



PIRANÓMETRO FOTOVOLTAICO CON SISTEMA AUTÓNOMO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Vera Luis H¹, Busso Arturo Juan², Benitez Francisco²

¹ Facultad de Ing. Electromecánica, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE)

Web: <http://ing.unne.edu.ar>, Tel /Fax: +54-(0)3722-420076, e-mail: lh_vera@yahoo.com.ar,

² Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas (GITEA)

Facultad Regional Resistencia-Universidad Tecnológica Nacional (FRRe-UTN)

Web: <http://www.frre.utm.edu.ar/> Tel /Fax: +54-(0)3722 32928 – 48870, e-mail: ifbenitez@infovia.com.ar

RESUMEN: Para proporcionar una precisa evaluación del recurso solar, se debe incrementar la instalación de estaciones de medición de radiación directa, difusa y global. Sin embargo, el elevado costo de los instrumentos de medición cuyo elemento sensor es una termopila, representa un importante obstáculo.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, se planteó el desarrollo de un medidor de radiación solar global que combina un fotodiodo, de características comerciales, con un sistema difusor de luz montado en una base de aluminio, conformando un piranómetro fotovoltaico.

El comportamiento del sistema es estudiado, y los valores obtenidos son comparados con los valores leídos con un piranómetro Eppley PSP. Después de sucesivas modificaciones se llegó a elevados valores de correlación (0,998) entre ambos piranómetros.

Conjuntamente con este sistema, se realizó un sistema de adquisición de datos de bajo costo, capaz de almacenar datos horarios de radiación por el término de 4 meses.

Palabras Clave: piranómetro fotovoltaico, *datalogger*, radiación solar.

ANTECEDENTES

El uso de piranómetros, que utilizan como elemento sensor un elemento fotosensible de silicio, se halla muy difundido debido a su bajo costo comparado con el de piranómetros de termopila. Los principales inconvenientes que presentan los instrumentos con fotodiodos (células fotovoltaicas) son: su respuesta espectral limitada y no plana (Fig.1), y la considerable dependencia angular con respecto ángulo de incidencia de la radiación solar. Como consecuencia de ello, los valores de irradiación medidos pueden diferir de los reales en más de un 10% (Iqbal, 1983), dependiendo de la altura del Sol y las condiciones meteorológicas.

A fin de evaluar la posibilidad de disponer en la región de piranómetros confiables, de bajo costo y manufacturados localmente, se iniciaron actividades que se centraron en la utilización de fotodiodos comerciales como elemento sensor. Esta no es una idea nueva en nuestro país; en el año 1999 piranómetros de características similares a las aquí planteadas fueron desarrollados en la CNEA (Bolzi et al, 1999), con la diferencia que el elemento sensor era creado a partir de una oblea de silicio y se lograba el producto final a través de una serie de procesos de laboratorio. En nuestra región no poseemos la tecnología para desarrollar este tipo de sensores, por lo que se pensó en reemplazarlo por elementos que se pueden adquirir en una casa de electrónica.

Otros trabajos realizados sobre las características de los piranómetros fotovoltaicos fueron realizados por: Duffie y Beckam, 1991; Zanesco, 1991; Banjos et al, 1998; Chenlo et al; 1990, Alados-Arboledas et al, 1995, donde se puede encontrar información más detallada sobre la comparación de los tipos de medidores de radiación.

DESCRIPCIÓN DEL PIRANÓMETRO FOTOVOLTAICO

El piranómetro elaborado utiliza como elemento sensor fotodiodos de origen comercial, cuyas principales características son las siguientes:

- Área activa 7,5 mm²
- Tensión de circuito abierto: 580 mV.
- Corriente de cortocircuito: 1,15 mA.

Los valores eléctricos aquí presentados fueron obtenidos a través de medidas realizadas con un multímetro Keithley 2000 con una precisión de 6 ½ dígitos, para una radiación aproximada de 1000 W/m² +- 10% y 28° C de temperatura ambiente. La área activa del sensor es un dato especificado en el catálogo y a su vez conferida a través de un calibre de precisión.

Como elemento protector para el sensor y a su vez difusor de luz, se utilizó una cubierta plana de teflón de 3 mm de espesor. Esta cobertura permite independizar parcialmente el valor de la radiación solar del ángulo de incidencia. La cobertura debe difundir homogéneamente la radiación solar que a ella llega y ser resistente a los rayos UV, es por esta razón que se utilizó el teflón, que cuenta con ambas características.

Instrumentos desarrollados por otras instituciones, o industrialmente, poseen una cobertura de vidrio esmerilado, o de un material polimérico. Para este último tipo de coberturas, debido a características inherentes del material, sufren una degradación con la radiación ultravioleta, por lo que precisa su reemplazo o una recalibración cada 2 años para asegurar su precisión (Li-cor, 2005).

El sensor se fijó sobre un soporte de aluminio dividido en 2 secciones, una sirve para sujetar el sensor y el difusor, y la otra se emplea como base para la primera pieza. Esta última posee tres tornillos y una burbuja para nivelar el instrumento (Fig. 2).

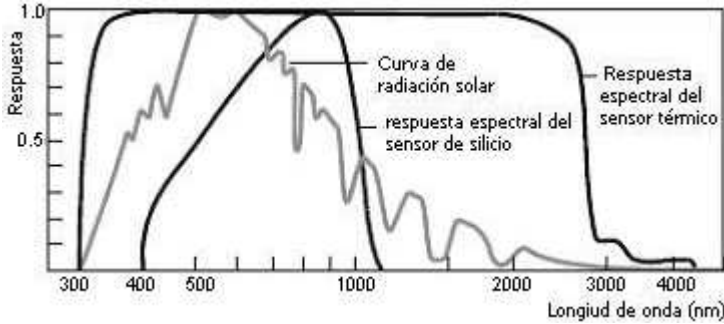


Figura 1.- Curvas normalizadas a su valor máximo que muestran la respuesta espectral de un sensor de silicio, un sensor térmico y al espectro solar a nivel del mar. (Kipp & Zonen, 2005).



Figura 2.- Foto del Piranómetro fotovoltaico construido.

Al fotodiodo se conecta una resistencia *shunt* de 50 ohm que provocará, en sus terminales, una caída de tensión próxima al 10 % del valor de la tensión de circuito abierto (Zanenco, 1991). La resistencia *shunt* se alojó en el interior del soporte de aluminio. Este procedimiento es realizado para garantizar la proporcionalidad del valor de tensión medido respecto a la radiación solar recibida por el sensor. En la figura 3 se ve el esquema de conexión así como la respuesta lineal esperada para distintos niveles de radiación.

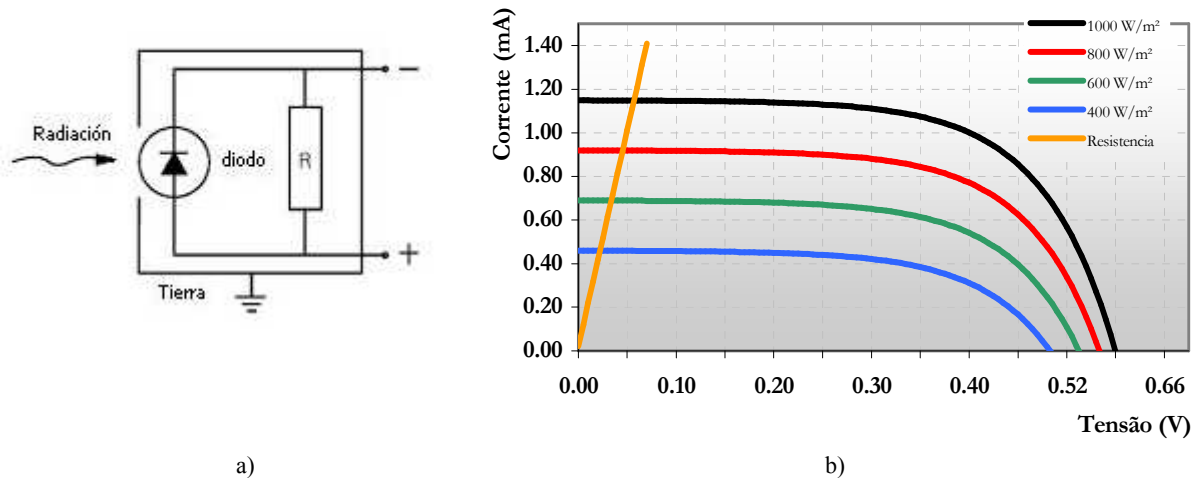


Figura 3.- a) Esquema de conexión de la resistencia *shunt*. b) Gráfico, no representativo del sensor utilizado, que muestra la proporcionalidad de la caída de tensión en el *shunt* respecto a distintos niveles de radiación en un dispositivo fotovoltaico (Prieb, 2002).

ESTUDIOS DE CAMPO

Siguiendo el procedimiento habitual de medición de radiación solar (Duffie y Beckman, 1991), se tomaron en campo simultáneamente lecturas instantáneas del piranómetro termoelectrico EPPLEY modelo PSP utilizado como patrón secundario (EPLAB, 2004) y del sensor fotovoltaico, calculando los valores medios cada 30 min.

A fin de comparar la respuesta de dispositivos fotovoltaicos y térmicos se deben tener en cuenta las características del sensor, la influencia del ángulo de incidencia de la radiación solar incidente, la respuesta a la temperatura, la velocidad de lectura para cambios de radiación y la distribución espectral.

La primera experiencia se realizó entre el día 14 y el 15 de marzo de 2005, con una radiación global diaria de 6.1 kWh/m² en ese período. La figura 4 muestra los valores obtenidos por ambos piranómetros.

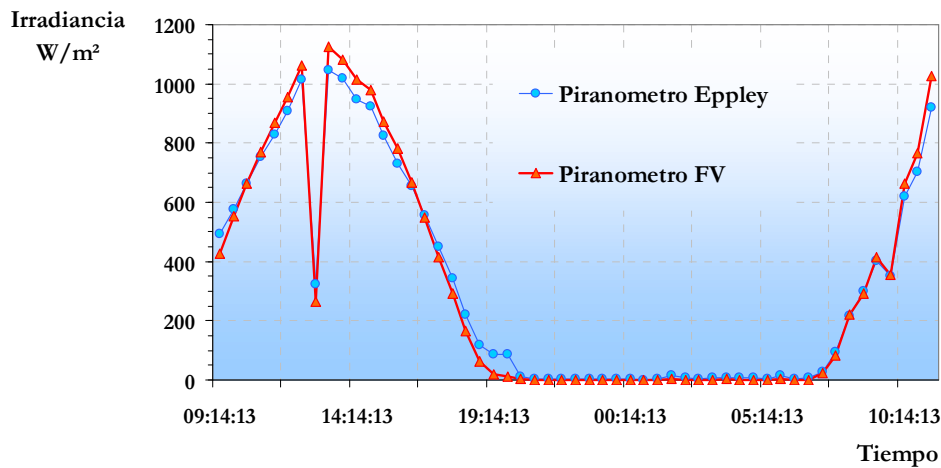


Figura 4.- Mediciones de radiación solar realizadas los días 14 y15 de marzo con ambos piranómetros.

Los valores de tensión entregados por el piranómetro fotovoltaico fueron corregidos a valores de radiación por medio de una constante que representa la media aritmética de la relación diaria entre la radiación medida con el piranómetro EPPLEY y el voltaje medido con el sensor fotovoltaico. En la figura 4 puede apreciarse un desvío, el cual se atribuye al camino óptico que la radiación solar tiene que atravesar a medida que aumenta su ángulo de incidencia sobre el difusor, porque a la mañana temprano y a la tarde la luz solar tiene que realizar un camino más largo sobre el difusor que al medio día.

Con los valores obtenidos con la cobertura plana, se calcularon las integrales horarias de valores registrados cada 5 min. durante varios días por ambos medidores y se determinó un error relativo medio del orden del 5%. Los valores obtenidos también fueron, correlacionados linealmente, obteniéndose un ajuste con coeficiente de determinación (R^2) que varió entre un 0.87 y 0.95. Se realizaron mediciones para días soleados y nublados (Fig. 5).

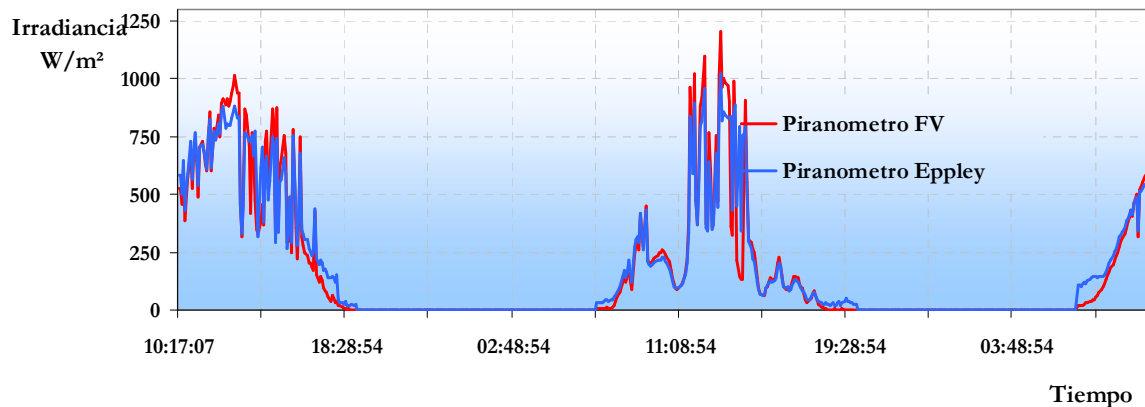


Figura 5.- Radiación medida con ambos piranómetros para días nublados.

El análisis de estos resultados permitió determinar las primeras modificaciones para optimizar el comportamiento del instrumento. Con la intención de corregir las diferencias entre las mediciones se cambió la forma y espesor del difusor así como también, la distancia entre el sensor y el difusor. Luego de sucesivas modificaciones se llegó a un piranómetro que difiere del planteado en una primera instancia en:

- Resistencia *shunt*: Varió de un valor de 50 ohm a 33 ohm,
- Difusor: se mantuvo el tipo de material, pero se cambio su forma (destalonado a 45°) y el espesor se incrementó a 6 mm.
- Cuerpo del piranómetro: se agregó una protección lateral para evitar reflexiones horizontales.
- Distancia: se disminuyó a 2 mm entre difusor y sensor.

Con las modificaciones presentadas se realizaron mediciones de radiación con el piranómetro fotovoltaico construido y se contrastó respecto de un piranómetro Eppley PSP, los valores obtenidos, cada 10 segundos, fueron adquiridos con un *datalogger* marca Agilent 34970A (Agilent, 2005). Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Energía Solar de la UFRGS, en la ciudad de Porto Alegre, Brasil. Las Fig.6 y Fig. 7 presentan los resultados obtenidos y el índice de correlación respectivamente para datos correspondientes al día 4 de agosto.

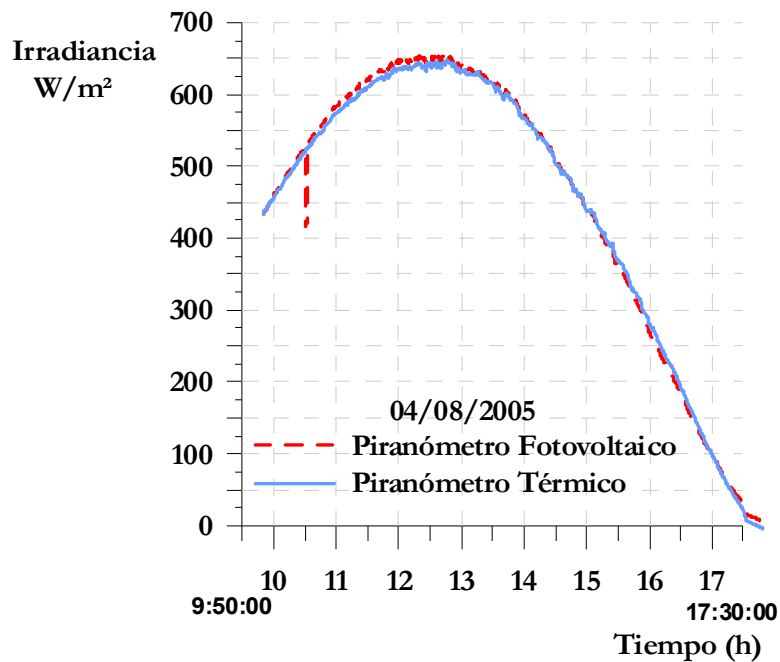


Figura 6.- Mediciones de radiación solar realizadas el día 4 de agosto con ambos piranómetros.

Con el procedimiento descrito se determinó como constante del piranómetro fotovoltaico un valor de $2,97 \times 10^{-5} \text{ V/Wm}^{-2}$ para el que se obtienen valores de radiación solar global con elevado coeficiente de correlación lineal. Este valor se mantuvo cercano a 0,99 para varios días de mediciones, lo que señala una buena correspondencia entre los valores de tensión indicados por el instrumento térmico y el fotovoltaico. Puede verse tanto en la figura 6 y 7 que existen una marcada dispersión en unos pocos valores medidos por el piranómetro fotovoltaico que se debieron a la presencia de un insecto en sus cercanías. No obstante, se puede ver el buen seguimiento del perfil de la campana de radiación solar diaria, lo que lleva a tener desviaciones instantáneas menores al 1,5 %. Para apreciar el comportamiento diario, se determinó el valor total de radiación solar global integrando los valores instantáneas, llegándose a diferencias relativas máximas del orden del 1 %.

Se tiene como meta adquirir datos durante varios meses con diferentes niveles de radiación a través del último sistema descrito e integrar los cada 10 minutos para encontrar la constante media de calibración diaria y horaria. Esta integración es importante debido a la diferencia en el tiempo de respuesta de los piranómetros fotovoltaicos y de los termoeléctricos, ya que los primeros tienen una velocidad de respuesta del orden de $10 \mu\text{s}$ y los otros del orden de 10 a 50 seg. (Tiba, 2000). Las medidas realizadas para tasas de adquisición de datos en cortos tiempos (menores al rango de respuesta de piranómetro térmico) no son necesarios integrar los debido a que las variaciones de radiación en estos casos no son importantes.

Para completar el estudio del instrumento desarrollado son todavía necesarias una serie de pruebas respecto a su comportamiento angular, térmico y temporal.

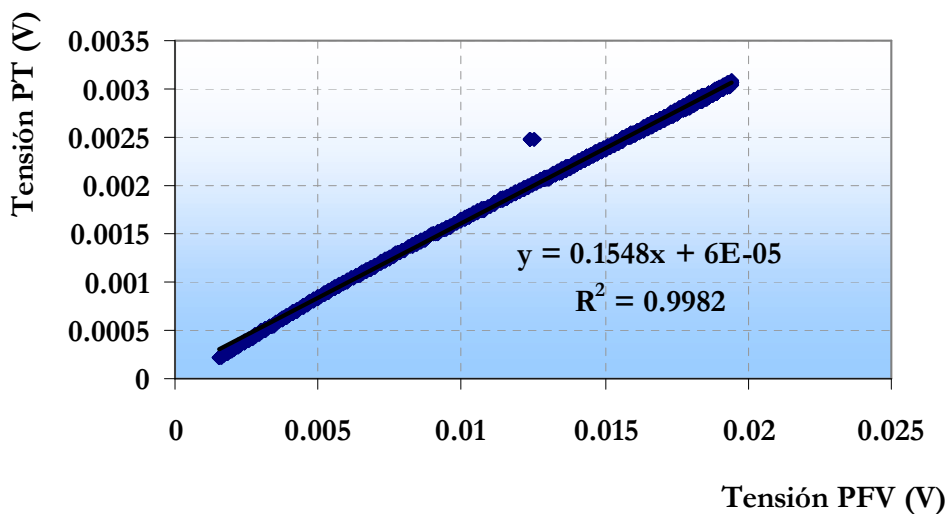


Figura 7.- Correlación entre los valores de tensión entre el piranómetro térmico y fotovoltaico.

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La medición de variables físicas, como ser la radiación solar, es una tarea fundamental en sistemas que utilicen tecnología fotovoltaica para generación de energía eléctrica o para sistema de calentamiento solar. En algunos casos, dichas mediciones deben realizarse de forma secuencial para determinar el comportamiento de la variable correspondiente en un periodo de tiempo específico. Para lo que se necesita un equipo que pueda realizar estas mediciones durante un determinado lapso de tiempo y a intervalos regulares según la aplicación. Teniendo en cuenta lo expuesto se inició la construcción de un equipo para realizar la adquisición y almacenamiento de datos de forma autónoma (Cekit, 2001), es decir, que no se tuviese la necesidad de una computadora para realizar dicha labor. La idea principal es que el instrumento puede llevarse hasta el sitio donde se desean realizar las medidas y, una vez tomados y almacenados los datos, se pueden bajar en una computadora portátil, la cual recibe a través del puerto serial los archivos almacenados.

Convertidor A/D: es el que transforma la señal analógica que llega desde el sensor fotovoltaico a una señal digital que es enviada al microcontrolador. Posee una resolución de 10 bits, se puede variar su tensión de referencia con lo que se logra adecuar el rango de la señal leída. Se realizaron pruebas con distintos valores de referencia, y cuando estos son menores a 300 mV el conversor se satura y envía una señal constante, por lo que se debe amplificar la señal de entrada (0 a 25 mV) 200 veces para trabajar dentro de puntos estables. Esto se logra agregando un amplificador operacional (AO).

Unidad de control: está conformada por un microcontrolador EEPROM con memoria de programa tipo Flash. Su función es la de leer la información enviada por el conversor A/D guardarla en una memoria y luego recuperarlos para enviarlos por un RS-232 a una computadora para su posterior tratamiento.

Botones de control: como el circuito debe realizar algunas tareas específicas, se dispusieron una serie de botones que el microcontrolador se encarga de interpretar para que se realice la tarea asignada. Además posee unos *jumpers* que permiten determinar el tiempo de muestreo, es decir cada cuanto tiempo se almacenará una variable.

Memoria EEPROM: Posee una capacidad de almacenamiento de 2048 bytes con un tiempo de escritura de aproximadamente 10 ms y, en conjunto con la capacidad de la batería, es el que limita el tiempo de autonomía de adquisición de datos. Este dispositivo se comunica serialmente con el microcontrolador.

Transmisión de datos: el microcontrolador posee un programa que se encarga de enviar los datos almacenados en la memoria los cuales pueden ser leídos por el programa hyperterminal del sistema operativo.

El adquisidor de datos está en etapa de prueba (fig. 8), sus funciones básicas las realiza correctamente pero, para que cumpla en su totalidad las funciones que llevarían a un óptimo funcionamiento del sistema, falta armar el amplificador de señal, modificar el programa para que realice una integración horaria de valores de radiación y para que solo adquiera datos en horarios con luz solar, estas últimas modificaciones tienen como objetivo economizar memoria y energía.

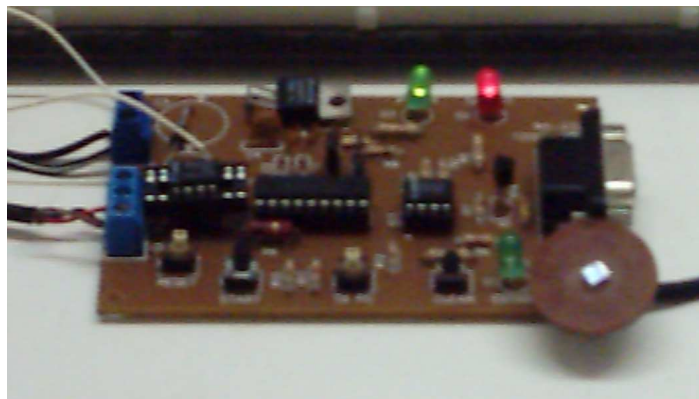


Figura 8.- Circuito electrónico desarrollado para la adquisición de datos junto con el fotodiodo que se seleccionó para medir la radiación solar.

CONCLUSIONES

Si bien este estudio no puede considerarse completo hasta que no se analice el comportamiento del sensor frente a diferentes condiciones climáticas (variaciones de: humedad relativa, temperatura), valores de irradiancia y ángulo de incidencia de la radiación solar, con los resultados parciales obtenidos se encontró que los valores diarios integrados tienen un desvío menor al 1% respecto a los valores adquiridos por el piranómetro térmico. Con la nueva geometría del difusor y modificaciones generales se corrigieron los desvíos que se presentaban en los horarios cuando la altura solar es baja, obteniéndose características similares a los piranómetros fotovoltaicos comerciales.

Los valores leídos por el sistema de adquisición de datos fueron comparados con un multímetro de precisión, marca Keitlhey 2000, obteniéndose valores con discrepancias menores al 0.5 %. Estos valores fueron comprobados para una tensión de referencia que varió de 1 a 5 volts.

Sobre la base de los resultados parciales obtenidos puede afirmarse que el piranómetro fotovoltaico de bajo costo muestra un óptimo comportamiento, similar a los comercializados en el exterior y, en conjunto con un sistema de almacenamiento de datos con una autonomía 4 meses, se presenta como una alternativa interesante para estudios de aprovechamiento de la radiación solar en nuestro país.

AGRADECIMIENTOS

A los departamentos de Mecánica y Termodinámica. Al Ing. Alberto Raush por la ayuda en la construcción del piranómetro, al Ing. Héctor Lorenzo por el asesoramiento en la construcción del *datalogger*, al Ing. Cesar Prieb, al Professor Arno Krenzinger por el asesoramiento y autorización para trabajar en el Laboratorio de Energía Solar de la UFRGS y al CNPq (Brasil).

REFERENCIAS

Agilent 34970A (2005). Data acquisition, Agilent Technology Inc., USA.

http://www.home.agilent.com/cgi-bin/pub/agilent/Product/cp_Product.jsp?LANGUAGE_CODE=eng&NAV_ID=-536897072.536883644.00&COUNTRY_CODE=US

Alados-Arboledas L., Batlles F. J. y Olmo F. J.(1995). Solar radiation resource assessment by means of silicon cells, Solar Energy, Vol 54, No. 3, pp 183-191

Bajons P. (1998). A Sensor Element For Direct Radiation Measurement, Solar Energy Vol. 63, No. 2, pp. 125–134.

Bolzi, C.G. et al (1991), Construcción Y Ensayo De Piranómetros Fotovoltaicos de Bajo Costo Desarrollados en la C.N.E.A, 1999. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 3, pp 29-33.

Cekit, 2001, Enciclopedia de Electrónica Industrial y Automatización. Ed Cekit, Colombia.

Chenlo, F.; Vela, N.; Olivares, J. (1990). Comparison between pyranometers and encapsulated solar cells as reference PV sensors-outdoor measurements in real conditions. Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty First IEEE

Duffie, J.A., Beckman, W.A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª edición. Jonh Wiley & Sons. New York.

EPLAB (2004), The Eppley Laboratory, Inc. Solar Radiation Measurement Instrumentation, USA

www.eppleylab.com

Iqbal, M., (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press. Canadá.

Li-cor Inc.,(2005), Environmental Research, USA,

http://ftp.licor.com/env/Radiation_Sensors/Manual/Terrestrial_SA_Manual.pdf

Kipp & Zonen (2005). Instruction manual Silicon Pyranometer SP LITE.

Prieb, C. W. (2002), “Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Tiba, Ch. y Fraidenaich, N. (2001). Atlas Solarimétrico do Brasil, Ed. Univesidade de UFPE, Brasil.

Zanesco, I. (1991), Analise e Construcao de um Piranômetro Fotovoltaico,. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Abstract: To provide a precise evaluation of the solar resource, the number of measuring stations of direct, diffuse and global solar radiation installed in the country should be increased. The high cost of thermopile base measuring instruments represents an important obstacle towards this goal.

Keeping this fact in mind, the development of a photovoltaic pyranometer for global solar radiation measurements was undertaken. The design combines a commercial photodiode with a light diffusor mounted on an aluminum base. The behavior of the system is studied. Readings are compared with those from an Eppley PSP pyranometer. After several modifications a correlation figure of 0,998 between both instruments was achieved.

A low cost data acquisition system able to store radiation data on a hourly bases for a period of up to 4 months was also constructed.

Keywords: photovoltaic pyranometer, datalogger, solar radiation.