

DESARROLLO DE SENSORES SOLARES EN ARGENTINA, APLICACIONES TERRESTRES Y ESPACIALES

Mónica G. Martínez Bogado – mbogado@tandar.cnea.gov.ar

Mariana J.L. Tamasi – tamasi@tandar.cnea.gov.ar

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Claudio G. Bolzi – bolzi@tandar.cnea.gov.ar

Daniel Raggio – raggio@tandar.cnea.gov.ar

Departamento Energía Solar, Gerencia de Investigación y Aplicaciones, Centro Atómico Constituyentes,
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

Resumen. En el año 1998 se inició en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) el desarrollo de radiómetros fotovoltaicos de bajo costo, utilizando como elemento sensor celdas fotovoltaicas de silicio cristalino fabricadas en el Laboratorio Fotovoltaico del Departamento Energía Solar del Centro Atómico Constituyentes. Se diseñaron, fabricaron y calibraron distintos prototipos para analizar el comportamiento de estos sensores y evaluar sus limitaciones. Actualmente se han distribuido en distintos laboratorios del país prototipos comerciales para su evaluación final en campo.

Los sensores fabricados tienen tanto aplicaciones terrestres como espaciales en satélites artificiales. En particular, el primer experimento de celdas solares argentinas en el espacio, a bordo del satélite SAC-A, incluyó la fabricación de los sensores de posición del satélite que formaban parte del sistema de orientación del satélite respecto al Sol. En este trabajo se presenta el desarrollo y estado actual de los sensores fotovoltaicos de silicio monocristalino fabricados en la CNEA, así como sus aplicaciones espaciales y terrestres.

Palabras claves: Sensores de radiación, aplicaciones terrestres, aplicaciones espaciales, fabricación, caracterización

1. INTRODUCCIÓN

Los sensores fotovoltaicos pueden utilizarse en cualquier situación donde el parámetro de entrada sea radiación luminosa, en el rango de longitudes de onda donde éstos son sensibles, entregando a la salida una señal eléctrica. En particular, se presenta su uso en radiómetros fotovoltaicos, muy difundidos para la medición de radiación solar debido a su bajo costo comparado con el costo de piranómetros basados en termopilas. Sin embargo poseen algunas desventajas respecto a estos últimos como ser:

- ✓ respuesta espectral limitada y no plana,
- ✓ apartamiento de la respuesta angular con respecto a la dependencia con el coseno del ángulo de incidencia. Esto hace que el orden de los errores de medición oscilen alrededor del 2% para integrales diarias y del 10% o más para mediciones instantáneas, dependiendo el error de la altura del Sol y de las condiciones meteorológicas.

Atendiendo la necesidad de disponer en el país de sensores de radiación solar confiables y de bajo costo, en 1998 se iniciaron actividades tendientes a diseñar y construir en el país este tipo de sensores, aprovechando la experiencia del Departamento Energía Solar de la CNEA en el desarrollo de celdas solares de silicio cristalino. Los primeros radiómetros se realizaron utilizando celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino desarrolladas y fabricadas en el DES de 25 mm de lado (Durán et al., 1998).

Los sensores fotovoltaicos también pueden ser utilizados en satélites artificiales con distintas finalidades, en particular, son ampliamente utilizados como sensores gruesos de posición para el posicionamiento de satélites respecto del Sol. (Bolzi et al. 2013)

2. ELABORACIÓN DE LOS SENSORES

Los sensores fotovoltaicos son básicamente celdas solares diseñadas, fabricadas y ensayadas de acuerdo a la aplicación: terrestre o espacial. El proceso de elaboración de sensores se realiza a partir de obleas de Si monocristalino de origen comercial tipo Czochralski, orientación (100), dopadas con boro, de 300 μm de espesor y con una resistividad de aproximadamente 1 Ωcm y consta de las siguientes etapas:

- ✓ Pulido químico y limpieza de las obleas: elimina los daños producidos por el corte de obleas y restos de solventes y suciedad provenientes del manipuleo.
- ✓ Evaporación de aluminio en la cara posterior: para la formación del emisor p^+ en el siguiente paso.

- ✓ Difusión de fósforo y aluminio: formación simultánea de los emisores frontal n^+ y posterior p^+ en un solo paso en horno de difusión a 950 °C (Basore et al. 1994).
- ✓ Fotolitografía: para transferir el patrón de la máscara de la grilla de contacto a la cara frontal de la celda.
- ✓ Depósito de contactos metálicos: evaporación de multicapa Ti-Pd-Ag en cámara de vacío para la formación de los contactos metálicos frontales (tipo grilla) y posterior completo.
- ✓ Lift-off: eliminación del metal excedente.
- ✓ Engrosado de contactos: electrodeposición química para obtener aproximadamente 6 μm de Al, espesor óptimo requerido para soldadura con aporte.
- ✓ Recocido de contactos: proceso térmico en ambiente de *forming gas* (mezcla de H_2 y N_2) para lograr el sinterizados de los contactos eléctricos.

Una vez obtenidos los sensores solares se procede al corte de los mismos empleando una máquina que permite el corte semi-automático. En la figura 1 se presenta un tipo de sensor fabricado.

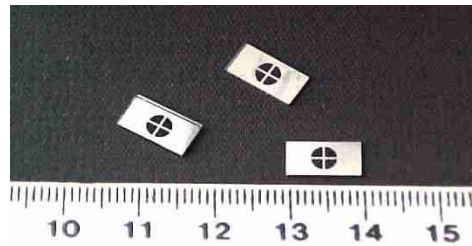


Figura 1 - Sensores FV

2.1 Caracterización eléctrica de los sensores elaborados

La determinación de las características eléctricas de los dispositivos se realiza mediante la determinación de la curva característica corriente-tensión (I-V). Para ello se emplea iluminación artificial, en condiciones especificadas de irradiancia, contenido espectral y temperatura. Para realizar estas mediciones se emplea un simulador solar de estado estacionario *Close match*, marca TS – Space (Manual de simulador solar, 2003), una base termostatzada BP-01 desarrollada en el DES para mantener el sensor a una temperatura controlada, una celda de referencia, un par de puntas de prueba y una carga electrónica que permite poner al sensor en varios puntos de carga (Azzaroni, 1992). Los condiciones de medición varían de acuerdo al uso del sensor y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 - Parámetros de medición de la curva I-V.

	Irradiancia equivalente (W/m^2)	Masa de aire	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
Terrestre	1000	AM1.5	25
Espacial	1367	AM0	28

Las curvas I-V obtenidas a partir de las mediciones de sensores de distintos tamaños se muestran a la Figura 2 y los parámetros característicos se presentan en la Tabla 2. Luego, a partir de los datos obtenidos en las mediciones se realiza una clasificación de los sensores por la corriente de cortocircuito, I_{cc} .

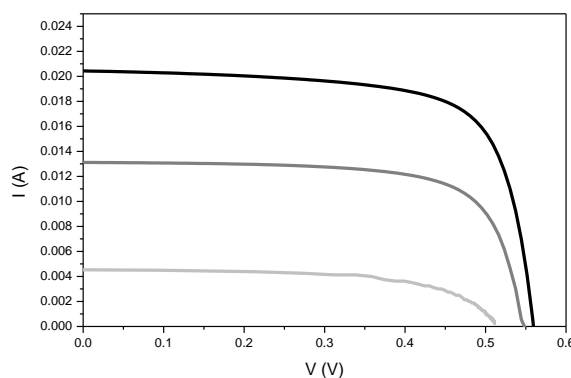


Figura 2 - Curva I-V de sensores FV fabricados con distintas áreas activas.

Tabla 2 - Parámetros promedio característicos de la curva I-V.

	Sensor terrestre	Sensor espacial
Corriente de cortocircuito I_{cc} (mA)	4	18
Tensión de circuito abierto V_{ca} (mV)	450	560
Corriente punto de máxima potencia I_{pmp} (mA)	2,8	11,5
Tensión punto de máxima potencia V_{pmp} (mV)	321	522
Potencia máxima (mW)	0,89	6
FF	0,5	0,6

2.2 Caracterización electrónica de los sensores elaborados

Finalmente a los sensores se le realiza la medición de la curva de respuesta espectral que permite determinar la respuesta de los mismos a las distintas longitudes de onda (Figura 3).

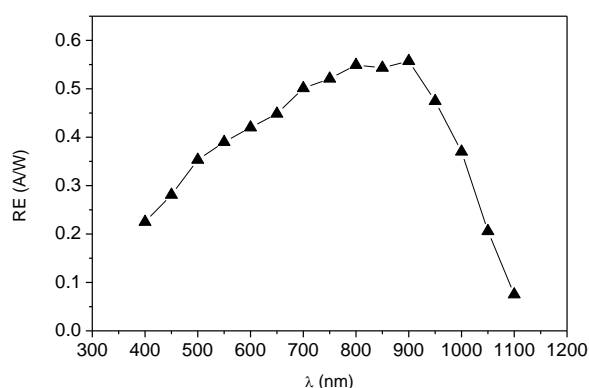


Figura 3 - Respuesta espectral de un sensor fotovoltaico fabricado.

3. SENSORES ESPACIALES

3.1 Antecedentes

El Plan Espacial Nacional elaborado por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) prevé misiones que involucran dos tipos de satélites: de aplicaciones científicas (SAC), y de observación (SAOCOM). Hasta el presente, se han puesto en órbita cuatro satélites del primer tipo: SAC-A, SAC-B, SAC-C y SAC-D éste último puesto en órbita en junio de 2011 hasta junio de 2015 donde el instrumento principal fue el *Aquarius* de la agencia espacial norteamericana (NASA) que permitió generar un mapa de salinidad de los océanos por primera vez desde un satélite. Asimismo, la CONAE ha iniciado el desarrollo de los satélites SAOCOM 1A y 1B en el cual la CNEA tiene una participación relevante a través de los proyectos “Paneles Solares” y “Antena Radar de Apertura Sintética (SAR)”, los que involucran aproximadamente 50 profesionales y técnicos del Centro Atómico Constituyentes (CAC). Estos subproyectos tienen por objetivo realizar actividades de investigación y desarrollo tecnológico que permitan diseñar, fabricar, ensayar y calificar los paneles solares y la antena radar para dichos satélites. La antena SAR es el principal instrumento de la misión mientras que los paneles solares constituyen el componente principal del subsistema de potencia. Tanto en el SAC-A, en el SAC-D como así otras misiones, el DES elaboró los sensores gruesos de posición de acuerdo a los requerimientos de cada misión que pasan a detallarse a continuación.

3.2 Misiones satelitales

Misión SAC-A

El satélite argentino SAC-A, desarrollado por la CONAE y fabricado por la empresa rionegrina estatal Investigaciones Aplicadas Sociedad del Estado (INVAP S.E.) fue puesto en órbita a mediados de diciembre de 1998 a una altura de aproximadamente 410 km (Figura 4). Por tratarse de un satélite experimental, no poseía sistema de propulsión propia que le permitiera corregir la pérdida de velocidad producida por el rozamiento con la atmósfera. Como consecuencia de ello y tal cual estaba previsto, su misión finalizó al cabo de alrededor de 10 meses de su puesta en órbita (Bolzi et al. 2002).



Figura 4 - Satélite SAC-A en el momento de la puesta en órbita

Entre otras experiencias y como parte de un acuerdo de colaboración entre la CNEA y la CONAE, la carga del SAC-A incluyó el primer ensayo de celdas solares argentinas en el espacio (Godfrin et al., 1999). Los dispositivos correspondientes, basados en celdas solares de silicio cristalino fabricadas por el DES de la CNEA (Bolzi et al., 1997), estuvieron asociados a dos objetivos diferentes: estudiar el comportamiento eléctrico de las celdas en el ambiente espacial y utilizar celdas elaboradas en el DES como sensores gruesos de posición (*Coarse Sun Sensor: CSS*). Para cumplir estos objetivos se integraron al satélite:

- a) 2 paneles de 160mm x 70mm, compuestos por 7 celdas solares cada uno (para estudiar el comportamiento de las celdas en el ambiente espacial);
- b) 4 celdas individuales (distribuidas en diferentes caras del satélite) y 1 celda de cada panel (sensores de posición angular).

Para la fabricación de los CSS de la misión SAC-A, se utilizaron celdas cuadradas de 25 mm de lado y 460 mm² de área activa. La elaboración se detalla en la sección siguiente. La estructura de los sensores, así como la de los paneles, constaba de una base de aluminio con una lámina de Kapton®. Sobre esta última se fijaron las celdas solares ya interconectadas, protegidas frontalmente con un vidrio dopado con cerio (Figura 5). El detalle de los procesos de elaboración de las celdas y paneles puede verse en Tamasi, 2003.

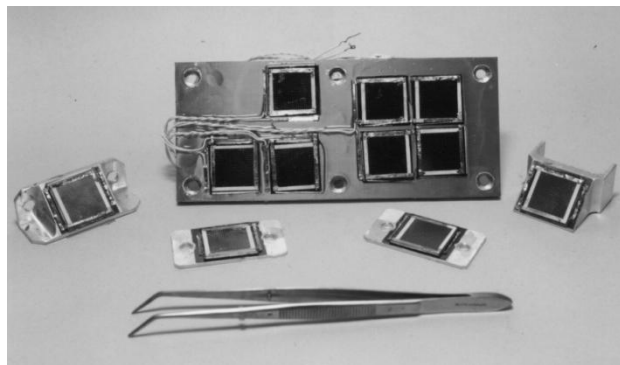


Figura 5 - Panel y sensores gruesos de ingeniería del SAC-A.

Se realizó un análisis de los datos de telemetría correspondientes a las celdas de posicionamiento y a los paneles solares fabricados en el GES e integrados en el satélite SAC-A. Los mismos corresponden al período entre el 15 de enero y el 10 de julio de 1999, en el cual se produjeron órbitas sin y con eclipses. El estudio completo del comportamiento de estos sensores puede verse en las referencias Bolzi et al., 2000 y Godfrin E. Et al., 1999. Los análisis realizados mostraron un correcto funcionamiento de los sensores de posición angular y de todas las celdas incluidas en los paneles de ensayo. Asimismo, los valores de corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto medidos en el espacio, se encontraron en buen acuerdo con las estimaciones teóricas realizadas en base a las mediciones realizadas en Tierra. En los gráficos de la figura 6 se presentan, a modo de ejemplo, la variación diaria de la tensión a circuito abierto (V_{ca}) y de la corriente de cortocircuito (I_{cc}) de una celda de posicionamiento en función del tiempo para días sin y con eclipse, respectivamente.

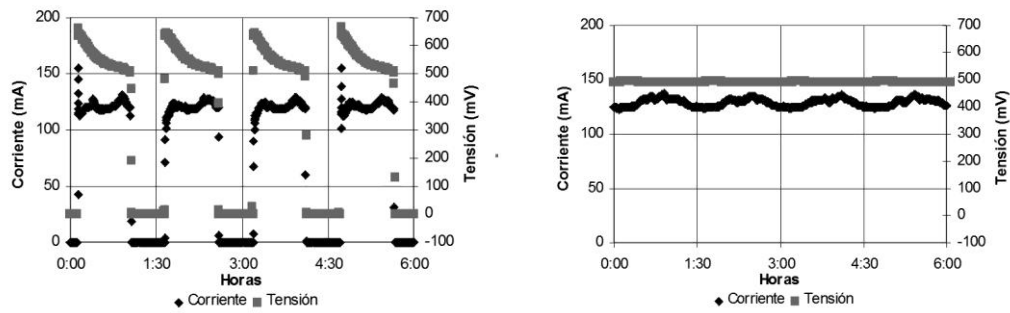


Figura 6 - Variación diaria de I_{cc} y de V_{ca} en función del tiempo para órbitas con y sin eclipse (Godfrin et al. 1999).

Proyecto VS-30

El Proyecto VS-30 fue parte un acuerdo de cooperación espacial entre la Argentina y Brasil, a cargo de la CONAE y la Agencia Espacial Brasileira (AEB) respectivamente. El 16 de diciembre de 2007 culminó exitosamente la Operación Angicos en el Centro de Lanzamiento da Barreira do Inferno (Natal, Brasil) con el lanzamiento del cohete VS-30. El proyecto consistió en el lanzamiento del vector VS-30 de fabricación brasileña, el cual desarrolló un vuelo suborbital que alcanzó una altura de 140 km, llevando a bordo una carga útil argentina de 320 kg de peso y un experimento brasileño de la Universidad Federal do Río Grande do Norte. La carga útil argentina colocada en el cohete consistió en componentes de un Sistema de Navegación, Guiado y Control desarrollados en nuestro país, para su posible utilización en los lanzadores que habrán de colocar en órbita los satélites de la serie SARE del Plan Espacial Nacional. El vuelo del mencionado sistema a bordo del VS-30, significó la posibilidad de probar este nuevo desarrollo espacial argentino en condiciones de microgravedad. La experiencia contribuyó significativamente al diseño de un sistema de Navegación, Guiado y Control definitivo para futuros lanzadores argentinos.

Los sensores gruesos para el Proyecto VS-30 se diseñaron, elaboraron, caracterizaron, clasificaron y encapsularon de acuerdo a los requerimientos de la misión, en cuanto a las características eléctricas y mecánicas. Los mismos se integraron en soportes sobre la estructura del cohete-sonda (Figura 7). Los dispositivos tenían un área activa de alrededor de 5mm^2 y una corriente de 3mA, colocados sobre una base que fue dispuesta sobre la cofia del cohete para su utilización final.



Figura 7 - Cofia del cohete VS-30. Arriba de la faja central se observan dos de los cinco soportes de sensores apareados.

En la Figura 8 se muestran las mediciones realizadas (en Volt debido al sistema de control) de los sensores solares para las fases de ascenso, controlada y de reentrada. Para interpretar este gráfico hay que tener en cuenta que al ser lanzado el cohete tiene un giro sobre su eje vertical, así que puede verse que en el ascenso es notable el efecto del albedo, pero que hacia el final de la propulsión este efecto estaría atenuado por la mayor altitud y el oscurecimiento debido a la pintura de la ojiva depositada en las superficies de las celdas, lo que hace cercano a cero la señal en los valles o picos secundarios. (Documento interno CONAE, 2008).

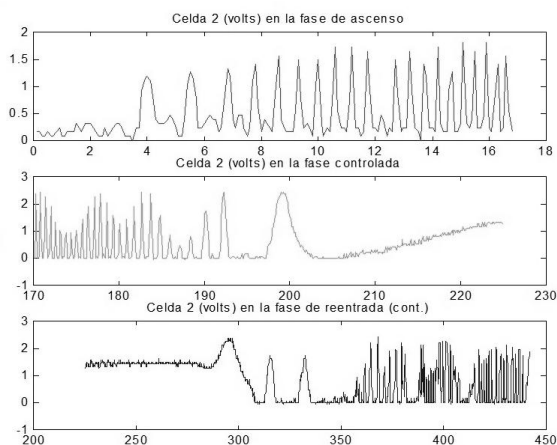


Figura 8 - Datos del sensor 2 (en Volt) durante la fase de ascenso, controlada y de reentrada. (Documento interno CONAE, 2008).

Misión Aquarius/SAC-D

El objetivo científico de la misión Aquarius/SAC-D está orientado a obtener nueva información climática a partir de las mediciones de salinidad y una nueva visión de la circulación y procesos de mezcla en el océano, así como detectar focos de alta temperatura en la superficie terrestre para la obtención de mapas de riesgo de incendios y humedad del suelo para alerta temprana de inundaciones. El desarrollo de los sensores solares gruesos forma parte del Subproyecto Paneles Solares como parte del proyecto Aquarius/SAC-D que se encuentra enmarcado dentro del convenio CNEA-CONAE para el desarrollo, integración y ensayo de paneles solares para misiones satelitales (Alurralde et al. 2010).

En base a los requerimientos de tamaño y de corriente de cortocircuito (entre 14 y 20 mA) de los sensores gruesos de posición se diseñaron y fabricaron dispositivos cuadrados de 12mm de lado. El área activa del dispositivo es circular de 50 mm² (8 mm de diámetro). Con el fin de definir de manera precisa y repetitiva se confeccionaron máscaras para la fotolitografía con 6 dedos metálicos dispuestos en forma radial con un ancho de 100 µm. En esta ocasión las máscaras fueron diseñadas para fabricar los sensores de forma menos artesanal y cortar los sensores con la máquina de corte de obleas disponible en CNEA. De esta forma se pudieron elaborar gran cantidad de sensores para su posterior selección y ensayos. En la Figura 9 se muestra el sensor ya montado en el soporte que está integrado al panel de vuelo.



Figura 9 - Sensor de posición integrado al panel de vuelo del SAC-D.

El SAC-D fue lanzado el 10 de junio de 2011 y se encuentra en perfecto estado de funcionamiento. A modo de ejemplo se muestran los datos de telemetría de todos los sensores dos años después de su lanzamiento en la Figura 10. La reducción a cero de la señal de todos los sensores indica la entrada del satélite en eclipse.

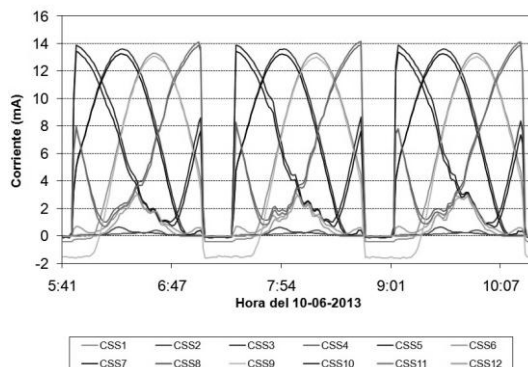


Figura 10 - Datos de telemetría de los sensores (CSS1 a CSS12) del SAC-D del día 10 de junio de 2013.

SNCS Project

Como consecuencia de la experiencia y los éxitos obtenidos con estos sensores de posición, el DES firmó un convenio con INVAP S.E. para la provisión de un conjunto de sensores solares gruesos de Si cristalino. Los mencionados sensores forman parte del denominado Proyecto Navigation, Control & Supervision System (SNCS) de un satélite brasileño de observación de la Tierra: Amazonia-1. Los sensores solares gruesos de la misión SNCS Project se diseñaron a acuerdo al requerimiento de peso ($< 20\text{g}$) y de corriente de cortocircuito ($15 \pm 0,75$ mA). En la Figura 11 se presenta el CSS terminado en su base-soporte. Estos sensores así como los del SAC-D fueron calificados para vuelo realizándoles ensayos de calificación y de aceptación.

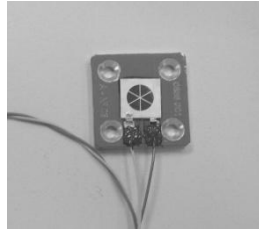


Figura 11 - CSS montado en el soporte para el Amazonia-1.

Misión SAOCOM 1A

En base a los requerimientos de la misión satelital SAOCOM 1A se diseñaron y construyeron los sensores gruesos de posición. Estos sensores fueron diseñados y fabricados *ad hoc*, adaptándose a los requerimientos de esta misión. Se destinaron a este satélite 12 sensores que fueron integrados en una base similar a la utilizada para el Amazonia 1 mostrada en la Figura 11. Estos sensores están siendo ensayados junto con los paneles de vuelo y el satélite en las instalaciones de INVAP S.E. en la ciudad de San Carlos de Bariloche, provincia de Río Negro, Argentina. Hasta el momento estos ensayos fueron aprobados con éxito.

3.3 Integración de los sensores

El proceso de elaboración de los sensores solares gruesos es básicamente similar a los demás dispositivos fabricados y explicado en la sección 2. El detalle de todos los ensayos y procesos de estos sensores se pueden ver en la referencia Tamasi et al. 2009. La fabricación del conjunto (CSS montado en la base-soporte) consta de las siguientes etapas (Documento interno CNEA, 2009):

- Soldadura de los interconectores frontal y posterior de Kovar® plateado de 30 μm de espesor
- Pegado del vidrio de protección de 100 μm de espesor
- Medición de la curva corriente-tensión del conjunto sensor con interconectores + vidrio
- Inspección visual del conjunto
- Pegado de los colectores de Kovar® y sensores a la base de aluminio
- Soldadura de los cables e interconectores a los colectores
- Pegado de los cables a la base o soporte
- Cobertura de la soldadura
- Ensayo de tracción de los cables
- Inspección final: medición eléctrica e inspección visual

3.3 Ensayos de calificación

Ensayos mecánicos

Después de la fabricación de los sensores y antes de su integración se realizan ensayos mecánicos sobre los contactos metálicos para cada lote de sensores fabricados. Cabe destacar que la selección del número de sensores a ensayar se realiza por muestreo estadístico de acuerdo al nivel de calidad aceptable (AQL) requerido. El ensayo consiste en someter a las soldaduras a pruebas mecánicas de tracción a 45° . La carga para superar el ensayo debe ser de 500 g, dicho valor está en buen acuerdo con lo reportado por el fabricante de celdas solares espaciales (Emcore Photovoltaics, 2005).

Ensayos de vibraciones

El momento más crítico en la puesta en órbita de un satélite es el lanzamiento debido a las vibraciones que se producen en el mismo por lo tanto deben realizarse ensayos de vibraciones según el requerimiento de cada misión. En el Centro Atómico Constituyentes se cuenta con el equipamiento necesario para realizar este tipo de ensayos y cumplir

con los requerimientos (Technical report CNEA, 2009). En la Figura 12-a se presenta el equipo para realizar estos ensayos mecánicos de vibraciones sobre distintos dispositivos y en particular, los sensores solares.

Ensayo de termo-vacío

El DES posee distintos equipos para la realización de ensayos de ciclado térmico. Uno de los equipos puede realizar ciclados en vacío. La cámara donde se realizan los ciclados está conectada a una bomba de alto vacío, el soporte se compone de una placa de aluminio que contiene un calentador resistivo 300 W y una placa de cobre soldada a un tubo de cobre de refrigeración diseñado para la operación con nitrógeno líquido. Este sistema permite el funcionamiento en alto vacío, dentro de un rango de temperatura ajustable de al menos $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 12-b). (Tamasi et al. 2009).

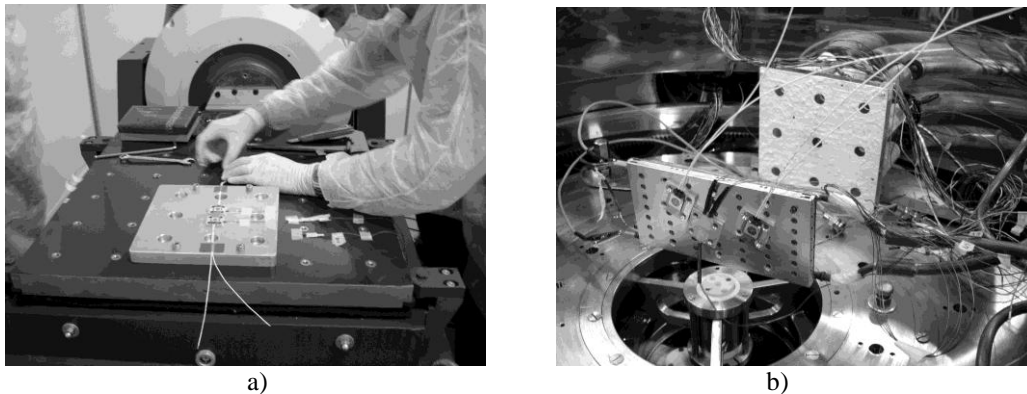


Figura 12 - a) Equipo de vibraciones mecánicas, b) Ensayo de temovacío

Ensayo de daño por radiación

Un satélite en órbitas bajas (LEO) está sometido a ciclados térmicos típicamente entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y recibe radiación de protones isotrópica con energías entre los keV y cientos de MeV entre otras partículas. Para simular este ambiente se estudia la degradación de los parámetros eléctricos y electrónicos de celdas solares de silicio cristalino bajo los efectos de la irradiación con protones o electrones. En el CAC de la CNEA se dispone de las instalaciones y equipamiento necesarios para la realización de irradiaciones con protones, lo que facilita la realización del experimento debido a que en general estos ensayos son muy costosos.

Una de las cámaras que posee el DES permite el ciclado térmico de la muestra entre -100°C y 100°C y a su vez irradiar con un haz de protones con distintos ángulos de incidencia. Este equipo incluye el simulador solar para iluminar las muestras y medir *in-situ* las curvas I-V de las muestras y así evaluar los efectos de la degradación. Otra de las posibles variantes es la modificación rápida del haz de energía que permite simular un espectro de energías así como también se puede desenfocar el haz para obtener una irradiación uniforme (Tamasi et al. 2009).

4. SENSORES TERRESTRES

Los sensores para aplicaciones terrestres, radiómetros o solarímetros constan de una base de aluminio, sobre la cual se monta el elemento sensor protegido por una cubierta de vidrio difusor sellado en su periferia. 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.

Como se ha mencionado, el elemento sensor es una celda fotovoltaica de silicio monocristalino diseñada y fabricada por el DES de la CNEA (Bolzi et al., 1997), en particular estos sensores tienen un área activa de $0,13\text{ cm}^2$. La salida eléctrica de los dispositivos es una salida de tensión del orden de los milivolts y dentro del intervalo de error, lineal con la radiación solar. En la figura 13 se muestra el instrumento terminado.



Figura 13 - Solarímetro fotovoltaico desarrollado por el DES.

Las mediciones de la respuesta del solarímetro respecto al ángulo de incidencia se realizaron en laboratorio para tener un mayor control sobre las condiciones de iluminación. Para esto, se construyó un colimador que, adosado a una lámpara de tungsteno de 50W con reflector dicróico, permitió tener un haz de luz con una abertura angular máxima de 3°. Asimismo, se construyó un soporte que permite variar el ángulo de incidencia a intervalos de 5° desde -90° a +90° (Figura 14).

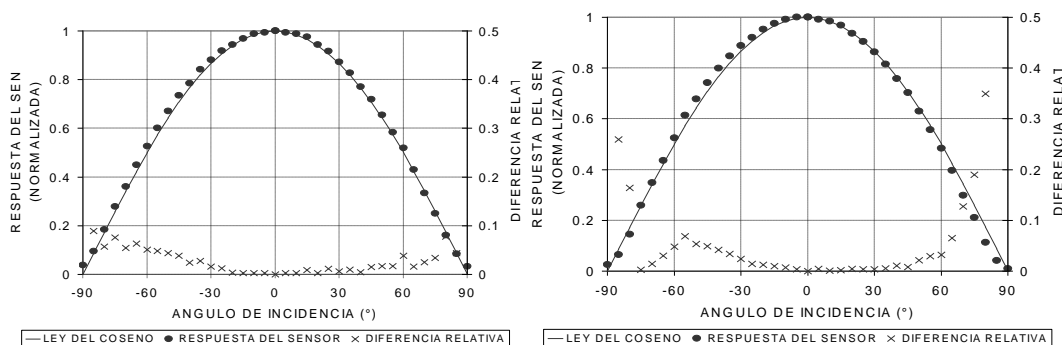


Figura 14 - Respuesta angular de los solarímetros con difusor (izquierda) y sin difusor (derecha) en función del ángulo de incidencia comparada con la dependencia del coseno del ángulo

Los primeros prototipos fueron calibrados por la Red Solarimétrica del Servicio Meteorológico Nacional y actualmente es realizada en el Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) de la Universidad Nacional de Luján. Para esto se siguen los procedimientos habituales en estos casos: se toman en campo simultáneamente lecturas instantáneas del piranómetro termoelectrico utilizado como patrón secundario (marca EPPLEY modelo PSP) y del solarímetro fotovoltaico. Para obtener la constante media de calibración del sensor se calculan las integrales diarias registradas por ambos sensores y se las correlaciona linealmente. En la Tabla 3 y en la Figura 15 se muestran los resultados de dos de los solarímetros fabricados.

Tabla 1. Resultados de la calibración de los radiómetros.

Radiómetro con sensor A4	Radiómetro con sensor C17
Cte. = $13,6 \times 10^{-6} \text{ V / W m}^{-2} (\pm 2,8\%)$	Cte. = $15,0 \times 10^{-6} \text{ V / W m}^{-2} (\pm 3,5\%)$

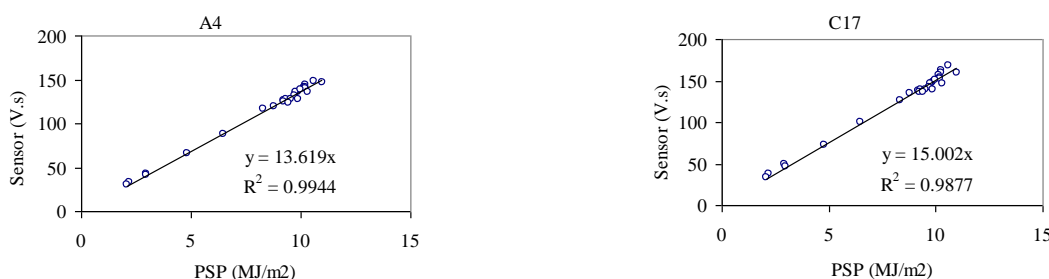


Figura 15 - Curvas de calibración de los radiómetros fotovoltaicos.

Como ensayo en condiciones reales de utilización algunos de estos radiómetros han sido distribuidos a distintos grupos de investigación de Argentina desde hace más de dos años. Algunos de los ensayos de los radiómetros están siendo realizados en condiciones reales de operación en ambientes adversos (alta radiación UV, gran amplitud térmica, etc.), con es el caso de la región de la Puna en el Norte Argentino. Para ello se cuenta en el equipo de trabajo con la colaboración de investigadores de la Universidad Nacional de Salta (Figura 16). Además, se ha instalado un radiómetro en el laboratorio del International Center of Earth Science (ICES) situado en la cadena montañosa del volcán Peteroa (Figura 17).



Figura 16 - Radiómetro en Iruya, Salta.



Figura 17 - Radiómetro en la base de Volcán Peteroa, Mendoza.

Dos de estos instrumentos de radiación global fueron instalados en la Base Marambio en la Antártida Argentina. Uno de ellos está acoplado con un sistema fotovoltaico del proyecto IRESUD (proyecto cuya finalidad es introducir en el país tecnologías asociadas con la interconexión a la red eléctrica, www.iresud.com.ar), y otro en posición horizontal. Estos radiómetros se encuentran acoplados al sistema fotovoltaico instalado allí por dicho proyecto y mide la radiación solar para poder evaluar el recurso y el instrumento en condiciones extremas. (Figura 18)



Figura 18 - Imágenes de los radiómetros instalados en la Base Marambio, Antártida Argentina.

5. CONCLUSIONES

La experiencia adquirida a lo largo de los años en la investigación y en el desarrollo de celdas solares de silicio y paneles solares para uso satelital permitió desarrollar sensores solares adaptados a distintos usos y según los requerimientos tanto en características eléctricas como en tamaño o diseño.

Estos dispositivos en cuanto a su uso espacial poseen varias ventajas respecto de otros sensores que se consiguen comercialmente: se pueden diseñar según los requerimientos en corriente y tamaño de cada misión satelital; en particular al estar integrados sobre una base y no dentro de ella permiten que el campo visual del sensor sea prácticamente de 180° y al tener un área activa circular, la respuesta es simétrica respecto su ángulo azimutal. Los sensores solares convencionales comerciales tienen masas de por lo menos cientos de gramos, otra ventaja de estos sensores desarrollados en CNEA es su bajo peso ya que pueden integrarse tanto sobre una base de aluminio como directamente sobre el panel. En particular esto es muy importante si se quieren utilizar en satélites de pequeños tamaños o nanosatélites.

Las celdas solares de silicio cristalino modificadas para su uso como sensores de radiación solar representan una alternativa viable y de bajo costo para la realización de mediciones solarimétricas. En base a los resultados obtenidos puede afirmarse que el solarímetro fotovoltaico de bajo costo desarrollado por la CNEA muestra un comportamiento comparable a otros ya comercializados en el exterior, lo cual constituye una alternativa interesante para estudios de aprovechamiento de la radiación solar que no requieran demasiada precisión.

Agradecimientos

Los autores dedican este trabajo a la memoria de Cristián Bruno. Agradecen, además, a todos los integrantes del DES que participaron en el desarrollo de los sensores, el apoyo de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales

(CONAE) y de INVAP S.E. a través de los distintos proyectos y al excelente grupo de colegas del GERSolar y en particular a Hugo Grossi Gallegos quien fue el promotor de los radiómetros de uso terrestres.

REFERENCIAS

- Alurralde M. A.; Barrera M.; Bolzi C.G.; Bruno C.J.; Cabot P.; Carella E.; Di Santo J.; Duran J. C.; Fernández Vázquez J.; Godfrin E.M.; Goldbeck V.; Gonzalez L.; Martínez Bogado M. G.; Mezzabolta E.; Moglioni A.; Muñoz S.; Olima J.M.; Pla; Raffo Calderón M.C.; Raggio D.; Rinaldi C.; Rodríguez S.E.; Socolovsky H. P.; Tamasi M. J. L., 2010. Integración y ensayos de los paneles solares de vuelo para la misión satelital Aquarius/SAC-D. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 14, pp. 449 - 455.
- Azzaroni G., Bruno C., Dawidowsky L., Frigerio A., 1992. Photovoltaic characterization facilities development. Proceedings Workshop on Materials Science and Physics of Non-Conventional Energy Sources, Buenos Aires, Argentina.
- Basore P.A., Gee J.M., Buck M.E., Schubert W.K. y Ruby D.S., 1994. Simplified high-efficiency silicon cell processing. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 34, n. 1-4, pp. 91-100.
- Bolzi C.G., Merino L.M., Tamasi M.J.L., Plá J.C., Durán J.C., Bruno C.J., Godfrin E.M., Lamagna A., Barrera M.P. y Quintero L.B., 1997. Elaboración y caracterización de celdas y paneles solares de silicio cristalino para su ensayo en el satélite SAC-A. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 1, n. 2, pp. 1-4.
- Bolzi C.G., Bruno C.J., Godfrin E.M., Martínez Bogado M.G., Merino L.M., Plá J.C., Tamasi M.J.L., Durán J.C., 2000. Primera experiencia de celdas solares argentinas en el espacio: elaboración, caracterización y análisis de datos de telemetría del satélite SAC-A. Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 8, pp. 1-4.
- 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 satellites. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 73, n. 3, pp. 269-272.
- Bolzi C.; Martínez Bogado M. G.; Tamasi M. J. L.. Reseña del Desarrollo de Sensores Solares en CNEA para Misiones Satelitales. Energías Renovables y Medio Ambiente Vol 31, 2013, pp. 29-36.
- Documento interno CONAE 2008, Reporte de datos de control.
- Documento Interno CNEA (2009): Plan de fabricación, inspecciones y ensayos de sensores solares gruesos. CAC-PSE-CSS-00200A-PR. Proyecto CSS/INVAP O/E 434107.
- Durán J.C., Bolzi C.G., Godfrin E.M., Plá J.C., Merino L.M., Bruno C. J. y Tamasi M.J.L., 1998. Fabricación de radiómetros de bajo costo en la Argentina. Algunas propuestas teóricas y primeras experiencias. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 2 (2), 5.9-5.12.
- Emcore Photovoltaics, 2005.
- Godfrin E.M., Martínez Bogado M.G., Tamasi M.J.L., Durán J.C., 1999. Primera experiencia de celdas solares argentinas en el espacio: análisis preliminar de los resultados. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol 3, pp. 04.25-04.28.
- Manual del simulador solar, 2003. Documento suministrado por TS-Space.
- Tamasi M.J.L., 2003. Celdas solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización. Tesis de Doctorado en Ciencia y Tecnología – Mención Física, Instituto de Tecnología “Profesor Jorge A. Sábato”, Universidad Nacional de General San Martín, Argentina.
- 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, vol. 23, pp. 19-26.
- Technical report CNEA, 2009. Qualification vibration tests on SNCS coarse solar sensor, IN-13-E-126-EE/09 (2010). Documento clasificado. Gerencia de Área Energía Nuclear U.A. Ensayos No Destructivos y Estructurales, Grupo Estudio y Ensayo de Componentes Estructurales (CNEA-CAC).

SENSORS SOLAR DEVELOPMENT IN ARGENTINA, GROUND- AND SPACE APPLICATIONS

Abstract. In the year 1998 there began in the National Atomic Energy Commission (CNEA) the development of low cost photovoltaic radiometers using a small crystalline silicon cells as sensor element. This development was performed in the Solar Energy Department (Photovoltaic Laboratory) at Constituents Atomic Center. Different sensors prototypes were designed, elaborated and calibrated in order to analyze their behavior and to evaluate its limitations. At present, commercial prototypes have been distributed in different specialized laboratories throughout Argentina for his final evaluation in field.

These radiometers are used for terrestrial and space applications in artificial satellites. In particular, the first experiment of solar Argentine cells in the space, on board of the SAC-A satellite, had included the manufacture of the positioning sensors as part of the satellite orientation system with regard to the Sun. The development and current state of these sensors and their application in terrestrial and space projects are presented.

Keywords: Radiation sensors, terrestrial applications, space application, elaboration, characterization