

## **COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA ANGULAR DE UN SENSOR GRUESO DE POSICIÓN PARA USO SATELITAL CON UN SENSOR COMERCIAL<sup>a, b</sup>**

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

<sup>1</sup>Departamento Energía Solar, Gerencia Investigación y Aplicaciones, Centro Atómico  
Constituyentes. CNEA, Argentina

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)  
Av. General Paz 1499 (1650) San Martín, Pcia. de Buenos Aires, Argentina. Tel. (011) 6772-7837,  
moreno@tandar.cnea.gov.ar

*Recibido 09/08/16, aceptado 09/10/16*

**RESUMEN:** El presente trabajo tiene como objetivo la comparación entre un sensor solar grueso de posición de fabricación nacional (CSS), desarrollado en Argentina en el Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y un sensor comercial de tipo fotodiodo. Los sensores nacionales se caracterizaron a partir de la curva corriente-tensión (I-V), analizando la corriente de cortocircuito y los fotodiodos a partir de señal de salida, ambas normalizadas con respecto al ángulo de incidencia normal. También se analizó la simetría de la respuesta a partir de la variación del ángulo azimutal y se calculó el error absoluto en las mediciones. Los resultados muestran que, en general, el comportamiento del sensor fabricado en CNEA presenta un mejor comportamiento.

**Palabras clave:** energía solar, sensores solares de posición, sensor fotovoltaico.

### **INTRODUCCIÓN**

Los sensores fotovoltaicos, en general, pueden utilizarse en cualquier situación donde la excitación de entrada sea radiación luminosa, en el intervalo de longitudes de onda donde éstos son sensibles, entregando a la salida una señal eléctrica. En particular en su utilización terrestre, los radiómetros fotovoltaicos están muy difundidos para la medición de radiación solar debido a su bajo costo (Bolzi et. al 2002) comparado con los piranómetros basados en termopilas. Para orientar un satélite o un cohete al Sol se utilizan sensores fotovoltaicos, primarios o sensores solares gruesos. Estos sensores también son una parte importante del sistema de control de actitud de satélites, donde se necesita de cierta precisión, que el sistema sea robusto y confiable para asegurar el éxito de la misión.

En el año 1995 se comenzó a trabajar en el Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en el desarrollo de sensores de radiación terrestre aprovechando la experiencia en la fabricación de celdas solares de silicio cristalino (Barrera et al., 2004). El objetivo final de estos trabajos fue disponer en el país de las herramientas de diseño y de las tecnologías de fabricación, caracterización y ensayo de sensores de radiación solar, tanto para usos terrestres proporcionando una herramienta confiable y de bajo costo, como para uso espacial. En particular se proveyeron los sensores gruesos de posición de las misiones

---

<sup>a</sup>Proyecto parcialmente financiado por el PICT 2013-0063

<sup>b</sup>Proyecto parcialmente financiado por el PIP 00319CO

<sup>c</sup>Beca PICT 2013-0063, MinCyT,

satelitales SAC-A (Bolzi et al., 2002) y de la misión Aquarius/SAC-D (Tamasi et al., 2007), prevista en el Plan Espacial Nacional. En Bolzi et al. 2013, se presenta una reseña de todos estos desarrollos y ensayos previstos para usos espaciales. El éxito de estas misiones permite ofrecer tales sistemas a otras misiones satelitales y adecuarlos según los requerimientos de cada misión. Cabe destacar que junto con los paneles del SAC-D los sensores gruesos (Tamasi et al., 2007) fueron sometidos a ensayos térmicos y mecánicos que pasaron exitosamente todas las pruebas de calificación. Aprovechando esta experiencia se diseñaron y fabricaron los sensores según los requerimientos de la misión SAOCOM.

El objetivo del trabajo es llevar a cabo una comparación de comportamiento entre un sensor solar grueso de posición fabricado en el DES y un sensor comercial de tipo fotodiodo sometidos a cambios de ángulo de incidencia de radiación y ángulo azimutal.

## CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES DE POSICIÓN ESTUDIADOS

En base a los requerimientos de tamaño y de corriente de cortocircuito (entre 14 y 20 mA) de los sensores gruesos de posición nacionales se realizaron dispositivos cuadrados de 12mm de lado. El área activa del dispositivo es circular de 50 mm<sup>2</sup> (8 mm de diámetro). El diseño del sensor es el que se observa en la Figura 1.

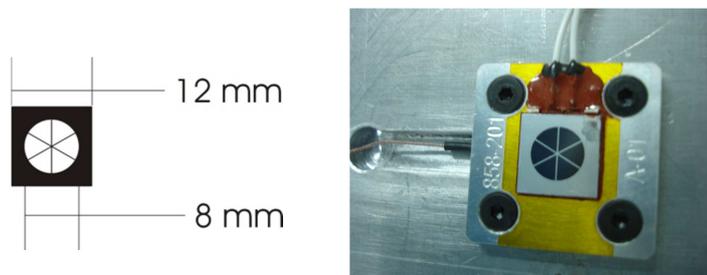


Figura 1: Diseño del CSS (izquierda) y el sensor elaborado (derecha).

En los sensores comerciales estudiados el elemento sensor es un fotodiodo, el área activa del dispositivo presenta geometría cuadrada y tiene un área de 24 mm<sup>2</sup>.

## CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA: CURVA I-V

Para la medición de la curva corriente-tensión (I-V) de celdas solares y sensores de radiación en condiciones controladas se dispone de un simulador solar de estado estacionario “close-match” marca TS-Space con espectro AM0 e irradiancia equivalente a 1367 W/m<sup>2</sup> normalizada y una carga electrónica. Para el control de la temperatura del dispositivo a medir se utiliza una base termostatazada que está controlada electrónicamente y trabaja en el intervalo de temperaturas cercanas a la normalizada (28 ± 1)°C.

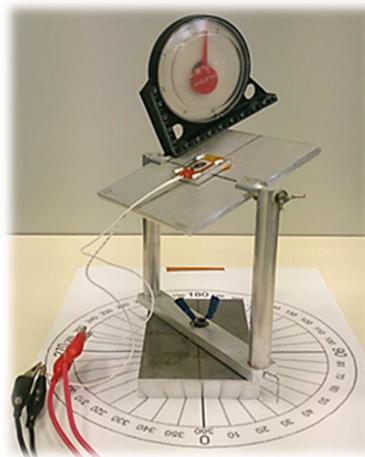
También es posible caracterizar eléctricamente sensores solares gruesos a través de la medición de la respuesta angular, que se establece como la variación de la corriente de corto circuito (I<sub>cc</sub>) en función del ángulo de incidencia. Otro parámetro que caracteriza a estos sensores es el ángulo de visión o campo visual, que representa el máximo ángulo que el sensor puede medir. En el caso de los sensores CSS, por el diseño particular que poseen, este ángulo es casi 180° porque solo está cubierto por el vidrio protector. Esta es una ventaja con respecto a otros sensores encapsulados cuyo campo visual en general rondan los 160° o menos (Bradfor, 2013).

En este trabajo para la caracterización eléctrica de los sensores, tanto CSS como el comercial, se midió la respuesta angular. Para medir la curva I-V los sensores se deben polarizar en inversa, en el sensor comercial estos se encuentran aislados de la salida a través de la etapa de amplificación.

## MEDICIONES

### *Disposición experimental*

Se midió la salida entregada por cada sensor iluminado en condiciones de AM0 medida con referencia de Silicio a 28°C y en posición horizontal. Para el caso del sensor CSS se midieron los valores de la corriente de corto circuito y en el sensor comercial se midió la tensión a la salida del circuito acondicionador de señal. Para realizar esta medición se diseñó y fabricó un soporte (Figura 2) que permite variar simultáneamente el ángulo de incidencia de la radiación y el ángulo azimutal.



*Figura 2: Soporte mecánico para la medición de la señal de los sensores respecto al ángulo de incidencia.*

### *Respuesta angular*

En ambos sensores se midió la variación de la señal de salida con respecto al ángulo de incidencia o ángulo de elevación. En la Figura 3 se muestra el esquema de la medición y en la Figura 4 se observa la comparación entre la salida normalizada del CSS elaborado en el DES y el sensor comercial. Así como la curva del coseno del ángulo que representa la posición del Sol respecto de la vertical, que es la respuesta ideal de ambos sensores. Los sensores comerciales fueron conectados a un amplificador y la señal que se obtiene es una tensión proporcional a la intensidad lumínica.

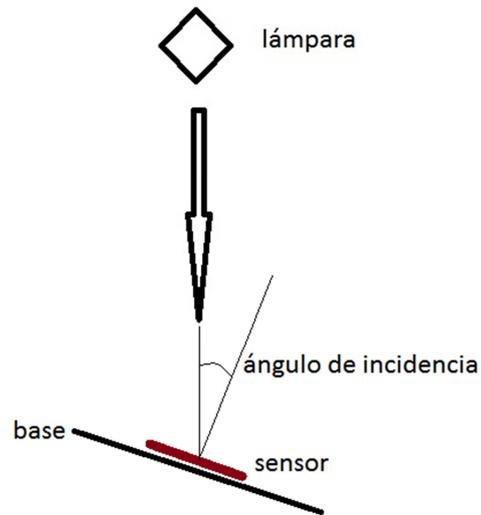


Figura 3: Esquema de medición de la respuesta angular.

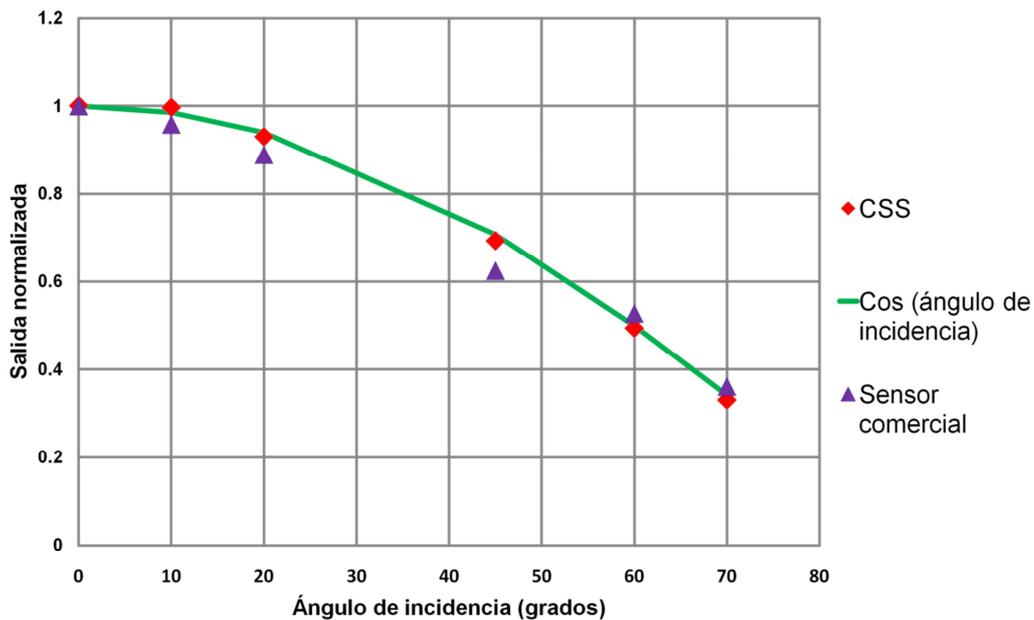


Figura 4: Comparación de la respuesta angular.

### Simetría

Se midió la salida de corriente y tensión de los sensores, variando el ángulo azimutal girándolo sobre su propio eje, con distintos ángulos de elevación (0°, 10°, 20°, 45°, 60° y 70°), se realizó una medición por ángulo. La Figura 5 muestra el esquema de medición y en las Figuras 6 y 7 se muestran los resultados de las mediciones para el sensor CSS y para el sensor comercial respectivamente.

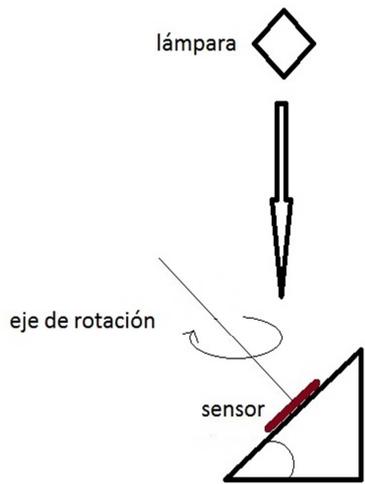


Figura 5: Esquema de medición de simetría.

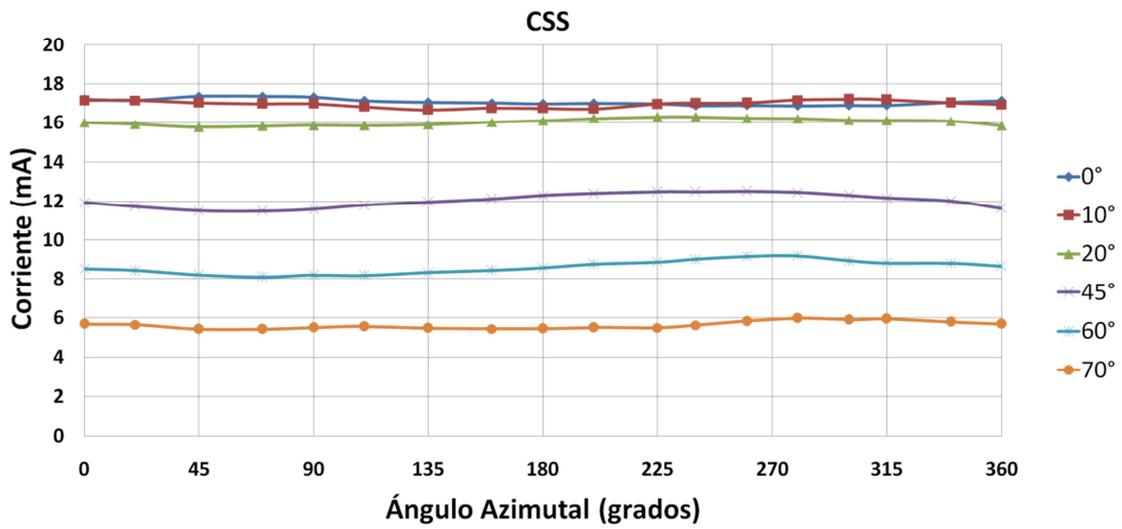


Figura 6: Comportamiento de simetría del CSS.

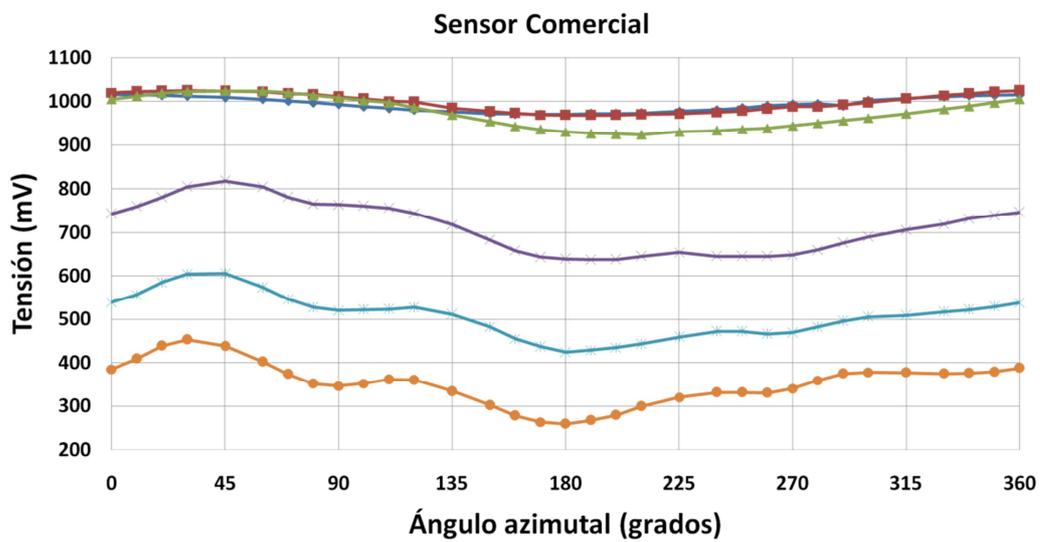


Figura 7: Comportamiento de simetría del sensor comercial.

### Cálculo de errores

Los errores absolutos porcentuales se calcularon con respecto a la respuesta ideal que se corresponde con un comportamiento según la ley del coseno.

En la Tabla 1 se observa que el sensor comercial tiene mayor desviación respecto de la respuesta ideal que los sensores nacionales. A este error debe agregarse el error experimental que es aproximadamente +/- 3%, dado por los errores propios de los instrumentos de medición como el multímetro y al error de alineación en la medición del ángulo con el soporte desarrollado.

Ángulo de incidencia	CSS	Sensor comercial
0°	--	--
10°	1,2	2,7
20°	1,1	5,4
45°	2,0	11,6
60°	1,1	5,5
70°	3,4	5,6

Tabla 1: Error absoluto en la salida (%).

### CONCLUSIONES

A partir de las curvas de las respuestas angulares de ambos sensores, se pudo verificar que el sensor desarrollado en el DES tiene un mejor comportamiento respecto al comercial en cuanto a su respuesta al coseno. Este sensor presenta una mayor simetría respecto a su ángulo azimutal en la respuesta de salida que el sensor comercial. Los resultados obtenidos arrojaron un error absoluto máximo de 3,4% correspondiente al CSS, menor que el error absoluto obtenido para el sensor comercial que fue del 11,6%, concluyendo que la geometría circular de los sensores nacionales muestra un mejor desempeño que la geometría cuadrada en los comerciales.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a José M. Olima por la construcción del soporte para medición, a Carlos Rinaldi y Hernán Socolovsky por su ayuda en el arreglo experimental para la medición.

### REFERENCIAS

- Barrera M., Bolzi C.G., Corvalán D., Martínez Bogado M.G., Plá J., Tamasi M.J.L. (2004). Últimos desarrollos en celdas solares de silicio cristalino en la CNEA. AVERMA, **8**, pp. 04.19 - 04.24.
- Bolzi C. G., Bruno C. J., Durán J. C., Godfrin E. M., Martínez Bogado M. G., Merino L. M., Plá J. C., Tamasi M. J. L., Barrera M. (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**, pp. 269-280.
- Bradfor (2013) Fine Sun Sensor Data Sheet. [http://bradford-space.com/#productline/sun\\_sensors/mini\\_fine\\_sun\\_sensor](http://bradford-space.com/#productline/sun_sensors/mini_fine_sun_sensor).
- Tamasi M. J. L., Martínez Bogado M. G., Rodríguez S. E., Prario I., Socolovsky H. P., Plá J. C., Alurralde M. A., Nigri C., Filevich A. (2007). Diseño, fabricación, caracterización y ensayos de sensores fotovoltaicos para la misión satelital AQUARIUS-SAC-D. AVERMA, **11**, pp. 04.01 – 04.08.

Tamasi M. J. L.; Martínez Bogado M. G.; Bolzi C.G.; Prario I.; Alurralde M. A. (2009). Sensores fotovoltaicos para la misión satelital AQUARIUS-SAC-D: desarrollo y ensayos ambientales. ERMA, 23, pp. 19 – 26.

## **ABSTRACT**

This work aims the comparison between a coarse sun sensor (CSS) developed in Argentina in the Department of Solar Energy (DES) of the National Commission Atomic Energy (CNEA) and a commercial sensor based on a photodiode. The sensors were characterized from the current-voltage (I-V) curve, analyzing both the normalized output of the sensors with respect to the incidence angle and the symmetry of the response with the variation of the azimuth angle. It was calculated the absolute error of the measurements presenting a better performance the national sensor.

**Keyword:** solar energy, sun sensor, photovoltaic sensor.