

# Introducción a la Solarimetría

V. M. García, G. Miramontes, J. M. García, I. Reducindo, S. M. Durón

## *Introduction to solar measurements*

Recibido: agosto 2, 2007

Aceptado: septiembre 17, 2007

Palabras clave: Radiación solar; energía solar; solarimetría

### **Abstract:**

*This work, corresponding to a first part, presents a description of general concepts and definitions for the understanding of solar radiation, its main parameters of interest and its measurement. The issues discussed in this paper are the following: Solar radiation and the constant solar geometrical factors affecting the flow of radiation energy, physical factors affecting flows radiation energy; quantification of the solar radiation energy, among others. In the State of Zacatecas, there is little information on solar radiation that has been obtained by field measurements. However, currently a project on the monitoring of solar radiation in Zacatecas is in progress.*

**Keywords:** Solar radiation; solar energy; solarimeter

**L**A medición de la radiación solar, los datos de la radiación solar y los cálculos que se realizan con propósitos diversos, se conoce como Solarimetría. La radiación que llega a la tierra, después de atravesar la atmósfera, es diferente a la radiación emitida por el sol, a la cuál se le denomina radiación extraterrestre. Generalmente no es práctico basar las predicciones o cálculos de la radiación solar incluyendo la atenuación de la radiación extraterrestre causada por la atmósfera, ya que raramente se tiene disponible información meteorológica exacta. Para predecir el desempeño del proceso solar, en su lugar, se usan las mediciones obtenidas en el pasado en un lugar en particular o en algún lugar cercano.

En el Estado de Zacatecas, se tiene poca información sobre la radiación solar que haya sido obtenida por mediciones de campo. Sin embargo, actualmente se encuentra en desarrollo un proyecto sobre el monitoreo de la radiación solar en Zacatecas.

En este trabajo se presenta una descripción general de los conceptos básicos y definiciones de partida para el entendimiento de la radiación solar, sus parámetros de interés y su medición. Los temas que se exponen en este trabajo son los siguientes:

- La radiación solar y la constante solar.
- Factores geométricos que afectan los flujos de energía de radiación.
- Factores físicos que afectan los flujos de energía de radiación.
- Cuantificación de la energía de radiación solar.
- Componentes de la radiación solar.
- Técnicas para la medición de la energía de radiación: Solarimetría.
- Evaluación de la energía solar disponible.

## **Radiación solar**

### *¿Cómo es el sol?*

La estructura del sol y sus características determinan la naturaleza de la energía que éste radía al espacio. Es de suma importancia la intensidad y su distribución espectral comprendida, principalmente, en el intervalo entre 250 nm y 300 nm de la porción de la radiación electromagnética que incluye la mayor parte de toda la energía radiada por el sol. Se sabe que el sol es una esfera de gas extremadamente caliente con un diámetro de  $1.39 \times 10^9$  m. A diferencia del planeta tierra, el sol no gira como un cuerpo sólido; visto desde la tierra el ecuador del sol toma alrededor de 27 días y las regiones polares toman cerca de 30 días para una

rotación. El sol tiene una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5777 K.<sup>1</sup> La temperatura en las regiones centrales interiores se estima entre los  $8 \times 10^6$  a los  $40 \times 10^6$  K y la densidad se estima alrededor de 100 veces la del agua.

## ¿Qué es el sol?

El sol es un reactor de fusión continuo, siendo sus gases el “contenedor” retenidos por fuerzas gravitacionales. Aunque se han sugerido varios modelos, el más aceptado es un proceso en el cual el hidrógeno (cuatro protones) se combinan para formar helio (un núcleo de helio); la masa del núcleo de helio es menor que la de los cuatro protones, de modo que la diferencia de masa se convierte en energía. La energía producida en el interior del sol a temperaturas de millones de grados debe transferirse hacia su superficie y luego radiarse al espacio. Ocurre un proceso de radiación y convección con emisión, absorción, y re-radiación sucesivas. La radiación en el núcleo del sol se encuentra en la porción del espectro de los rayos X y rayos gamma, con longitudes de onda que aumentan en tanto la temperatura cae a distancias radiales distintas.

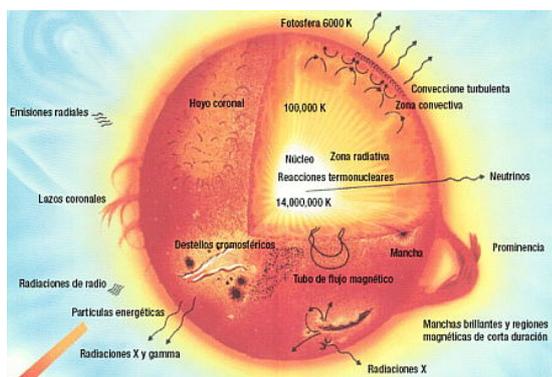


Figura 1. Imagen del sol tomada de [1].

Se estima que el 90% de la energía se genera en la región de 0 a  $1598.5 \times 10^5$  m, lo cual contiene el 40% de la masa del sol. A una distancia de  $4865 \times 10^5$  m desde el centro, la temperatura desciende a cerca de 130,000 K y la densidad a  $70 \text{ kg/m}^3$ .

La superficie del sol parece estar compuesta por gránulos (celdas de convección irregular), con dimensiones de 1000

<sup>1</sup> La temperatura efectiva de cuerpo negro de 5777 K es la temperatura de un cuerpo negro radiando la misma energía que radía el sol.

a 3000 km y con un tiempo de vida de unos pocos minutos. Otras características de la superficie solar son las pequeñas áreas oscuras llamadas poros, los cuales son del mismo orden de magnitud de las celdas de convección, y grandes áreas oscuras llamadas manchas solares, las cuales varían en tamaño. El extremo de la fotosfera está marcadamente definida, aun cuando es de baja densidad (alrededor de  $10^{-4}$  de la densidad del aire a nivel del mar). Esta capa es esencialmente opaca ya que los gases que la componen están fuertemente ionizados y son capaces de absorber y emitir un espectro de radiación continuo. La fotosfera es la fuente de la mayor radiación solar.

En el Estado de Zacatecas, se tiene poca información sobre la radiación solar que haya sido obtenida por mediciones de campo. Sin embargo, actualmente se encuentra en desarrollo un proyecto sobre el monitoreo de la radiación solar en Zacatecas.

Fuera de la fotosfera hay una atmósfera más o menos transparente, la cual es observable durante un eclipse total de sol o por instrumentos que oculten el disco solar. Arriba de la fotosfera hay una capa de gases más fríos (o menos calientes) de varios cientos de kilómetros de profundidad llamada la **capa de reversión**. Afuera de esta capa hay una capa referida como la **cromósfera**, con una profundidad de 10,000 km. Más arriba está la **corona**, una región de muy baja densidad y de muy alta temperatura ( $10^6$  K).

## La constante solar

La radiación emitida por el sol y su relación espacial a la tierra resulta en una intensidad casi fija de radiación solar fuera de la atmósfera terrestre. Entonces, se define la constante solar,  $G_{sc}$ , como la energía desde el sol por unidad de tiempo, recibida en una superficie de área unitaria perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, a la distancia media entre la tierra y el sol, fuera de la atmósfera.

Antes de las naves espaciales, la estimación de la constante solar se tenía que hacer a partir de mediciones hechas en tierra. Se debían hacer extrapolaciones ya que se medía la radiación solar después de que ésta había sido transmitida a través de la atmósfera y por lo tanto absorbida en parte y dispersada por los componentes de la atmósfera. Así pues se han tenido y se tienen varios valores para la constante solar en diferentes épocas. Quizá el primer valor de la constante solar fue el de  $1322 \text{ W/m}^2$ , pasando por el de  $1395 \text{ W/m}^2$  (en 1954),  $1353 \text{ W/m}^2$  (en 1977),  $1373 \text{ W/m}^2$  (en 1978),  $1368 \text{ W/m}^2$  (en 1981),  $1367 \text{ W/m}^2$ ,  $1372 \text{ W/m}^2$ , y  $1374 \text{ W/m}^2$  (en 1982). El Centro Mundial de Radiación (WRC, de sus siglas en inglés) ha adoptado el valor de  $1367 \text{ W/m}^2$ , con una incertidumbre del orden del 1%.

Antes de las naves espaciales, la estimación de la constante solar se tenía que hacer a partir de mediciones hechas en tierra.

## Distribución espectral de la radiación solar

Es muy útil conocer la distribución espectral de la radiación solar, esto es la distribución de la intensidad de la radiación contra la longitud de onda<sup>2</sup>. El WRC provee información en forma numérica del espectro solar.  $G_{sc,\lambda}$  (en  $\text{W/m}^2\mu\text{m}$ ) es la irradiancia solar promedio sobre el intervalo desde el centro del intervalo de la longitud de onda precedente a la mitad del siguiente intervalo.

En la Figura 2, se muestra la distribución espectral de la radiación extraterrestre para diferentes longitudes de onda, según datos tomados de [3].

## Modelo del cuerpo negro

Utilizando un modelo proveniente de la mecánica cuántica se puede representar la distribución espectral de la radiación extraterrestre para diferentes temperaturas, en función de  $\nu$  según la (1) [2]. Tomando como base la temperatura de

<sup>2</sup> Por ejemplo, si una celda fotovoltaica tiene una respuesta espectral igual al del espectro solar, entonces se podrá obtener su máximo rendimiento.

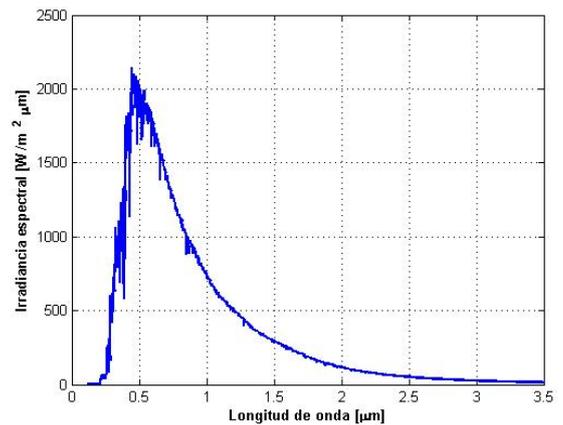


Figura 2. Distribución espectral de la radiación solar.

cuerpo negro equivalente del sol de  $5777 \text{ K}$ , en la Figura 3 se muestra la distribución espectral comparada con la radiación medida según los datos del WRC.

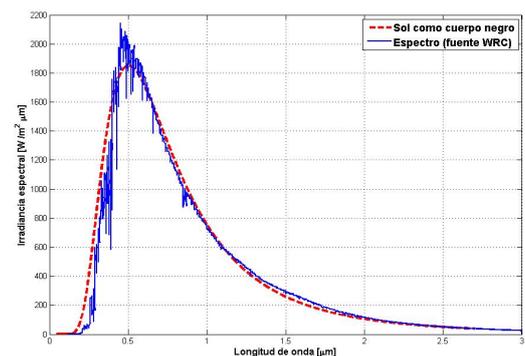


Figura 3. Distribución espectral de la radiación solar y de cuerpo negro a  $5777 \text{ K}$ .

La distribución espectral de cuerpo negro se puede encontrar por

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left( \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \right), \quad (1)$$

donde  $I(\nu)d\nu$  es la cantidad de energía por unidad de área superficial por unidad de tiempo por un ángulo sólido emitida en el intervalo entre  $\nu$  y  $\nu + d\nu$ ;  $T$  es la temperatura del cuerpo negro;  $h = 6.6260689633 \times 10^{-34} \text{ Js}$  es la constante de Planck,  $c = 299792458 \text{ m/s}$  es la velocidad de la luz,  $k = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ Joule/K}$  es la constante de Boltzman. En la Figura 4 se muestran las franjas del espectro solar correspondiente a la capa más externa, llamada fotosfera.



Figura 4. Franjas del espectro solar, según [4]

Los astrónomos pueden identificar los distintos elementos químicos que están presentes en la fotosfera quienes dejan su huella como líneas oscuras, llamadas líneas espectrales. Aunque en el Sol están presentes todos los elementos conocidos en la Tierra, no todos ellos muestran su huella en este espectro [4].

Dentro de la distribución espectral, por razones prácticas y físicas se han identificado tres grandes regiones, según se muestran en la Tabla 1.

### Energía solar

Es la energía en forma de ondas electromagnéticas emitida por el sol. Se denota con  $\epsilon$  y es la cantidad de energía de radiación solar, dada en Joules (J).

La energía solar se define por dos cantidades importantes: la irradiancia y la irradiación.

### Irradiancia

Es la densidad de flujo de energía de radiación. Se define como la razón (o tasa) a la cual la energía de radiación es emitida o recibida por un objeto por unidad de tiempo y por unidad de área:

$$I = \frac{d}{dA} \left( \frac{d\epsilon}{dt} \right) = \frac{dP}{dA}, [W/m^2] \quad (2)$$

### Irradiación

También llamada insolación, se define como la densidad de flujo de energía de radiación que emite o recibe un objeto

durante un cierto tiempo, es la integral de la irradiancia a lo largo de un cierto tiempo y está dada por

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dA} \left( \frac{d\epsilon}{dt} \right) dt = \frac{d}{dA} \int_{t_1}^{t_2} d\epsilon, [J/m^2] \quad (3)$$

En la Figura 5 se muestra una curva de insolación.



Figura 5. Curva de Insolación.

## Factores que afectan los flujos de radiación solar

Se pueden distinguir dos tipos de factores que afectan la cantidad de radiación solar que se recibe en un punto dado, los factores geométricos y los factores ambientales [6].

Dentro de los factores geométricos se pueden mencionar los siguientes:

1. Movimiento de translación de la Tierra.
2. Inclinação del eje de rotación de la Tierra.
3. Movimiento de rotación de la Tierra.
4. Posición geográfica del punto de observación.
5. Altitud del punto de observación respecto del nivel medio del mar.

Dentro de los factores ambientales que atenúan la radiación solar tenemos:

1. Por esparciación (dispersión):
  - (a) El aire (esparcimiento de Rayleigh).
  - (b) Las partículas que forman el aerosol (esparcimiento o efecto Mie).

Tabla 1. Regiones de interés en el espectro solar.

Nombre	Rango [ $\mu$ m]	Característica	% del espectro
Ultravioleta (UV)	$0 < \lambda < 0.38$	Invisible al ojo humano	7
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78$	Visible por el ojo humano	47.3
Infrarrojo	$\lambda > 0.78$	Ondas de calor	45.7

- (c) Las nubes (reflexión).
- (d) El albedo de la superficie receptora (reflectividad del suelo).

2. Por absorción:

- (a) El ozono (absorción selectiva).
- (b) El oxígeno atómico y diatómico (absorción selectiva).
- (c) El nitrógeno atómico y diatómico (absorción selectiva).
- (d) Algunos compuestos de azufre en zonas urbanas, v.g. SO<sub>2</sub>.
- (e) Las partículas del aerosol (absorción continua).
- (f) El vapor de agua (absorción selectiva).
- (g) Los gases homogéneamente diluidos: v.g. CO<sub>2</sub> (absorción selectiva).
- (h) Las nubes (cierto tipo).

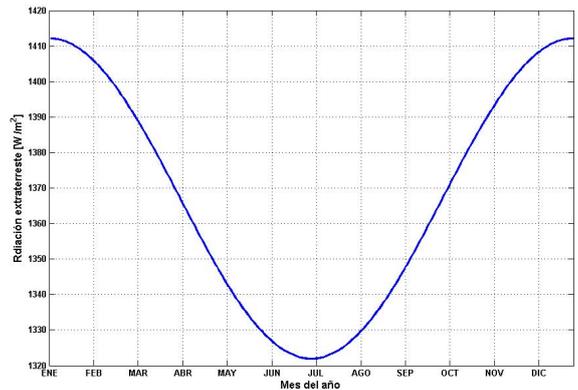


Figura 6. Variación de la radiación solar.

### Variación de la radiación solar extraterrestre

La radiación solar extraterrestre es la radiación medida fuera de la atmósfera terrestre. Esta radiación fluctúa durante el año, debido a la variación de la distancia entre el sol y la tierra (factores geométricos). Esta variación es calculada mediante la ecuación (4) y se muestra gráficamente en la Figura 6.

$$G(n) = G_{sc}(1 + 0.033 \cos(360n/365)), \quad (4)$$

donde  $n$  es el número del día del año ( $1 < n < 365$ ), y  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ .

### Efectos horarios y estacionales

Como sabemos la tierra es un planeta que gira alrededor del sol, describiendo una elipse en el período de un año, que a su vez rota sobre sí misma en 24 horas respecto a su eje que pasa por los polos.

Los efectos horarios se dan debido a la rotación de la tierra, por lo cual la intensidad de la radiación es máxima hacia el mediodía y disminuye hacia los amaneceres y atardeceres.

Los efectos estacionales, por su lado, se producen debido a la inclinación del eje de rotación de la tierra en relación al plano de traslación alrededor del sol. En la línea del Ecuador, los días 21 de marzo y 21 de septiembre, la trayectoria del sol describe un plano perpendicular al plano del suelo, es decir, un semicírculo con centro en la intersección de los ejes N-S y O-E.

Como se mencionó, este plano presenta una variación durante el año, la cual hace que exista un ángulo de inclinación máximo de dicho plano para algunos casos especiales. El 21 de junio se produce un ángulo de 23.5 grados hacia el norte y el 21 de diciembre un ángulo de 23.5 grados hacia el sur con respecto a la vertical.

Esto hace que el 21 de junio sea el día más largo en el Hemisferio Norte, llamado solsticio de verano y en esta misma fecha será el solsticio de invierno en el Hemisferio Sur, es decir, el día de menor duración.

El día 21 de diciembre será el solsticio de invierno para el Hemisferio Norte y el solsticio de verano para el Hemisferio Sur.

Por otro lado, cuando los rayos solares llegan perpendicularmente al eje de la tierra, es decir, el 21 de marzo y el 21 de septiembre, se les designa como equinoccios. El 21 de marzo será el equinoccio de otoño para el Hemisferio Sur y de primavera para el Hemisferio Norte; y el 21 de septiembre será el equinoccio de primavera para el Hemisferio Sur y de otoño para el Hemisferio Norte, respectivamente. En la Tabla 2 se muestran las fechas para los equinoccios y los solsticios para cada hemisferio.

Para que una superficie sobre la línea ecuatorial reciba la máxima cantidad de energía, debe recibir al mediodía los rayos perpendicularmente.

En términos de energía solar, se habla de “radiación total”. Ésta es la energía solar recibida sobre una superficie horizontal, determinada mediante integración de la radiación durante un período de tiempo determinado, generalmente una hora o un día.

## Horas del sol estándar

Otra unidad muy útil es la hora solar estándar. Ésta se aplica para facilitar el cálculo de generación de un panel fotovoltaico, por ejemplo. Esta unidad representa la cantidad de horas a lo largo de un día, en que se tiene una irradiación de un sol.

## Corrección para la hora solar

Se conoce como hora solar, o tiempo solar, al tiempo basado en el movimiento angular aparente del sol al cruzar el cielo, siendo el mediodía solar la hora en que el sol cruza el meridiano del observador. La hora solar no coincide con la hora local, así que es necesario aplicar dos correcciones. La primera es un valor constante por la diferencia entre el meridiano del observador (longitud) y el meridiano en el cual se basa la hora local. La segunda corrección es de la ecuación de tiempo, la cual toma en cuenta las perturbaciones en la rotación terrestre quienes afectan el tiempo

en que el sol cruza el meridiano del observador. Así la ecuación del tiempo  $E$  en minutos está determinada por [5]

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.031077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin B), \quad (5)$$

donde

$$B = (n - 1) \frac{360}{365}. \quad (6)$$

En la Figura 7 se muestra el valor de  $E$  en minutos como función del tiempo en meses del año.

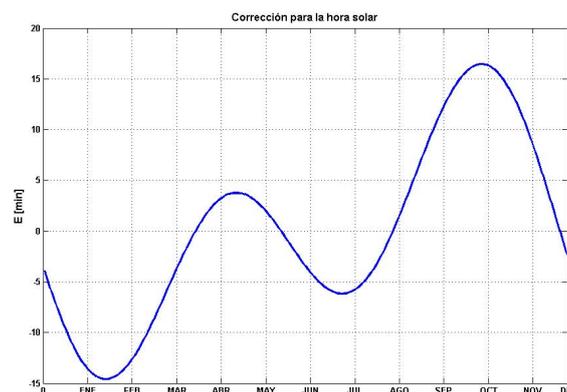


Figura 7. Corrección para la hora solar.

## Métodos para la evaluación del recurso solar

Dentro de los métodos para la evaluación del recurso solar se tiene los siguientes:

1. Medición directa: piranómetros, pirheliómetros, radiómetros UV, etc.
2. Modelos matemáticos teóricos y empíricos.
3. Estimación con base a mediciones con satélite.
4. Atlas de radiación.

En la siguiente parte de este trabajo se describirán con más detalle estos métodos. Igualmente se presentarán algunos datos preliminares obtenidos con la instrumentación instalada y que se encuentra operando actualmente en el Campus Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas en el proyecto “Evaluación del potencial eólico del cerro de la virgen y solar de Zacatecas”

Tabla 2. Fechas de Equinoccio y Solsticio.

Fecha	Hemisferio Sur	Hemisferio Norte
21 de marzo	equinoccio de otoño	equinoccio de primavera
21 de junio	solsticio de invierno	solsticio de verano
21 de septiembre	equinoccio de primavera	equinoccio de otoño
21 de diciembre	solsticio de verano	solsticio de invierno

## Bibliografía

- [1] <http://www.astromia.com/solar/fotos/estrucsol2.jpg>
- [2] <http://www.answers.com/topic/black-body?cat=technology>
- [3] <http://rredc.nrel.gov/solar/standards/am0/>
- [4] [http://www.universum.unam.mx/eq\\_univ\\_43.html](http://www.universum.unam.mx/eq_univ_43.html)
- [5] Solar Engineering of Thermal Processes, John A. Duffie, William A. Beckman, Wiley Interscience Second Edition (1991).
- [6] Agustín Muhlia V., Notas para el Curso de Solarimetría XXXI Semana Nacional de la Energía Solar, Zacatecas, Zac. Octubre 2007.

## Acerca del autor o autores

V. M. García, J. M. García y S. M. Durón son profesores investigadores del Cuerpo Académico de Energéticos.

G. Miramontes es profesor investigador del Cuerpo Académico de Procesamiento Digital de Señales, e I. Reducindo es alumno de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y colaborador en el proyecto.

Correo-e: vmgarcia@uaz.edu.mx