

Capítulo 2. EL POTENCIAL DE LA RADIACIÓN SOLAR

2.1 CARACTERIZACIÓN SOLAR

2.1.1 El Sol

El Sol es la estrella que pertenece a nuestro Sistema Solar. Su origen al igual que la Tierra fue un conjunto de gases incandescentes que al girar vertiginosamente provocó que los gases más pesados se fueran al centro y los más livianos al exterior. Su energía procede de la transformación constante en su núcleo que convierte átomos de hidrógeno a átomos de helio. El astro solar es una gigantesca bola de gas a la que la Tierra, al igual que el resto de cuerpos del Sistema Solar, se encuentra íntimamente ligada. Pequeños cambios en las propiedades físicas del Sol pueden tener, y de hecho han tenido, efectos enormes en el clima y la vida en nuestro planeta.

Este gran astro se formó aproximadamente hace 4,650 millones de años y podemos decir que tiene combustible para 5,000 millones más. Actualmente el Sol se encuentra en la fase de plena actividad, en la que seguirá quemando hidrógeno de manera estable unos 5,000 millones de años más.

2.1.2 Características Físicas del Sol¹

En el siguiente cuadro recopilamos algunos de los datos más importantes sobre el Sol:

CARACTERÍSTICA	UNIDADES
Diámetro	1,392,000 km
Superficie	$6.09 \times 10^{12} \text{ km}^2$
Volumen	$1.41 \times 10^{27} \text{ km}^3$
Masa	$1.989 \times 10^{27} \text{ kg}$
Densidad	1411 kg/m^3
Gravedad en la superficie	274 m/s^2
Temperatura de la superficie	$6 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$
Luminosidad	$3,827 \times 10^{26} \text{ W}$

Tabla 2.1: Características físicas del Sol.
Fuente: <http://www.solarviews.com/span/sun>.

¹ *Energía Solar Térmica Proyecto RES & RUE Dissemination*

2.1.3 Composición y estructura del Sol²

El Sol posee una forma esférica, y a causa de su lento movimiento de rotación, tiene también un leve achatamiento polar, como en cualquier cuerpo de masa considerable toda la materia que lo constituye es atraída hacia el centro del objeto por su propia fuerza gravitatoria.

Como ya lo mencionamos antes, el Sol es una gran esfera de gases incandescentes, pero se cree que su porción central o núcleo, se encuentra en estado líquido.

En la siguiente tabla mostramos la distribución de los elementos que conforman la fotosfera:

ELEMENTO	PORCENTAJE
Hidrógeno	74.46 %
Helio	24.85 %
Oxígeno	0.77 %
Carbono	0.29 %
Hierro	0.16 %
Neón	0.12 %
Nitrógeno	0.09 %
Silicio	0.07 %
Magnesio	0.05 %
Azufre	0.04 %

Tabla 2.2: Composición de la fotosfera solar.

Fuente: <http://www.solarviews.com/span/sun>.

Como podemos observar en la tabla anterior, el hidrógeno es el elemento que predomina, perteneciéndole el 73 % de la masa total del Sol (el hidrógeno es el elemento más ligero). El helio es el segundo elemento, ocupa casi el 24.85 % de la masa del Sol. A todos los demás elementos restantes, le corresponde algo más del 1%.

² <http://www.solarviews.com/span/sun>.

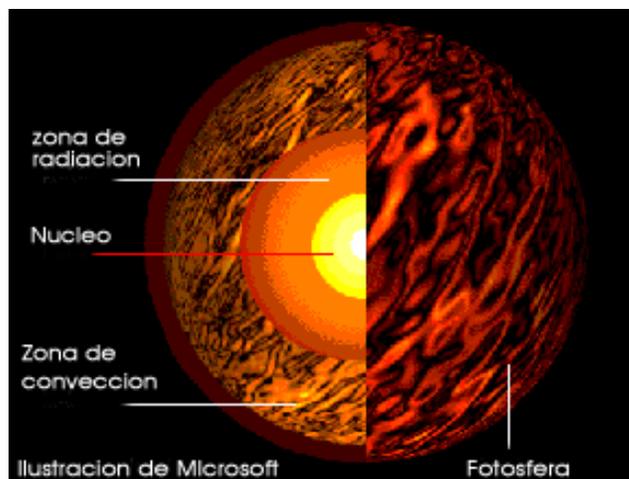


Figura 2.1: Estructura del Sol.

Fuente: <http://www.instalacionenergiasolar.com/energia/radiacion-solar.html>

2.1.4 Radiación Solar³

La radiación solar la podemos definir como el flujo de energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas que permite la transferencia de energía solar a la superficie terrestre. Estas ondas electromagnéticas son de diferentes frecuencias y aproximadamente la mitad de las que recibimos están entre los rangos de longitud de onda de 0.4 [μm] y 0.7 [μm], y pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que conocemos como luz visible. De la otra mitad, la mayoría se sitúa en la parte infrarroja del espectro y una pequeña parte en la ultravioleta.

2.1.4.1 Espectro Solar⁴

A pesar de la compleja estructura del Sol, para el aprovechamiento de su energía se puede adoptar un modelo mucho más simplificado. Así, se considera el Sol como un cuerpo negro que radia energía a la temperatura de 5780 °K, ya que su distribución espectral es muy similar a la de dicho cuerpo negro para el rango de longitudes de onda típico de los procesos térmicos y foto térmicos.

La luz visible, ya sea de origen solar, o generada por un foco incandescente o fluorescente, está formada por un conjunto de radiaciones electromagnéticas que está contenida dentro de un determinado rango de frecuencias, al que se lo denomina espectro visible. La intensidad de la radiación luminosa varía con la frecuencia.

³ Esta sección está basada en el programa (2000) y la publicación en línea *Renewable Energy in Latin América and the Caribbean* del Center for Renewable Energy and Sustainable Technology (CREST).

⁴ *Radiación Solar*, Prof. Rafael Martín Lamaison 5 de Marzo de 2004.

En la siguiente imagen podemos observar el espectro de la luz solar con los rangos de frecuencia y longitud de onda que abarca:

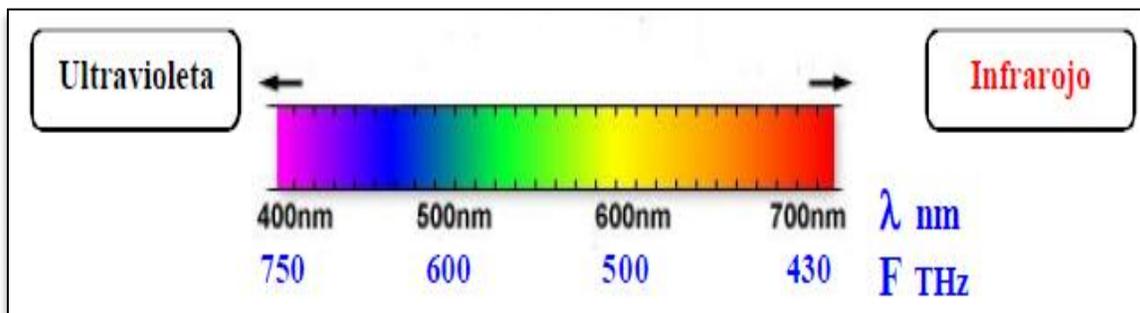


Figura 2.2: Rango de frecuencias y longitud de onda del espectro solar.

Fuente: Fuente: IDEAM.

- Las ondas de baja frecuencia del espectro solar tienen el nombre de **“Radiación Infrarroja”**. La fuente primaria de la radiación infrarroja es el calor o radiación térmica.
- Las ondas de alta frecuencia del espectro solar las llamamos **“Radiación Ultravioleta”**, estas hacen posible el proceso de fotosíntesis o el bronceado de la piel.

2.1.4.2 Unidades de medida de la radiación solar.⁵

Las cantidades de radiación son expresadas generalmente en términos de exposición radiante o irradiancia, siendo esta última una medida del flujo de energía recibida por unidad de área en forma instantánea como energía/área-tiempo y cuya unidad es el Watt por metro cuadrado (W/m^2). Un Watt es igual a un Joule por segundo.

La exposición radiante es la medida de la radiación solar, en la cual la radiación es integrada en el tiempo como energía/área y cuya unidad es el kWh/m^2 por día (si es integrada en el día) ó MJ/m^2 por día.

Por ejemplo, 1 minuto de exposición radiante es una medida de la energía recibida por metro cuadrado sobre un periodo de un minuto. Sin embargo, un minuto de exposición radiante = irradiancia media (W/m^2) x 60 (s) y tiene unidades de Joule por metro cuadrado (J/m^2).

Finalmente, una hora de exposición radiante es la suma de los 60 minutos de exposición radiante.

Otras magnitudes radiométricas:

⁵ Radiación Solar, Prof. Rafael Martín Lamaison 5 de Marzo de 2004

Unidad	Equivalencia
1 Watt (W)	1Joule/segundo (J/s)
1 W*h	3,600 J
1 KW*h	3.6 MJ
1 W*h	3.412 Btu
1 Caloría	0.001163 W*h
1 Caloría	4.187 Joule
1 cal/cm ²	11.63 W*h/m ²
1 MJ/m ²	0.27778 kW*h/m ²
1 MJ/m ²	277.78 W*h/m ²
1 MJ/m ²	23.88 cal/cm ²
1BTU	252 calorías
1BTU	1.05506 KJ
1 cal/(cm ² *min)	60.29 MJ/m ² por día

Tabla 2.3: Conversiones útiles para radiación.

Fuente: Atlas de radiación solar de Colombia, www.upme.com

2.1.4.3 Constante solar

Para los fines de nuestra investigación es importante conocer la magnitud exacta de la potencia de la radiación solar y gracias a la constante solar la podemos conocer.

La constante solar es la cantidad total de energía solar que atraviesa en un minuto una superficie perpendicular a los rayos incidentes con área de 1 cm², que se encuentra a la distancia media existente entre la Tierra y el Sol.

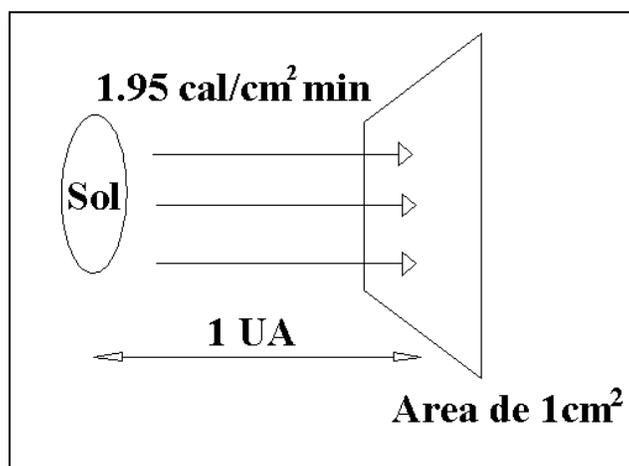


Figura 2.3: Concepto de constante solar.

Fuente: Realizado con base a la información de <http://personales.ya.com/casanchi/ast/solar001.gif>.

El valor medio de la constante solar es alrededor de $2 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$. Sin embargo, esta cantidad no es constante, ya que parece ser que varía un 0.2 % en un periodo de 30 años.

La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera. Expresada en otras unidades la constante solar es igual:

$$C = 1,353 \text{ W/m}^2$$

En la superficie de la Tierra el flujo de radiación solar disminuye debido a la absorción y dispersión en la atmósfera terrestre, y es, por término medio de $800 \text{ a } 900 \text{ W/m}^2$.

Es muy importante controlar en cada momento el valor de la constante solar, pues se cree que solo una modificación del 1% de la misma podría ocasionar una variación de uno a dos grados en la temperatura de nuestro planeta. Nuestra supervivencia puede depender de la capacidad que tengamos de estar preparados y de poder prevenir una hipotética variación importante de la constante solar.

2.1.4.4 Irradiancia Solar

La irradiancia es la utilizada para describir el valor de la potencia luminosa (energía/unidad de tiempo) incidente en un determinado instante por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. Sus unidades de medida son:

$$\text{W/m}^2$$

2.1.4.5 Irradiación Solar

La irradiación también conocida como insolación se refiere a la cantidad de energía solar recibida durante un determinado periodo de tiempo.

Sus unidades de medida son:

$$\text{Wh/m}^2$$

Por su diferente comportamiento, la irradiación la podemos separar en tres componentes: la directa, la difusa y la reflejada.

- **Directa**: Es la que se recibe directamente desde el sol en línea recta, sin que se desvíe en su paso por la atmósfera. Es la mayor y la más importante en las aplicaciones fotovoltaicas.
- **Difusa**: Es la que se recibe del sol después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro aún de día, como sucede por ejemplo en la luna.
- **Reflejada**: Es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

$$\text{Irradiancia Solar Global} = \text{Directa} + \text{Difusa} + \text{Reflejada}$$

La irradiación Global es la radiación total incidente sobre una superficie.

2.2 CAUSAS DE LAS VARIACIONES DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA TIERRA⁶

La Tierra en su desplazamiento por la órbita solar realiza dos movimientos principales, el de rotación sobre su propio eje y el de traslación alrededor del Sol, que determinan la cantidad de luz y calor que llega a cada lugar de la superficie terrestre a lo largo del día y del año.

2.2.1 Distancia Tierra-Sol

La Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica, con el Sol ubicado en uno de sus focos, la cantidad de radiación solar que llega a la Tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al Sol. Por lo cual un valor preciso de la distancia Tierra-Sol r_0 se denomina "Unidad astronómica":

$$\begin{aligned} 1 \text{ AU} &= 1.496 \times 10^8 \text{ km.} \\ \text{Distancia Mínima Tierra-Sol} &= 0.983 \text{ AU} \\ \text{Distancia Máxima Tierra-Sol} &= 1.017 \text{ AU} \end{aligned}$$

Es conveniente expresar la distancia Tierra-Sol en un modelo matemático simple. Para muchas aplicaciones tanto tecnológicas como en ingeniería se puede aplicar la expresión de Duffie y Beckman desarrollada en 1980.

$$\rho^2 = \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 = \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \right]^{-1}$$

Donde:

r = Distancia a conocer Tierra-Sol.

r_0 = Distancia media Tierra-Sol.

ρ^2 = Recíproco del cuadrado del radio vector de la Tierra (factor de corrección de la distancia Tierra-Sol).

2.2.2 Declinación solar

El plano en el cual la tierra gira en torno al Sol se denomina plano eclíptico. La Tierra gira sobre sí misma alrededor de un eje denominado eje polar, El cual se encuentra inclinado aproximadamente 23.5° de la

⁶ Radiación Solar, Prof. Rafael Martín Lamaison 5 de Marzo de 2004

normal del plano denominado “plano eclíptico”. La rotación de la Tierra alrededor de este eje ocasiona los cambios diarios en la radiación solar que incide en el planeta Tierra y la posición de este eje relativo al Sol causa los cambios estacionales en la radiación solar. El ángulo entre el eje polar y la normal al plano eclíptico permanece sin cambios. Aunque, el ángulo que forma el plano ecuatorial y la línea que une los centros del Sol y la Tierra cambia cada día, de hecho cambia en cada instante. Este ángulo es llamado “Declinación Solar” y es representado por la letra griega δ . La declinación es cero en los equinoccios de Primavera y de Otoño (las noches y los días duran lo mismo). En el solsticio de Verano tiene un ángulo de aproximadamente $+23.5^\circ$ y en el solsticio de Invierno un ángulo de -23.5° .

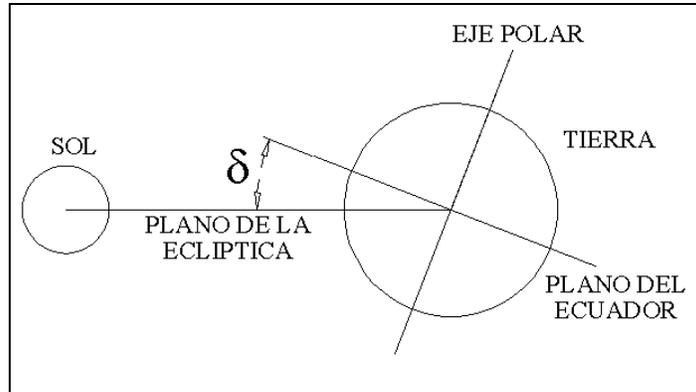


Figura 2.4: Declinación solar.

Fuente: Realizado con base a la información de <http://www.absoluterprotecsol.com/images/esfera-celeste.jpg>

Para la determinación del ángulo de declinación solar δ puede hacerse mediante la aplicación de modelos matemáticos aproximados, que dan su valor con diversos grados de precisión. Una de las expresiones matemáticas más importantes y la que citaremos en esta investigación es la fórmula de Perrin Brichambaut (1975), proporcionando el ángulo de la declinación solar en grados.

$$\delta = \sin^{-1} \left\{ 0.4 \sin \left[\frac{360}{365} (d_n - 82) \right] \right\}$$

$$(1 \leq d_n \leq 365)$$

2.2.3 Movimiento de Rotación

Cada 24 horas, la Tierra da una vuelta completa alrededor de un eje imaginario que pasa por los polos. Gira en dirección Oeste-Este, en sentido contrario al de las agujas del reloj. A este movimiento le llamamos Movimiento de Rotación. Este movimiento es causante de la sucesión de días y noches, La mitad del globo terrestre quedará iluminado, en dicha mitad es de día mientras que en el lado oscuro es de noche. En su movimiento de rotación, los distintos continentes pasan del día a la noche y de la noche al día.

2.2.4 Movimiento de Traslación

La traslación de la Tierra es el movimiento de este planeta alrededor del Sol. La Tierra en su viaje alrededor del Sol tarda en dar una vuelta completa 365 días y 6 horas, aproximadamente. Este denominado movimiento de traslación corresponde con el año solar.

El hecho de que la órbita terrestre sea elíptica hace variar la distancia entre la Tierra y el Sol en el transcurso de un año. A primeros de enero la Tierra alcanza su máxima proximidad al Sol y se dice que pasa por el perihelio. A principios de julio llega a su máxima lejanía y está en afelio. La distancia Tierra-Sol en el perihelio es de 142,700,000 kilómetros y la distancia Tierra-Sol en el afelio es de 151,800,000 kilómetros.

2.2.4.1 Las Estaciones, Equinoccios y Solsticios

El cambio de las estaciones a lo largo del año se produce al darse la particularidad de que el eje de rotación de la Tierra se encuentra inclinado respecto del plano de la órbita, esto hace que los rayos del Sol incidan de forma diferente a lo largo del año en cada hemisferio.

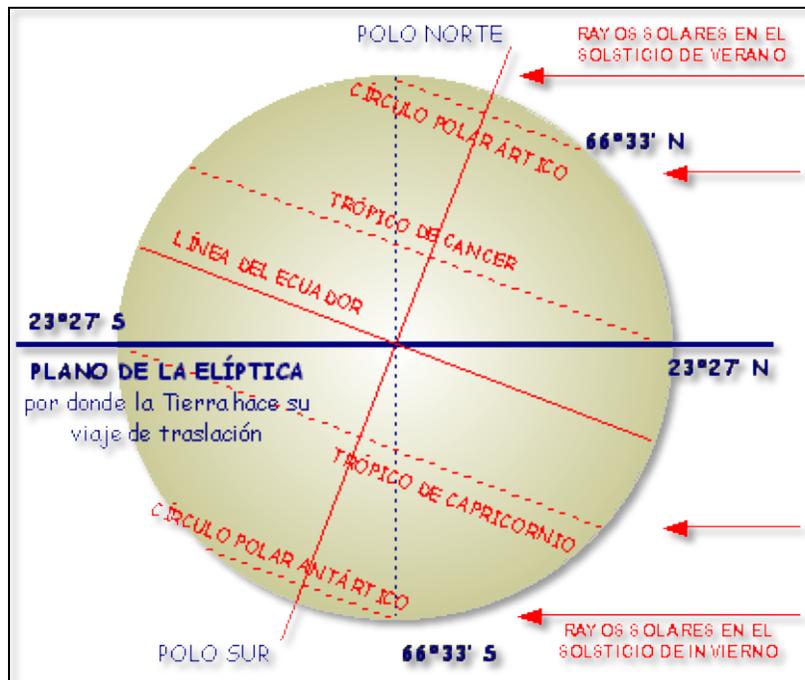


Figura 2.5: Esquema de las líneas imaginarias del planeta Tierra.

Fuente: <http://www.absoluterprotecsol.com/images/esfera-celeste.jpg>

Debido a este movimiento de traslación la Tierra pasa por cuatro momentos importantes durante su movimiento de traslación:

Capítulo 2. El potencial de la radiación solar

- **Solsticio de Verano:** Comienza el 21 de junio, el Hemisferio Norte se inclina hacia el Sol. Los días son más largos que las noches y los rayos del Sol inciden de forma más perpendicular, al situarse el Sol en la vertical del Trópico de Cáncer, iniciándose en este hemisferio la estación más calurosa, el verano. Sin embargo en el Hemisferio Sur se produce la situación contraria, iniciándose entonces el invierno.
- **Equinoccio de Otoño:** Comienza el 22 de septiembre, los días y las noches tienen igual duración en todo el planeta, al situarse el Sol en la vertical del Ecuador, comenzando el otoño en el Hemisferio Norte y la primavera en el Sur.
- **Equinoccio de Primavera:** Comienza el 21 de marzo, los días y las noches tienen igual duración en todo el planeta, al situarse de nuevo el Sol en la vertical del Ecuador, comenzando la primavera en el Hemisferio Norte y el otoño en el Hemisferio Sur.
- **En el Solsticio de Invierno,** 22 de diciembre, es el Hemisferio Norte el que tiene los días más cortos que las noches, a la vez que los rayos del Sol inciden de una forma más oblicua, al situarse el Sol en la vertical del Trópico de Capricornio, comenzando en este hemisferio la estación más fría, el invierno. En el Hemisferio Sur se produce la situación contraria, iniciándose entonces el verano.

En la siguiente imagen podemos observar el ciclo completo en el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, pasando por las cuatro estaciones durante los 365 días que tarda en completarse un año.

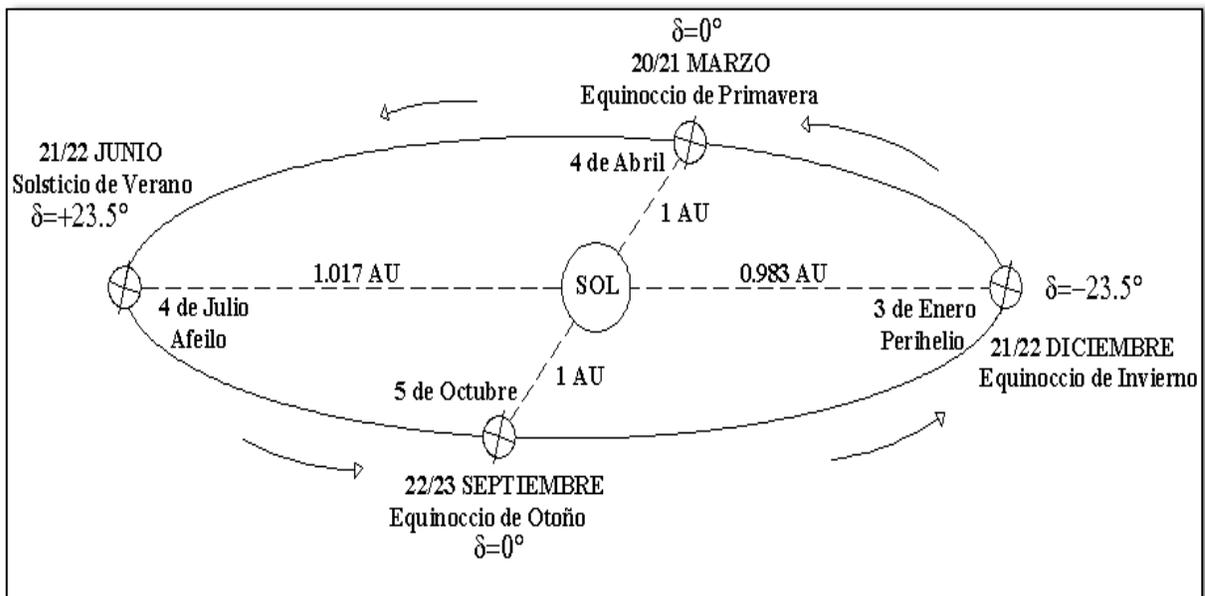


Figura 2.6: Movimiento de la Tierra respecto al Sol.

Fuente: <http://www.absoluterprotecsol.com/images/esfera-celeste.jpg>

2.2.5 Atenuación atmosférica de la radiación solar

La intensidad y frecuencias del espectro luminoso generado por el sol sufren alteraciones cuando la luz atraviesa la atmósfera. Ello se debe a la absorción, reflexión y dispersión de la radiación solar. Los gases presentes en la capa atmosférica actúan como filtros para ciertas frecuencias, las que ven disminuidas su intensidad o son absorbidas totalmente

- **Dispersión:** La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. La dispersión ocurre cuando un fotón afecta a un obstáculo sin ser absorbido cambiando solamente la dirección del recorrido de ese fotón.
- **Reflexión (Albedo):** La capacidad de reflexión o fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie se denomina *Albedo*. El albedo planetario es en promedio de un 30%. Esta energía se pierde y no interviene en el calentamiento de la atmósfera.
- **Absorción por moléculas de gases y partículas en suspensión:** La absorción de energía por un determinado gas tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura.

Como conclusión, se puede afirmar que la radiación total incidente sobre la superficie de la Tierra va a estar sujeta a variaciones, algunas previsible (diurnas y estacionales) y otras no previsible (las meteorológicas, particularmente el vapor de agua condensado en las nubes).

2.2.6 Coordenadas geográficas

Un punto sobre la esfera terrestre se puede situar utilizando el sistema de coordenadas geográficas, siendo éstas la **latitud**, que es el ángulo formado por la vertical a la Tierra en dicho punto y el plano del Ecuador, y la **longitud**, ángulo que forma el meridiano que pasa por dicho punto con el meridiano de Greenwich.

La latitud determina la inclinación con la que caen los rayos del Sol y la diferencia de la duración del día y la noche. Cuanto más directamente incide la radiación solar, más calor aporta a la Tierra.

Las variaciones de la insolación que recibe la superficie terrestre se deben a los movimientos de rotación (variaciones diarias) y de traslación (variaciones estacionales).

Las variaciones en latitud son causadas por la inclinación del eje de rotación de la Tierra. El ángulo de incidencia de los rayos del Sol no es el mismo en verano que en invierno siendo la causa principal de las diferencias estacionales. Cuando los rayos solares inciden con mayor inclinación calientan mucho menos porque el calor atmosférico tiene que repartirse en un espesor mucho mayor de atmósfera, con lo que se filtra y dispersa parte de ese calor.

La longitud geográfica es una de las coordenadas fundamentales que determinan en la Tierra la localización de un punto (la otra coordenada es la Latitud). La longitud es el ángulo formado entre el meridiano que pasa por el punto considerado y el meridiano fundamental de Greenwich elegido, por convención, como origen de esta coordenada geográfica. Se mide desde 0 grados a 180 grados al Este o al Oeste con respecto a Greenwich.

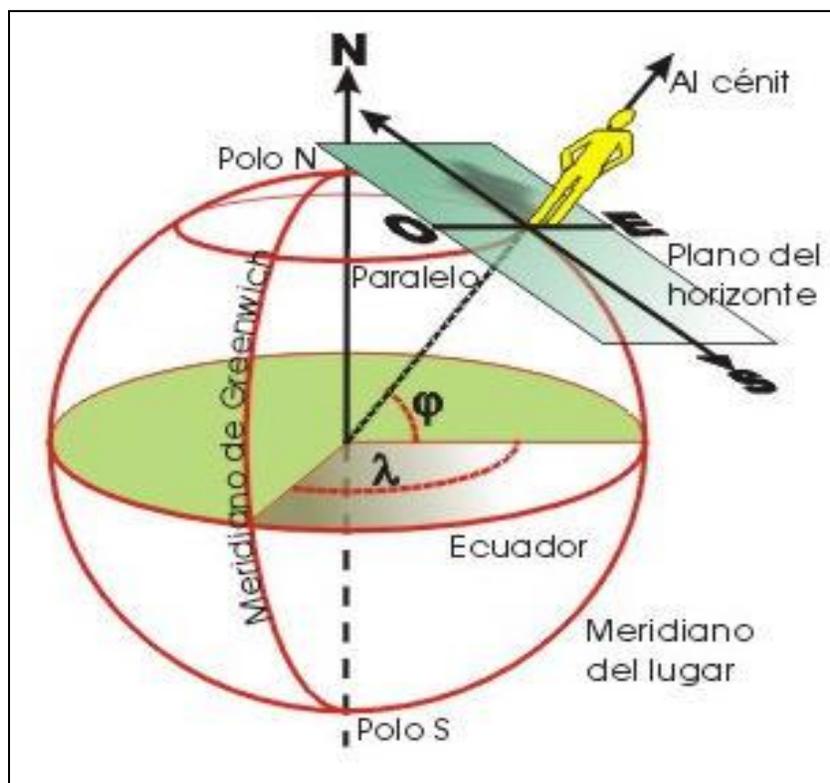


Figura 2.7: Representación gráfica de las coordenadas geográficas. Latitud y longitud de un punto sobre la esfera terrestre.

Fuente: <http://img.genciencia.com/2008/10/p.jpg>

2.2.7 Posicionamiento del Sol respecto a la superficie terrestre

Desde el punto de vista de un observador sobre la superficie de la Tierra, el Sol describe un arco desde su salida (orto) hasta su puesta (ocaso). Por definición, a mitad de su recorrido, es decir, en el mediodía solar, el Sol pasa por el meridiano local.

Se denomina cenit a la vertical desde un punto cualquiera de la Tierra al corte con la hipotética trayectoria de la esfera solar.

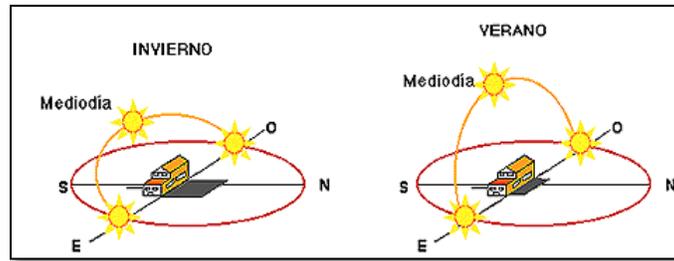


Figura 2.8: Movimiento aparente del sol en el cielo en función de la hora del día y la época del año.

Fuente: www.ideam.gov.co

La posición del Sol se puede referir en dos sistemas de coordenadas distintos, ambos centrados en el observador: coordenadas horarias (declinación, N_s , y ángulo horario, O_s) y coordenadas horizontales (altura solar, h_s , y azimut, a_s). Estas coordenadas determinan el vector solar, entendido éste como el vector con origen en el observador y extremo en el Sol. Del vector solar se volverá a hablar al calcular el ángulo de incidencia en un colector cilindro parabólico.

2.2.7.1 Relaciones geométricas entre los rayos solares y la superficie terrestre⁷

Las relaciones geométricas entre los rayos solares, que varían de acuerdo con el movimiento aparente del sol, y la superficie terrestre, se describen a través de varios ángulos que mostramos a continuación:

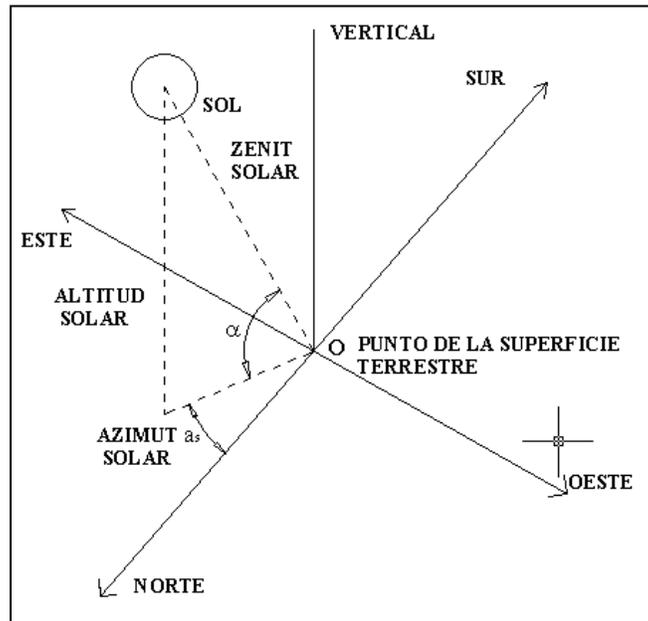


Figura 2.9: Representación de los ángulos α y a_s .

Fuente: www.ideam.gov.com

⁷ Radiación Solar, Prof. Rafael Martín Lamaison 5 de Marzo de 2004.

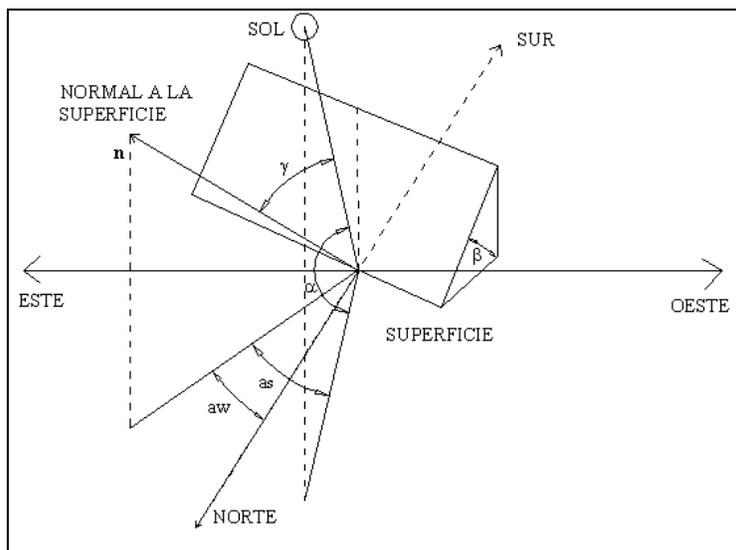


Figura 2.10: Coordenadas de orientación de la superficie, α_w y β , y el ángulo.

Fuente: Fuente: www.ideam.gov.com

- **Ángulo de incidencia (γ):** Ángulo formado entre los rayos del sol y la normal a la superficie de captación.
- **Ángulo acimutal de la superficie (α_w):** Ángulo entre la proyección de la normal a la superficie en el punto horizontal y la dirección sur-norte (para localizaciones en el hemisferio norte) o norte-sur (para localizaciones en el hemisferio sur). El desplazamiento angular se toma a partir del sur o norte dependiendo de si estamos en el hemisferio sur-norte o norte-sur.
- **Ángulo acimutal del sol (α_s):** Ángulo entre la proyección del rayo solar en el plano horizontal y la dirección sur-norte (para localizaciones en el hemisferio norte) o norte-sur (para localizaciones en el hemisferio sur) obedece a la misma convención mencionada anteriormente.
- **Altura solar (α):** Ángulo comprendido entre el rayo solar y la proyección del mismo sobre un plano horizontal.
- **Inclinación (β):** Ángulo entre el plano de la superficie a considerar y la horizontal. En el intervalo $0 < \beta < 90^\circ$ la superficie ve hacia arriba, mientras que en el intervalo $90 < \beta < 180$ la superficie ve hacia abajo. Una azotea horizontal tendrá $\beta = 0^\circ$, mientras que para una pared vertical $\beta = 90^\circ$.
- **Ángulo horario del sol u hora angular (W):** Desplazamiento angular este-oeste del sol, a partir del meridiano local, y debido al movimiento de rotación de la tierra. Así, cada hora corresponde a un desplazamiento de 15° . Se adapta como convención valores positivos para el período de la mañana con cero a las 12:00 hs.

2.2.7.2 Tiempo solar

El tiempo solar es una medida del tiempo fundamentada en el movimiento aparente del Sol sobre el horizonte del lugar. Toma como origen el instante en el cual el Sol pasa por el Meridiano, que es su punto más alto en el cielo, denominado mediodía, al cual se le asigna el valor de 12. Sin embargo, el Sol no tiene un movimiento regular a lo largo del año, y por esta razón el tiempo solar se divide en dos categorías:

➤ *El tiempo solar aparente o verdadero (TSV)*

Está basado en el día solar aparente, el cual es el intervalo entre dos regresos sucesivos del Sol al meridiano. Puede ser medido con un reloj de sol, y se corresponde con el amanecer, el mediodía o el anochecer: se basa en lo que es posible observar de manera directa. El tiempo solar no coincide con el tiempo local. Por lo tanto, es necesario corregir el tiempo aplicando dos correcciones.

- a) Corrección debida a la diferencia entre la longitud del meridiano del observador y el meridiano sobre el cual se basa la hora local estándar (en la Ciudad de México la hora estándar se basa en el meridiano 99°09' W). El Sol toma cuatro minutos para realizar un desplazamiento aparente de 1° de longitud.
- b) Corrección debida a las perturbaciones en la velocidad de rotación de la Tierra.

El TSV se determina mediante la ecuación:

$$TSV = TSM + 4(L_s - L_l) + E_t$$

Donde:

TSM = Tiempo solar medio.

E_t = Ecuación de tiempo.

L_s = Longitud geográfica del meridiano de referencia del país.

L_l = Longitud geográfica del meridiano del lugar (en grados sexagesimales).

➤ *El tiempo solar medio (TSM)*

Está basado en un sol ficticio que viaja a una velocidad constante a lo largo del año, y es la base para definir el día solar medio. La duración de un día solar aparente varía a lo largo del año. Esto se debe a que la órbita terrestre es una elipse, con lo cual la Tierra en su movimiento de traslación se mueve más veloz cuando se acerca al Sol y más despacio cuando se aleja de él. Debido a esto, en el Hemisferio Norte los días solares aparentes son más cortos en los meses de marzo y septiembre que en los meses de junio o diciembre, produciéndose el fenómeno inverso en el Hemisferio Sur. La diferencia entre el

tiempo solar aparente y el tiempo solar medio, que en ocasiones llega a ser de 15 minutos, es llamada Ecuación de tiempo.

2.2.7.3 Coordenadas horarias

La declinación (N_s) es la posición angular del Sol en el mediodía solar cuando el Sol pasa por el meridiano local respecto al plano del ecuador terrestre.

Como ya lo habíamos mencionado antes el valor de este ángulo se suele tomar cada día al mediodía solar. Esto es debido a que el eje de rotación de la Tierra está inclinado un ángulo de 23.45° respecto al eje del plano que contiene la órbita que describe alrededor del Sol y de ahí que el valor de la declinación varíe entre $\pm 23.45^\circ$ a lo largo del año.

La declinación es una función continua del tiempo. La tasa de cambio máxima de la declinación es en los equinoccios, con un valor aproximado de 0.5° /día.

El ángulo horario (O_s) es el desplazamiento angular del Sol (hacia el este u oeste) respecto al meridiano local debido a la rotación de la Tierra, sobre su eje, a 15° /hora.

- Por la mañana: $O_s < 0$.
- Por la tarde: $O_s > 0$.

2.2.7.4 Coordenadas horizontales

La altura solar (h_s) o ángulo de elevación del Sol por encima del horizonte es el ángulo entre la horizontal y la dirección de la radiación directa. Es el ángulo complementario del ángulo cenital, por lo que su cálculo se realiza aplicando la propiedad de que el coseno de un ángulo es igual al seno de su complementario. El ángulo cenital es una particularización del ángulo de incidencia.

El azimut solar (a_s) o ángulo azimutal solar es el ángulo entre la proyección sobre un plano horizontal de la radiación directa y el meridiano local. Se toma como origen de azimut el mediodía solar. Para el hemisferio norte, el azimut es positivo si el colector está orientado hacia el oeste, negativo si el colector está orientado hacia el este. La ecuación (2.6) muestra la variación del azimut solar.

$$-180^\circ \leq a_s \leq 180^\circ$$

- Si está orientado hacia el este $a_s < 0^\circ$.
- Si está orientado hacia el oeste $a_s > 0^\circ$.
- Y en el sur $a_s = 0^\circ$.

2.3 DATOS DE RADIACIÓN SOLAR EN MÉXICO Y EL MUNDO

La radiación solar transporta energía, que calienta la Tierra y es la fuerza impulsora que está detrás de nuestro clima y tiempo atmosférico.

Aunque cerca del Ecuador la intensidad del Sol se siente con mucha más fuerza que en las regiones polares, a todos los lugares de la Tierra llega la misma cantidad total de luz cada año; los lugares próximos al Ecuador reciben 12 horas diarias de luz anuales y en los círculos polares ártico y antártico se compensan los períodos de dos semanas sin luz en invierno con períodos veraniegos de igual duración en los que la luz dura todo el día.

De toda la radiación Solar, solo el 47% llega al planeta Tierra, de este porcentaje podemos desglosar los siguientes datos:

- 28 % es reflejada por las nubes.
- 5 % la absorben tanto nubes como polvo.
- 17 % La absorben los gases atmosféricos como el vapor de agua.
- 0.2 % la absorben las plantas.
- 21 % la absorbe la superficie terrestre.
- 26 % La absorbe el agua.

Del 47 % de la radiación Solar, que es la que llega a la Tierra, se reparte de la siguiente manera: un 40% a evaporación de agua, un 0,2% a la fotosíntesis de plantas y un 59,8% la absorben mares y océanos.

2.3.1 Mapa mundial de la radiación solar

El mapeado de la radiación solar media en el mundo, nos da una idea de qué zonas son las que reciben mayor radiación solar. Éstas se encuentran principalmente en la zona del ecuador, difuminándose hacia los polos, aunque entran en juego distintos factores como la nubosidad o las características geológicas del suelo, refractando esta mayor o menor radiación, contribuyendo al efecto invernadero y al aumento de la temperatura.

El mapa en la imagen de abajo es muy importante por dos cosas. Primero porque nos muestra en que parte del mundo se puede aprovechar mejor la energía solar. Y segundo, porque si la estudiamos un poco más a detalle podemos ver que la energía solar tiene un potencial más grande de la que nos imaginamos.

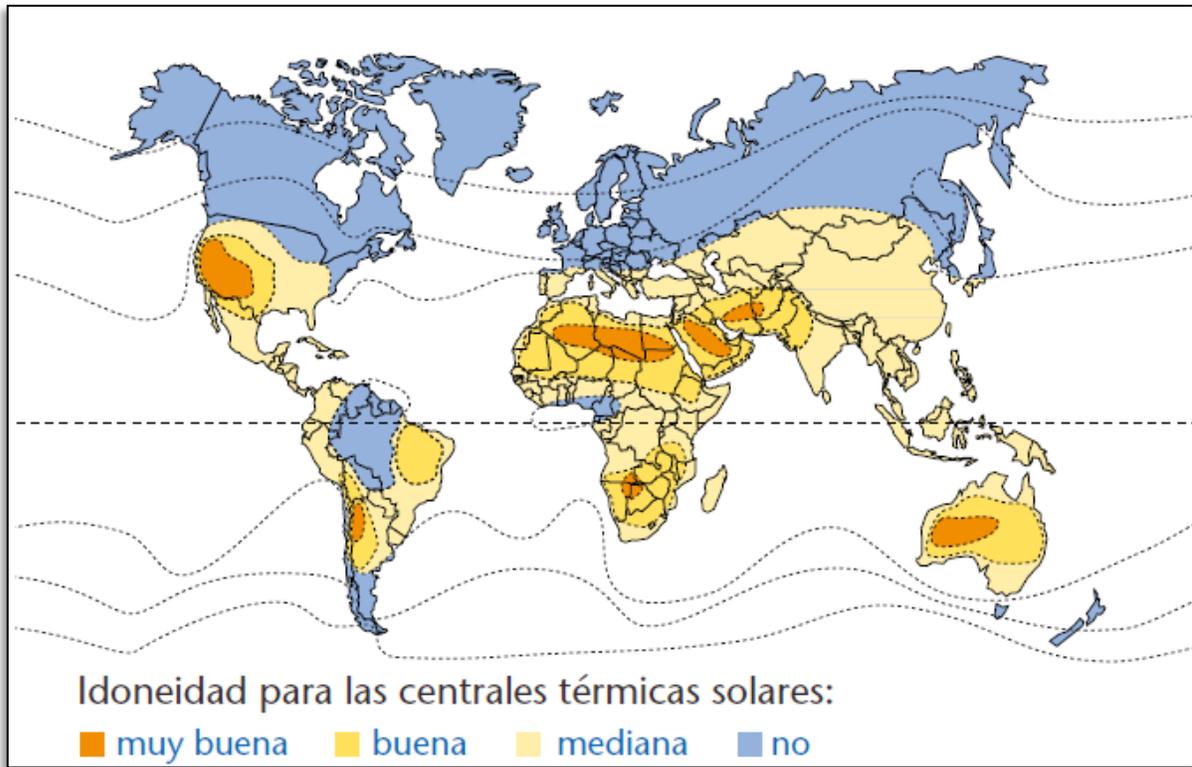


Figura 2.10: Mapa mundial de radiación solar.

Fuente: <http://tallersolar.com/img/mapa%20solar.JPG>

En este mapa podemos ver que México, Estados Unidos y algunos países de Sudamérica son los que cuentan con mayor potencial solar en todo el continente.

Por otro lado algunos países en donde menos radiación de energía solar hay es en donde actualmente más se está usando la energía solar. Por ejemplo, si vemos el mapa, Alemania está en color azul, lo que quiere decir que recibe menos de 150 W/m^2 de energía solar. Ahora imaginémonos cuanta energía se puede aprovechar en lugares en donde la radiación supera los 350 W/m^2 .

Ninguna ciudad europea supera a México en potencial solar. La capacidad instalada para producir electricidad a partir de energía solar de los alemanes es, por ejemplo, miles de veces más que la que tiene México (10,234 MW vs 16 MW). Irónico: siendo un país con un territorio 72% más pequeño que el nuestro, su capacidad de producción eléctrica a partir del Sol equivale a una sexta parte de toda nuestra capacidad de generación eléctrica instalada.

Estos datos dejan dos cosas claras: primero, que el potencial de luz solar que tenemos en México duplica el que tiene Alemania; y segundo, que todo ese potencial se queda literalmente en el aire, porque nuestra capacidad para recuperar la energía solar anda por los suelos.

2.3.2 Datos de radiación solar en México⁸

El sol está jugando un papel cada vez más importante en nuestra economía, y puede llegar a ser una fuente de empleos para nuestro país. Actualmente en México es posible hacer uso de la energía eléctrica generada por el uso de paneles fotovoltaicos o sistemas de concentración solar utilizando la radiación directa, y existen mecanismos concretos para lograr que la inversión sea rentable.

Considerando la capacidad energética del Sol, la cual perdurará durante millones de años, así como la privilegiada ubicación de México en el globo terráqueo, la cual permite que el territorio nacional destaque en el mapa mundial de territorios con mayor promedio de radiación solar anual con índices que van de los 4.4 kWh/m² por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m² por día en el norte del país, resulta fundamental la adopción de políticas públicas que fomenten el aprovechamiento sustentable de la energía solar en nuestro país.

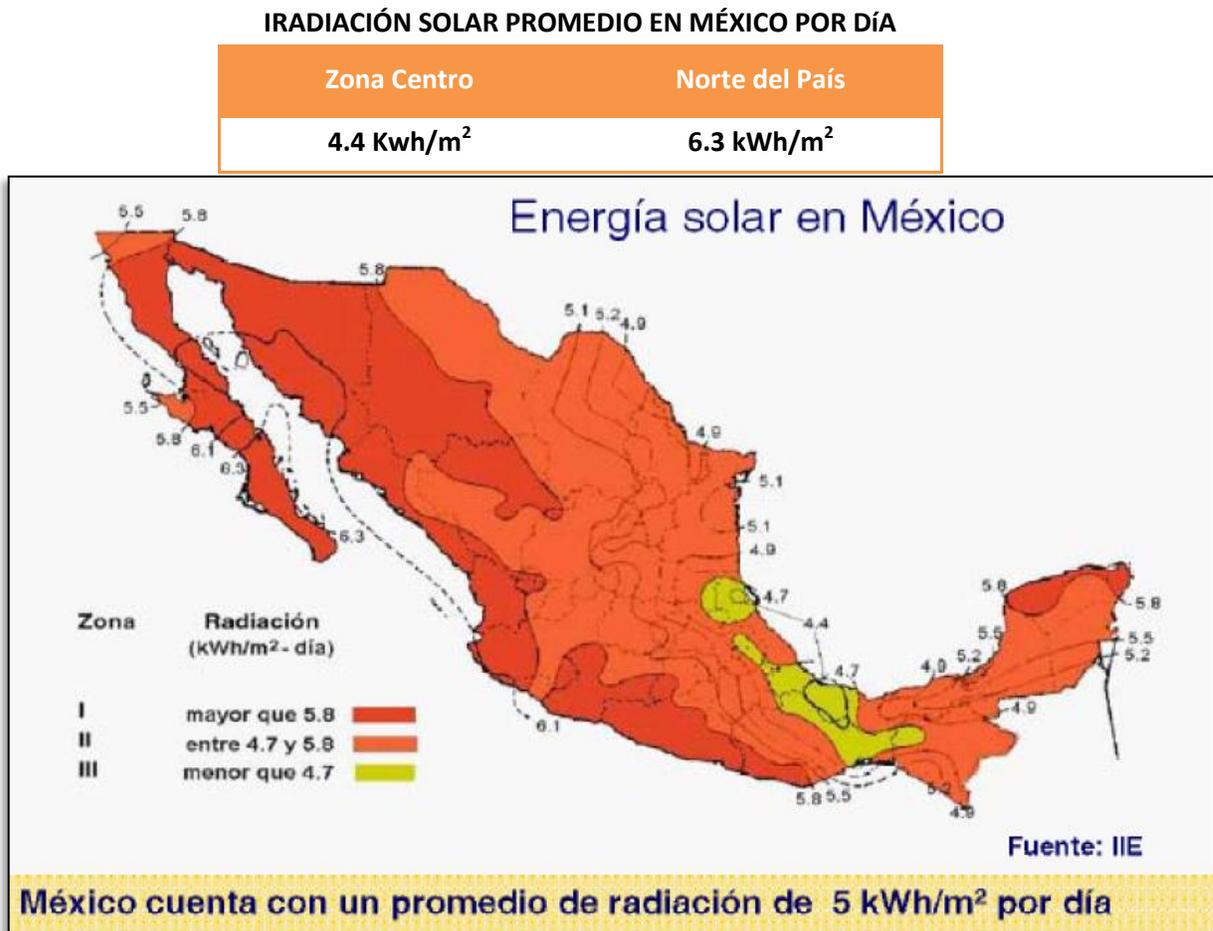


Figura 2.11: Mapa de Irradiación Solar, México, kWh/m² al día.

Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

⁸ Potencial de la Energía Solar Térmica de Baja y Media Temperatura Dr. Roberto Best y Brown, Centro de Investigación en Energía de la UNAM Mesa de trabajo 8: Fuentes alternativas de energía - III

México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo. La mitad del territorio nacional presenta una insolación promedio de 5.3 kWh por metro cuadrado al día, suficiente para satisfacer la necesidad de un hogar mexicano promedio. Esto nos coloca en una situación muy favorable para el uso de la energía solar. Se estima que México tendrá una capacidad de 10MW producidos por tecnología termosolar en 2012.

Hay muchos factores que influyen en la decisión de usar esta fuente de energía para resolver los requerimientos de energía eléctrica, pero las condiciones de muchas zonas del país, permiten que las inversiones en el Noroeste de México, se antojen como las más rentables, la mayor cantidad de irradiación de que se dispone se encuentra en esta zona del país, lo que hace suponer que será en ahí donde primero se realicen inversiones de sistemas de generación a base de energía solar en México.

2.3.2.1 Insolación Normal Directa diferentes regiones de México

En la ciudad de Guadalajara, Jalisco, la Insolación Normal Directa (DNI) es de 4.9 kWh/m² por día (valor bueno), promedio anual según centros científicos europeos. La UNAM, dan un valor un poco más alto para Guadalajara, de 5.6 kWh/m² por día.

La Insolación Normal Directa es 50% más alta en otras regiones de México como por ejemplo en el estado de Sonora donde alcanzamos 7 a 8 kWh/m² por día (dependiendo la época del año) en promedio anual, igual en los estados de Baja California, Chihuahua, norte de Durango, Coahuila, norte de Zacatecas, el oeste de San Luis Potosí, el suroeste de Oaxaca, el este de Jalisco, el norte de Guanajuato y el sur de Puebla.

Regiones con Insolación Normal Directa entre 6 y 7 kWh/m² por día (valor muy bueno): Sinaloa, Nayarit, Durango, sur de Zacatecas, Aguascalientes, Guerrero, una parte de Michoacán, una parte de Jalisco, Colima, Querétaro, el este de Hidalgo.

Los estados de la Costa Caribe tienen un aire más húmedo y la Insolación Normal directa está entre 3 y 4.5 kWh/m² por día.

En el Distrito Federal, la contaminación del automóvil y de la industria es tan alta que impide que pasen una parte de los rayos solares; la Insolación Normal Directa del D.F. es sólo de 3.5 kWh/m² por día.

2.3.3 Factores geográficos que favorecen al potencial solar de México.

El territorio de la República Mexicana está ubicado en la porción media del continente americano, al norte del ecuador y al oeste del meridiano de Greenwich, y es el país más septentrional de América. La línea imaginaria del trópico de Cáncer lo divide en dos grandes regiones. Por su posición pertenece a América del Norte (tres cuartas partes) y a América Central.

COORDENADAS EXTREMAS QUE ENMARCAN EL TERRITORIO MEXICANO			
Sur:	14° 32' 27'' latitud norte, en la desembocadura del río Suchiate, frontera con Guatemala.	Norte:	32° 43' 06'' latitud norte, en el Monumento 206, en la frontera con los Estados Unidos de América.
Este:	86° 42' 36'' longitud oeste, en el extremo sureste de la Isla Mujeres.	Oeste:	118° 22' 00'' longitud oeste, en la Roca Elefante de la Isla de Guadalupe, en el Océano Pacífico.

Tabla 2.4: Coordenadas geográficas de México en el Mundo.
 Fuente: www.camescom.com.mx/pages/viewfull.asp?CodArt=20

El clima de México puede llegar a ser un factor determinante a la hora de la elección del lugar más óptimo para la instalación de una central solar; en los climas áridos o hiperáridos la radiación solar será más determinante que en climas donde, aunque la radiación solar sea mayor, sus repercusiones serían menores por causa de la vegetación, la humedad o la presencia de nubosidades.

2.3.4 Variaciones estacionales de la radiación solar en algunas regiones de México

Como ya lo mencionamos anteriormente, la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre depende de diversos factores, uno de ellos es la distancia de la tierra respecto al sol según la época del año, así como la inclinación del eje terrestre respecto al plano de la órbita solar. Esto ocasiona que los rayos solares lleguen con más potencia a algunas regiones del planeta dependiendo del mes del en el que nos encontremos.

En México, estos factores tienen gran repercusión en las variaciones de radiación solar que se recibe en el territorio nacional. En la siguiente tabla mostramos algunas regiones de interés de la República Mexicana con sus valores de radiación solar según el mes.

Estado	Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Sonora	Hermosillo	4.0	4.6	5.4	6.6	8.3	8.5	6.9	6.6	6.7	6.0	4.7	3.9	6.0
Sonora	Guaymas	4.5	5.7	6.5	7.2	7.3	6.8	5.9	5.8	6.3	5.9	5.0	5.6	5.9
Chihuahua	Chihuahua	4.1	4.9	6.0	7.4	8.2	8.1	6.8	6.2	5.7	5.2	4.6	3.8	5.9
SLP	SLP	4.3	5.3	5.8	6.4	6.3	6.1	6.4	6.0	5.5	4.7	4.2	3.7	5.4
Zacatecas	Zacatecas	4.9	5.7	6.6	7.5	7.8	6.2	6.2	5.9	5.4	4.8	4.8	4.1	5.8
Guanajuato	Guanajuato	4.4	5.1	6.1	6.3	6.6	6.0	6.0	5.9	5.8	5.2	4.8	4.6	5.6
Aguascalientes	Aguascalientes	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	6.3	6.1	5.9	5.7	5.1	4.8	4.0	5.6
Oaxaca	Salina Cruz	5.4	6.3	6.6	6.4	6.1	5.0	5.6	5.9	5.2	5.9	5.7	5.2	5.8
Oaxaca	Oaxaca	4.9	5.7	5.8	5.5	6.0	5.4	5.9	5.6	5.0	4.9	4.8	4.4	5.3
Jalisco	Colotlán	4.6	5.7	6.5	7.5	8.2	6.6	5.8	5.6	5.8	5.3	4.9	4.1	5.9
Jalisco	Guadalajara	4.6	5.5	6.3	7.4	7.7	5.9	5.3	5.3	5.2	4.9	4.8	4.0	5.6
Durango	Durango	4.4	5.4	6.5	7.0	7.5	6.8	6.0	5.6	5.7	5.1	4.8	3.9	5.7
Baja California	La Paz	4.4	5.5	6.0	6.6	6.5	6.6	6.3	6.2	5.9	5.8	4.9	4.2	5.7
Baja California	San Javier	4.2	4.6	5.3	6.2	6.5	7.1	6.4	6.3	6.4	5.1	4.7	3.7	5.5
Baja California	Mexicali	4.1	4.4	5.0	5.6	6.6	7.3	7.0	6.1	6.1	5.5	4.5	3.9	5.5
Querétaro	Querétaro	5.0	5.7	6.4	6.8	6.9	6.4	6.4	6.4	6.3	5.4	5.0	4.4	5.9
Puebla	Puebla	4.9	5.5	6.2	6.4	6.1	5.7	5.8	5.8	5.2	5.0	4.7	4.4	5.5
Hidalgo	Pachuca	4.6	5.1	5.6	6.8	6.0	5.7	5.9	5.8	5.3	4.9	4.6	4.2	5.4

Tabla 2.5: Radiación solar en lugares selectos de México (datos en kWh/m² por día).

Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Claramente podemos observar en la tabla anterior que el mes de Enero es en el que recibimos menor cantidad de radiación solar; aunque en ese mes la distancia de la tierra respecto al sol no es la máxima, el ángulo de inclinación de la Tierra provoca que precisamente en esa época del año los rayos solares no lleguen directamente al hemisferio norte (región donde se encuentra México), teniendo el invierno en esta zona del planeta y el verano en el hemisferio sur.

Lo contrario pasa en el mes de Mayo cuando en México se tiene el mes de máxima insolación, a pesar de que en esta época del año se tiene la distancia máxima entre la Tierra el Sol la inclinación de la Tierra respecto al plano solar permite que los rayos solares peguen directamente en el hemisferio norte teniendo el verano en esta región del planeta y el invierno en el hemisferio sur.

En los mapas que se muestran a continuación se presentan las variaciones máximas y mínimas de la radiación solar que se recibe en el territorio nacional según la época del año.

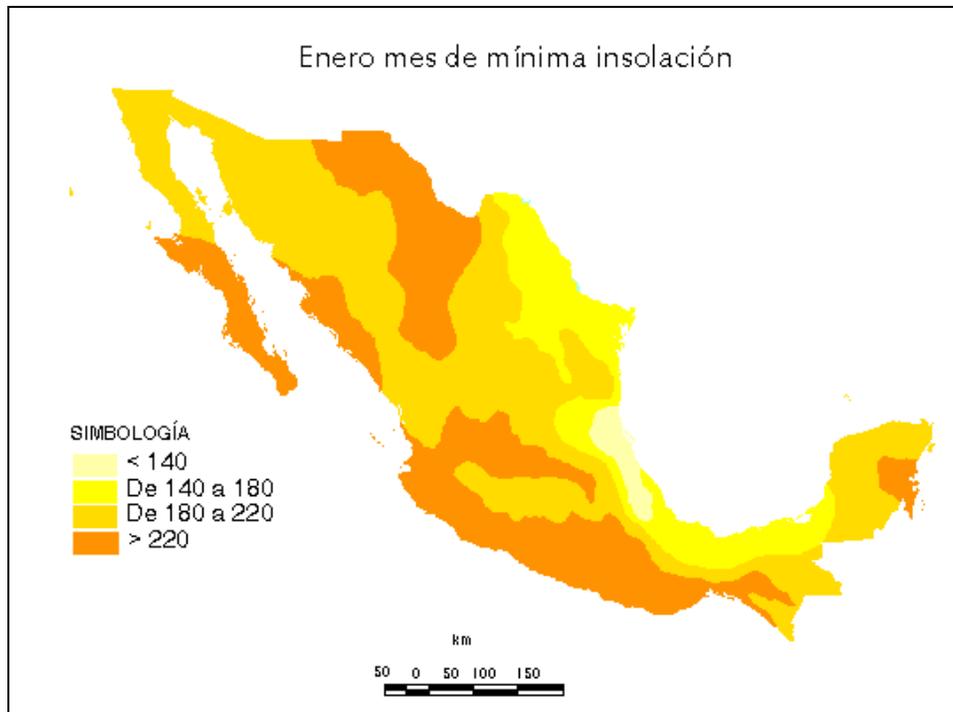


Figura 2.12: Mapa que muestra la distribución de la radiación solar mínima en la Republica Mexicana en el mes de Enero. Medida en W/m^2 .
Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas. Disponible.

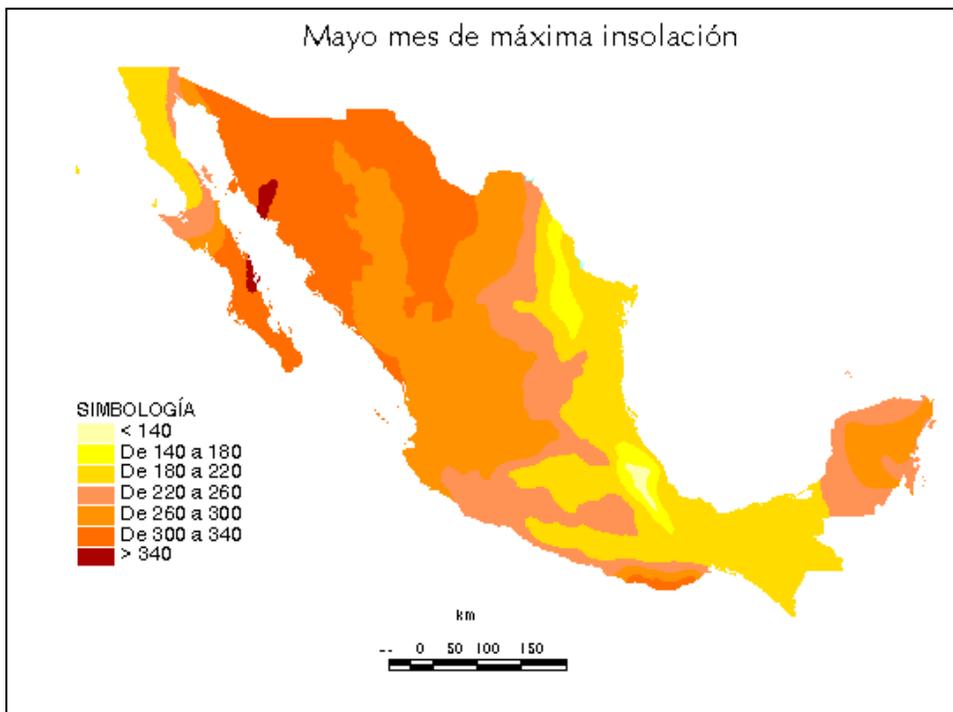


Figura 2.13: Mapa que muestra la distribución de la radiación solar máxima en la Republica Mexicana en el mes de Mayo. Medida en W/m^2 .
Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

2.3.5 Sonora, uno de los lugares con mayor potencial solar en México y el mundo

En México los desiertos podrían satisfacer de sobra los requerimientos energéticos. Con más de un millón de kilómetros cuadrados de zonas áridas y semiáridas (aproximadamente el 49.1% de la superficie nacional) se obtendría la energía equivalente a 1.4 billones de barriles de petróleo en un año. Con el sol que recibe el 0.3% de la superficie de Sonora con una extensión aproximada de unos 604 km², podría generarse todo el consumo eléctrico nacional (203,638 GWh en 2007, según la Secretaría de Energía). Es necesario cuantificar la energía solar que recibe en territorio nacional para poder documentar la competitividad de su explotación frente a las alternativas convencionales.

Pese a que los niveles de irradiación en el noroeste del país son ideales para instalar un campo de concentradores solares con base en espejos en forma de canal parabólico y así generar electricidad, hasta la fecha no se ha aprovechado esta posibilidad como debiera.

Sonora recibe una insolación mayor a los 6 KWh/m²/día promedio, y resulta que aunque eso es apenas un kilowatt hora más que el promedio nacional, lo coloca en la lista de los estados con mayor potencial eléctrico.

El potencial de Sonora rebasa también al de los líderes en captación de energía solar, como España y Alemania. Según datos del Sistema Geográfico de Información Fotovoltaica de la Comisión Europea, Sevilla recibe una insolación de 4.7 KWh/m² al día, mientras que Leipzig, Alemania (donde se encuentra una de las plantas solares más importantes del mundo), recibe 2.7 KWh/m² al día. No hay vuelta de hoja: Sonora los supera con 1.3 y 3.3 KWh/m² al día, respectivamente. Y esta ventaja numérica viene acompañada de la ventaja operativa que se deriva de la duración del día, porque mientras que la mayoría de las ciudades alemanas reciben 4 horas diarias de insolación en promedio, Sonora tiene de 7 a 8 horas al día, de marzo a octubre.

Con el 0.3% de la superficie del estado se podría generar todo el consumo eléctrico nacional (604 km²).

2.4 APLICACIONES DE LA RADIACIÓN SOLAR

2.4.1 La energía solar

La energía solar es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el Sol. La mayoría de las fuentes de energía usadas por nosotros proceden directa o indirectamente del Sol, por lo cual podemos afirmar que el Sol es imprescindible para que haya vida y progreso en la Tierra.

El recurso solar disponible es enorme, y para darnos una idea de que tan grande puede llegar a ser; la energía solar que recibe la tierra en un año es equivalente a más de diez mil veces al consumo energético en todo el mundo. Por esta razón es importante empezar a explotar lo más que se pueda este recurso natural inagotable para satisfacer las necesidades eléctricas del país.

2.4.2 Aprovechamiento de la energía solar

La energía del Sol que llega a nuestro planeta es inmensa y esta se puede manifestar de distintas maneras. Existen diferentes formas en que se puede aprovechar la energía solar para obtener electricidad. Esta clasificación la podemos hacer por tecnologías y por su uso más general. Aquí se presentan las formas de energía solar más importantes para la generación de electricidad:

- Energía Solar Fotovoltaica
- Energía Solar Térmica

2.4.2.1 Energía solar fotovoltaica⁹

La energía solar fotovoltaica se basa en la captación de energía solar para transformarla en energía eléctrica sin ciclos termodinámicos ni reacciones químicas, y únicamente por medio del efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico es un fenómeno físico a través del cual ciertos dispositivos fabricados con semiconductores son capaces de convertir la luz del sol en electricidad sin ningún proceso intermedio. A la unidad donde se realiza dicho fenómeno se le llama celda fotovoltaica. La conversión fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico, es decir, en la conversión de la energía lumínica proveniente del sol en energía eléctrica.

La energía solar se transmite por el espacio en forma de fotones de luz. Estos fotones atraviesan la atmósfera terrestre perdiendo parte de su energía por los impactos con la misma.

Cuando fotones de un determinado rango de energía chocan con átomos de ciertos materiales semiconductores (el Silicio es el más representativo) les ceden su energía produciendo un desplazamiento de electrones que es en definitiva una corriente eléctrica.

⁹ www.generaciofotovoltaica.com

Capítulo 2. El potencial de la radiación solar

Los materiales semiconductores, para su utilización en celdas fotovoltaicas, han de ser producidos en purezas muy altas, normalmente con estructura cristalina.

Estos cristales se cortan en rebanadas muy finas (del orden de micras) y se dopan unas con elementos químicos para producir huecos atómicos, material tipo "p" (en el caso del Si con Boro) y otras con otros elementos para producir electrones móviles, material tipo "n", (con Fósforo también en el caso del Si).

La unión de una segmento tipo "n" con un segmento tipo "p" cada una con un conductor eléctrico metálico, forman así una célula fotoeléctrica, la cual bajo la incidencia de fotones, crea una corriente de electrones corriente eléctrica continua a través del circuito eléctrico al que estén conectados los dos conductores de la celda.

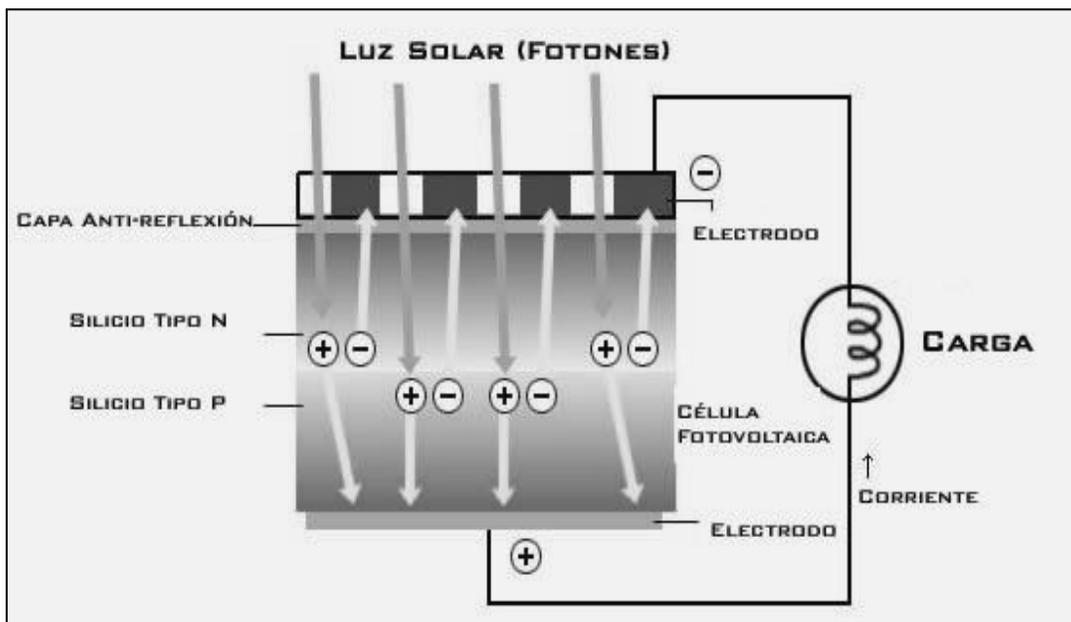


Figura 2.14: Funcionamiento de una celda fotovoltaica.

Fuente:<http://www.reportfotografia.com/clima/Imagen/Esquema%20Celula%20Fotovoltaica.jpg>

Mientras las celdas solares permanecen expuestas a la luz, este proceso de liberación de electrones continua y, por consecuencia el proceso de generación de electricidad.

Un panel solar puede producir energía limpia por un periodo de 20 años o más. El desgaste se debe, principalmente, a la exposición al medio ambiente. Un panel solar montado apropiadamente constituirá una fuente de energía limpia, silenciosa y confiable por muchos años.



Figura 2.15: Campo de celdas fotovoltaicas.

Fuente: www.flickr.com/photos/m1952c/3003521882/

Actualmente existen dos formas de utilización de la energía fotovoltaica:

- **Autoconsumo** - La instalación es un elemento no conectado a la red pública y sirve para abastecer a una vivienda aislada utilizándose la producción eléctrica para el autoconsumo. El usuario accede a su propia energía de manera independiente con sus propias baterías acumuladoras para períodos en los que el sol se oculta.
- **Integración en la red eléctrica**- La instalación solar se conecta a la red eléctrica pública permitiendo esta conexión el intercambio de energía con la red eléctrica con la aportación de excesos a la misma y su utilización en períodos de menor producción.

Durante los próximos años se espera un gran aumento a nivel mundial en el uso de este tipo de tecnología por sus demostradas ventajas a todos los niveles, lo cual atraerá múltiples beneficios, tanto económicos como para el medio ambiente.

2.4.2.2 Energía Solar térmica¹⁰

Se entiende por energía solar térmica, a la transformación de la energía radiante solar en calor. Este tipo de energía solar usa directamente la energía que recibimos del sol, la aprovecha en forma de calor y por consiguiente se puede usar directamente para producir electricidad.

El principio básico general de todos los sistemas solares térmicos es muy simple y consiste en concentrar la luz solar mediante dispositivos especialmente diseñados que permiten alcanzar altas temperaturas (más de 400 °C), que se utilizan para generar vapor y activar una turbina e impulsar un generador o alternador que

¹⁰ *Energía Solar Térmica Proyecto RES & RUE*
Diseminación <http://www.cecua.es/temas%20intereses/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/3%20solar%20termica.htm> (17 of 18)

produce electricidad (Ciclo termodinámico convencional). En este proceso no se producen las emisiones contaminantes de las centrales térmicas convencionales.

Para producir electricidad a partir de la energía solar térmica se requieren cuatro elementos básicos:

- Concentrador.
- Receptor.
- Sistema transportador del calor.
- Sistema de almacenamiento y conversión de la energía.

Las tres tecnologías solares térmicas más importantes y prometedoras son:

- Concentrador cilindro parabólico (CCP).
- Receptor central o central de torre.
- Disco parabólico.

En el capítulo siguiente hablaremos más a fondo de cada una de estas tecnologías.