ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 6, Nº 2, 2002. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

CALCULO DE LA RADIACION QUE INCIDE SOBRE LOS COMPONENTES DE UN EQUIPO SOLAR

Luis R. Saravia[1], Santiago Russo y Hugo Tapia
INENCO[2]
Universidad Nacional de Salta - CONICET
Buenos Aires 177, 4400, Salta, Argentina
Fax: 54-387-4255489, e-mail: saravia@unsa.edu.ar

RESUMEN- Se presenta un programa numérico de calculo de la distribución de la radiación que llega a lo largo de un día a un equipo solar que ocupa un cierto volumen y posee una envolvente externa con posibles ventanas y una superficie interna que define una cavidad en la que se pueden colocar otros objetos. Como ejemplo puede pensarse en una cocina solar tipo caja con sus paredes y ventana así como una olla colocada en su interior. Se pretende que el programa sea de uso sencillo y no necesite de una descripción muy detallada del equipo. Se espera que los resultados tampoco tengan una distribución espacial de mucha definición, de modo que el cálculo pueda realizarse en un tiempo razonable sin necesidad de equipos de cálculo de alto rendimiento. Estos resultados están destinados a su posterior uso en una simulación térmica del comportamiento del equipo. En este trabajo se explica el método de cálculo, se describe una introducción a su uso y se muestran los resultados obtenidos con un ejemplo sencillo como el mencionado en este párrafo anteriormente. En esta etapa se considera que las caras externas e internas del equipo pueden absorber radiación o reflejarla en forma difusa. En una próxima etapa se incorporarán caras con reflexión especular. El programa está escrito en Visual Basic para Windows y se espera que quienes lo utilicen indiquen a los autores posibles mejoras o correcciones.

1. INTRODUCCION.

Un aspecto de importancia en un planteo global de la simulación numérica de un equipo solar es el cálculo de la radiación solar que incide sobre sus componentes. Si bien existen métodos muy divulgados de cálculo para estimar la radiación incidente horaria sobre una superficie dada (Duffie and Beckman, 1991), la simulación térmica de un equipo completo, como ser, por ejemplo, una cocina o un secador solar, exige determinar la radiación absorbida por cada componente como resultado de las distintas reflexiones e interacción de los rayos solares sobre los mismos. Recientemente (Saravia y Alia, 2001), se ha presentado un simulador térmico llamado SIMUSOL, que evalúa el comportamiento térmico de un equipo a lo largo del tiempo, pero el mismo requiere que se le entregue como datos la radiación absorbida por cada elemento del equipo. El presente trabajo introduce un programa que permite calcular la distribución de radiación, con lo cual se completa la programación necesaria para realizar la evaluación del comportamiento térmico de un sistema solar.

Existen programas muy detallados para el análisis de la iluminación, por ejemplo en edificios, o para la distribución de luz en una escena, por ejemplo para la creación de películas, que utilizan los llamados métodos de "ray tracing", pero los mismos no están orientados a determinar la absorción de radiación y en general son programas de gran envergadura con exigentes requerimientos computacionales.

A continuación se presenta un programa sencillo, al que llamaremos RADSOL3D, destinado a calcular la distribución de radiación absorbida por un equipo solar en sus distintas caras cuando es iluminado a lo largo de un día. El programa utiliza una descripción no muy detallada del equipo y permite obtener valores de la distribución de energía sobre las partes del mismo en un tiempo razonable y sin necesidad de introducir una descripción muy exigente de la geometría del sistema. La experiencia recogida en simulaciones indica que este nivel de cálculo es suficiente desde el punto de vista de la simulación térmica del sistema en la mayor parte de los casos prácticos.

El programa está escrito en Visual Basic para el sistema operativo Windows. Se supone que el equipo ocupa un cierto volumen y está formado por caras externas e internas con absorción y reflexión difusa, así como caras transparentes, con reflexión y absorción parcial, por las que la radiación puede entrar o salir del mismo. Un primer programa, llamado DIBUJANTE, permite definir al equipo solar. Este programa incorpora rutinas de dibujo en tres dimensiones con el fin de trazar esquemas del equipo con el fin de inspeccionar visualmente los datos para su eventual corrección.

1.- Investigador del CONICET
2.- Instituto UNSa-CONICET

Una vez definido el equipo, el mismo es iluminado por radiación solar a lo largo de un día y se calcula para cada hora del día la cantidad de radiación que es absorbida por cada una de las caras del equipo. Ello se realiza mediante un segundo programa llamado ESTIMADOR. Como resultado final se genera un archivo tipo ASCII con una tabla de doble entrada que indica para cada hora y para cada cara la radiación absorbida. Este archivo podrá ser leído por el programa de simulación térmica de sistemas solares SIMUSOL o eventualmente por otro programa similar.

En un futuro próximo se espera desarrollar una extensión del programa en la cual se podrán incluir caras internas con reflexión especular. También se espera poder disponer de una versión para el sistema operativo Linux.

En las secciones que siguen se explicará el método de cálculo, las rutinas numéricas empleadas para realizarlo, una descripción introductoria del uso del mismo y una aplicación a un ejemplo sencillo consistente en una cocina tipo caja con una olla colocada en su interior.

El programa es de libre distribución y su presentación tiene como uno de sus fines hacerlo conocer para que se utilice y se comuniquen los posibles defectos y mejoras al mismo.

2. EL METODO DE CALCULO

Al equipo solar se lo considerará formado por una envolvente externa y otra interna que rodean una cavidad. En la cavidad pueden existir otros objetos definidos por su envolvente externa. Cada envolvente está formada por caras planas poligonales. Algunas de las caras pueden ser transparentes, en cuyo caso se define el tipo y número de cubiertas que cubre esa cara. Estos datos se introducen a través de una base de datos que consultará el programa de cálculo.

Se supone que cada cara i reflejará en forma difusa la radiación que incide sobre la misma y sus propiedades ópticas quedan determinadas por un coeficiente de reflexión Ri. El de absorción será igual a 1 menos el de reflexión, (1 – Ri), ya que la radiación puede ser absorbida o reflejada. No se considerará una dependencia de los coeficientes con la longitud de onda de la radiación, aunque de ser necesario es posible repetir el cálculo para distintos valores de la misma. Para las cubiertas de las superficies transparentes se indicará el número de capas, índice de refracción, coeficiente de extinción y espesor de la capa a partir de los cuales se calcula la radiación reflejada, la absorbida en la cubierta y la transmitida hacia el otro lado. Por el momento no se considera la existencia de superficies con reflexión especular.

Se supone que inicialmente se dispone de la radiación diaria total sobre superficie horizontal y a partir de la misma se calcula por el método de Liu y Jordan la distribución horaria de radiación directa y difusa sobre una superficie normal al haz.

Con referencia a la radiación directa, para cada hora se genera una red de rayos solares paralelos con una distribución en el plano normal a los mismos sobre una retícula ortogonal de extensión tal que ilumine completamente al objeto que se defina. A cada rayo se le asigna el valor de radiación directa correspondiente al área que lo rodea. Para cada rayo se evalúa si corta la envolvente externa en una cara opaca. Si lo hace se acumula la radiación absorbida y la reflejada se pierde. Si corta una cara transparente, se calcula y acumula la radiación absorbida y la transmitida. El rayo transmitido se corta con las caras internas para determinar a cual de ellas llega. Allí se acumula la energía que es absorbida y se evalúa la reflejada en forma difusa para considerar su distribución posterior. Si llega a cortar una superficie transparente se evalúa la reflexión hacia el interior, que se considerará difusa, la absorbida en el vidrio, que se acumula para el cálculo térmico, y la transmitida al exterior, que se perderá.

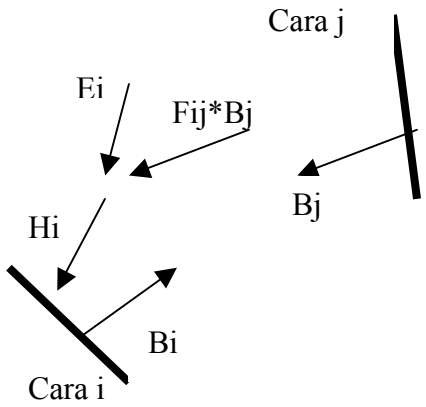

Fig. 1.- Intercambio de radiación difusa. entre las superficies i y j.

Para la radiación difusa, si llega a una superficie externa opaca, solo se evalua la radiación absorbida. Si llega a una superficie externa transparente, se supone que la radiación pasa el vidrio con la absorción correspondiente a un ángulo de 60 grados y luego pasa a formar parte de la radiación difundida por el vidrio hacia el interior.

Después de calcular la distribución de los rayos se conoce cuanta radiación es difundida por las caras internas del modelo, por lo que se puede encarar el cálculo de cómo se difunde la misma entre dichas caras. En este proceso se consideran tanto las caras opacas como las transparentes.

Esta distribución de la radiación difundida queda determinada por los factores de forma entre cada par de caras internas. Estos factores son calculados mediante un método de Montecarlo antes de iniciarse la evaluación de la distribución. Esto se realiza por una sola vez ya que estos valores solo dependen de la geometría del equipo. Para

aplicar el método cada superficie se divide en elementos de igual superficie distribuidos uniformemente sobre toda su área y se supone que un cierto conjunto de rayos es emitido por cada elemento en direcciones definidas al azar. Luego se realiza un conteo del número de rayos de una superficie que llegan a cada una de las otras. La precisión del cálculo mejorará en la medida que se utilicen más elementos y más rayos por elemento.

Una vez calculados los factores de forma Fij entre una cara i y otra j, se calcula la distribución de radiación difusa mediante un sistema de ecuaciones lineales como se explica a continuación y se ilustra en la figura 1. Para una cara i llamaremos Bi a la cantidad total de radiación que es reflejada por la cara i. También llamaremos Hi a la cantidad total de radiación que llega a esa cara, la que está compuesta por la radiación que llega con cada rayo externo y por la radiación difusa intercambiada entre las caras. La primer relación entre estas cantidades está dada por el hecho de que la radiación Bi reflejada por una cara debe ser igual a la que llega a la misma, Hi, multiplicada por el coeficiente de reflexión de esa superficie, Ri:

$$Bi = Ri*Hi. \qquad (1)$$

Por otro lado, la radiación Hi que llega a una cara estará formada por la radiación de cada rayo externo, ya evaluada y a la que llamaremos Ei, y a la radiación difusa que viene de las otras caras, que se obtiene mediante los factores de forma:

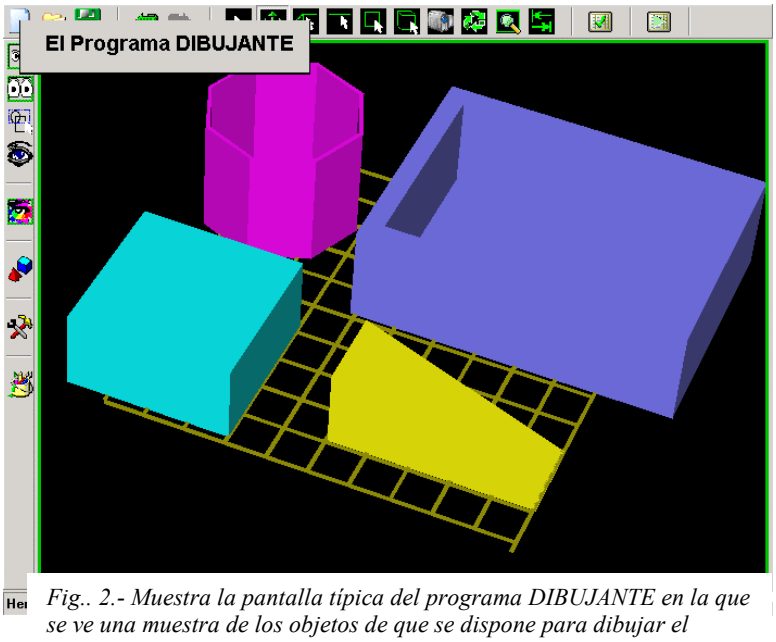

Fig.. 2.- Muestra la pantalla típica del programa DIBUJANTE en la que se ve una muestra de los objetos de que se dispone para dibujar el equipo

$$Hi=Ei+\sum Fij*Bj \qquad (2)$$

Si en la ecuación (2) se reemplazan las Bi por las Hi mediante la ecuación (1), se obtiene un sistema de ecuaciones lineales en Hi, una por cada cara i. Multiplicando Hi por el coeficiente de absorción (1-Ri) de la cara se obtiene la radiación difusa absorbida por esa cara, con lo que el cálculo queda terminado.

EL USO DE LOS PROGRAMAS, UN EJEMPLO.

A continuación se expondrá en forma muy sintética el uso y alcances de los programas utilizando un ejemplo muy simplificado, un modelo de cocina caja consistente en una caja con forma de paralelepípedo rectangular que tiene una entrada transparente en su cara horizontal superior cerrada por un doble vidrio. Tiene 70 cm de ancho, 50 cm de fondo y 25 cm de alto con una aislación es sus paredes de 5 cm de lana de vidrio. En su interior se colocará una olla de 25 cm de diámetro y 20 cm de altura. Se supondrá que todas las caras internas son negras con un coeficiente de absorción de 0.9. No se colocará un espejo externo.

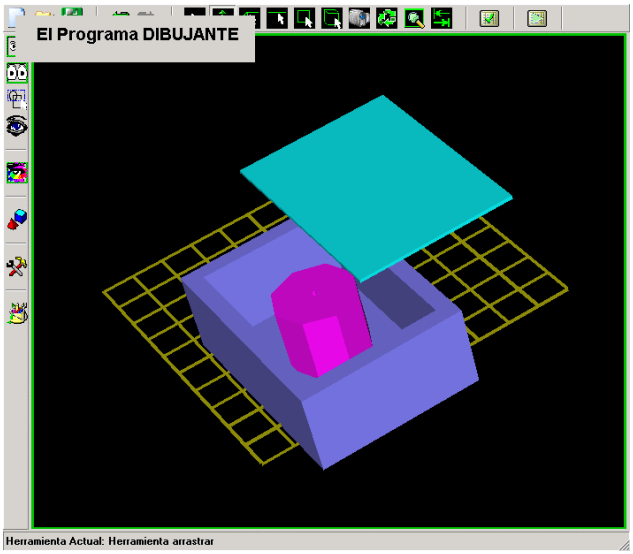

Fig. 3.- Muestra el modelo de la cocina caja con el vidrio algo corrido para ver la olla dentro de la caja.

El programa DIBUJANTE permite entrar los datos del equipo, lo que se hace en forma interactiva con una pantalla gráfica, la cual se muestra en la figura 2. Se dispone de barras de herramientas con funciones varias . Para la entrada de los datos se dispone de objetos tridimensionales tipo: un paralelepípedo de base rectangular, otro de base triangular, una caja y un cilindro de base poligonal, los que se muestran en la figura 2 como parte de la pantalla. Los objetos pueden ser sólidos o con paredes de cierto espesor. El cilindro de la figura 2 es un ejemplo de ello. El program realiza operaciones de unión y corte de objetos con el fin de producir figuras más complicadas a partir de los objetos básicos.

A continuación se construye el modelo de la cocina. La base de la cocina es una caja con las medidas ya indicadas, mientras que la cubierta transparente será un bloque con ancho y largo determinados por la caja mientras que el espesor se elegirá igual al mínimo aceptables, es decir 1 cm. La olla es un cilindro sólido de 8 lados con un diámetro de 20 cm. La figura 3 muestra la pantalla donde se ven los tres objetos elegidos. Aún no se ha colocado el vidrio encima de la caja para que se aprecie el interior de la cocina

El modelo generado es guardado en un archivo para su entrada al siguiente programa, el ESTIMADOR. Este realiza las operaciones necesarias para obtener el resultado final, es decir, la radiación absorbida por cada una de las caras del equipo solar definido por el modelo introducido. Como se explica a continuación, será necesario introducir un conjunto de parámetros que definen el problema. En cada caso aparecerá una ventana especial que permite entrar los datos Las etapas que realiza esta segunda parte son las siguientes:

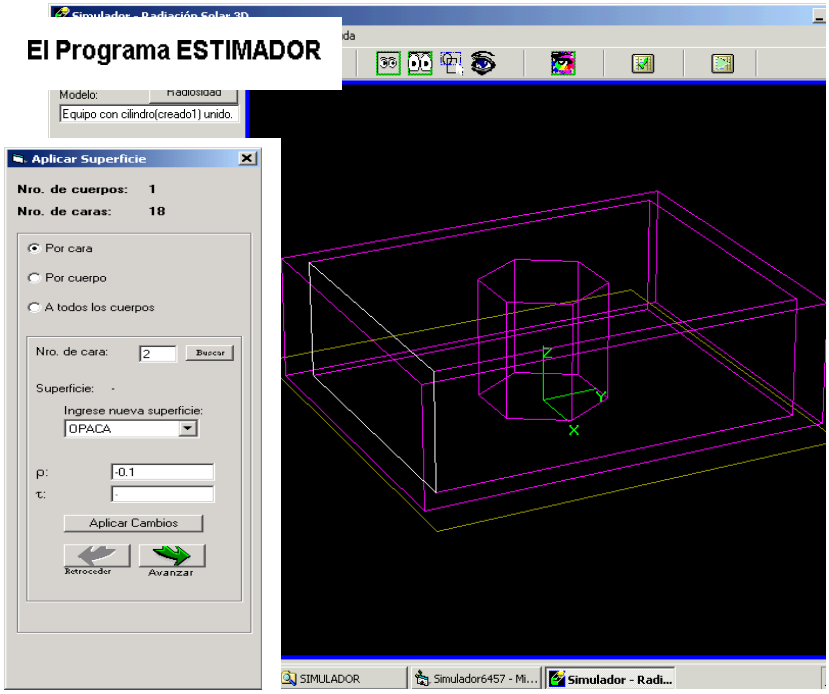

Fig. 4. Muestra el programa ESTIMADOR con el modelo en forma de estructura tipo alambre y la ventana abierta para introducir los datos de cada cara.

1---Se carga el modelo en la computadora y el programa revisa el mismo determinando cuales son las caras internas y externas del mismo, las cuales son numeradas para su identificación. Esta información es guardada en una base de datos. El programa muestra en pantalla el modelo y a pedido puede marcar en forma distintiva la cara cuyo número se solicita, lo que permite reconocer en cualquier momento la identificación correspondiente a una cara de interés. La figura 4 muestra una pantalla con el modelo en estudio.

2---Se calculan los factores de forma entre todas las caras.. Para eso se indica el número de elementos uniformemente espaciados que se define sobre cada cara y el número de rayos que se genera en cada uno para realizar el cálculo mediante el método de Montecarlo. Por ejemplo, pueden elegirse una cantidad de elementos por cara igual a 10 y 20 rayos que salen de cada uno, lo que indica que se usará un total de 200 rayos por cara . La experiencia adquirida muestra que si estos números son pequeños, del orden de los valores mencionados, aparece algún error en los factores, evidenciados por el hecho de que la suma de los mismos para una cara dada se desvía en algo del valor 1. A medida que estos números se elevan la precisión del cálculo mejora y la experiencia indica que en términos generales el uso de 500 rayos por cara da valores con error razonable. Este cálculo insume algunos minutos de máquina para computadoras con velocidades en el orden de 1000 Megahertz. El mismo se realiza una sola vez para cada modelo, ya que los factores de forma dependen exclusivamente de la geometría del mismo.

3---Para cada cara del modelo se deben introducir los parámetros que definen su comportamiento óptico teniendo dos opciones en cuanto al tipo de cara:

a) Cara opaca. En este caso se supone que los rayos incidentes serán en parte absorbidos y el resto de la radiación será reflejado en forma difusa. El único parámetro será la reflexión de la cara, mientras que su absorción valdrá uno menos el coeficiente de reflexión;
b) Cara transparente. En este caso existen una o más cubiertas superpuestas e iguales. Para ellas se deberá dar el número de cubiertas, su índice de refracción, su coeficiente de extinción y el espesor. Con estos datos se calculará la radiación reflejada hacia el exterior por la cara, la radiación absorbida cuando el rayo atraviese las cubiertas y la transmitida, que entrará a la zona interna y llegará auna de las caras correspondientes.

4---A continuación se introducen los datos de la radiación solar para el día a calcular: número que identifica el día del año, latitud del lugar y radiación total diaria sobre superficie horizontal. A partir de ellos se calcula el azimuth y altura del rayo solar hora por hora. Por otro lado se define un haz de rayos distribuidos sobre una grilla rectangular uniforme de tamaño suficiente para iluminar todo el modelo. Mediante el método de Liu – Jordan se calcula la radiación directa y difusa sobre cada cara del modelo.

5---En este momento se dispone de todos los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo, el que se realizará en el siguiente orden:

c) Se selecciona una hora

d) Con los ángulos del rayo correspondiente a la hora se toma un rayo del haz que barre el modelo y se determina con la cara externa con la cual corta. Habrá dos opciones: i) Si esta es opaca, el haz se absorbe y se refleja no volviendo al modelo. Por tanto, se guarda la radiación absorbida y ese rayo termina su acción. ii) Si la cara es transparente el haz la atraviesa, reflejándose algo y absorbiéndose otra parte. La radiación transmitida entrará al espacio interior y cortará alguna de las caras internas. Nuevamente aparecen dos opciones: i) Si esta es opaca, se absorbe parte del rayo y se refleja el resto en forma difusa. La absorbida se va acumulando para conocer al final la radiación absorbida por esa cara. Por otro lado, la reflejada se almacena para que al final se calcule su distribución sobre todas las caras internas. ii) Si la cara es transparente, se determina las partes reflejadas, absorbidas y transmitidas. La última sale al exterior y se pierde. Las absorbida se acumula. La reflejada será tratada en forma aproximada: se la supondrá difusa y entrará junto a las caras opacas en el cálculo final de distribución. En realidad, esta reflexión es especular, pero por el momento no se ha programado el manejo de superficies especulares. En la mayoría de los casos esta aproximación causará poco error ya que el haz tiene ya poca intensidad al haber estado en contacto con dos caras en sucesión.

6---El programa genera una tabla a doble entrada donde figura la energía absorbida por segundo, expresada en vatios, como función de la cara y de la hora. Esta tabla se guarda en un archivo ASCII para su uso en el programa de simulación SIMUSOL u otro similar..

CONTROL DE LOS RESULTADOS

Es conveniente establecer un control de los resultados obtenidos. El más importante es el control del balance energético del cálculo. La energía que llega al sistema solar debe ser igual a la que queda en el sistema solar como energía absorbida mas la suma de la que vuelve a salir como energía reflejada en las caras externas y la que sale desde el interior a través de las caras transparentes. Este balance es realizado por el programa y mostrado en un cuadro debiendo cerrar con un error muy pequeño. Existen algunas diferencias provenientes de los errores numéricos y las aproximaciones adoptadas.

CONCLUSIONES

El programa presentado aquí, RADSOL3D, junto con el programa SIMUSOL, permiten encarar la simulación térmica, dando únicamente los datos meteorológicos: temperatura ambiente y radiación solar, por lo que constituye un paso importante en el proceso de simulación térmica de sistemas solares.

Aún es necesario completar el mismo en dos aspectos: la inclusión de caras con reflexión especular y la posibilidad de colocar espejos externos con lo cual se tendría más de una fuente de radiación solar trabajando en forma simultánea. Se espera incorporar estos elementos a la brevedad.

Por el momento este programa ha sido preparado en el sistema operativo Windows por razones relacionadas con el trabajo de seminario en el cual se encuadra. Se espera que pronto se pueda preparar una versión en Linux, como el SIMUSOL, de manera que todo el proceso de cálculo se pueda llevar a cabo en un único sistema operativo.

RECONOCIMIENTOS

Los autores Santiago Russo y Hugo Tapia son alumnos avanzados de la carrera de Licenciatura en Análisis de Sistemas de la Facultad de Ciencias Exactas de la UNSa y han tenido a su cargo la programación del trabajo que aquí se presenta como parte del Seminario realizado bajo la dirección del Dr. Luis Saravia y que deben cumplimentar a efectos de obtener el título intermedio de Computador Universitario.

Este trabajo forma parte de las tareas de investigación que se realizan en el marco del CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, dentro de las actividades del Subprograma VI, Nuevas Fuentes y Uso racional de la Energía, en el proyecto de Cocinas Solares Comunales dirigido por el Dr. Collares Pereira. Los autores agradecen a los integrantes del proyecto la interacción que ha permitido encarar este estudio.

El trabajo ha sido parcialmente subsidiado por el Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta, CIUNSa, y por el CONICET.

BIBLIOGRAFÍA

Duffie, J. A. y Beckman, W. A., (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd ed., John Wiley and Sons

Saravia, L., Alia, D., (2001). SIMUTERM, un simulador de sistemas solares térmicos, *Avances en Energías Renovables y medio ambiente*, **5**, No. 1, pp. 08.07-08.12.

ABSTRACT

A numerical program for the calculation of the solar radiation distribution on a solar equipment is presented. Ithe equipment has an external surface with some windows and an internal surface defining a cavity where other objects can be placed. As an example you can consider a solar box cooker with a pot. The program is simple not requiring a high spatial definition so that the used computational time is short. The calculation method is explained, an introduction to its main characteristics is given and its use is explained through a simple example. At present the program considers external and internal surfaces which can absorb or reflect diffuse radiation. It is expected that specular reflection can be added shortly.The program has been prepared using Visual Basic for Windows.