

Diseño y construcción de un medidor de radiación solar

Design and construction of solar radiation instrument

CÉSAR ALEXANDER CHACÓN CARDONA

Físico Universidad Nacional de Colombia (1995), magíster en Ciencias, Física. Universidad Nacional (1999), investigador científico, Programa de Físico Química-Ambiental, Programa de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono (1996-2005). Publicación más importante, Atlas de Radiación Solar de Colombia (2005). Docente Asistente Facultad Tecnológica desde 2002 hasta el presente. Integrante del grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética (CEM) y del grupo de Investigación en Energías Alternativas (GIAUD) de la Universidad Distrital. Correo electrónico: alexchacord@yahoo.com

ÓSCAR EDUARDO CELY

Tecnólogo en electricidad, Universidad de Distrital Francisco José de Caldas. Integrante del grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética (CEM) y del grupo de Investigación en Energías Alternativas (GIAUD) de la Universidad Distrital. Correo electrónico: ocelyruiz@yahoo.com

FERNANDO GUERRERO

Tecnólogo en electricidad, Universidad de Distrital Francisco José de Caldas. Integrante del grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética (CEM) y del grupo de Investigación en Energías Alternativas (GIAUD) de la Universidad Distrital. Correo electrónico: fercho2066@hotmail.com

Clasificación del artículo: investigación (Conciencias)

Fecha de recepción: 19 de julio de 2007

Fecha de aceptación: 21 de julio de 2008

Palabras clave: radiación solar, fotodiodo, linealidad, radiómetro.

Key words: solar radiation, photodiode, linearity, radiometer.

RESUMEN

En este artículo se presenta la metodología utilizada para el diseño, construcción y calibración de un medidor de radiación solar (piranómetro fotovoltaico). El instrumento desarrollado con el propósito de cuantificar el recurso solar cumple con los

requerimientos de precisión de un instrumento de primer orden (linealidad, independencia del ángulo cenital y la temperatura), al ser ínter comparado con un patrón de referencia mundial para la medición de radiación global.

ABSTRACT

In this paper is presented the methodology used to design, construct and calibrate a solar radiation radiometer (photovoltaic piranometer). The instrument was developed with the purpose to quantify

solar energy resources, and carry out the precision demands of a first order instrument (linearity, no dependence with zenithal angle and the temperature), to be compared with a world reference standard in global radiation measurements.

* * *

1. Introducción

En la actualidad, cobra gran importancia el estudio acerca del aprovechamiento de la energía solar como fuente de energía alternativa, ya que es una fuente limpia, probablemente inagotable y de bajo costo a largo plazo [1]. Por esto es clave proporcionar una evaluación precisa del recurso solar en el país y para ello es necesario contar con estaciones meteorológicas, compuestas por equipos sumamente costosos y de difícil acceso para las entidades de investigación en energía solar y el público, en general. Debido a esta razón, los grupos de investigación de la Universidad Distrital GIAUD (Grupo de Investigación en Energías Alternativas) y el grupo CEM (Compatibilidad Electromagnética) aunaron sus esfuerzos para el desarrollo de instrumentos básicos para la evaluación de variables atmosféricas.

Se planteó el desarrollo de un medidor de radiación solar global que combinara un fotodiodo de características comerciales y de bajo costo, con un sistema difusor de luz para mejorar la respuesta con el ángulo cenital. Este conjunto se monta sobre una base de acero inoxidable, conformando lo que se conoce con el nombre comercial de “Piranómetro Fotovoltaico”, el cual tiene un bajo costo en relación con medidores de primer orden que funcionan por principios térmicos y con un comportamiento instrumental comparable.

2. Fundamentos teóricos**2.1 Radiación solar**

Se conoce por radiación solar al conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro que emite energía siguiendo la ley de Planck, a una temperatura de unos 6000 K. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, pero no toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, pues la radiación ultravioleta de longitud de onda más corta es absorbida por los gases de la atmósfera fundamentalmente por el ozono. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que cuantifica la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra en una superficie perpendicular, su unidad es el W/m^2 (vatio por metro cuadrado) [2].

La radiación es una forma de transferencia de energía por medio de ondas electromagnéticas, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Todas las formas de radiación son producidas por cargas aceleradas, de forma que las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse. La longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad $c = 299.792 \text{ km/s}$ [3].

2.2 Espectro de radiación

Existen muchas formas de ondas electromagnéticas que se distinguen por sus frecuencias y longitudes de onda, éstas varían en un amplio rango, definiendo el espectro electromagnético. Esta variación se produce, porque las fuentes emisoras de ondas electromagnéticas son completamente diferentes.

El espectro electromagnético no tiene definidos límites superior ni inferior, no obstante, aquella parte del espectro de radiación que puede percibir la sensibilidad del ojo humano se define como radiación visible, uno de los componentes del espectro electromagnético.

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro que se extiende desde longitudes de onda corta de billonésimas de metro (frecuencias muy altas) hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas).

Por orden creciente de longitudes de onda (o decreciente de frecuencias), el espectro electromagnético está compuesto por rayos gamma, rayos X duros y blandos, radiación ultravioleta, radiación visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio.

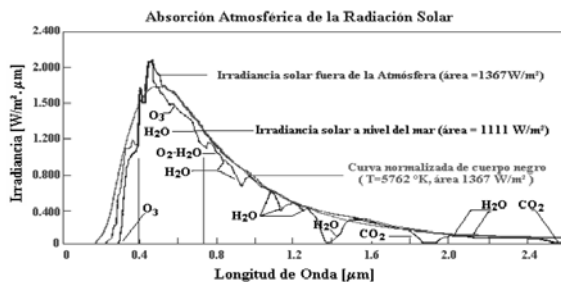


Figura 1. Espectro de radiación Solar (disponible en <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/ecofisiologia>)

La radiación solar global es la característica de la radiación proveniente del Sol que corresponde a la cantidad de energía por unidad de área y en la unidad de tiempo que incide en la superficie terrestre después de haber atravesado la atmósfera. Como

se puede observar en la gráfica siguiente, los gases de la atmósfera atenúan la radiación proveniente del Sol en el límite de la atmósfera por procesos de reflexión, dispersión y absorción de energía [4]. La radiación global es definida como la suma de las componentes directa y difusa de la radiación y su valor varía con las condiciones meteorológicas del lugar. Su medida está regida por la Organización Meteorológica Mundial y es clave dentro del desarrollo ambiental y energético.

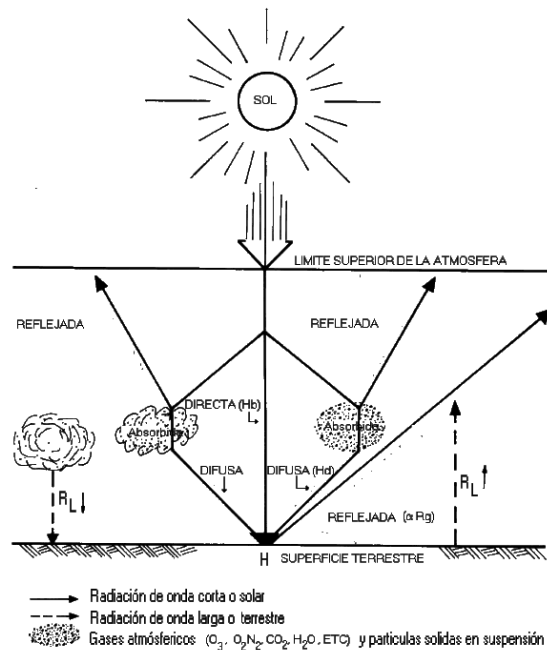


Figura 2. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre [2]

2.3 Fotodiodos

2.3.1 Características de los fotodiodos

El efecto fundamental bajo el cual opera un fotodiodo es la generación de pares electrón hueco, debido a la energía luminosa. Este hecho es lo que le diferencia del diodo rectificador de silicio en el que solamente existe generación térmica de portadores de carga. La generación luminosa tiene una mayor incidencia en los portadores minoritarios,

que son los responsables de que el diodo conduzca ligeramente en inversa [5]. La figura .3 muestra un diodo con iluminación, así como la producción de un para electrón-hueco, los cuales son separados por el campo eléctrico creado internamente.

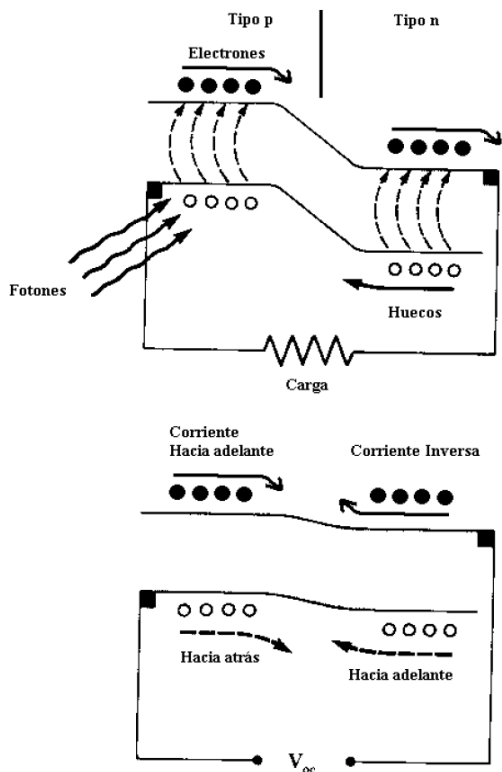


Figura 3. Unión P-N con iluminación con generación de pares electrón-hueco [3]

El comportamiento para un fotodiodo ideal está dado por:

$$I = I_0 \left(e^{qV/kT} - 1 \right) - I_{sc} \quad (1)$$

Donde I y V son la corriente externa y el voltaje, q es la carga del electrón, k la constante de Boltzmann, I_{sc} es la corriente a corto circuito e I_0 es la corriente de saturación inversa del diodo [3]. Para caracterizar el funcionamiento del fotodiodo se definen los siguientes parámetros:

2.3.2 Modo fotoconductorivo

En el modo fotoconductorivo, se conecta el fotodiodo en serie con la impedancia de carga y con una fuente de alimentación éste se polariza en inversa. En este modo, se puede usar resistencias de carga muy altas sin perder la linealidad. La capacitancia de la unión disminuye con la polarización, dado que la zona de agotamiento es ampliada. Aquí el valor típico de la capacitancia es 10 pF/mm², que es 10 veces más pequeña que en el modo fotovoltaico. La desventaja de este modo con respecto al modo fotovoltaico es que la corriente de fuga o en oscuridad es más grande.

2.3.3 Modo fotovoltaico

Un fotodiodo operado en un modo fotovoltaico es directamente conectado a una impedancia de carga sin usar una fuente de voltaje adicional. Entonces, el potencial sobre el fotodiodo solamente es dado por la generación de corriente en el fotodiodo. En esta configuración, la corriente de oscuridad o de fugas es mínima, ya que no aplicamos una tensión inversa para su funcionamiento, por esta razón se utilizó el método fotovoltaico en el instrumento desarrollado [6].

3. Desarrollo experimental

3.1 Caracterización del sensor

Para la construcción del medidor se utilizó un fotodiodo PIN OP910W de silicio comercial. Se utilizó luz artificial, con el fin de obtener mejor control en variables ambientales (temperatura, lluvias, nubosidad y humedad), debido a la gran sensibilidad de los elementos semiconductores ante variaciones externas [7]. Se tuvieron en cuenta las siguientes características determinantes para la medición de la radiación solar: linealidad del sensor, comportamiento del fotodiodo con la temperatura y la respuesta angular del fotodiodo.

3.1.2 Linealidad del sensor

Se realizaron pruebas para comprobar la linealidad del potencial entregado por el fotodiodo medido en [mV] con un multímetro TRUE RMS Fluke 189 de cinco dígitos, rango de 500,00 mV, resolución de 0,01 mV y exactitud de (0,03% + 2)- contra la incidencia de radiación sobre su superficie medida en [W/m²] por un piranómetro espectral de precisión marca EPPLEY modelo PSP con una sensibilidad de 9 [μV/Wm²], avalado internacionalmente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) [8].

3.1.2.1 Montaje

Debido a la necesidad de determinar con un mayor grado de fineza los cambios de posición detectables por nuestro sistema visual, así como la variación de intensidad de iluminación de las fuentes por la mala calidad de la señal de tensión alterna presente en el laboratorio, se construyó el siguiente prototipo para realizar mediciones más precisas: una caja rectangular de madera, pintada de negro para evitar reflexiones de luz ambiente dentro de ésta (figura 4) y en su interior alojadas las fuentes de luz artificial. En este caso el bombillo se desplazaba verticalmente hacia abajo por medio de un tornillo de 1 mm de paso, es decir, por cada vuelta que se daba a la manivela acoplada al tronillo, éste acercaba el bombillo 1 mm de distancia hacia la superficie del fotodiodo.



Figura 4. Montaje para realizar las curvas tensión corriente del fotodiodo

Además, se trabajó con un voltaje de 120 voltios en corriente continua, tomada de la fuente regulada 0 - 240 VDC, 10 A y 4.2% de ondulación residual, del banco D´Lorenzo 1013M3 del laboratorio de máquinas eléctricas, de la Universidad Distrital. Esta tensión se monitoreó constantemente por medio de un multímetro digital FLUKE 73 serie III para asegurarnos de un valor DC constante.

3.1.2.2 Resultados linealidad del transductor

A continuación, se presenta la última muestra que ratifica la linealidad del fotodiodo con la radiación incidente, realizada en este montaje con un bombillo ahorrador fluorescente de 24 W, un bombillo incandescente de 100 W y una resistencia de carga de 1 KΩ. Nuevamente, los datos de potencial se tomaron con el multímetro digital fluke 189 en la escala de 500.00 mV con una exactitud de (0.03%+2) y se aprecian en las siguientes gráficas.

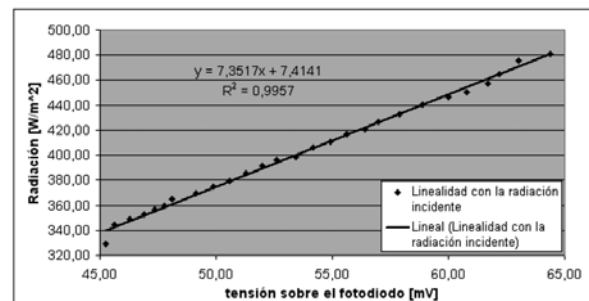


Figura 5. Comportamiento del fotodiodo ante la radiación incidente de un bombillo incandescente de 100W

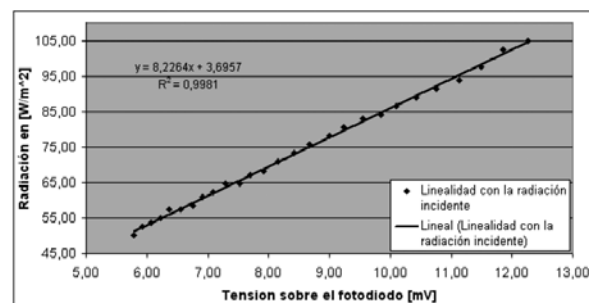


Figura 6. Comportamiento del fotodiodo ante la radiación incidente para un bombillo fluorescente de 24W

3.1.3 Construcción de las curvas V vs. I

La caja se patronó en términos de valores de radiación en [W/m²], es decir, se puso el piranómetro patrón en el interior de la caja y se graduó el tornillo con un bombillo fijo en su valor de potencia; asimismo, se establecieron diferentes valores fijos de radiación para realizar las curvas V vs. I con una radiación incidente siempre constante.

La resistencia interna (R_{INT}) del fotodiodo se obtuvo de restar el valor de la tensión de circuito abierto sobre el fotodiodo (sin carga, R=0), la tensión leída por el voltímetro –éstas son una proporción de su tensión real, ya que la resistencia de los fotodiodos son del orden de ohmios y la impedancia del multímetro es de 10 MΩ, siendo el valor medido indicador del comportamiento–. No se tomó en cuenta el valor de la resistencia del amperímetro, ya que el valor más cercano a éste es el del primer dato de resistencia de carga (500 Ω), el segundo valor es 1 KΩ, es decir, 10 veces mayor, por lo cual el error será muy bajo (<10%) para estos datos iniciales y será despreciable para el resto de datos [9].

$$R_{INT} = \frac{V_{CA} - V_{LEIDO}}{I_{LEIDA}} \quad (2)$$

Resistencia interna del fotodiodo.

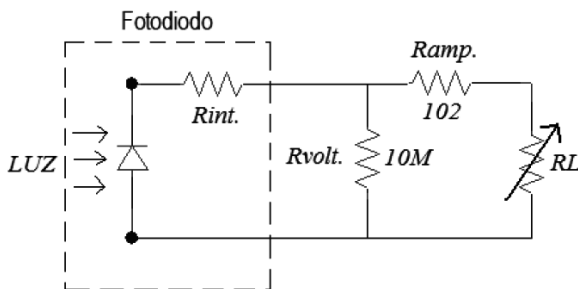


Figura 7. Circuito para determinar las curvas tensión vs. Corriente

Se obtuvieron las gráficas tensión corriente (V vs. I) para determinar el comportamiento del fotodiodo

frente a cambios de resistencia de carga e iluminación y así, finalmente, realizar un modelo circuital para éste. Adicionalmente, se obtuvo una proporción del comportamiento de la resistencia interna del fotodiodo con las variaciones en la carga.

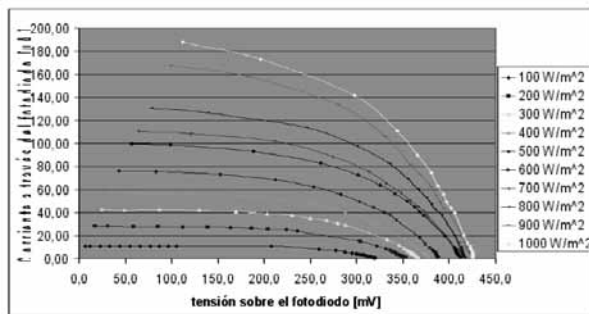


Figura 8. Curvas tensión vs. Corriente para una resistencia de carga de 500 Ω a 500 KΩ.

Con el análisis de la gráfica de la figura 8 se pudo concluir que el fotodiodo tiene dos zonas distintas de funcionamiento, bien marcadas, en las cuales se comporta como:

- Fuente de corriente independiente: se puede ver para valores de radiación desde 100W/m² hasta 400 W/m² en la cual el fotodiodo presenta una corriente constante (líneas constantes al lado izquierdo de la gráfica) para una resistencia de carga variable desde 500 Ω hasta 4 KΩ.
- Fuente de tensión independiente: se puede ver para valores desde 800 W/m² hasta 1000 W/m² en la cual el fotodiodo presenta un tensión casi constante (líneas verticales al lado derecho de la gráfica) para una resistencia de carga variable desde 20 KΩ hasta 500 KΩ.

Para obtener un transductor que varíe sus características eléctricas lo menos posible con los parámetros externos como temperatura, resistencia de carga y ángulo de incidencia de la radiación solar, entre otros, se utilizó el fotodiodo de modo que funcione

en la región correspondiente a una fuente de corriente independiente con su resistencia dinámica y una resistencia de carga, ambas en paralelo.

3.1.4 Estudio del comportamiento del fotodiodo con la temperatura

Los parámetros más importantes para estudiar en este apartado son la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto cuando el fotodiodo es iluminado con una radiación constante y se utiliza algún método para aumentar su temperatura de manera controlada.

3.1.4.1 Montaje

Por medio de una caja metálica, con un hoyo en la parte superior para iluminar los medidores (fotodiodo y piranómetro PSP) con una radiación constante, dimensionada para cubrir la parrilla de un horno convencional marca OSTER funcionando con 110 VAC. Se hizo elevar la temperatura del receptáculo por medio de la aplicación de una diferencia de potencial regulable a la resistencia del horno de 0 VAC hasta aproximadamente 100 VAC, tomando el valor de tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito en un rango de temperaturas entre 20 °C y 110 °C en intervalos de 5 °C.



Figura 9. Montaje realizado para la medición de los parámetros eléctricos con respecto a la temperatura

3.1.4.1.2 Resultados comportamiento del transductor con variaciones de temperatura

Podemos ver que la tensión de circuito abierto varió notablemente con la temperatura, pues disminuyó en un 58% para una radiación de 400 W/m² y un 48% para 800 W/m² de radiación incidente y un aumento de temperatura de 88 °C y 93 °C respectivamente; de esta manera se demuestra la poca estabilidad con respecto a la temperatura que tendría el fotodiodo si se llegara a usar en la región en la cual se comporta como una fuente de tensión. Esto se ve claramente reflejado en las curvas de tensión de circuito abierto de las figura 10.

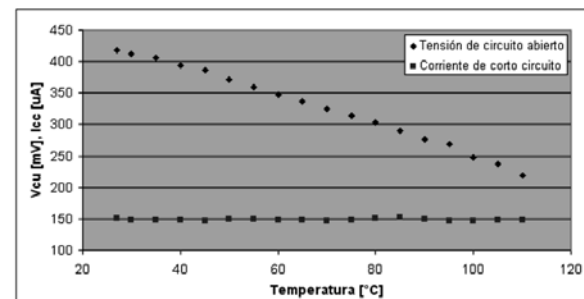


Figura 10. Tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito Vs. temperatura para radiación constante de 800 W/m²

3.2 Óptica del instrumento de medición

3.2.1 Respuesta angular del fotodiodo

Todo medidor de radiación solar posee un error, debido a la dirección del rayo incidente de radiación solar conocido como error, debido al coseno del ángulo cenital. En primer lugar, es necesario recordar que el camino óptico que la radiación tiene que atravesar, aumenta a medida que se incrementa su ángulo de incidencia sobre el medidor y, en segundo lugar, el ángulo de aceptación de cada sensor (ventana angular en la cual la respuesta es constante), en este caso con respuesta aceptable para ángulos comprendidos entre +/- 40° con respecto a la normal de su superficie [10]. Este hecho se comprobó experimentalmente rotando

el fotodiodo para ángulos comprendidos entre 0° y 90° en intervalos de 10° incidiendo sobre él una fuente de luz blanca con iluminación constante, como se muestra en la figura 11. Se tomaron los respectivos datos de tensión de circuito abierto del fotodiodo, se realizó una gráfica (figura 12) de tal forma que el valor a 0° fuera el 100% de respuesta del fotodiodo y los demás ángulos de inclinación un valor relativo al primero.

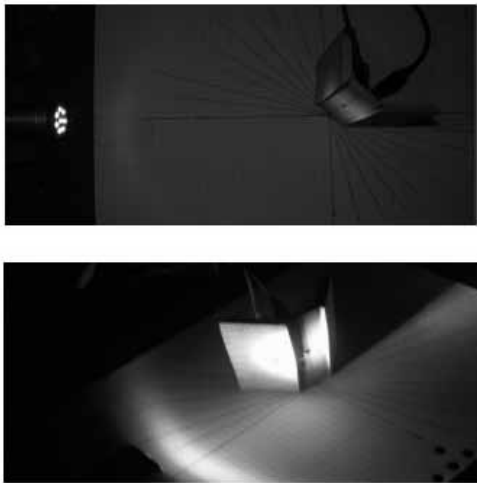


Figura 11. Montaje experimental para determinar la respuesta del fotodiodo con la variación del ángulo de incidencia

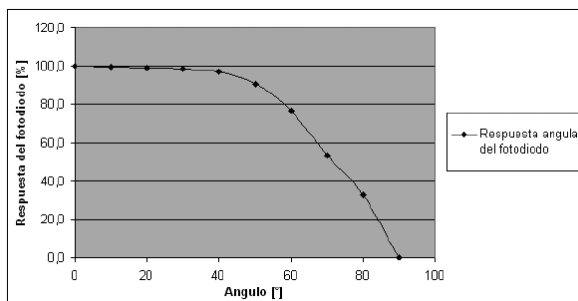


Figura 12. Respuesta del fotodiodo sin carga ante cambios en el ángulo de incidencia de la luz

Se comprueba que la tensión sobre el fotodiodo permanecerá aproximadamente constante si el ángulo de incidencia de la radiación no sobrepasa los $\pm 40^\circ$ con respecto a la normal de su superficie.

Para mejorar este inconveniente se plantearon dos posibles soluciones, la primera fue el diseño de un concentrador solar con un lente plano convexo invertido; al obtener resultados catastróficos, en cuanto a la medición del sensor, se planteó la segunda opción la cual incluía un lente difusor de teflón con 2 mm de grosor, el cual proporcionó mejores resultados en cuanto a la percepción de radiación por parte del sensor durante horas en las cuales el Sol está muy cerca del horizonte.

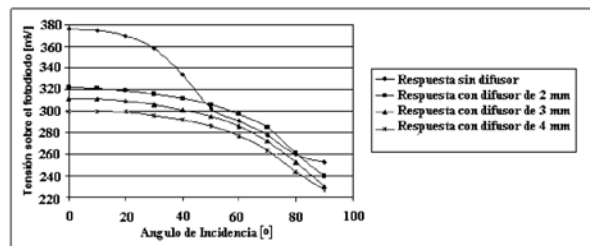


Figura 13. Comportamiento de la tensión del fotodiodo sin carga con el ángulo de incidencia

4. Construcción del piranómetro fotovoltaico

4.1 Calibración del instrumento

La calibración del instrumento se llevo a cabo los días 20, 21 y 22 de agosto de 2007. Se implementó el método de inter comparación entre el medidor desarrollado y el piranómetro patrón, instrumento de primer orden patronado, a su vez, en el Centro de Radiación de la Universidad Nacional Autónoma de México. Las diferencias de potencial se midieron con el Multímetro MU-115 en la escala de 200mV, exactitud $\pm(0,5\% \pm 1)$, resolución de $100\mu\text{V}$ y el Multímetro MAS_838 en la escala de 200mV, exactitud $\pm(0,5\% \pm 2)$, resolución $100\mu\text{V}$ respectivamente.

Se tomaron los datos de tensión sobre los instrumentos el día miércoles 22 de agosto desde las 10:00 a.m. hasta las 3:10 p.m.

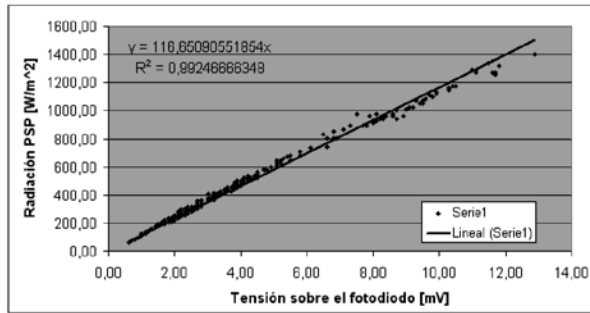


Figura 14. Constante de calibración calculada con las medidas del día 22 de agosto

En esta experiencia el coeficiente de correlación (figura 17), alcanza un elevado valor de 99,24%. De esta forma se calcula la nueva constante de calibración “K=116,65” y se determinó un error promedio de 4,78% el cual es muy satisfactorio, ya que alcanza a clasificar este medidor como un instrumento de primera clase (según la norma ISO 9060). Además de la figura 15 se observa una buena semejanza entre las curvas de radiación tomadas por el piranómetro patrón y el piranómetro fotovoltaico construido. Cabe mencionar que ocurren instantes en los cuales se presentan picos más altos con el piranómetro fotovoltaico (ver curva ampliada (figura 16)).

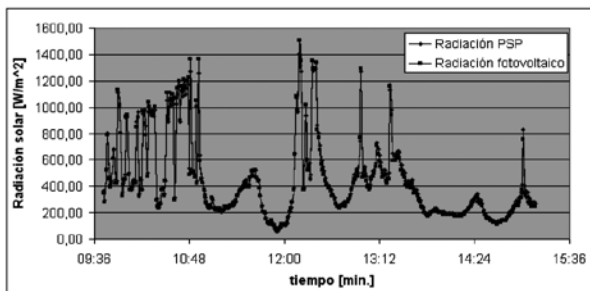


Figura 15. Curvas de radiación solar medidas con el piranómetro patrón (PSP) y el piranómetro fotovoltaico

Finalmente, la figura 15 muestra la recta que proporcionó la mejor información acerca de la linealidad en la inter comparación de las medidas, con los cuales se obtuvo la conocida constante de calibración para el medidor construido de $K=116,65 [Wm^{-2}/mV]$, para

una respectiva sensibilidad de $8,57 \mu V/Wm^{-2}$ y una exactitud de $\pm 4,78\%$.

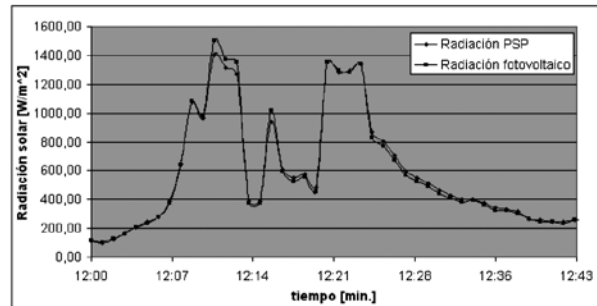


Figura 16. Radiación solar medida, piranómetro patrón (PSP) y el piranómetro fotovoltaico. Ampliación 12:00 a 12:43 p.m.

4.2 Características físicas



Figura 17. Piranómetro fotovoltaico

Con el estudio del transductor que va a ser utilizado en nuestro medidor, su respectivo difusor y su debido proceso de calibración o patronamiento, se construyó un medidor de radiación solar fotovoltaico (figura 17) con las siguientes características.

- Transductor, fotodiodo PIN OPTEK OP910W. Con una distancia al difusor de 3 mm y una resistencia de carga en paralelo de 180Ω . Fijado en el centro de una lámina de teflón circular de 42 mm de diámetro y 3 mm de espesor.

- Difusor circular en teflón de 46 mm de diámetro y 2 mm de espesor para obtener la máxima transmitividad posible, sellado con silicona para evitar filtraciones.
- Carcaza de acero inoxidable en dos piezas, ajustada a presión y sellada con silicona para evitar filtraciones, con tornillos para su respectiva nivelación con la horizontal, indicado por medio de un nivel de gota.
- Juego de conector macho y hembra de 3 pines con 4 metros de cable tripolar calibre AWG # 18, con caimanes de conexión en los extremos.

5. Conclusiones

- Se construyó un instrumento con capacidad para medir radiación solar global clasificado por la ISO 9060 como un piranómetro de *primera clase* con una exactitud de $\pm 4,78\%$, calibrado por medio de un patrón secundario (piranómetro PSP), el cual está calibrado respectivamente con un patrón primario (pirheliómetro) avalado internacionalmente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- A partir de las pruebas realizadas durante la investigación se constató que el sensor utilizado en el instrumento cumplió satisfactoriamente las condiciones como instrumento para la medición de radiación solar global: linealidad

del 99,24% frente a la radiación incidente, sensibilidad de $8,57 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$.

- Se logró disminuir ostensiblemente los costos de diseño y construcción del instrumento de medición, utilizando componentes electrónicos de bajo costo y de fácil adquisición, esto con el fin de ampliar en el futuro la cuantificación del recurso solar con instrumentos de menor valor que en el mercado.
- De las pruebas de temperatura realizadas al instrumento de medida, se concluye que no es de vital importancia realizar un complejo sistema de control de temperatura, ya que en el modo en el cual opera el transductor (fuente de corriente) no se observa una variación en la corriente entregada por éste a la resistencia de carga cuando se presentan grandes cambios en la temperatura de fotodiodo.
- Gracias a la implementación de montajes experimentales para la realización de las prácticas, tales como las bases paralelas, la caja de absorción absoluta, el receptáculo térmico variable y la fuente artificial rotativa –para mediciones con distintos ángulos de incidencia– se logra establecer con claridad y buena exactitud las variables que permitieron el buen diseño y construcción del instrumento.
- Con el uso de materiales difusores (cubierta de teflón) se observa mejora substancial del ángulo de aceptación del instrumento.

Referencias bibliográficas

[1] J.C. González & H. Leal. *Energía: sus perspectivas, su conversión y utilizaciones en Colombia*. UN, Bogotá, s.f..

[2] C. Chacón, O. Simbaqueva & H. Zapata, *Atlas de Radiación Solar de Colombia*, 2ª Edición. UPME-IDEA, 2005.

- [3] R.A. Serway, *Física Tomo II*. 4 ed. McGraw-Hill, México, 1997. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 3.
- [4] M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*. 1 ed. Academic Press, Toronto, 1983. [8] EPLAB, The Eppley Laboratory, Inc. *Solar Radiation Measurement Instrumentation*, USA. 2004. Disponible en: www.eppleylab.com
- [5] M. Morris, *Lógica digital y diseño de computadores*. Prentice Hall, 1982. [9] A.P. Malvino, *Principios de Electrónica*. 6 ed. McGraw-Hill. Madrid, 2000.
- [6] S.A. Creus, *Instrumentación Industrial*. 6 ed. Alfaomega, Marcombo Boixareu, Barcelona, 1997. [10] Zanesco, I., *Análise e Construção de um Piranômetro Fotovoltaico*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1991.
- [7] C.G. Bolzi et al., *Construcción y Ensayo de Piranómetros Fotovoltaicos de Bajo Costo Desarrollados en la CNEA*, 1999, 1991.