

MEDIDOR DE NO UNIFORMIDAD PARA CARACTERIZAR SIMULADORES SOLARES DE ESTADO ESTABLE DE GRAN SUPERFICIE

José Alejandro Moreno Alfonzo – joc.alejandro.m@gmail.com

Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós-graduação em Mecatrônica

Acbal Rucas Andrade Achy – acbal.achy@gmail.com

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Laboratório de Energia e Instrumentação.

Tiago Franca Paes – ticopaes@gmail.com

Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física.

Iuri Muniz Pepe – lapo.if@gmail.com

Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física, Programa de Pós-graduação em Mecatrônica

Resumen. *Este trabajo desenvuelve las bases para un sistema de medición de no uniformidad para simuladores solares de estado estable de gran superficie. Con un mecanismo de posicionamiento automático bidireccional (XY) utilizando motores de paso, es posible tomar medidas con gran discreción, esto es útil para análisis detallados en el plano de ensayo en las etapas de desarrollo de estos simuladores. Como sensor se desea utilizar una célula fotovoltaica de silicio monocristalino la cual fue calibrada utilizando un piranómetro como referencia. El resultado de la calibración demostró que la salida de tensión del sensor es linealmente dependiente a la radiación incidente en él. Se pudo estimar que nuestro sensor posee una sensibilidad de $28,21 \mu V/(W/m^2)$. Como segunda etapa se realizó una tomada de datos utilizando un posicionador automático de un solo eje para obtener el plano de radiación de una lámpara, estos datos fueron usados para estimar un plano de radiación con varias lámparas simulando valores superpuestos matemáticamente en hojas de cálculo con el mapa de esa sola lámpara. Así fue posible estimar con 36 lámparas en configuración cuadrada de 6×6 , una irradiancia media de $1027 W/m^2$ en un área de $1 m^2$ con no uniformidad de 1,27%. Este concepto con un dispositivo terminado nos permitirá estimar número de lámparas, separación entre ellas y cantidad necesaria para una cierta área de prueba con la mayor eficiencia posible.*

Palabras clave: Piranómetro, No Uniformidad, Simulador Solar.

1. INTRODUCCIÓN

Un simulador solar continuo es un dispositivo utilizado para reproducir la radiación solar en ambientes internos de forma controlada y así evitar interferencias de nubes o el efecto de irradiancia difusa. En algunos casos son usados para estudiar la reacción que produce este tipo de radiación en pinturas, materiales o acabamientos, siendo en el campo de la energía solar fotovoltaica donde se utiliza para obtener de los paneles solares, parámetros como la curva IV o degradación a la exposición a la radiación. Para esta última aplicación existen normas internacionales que califican tres características específicas de los simuladores solares de estado estable: estabilidad temporal, distribución espectral y no uniformidad; cada una de ellas en las escalas entre A, B y C (IEC60904-9, 2007). Un simulador con distribución espectral B, no uniformidad A y estabilidad temporal A, sería clasificado como de tipo BAA. Para algunos análisis, existen normas con procedimientos de cómo realizar las pruebas en los paneles solares utilizando este tipo de simulador, en su mayoría, exigen que el equipo sea clasificado AAA para garantizar la veracidad de los resultados de los ensayos.

Para evaluar la estabilidad del simulador la norma exige que se coleccionen valores de irradiancia con una célula de silicio cristalino durante el tiempo de adquisición de datos, con el valor máximo y mínimo obtenido se calcula la diferencia porcentual la cual se utiliza para clasificar entre A, B o C. El parámetro de distribución espectral puede ser realizada evaluado, utilizando un espectrómetro con una amplitud de lecturas entre 400 nm a 1100 nm. Los datos coleccionados son divididos en intervalos de 100 nm para luego calcular la diferencia porcentual de cada uno de ellos con la distribución espectral de referencia AM1.5. La clasificación se define en base a la menor desviación obtenida en los intervalos calculados. Por último, la no uniformidad debe ser realizada en todo el plano de ensayo donde son tomados datos de irradiancia en por lo menos 64 puntos equidistantes, la diferencia porcentual se calcula de la misma manera que con la estabilidad, son utilizados el valor máximo y mínimo encontrados durante la prueba. Este ensayo generalmente es caro y lento de realizar cuando el objetivo es ajustar el equipamiento para alcanzar la mejor configuración entre distancia y posición de las lámparas, ajustes necesarios durante el desenvolvimiento de un prototipo (Rivola et al., 2014).

Para el análisis de no uniformidad, Rivola et al (2014) propusieron una red de sensores con un microcontrolador que alcanza a realizar lecturas de alta velocidad en múltiples canales consiguiendo obtener un gráfico bidimensional en un programa desenvuelto en C#. Cada sensor en la red se comunica por RS485 al procesador principal el cual envía los datos vía USB a un computador. Esta parece una buena solución después de dedicar tiempo a la calibración de cada sensor e instalando el manto en un lugar fijo para mantener la matriz de sensores siempre localizada en la posición preestablecida, además que limita la cantidad de puntos que puedes medir en una cierta área. Para prototipos en desarrollo, sería interesante definir cuantas medidas realizar en una determinada área o en un determinado eje, así sería posible hacer ajustes locales en la fuente de iluminación.

Kenny y Davison (1994) diseñaron un simulador de gran escala con múltiples lámparas, ellos verificaron cada una de las características de su simulador incluyendo la no uniformidad posicionando un Piranómetro Licor 200SA cada 0,056m hasta cubrir un área de 1,06m por 1,06m. El tiempo de respuesta de este sensor es relativamente rápido lo cual solo dejaría la intervención del hombre como factor de retraso a la hora de mudar de posición manualmente. Para cubrir el área informada, fueron tomados 361 puntos. Si la maniobra para mudar el sensor demora unos 10 segundos aproximadamente, la tarea para obtener el plano de no uniformidad debió demorar aproximadamente una hora.

Cada método tiene sus ventajas y desventajas. Definir un número de sensores fijos aumenta la velocidad de toma de datos quitando la posibilidad de mudar la configuración de los sensores para una mejor resolución. Un único sensor siendo posicionado de forma manual posibilita reducir costos y el espacio entre medidas, obteniendo una mejor resolución lo que aumenta el tiempo captación de datos. La propuesta de este trabajo es automatizar el posicionamiento de un único sensor en dos ejes para coleccionar datos de forma continua con un software dedicado. Será utilizado una célula fotovoltaica de silicio monocristalino calibrada, la cual permitirá relacionar la corriente de salida a un valor de irradiancia en W/m^2 .

Para garantizar los resultados de las pruebas, este trabajo cumplirá varias etapas. En primer lugar, se calibrarán los sensores de radiación que serán utilizados, entre ellos un piranómetro Kipp & Zonen CMP21 y la célula fotovoltaica de silicio monocristalino. En segundo lugar, con el objetivo de probar un pre-prototipo del medidor en un eje y de realizar una simulación del plano irradiado, se verificará la teoría de doble rendija de Young para verificar que la irradiancia en un punto iluminado por dos fuentes de radiación es igual a la suma de las irradiancias de las fuentes medidas por separado. En la tercera etapa aun con el pre-prototipo del medidor de un eje, se levantará el plano de irradiancia de una lámpara de vapor metálico desplazando el segundo eje manualmente, este plano será utilizado para la simulación de irradiancia que se hará en una hoja de cálculo de Excel. Finalmente, la simulación nos dará una idea de cómo será el plano irradiado por varias lámparas lo cual debe servir como referencia a la hora de realizar las medidas con el prototipo final del medidor desplazándose en dos ejes.

2. METODOLOGIA

2.1 Calibración de sensores

La norma IEC 60904-9 recomienda el uso de una célula encapsulada con silicón cristalino o un mini-modulo como sensor de irradiancia para determinar la no uniformidad en el plano de prueba. En el Laboratorio de Propiedades Ópticas de la Universidad Federal de Bahía, teníamos disponibles una célula fotovoltaica de silicio monocristalino aeroespacial con un área de 20 mm x 40 mm. La célula fue encapsulada en silicona QSIL 216 y colocada en un soporte de acrílico para aumentar la rigidez mecánica, la Figura 1a muestra el sensor finalizado.

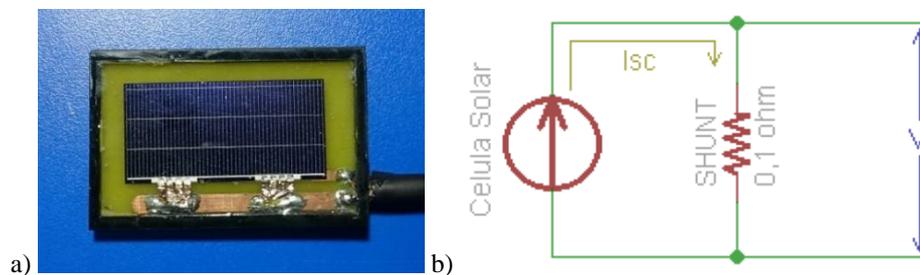


Figura 1- a) Célula fotovoltaica de silicio monocristalino aeroespacial de 20 mm x 40 mm encapsulada en silicón QSIL 216 e instalada en una estructura de acrílico. b) Esquemático utilizado para la célula solar con un shunt de 0,1 ohm para el cálculo de la corriente de corto circuito I_{sc} a partir de la tensión V generada sobre la resistencia.

La corriente de corto circuito I_{sc} en placas solares es linealmente dependiente a la radiación que está incidiendo en ella a temperatura constante. La célula solar con un shunt cerámico de $0,1 \Omega$ fornece tensión operando en el modo de corto circuito, así, la corriente es calculada utilizando la Ley de Ohm a partir de la resistencia y la tensión medida, la Figura 1b muestra el circuito utilizado. De esta forma es posible conocer el valor de irradiancia a partir de la diferencia de tensión producida por la placa sobre la resistencia, para ello es necesario calibrar este sensor junto a otro de referencia para construir dicha relación. Emery y Osterwald en 1989 utilizaron un piranómetro para calibrar este tipo de células debido a que la respuesta de la termopila de estos instrumentos no depende del espectro incidente. Fue utilizado un Piranómetro Kipp & Zonen CMP21 con una sensibilidad de fábrica de $9,38 \mu V/(W/m^2)$ para utilizar como referencia para esta calibración. Este piranómetro pasó por un proceso de recalibración en el Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE) utilizando otro Piranómetro de referencia local calibrado con una sensibilidad de $5,07 \mu V/(W/m^2)$. La Figura 2 muestra como fueron colocados los dos Piranómetros sobre el techo de uno de los edificios del INPE desde las 9:00h de la mañana hasta las 12:00h del mediodía. Fueron colectados, a cada minuto, valores de tensión de cada piranómetro, así como la temperatura ambiente y de la base de concreto. El método de calibración utilizado fue el método del cociente que siguiendo las recomendaciones de la OMM (Organización Meteorológica Mundial) se utiliza la siguiente expresión:

$$k_P = k_R \left(\frac{V_P}{V_R} \right) \quad (1)$$

Donde k_p y k_R son las constantes de sensibilidad de los piranómetros a calibrar y de referencia, V_p y V_R son las medidas de tensión en volts (Oliveira et al., 1996).



Figura 2- Comparación del Piranómetro Kipp & Zonen CMP21 (Izquierda) realizada en el Instituto Nacional de Pesquisa Espacial INPE junto a otro Piranómetro ya calibrado (Derecha).

Las comparaciones de estos datos permitieron justar el valor de sensibilidad k del Piranómetro CM21 tomando en cuenta que la relación que existe entre la tensión de salida U_{emf} de los instrumentos y la irradiancia E_{solar} es calculada por medio de la siguiente relación matemática:

$$E_{solar} = \frac{U_{emf}}{k} \quad (2)$$

Luego de calibrado, el Piranómetro fue colocado en el techo del Instituto de Física junto a la célula solar para definir una relación entre la irradiancia que estaba incidiendo medida con el piranómetro, con la corriente que estaba siendo producida por la célula fotovoltaica. Fueron tomadas diversas medidas aleatorias durante el periodo del mediodía junto con valores de temperatura para intentar guardar una relación entre corriente e irradiancia a temperatura constante. Para calcular la constante de calibración del sensor k_C , fue utilizado el coeficiente angular de la recta de regresión ajustada a los valores por el método de los mínimos cuadrados. La constante sigue la siguiente relación:

$$k_C = ak_p \quad (3)$$

Siendo que "a" es el coeficiente angular de la recta entre la tensión de salida del sensor V_C en función de la tensión de salida del piranómetro V_p .

2.2 Comprobación de superposición de irradiancias

Thomas Young (1829) demostró que el campo eléctrico total \vec{E} en cualquier punto P de la superficie irradiada es igual a la suma vectorial de las fuentes:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (4)$$

Para fuentes de radiación incoherentes, dado que no existe una relación de fase entre \vec{E}_1 y \vec{E}_2 la intensidad es simplemente la suma de las dos intensidades individuales (Halliday y Resnick, 2016):

$$I_p = I_1 + I_2 \quad (5)$$

Con el objetivo de comprobar que la radiación total en un punto iluminado por varias fuentes de radiación es igual a la suma de la radiación de cada fuente por separado, fue medida la radiación emitida por dos fuentes a lo largo de un eje. Primero se midieron las radiaciones de cada fuente por separado, y luego con las dos encendidas para comparar con el resultado obtenido al sumar algebraicamente las dos medidas en solitario.

Como sistema de medición se construyó un pre-prototipo contemplando movimiento en un eje. Fue adquirido un tornillo sin fin de un metro y medio acoplado a una tuerca de bolas para disminuir al máximo las fuerzas de atrito. Utilizando aluminio estructurado, rodamientos, motor de paso y mancales cortados en acrílico con una máquina de corte a laser, fue posible bajar el precio de fabricación del posicionador lineal. En él se colocó un piranómetro para medir valores discretos de irradiancia de forma continua. Como sistema de adquisición fue utilizado un multímetro digital de bancada RIGOL de 6½ dígitos y un microcontrolador ATmega328 foto-acoplado a un driver de potencia para controlar un motor de paso unipolar. La Figura 3 muestra como fueron hechas las medidas de esta etapa.



Figura 3- Pre-prototipo del sistema de medición de no uniformidad con movimiento en un eje realizando medidas de radiación continuas abajo de dos lámparas.

2.3 Campo de radiación de una lámpara

Con el mismo sistema utilizado anteriormente, Figura 3, fueron medidos varios puntos de irradiancia a lo largo de dos ejes desplazando el pre-prototipo manualmente dos centímetros por vez lateralmente. La lámpara utilizada fue de vapor metálico de alta presión instalada en un proyector provisto internamente de un reflector esférico y una lente Fresnel de 150 mm de diámetro. Se definió una distancia de 400 mm entre el sensor y la lente Fresnel del proyector.

Nuevamente los valores fueron colectados con el multímetro digital de bancada y transferidos a un computador por medio de una memoria USB. Cada valor de irradiancia fue organizado en una hoja de Excel en forma de matriz cuadrada para posibilitar el análisis e interpretación colocando una escala de colores que permitió una mejor interpretación.

2.4 Simulación de la distribución de irradiancia en el plano de prueba

Tomando el resultado obtenido en la etapa anterior fue creada una matriz cuadrada de 37 x 37 valores de irradiancia que luego fueron inseridos en una hoja de cálculo de Excel para realizar una suma directa de los valores de intensidad que incidan en un punto iluminado por varias lámparas al mismo tiempo E_c (6). Así fue construida una matriz de valores que simularían un arreglo cuadrado de 6 x 6 proyectores totalizando 36 reflectores separados de 20 mm entre ellos irradiando con la misma intensidad y abertura. Se analizará el área resultante separándola en 64 puntos para calcular la clasificación según la no uniformidad utilizando la siguiente ecuación definida pela norma IEC60904-9, 2007.

$$\text{No uniformidad}(\%) = \frac{I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}} + I_{\text{mín}}} \times 100\% \quad (6)$$

Para valores mayores de 5% hasta 10% se clasifica de tipo C, para valores mayores a 2% hasta 5% se clasifica de tipo B, y para valores menores o iguales 2% se clasifica de tipo A. Los simuladores de tipo A en todas las categorías son los de mejor rendimiento.

3. RESULTADOS

3.1 Simulación de la distribución de irradiancia en el plano de prueba

Después de dos horas de exposición a la radiación solar, el siguiente grafico presenta los valores de irradiancia obtenidos por el piranómetro del INPE y el de la UFBA.

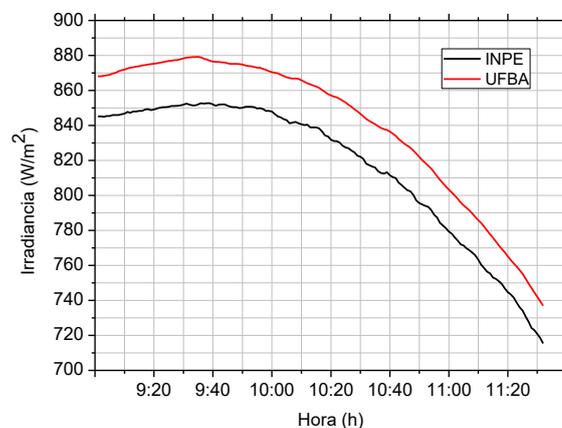


Figura 4- Irradiancia en función del tiempo de dos piranómetros, uno de referencia (negro) del INPE y uno con intención de ser calibrado (rojo) de la UFBA.

Como es posible observar en la Figura 4, el piranómetro proveniente de la Universidad Federal de Bahía, presenta valores considerablemente mayores a los arrojados por el piranómetro de referencia del Instituto Nacional de Pesquisa Espacial. Tomando los valores de tensión medidos de ambos piranómetros con la sensibilidad de referencia $5,07 \mu V/(W/m^2)$, utilizando la Ec. (1), el nuevo valor de sensibilidad para el Piranómetro Kipp & Zonen CMP21 es de $9,66 \mu V/(W/m^2)$.

Posteriormente, para realizar la comparación entre el piranómetro calibrado y la célula fotovoltaica, fueron consideradas diversas situaciones de luminosidad, desde cielo abierto hasta parcialmente nublado. Los datos adquiridos fueron analizados utilizando el método de coeficiente angular. Ec. (3). La Figura 5 muestra los datos obtenidos:

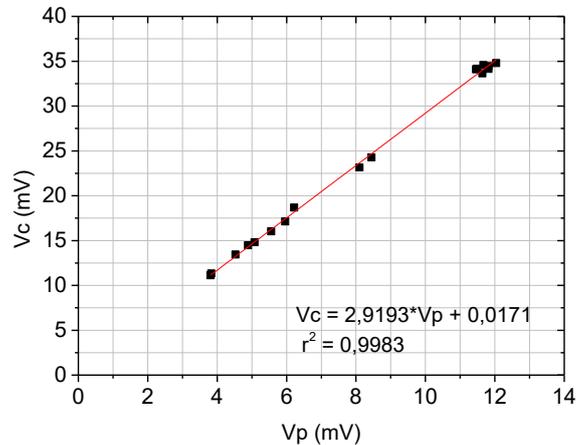


Figura 5- Tensión de salida de la célula fotovoltaica V_c versus la tensión de salida del piranómetro Kipp & Zonen CMP21 V_p . Por el método de los mínimos cuadrados se obtuvo una recta con un coeficiente angular $a = 2,92$.

Finalmente, la sensibilidad obtenida para la célula fotovoltaica fue de $k_c = 28,21 \mu V/(W/m^2)$.

3.2 Superposición de Irradiancias

La Figura 6 muestra los valores de irradiancia medidos con el sistema de posicionamiento lineal de dos lámparas por separado y con las dos prendidas simultáneamente. También puede verificarse que la suma de los valores medidos separadamente coincide con los valores de la medida con las dos prendidas.

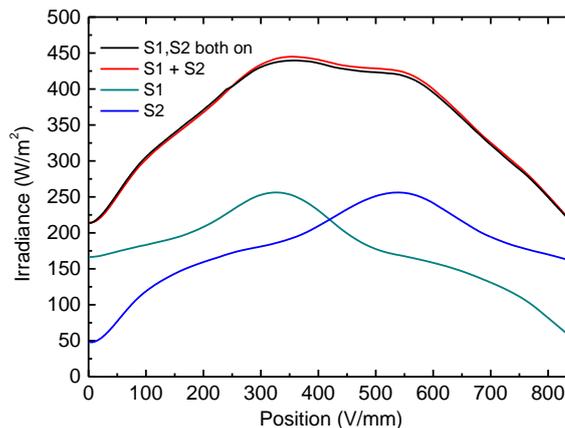


Figura 6- Medida de irradiancia producida por dos lámparas encendidas (negro), por dos lámparas encendidas separadamente (verde y azul) y la suma algebraica de los valores superpuestos (rojo).

3.3 Mapa de radiación de una lámpara de vapor metálico

El plano de radiación de una lámpara es presentado en la Figura 7. Los valores fueron organizados en una matriz de 37 por 37 puntos y presentados con escala de colores para una mejor visualización. Se observa un pico de irradiancia en el centro del mapa resultado de la óptica de la lente Fresnel utilizada.

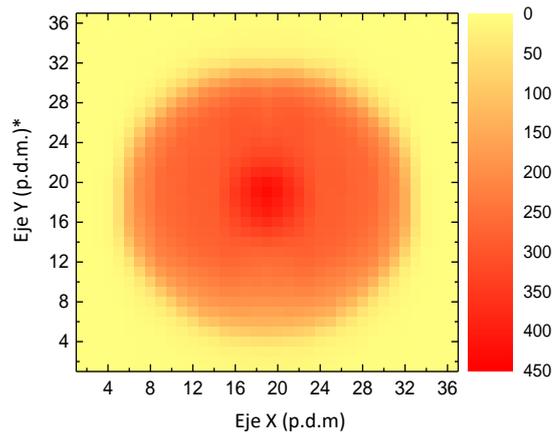


Figura 7- Mapa de irradiancia a 400 mm de una lámpara de vapor metálico dentro de un proyector con lente Fresnel.
*p.d.m (punto de medición)

3.4 Simulación de una matriz de 6x6 fuentes de radiación

Los valores colocados en superposición en una matriz de 6 por 6 reflectores iguales, fueron sumados en una hoja de cálculo de Excel obteniendo un área efectiva de iluminación de 1 m^2 y con una irradiancia media de 1027 W/m^2 . La Figura 8 muestra los datos organizados con escala de colores. El área designada fue dividida en 64 puntos para calcular la desviación que indicaría la clasificación de la no uniformidad según las normas antes mencionada. La máxima y mínima radiación obtenida de los 64 puntos fue de 1039 W/m^2 y 1015 W/m^2 respectivamente, esos valores corresponden a un desvío de 1,27% calculada con la Ec. (6) que indica una clasificación de tipo A.

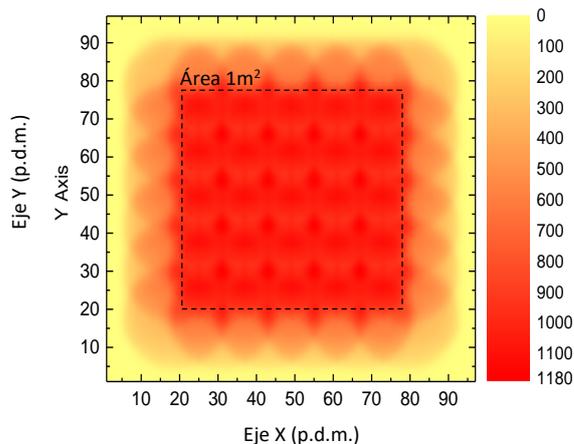


Figura 8- Mapa de radiación de 36 lámparas con un área de trabajo de 1 m^2 y una irradiancia media de 1027 W/m^2 .

4. Conclusiones

Fue observado que para utilizar un medidor de irradiancia del tipo piranómetro para trabajos de investigación, es importante verificar la sensibilidad de calibración con cierta regularidad. El fabricante indica que el instrumento debe ser recalibrado anualmente, por eso fue tomada como referencia instrumento del Instituto Nacional de Pesquisa Espacial para este ajuste.

La célula fotovoltaica de silicio monocristalino resulto en una buena opción como sensor ya que fue fácil de condicionar y calibrar. Este tipo de instrumento es mucho más leve y con más portabilidad para medidas dinámicas sobre sistemas mecánicos.

Con el sistema de medición con movimiento en un solo eje fue posible realizar medidas de irradiancias en un plano con cierta facilidad y con un alto grado de discriminación entre los puntos. Mejorando este sistema para dos ejes de movimiento se podría medir campos discretos con gran número de puntos en áreas grandes, como objetivo final el sistema solo necesitaría cubrir un área de $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ que es el mayor tamaño de placa solar existente en el mercado.

La teoría de Thomas Young es totalmente valida a la hora de querer estimar números de fuentes de radiación para construcción de simuladores solares de grande porte. Utilizando una hoja de cálculo con el plano de radiación de una sola lámpara, se podría estimar la distancia máxima de separación entre lámparas simulando diferentes arreglos, así como el

número necesario de lámparas para iluminar un área determinada a partir de condiciones deseadas, por ejemplo, irradiancia media de 800 W/m^2 con uniformidad B.

Ya con el plano de radiación simulado para las 36 lámparas es posible comparar con los datos que serán obtenidos con el prototipo final cuando el medidor de no uniformidad esté realizando movimientos automáticos en dos ejes con la célula fotovoltaica como sensor.

Agradecimientos

Gracias a la CAPES (*Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nivel Superior*) por la beca de estudio de doctorado, al equipo de investigación del Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales INPE por darnos acceso al laboratorio y a su piranómetro de referencia, y al LAPO-IF/UFBA por el apoyo técnico disponible al proyecto.

REFERENCIAS

- Emery, K., Osterwlad, C., 1989. **Solar cell calibration methods**. Solar Cells, 27, 445-453.
- Rivola, D., Dittmann, S., Pravettoni, M., Friesen, G., Chianese, D., 2014. **High-Speed Multi-Channel System for Solar Simulator Irradiance Non-Uniformity Measurement**. PVSC, IEEE 40th, 0160-8371.
- Kenny, S., Davidson, J., 1994. **Design of a Multiple-Lamp Large-Scale Solar Simulator**. Journal of Solar Energy Engineering. 116, 200-205.
- Oliveira, A., Escobedo, J., Plana-Fattori, A., Soares, J., Santos, P., 1996. **Medidas de radiação solar na cidade de São Paulo: Calibração de piranômetros e aplicações meteorológicas**. Revista Brasileira de Geofísica. Vol. 14(2).
- IEC 60904-9, 2007. **International Electrotechnical Commission Standard for Solar Simulator Performance Requirements**.
- Halliday, D., Resnick, R., **Fundamentos de física: Óptica e física moderna**. 10ma Edição. Gen LTC, Pag. 90.

MEASUREMENT SYSTEM OF NON-UNIFORMITY TO CHARACTERIZE STEADY STATE LARGE-SCALE SOLAR SIMULATOR

Abstract. *This work develops the bases for a non-uniformity measurement system for steady state large-scale solar simulator. With a bidirectional automatic positioning system (XY) it is possible to take measures with great discretion. This is useful for detailed analyzes in the test plane on stages of development of solar simulators. As a sensor, it is desired to use a monocrystalline silicon photovoltaic cell which was calibrated using a pyranometer as a reference. The result of the calibration showed that the voltage output of the sensor is linearly dependent on the radiation incident on it. It could be estimated that our sensor has a sensitivity of $28,21 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$. In the second stage, data was taken using a single-axis automatic positioner to obtain the radiation plane of a lamp, these data were used to estimate a radiation plane with several lamps simulating mathematically superimposed values in spreadsheets with the map of that single lamp. Thus it was possible to estimate with 36 lamps in a square configuration of 6×6 , an average irradiance of $1027 \text{ W}/\text{m}^2$ in an area of 1 m^2 with non-uniformity of 1.27%. This concept with a finished device will allow us to estimate the number of lamps, separation between them and the amount needed for a certain test area with the highest possible efficiency.*

Key words: *Pyranometer, Nonuniformity, Solar simulator.*