

Desarrollo de Sensores Fotovoltaicos de Radiación Solar para Aplicaciones Terrestres y Espaciales

Mariana J.L. Tamasi^{1,2}, Mónica G. Martínez Bogado^{1,2}, Claudio G. Bolzi¹, Martha Díaz Salazar^{1,2}, Javier Fernández Vázquez¹, Nadia Kondratiuk^{1,2}, Analía Moreno^{1,2}, Juan I. Pérez¹, José M. Olima¹, Daniel Raggio¹, Raul Righini^{1,3}

1- Departamento Energía Solar.

Gerencia Investigación y Aplicaciones – CAC-CNEA

2- Instituto de Nanociencia y Nanotecnología - CNEA-CONICET

3- GERSolar, División Física, Departamento Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján

Contacto: tamasi@tandar.cnea.gov



RESUMEN

En el año 1995 se inició en la Comisión Nacional de Energía Atómica el desarrollo de sensores fotovoltaicos para distintas aplicaciones, desde radiómetros para medición de radiación global hasta sensores de posición satelital. El elemento sensor es un dispositivo fotovoltaico de silicio monocristalino fabricado en el Departamento Energía Solar del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA. Este trabajo dio lugar a un PDTs cuyo objetivo fue continuar con el diseño, fabricación, ensayos e integración de sensores adaptados a las necesidades de distintos usuarios. Además de los sensores espaciales para las misiones SAOCOM 1A, 1B y SABIA-Mar, surgieron radiómetros de radiación PAR, radiómetros sumergibles y el comienzo del desarrollo de instrumentos para medición de radiación UV, índice NDVI y sensores solares finos. En este artículo se presentan los desarrollos llevados a cabo en este PDTs.

ABSTRACT

In 1995, the National Atomic Energy Commission began to develop photovoltaic sensors for different applications, from radiometers for measuring global radiation to satellite position sensors. The sensor element is a monocrystalline silicon photovoltaic device manufactured in the Solar Energy Department of the CNEA Constituyentes Atomic Center. This work gave rise to a PDTs whose objective was to continue with the design, manufacture, testing and integration of sensors adapted to the needs of different users, emerging in addition to the space sensors for the SAOCOM 1A, 1B and SABIA-Mar missions, radiometers of PAR radiation, submersible radiometers and the beginning of the development of instruments for measuring UV radiation, NDVI index and fine solar sensors. This article presents the developments carried out in this PDTs.

INTRODUCCIÓN

En el año 1995, el entonces Grupo Energía Solar (GES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), comenzó a trabajar en el desarrollo de sensores de radiación terrestre aprovechando la experiencia en la fabricación de celdas solares de silicio cristalino y atendiendo la necesidad de disponer en el país de dispositivos confiables y de bajo costo. A partir del año 1997, el GES, hoy Departamento Energía Solar (DES), trabaja en el desarrollo de celdas y sensores de silicio para aplicaciones espaciales [1] así como, en el desarrollo de paneles solares para distintas misiones satelitales argentinas [2], [3].

Durante estos años se realizaron distintos trabajos de investigación y tesis de doctorado que sentaron las bases para el desarrollo de distintos dispositivos fotovoltaicos con diversas aplicaciones. Desde 2014 a 2018 se presentó un Proyecto de Desarrollo Tecnológico y Social (PDTs), cuyos avances y resultados se presentan en este artículo. El mismo fue acreditado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, e Innovación Productiva (MIN-CyT) con el código PCTI-143. Las instituciones ejecutoras fueron la CNEA, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Universidad Nacional de Luján. Participaron como instituciones adoptantes la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), la CNEA y el Convenio Asociativo Público-Privado (CAPP) IRESUD, Proyecto "Interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos" (FITS Energía Solar Nr. 008-2010).

La base de los productos a generar fueron sensores de radiación de silicio. Estos dispositivos electrónicos tienen una salida eléctrica en corriente directamente proporcional a la irradiancia recibida. La fabricación de estos sensores y su adecuación mediante distintos encapsulados, la modificación de su respuesta espectral y/o su acoplamiento a un sistema de adquisición de datos, pueden generar distintos instrumentos: sensores de radiación solar global, de radiación solar fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés), de radiación ultravioleta (UV), para medición del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) y sumergibles.

En cuanto a las aplicaciones espaciales, la posibilidad de elaborar sensores de posición, permite adaptar los dispositivos, mediante el diseño, a los requerimientos de distintas misiones espaciales con satélites LEO, GEO o nanosatélites y así, ofrecerlos a otros países, tal como los desarrollados en el año 2009 que fueron parte del sistema del control de actitud, desarrollado por INVAP, del satélite brasileño Amazonia-1. Por último, los instrumentos desarrollados podrán sustituir importaciones redu-

ciendo costos utilizando tecnología nacional.

Si bien la tecnología de fabricación de dispositivos fotovoltaicos es una tecnología bien conocida, la importancia del proyecto presentado radica en fortalecer y completar la tecnología adquirida en nuestros laboratorios para poder adaptarla a los distintos requerimientos de los adoptantes de estos instrumentos, ya sea espaciales o terrestres. Asimismo, la versatilidad y adaptación a distintos usos, los ensayos de campo y la calificación de los dispositivos, abre más posibilidades para adaptarlos a otros usos.

SENSORES DE USO ESPACIAL

Detectar la presencia y/o la posición del Sol relativa a un satélite es de gran importancia en la mayoría de las misiones espaciales. Generalmente se utiliza una combinación de sensores inerciales y de referencia como parte del control de actitud de un satélite y entre ellos, se encuentran los sensores solares gruesos (CSS) y los sensores solares finos (FSS).

Los CSS realizan una medición indirecta de la posición del Sol a partir de la ley del coseno o respuesta angular, que relaciona la corriente de cortocircuito (I_{cc}) de los sensores con el ángulo de incidencia de la radiación, $I(\theta) = I(0) \cos \theta$. Con este principio de medición se puede obtener información de actitud en un eje. Estos sensores se utilizan en grandes cantidades, colocados en las diferentes caras del satélite para maximizar el campo visual. Los CSS son de especial importancia durante el estado en modo seguro de un satélite, que se activa únicamente en situaciones críticas, entre otras cosas, para proteger instrumentos que sean sensibles a la radiación directa del Sol [4].

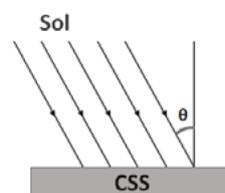


Figura 1: Esquema del funcionamiento de un sensor solar grueso.

Antecedentes

El Plan Espacial Nacional prevé misiones que involucran dos tipos de satélites: de aplicaciones científicas y de observación. Hasta el presente, se han puesto en órbita cuatro satélites del primer tipo: SAC-A, SAC-B, SAC-C y SAC-D. Este último puesto en órbita en junio de 2011, donde el instrumento

principal es el Aquarius de la agencia espacial norteamericana (NASA) que permitió generar un mapa de salinidad de los océanos por primera vez desde un satélite. En la Figura 2 puede observarse un sensor CSS desarrollado en el DES integrado en el satélite SAC-D.

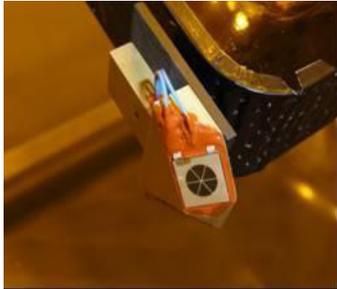


Figura 2: Sensor de posición integrado al panel de vuelo del SAC-D.

A modo de ejemplo en la Figura 3, se muestran los datos de telemetría de todos los sensores del SAC-D dos años después de su lanzamiento. La reducción a cero de la señal de todos los sensores indica la entrada del satélite en eclipse.

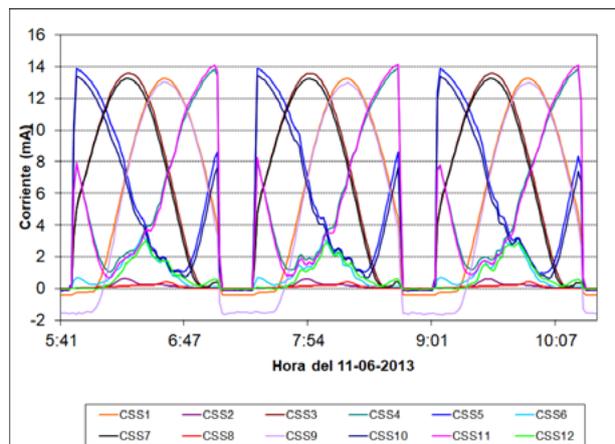


Figura 3: Datos de telemetría de los sensores (CSS1 a CSS12) del SAC-D del día 10 de junio de 2013.

Asimismo, en 2018 y 2020 los satélites SAO-COM 1A y 1B fueron puestos en órbita y actualmente envían información acerca de la medición de la humedad del suelo y aplicaciones en emergencias, tales como detección de derrames de hidrocarburos en el mar y seguimiento de la cobertura de agua durante inundaciones. En la Figura 4 pueden observarse 2 de los 12 sensores CSS dispuestos en el satélite SAOCOM 1A.

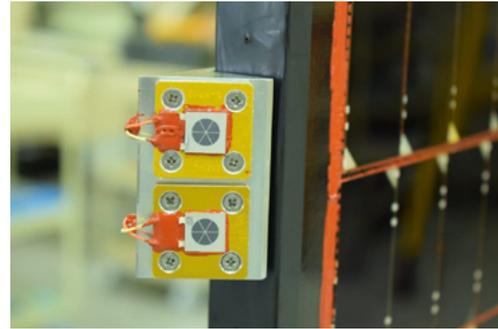


Figura 4: Sensores solares gruesos montados en el panel solar del SAOCOM 1A.

Integración y ensayos

La grilla frontal y el área activa de los sensores fabricados en CNEA se diseñaron según la corriente requerida en cada misión. Se pudo así ajustar la señal del dispositivo a las necesidades de cada misión. En general, el área activa del sensor es circular lo cual le da simetría en la respuesta respecto al ángulo azimutal.

Los sensores gruesos se elaboraron a partir de obleas de Si monocristalino de origen comercial tipo Czochralski, dopadas con boro y con una resistividad de aproximadamente 1 Ωcm . Su estructura n^+pp^+ se logra a partir de una codifusión de fósforo y aluminio [5] en un horno de difusión a 950°C, obteniéndose una resistencia de capa en la cara frontal de aproximadamente 50-70 Ω/cuad . Los contactos metálicos frontales (tipo grilla) y posterior completo están formados por una multicapa de Ti-Pd-Ag.

El proceso de fabricación del conjunto (CSS montado en la base-soporte) consta de las siguientes etapas:

- 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

Caracterización eléctrica y electrónica

Curva corriente-tensión (I-V)

Para la medición de la curva tensión corriente (I-V)

de celdas solares y sensores de radiación en condiciones controladas se dispone de un simulador solar de estado estacionario de alta fidelidad "Close-match" TS-Space con espectro AM0 e irradiancia equivalente a 1367 W/m^2 normalizadas y una carga electrónica. Para el control de la temperatura del dispositivo a medir, se diseñó y construyó una base que utiliza el efecto Peltier, controlada electrónicamente y que trabaja en el intervalo de temperaturas cercanas a la normalizada (28 ± 1) °C. De la curva I-V se extraen los datos eléctricos de los sensores, en particular la corriente de cortocircuito (I_{cc}), además se pueden obtener la tensión a circuito abierto (V_{ca}), el factor de forma (FF) y el punto de máxima potencia (P_{max}).

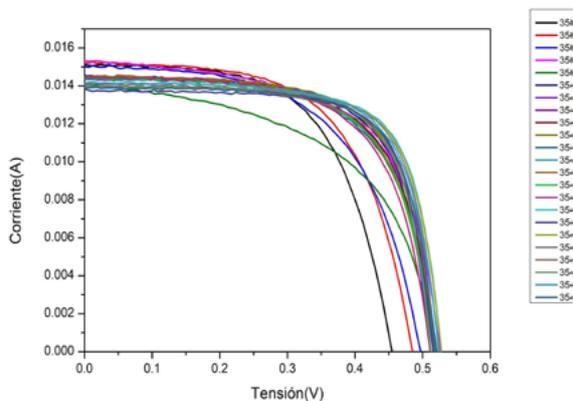


Figura 5: Curvas I-V de un lote de sensores de una misma difusión.

Respuesta espectral

Para la medición de la respuesta espectral se emplea un equipo diseñado y fabricado en el DES que cumple con la Norma IRAM Argentina 210013-14 y la ASTM N° E 297. El equipo permite caracterizar celdas y sensores solares de silicio y ha sido modificado para medir celdas solares III-V multijuntura de estructura monolítica [6].

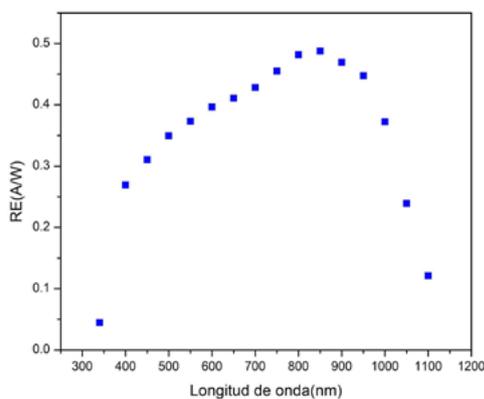


Figura 6: Respuesta espectral de un sensor de silicio.

Respuesta angular

Otra de las caracterizaciones importantes, en cuanto a lo que significa un sensor de posición, es el ángulo de visión o campo visual y la respuesta angular. La primera característica representa el ángulo que el dispositivo puede sensar, en el caso de estos sensores debido a que el diseño particular que poseen el campo visual es casi 180° , ya que 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.

La respuesta angular se establece como la variación de la I_{cc} en función del ángulo de incidencia. Se muestra a modo de ejemplo, la caracterización de un sensor para ángulos entre 0° y 90° en ambos sentidos para una temperatura fija. En la Figura 7 se detalla la variación de la I_{cc} con el ángulo para una irradiancia de 1367 W/m^2 a una temperatura de 20° C .

Se caracteriza además, la simetría del sensor con mediciones al variar el ángulo azimutal para cada posición del ángulo de inclinación. Esto, a su vez, proporciona una estimación del error de la respuesta para cada uno de los ángulos de inclinación.

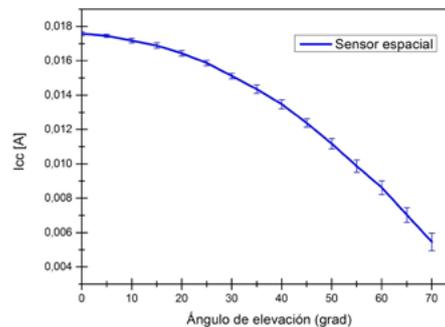


Figura 7: Respuesta angular de un sensor espacial y la desviación debido a la simetría.

Ensayos mecánicos

Después de la fabricación de los sensores y antes de su integración, se realizan ensayos de tracción 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 con el nivel de calidad aceptable (AQL, por sus siglas en inglés) requerido. El ensayo consiste en someter a las soldaduras a pruebas de tracción a 45° . La carga para superar el ensayo debe ser de 500 gramos. Dicho valor está en buen acuerdo con lo reportado por el fabricante de celdas solares espaciales [7].

Los sensores también se someten a un ensayo de ciclado térmico. Este ensayo se realiza en atmósfera de nitrógeno, en un equipo desarrollado

por el DES que consiste en someter a los sensores a ciclos de temperatura entre $\pm 100^{\circ}\text{C}$ a presión atmosférica, para simular las condiciones ambientales que experimentarán durante la órbita.

SENSORES DE USO TERRESTRE

La medición de la energía proveniente del Sol se considera necesaria, entre otras cosas, para:

- estudiar el impacto que los cambios en los niveles de radiación tienen sobre las condiciones climáticas debido a las variaciones periódicas o anómalas. Variaciones en la nubosidad, en la cantidad de partículas en suspensión en la atmósfera y en el agua que se puede precipitar, se verían inmediatamente reflejadas en la radiación medida,
- determinar la influencia que la radiación solar a nivel de superficie tiene en el rendimiento de cosechas,
- estudiar el balance energético o el crecimiento de un cultivo particular,
- evaluar la evapotranspiración potencial del suelo y determinar así su estado hídrico (agua disponible y necesidad de riego),
- planificar el secado de productos vegetales con mayor eficiencia y
- diseñar adecuadamente y monitorear sistemas fotovoltaicos.
- alertar de manera temprana sobre los efectos negativos que una prolongada exposición a la radiación ultravioleta puede implicar sobre la salud humana.

Los primeros radiómetros se realizaron utilizando celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino desarrolladas y fabricadas en el DES de 25 mm de lado [8]. Desde entonces se ha ido modificando su diseño y adecuándolos a las necesidades de los usuarios. Es así como se adaptaron los sensores de radiación global a necesidades específicas, tales como la medición de la radiación PAR, la radiación UV y se están realizando las adecuaciones para tener un primer prototipo de radiómetro para medir el índice de vegetación NDVI.

Radiómetros para medición de radiación global

Los sensores para aplicaciones terrestres desarrollados, denominados 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 [9]. 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 8 se muestra el instrumento terminado.

Como ensayo en condiciones reales de utilización, algunos de estos radiómetros han sido distribuidos a distintos grupos de investigación de Argentina desde hace varios 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.), como es el caso de la región de la Puna en el Norte Argentino. Además, se ha instalado un radiómetro en el laboratorio del International Center of Earth Science (ICES) situado en la cadena montañosa del volcán Peteroa. 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. Todos estos instrumentos fueron instalados en el marco del PDTs presentado.



Figura 8: Radiómetro desarrollado en el DES.

Radiómetros PAR

Para estudiar el balance energético o el crecimiento de un cultivo particular, si bien puede disponerse en general del dato de radiación global (medida o estimada), no es frecuente contar con valores de radiación fotosintéticamente activa (PAR), la que puede ser definida como la fracción del espectro solar comprendida entre 400 y 700 nm. Por ello, se desarrollaron radiómetros para la medición de la radiación PAR. Para esto, se trabajó paralelamente en el uso de filtros comerciales y el desarrollo de procesos para la fabricación de multicapas dieléctricas, tanto sobre el sensor como en las cubiertas

para limitar la respuesta espectral.

Como primera aproximación se calculó la respuesta espectral que tendría un radiómetro PAR utilizando un filtro comercial. La misma se obtuvo a partir de la respuesta espectral medida de un sensor de silicio y la transmitancia del filtro. Los primeros prototipos desarrollados con filtro comercial se calibraron en el Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) de la Universidad Nacional de Luján y son utilizados por organismo nacionales públicos y privados. Estos radiómetros son constructivamente similares a los de radiación global al que se le adiciona filtro óptico que recorta su respuesta espectral [10].

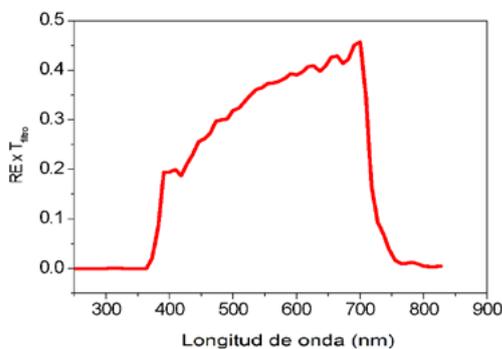


Figura 9: Respuesta espectral de un radiómetro PAR a partir de un filtro comercial.

Radiómetros UV

La aplicación de los sensores de radiación ultravioleta es muy amplia: desde usos en grupos de investigación de diferentes disciplinas como la biología, agronomía, etc., hasta mediciones en zonas de alto nivel de radiación UV donde se puede estudiar el impacto de los cambios en los niveles de radiación debido a variaciones periódicas o anómalas. En el transcurso de su vida, las personas en sus distintas actividades propias se exponen a la radiación del Sol por diversos motivos. El 80 % de los efectos indeseables que origina la exposición solar se debe al espectro ultravioleta B (UVB), comprendido entre los 290 nm y 320 nm de longitud de onda. Poder conocer la dosis de exposición es fundamental ya que existe una relación directa entre su magnitud y el desarrollo de neoplasias, mutaciones, fotoenvejecimiento, inmunosupresión y cataratas. De esta manera, se puede alertar de manera temprana sobre los posibles efectos negativos para la salud en las poblaciones de distintos emplazamientos.

Para que un radiómetro de silicio funcione como un sensor de radiación ultravioleta, es necesario la utilización de un filtro óptico que recorte la porción del espectro que no se desea sensor. En una primera etapa del desarrollo de los sensores,

se realizaron simulaciones numéricas para obtener la transmisión de filtros de películas delgadas de capas metal-dieléctricas con el fin de optimizar el diseño, para poder medir en bandas estrechas específicas del espectro UV. Estos filtros se utilizan desde la década del 60 y en los últimos años se ha estudiado en detalle para su aplicación en el rango ultravioleta [11], [12].

Se pudo observar que los diseños de multicapas de Al-Al₂O₃ permitirían la obtención de un filtro que permite medir el espectro UVB, ya que se puede lograr que la longitud de onda central sea la adecuada, variando el espesor del material dieléctrico (ver Figura 10).

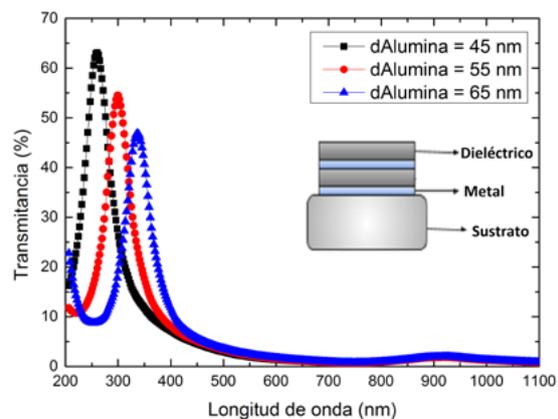


Figura 10: Transmitancia de los filtros UV diseñados para un espesor de las películas de aluminio de 10 nm.

Para la optimización del dispositivo es necesario aumentar la respuesta espectral en la región ultravioleta de la celda de silicio. En particular, el objetivo es modificar el proceso de difusión de dopantes que determinan la juntura np de la celda solar. Se realizaron diferentes procesos de difusión de fósforo sobre sustratos de silicio tipo p variando distintos parámetros como tiempos y caudal de gases en varias etapas del proceso. Estas variaciones se realizaron con el objetivo de obtener muestras con menor profundidad de juntura y menor concentración de dopante tipo n, donde estas características son fundamentales para una mayor respuesta espectral en el espectro ultravioleta. Se continúa trabajando en este instrumento para poder concluirlo con las prestaciones que se requieren.

Sensor de medición del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

De los índices de vegetación conocidos, el NDVI es de los más importantes y usados. Utiliza las bandas del rojo y el infrarrojo cercano y permite calcular la salud de una planta en un estado fenológico concreto. La respuesta espectral que tiene la

vegetación sana muestra un claro contraste entre el espectro visible, especialmente la banda roja y el infrarrojo cercano. Mientras que en el visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el infrarrojo, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye en el infrarrojo y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica. Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas.

Las longitudes de onda involucradas se encuentran en el intervalo de respuesta de los sensores de silicio [13]. Para desarrollar el primer prototipo se llevó a cabo el diseño y la construcción de una base para montar los sensores y los filtros comerciales que recortan el espectro en las longitudes de onda de interés. Esta base tiene una disposición de dos sensores que miden hacia arriba y dos hacia abajo (ver Figura 11), en ambos pares de sensores uno de los sensores mide en el visible, 630 nm y el otro en el infrarrojo cercano, 800 nm.

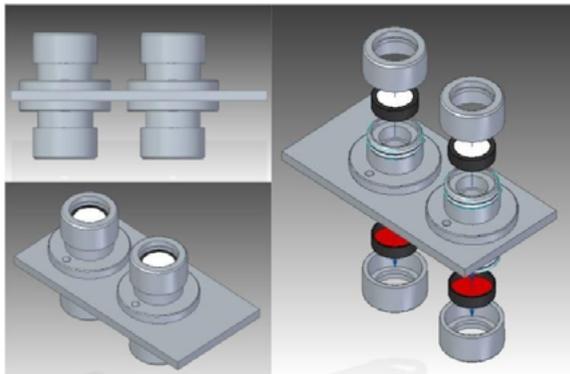


Figura 11: Esquema de montaje de sensores y filtros para medir NDVI.

CONCLUSIONES

Desde finales de la década del '90 se trabaja en el desarrollo de radiómetros. En particular, el trabajo desarrollado en el PDTs que se presenta en este artículo es la consecuencia tanto del trabajo de varios años como de la interacción y la posibilidad de adaptación de los instrumentos a las necesidades específicas de los usuarios. Se construyeron instrumentos confiables de bajo costo y disponibles tanto para el área comercial, agrícola, meteorológica, entre otras, además de la sustitución de componentes de fabricación nacional en la industria espacial.

Los sensores de radiación con aplicaciones espaciales elaborados en el DES forman parte de las misiones SAOCOM 1A y SAOCOM 1B. Su funcionamiento en el espacio permitió corroborar que los dispositivos cumplen con los exigentes requerimientos para este tipo de tecnología. Se contempla en la actualidad el desarrollo de sensores finos de posición, con la intención de proveer distintos dispositivos y continuar creciendo en el desarrollo de tecnología de alta calidad y nacional.

Se inició con el desarrollo de radiómetros terrestres con aplicaciones específicas y se adecuaron a las necesidades de distintos usuarios. Se diseñaron los dispositivos y sus componentes para que cumplan con los requisitos de medición. Se continúa con la elaboración y optimización de los dispositivos con el fin de obtener los primeros prototipos, entre las cuales también se encuentra un radiómetro sumergible.

En particular, se contempló el desarrollo de radiómetros para la medición de radiación correspondiente a distintas regiones del espectro electromagnético (UV, UVB, PAR). Las ventajas de desarrollar estos dispositivos residen principalmente en la posibilidad de proporcionar a empresas, instituciones universitarias y de ciencia y tecnología una herramienta fiable, con una disponibilidad más inmediata y a un costo menor en comparación con los instrumentos comerciales importados.

AGRADECIMIENTOS

Las y los autores agradecen a Hugo Grossi por ser el promotor de los primeros radiómetros fabricados en el DES y nuestro constante guía en el desarrollo de estos instrumentos. También, a José Di Santo por su aporte en tareas de diseño y construcción de equipos para mediciones. Por último, a las instituciones ejecutoras y adoptantes que confiaron en nuestros desarrollos.

REFERENCIAS

- [1] Barrera, M. P.; Bolzi, C. G.; Corvalán, D.; Martínez Bogado, M. G.; Plá, J. C. & Tamasi, M. J. L. (2004). Últimos desarrollos en celdas solares de silicio cristalino en la CNEA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 8.
- [2] Bolzi, C. G.; Bruno, C. J.; Durán, J. C.; Godfrin, E. M.; Bogado, M. M.; Merino, L. M., ... & Barrera, M. (2002). First experiment of Argentine solar cells in space: modules fabrication, characterisation, and telemetry data analysis from SAC-A satellite. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 73(3), 269-280.
- [3] Alurralde, M.; Barrera, M.; Bolzi, C. G.; Bruno, C. J.;

- Cabot, P.; Carella, E., ... & Filevich, A. (2013). Development of solar arrays for Argentine satellite missions. *Aerospace Science and Technology*, 26(1), 38-52.
- [4] Ley, W.; Wittmann, K.; & Hallmann, W. (Eds.). (2009). *Handbook of Space Technology* (Vol. 22). John Wiley & Sons.
- [5] Basore, P. A. (1994). Defining terms for crystalline silicon solar cells. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 2(2), 177-179.
- [6] García, J. A.; Socolovsky, H. P.; & Plá, J. C. (2010). Desarrollo de un equipo de medición de respuesta espectral en celdas solares multijuntura: última etapa. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14.
- [7] Emcore Photovoltaics, 2005.
- [8] Bolzi, C. G.; Durán, J. C.; Dursi, O.; Renzini, G., & Grossi Gallegos, H. (1999). Construcción y ensayo de piranómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la CNEA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1.
- [9] Bolzi, C. G.; Merino, L. M.; Tamasi, M. J. L.; Plá, J. C.; Durán, J. C.; Bruno, C. J.; ... & 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*, 1.
- [10] Bolzi C.G.; Tamasi M.J.L.; Martínez Bogado M.G.; Plá J.C. (2002). Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la C.N.E.A.: prototipo comercial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6, 11.01.
- [11] Jakšić, Z.; Maksimović, M. & Sarajlić, M. (2004). Silver-silica transparent metal structures as band-pass filters for the ultraviolet range. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 7(1), 51.
- [12] Mu, J.; Lin, P. T.; Zhang, L.; Michel, J.; Kimerling, L. C.; Jaworski, F. & Agarwal, A. (2013). Design and fabrication of a high transmissivity metal-dielectric ultraviolet band-pass filter. *Applied Physics Letters*, 102(21), 213105.
- [13] Garrity, S. R.; Vierling, L. A. & Bickford, K. (2010). A simple filtered photodiode instrument for continuous measurement of narrowband NDVI and PRI over vegetated canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3), 489-496.