

SOFTWARE DE SIMULACIÓN DE LA RADIACIÓN INCIDENTE SOBRE SUPERFICIES BAJO DIFERENTES CONDICIONES

Sergio Sanz Hernando
CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo, sersan@cartif.es

José Ignacio Díaz García
CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo, josdia@cartif.es

Pedro Caballero Lozano
CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo, pedcab@cartif.es

Marta Poncela Blanco
CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo, marpon@cartif.es

Resumen

El software que se describe tiene la capacidad de calcular la radiación incidente en superficies, aplicando para ello un modelo de irradiancia solar basado en transmitancias. Dicho modelo calcula la irradiancia teórica en un día claro en cualquier instante, y a partir de él se realizan los correspondientes cálculos.

Partiendo de la simulación se calcula la radiación incidente en todo tipo de superficies definidas por su inclinación, orientación, latitud, longitud y altitud. Con ello se realizan comparativas de radiación en superficies para diferentes orientaciones (fachadas), estudios sobre la ganancia con seguimiento azimutal (sistema implantado en CARTIF), estudios de inclinación óptima de paneles (solares térmicos y fotovoltaicos) y cálculo de las pérdidas por sombras en una superficie de captación.

Primeramente se describirán los puntos fundamentales de la simulación de la irradiancia solar en un día claro, posteriormente se enumerarán las diferentes capacidades del programa, así como los métodos de cálculo empleados. Por último se ofrecen ejemplos comentados de situaciones comunes que es capaz de analizar el programa.

Palabras Clave: Radiación solar, seguimiento solar.

1 INTRODUCCIÓN

En CARTIF, Centro de Automatización, Robótica y Tecnologías de la Información y de la Fabricación, y más concretamente en el Laboratorio de Estudios Energéticos, se trabaja, entre otros campos, en aplicaciones de energía solar en edificios. Este

trabajo pretende describir la aplicación desarrollada para el cálculo y simulación de la radiación incidente en superficies de variadas características en cuanto a su orientación e inclinación, con el fin de obtener una herramienta que ayude a evaluar los efectos del Sol en variados tipos de situaciones, tales como en construcciones bioclimáticas, en instalaciones solares térmicas y fotovoltaicas, así como en cualquier aplicación práctica que requiera estimar los aportes solares y/o lumínicos.

Debido a las necesidades propias de estudiar este tipo de sistemas (el edificio de CARTIF dispone de instalaciones solares fotovoltaicas y térmicas y actualmente estudia la construcción de un nuevo edificio de carácter bioclimático) y a que no existe un software comercial con las características descritas, se ha visto la necesidad de desarrollar este programa.

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE RADIACIÓN SOLAR UTILIZADO

El modelo de radiación escogido tiene como característica la de determinar la irradiancia en cualquier instante de tiempo (los modelos de carácter estadístico se limitan a evaluar la radiación pero en intervalos de tiempo horarios). Su limitación es que únicamente simula la radiación en un día claro.

La irradiancia global se determina como la suma de la irradiancia directa y la irradiancia difusa.

Para el cálculo de la irradiancia directa se ha utilizado un modelo paramétrico de banda ancha, en el cual la irradiancia normal es proporcional a la transmitancia.

El cálculo de la irradiancia difusa se divide en tres posibles fuentes, la debida a la dispersión por efecto Raleigh, la producida por aerosoles y la debida a reflexiones múltiples entre la tierra y la atmósfera.

Los ángulos de elevación y azimut definen la posición del sol y los ángulos de orientación e inclinación. El objetivo final es, conocidos los ángulos de elevación y orientación, deducir el ángulo de incidencia o inclinación del Sol sobre la superficie inclinada para cada valor de elevación y azimut. El cálculo de estos ángulos, que definen completamente la posición del Sol respecto a la superficie inclinada, depende fundamentalmente de dos datos, la declinación solar y el ángulo horario y es un problema exclusivamente geométrico.

La descomposición de la irradiancia solar se aprecia en la figura 1. Se parte de la irradiancia solar extraterrestre (I_c) que es un valor constante. Este valor alcanza la atmósfera con una pequeña variación, producto de la trayectoria elíptica de la tierra, y se conoce como irradiancia extraterrestre (I_{ext}). La irradiancia extraterrestre al llegar a la atmósfera se fragmenta. Una parte se refleja, otra es absorbida (componente ultravioleta debido al ozono y componente infrarroja debido al vapor de agua), otra es dispersada en por las moléculas de gas, agua y partículas existentes en el aire, parte se refleja en las nubes y por último otra parte llega a la tierra en forma de irradiancia directa (I_b).

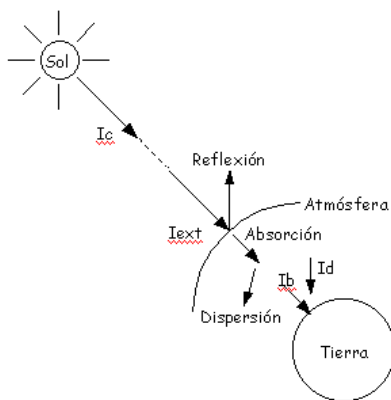


Figura 1: Esquema del efecto de la atmósfera en la irradiancia que llega a la tierra

De las componentes reflejada y dispersa una parte llega al planeta en forma de irradiancia difusa (I_d). El valor de I_c ha sufrido variaciones con el aumento de la precisión de los instrumentos con que se mide. Su valor actual se considera $I_c = 1.367 \text{ W/m}^2$.

La irradiancia extraterrestre que alcanza la atmósfera de la Tierra se suele calcular en función de la

irradiancia solar extraterrestre y del factor de excentricidad (Exc):

$$I_{ext} = I_c \cdot \left(\frac{D_0}{D} \right)^2 = I_c \cdot Exc$$

Según la expresión anterior los valores máximo y mínimo de la irradiancia extraterrestre se producirán el 3 de enero (Afelio) con un valor 1.415 W/m^2 y el 4 de Julio (Perihelio) con un valor de 1.321 W/m^2 respectivamente.

Resumiendo, se puede plantear que la irradiancia global (I_g) sobre un punto en la Tierra se puede determinar como la suma de la irradiancia directa y la irradiancia difusa:

$$I_g = I_b + I_d$$

A continuación se describe el modelo utilizado, determinando la irradiancia solar a través del cálculo de la irradiancia directa normal y de la difusa, de la siguiente forma:

Irradiancia directa normal: la irradiancia normal es proporcional a la transmitancia, dependiendo este valor de los siguientes parámetros:

$$T_b = \frac{I_{bn}}{K \cdot I_{ext}} = F(L, W, A, B, M)$$

Donde:

- T_b : Transmitancia de la irradiancia directa normal.
- I_{bn} : Irradiancia directa normal.
- K : Parámetro constante que depende del ancho de banda del espectro de irradiancia considerado.
- L : Espesor de la capa de ozono (cm).
- W : Espesor de la capa de vapor de agua (cm).
- A, B : Coeficientes de la turbiedad atmosférica.
- M : Masa de aire.

El valor de T_b se calcula mediante el producto siguiente:

$$T_b = T_o \cdot T_g \cdot T_w \cdot T_r \cdot T_a$$

- T_o : Transmitancia debida a la absorción del ozono.
- T_w : Transmitancia debida a la absorción del vapor de agua.
- T_r : Transmitancia debida al efecto de dispersión por las moléculas de aire (Efecto Rayleigh).
- T_a : Transmitancia debida a la atenuación por los aerosoles.

Estas transmitancias dependen fundamentalmente de la masa de aire a presión estándar, siendo esta:

$$M_r = \frac{1}{\text{sen}(\text{Elevación}) + 0.15(3.885 + \text{Elevación})^{-1.253}}$$

y de la masa de aire a la presión atmosférica actual:

$$P = P_o e^{-0.0001184 \text{Alt}} \quad P_o = 1013 \text{ mbar}$$

$$Ma = Mr \frac{P}{P_o}$$

A partir de estos datos se calcula Tr como:

$$Tr = e^{-0.0903 Ma^{0.84(1 + Ma - Ma^{1.01})}}$$

y To como:

$$To = 1 - \frac{0.1611 \cdot L \cdot Mr \cdot (1 + 139.48 \cdot L \cdot Mr)^{-0.3035} - 0.002715 \cdot L \cdot Mr}{1 + 0.044 \cdot L \cdot Mr + 0.0005 \cdot L^2 \cdot Mr^2}$$

siendo el valor de L considerado, $L = 0.3 \text{ cm}$.

A su vez Tg se expresa como:

$$Tg = e^{-0.0127 \cdot Ma^{0.26}}$$

y Tw como:

$$Tw = 1 - \frac{2.4959 \cdot W_1 \cdot Mr}{(1 + 79.034 \cdot W_1 \cdot Mr)^{0.6828} + 6.385 \cdot W_1 \cdot Mr}$$

siendo W_1 el espesor de la capa de vapor de agua:

$$W_1 = W \cdot \left(\frac{P}{P_o} \right)^{0.75}$$

tomando W el valor de 1cm.

Por último, Ta depende de los coeficientes de atenuación espectral K_1 y K_2 , siendo el primero a la longitud de onda de $0.35 \mu\text{m}$ y el segundo a $0.5 \mu\text{m}$. Los valores tomados son:

$$K_1 = 0.087$$

$$K_2 = 0.069$$

$$K_a = 0.275K_1 + 0.35K_2$$

$$Ta = e^{-K_a^{0.873} \cdot (1 + K_a - K_a^{0.7088}) \cdot Ma^{0.9108}}$$

siendo K_a el espesor óptico de los aerosoles.

Ahora se calcula la irradiancia directa normal, como:

$$I_{bn} = 0.9751 I_{ext} T_b$$

Irradiancia difusa horizontal: para realizar este cálculo se divide esta irradiancia en tres posibles fuentes, la debida a la dispersión por efecto Raleigh, Idr, la debida a los aerosoles, Ida, y la debida a la reflexión múltiple entre la tierra y la atmósfera, Idm.

$$I_{dh} = I_{dr} + I_{da} + I_{dm}$$

El primer término o irradiancia por dispersión se calcula como:

$$I_{dr} = 0.79 \cdot I_{ext} \cdot \text{sen}(\text{Elevación}) \cdot T_{dr}$$

Siendo T_{dr} la transmitancia de la irradiancia difusa debida a la dispersión, cuyo valor es:

$$T_{dr} = 0.5 \cdot To \cdot Tg \cdot Tw \cdot T_{aa} \cdot \frac{1 - Tr}{1 - Ma + Ma^{1.02}}$$

siendo T_{aa} la transmitancia de la irradiancia difusa debida a la absorción de los aerosoles:

$$T_{aa} = 1 - (1 - Wo) \frac{1 - Ma + Ma^{1.02}}{1 - Ta}$$

donde Wo es el albedo o reflectividad simple de dispersión, siendo el valor empleado:

$$Wo = 0.9$$

La componente de la irradiancia difusa debida a los aerosoles se expresa como:

$$I_{da} = 0.79 \cdot I_{ext} \cdot \text{sen}(\text{Elevación}) \cdot T_{da}$$

siendo T_{da} la transmitancia de la irradiancia difusa debida a los aerosoles, cuyo valor es:

$$T_{da} = To \cdot Tg \cdot Tw \cdot T_{aa} \cdot F_c \frac{1 - \frac{Ta}{T_{aa}}}{1 - Ma + Ma^{1.02}}$$

siendo F_c la fracción de dispersión directa respecto de la total, tomando un valor de:

$$F_c = 0.82$$

Por último se calcula el término de irradiancia debido a la reflexión múltiple, que es:

$$I_{dm} = (I_{bn} \cdot \text{sen}(\text{elevación}) + I_{dr} + I_{da}) \cdot T_{dm}$$

en el que T_{dm} es la transmitancia de la irradiancia difusa debida a las reflexiones múltiples, cuyo valor es:

$$T_{dm} = \frac{R_g \cdot R_a}{1 - R_g \cdot R_a}$$

siendo R_a el albedo de la atmósfera sin nubes y R_g el albedo del suelo. El primero se expresa como:

$$R_a = 0.0685 + (1 - F_c) \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_{aa}}\right)$$

mientras que el segundo toma un valor de 0,2 en el caso general de la superficie frontal del colector solar, y R_g vale 0,6 en el caso de la superficie posterior del colector solar, estando el suelo pintado de blanco.

Una vez realizados estos cálculos podemos pasar a calcular la irradiancia global horizontal, como suma de las irradiancias directa y difusa horizontales, obteniéndose el valor:

$$I_{gh} = I_{bh} + I_{dh} = I_{bn} \cdot \sin(\text{Elevacion}) + I_{dh}$$

También podemos calcular la irradiancia global sobre superficies inclinadas, en superficies sin concentración:

$$I_{gi} = I_{bi} + I_{di} = I_{bn} \cdot \cos(\text{Inclinacion}) + 0.5 \cdot [1 + \cos(\text{Inclinacion})] \cdot I_{dh} + 0.5 \cdot [1 - \cos(\text{Inclinacion})] \cdot R_g \cdot I_{gh}$$

En el caso de que exista superficie colectora posterior (caso de paneles fotovoltaicos bifaciales), la irradiancia que incide en esta cara es:

$$I_{gi} = 0.5 \cdot [1 + \cos(\text{Inclinacion})] \cdot I_{dh} + 0.5 \cdot [1 - \cos(\text{Inclinacion})] \cdot R_g \cdot I_{gh}$$

3 CAPACIDADES DEL PROGRAMA

El software desarrollado ha sido programado en lenguaje Labview 6i. Gracias a las características de dicho lenguaje, el programa presenta tanto gráfica como numéricamente los resultados, de una manera sencilla y versátil. Además el desarrollo modular con el que se ha diseñado el programa favorece su posible ampliación para dotar a este software de mejores capacidades.

A continuación se enumeran las capacidades de cálculo del programa. Las posibles aplicaciones quedan reflejadas en los ejemplos que se explican en el apartado siguiente.

3.1 ESTUDIO DEL SEGUIMIENTO

Fijada una inclinación, el programa simula la radiación incidente sobre una superficie de 1 m² durante un año. Este cálculo se realiza simultáneamente para una superficie orientada al sur y para otra que posea un sistema de seguimiento azimutal.

El sistema de seguimiento se simula de manera discreta. El parámetro principal a introducir es el del ángulo de desplazamiento del sistema. Con este ángulo el programa calcula el instante en el que el sistema se tiene que posicionar frente al Sol. En el caso de querer simular un sistema de seguimiento continuo basta con considerar un ángulo de desplazamiento pequeño.

3.2 ESTUDIO DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN

El programa calcula la radiación incidente sobre una superficie inclinada entre 0° y 90°. Los cálculos se pueden hacer tanto para un día en concreto como para un año entero. Este último es siempre el más interesante ya que para los datos de partida podremos determinar la inclinación óptima para la que captará mayor radiación la superficie.

Este cálculo se puede hacer tanto para una superficie fija a una orientación determinada como para una superficie con seguimiento azimutal del sol.

3.3 ESTUDIO DE LATITUDES

En este caso, definida una inclinación de la superficie a estudiar, lo que se pretende es representar la radiación captada para diferentes latitudes. Igualmente que en el caso anterior, se puede determinar tanto para un día del año en concreto como para un año completo. Con esto podremos definir para que latitudes es más interesante una inclinación que otra, y podremos fijar también para que latitudes es más interesante implantar un sistema de seguimiento azimutal.

3.4 ESTUDIO DE LA ORIENTACIÓN

El propósito de este apartado es el de determinar la radiación incidente a lo largo de un año en una superficie orientada al este, sudeste, sur, sudoeste, oeste, noroeste, norte y noreste. Todos los gráficos se representan de manera conjunta para poder hacer estudios comparativos entre ellos.

La utilidad de este apartado es principalmente la de definir la radiación incidente durante los diferentes días del año sobre las fachadas de un edificio. Para este caso puede ser interesante aprovechar otra opción del programa, que es la de definir un intervalo de tiempo que equivale a definir las horas de uso del

edificio, a lo largo de un día, para el cual hacer la simulación.

3.5 ESTUDIO DE SOMBREAMIENTOS

Esta parte del programa determina la cantidad de radiación perdida a causa de un sombreado producido por un obstáculo. Para ello se define la altura y la distancia a la que está el obstáculo y se representan la radiación anual sobre la superficie con o sin el obstáculo.

4 RESULTADOS

A continuación se estudian con diferentes ejemplos los resultados obtenidos por el programa.

4.1 EJEMPLO I

Se va a considerar una latitud de 42° y una superficie con inclinación de 45°.

La figura 2 representa, conjuntamente, la radiación incidente sobre la superficie orientada al sur (verde) y la que incidiría si dispusiese de un sistema de seguimiento (rojo). Se calcula que la ganancia de un sistema respecto al otro es superior al 30%.

4.2 EJEMPLO II

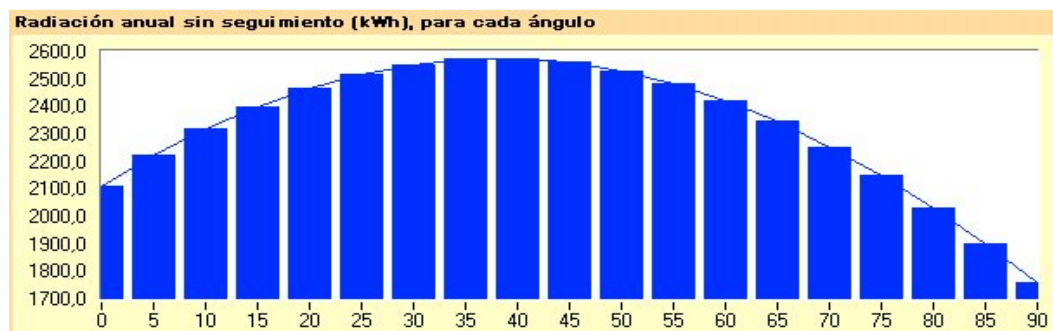
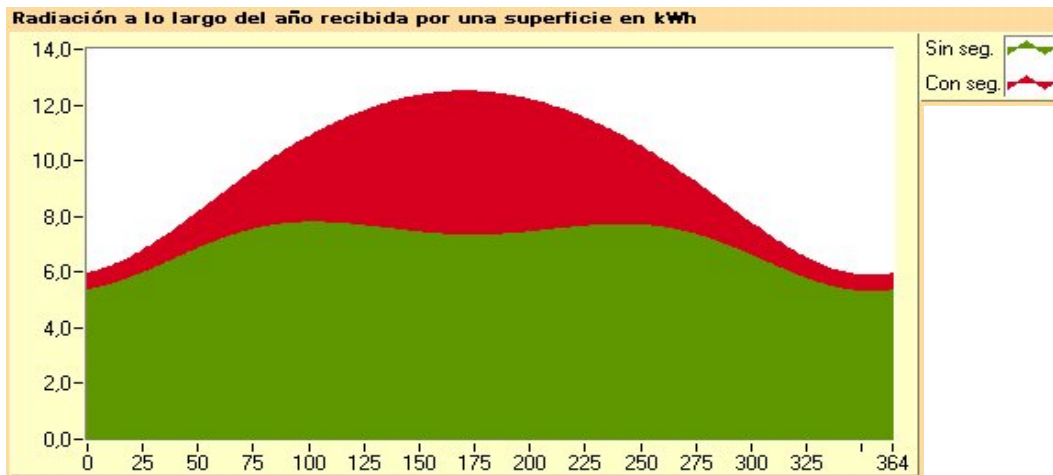
Se define la latitud del lugar, en este caso 42°. Para el tema del seguimiento definimos el ángulo que se desplaza cada vez.

En la figura 3 está representada la radiación anual sobre la superficie inclinada para ángulos entre 0° y 90°. Como se puede observar las inclinaciones óptimas para las que la captación sea mayor rondan entre los 35° y 40°.

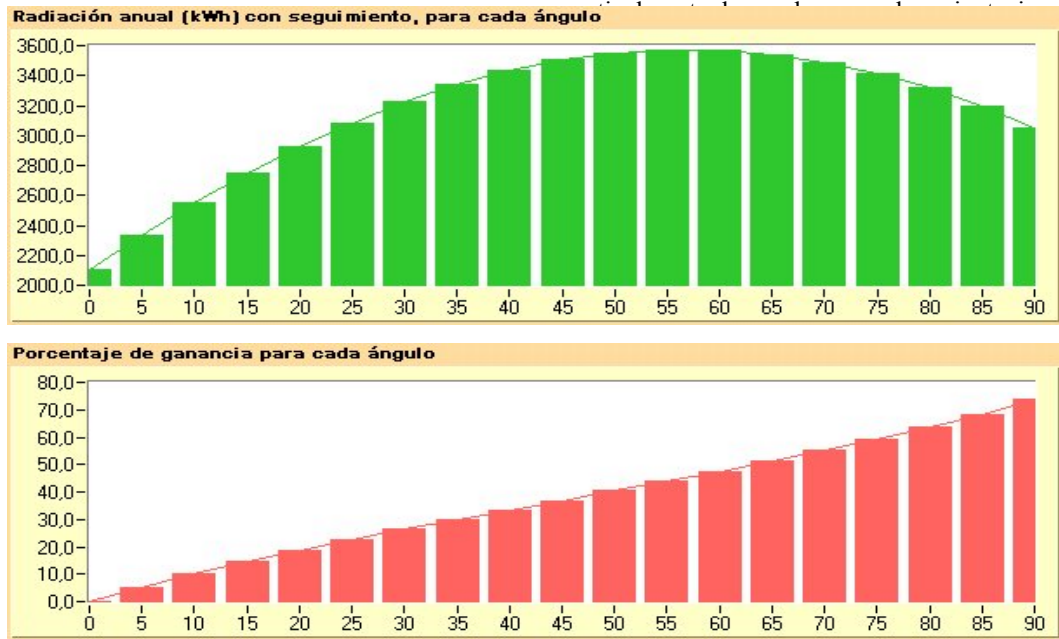
Se calcula que, aproximadamente, la ganancia de colocar la superficie a la inclinación óptima frente a situarla horizontalmente supone un aumento de más del 20% en la captación. Se puede observar también que el caso más desfavorable es el de la superficie vertical (90°).

En la figura 4 se muestra la radiación anual incidente para diferentes ángulos de inclinación sobre un sistema con seguimiento. Para este caso se ve que la inclinación óptima difiere de la obtenida en un sistema sin seguimiento, estando entre 55° y 60°.

La figura 5 representa la ganancia que supone considerar un sistema con seguimiento, calculado para los diferentes ángulos de inclinación. Se observa que para las inclinaciones óptimas en los sistemas de seguimiento la ganancia frente a los sistemas sin seguimiento es superior al 40%.



torno a Abril la radiación comienza a incidir mas



Figuras 2,3,4 y 5 (respectivamente)

4.3 EJEMPLO III

En este caso se va a considerar una latitud de 63°.

La figura 6 representa la radiación incidente a lo largo de un año sobre las diferentes orientaciones. Se observa que en la fachada sur sobre la que mas radiación incide. Únicamente en verano (durante unos 100 días) la radiación sobre las orientaciones sudeste y sudoeste es ligeramente mayor, y durante aun menos días (unos 50 días) es superior la de las orientaciones este y oeste. Hay que notar también que la diferencia entre la radiación incidente en los días centrales del año frente a la de los días de invierno, que llega a ser superior a 5 veces una de otra.

El motivo de estos resultados es haber seleccionado una latitud muy al norte. Esto implica días muy cortos en invierno y muy largos en verano, por lo que la radiación es muy diferente a lo largo del año.

4.4 EJEMPLO IV

En este ejemplo (figura 7) se calcula lo mismo que para el apartado anterior pero para una latitud distinta, 42°, que es aproximadamente la de Castilla y León.

En este caso las distintas orientaciones difieren bastante más, según sea la época del año. La orientación sur es, con diferencia, sobre la que mayor radiación incide en las épocas invernales. Pero en

sudeste y sudoeste sean en este caso la de mayor captación. Además tampoco es despreciable la época del año en que la radiación incidente sobre las superficies este y oeste es la predominante.

4.5 EJEMPLO V

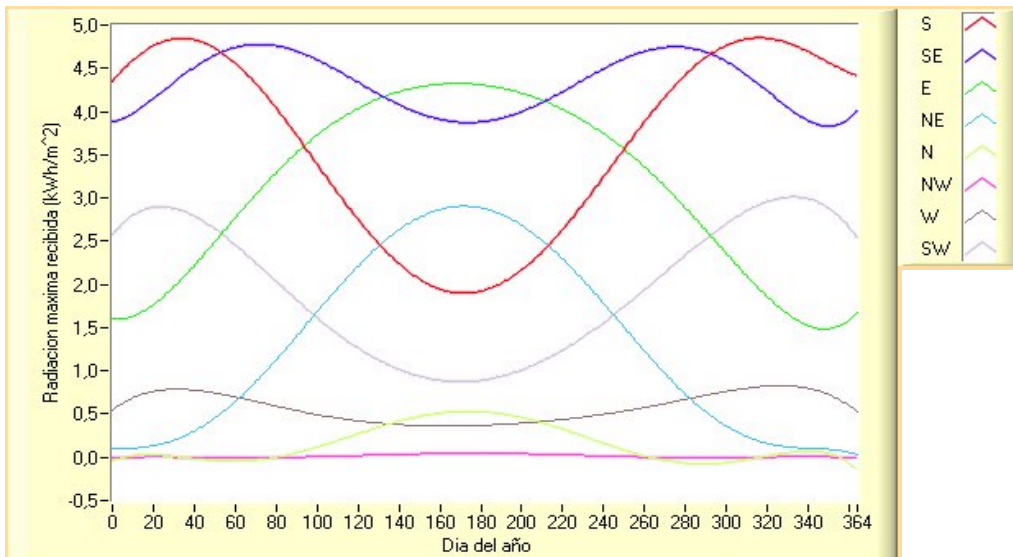
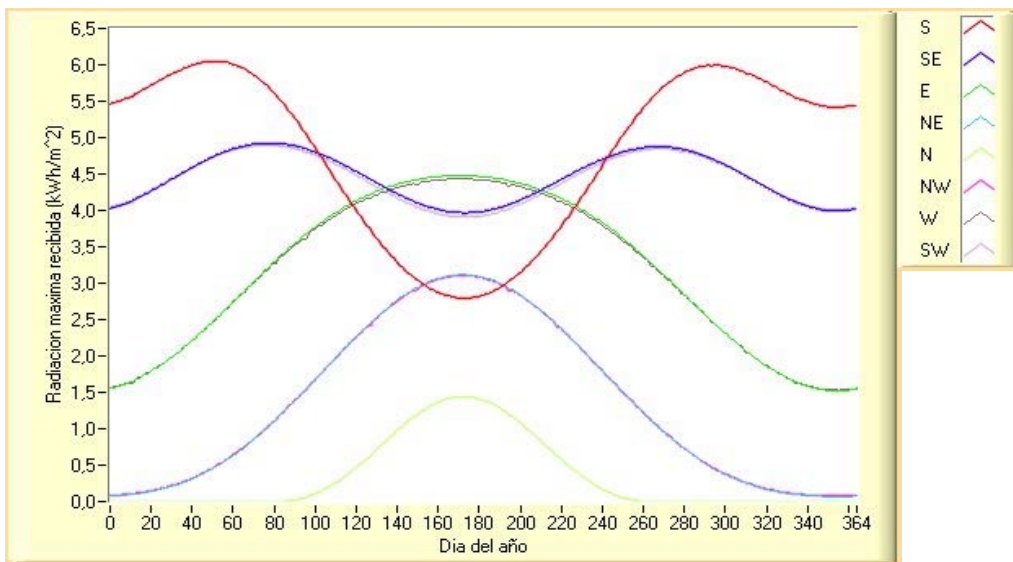
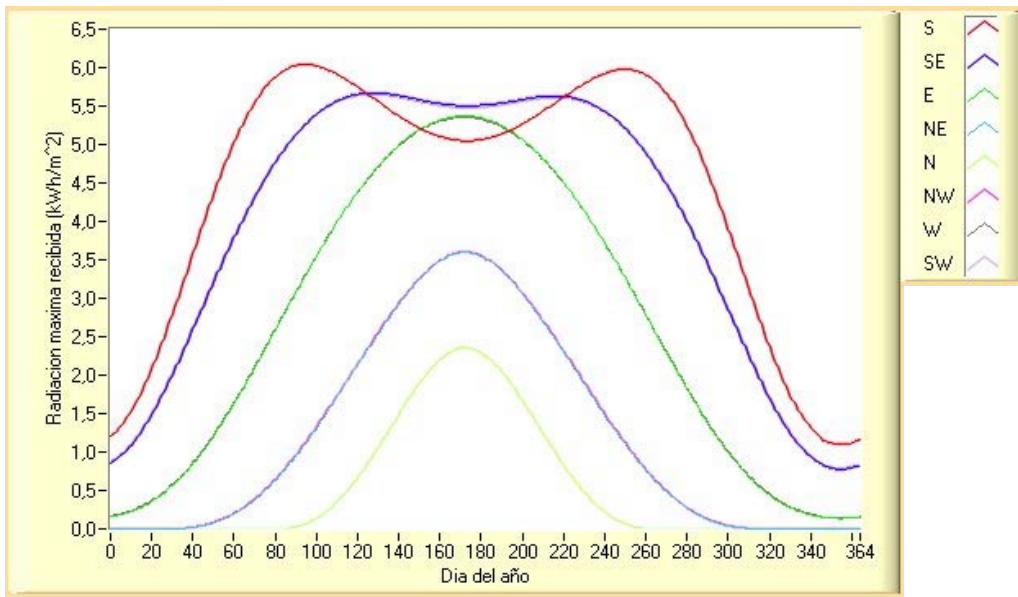
Se va a estudiar ahora el mismo caso que en el ejemplo anterior pero para un edificio de ocupación únicamente de 7:00 a 15:00.

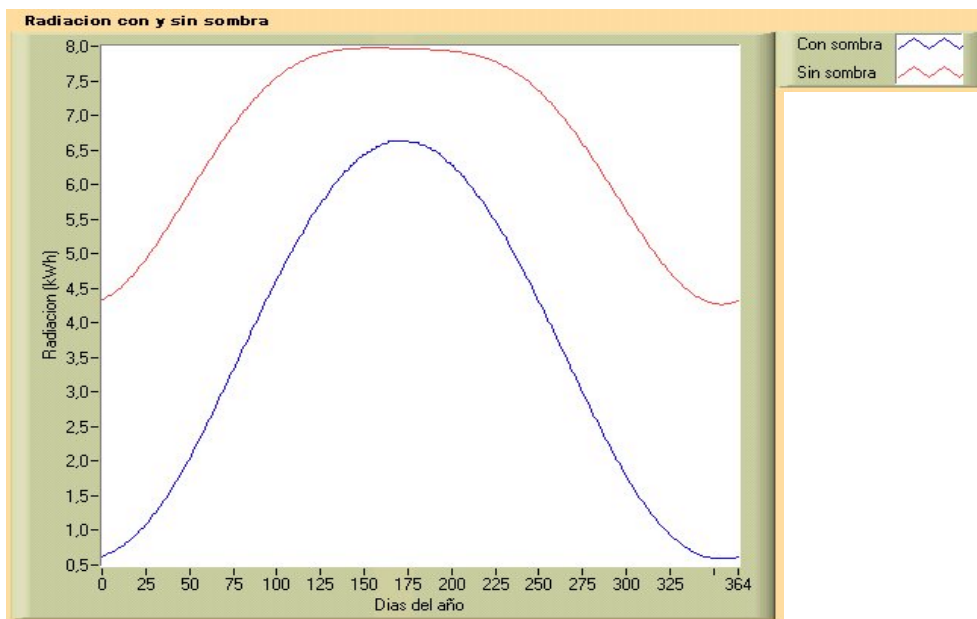
En este caso (figura 8) se observa como sobre la superficie sudeste la radiación incidente es con diferencia la mayor durante gran parte del año siendo no por mucho superada por la orientación sur en las épocas de invierno.

4.6 EJEMPLO VI

El programa calcula también la influencia que tiene un obstáculo sobre la incidencia de la radiación en una superficie.

En la figura 9 se representa la radiación que incide sobre una superficie libre de obstáculos (en rojo), y con un obstáculo de 15 metros de altura y situado también a 15 metros de distancia (en azul). Se aprecia como existe una pérdida muy importante de energía por haber considerado una relación lineal entre la altura del obstáculo y la distancia al mismo.





Figuras 6,7,8,9 (respectivamente)

5 CONCLUSIONES

Los modelos de radiación son útiles a la hora de estudiar sistemas solares en el caso de que no se disponga de datos reales de radiación.

Conocer la inclinación óptima para la cual una superficie tiene una incidencia máxima es de vital importancia sobre todo a la hora de dimensionar los sistemas solares (tanto fotovoltaicos como térmicos), ya que en la actualidad este cálculo se hace sin ninguna rigurosidad.

Evaluar el incremento de radiación incidente por considerar un sistema de seguimiento azimutal es de utilidad a la hora de determinar si puede ser rentable instalar un sistema de estas características, ya que permite comparar el ahorro de energía frente al coste adicional de la instalación. Además el programa calcula para que latitudes es más interesante un sistema de estas características.

Igualmente, en las instalaciones de energía solar, es de vital importancia conocer de antemano la influencia que tendrá sobre dicha instalación la existencia de obstáculos que puedan sombrear las superficies de captación solar.

En edificación, conocer la radiación incidente sobre las diferentes fachadas del edificio en las diferentes épocas del año permite hacerse una idea de las demandas de energía para calefacción y refrigeración que tendrán las diferentes estancias del edificio según

estén dispuestas en uno u otro lado. El poder limitar las horas sirve para definir esto mismo pero para edificios en los que la ocupación a lo largo del día no es completa sino que ocupa únicamente un período del día.

El modelado de los sistemas de seguimiento sirve de base a la hora de definir estrategias de control que optimicen su funcionamiento.

A la hora de diseñar el control de los sistemas de climatización de estancias es importante considerar la radiación que incide a lo largo del año sobre la fachada.

5 LIMITACIONES Y POSIBLES MEJORAS

El modelo de radiación considerado es un “modelo de día claro” lo que significa que no consideramos nubosidad. Puede ser interesante dar un toque estadístico al programa considerando datos de nubosidad de la región a estudiar para así llegar a resultados más exactos ya que no considerar nubosidad supone considerar en invierno una radiación mayor de la que realmente es.

El programa solamente estudia sistemas de seguimiento azimutal. Hacer un estudio teórico del resto de sistemas de seguimiento permitirá comparar estos y evaluar cual puede ser más adecuado en cada caso.

Referencias

- [1] Iqbal, M., (1983) An introduction to solar radiation, Academic Press, Toronto.
- [2] Hoyt, B., (1978) A model for calculation of solar global radiation, Solar Energy, vol. 21, núm. 1.
- [3] Robinson, N., (1966) Solar Radiation, Elsevier, Nueva York.