación de cuerpo negro de la ecuación de Stefan-Boltzmann;
- R_{sun} es el radio del sol en metros como se muestra en la figura a continuación; y
- D es la distancia desde el sol en metros, como se muestra en la siguiente figura.



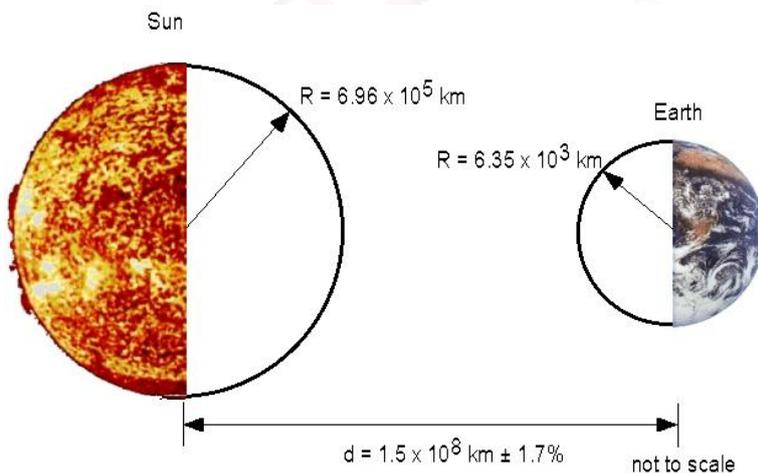
A una distancia D del sol la misma cantidad de potencia se extiende sobre un área mucho más amplia por lo que la intensidad de la potencia de la radiación solar se reduce.

La siguiente tabla muestra los valores estandarizados para la radiación en cada uno de los planetas, sino mediante la introducción de la distancia que se puede obtener una aproximación.

Planetas	Distancia ($\times 10^9$ m)	Media radiación solar (W/m^2)
Mercurio	57	9116.4
Venus	108	2611.0
Tierra	150	1366.1
Marte	227	588.6
Júpiter	778	50.5
Saturno	1426	15.04
Urano	2868	3.72
Neptuno	4497	1.51
Plutón	5806	0.878

2.3 Radiación solar fuera de la atmósfera terrestre. Constante Solar

La radiación solar fuera de la atmósfera de la Tierra se calcula utilizando la densidad radiante de energía (H_{sun}) en la superficie del Sol (5.961×10^7 W/m²), el radio del Sol (R_{sun}), y la distancia entre la Tierra y el sol. La irradiación solar calculada en la atmósfera de la Tierra es de aproximadamente 1.36 kW/m². Las constantes geométricas utilizadas en el cálculo de la radiación solar incidente en la Tierra se muestran a continuación:



Constantes geométricas para calcular la radiación solar de la Tierra.

La densidad de potencia varía ligeramente por los cambios de distancia Tierra-Sol durante la órbita elíptica de la Tierra alrededor del Sol, y porque la potencia emitida del Sol no es constante. La variación de potencia debido a la órbita elíptica es alrededor de un 3,4%, con la mayor radiación solar en enero y la menor irradiación solar en julio. Una ecuación, que describe la variación durante todo el año a las afueras de la atmósfera de la Tierra es:

$$\frac{H}{H_{constant}} = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360(n-2)}{365}\right)$$

dónde:

H es la densidad de energía radiante fuera de la atmósfera de la Tierra (en W/m²);

$H_{constant}$ es el valor de la constante solar, 1.353 kW/m²;

n es el día del año.

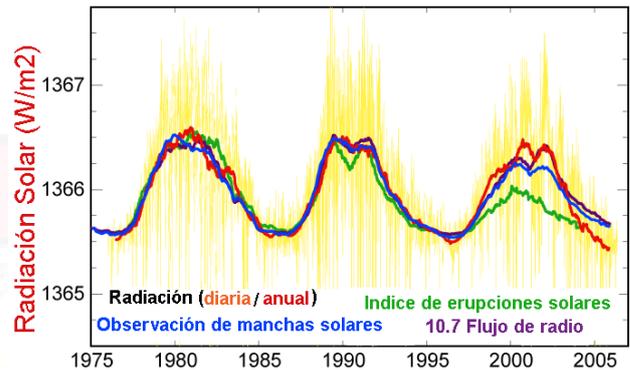
Estas variaciones suelen ser pequeñas y para aplicaciones fotovoltaicas la irradiación solar puede considerarse como constante. El valor de la constante solar y su espectro se han definido como un valor estándar llamado masa de aire cero (AM0) y toma un valor de 1.353 kW/m^2 .

2.3.1 Variabilidad de la constante solar

La cantidad de manchas solares aumentan con una periodicidad de 11 años. En paralelo, la radiación solar llega a ser más fuerte. Este ciclo, tuvo a principios del 2008 un mínimo, produjo una variación de la constante solar de 0.1%. El resultante cambio de la temperatura, si no fuese influido por otros factores, estaría en la gama de 0.5 a 1°C .

Variación del valor absoluto de la constante solar durante las últimas décadas.

Gráfica: Robert A. Rode for Global Warming Art.



El número de manchas de sol fue muy bajo en el período de 1645 a 1715. Nosotros lo llamamos el Mínimo Maunder. El valor de la constante solar disminuyó aproximadamente en 0.2%.

Tales mínimos ocurren sobre intervalos más largos de tiempo, los cuales son probablemente una consecuencia de los ciclos solares a largo plazo que superponen el ciclo de Schwabe.

Los científicos conocen un ciclo cubriendo aproximadamente 200 años (el ciclo de Suess) y un ciclo aproximadamente de 88 años (el ciclo de Gleissberg). En la actualidad, nos encontramos en el período de un máximo más largo.

Figura: Manchas solares de tamaño inusual. Parece contradictorio, que la actividad solar aumente a causa de las manchas oscuras del sol. Pero alrededor de estas manchas la intensidad de la radiación es más alta de lo normal. Fuente: SOHO project / NASA

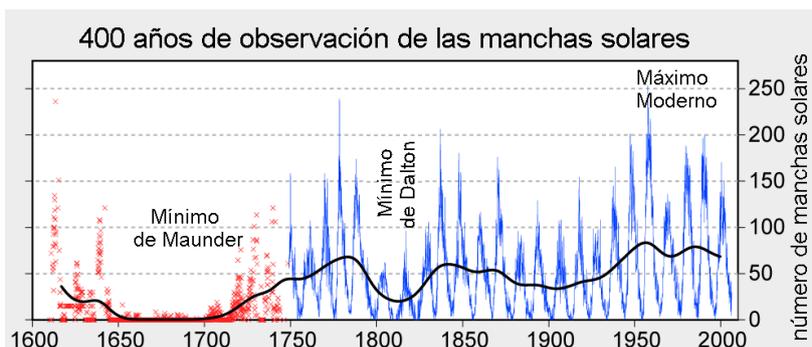
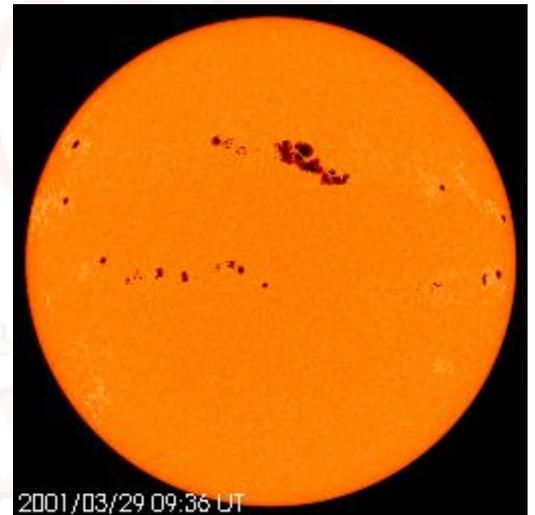


Figura Observación o estimación del número de manchas solares durante los últimos 400 años. Gráfica: Robert A. Rohde for Global Warming Art.

2.3.2 Distribución espectral de la radiación solar

La aplicación de la Ley de Planck al Sol con una temperatura superficial de unos 6000 K nos lleva a que el 99 % de la radiación emitida está entre las longitudes de onda 0,15 μm (micrómetros) y 4 μm . El Sol emite en un intervalo espectral de 150 nm hasta 4 μm . La luz visible se extiende desde 380 nm a 830 nm.

La atmósfera de la Tierra constituye un importante filtro que hace inobservable radiaciones de longitud de onda inferiores a las 0,29 μm por la fuerte absorción del ozono y el oxígeno. Ello nos libra de la ultravioleta más peligrosa para la salud. La atmósfera es opaca a toda radiación infrarroja de longitud de onda superior a 24 μm . Ello no afecta a la radiación solar pero sí a la energía emitida por la Tierra que llega hasta las 40 μm y que es absorbida. Este efecto se conoce como efecto invernadero.

El máximo (Ley de Wien) ocurre a 0,475 μm . Considerando la ley de Wien, ello corresponde a una temperatura de:

La **ley de desplazamiento de Wien** es una ley de la física que establece que hay una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura. Matemáticamente, la ley es:

$$\lambda_{\max} = \frac{0,0028976 \text{ m} \cdot \text{K}}{T}$$

Donde T es la temperatura del cuerpo negro en Kelvin (K) y λ_{\max} es la longitud de onda del pico de emisión en metros. La constante de Wien está dada en Kelvin x metro.

Las consecuencias de la ley de Wien es que cuanto mayor sea la temperatura de un cuerpo negro menor es la longitud de onda en la cual emite. Por ejemplo, la temperatura de la fotosfera solar es de 5780 K y el pico de emisión se produce a 501,3 nm = $5,013 \cdot 10^{-7}$ m. Como 1 angstrom $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-4}$ micras resulta que el máximo ocurre a 5013 \AA . Como el rango visible se extiende desde 4000 \AA hasta 7400 \AA , esta longitud de onda cae dentro del espectro visible siendo un tono de verde.

Pero la emisión solar difiere de la de un cuerpo negro, sobre todo en el ultravioleta. En el infrarrojo se corresponde mejor con la temperatura de un cuerpo negro de 5779 K, y en el visible con 6090 K. Ello nos habla de que la radiación solar no se produce en las mismas capas y estamos observando la temperatura de cada una de ellas donde se produce la energía.

2.4 Radiación solar en la superficie de la tierra

Mientras que la radiación solar incidente sobre la atmósfera de la Tierra es relativamente constante, la radiación en la superficie de la Tierra varía ampliamente debido a:

- efectos atmosféricos, incluyendo absorción y dispersión;
- variaciones locales en la atmósfera, como el vapor de agua, las nubes y la contaminación;
- latitud del lugar; y