

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN SOLARÍMETRO DE BAJO COSTO

Rodolfo Echarri^{1,2}, Sergio Vera¹, Ernesto Cyrulies¹, Andres Sartarelli¹, Inna Samsón³

¹Instituto de Desarrollo Humano, Universidad Nacional de General Sarmiento (IDH, UNGS)

J.M. Gutierrez 1150 Los Polvorines, provincia de Buenos Aires

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³INTEC (Instituto Tecnológico Santo Domingo. Rep. Dominicana)

FONDOCYT 2008-2-E1-010

RESUMEN

Se diseñó, construyó y calibró un solarímetro que basa su funcionamiento en la medición de flujo de calor a través de una barra metálica. Se muestran las curvas obtenidas con nuestro instrumento en días claros y su relación con las calculadas con el método de Hottel encontrándose un buen acuerdo entre las mismas. Por otro lado, se midió el tiempo de respuesta del instrumento completo y el de los sensores. Además se evaluó en forma numérica la respuesta térmica de la barra mencionada. Se encontró que es posible mejorar el comportamiento del dispositivo optimizando el contacto térmico de los sensores.

Palabras clave: Radiación solar, Solarímetro, Tiempo de respuesta.

INTRODUCCIÓN

El Sol es la fuente principal de la energía presente en la mayoría de los procesos en la Tierra. Dicho astro, emite cantidades importantes de energía por unidad de tiempo desde su superficie. Este valor es de aproximadamente 1367 W/m^2 a tope de atmósfera para un plano normal a la radiación incidente. Sin embargo, la cantidad de radiación que se recibe en la superficie horizontal a nivel del mar es menor debido a diversos factores entre los cuales se encuentran la inclinación de la superficie expuesta respecto de la horizontal y la absorción de la atmósfera. Ésta última, se debe a la presencia de nubes y aerosoles.

Existen varios modelos teóricos (Liu B.Y.H. y Jordan R.C, 1960) (Page J.K, 1961) (Hottel H. C, 1973) que permiten estimar la radiación solar, pero es obvio que ninguno puede dar cuenta de la radiación particular para un punto específico de la Tierra en un instante dado. Para eso hace falta una medición y para ese fin se utilizan solarímetros que suelen ser clasificados, según su principio de funcionamiento en termoelectrónicos y fotovoltaicos (Grossi Gallegos H. et al, 2008). Los primeros hacen uso de termocuplas, que permiten obtener una diferencia de potencial proporcional a la diferencia térmica. Los solarímetros fotovoltaicos, en cambio, utilizan material semiconductor como detector. El principio de funcionamiento de nuestro modelo es, en cambio, la medición de un flujo de calor a través de una barra metálica.

Hacemos un breve resumen de la calibración del instrumento y analizamos el desempeño del mismo en cuanto a su tiempo característico. Para eso realizamos mediciones de la respuesta transitoria a un estímulo tipo onda cuadrada.

DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO

El instrumento consta de una barra metálica, uno de cuyos extremos se encuentra asociado a un disco de cobre de 30mm de diámetro que está expuesto a la radiación solar, mientras que el otro extremo se está vinculado a una base de aluminio que se encuentra en contacto con el aire circundante, y protegido de la radiación. La barra en cuestión es de acero SAE 1010, con un diámetro de 5mm y una longitud de 50mm.

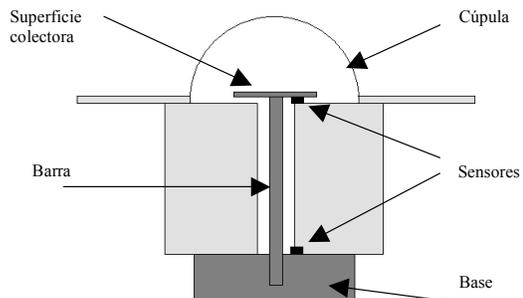


Figura 1: Esquema y foto del solarímetro.

Cuando el disco de cobre recibe radiación, aumenta su temperatura y el valor de ésta en el estado estacionario depende de la temperatura de la base y de la cantidad de calor que está circulando por la barra. Dicho de otro modo, de acuerdo a la ley de Fourier:

$$\dot{Q}_c = -k(T_1 - T_2) \quad (1)$$

Dónde el primer miembro representa el flujo de calor a través de la barra el que a su vez, despreciando las pérdidas, es igual a la radiación recibida por el disco, y T_1 y T_2 son las temperaturas en los extremos de la barra. Por otro lado, k es la conductividad de la barra.

Haciendo un análisis de las pérdidas se encuentra que las más importantes son las debidas a las pérdidas de calor a través del aislamiento lateral de la barra, las que de todas formas son proporcionales a la diferencia de temperaturas ($T_1 - T_2$). Por lo tanto la radiación incidente sigue siendo proporcional a dicha diferencia sólo que en la expresión anterior debemos colocar una constante que tenga en cuenta tanto la conducción como las pérdidas.

Por otro lado, para evaluar las pérdidas por radiación del disco superior, debe tenerse en cuenta que se tiene una elevada emisividad (0,95) dada por sus características superficiales. Sin embargo, para la temperatura de operación de este elemento (50 °C), se tiene una emisión cuyo máximo se sitúa aproximadamente en los 9 μm . Para la curva correspondiente, el vidrio utilizado en la cúpula del instrumento resulta ser esencialmente opaco disminuyendo significativamente las pérdidas desde el disco.

CALIBRACIÓN

La forma mas natural de calibrar nuestro instrumento, hubiera sido hacerlo con un solarímetro patrón colocado en el mismo lugar, pero debido a no poseer acceso a este tipo de dispositivos, lo hicimos por medio de métodos más indirectos.

Como ya se puntualizó, la relación entre la radiación incidente y la diferencia de temperaturas es lineal, así que se busca una recta de calibración. Para eso se midieron las temperaturas de ambos extremos de la barra durante las horas de sol para un día claro, y se graficó la radiación calculada con el método de Hottel (Hottel, H. C, 1976) en función de dicha diferencia de temperaturas. Se repitió el procedimiento para varios días pero aquí mostramos uno de los resultados donde se puede apreciar que la suposición de linealidad es válida.

Los sensores utilizados son del tipo DS1624, que poseen una salida digital de precisión 0,03°C. La señal obtenida es adquirida por medio de un hardware y software (en C++) desarrollado por nosotros.

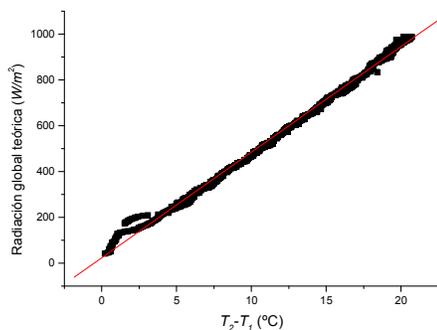


Figura 2: Determinación de la recta de calibración 29/12/08

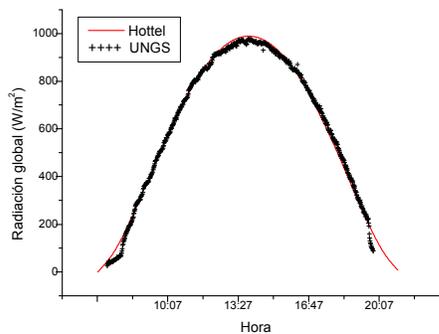


Figura 3: Comparación de curvas para el 29/12/08

Por otro lado, se compara la curva obtenida con nuestro solarímetro con los datos provenientes de una estación automática que se ubica en el predio del Servicio Meteorológico Nacional, ubicado en la localidad de Villa Ortúzar, en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (<http://www.smn.gov.ar>)

El hecho que nuestro dispositivo se encuentre en el campus de la Universidad Nacional de General Sarmiento (Los Polvorines) y la estación meteorológica a aproximadamente veinte kilómetros nos condicionó, también en este caso, a realizar mediciones comparativas solamente los días de cielo claro. Esto se debe a que la variación de radiación por nubes o condiciones atmosféricas particulares podría afectar de modo diferente a cada dispositivo.

Por otro lado, la diferencia horaria solar (consecuencia de las distintas ubicaciones geográficas) no resulta significativa ya que sólo es de aproximadamente 1 minuto (0,25° de longitud) y además nos encontramos prácticamente en la misma latitud. La comparación de las curvas da el siguiente gráfico:

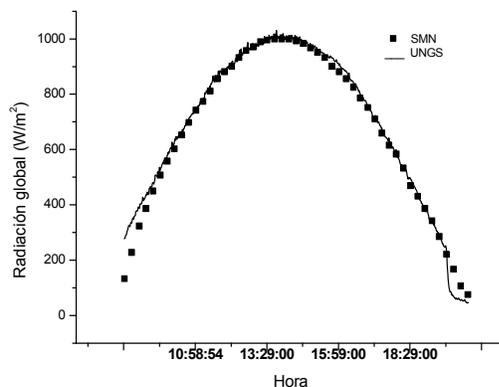


Figura 4: Comparación entre las curvas del SMN y de la UNGS para el día 29 de diciembre de 2008

De los datos obtenidos con las mediciones y la curva teórica se deduce que el error promedio es del 9,3 %. Sin embargo, este valor se reduce sensiblemente si no tenemos en cuenta los valores menores a los 200 W/m². En ese caso el error promedio es del 3,2 %, es decir, por encima de los valores de radiación mencionados, la correlación entre los datos experimentales y los valores obtenidos con el método de Hottel resulta satisfactoria con un coeficiente de correlación lineal de 0,998 (Passamai, V. J, 2000) (Hernández, A. L, 2003). Este comportamiento se repitió para todas las mediciones realizadas.

Otro hecho que resulta importante destacar es el corrimiento temporal entre una curva y otra. Como se puede ver en el gráfico mostrado en la figura 5, para los datos experimentales el máximo de radiación se produce unos doce minutos más tarde que el correspondiente valor teórico. Esto no quedó evidenciado en los gráficos anteriores, porque se realizó un corrimiento temporal para realizar la calibración.

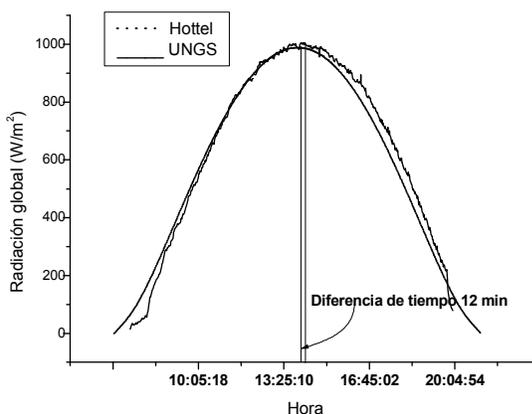


Figura 5: Gráfico que muestra el corrimiento temporal del mediodía solar para el 29 de diciembre de 2008

DESEMPEÑO TEMPORAL

Para evaluar el tiempo de respuesta del instrumento se procedió a colocar una lámpara de filamento de 100 Watts a una distancia de 14 cm medidos desde el disco del solarímetro, lo que nos da una intensidad aproximada de 400 Watt/m². Es sabido que el espectro de una lámpara de tungsteno es bien diferente del espectro solar y esto nos conduciría a errores si pretendemos calibrar con dicha lámpara para luego medir la radiación solar, en nuestro caso esto no reviste importancia alguna. Dicho de otro modo: la radiación proveniente del filamento es utilizada sólo para elevar la temperatura del disco de cobre ennegrecido lo que podría haber sido hecho con algún otro método, por ejemplo, una fuente de calor. Lo que nos interesa en este caso es cuánto tiempo tarda el instrumento en llegar al estado estacionario y no los valores de radiación que registra. A continuación se encendió la lámpara y se la apagó un tiempo después con el fin de obtener un pulso acotado de radiación. El experimento se repitió tres veces. La figura 6 muestra una de las curvas obtenidas.

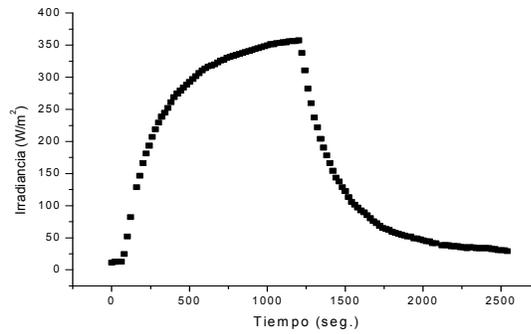


Figura 6: prueba de respuesta

Con estos datos, se realizó el ajuste de las curvas para la parte ascendente en forma separada de la descendente utilizándose, para ambas curvas, la expresión:

$$Y(t) = P_1 + P_2 e^{(-t/\tau)} \quad (3)$$

Esto es equivalente a suponer que la difusividad de la barra es mucho mas alta que la del medio exterior, y aunque no es totalmente cierto, como se verá en la sección “respuesta de la barra”, alcanza para tener una idea del tiempo característico del sistema.

Las siguientes figuras muestran el ajuste para las curvas ascendentes y descendentes respectivamente. Dicho ajuste fue realizado con el programa “Origin”

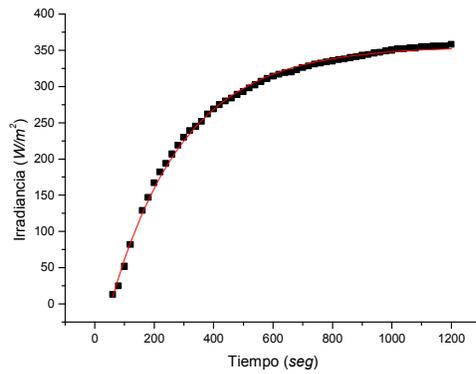


Figura 7: Ajuste de la curva ascendente.

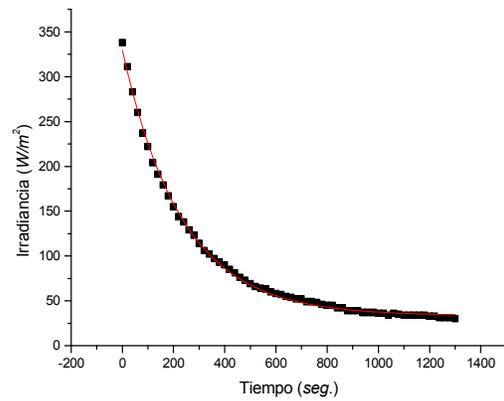


Figura 8: Ajuste de la curva descendente.

En la tabla 1 se pueden observar los valores de los parámetros obtenidos para las tres curvas.

En las tres mediciones realizadas se obtuvieron tiempos de respuesta similares tanto como para la curva ascendente como para la descendente.

Medición ascendente	τ_{asc}	Medición descendente	τ_{desc}
Curva 1	246,1 ± 3,7 seg.	Curva 1	231,7 ± 2,6 seg.
Curva 2	266,5 ± 5,8 seg.	Curva 2	221 ± 3,3 seg.
Curva 3	239,3 ± 3,9 seg.	Curva 3	239,3 ± 3,9 seg.

Tabla 1: Valores de los tiempos de respuestas para las distintas mediciones.

Tomando valores medios se obtiene que los tiempos característicos son:

$$\tau_{asc} = 250,6 \pm 4,5 \text{ seg.}$$

$$\tau_{desc} = 235,4 \pm 3,3 \text{ seg.}$$

Por otro lado nuestro solarímetro muestra una respuesta lenta, pero esto no es de importancia para el uso para el cual fue concebido, que es el análisis de un colector solar cilíndrico cargado con 20 Kg de carbón activado que tiene una inercia térmica mucho mayor que la del instrumento. De todas formas, para evaluar la posibilidad de mejorar su respuesta, analizamos por un lado la respuesta térmica de la barra metálica en forma numérica, y por el otro la respuesta de los sensores utilizados en forma experimental obteniéndose lo indicado en el punto siguiente.

Respuesta de la barra

Como una estimación del tiempo característico de la barra frente a los cambios de temperatura, se analizó el enfriamiento de la misma sometida a las siguientes condiciones:

La barra se encuentra aislada en toda su longitud y en uno de sus extremos.

La temperatura inicial de la barra es de 70 °C y la del aire en el extremo no aislado 20°C.

Para el coeficiente de convección asignado al aire, se tiene en cuenta la relación entre la sección de la barra y la superficie de la base del solarímetro, que representa la disipación real del sistema.

Este problema es equivalente al clásico de flujo de calor en una losa infinita de espesor L aislada por uno de sus lados (Kreith/Bohn 2001). La solución analítica está dada por una serie infinita, que puede ser aproximada con bastante exactitud por los primeros diez términos (en nuestro caso no encontramos diferencias de importancia tomando diez, cien o mil términos). Cada uno de los términos de dicha serie aparece multiplicado por una exponencial decreciente cuyo decaimiento está determinado básicamente por tres parámetros: la difusividad térmica α , la longitud de la barra L y el número de término n de la serie. A medida que crece n , el decaimiento es más rápido y por lo tanto para tener una estimación del tiempo característico del sistema en primera aproximación, sería suficiente tomar el primer término, lo que nos daría un comportamiento exponencial puro. En nuestro caso realizamos un programa computacional (C++) y dejamos evolucionar libremente el sistema a partir de las condiciones iniciales mencionadas.

El resultado se muestra en el gráfico de la figura 9 en donde se puede ver la evolución temporal de la temperatura para diferentes posiciones de la barra.

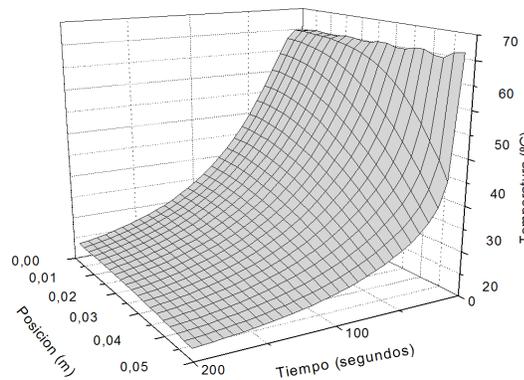


Figura 9: Evolución temporal de la temperatura en la barra.

Del análisis de los datos, y considerando una caída de temperatura del 63% de la diferencia inicial entre la barra y el ambiente se encuentra un tiempo característico de 40 segundos. Dado este resultado, queda claro que la respuesta de nuestro instrumento no está limitada por las características de la barra utilizada.

Respuesta del sensor

Para analizar la respuesta propia del sensor DS1624, se lo impermeabilizó convenientemente manteniendo la mejor transferencia térmica posible, se lo sumergió en agua a aproximadamente 90 °C, y luego de alcanzar una temperatura estable, se retiró del agua caliente y se lo dejó enfriar al aire. Durante todo el tiempo el sensor estuvo conectado a la computadora y se fue tomando su temperatura en función del tiempo.

En la figura 10 se puede ver la curva obtenida.

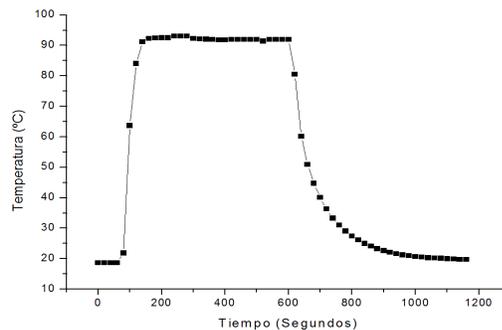


Figura 10: curva de respuesta del sensor.

A simple vista se nota un tiempo característico para la subida de temperatura que es mucho menor que el de bajada. Esto, seguramente está en relación con que en un caso el detector está sumergido en agua y en el otro al aire lo que provee una conducción hacia o desde el sensor que cambiará como mínimo en un factor diez (que es la relación entre los coeficientes de convección del agua (100 w/ °K m²) y del aire (10 w/ °K m²).

Para el ajuste se probó con las curvas provistas por el Origin y se eligió la que mejor ajustaba en cada caso sin que mediara ninguna justificación física para la elección.

Se ajustó la zona de crecimiento de la curva por medio de la ecuación:

$$T = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{t-t_0}{\tau}}} + A_2 \quad (4)$$

Donde:

A₁ = 18 °C; A₂ = 91.9°C; t₀ = 77.1 seg. y τ = 7.3 seg.

El ajuste logrado se muestra en la siguiente figura:

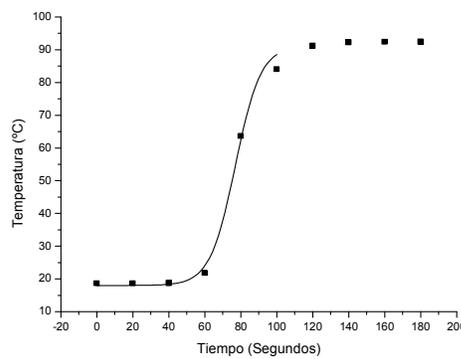


Figura 11: Ajuste de los valores experimentales de la curva ascendente.

En la expresión anterior, T es la temperatura, t el tiempo y τ la constante de tiempo del sensor. Para una curva de este tipo se considera que el sistema llega al estado estacionario luego de 4 τ, lo que en nuestro caso da un valor de 30 segundos aproximadamente. Este tiempo también está muy por debajo de la respuesta de nuestro instrumento.

Para la zona decreciente, se utilizó para el ajuste, la curva dada por la expresión:

$$Y = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + B \quad (5)$$

Donde:

A = 72 °C; B = 21 °C y τ = 78 seg.

El ajuste se muestra en la figura 12

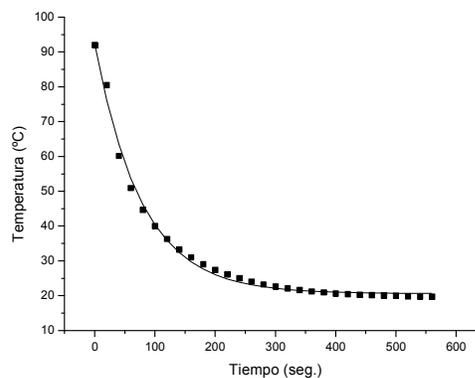


Figura 12: Ajuste de los valores experimentales de la curva descendente.

En este caso, tomando 3τ , tenemos un tiempo de respuesta de 234 segundos, que está en completo acuerdo con los valores hallados para el solarímetro. Esto parece indicar, que la resistencia térmica entre el sensor y la barra es equivalente a tener el sensor en aire, y que podría ser mejorada su respuesta con un diseño que mejore este contacto.

CONCLUSIONES

Se construyó un solarímetro basado en la medición de flujo de calor. Se lo calibró utilizando el método del día claro de Hottel y se verificó una concordancia satisfactoria en relación con los valores de radiación calculados y medidos.

Se comprobó una respuesta temporal de unos 4 minutos que, aunque adecuada a nuestros fines, podría resultar no acorde para otras aplicaciones.

De la evaluación y medición de los tiempos característicos del solarímetro completo y de cada una de sus componentes por separado, se concluye que es posible disminuirlo mejorando el contacto térmico entre los sensores y la barra.

Esto último puede explicarse de la siguiente manera:

El tiempo característico de la barra es menor que el del solarímetro completo.

El tiempo característico propio de los sensores sumergidos en agua es mucho menor que el de los mismos sometidos al aire y es del mismo orden que el tiempo de respuesta del solarímetro. También es menor que el característico de la barra.

De lo anterior es posible suponer que los sensores podrían medir los cambios de temperatura en la barra pero que lo que impide esto es una capa de aire entre el sensor y la barra.

REFERENCIAS

Grossi Gallegos H, Richijk C, VI curso de aprovechamiento energético de la radiación solar. UNLu. Pag 35- 51. (2008).

Hernandez A.L., "Geosol: una herramienta computacional para el cálculo de coordenadas solares y la estimación de irradiación solar horaria." Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. v.7, n.2, p.19 - 24, (2003).

Hottel, H. C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. Solar Energy, 18, 129.

Kreith, F. and Bohn M. S. Principios de transferencia de calor. Tomson Learning (2001)

Liu, B.Y.H. and Jordan, RC, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total radiation. Solar Energy vol. 4 No. 3, pp. 1-19 (1960).

Page, J.K. The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40° N- 40°S. In Proc. U.N. Conf. on New Sources of Energy, Paper N° S98 vol. 4, pp 378- 390 (1961).

Passamai, V. J. Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3, n°2 (08.89-08.92) (2000).

ABSTRACT:

A solarimeter which bases its operation on the measurement of heat flow through a metal bar was designed, built and calibrated. The curves obtained with the instrument on clear days and their relationships with those calculated by the method of Hottel are shown. A good agreement between them was found ($R^2 = 0,998$). In addition, the response times of the complete instrument and of the sensors were measured and the thermal response of the bar numerically evaluated. It is demonstrated that the behavior of our device can be improved by optimizing its thermal contact sensors.

Keywords: solar radiation, solarimeter, time response.