



Energía Solar Fotovoltaica Introducción

1 Introducción

El rápido crecimiento de la energía renovable se sustenta en la caída de los costes tecnológicos, la subida de los precios de los combustibles fósiles y el establecimiento de un precio a las emisiones de CO₂; pero su auge principal se debe sustancialmente a las continuas subvenciones. Las medidas de apoyo a nuevos proyectos renovables deberán acompañarse en el tiempo con el aumento de capacidad y la caída de los costes, con el fin de evitar una carga excesiva para los gobiernos y consumidores.

La drástica reducción de los precios que han experimentado en los últimos años los paneles solares hace que, al día de hoy, el precio de la energía solar fotovoltaica pueda competir en igualdad de condiciones con la obtenida con otras fuentes de energía convencionales, sin el respaldo de subvenciones de ninguna clase, fenómeno conocido como paridad de red

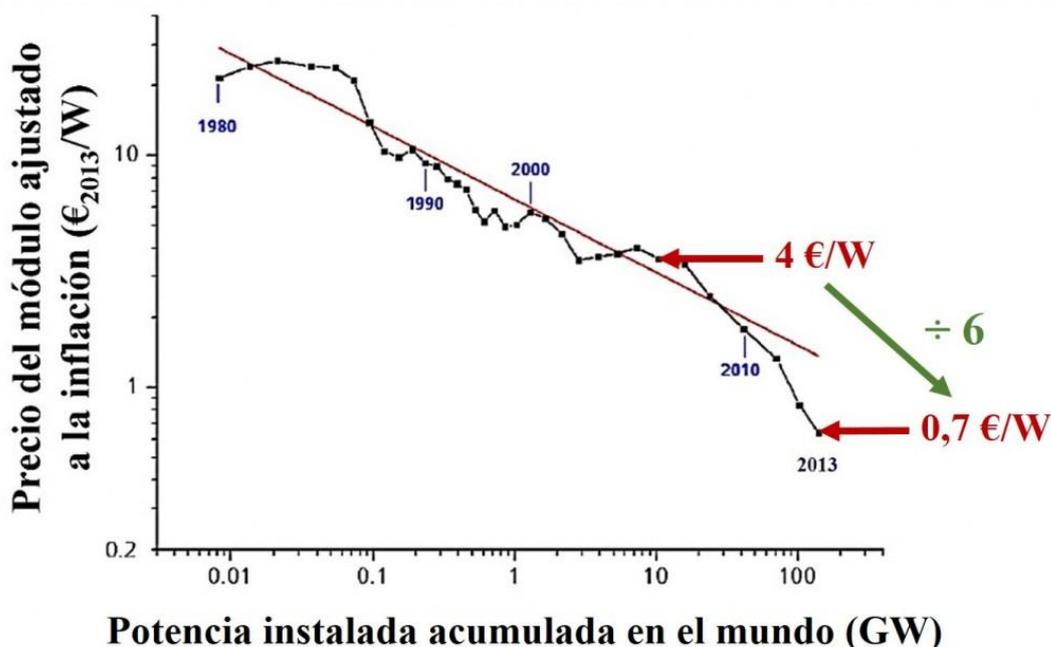
La reducción en el coste de las placas solares fotovoltaicas ha estado motivada en parte por las mejoras debidas a las economías de escala y de eficiencia que se han conseguido, debidos en gran parte por el gran incremento en la demanda, que hace que se haya producido una disminución del coste de los paneles que sigue la llamada 'Ley de Swanson' que sería el equivalente, en el mundo de la fotovoltaica, a la 'Ley de Moore' de los microprocesadores.

La 'Ley de Swanson' afirma que los precios de los paneles fotovoltaicos disminuyen del orden de un 20 % cada vez que se dobla la producción mundial de los mismos, en el siguiente gráfico puede verse cómo han evolucionado los paneles solares siguiendo esta ley empírica-

La figura muestra como cada vez que la potencia total instalada se duplica, el precio del vatio baja un 20 % y esto ha venido siendo así durante los últimos 35 años. El precio del vatio solar en 2007, año en el que comenzó la participación significativa de la ESF en el "mix" energético español y en 2013, se muestran en la misma figura. Se aprecia una reducción en el precio de un año al otro en un factor 6.

La relación entre el precio de los paneles y el de la energía eléctrica que producen es muy dependiente de diversos factores: coste de la instalación, vida estimada del panel solar, insolación media en el lugar de instalación, energía producida durante su tiempo de

utilización, etc.; es decir, el precio de la energía producida viene muy determinado por los niveles de insolación existentes en el lugar de ubicación de los paneles, de manera que cuanto mayor sea aquella, menor será el precio de la electricidad producida. Con el precio que tienen los paneles solares en la actualidad, y para una instalación localizada en una zona con unos niveles de irradiación de 1.500 kWh/m² año, que es el valor promedio para la península ibérica, el precio del kWh a finales de 2014 se situó en el margen 0.08-0.1 €/kWh, precio comparable al que producen la electricidad las centrales de carbón, de gas o las nucleares.



Evolución del precio del vatio solar. Ambas escalas son logarítmicas Fuente: Elaboración a partir del informe Fraunhofer PV Report 2014

Según un informe de la Comisión Europea "Energy Transition in the Power Sector in Europe: State of Affairs in 2015" la tendencia es ir aumentando la participación de las energías alternativas en el mix energético en detrimento de otras fuentes convencionales:

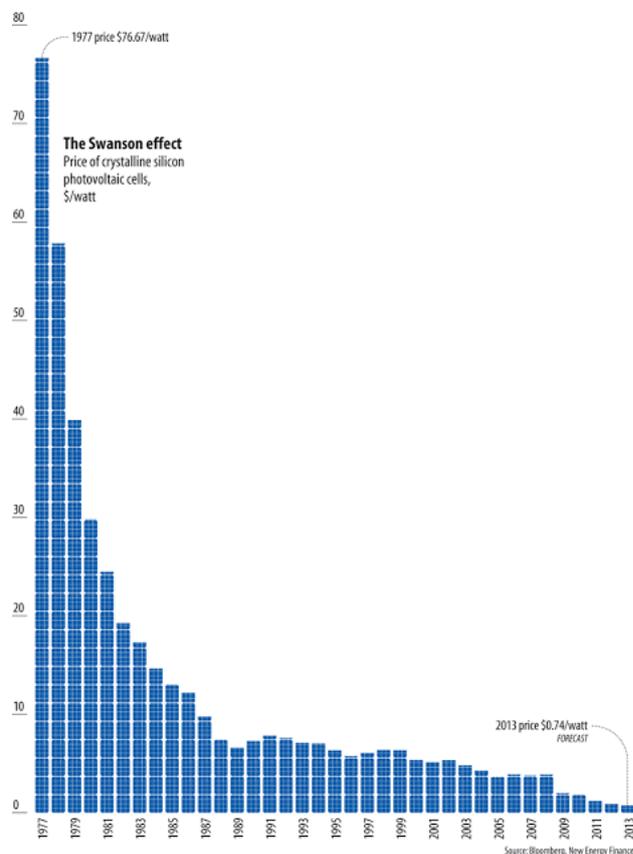
As of 2015, renewable energies are Europe's dominant power source, with a 29 percent share of the power mix. Nuclear power comes in second with 27 percent, coal (hard coal and lignite) amount to 26 percent. Among RES, wind power increased significantly by more than 50 terawatt hours to 307 terawatt hours in total. Hydropower produced much less due to less precipitation.

Three key trends in European power production have emerged in 2010-2015: gas and nuclear power are losing ground, renewables are on the rise while coal is in 2015 back on 2010 levels. From 2010 to 2015, gas demand fell by more than a third, while renewables increased by 35.9 percent. Nuclear power production decreased slightly (-6.3 percent) and, following a slight decrease in 2014, coal (hard coal and lignite) returned to the 2010 level in 2015.

En 2014, el total de potencia renovable instalada en el mundo superó por primera vez a la potencia instalada proveniente de fuentes no renovables. De hecho, las previsiones de la

Agencia Internacional de la Energía apuntan a que la ESF será la fuente principal de producción de energía para mediados de este siglo

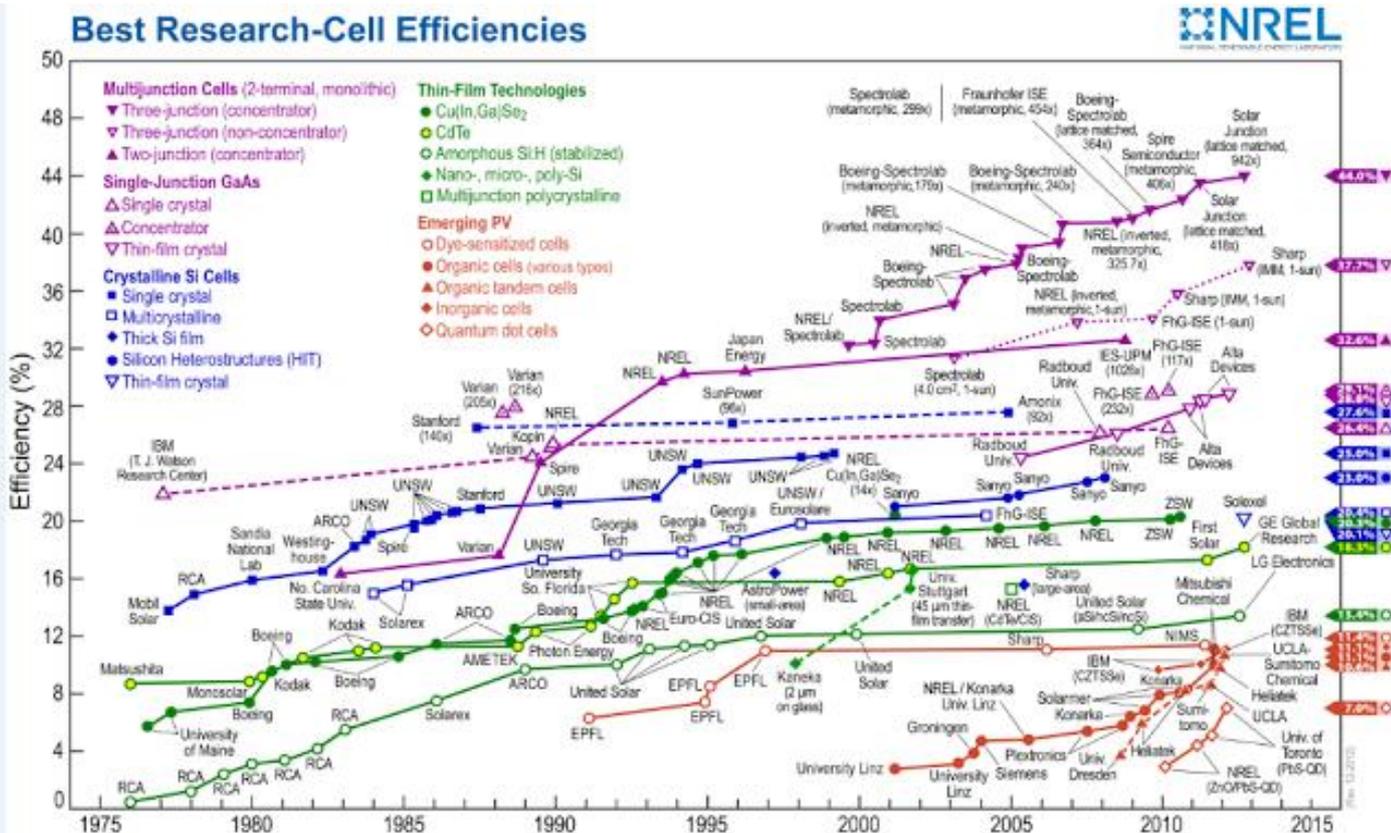
Como puede verse en el siguiente gráfico, en el año 1977 el coste de los paneles era de 76,67 \$/Wp, en cambio en 2013 el precio es de 0,74\$/Wp = 0,56 €/Wp que hace muy rentable el uso de esta tecnología.



Según un estudio del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts) se afirma que se está desarrollando la tecnología para conseguir placas a un coste de 0,52\$/Wp = 0,39 €/Wp, esto haría que la generación fotovoltaica, en determinadas zonas de los USA, sería competitivo con la generación eléctrica usando carbón o "shale gas", incluso sin captura de CO₂, y por supuesto aún más rentable en el caso de Europa, pues los precios de los combustibles fósiles son más altos que en USA.

Quizás en la actualidad, parte del efecto de la bajada del precio de las placas solares FV no es sólo debido a las mejoras en eficiencia, de tecnología y a la economía de escala, sino que hay un exceso de oferta de las mismas respecto a la demanda, no obstante la tendencia parece que va a seguir a la baja y no se espera, que haya una subida del precio de las mismas, ya que se trata de un mercado maduro, con muchos participantes y que no se deja de invertir en nuevos desarrollos tecnológicos que lo hacen aún más interesante.

En la siguiente figura se puede ver la evolución de la eficacia energética de las placas; se aprecia la misma tendencia creciente de su rendimiento por unidad de radiación solar incidente. Fuente: National Renewable Energy Laboratory.



En la actualidad existen células fotoeléctricas de laboratorio que llegan al 44 % de eficiencia, aunque de momento y debido a su coste prohibitivo, no son las que están actualmente en uso de forma generalizada, cuya eficiencia están en el entorno del 11%-17%, no obstante los desarrollos continúan, tanto del lado del abaratamiento del coste como en el de la mejora de la eficiencia de las mismas.

Así pues el desarrollo y la mejora, tanto de la eficiencia como de los costes, de las células fotovoltaicas, no va a dejar de mejorar en los próximos años, y forma parte de la adaptación necesaria de nuestra sociedad a un futuro de mucho menor consumo de combustibles fósiles, tanto por su progresivo agotamiento y precio cada vez más elevado, como por que es imprescindible bajar las emisiones de CO₂ si queremos evitar una catástrofe climática a escala global.

El proceso de abaratamiento de la ESF es irreversible, ya que al ser una apuesta decidida por parte de los países más industrializados del planeta, la economía de escala que generan es un factor determinante en el abaratamiento de precios. Un reciente informe del Fraunhofer Institut for Solar Energy sitúa los precios esperados para la ESF en 0,04-0,06 €/kWh para 2025 y en 0,02-0,04 €/kWh para 2050.

La potencia solar fotovoltaica instalada acumulada en el mundo hasta finales de 2014 fue de 177.000 millones de vatios (MW); los países que tienen más potencia instalada se muestran en la siguiente tabla:

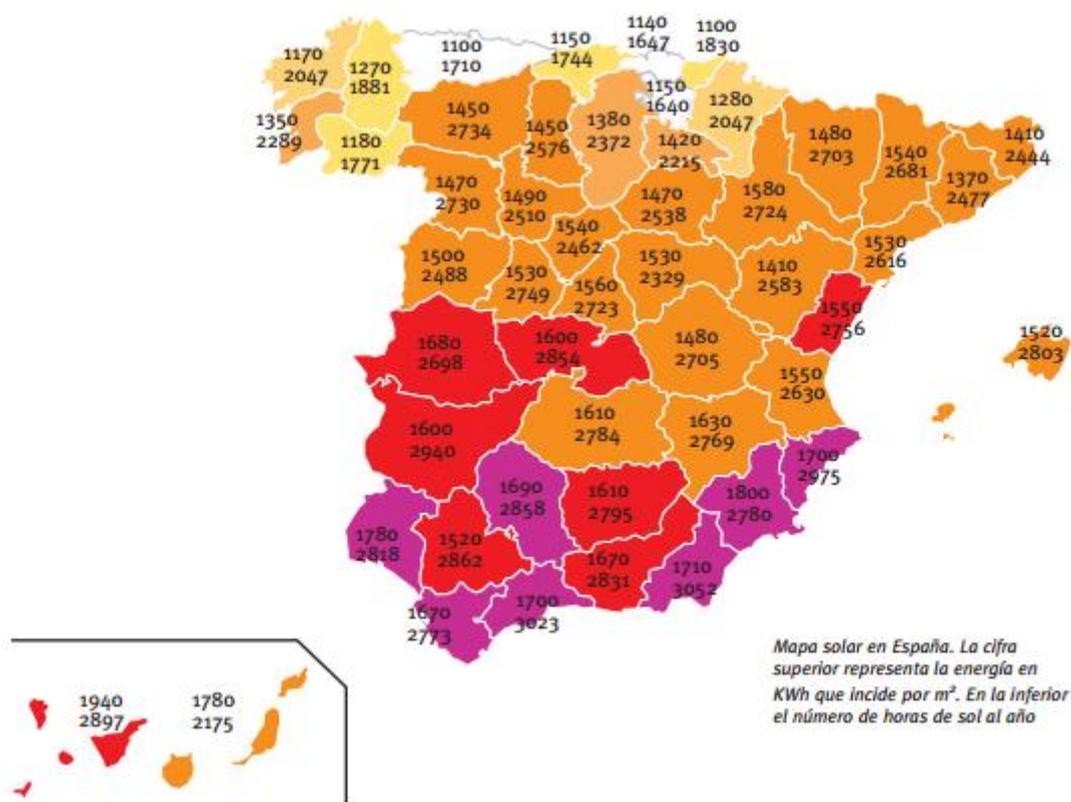
Países con más potencia fotovoltaica instalada al final de 2014 (en MW)

1.		Germany	38,200
2.		China	28,199
3.		Japan	23,300
4.		Italy	18,460
5.		United States	18,280
6.		France	5,660
7.		Spain	5,358
8.		UK	5,104
9.		Australia	4,136
10.		Belgium	3,074

España tiene ante sí un amplio potencial de desarrollo de energía solar, con una media de 2.500 horas de sol aseguradas al año. La poca nubosidad, la baja humedad ambiental, el clima seco y la incidencia de los rayos solares, hacen que nuestro país obtenga unos valores de radiación directa envidiables.

Aún así, existen evidentes diferencias entre las distintas comunidades españolas. Según los datos disponibles, existe un gran contraste entre las comunidades del Cantábrico, que rondan las 1.700 horas de sol al año, y las mediterráneas, que alcanzan las 2.750 horas de sol anuales. Estas diferencias están motivadas por la presencia de varias zonas climáticas en el interior de la Península Ibérica, lo que explica porqué algunas zonas del norte de España reciben menos horas de sol que incluso regiones del centro de Europa, como Viena, con 1.890 horas de sol al año.

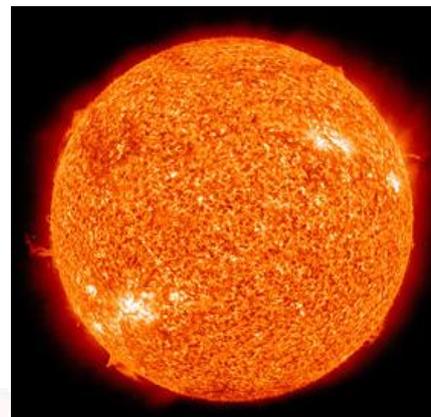
Las provincias del sur de Andalucía y Canarias son las que concentran mayor número de horas de sol anuales, alcanzando las 3.000. Teniendo en cuenta que en la actualidad no se aprovecha ni el 10% de la energía que nos ofrece el Sol, las posibilidades de desarrollo son realmente espectaculares.



Fuente IDAE El sol fuente inagotable de energía

2 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.

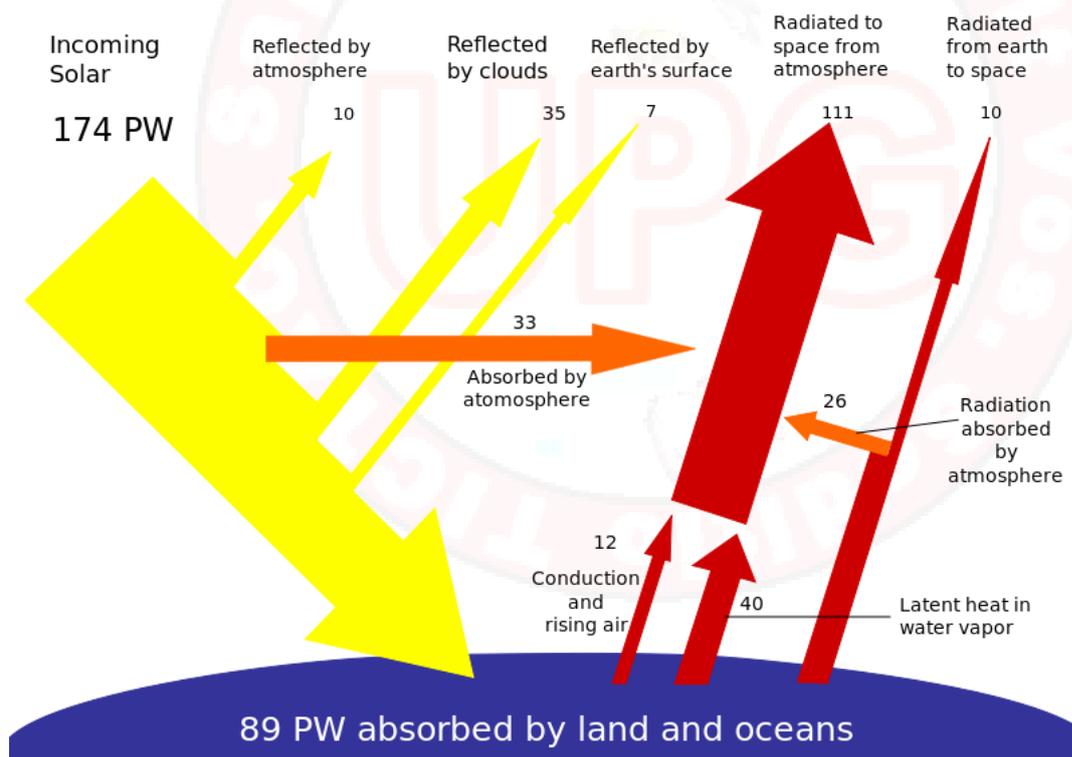
La energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la denominada radiación solar. El espectro de la radiación solar está compuesto por:

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.



La radiación es aprovechable en sus componentes directos y difusos, o en la suma de ambos. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La bóveda celeste diurna emite la radiación difusa debido a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas las direcciones.

La irradiancia directa normal (o perpendicular a los rayos solares) fuera de la atmósfera, recibe el nombre de constante solar y tiene un valor medio de 1366 W/m^2 (que corresponde a un valor máximo en el perihelio de 1395 W/m^2 y un valor mínimo en el afelio de 1308 W/m^2).

La radiación absorbida por los océanos, las nubes, el aire y las masas de tierra incrementan la temperatura de éstas. El aire calentado es el que contiene agua evaporada que asciende de los océanos, y también en parte de los continentes, causando circulación atmosférica o convección. Cuando el aire asciende a las capas altas, donde la temperatura es baja, va disminuyendo su temperatura hasta que el vapor de agua se condensa formando nubes. El calor latente de la condensación del agua amplifica la convección, produciendo fenómenos como el viento, borrascas y anticiclones. La energía solar absorbida por los océanos y masas terrestres mantiene la superficie a $14 \text{ }^\circ\text{C}$. Para la fotosíntesis de las plantas verdes la energía solar se convierte en energía química, que produce alimento, madera y biomasa, de la cual derivan también los combustibles fósiles.



Se estima que la energía total que absorben la atmósfera, los océanos y los continentes puede ser de 3 850 000 exajulios por año. En 2002, esta energía en una hora equivalía al consumo global mundial de energía durante un año. La fotosíntesis captura aproximadamente 3000 EJ por año en biomasa, lo que representa solo el 0,08 % de la energía recibida por la Tierra. La cantidad de energía solar recibida anual es tan vasta que equivale aproximadamente al doble de toda la energía producida jamás por otras fuentes de energía no renovable como son el petróleo, el carbón, el uranio y el gas natural.



2.1 Radiación solar

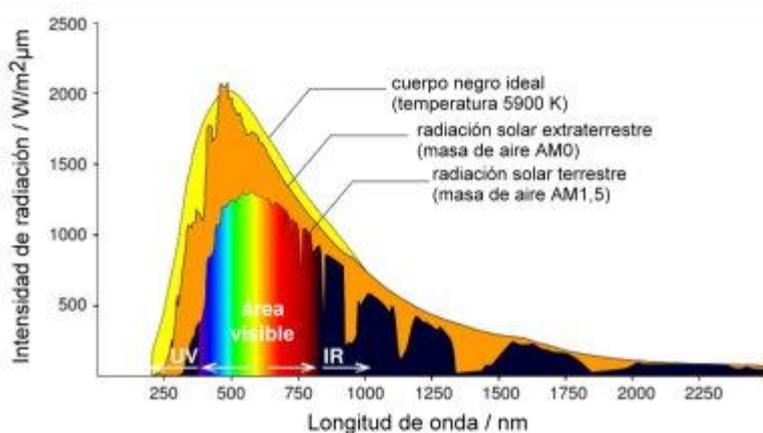
La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. La energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la radiación solar.

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.

La radiación del Sol corre a una velocidad increíble de 300.000 km/s (velocidad luz) por el espacio y recorre una distancia de 150 millones de kilómetros del Sol a la Tierra en aproximadamente 8 minutos.



Esta figura muestra el espectro original de la radiación solar idealizada (amarillo), en el tope superior de la atmósfera (naranja) y en la superficie terrestre después de ser modificada por la atmósfera (multicolor, negro). Las áreas negras representan la luz, que no es visible por nuestros ojos. La energía de la radiación disminuye de izquierda a derecha.

© Wikimedia Creative Commons Lincence

El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro, el cual emite energía siguiendo la ley de Planck a la temperatura ya citada. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas son absorbidas por los gases de la atmósfera. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la potencia que por unidad de superficie alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m^2 .

2.2 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: