

## CARACTERIZACIÓN ANGULAR AUTOMATIZADA DE SENSORES SOLARES FOTVOLTAICOS

**M. Díaz Salazar<sup>1</sup>, N. Kondratiuk<sup>1</sup>, A. Moreno<sup>2</sup>, M. Martínez Bogado<sup>1</sup>, M. Tamasi<sup>1</sup>, J. Di Santo**

Departamento Energía Solar, Gerencia Investigación y Aplicaciones, CNEA

<sup>1</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

<sup>2</sup>Agencia Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas

Centro Atómico Constituyentes, CNEA Av. General Paz 1499 (1650),

San Martín, Buenos Aires, Argentina. Tel. (011) 6772-7199

e-mail: dsalazar@tandar.cnea.gov.ar

*Recibido 09/08/18, aceptado 20/09/18*

**RESUMEN:** Este trabajo tiene como objetivo caracterizar la respuesta angular de distintos dispositivos fotovoltaicos al variar el ángulo de la radiación solar incidente. La caracterización se llevó a cabo con un nuevo equipo automatizado de respuesta angular desarrollado en el Departamento de Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Se presenta la caracterización de sensores solares y radiómetros fotovoltaicos desarrollados en el DES y dispositivos comerciales similares. Se analizó la repetitividad de la respuesta entre varios sensores de radiación fotosintéticamente activa (PAR) de una misma serie de fabricación nacional y se comparó la respuesta de los diferentes sensores elaborados en el DES con la de los sensores comerciales de igual principio de funcionamiento. En el caso de los sensores PAR nacionales, el análisis de las mediciones llevó a una modificación del difusor del sensor; la mejora en la respuesta se pudo comprobar ensayando nuevamente los sensores.

**Palabras clave:** sensores solares gruesos, radiómetro PAR, radiómetro global, respuesta angular, energía solar.

### INTRODUCCION

Una de las características de los dispositivos que tienen como principio de medición el efecto fotoeléctrico es la dependencia de la corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ) con el ángulo de incidencia de la radiación, esto se conoce como ley del coseno o respuesta angular del dispositivo (Grossi Gallegos, 2004). En el caso de los radiómetros fotovoltaicos esta dependencia debe ser considerada para proporcionar una precisa evaluación del recurso solar. Por otro lado, en el caso de los sensores solares de posición se hace una medición indirecta de la posición del Sol a partir de su relación con la  $I_{cc}$  a través de la ley del coseno. Lo ideal es que los sensores y radiómetros fotovoltaicos tengan una respuesta angular que sea exactamente la misma que la ley del coseno, no obstante, la respuesta angular está influenciada por la calidad, dimensiones y construcción de las cúpulas. La caracterización angular de los distintos dispositivos nos proporciona información que permite hacer mediciones más confiables ya que por ejemplo se puede definir el error direccional del dispositivo así como el campo visual (FOV, por sus siglas en inglés) del mismo y desde el punto de vista de la investigación y el desarrollo brinda información fundamental para tomar decisiones en cuanto al diseño de los dispositivos.

En el Departamento de Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) se realiza la caracterización angular de los dispositivos de fabricación nacional desde hace algunos años como fue presentado en Moreno et al., 2016. Hasta el momento el ensayo se llevaba a cabo utilizando una base mecánica y la adquisición de los datos se realizaba de forma manual, debido a esto, completar el ensayo requería mucho tiempo lo cual era una desventaja si se querían hacer análisis de la

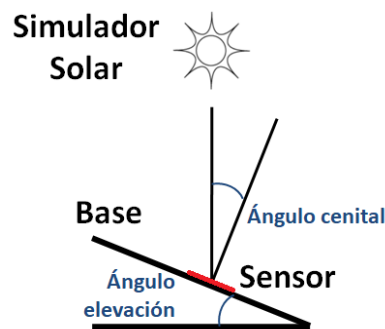
respuesta de muchos dispositivos para iguales condiciones de funcionamiento. Con el objetivo de disminuir los tiempos requeridos para ensayar los dispositivos y aumentar la precisión de las mediciones se desarrolló un equipo de medición automatizado que permite variar el ángulo de incidencia de la radiación en dos ejes y adquirir la salida del dispositivo en cada punto.

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar la respuesta angular de distintos dispositivos fotovoltaicos al variar el ángulo de la radiación solar incidente y presentar el equipo automatizado de respuesta angular desarrollado en el DES que se utilizó para el ensayo. Se presenta la caracterización de sensores solares y radiómetros fotovoltaicos desarrollados en el DES y de sensores comerciales con similares características. Primeramente se detallan las especificaciones de los diferentes sensores solares y radiómetros ensayados, la configuración del ensayo y el procedimiento de la medición. Luego se comparan las respuestas de los diferentes sensores medidos bajo las mismas condiciones, se discuten los resultados obtenidos y se analizan las ventajas de la automatización del ensayo.

## CARACTERIZACIÓN ANGULAR

### *Caracterización de respuesta angular*

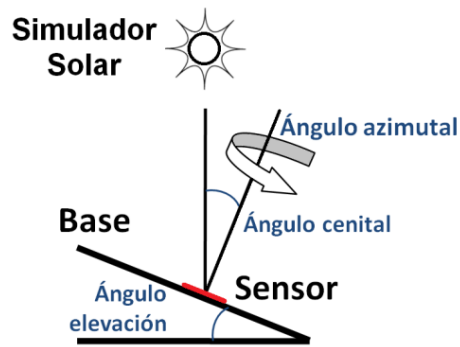
La caracterización angular consiste en medir la señal de salida del sensor al variar el ángulo de incidencia de la radiación para validar que el sensor responde según la regla del coseno y verificar así el correcto funcionamiento del mismo. Esta medición se define como respuesta angular y se puede medir tanto en condiciones AM0 ( $1367 \text{ W/m}^2$ ) o AM1.5 ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) dependiendo si los sensores son para aplicaciones espaciales o terrestres. Una representación esquemática de la disposición del sensor y la lámpara se puede observar en la Figura 1, al mantener la fuente de luz en un ángulo fijo y variar la inclinación del sensor, el ángulo de elevación de la base se corresponde con el ángulo cenital del Sol.



*Figura 1: Representación esquemática de la medición de respuesta angular al variar el ángulo de elevación de la base.*

### *Caracterización de simetría*

La caracterización en simetría consiste en medir la señal de salida del sensor al variar el ángulo acimutal (rotación) para cada uno de los ángulos de elevación considerados en la respuesta angular, esta medición se hace en condiciones AM0 o AM1.5 dependiendo de la aplicación de los sensores como se comentó anteriormente. El ángulo acimutal se varía hasta completar una vuelta completa de  $360^\circ$ . Una representación esquemática de la disposición del sensor y la lámpara se puede observar en la Figura 2.



*Figura 2: Representación esquemática de la medición de respuesta angular al variar el ángulo acimutal.*

Con estas mediciones se pueden determinar parámetros importantes del desempeño de los sensores como por ejemplo el campo visual, el error direccional en elevación y en acimut, además se puede utilizar para la calibración de los sensores de posición.

### CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO

La caracterización angular de los sensores se realizó en el Laboratorio de Caracterización utilizando una base rotatoria desarrollada en el DES, un simulador solar clase A de la marca ScienceTech modelo SS1KW y una unidad de fuente y medición Keithley 2602A (SMU, por sus siglas en Inglés), en la Figura 3 se muestra el equipamiento utilizado en el ensayo.



*Figura 3: Equipamiento para medir la caracterización de la respuesta angular.*

El simulador solar ScienceTech modelo SS1KW permite simular diferentes condiciones mediante el empleo de filtros, estos modifican la salida espectral de la lámpara para que coincida con las condiciones solares naturales como el espectro AM0 y AM1.5 (Manual ScienceTech). La base rotatoria gira con dos grados de libertad, se utilizaron dos motores paso a paso para proporcionar el movimiento en acimut y en elevación del sensor a medir. Se utilizó una computadora para programar la base rotatoria y adquirir los datos de medición del SMU. Además, se diseñó una interfaz gráfica para definir parámetros de la medición y visualizar los datos adquiridos a medida que se realiza el ensayo.

La Figura 4 muestra un diagrama de flujo de la secuencia de control para manejar los dos motores paso a paso y adquirir los datos de la medición. Desde la computadora se envían los comandos por puerto serie al microcontrolador de la placa Arduino Mega 2560, la interfaz entre el microcontrolador

y los motores está formada por la placa Ramps 1.4 para la electrónica de potencia y los drivers DRV8825 para manejar la corriente que se entrega a los motores.

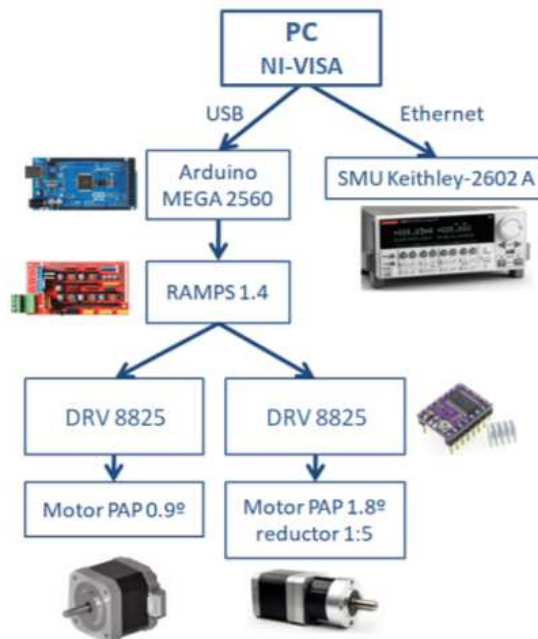


Figura 4: Esquema del hardware para controlar la base rotatoria y adquirir los datos.

El ensayo se llevó a cabo en un ambiente oscuro, con el simulador solar como única fuente de luz, para evitar que la luz parásita interviniera con la determinación precisa de la respuesta del sensor. Se midió la salida de cada sensor iluminado en condiciones de AM0 o AM1.5, dependiendo de la aplicación del sensor, ambas condiciones medidas con una celda de referencia de silicio. El equipo se programó para realizar una medición cada 5° entre 0 y 70° de elevación y cada 30° de rotación.

## SENSORES CARACTERIZADOS

### *Sensor solar grueso para uso espacial*

Los sensores solares gruesos (CSS, por sus siglas en inglés) son parte del control de actitud de un satélite o un cohete y se utilizan principalmente para la detección de la presencia y/o la orientación del Sol con relación al satélite. En el DES se diseñan y fabrican estos CSS para aplicaciones espaciales en base a los requerimientos de tamaño y de  $I_{cc}$  de las distintas misiones satelitales y se califican para vuelo realizándoles ensayos ambientales, de calificación y de aceptación. El elemento sensor es una celda solar de silicio monocristalino diseñada y elaborada en el DES y se le coloca en la superficie un vidrio protector (Bolzi et al., 2013). Hasta el momento los CSS de fabricación nacional se han empleado en las misiones espaciales SAC-A (Bolzi et al., 2002), Aquarius/SAC-D (Tamasi et al. 2009), el Proyecto VS-30, Amazonia-1, SAOCOM 1A y SAOCOM 1B (Martínez Bogado et al., 2015). El sensor caracterizado en este trabajo es el denominado CSS A-05, fue uno de los CSS de ingeniería de la misión SAOCOM, su formato es cuadrado de 12mm de lado y área activa circular de 50 mm<sup>2</sup>, en la Figura 5 se puede observar el dispositivo montado en una base de aluminio.

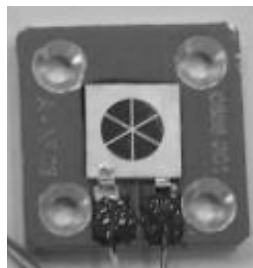


Figura 5: Sensor grueso de posición de ingeniería de la misión SAOCOM desarrollado en el DES.

#### *Fotodiodo comercial*

El sensor comercial SSFH 2430 es un fotodiodo de silicio con un FOV de 120° según lo especificado por el fabricante, el área activa del dispositivo presenta geometría cuadrada y tiene un área de 16 mm<sup>2</sup>. Al sensor se le incorporó un vidrio protector para tener las mismas condiciones ópticas que el CSS de fabricación nacional. En la Figura 6 se muestra una imagen del sensor SSFH 2430.



*Figura 6: Sensor comercial SSFH 2430.*

#### *Radiómetro global desarrollado en el DES*

Los radiómetros fotovoltaicos de bajo costo se desarrollan en CNEA desde el año 1998 (Bolzi, Tamasi et al., 2002) vienen utilizándose por distintos grupos de investigación, universidades, empresas y personas particulares. Este instrumento tiene como elemento sensor una celda fotovoltaica de silicio monocristalino diseñada y fabricada íntegramente en el DES con un área activa de 0,13cm<sup>2</sup>. El instrumento consta de una base de aluminio, sobre la cual se monta el elemento sensor protegido por una cubierta de vidrio difusor sellado en su periferia, ver Figura 7. La cubierta de vidrio tiene dos finalidades, por un lado proteger al sensor fotovoltaico de las condiciones ambientales y por el otro, mejorar la respuesta angular debido al esmerilado superficial del mismo (Bolzi et al. 2008).



*Figura 7: Radiómetro global desarrollado en el DES.*

#### *Radiómetro PAR desarrollado en el DES*

La medición de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), definida por la fracción del espectro solar comprendida entre 400 y 700 nm, es necesaria en aplicaciones relacionadas con la fisiología de las plantas, modelos de productividad de cultivos, la producción de biomasa y la iluminación natural en invernaderos entre otras aplicaciones en el área agronómica (Tamasi y Martínez Bogado, 2013).

Los radiómetros PAR desarrollados en el DES tienen como elemento sensor una celda fotovoltaica de silicio de área activa circular, aprovechando la característica de las celdas fotovoltaicas de tener una respuesta espectral que depende de la longitud de onda incidente. Al elemento sensor se le adhirió un filtro comercial que permite medir solamente la región del espectro de interés.

#### *Radiómetro PAR comercial*

El elemento sensor de los radiómetros comerciales PAR Kipp & Zonen PQS-1 (ver Figura 8) es un fotodiodo, su FOV es de 180° y presenta un error direccional en elevación menor a 30 μmol/m<sup>2</sup>·s según la hoja de datos que proporciona el fabricante.



Figura 8: Radiómetro PAR Kipp & Zonen PQS 1.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización angular es un proceso repetitivo y puede implicar un largo período de medición, sobre todo si se desean realizar muchas mediciones en las mismas condiciones. Estas mediciones pueden ser para conocer la respuesta de una serie de dispositivos similares o para hacer una estadística de mediciones sucesivas de la respuesta de un mismo dispositivo. Hasta el momento en las condiciones en que se llevaba a cabo el ensayo, con una base mecánica y adquisición de los datos de forma manual, el tiempo que demandaba completarlo dependía de muchos factores; entre ellos la experiencia y práctica de los operadores, que son parámetros difíciles de definir. Con la modificación del equipo se descartaron las principales fuentes de error y de posibles demoras causadas por los factores humanos mencionados anteriormente.

### Sensores espaciales

Luego de realizar las mediciones se analizaron los resultados mediante el cálculo del valor medio y la desviación estándar para cada ángulo de elevación debido a la variación del ángulo acimutal. Como se puede observar el gráfico de la Figura 9.a. la respuesta del sensor comercial presenta una mayor desviación que la del CSS elaborado en el DES, siendo la desviación del primero del orden de  $10^{-3}$  y la del segundo del orden de  $10^{-5}$ , esto se puede atribuir a la geometría cuadrada del área activa. De la gráfica de error relativo porcentual (Figura 9.b.) se puede observar que para los mayores ángulos de elevación el CSS tiene una excelente respuesta al coseno con un error relativo porcentual menor al 10%, mientras que el sensor comercial tiene un error relativo porcentual superior al 25%. El fabricante del sensor comercial define el FOV del sensor en  $\pm 60^\circ$ , lo cual se corrobora con las mediciones, en la figura 9.a. se observa que después de los  $60^\circ$  la respuesta del sensor comercial empeora de forma considerable.

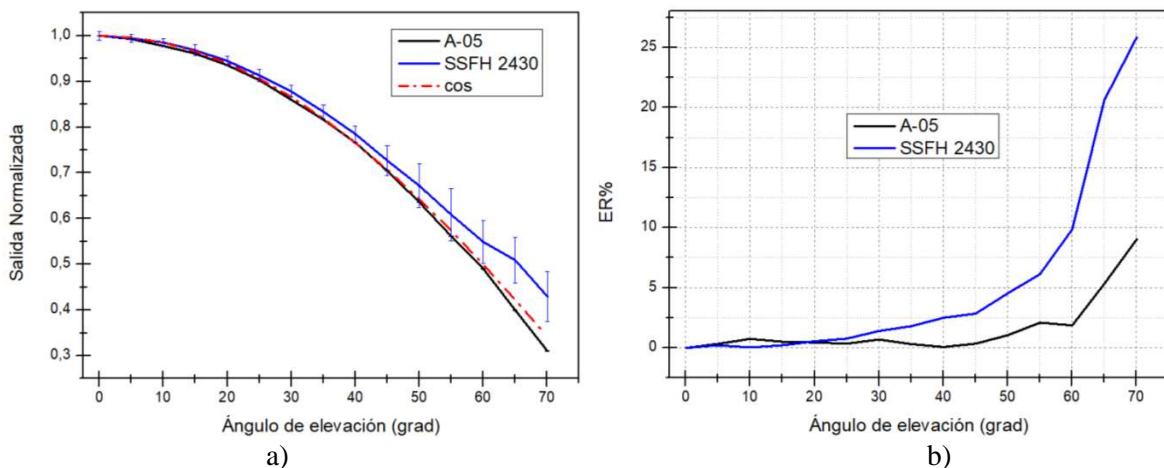


Figura 9: a) Respuesta angular del CSS A-05 elaborado en el DES y del fotodiodo comercial SSFH 2430 con vidrio b) Error relativo porcentual.

### Sensores PAR

Como primera medida se midió la respuesta de un sensor global y uno PAR desarrollados en el DES y se compararon las mediciones para estudiar posibles diferencias en la salida de los sensores. Se observó que hay un mayor distanciamiento con la respuesta del coseno ideal en el radiómetro PAR (ver Figura 10) debido a la utilización del filtro óptico en la elaboración del sensor.

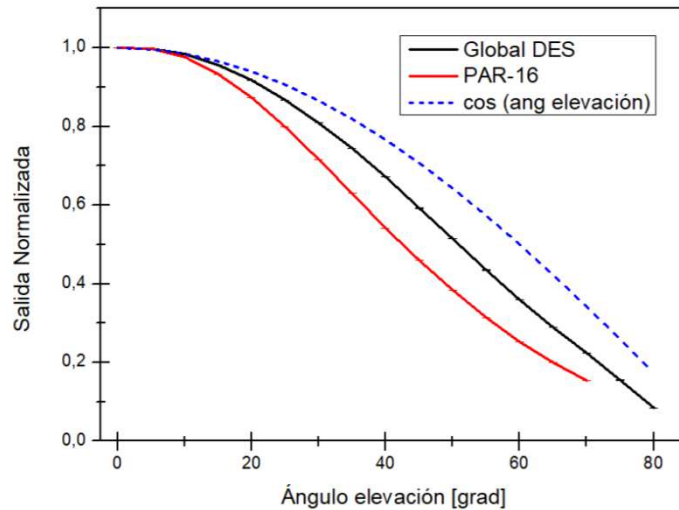


Figura 10: Resultados de las mediciones de los radiómetros PAR-16 y Global.

Luego se midieron cuatro sensores PAR desarrollados en el DES para analizar la repetitividad del proceso de elaboración de los dispositivos. La Figura 11 muestra las mediciones obtenidas y se puede observar un comportamiento similar en los cuatro radiómetros. Cada sensor se midió 10 veces para cada ángulo de elevación y se observó un desvío estándar experimental para el valor medio del orden de  $10^{-5}$ . A partir de la medición de simetría de los radiómetros del DES se calculó un error direccional en acimut es del orden de  $10^{-5}$ .

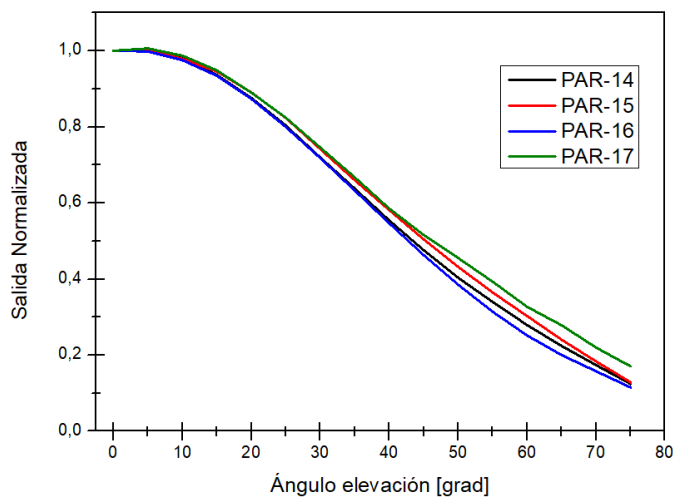


Figura 11: Resultados de las mediciones de respuesta angular normalizada de los radiómetros PAR-14, PAR-15, PAR-16 y PAR-17 desarrollados en el DES.

Se realizó la medición en respuesta angular de un radiómetro PAR comercial Kipp & Zonen PQS-1 con el objetivo de compararlo con los sensores PAR desarrollados en el DES. La Figura 12.a. muestra la respuesta del sensor PAR-16 junto con la del sensor comercial. Los resultados de la medición del sensor comercial Kipp & Zonen PQS-1 mostraron un comportamiento distinto a lo que indica el fabricante en la hoja de datos con respecto al error direccional del instrumento. Por otro lado se puede observar un mayor distanciamiento con la respuesta del coseno ideal para el radiómetro PAR-16. Luego de esta observación se decidió cambiar el difusor del radiómetro PAR-16 y se midió nuevamente su respuesta (Figura 12.a.). Se analizó el error relativo de los radiómetros con respecto a la respuesta ideal (Figura 12.b.) y se obtuvo que luego del cambio del difusor en el radiómetro PAR-16 el error relativo porcentual disminuyó a la mitad para los ángulos más elevados y se acercó a la respuesta del sensor comercial, lo que se considera como una mejora en la respuesta del radiómetro nacional.



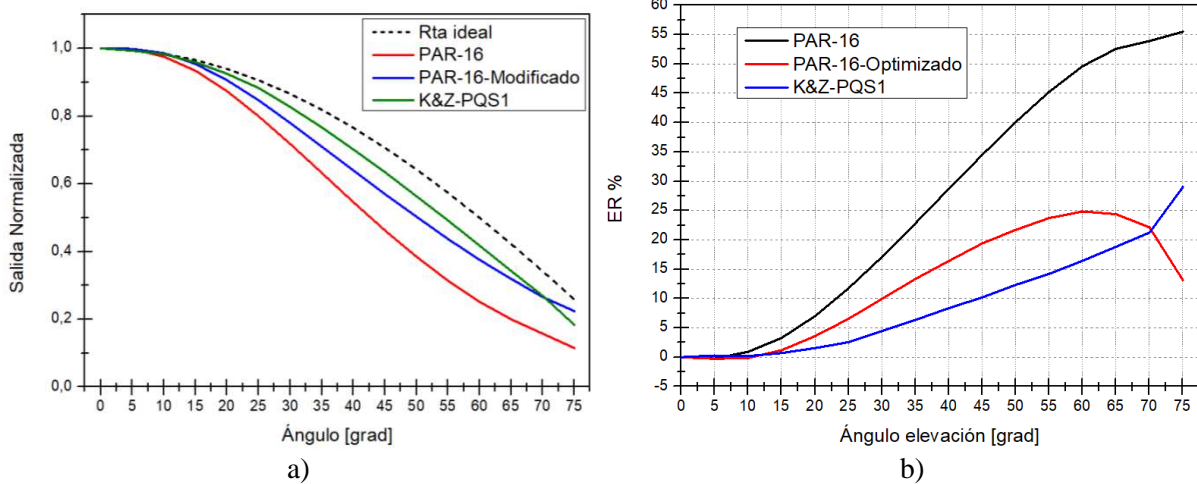


Figura 12: a) Comparación entre el sensor comercial de Kipp & Zonen PQS-1 con el sensor PAR-16 desarrollado en el DES, antes y después de optimizar el difusor. b) Error relativo porcentual para el radiómetro comercial Kipp & Zonen y el radiómetro PAR-16 desarrollado en el DES.

## CONCLUSIONES

Se compararon las respuestas de los diferentes sensores elaborados en el DES con sensores comerciales de igual principio de funcionamiento y aplicaciones. Los dispositivos fueron ensayados en las mismas condiciones, disminuyendo de esta forma los errores que introducen la disposición experimental a la medición.

En base a las mediciones realizadas a los CSS se puede concluir que para los mayores ángulos de elevación el CSS desarrollado en el DES tiene una excelente respuesta al coseno con un error relativo porcentual menor al 10%, mientras que el sensor comercial tiene un error relativo porcentual superior al 25%. Se pudieron determinar parámetros de los sensores como, por ejemplo, el FOV, el error direccional en elevación y el error asociado a la variación de ángulo acimutal.

Se analizó la repetitividad de la respuesta entre varios sensores de radiación PAR de una misma serie de fabricación mostrando un comportamiento similar en todos ellos. Debido a estos resultados, en cuanto al apartamiento de la ley del coseno, se decidió modificar el difusor de uno de ellos y luego repetir el ensayo con lo cual se pudo verificar que el cambio del difusor mejoró la respuesta del sensor. A pesar de esta desviación, en Righini et al. (2009) y Denegri et al. (2009) se presentó la comparación entre las integrales diarias, horarias y cada diez minutos entre el sensor PAR de CNEA y el radiómetro PAR Kipp & Zonen mostrando una correlación excelente durante todo el período de 215 días que fuera analizado. La propia estabilidad del equipo Kipp & Zonen, cotejada mediante la comparación de las integrales diarias con un piranómetro CIMEL, permite equiparar el funcionamiento del sensor de CNEA con el sensor PAR comercial.

Como última observación, luego de realizar sucesivas mediciones con el equipamiento desarrollado en el DES, se observó que el tiempo empleado para llevar a cabo una caracterización angular completa disminuyó considerablemente (alrededor de un 80%) con respecto a los tiempos que se empleaban con las condiciones anteriores, principalmente gracias a la adquisición automática de los datos. Además, al variar el ángulo con los motores paso a paso de forma controlada se eliminaron los posibles errores debido al operador al cambiar el ángulo. Por otro lado, esto permite que para trabajos futuros se puedan hacer mediciones con variaciones más pequeñas en los ángulos de elevación y acimut, sin que esto requiera ningún esfuerzo extra del operador del ensayo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Agustín Dato por su colaboración en el diseño mecánico de la base rotatoria utilizada en este trabajo.



## REFERENCIAS

- Bolzi, C. G., Bruno, C. J., Durán, J. C., Godfrin, E. M., Bogado, M. M., Merino, L. M., Tamasi M. et al. (2002). First experiment of Argentine solar cells in space: modules fabrication, characterization, and telemetry data analysis from SAC-A satellite. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 73(3), 269-280.
- Bolzi, C. G., Tamasi, M. J. L., Martínez Bogado, M. G., & Plá, J. C. (2002). Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la CNEA: prototipo comercial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6 (11.01).
- Bolzi, C. G., Martínez Bogado, M. G., Tamasi, M. J. L., Grossi Gallegos, H., Righini, R. (2008). Desarrollo de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo en la CNEA. *Actas del IX Congreso Panamericano de Iluminación Luxamérica*.
- Bolzi, C. G., Martínez Bogado, M. G., & Tamasi, M. J. L. (2013). Reseña del desarrollo de sensores solares en CNEA para misiones satelitales. *Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 31*, pp. 29 - 36
- Denegri, M. J. Righini R., Grossi Gallegos H., Bolzi C.G., Martínez Bogado M.G., Tamasi M.J.L., (2009). Estudio comparativo del comportamiento de un radiómetro PAR fabricado por CNEA con respecto a uno comercial. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 24(2).
- Grossi Gallegos, H. (2004). *Notas sobre radiación solar*. Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires.
- Manual ScienceTech Model SS1kW Solar Simulator User's Manual Version 2.2
- Martínez Bogado, M., Tamasi, M., Bolzi, C., & Raggio, D. (2015). Desarrollo de sensores solares en argentina, aplicaciones terrestres y espaciales. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 6(1).
- Moreno, A., Tamasi, M., Martínez Bogado, M., Díaz Salazar, M., & Kondratiuk, N. (2016). Comparación de la respuesta angular de un sensor grueso de posición para uso satelital con un sensor comercial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 20*, pp 04.73-04.79.
- Righini, R., Grossi Gallegos, H., Bolzi, C. G., Martínez Bogado, M., & Tamasi, M. (2009). Comportamiento de un radiómetro PAR fabricado por CNEA respecto a un radiómetro PAR comercial KIPP & ZONEN. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 09-07.
- Tamasi, M. J. L., Bogado, M. M., Bolzi, C. G., Prario, I., & Alurralde, M. (2009). Sensores fotovoltaicos para la misión satelital AQUARIUS-SAC-D: desarrollo y ensayos ambientales. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, Vol. 23, pp. 19 - 26.
- Tamasi, M. J. L., Bogado, M. M. (2013). A theoretical approach to photosynthetically active radiation silicon sensor. *Thin Solid Films*, 534, 497-502.

## ABSTRACT

The main objective of this paper is to characterize the angular response of different photovoltaic devices by varying the angle of incident solar radiation. In order to achieve this, new automated angular response equipment made in the Department of Solar Energy (DES) of the National Atomic Energy Commission (CNEA) is being used. The characterization of solar sensors and photovoltaic radiometers developed in DES and commercial devices with similar characteristics is presented. The repetitiveness of the response between several photosynthetically active radiation sensors (PAR) of the same series of national manufacture was analyzed and the response of the different sensors developed in the DES with the response of commercial sensors of the same operating principle was compared. In the case of the national PAR sensors, the analysis of the results obtained led to a modification of the diffuser; the improvement in the response was checked by retesting the sensors.

**Keywords:** coarse sun sensor, PAR radiometer, global radiometer, angular response, solar energy.