

## **SUBSISTEMA DE POTENCIA DEL SAC-D: ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS PANELES SOLARES DURANTE LA MISIÓN MEDIANTE LOS DATOS DE TELEMETRÍA**

**Elena M. Godfrin, Julio C. Durán**

Departamento Energía Solar – Gerencia Investigación y Aplicaciones – CAC – CNEA  
Av. General Paz 1499 – B1650KNA San Martín – Provincia de Buenos Aires – Argentina  
Tel. (011) 6772-7132, Fax (011) 6772-7121, [www.tandar.cnea.gov.ar](http://www.tandar.cnea.gov.ar), [godfrin@tandar.cnea.gov.ar](mailto:godfrin@tandar.cnea.gov.ar)

*Recibido 27/07/17, aceptado 28/09/17*

**RESUMEN:** El SAC-D, primer satélite argentino con paneles solares fotovoltaicos fabricados en el país, fue puesto en órbita exitosamente el 10 de junio de 2011, desde la base aérea de Vandenberg, EE.UU. A partir de ese momento comenzó a transmitir por telemetría mediciones de las variables de los diferentes subsistemas del satélite y, en particular, de parámetros eléctricos de los paneles solares y sensores solares gruesos. En el presente trabajo se analizan los valores de los datos recibidos por telemetría a fin de determinar su correcto funcionamiento y las degradaciones de dichos componentes.

**Palabras clave:** Energía solar fotovoltaica, celdas solares, sensores solares gruesos, paneles solares, degradación, subsistema de potencia.

### **INTRODUCCION**

El Departamento de Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) trabajó, entre otros proyectos, en el desarrollo de los paneles solares para el satélite SAC-D/Aquarius, como parte de un contrato firmado entre la CNEA y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). La CNEA tuvo la responsabilidad del desarrollo, fabricación y ensayo funcional de los paneles solares, única fuente de alimentación eléctrica del satélite (Alurralde et al., 2012; 2008, 2007; Bolzi et al., 2002; Filevich et al., 2003). Las actividades incluyeron, además del desarrollo de las tecnologías de fabricación y ensayo de los paneles, la elaboración de modelos teóricos que permitieran diseñar y simular el funcionamiento del subsistema de generación de energía eléctrica (subsistema de potencia) del satélite a lo largo de la vida útil de la misión (Godfrin et al., 2007).

El 10 de junio de 2011 se realizó con éxito el lanzamiento y puesta en órbita del SAC-D desde la base aérea de Vandenberg, California, EE.UU., momento a partir del cual comenzó a transmitir datos por telemetría.

Este satélite describe una órbita heliosincrónica (de 98° de inclinación respecto al plano del Ecuador terrestre) a una altura nominal de 658 km a su paso sobre el Ecuador terrestre, con un nodo ascendente establecido a las 6:00 p.m. y un período orbital de 98 minutos. Este tipo de órbita mantiene una orientación fija respecto al Sol a medida que la Tierra se traslada alrededor del mismo. Durante tres meses al año (de mayo a agosto), el satélite atraviesa a lo largo de su órbita parte del cono de sombra que genera la Tierra (en la región cercana al polo sur) produciéndose períodos en los cuales los paneles solares no reciben iluminación solar. Dichos períodos se denominan “eclipses” y su duración es de hasta 20 minutos.

Luego de casi 4 años, durante los cuales se comprobó el correcto funcionamiento de los paneles solares mediante el análisis de los datos telemétricos (ver por ejemplo Godfrin et al., 2011 y 2012), la misión del satélite concluyó el 8 de junio de 2015 (CONAE noticias, 2015).

## CONSIDERACIONES PREVIAS

Los paneles solares denominados -X y +X, formados por conjuntos de módulos de celdas de triple juntura InGaP/GaAs/Ge, proveen la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del satélite y los sensores solares gruesos (SSG), de silicio cristalino, se utilizan para el correcto posicionamiento del satélite.

La corriente generada por cada módulo y la de los SSG dependen principalmente del ángulo de incidencia de la radiación solar y de la temperatura de operación.

En una primera aproximación y considerando que los paneles se encuentran en el plano de la órbita, el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre los paneles ( $\beta$ ) queda determinado por la inclinación de la órbita y varía anualmente con la traslación de la Tierra. Sin embargo, debido a motivos técnicos relacionados con el instrumento MWR (Micro Wave Radiometer), el satélite realiza un “raw-steering”, es decir que  $\beta$  tiene una variación cíclica, no simétrica, alrededor de su valor nominal (ángulo de la órbita). En consecuencia, fue necesario realizar el cálculo de  $\beta$  a partir de la lectura de las corrientes de los SSG (Godfrin, 2005). Dado que el algoritmo utilizado depende de los valores de la temperatura de operación y de la corriente de cortocircuito medida en Tierra en condiciones estándar, en dicho trabajo se analizó la influencia de las incertidumbres de dichos parámetros: para los valores máximos de  $\beta$  (junio), las diferencias porcentuales aplicadas al ángulo son comparables a la incertidumbre de medición de las corrientes de cortocircuito de los SSG; para valores mínimos de  $\beta$ , las diferencias porcentuales son despreciables.

En la Figura 1 se muestra la conformación de los paneles solares, la posición de los SSG y la de los sensores de temperatura. A modo de ejemplo, se muestran los SSG 8 y 9 sobre su soporte. Los SSG 2, 4, 8, 12 apuntan hacia la parte posterior de los paneles, mientras que los restantes hacia la parte frontal.

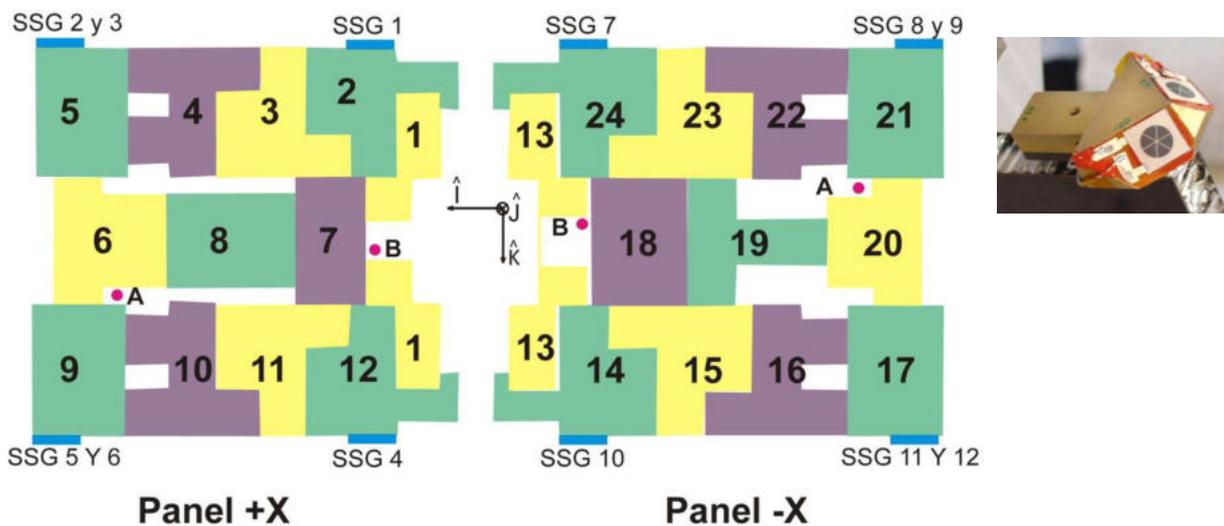


Figura 1: Conformación de los paneles solares del satélite SAC-D y SSG 8 y 9 sobre su soporte. Los rectángulos celestes indican la posición de los sensores solares gruesos y los puntos rojos, la de los sensores de temperatura.

Los datos analizados fueron provistos por la CONAE y corresponden a las corrientes de los módulos, las corrientes de los SSG y las temperaturas de los sensores de temperatura.

El análisis se realizó, sistemáticamente, sobre conjuntos de datos medidos cada 8 segundos, a lo largo de 24 horas (aproximadamente 15 órbitas), los días 10, 20 y 30 de cada mes.

## SENSORES SOLARES GRUESOS

El análisis de las corrientes de los SSG permitió detectar anomalías atribuibles a errores de conversión de los valores medidos o fallas en algunas mediciones, siendo las dos siguientes las más destacables:

- a principios de la misión se detectaron inconsistencias (valores negativos carentes de sentido físico) en los valores de las corrientes de algunos SSG. Se informó a la CONAE y ello dio lugar a la corrección de las fórmulas de conversión de los datos de telemetría de los SSG;
- el 13 de julio de 2013, la corriente del sensor 9 presentó una nueva alteración. El hecho fue comunicado a la CONAE pero el problema no pudo ser resuelto. En la Figura 6.13, se muestran los gráficos de las corrientes de los sensores equivalentes en cuanto a su orientación en el satélite (3 y 7 por un lado, 1 y 9 por el otro) en dicha fecha: puede apreciarse una mínima diferencia entre las corrientes de los SSG 3 y 7 a lo largo de todo el día, mientras que la diferencia en las corrientes de los SSG 1 y 9 es mayor que las anteriores para los valores mínimos hasta las 11:44 y, a partir de ese instante, la curva sufre una traslación de aproximadamente  $-1.5$  mA (Figura. 2).

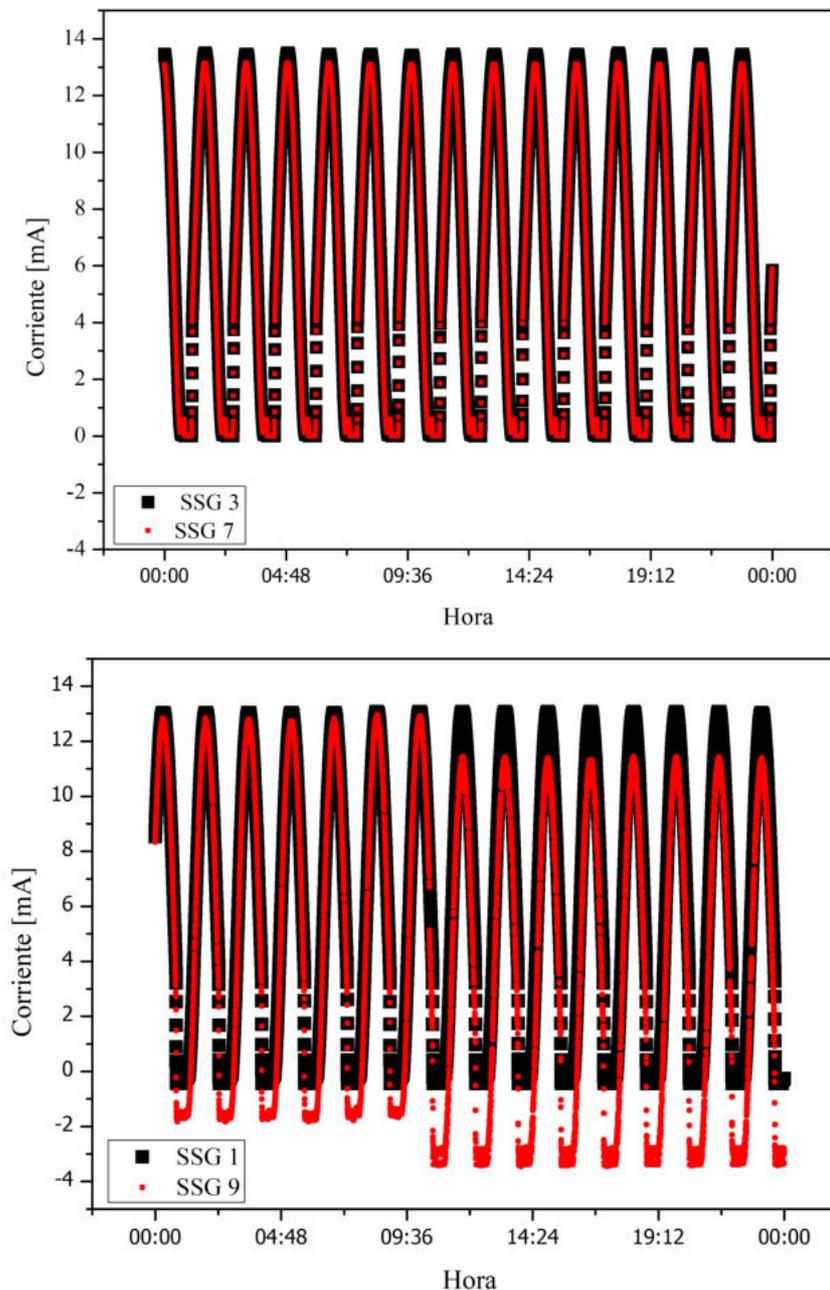


Figura 2: Gráfico de las corrientes (en mA) para SSG equivalentes para el 13 de julio de 2013.

Se calcularon los valores máximos, mínimos y promedios de las corrientes de operación de cada sensor. A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para el 10 de octubre de los valores máximos, mínimos y promedios de las corrientes (en mA) para cada SSG durante la misión. Para los demás días analizados los resultados son similares.

|          | CSS1 | CSS2 | CSS3 | CSS4  | CSS5  | CSS6 | CSS7 | CSS8 | CSS9 | CSS10 | CSS11 | CSS12 |
|----------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 2011     |      |      |      |       |       |      |      |      |      |       |       |       |
| MINIMO   | 6.00 | 0.07 | 7.52 | 8.31  | 7.82  | 0.11 | 7.08 | 0.00 | 5.51 | 6.82  | 8.03  | 0.04  |
| MAXIMO   | 9.02 | 0.11 | 9.15 | 10.30 | 11.05 | 0.36 | 8.75 | 0.11 | 9.26 | 10.03 | 10.30 | 0.43  |
| PROMEDIO | 7.55 | 0.08 | 8.31 | 9.31  | 9.61  | 0.22 | 7.90 | 0.08 | 7.44 | 8.58  | 9.14  | 0.19  |
| 2012     |      |      |      |       |       |      |      |      |      |       |       |       |
| MINIMO   | 5.89 | 0.00 | 7.41 | 8.10  | 7.72  | 0.07 | 7.04 | 0.00 | 5.17 | 6.71  | 7.92  | 0.00  |
| MAXIMO   | 8.83 | 0.11 | 8.90 | 10.05 | 10.83 | 0.36 | 8.57 | 0.11 | 8.82 | 9.85  | 10.12 | 0.43  |
| PROMEDIO | 7.44 | 0.07 | 8.14 | 9.06  | 9.42  | 0.21 | 7.80 | 0.07 | 7.04 | 8.42  | 8.99  | 0.18  |
| 2013     |      |      |      |       |       |      |      |      |      |       |       |       |
| MINIMO   | 5.85 | 0.00 | 7.30 | 8.02  | 7.64  | 0.07 | 6.97 | 0.04 | 3.50 | 6.64  | 7.88  | 0.00  |
| MAXIMO   | 8.76 | 0.11 | 8.82 | 9.94  | 10.72 | 0.36 | 8.53 | 0.11 | 7.37 | 9.74  | 9.97  | 0.40  |
| PROMEDIO | 7.35 | 0.07 | 8.07 | 8.95  | 9.39  | 0.21 | 7.75 | 0.07 | 5.56 | 8.34  | 8.88  | 0.16  |
| 2014     |      |      |      |       |       |      |      |      |      |       |       |       |
| MINIMO   | 5.78 | 0.04 | 7.26 | 7.95  | 7.61  | 0.07 | 6.94 | 0.04 | 3.31 | 6.53  | 7.81  | 0.00  |
| MAXIMO   | 8.76 | 0.11 | 8.82 | 9.83  | 10.72 | 0.36 | 8.53 | 0.11 | 8.71 | 9.71  | 9.94  | 0.43  |
| PROMEDIO | 7.32 | 0.07 | 8.01 | 8.90  | 9.34  | 0.21 | 7.70 | 0.07 | 5.36 | 8.28  | 8.86  | 0.16  |

Tabla 1: Máximos, mínimos y promedios de las corrientes (en mA) para cada SSG durante la misión.

En la Tabla 1, puede observarse que:

- las corrientes de los SSG 2, 4, 8 y 12 son despreciables indicando que no reciben radiación solar directa ni albedo (reflejo de la radiación solar sobre la Tierra),
- las de los SSG 4, 5, 10 y 11 son las de mayor intensidad dado que reciben radiación solar directa y albedo,
- a lo largo de la misión, las variaciones de las corrientes de los SSG que reciben radiación solar es pequeña, salvo para el SSG 9,

Los SSG de interés para el cálculo del ángulo  $\beta$  son los 1, 3 para el panel -X, 7 y 9 para el +X, dado que, por su ubicación, el albedo es despreciable. La anomalía detectada en el SSG 9 afecta el resultado del cálculo del ángulo  $\beta$  para el panel -X y, ante la imposibilidad de acceder a una lectura confiable de la corriente del sensor 9, se decidió utilizar los valores del ángulo calculado con los sensores 1 y 3 para ambos paneles.

En las Figuras 3 y 4 se presentan los valores de los promedios de las corrientes de los SSG durante la misión. Al cabo de los 4 años de misión, se observan degradaciones en la corriente de los SSG de aproximadamente 4% (SSG 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 y 11), 10% (SSG 2), 12% (SSG 12), y 28% en el SSG 9 que presentó la anomalía en 2013.

Excluyendo el caso anómalo del SSG 9, las degradaciones observadas resultan comparables o inferiores a la degradación del 10% estimada mediante simulación (Alurralde, 2011).

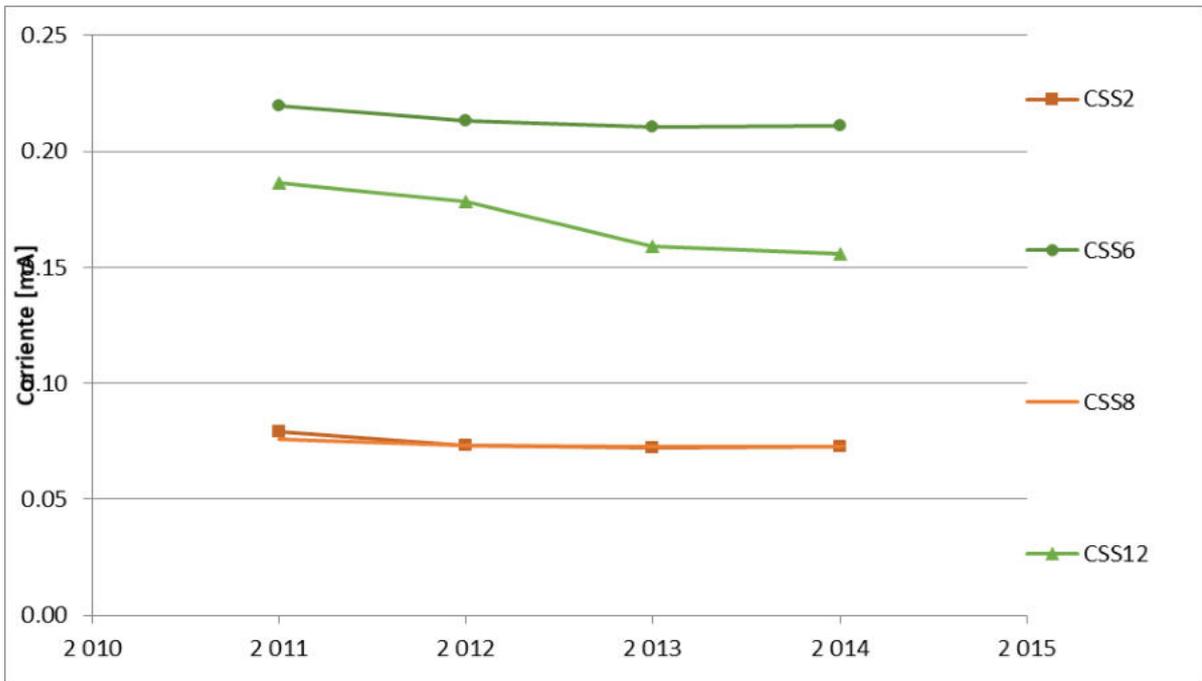


Figura 3: Valores de los promedios de las corrientes de los SSG 2, 6, 8 y 12 durante la misión

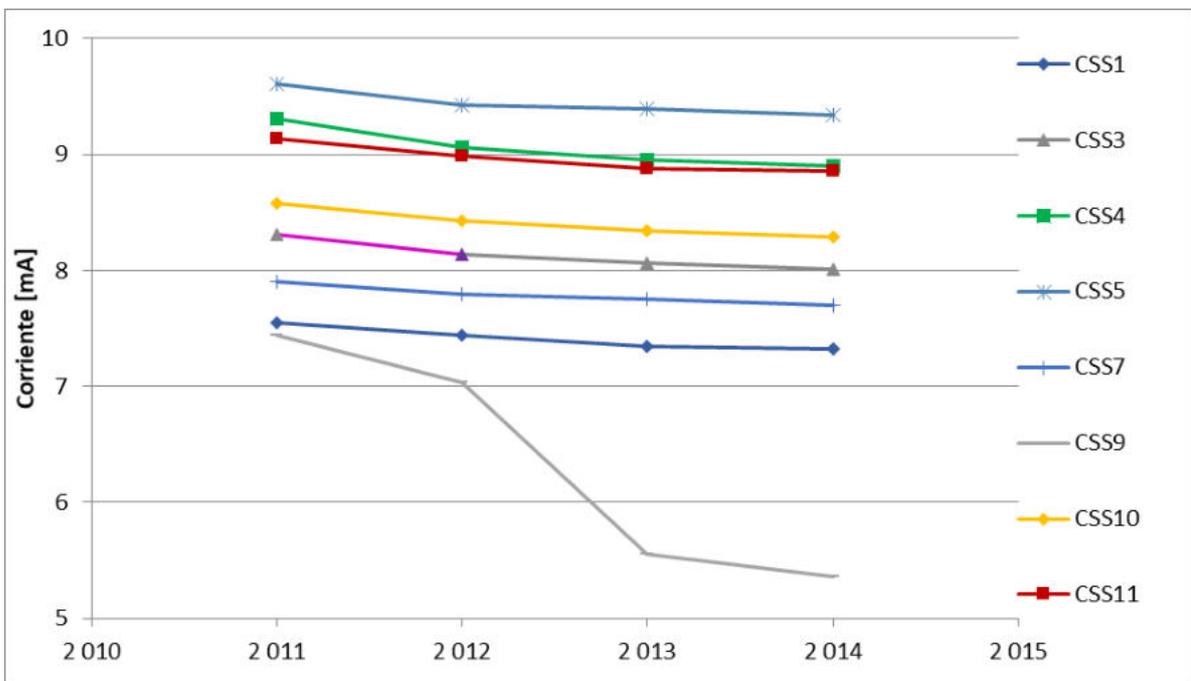


Figura 4: Valores de los promedios de las corrientes de los SSG 1, 3 4, 5, 7, 9, 10 y 11 durante la misión

Teniendo en cuenta el análisis de sensibilidad del algoritmo de cálculo, puede considerarse que la variación de la corriente de los SSG 1 y 3 no altera el cálculo de dicho ángulo.

Continuando con el ejemplo anterior, en la Figura 5 se presenta la variación de  $\beta$  para el 10 de octubre de 2011 y de 2014, donde puede observarse que en la trayectoria ascendente del satélite, particularmente entre  $-135^\circ$  y  $0^\circ$ , dicho ángulo prácticamente no presenta variación; entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  se aprecia la diferencia del “raw-steering”, inferior a  $3^\circ$ .

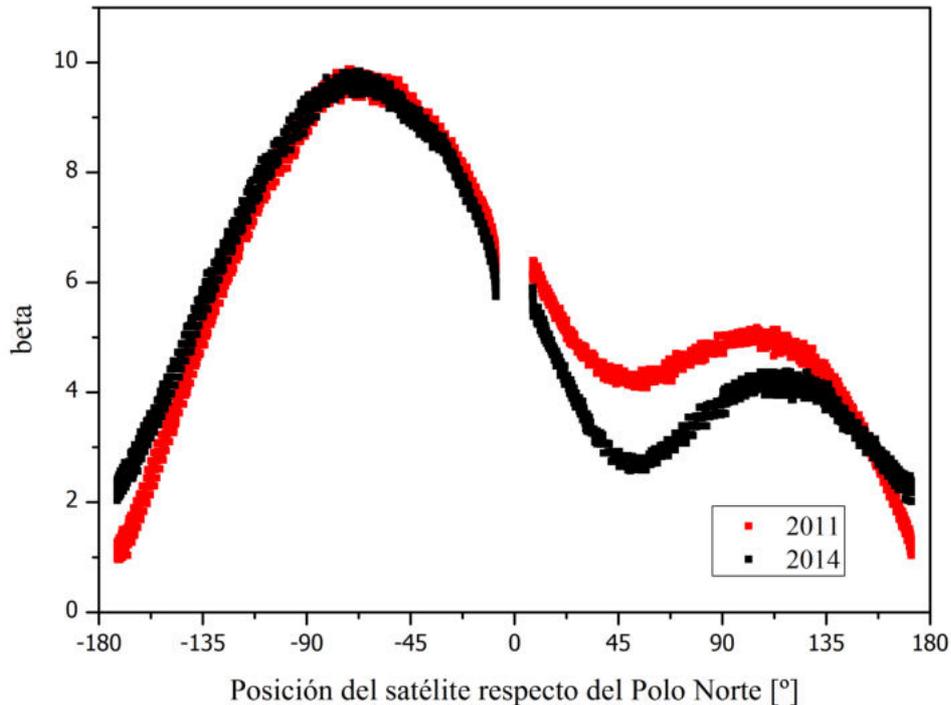


Figura 5: Variación del ángulo  $\beta$  para el 10 de octubre de 2011 y de 2014.

## PANELES SOLARES

A fin de poder comparar las corrientes de los módulos medidas en órbita bajo diferentes condiciones de operación (temperatura y ángulo de incidencia) y, a partir de ellas, estimar la degradación de los módulos, se llevaron los valores medidos a condiciones estándar de medición (28°C y radiación incidente normal a los paneles), a principios y al final de la misión. Las corrientes normalizadas se compararon con las corrientes de cortocircuito y de máxima potencia simuladas (Godfrin et al, 2009).

En la Figura 6 se presentan dichas corrientes para el módulo 6 (módulo de mayor potencia, continuamente en operación) y, en la Figura 7, para el módulo 8 (módulo en condiciones de cortocircuito), ambas para el 10 de octubre de 2011 y de 2014.

Cabe notar que los paneles solares reciben el albedo proveniente de la Tierra, lo cual incrementa la radiación solar que reciben y, en consecuencia, también el valor de la corriente de operación de los módulos. Dado que las corrientes obtenidas por simulación no tienen en cuenta el albedo, es de esperar que las mismas resulten inferiores a los valores medidos.

En las Figuras 6 y 7, puede apreciarse

- las corrientes normalizadas muestran variaciones entre órbitas, asociadas a la variabilidad del albedo, dando lugar a las bandas que se observan en las figuras;
- todas las "bandas" se encuentran por encima de la corriente de máxima potencia.

Comparando las bandas del año 2011 con las de 2014, en la Figura 6 parecería apreciarse un desplazamiento vertical descendente entre ambas, siendo el desplazamiento del orden del 1%; mientras que en la Figura 7, el desplazamiento no es significativo. Dada la variabilidad del albedo y la magnitud de estas diferencias, puede concluirse que no se aprecia degradación de los módulos, hecho en buen acuerdo con las estimaciones realizadas. (Alurralde, 2006).

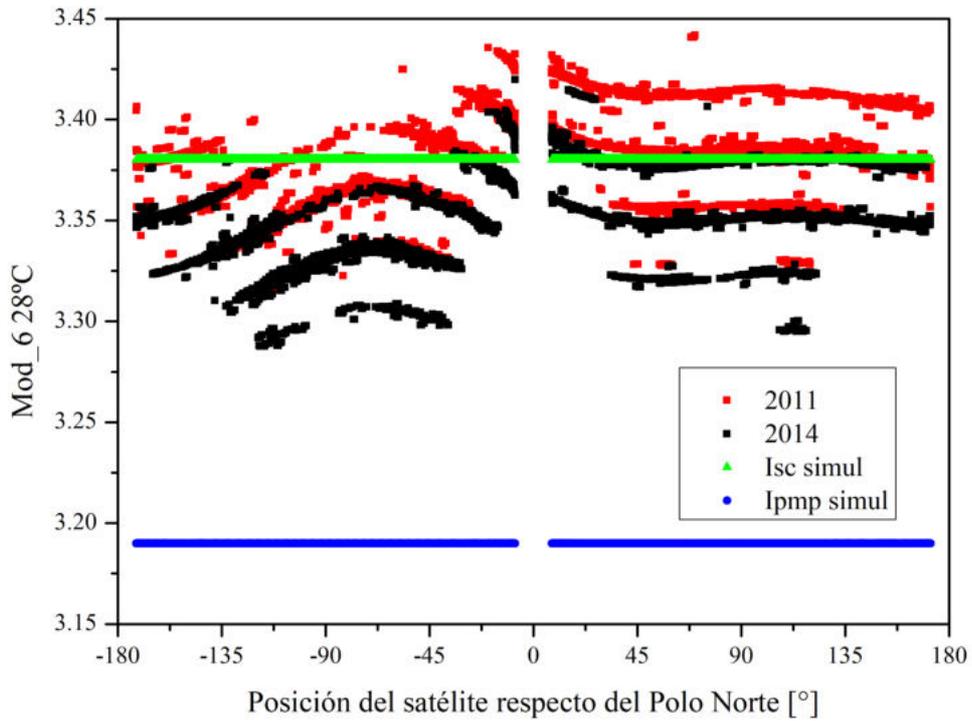


Figura 5: Comparación de la corriente de cortocircuito normalizadas (telemetría) del módulo 6 para el 10 de octubre de 2011 y de 2014 con las de cortocircuito ( $I_{sc}$  simul) y de máxima potencia ( $I_{pmp}$  simul) simuladas.

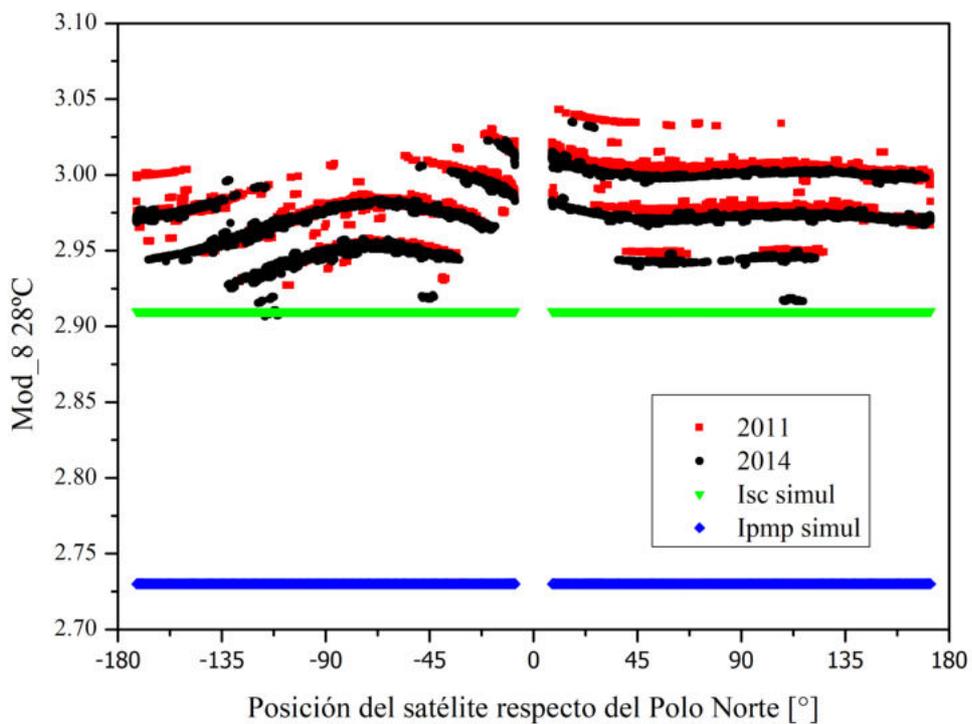


Figura 6: Comparación de las corrientes de cortocircuito normalizadas (telemetría) del módulo 8 para el 10 de octubre de 2011 y de 2014 con las de cortocircuito ( $I_{sc}$  simul) y máxima potencia ( $I_{pmp}$  simul) simulada.

## CONCLUSIONES

El DES desarrolló, fabricó y realizó el ensayo funcional de los paneles solares, única fuente de alimentación eléctrica del satélite SAC-D. Las actividades incluyeron, además del desarrollo de las tecnologías de fabricación y ensayo de los paneles, la elaboración de modelos teóricos que permitieran diseñar y simular el funcionamiento del subsistema de generación de energía eléctrica (subsistema de potencia) del satélite a lo largo de la vida útil de la misión.

La misión comenzó el 10 de junio de 2011 y finalizó el 8 de junio de 2015. Durante todo el período, se recibieron datos de telemetría. Los datos correspondientes a los paneles solares que fueron analizados sistemáticamente para estudiar su comportamiento, detectar anomalías y degradación de las celdas que los componen.

En el presente trabajo se analizaron los datos de las corrientes de los sensores solares gruesos y de los paneles solares pudiéndose concluir que no se observa degradación en los paneles solares y que los sensores solares gruesos presentaron una degradación a lo largo de los 4 años de misión similar o inferior a la estimada. Estos resultados se hallan en buen acuerdo con las predicciones realizadas previamente al lanzamiento.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a C.F. Varotto (Director de la CONAE), D. Caruso (SAC-D Project Manager) y a los equipos de trabajo de la CONAE y de la agencia espacial de los EE.UU. (NASA) por su apoyo y colaboración. Agradecen asimismo la cooperación de todo el grupo de trabajo de la CNEA.

Este trabajo fue financiado principalmente por la CNEA y la CONAE, habiéndose recibido también aportes de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT).

## REFERENCIAS

- Alurralde M. (2006). Degradación de celdas Emcore 3ATJ para tres y cinco años en órbita tipo SAC-D. Informe técnico de circulación restringida de la misión Aquarius/SAC-D CAC-PSE-ENV-00610A-IN.
- Alurralde M. (2011). Estimación de la degradación de las celdas solares por daño por radiación mediante el método NRL. Informe técnico de circulación restringida de la misión Aquarius/SAC-D CAC-PSE-ENV-00620A-IN.
- Alurralde M., Barrera M., Bolzi C.G., Bruno C.J., Cabot P., Carella E., Di Santo J., Durán J.C., Fernández Vázquez J., Filevich A., Franciulli C.D., Godfrin E.M., Goldbeck V., Iglesias A., Martínez Bogado M.G., Mezzabolta E., Moglioni A., Nigri C., Nigro S.L., Palumbo F., Plá J., Prario I., Raffo Calderón M.C., Rodríguez S.E., Socolovsky H., Tamasi M.J.L., Vertanessian A. (2007). Advances in the development of photovoltaics for space applications in Argentina. 22nd EUPVSC, 687-691.
- Alurralde M., Barrera M., Bolzi C.G., Bruno C.J., Cabot P., Carella E., Di Santo, J., Durán J.C., Fernández Slezak D., Fernández Vázquez J., Filevich A., Franciulli C.D., García J.A., Godfrin E.M., González L., Goldbeck V., Iglesias A., Martínez Bogado M.G., Mezzabolta E., Moglioni A., Muñoz S., Nigri C., Nigro S.L., Pérez J.I., Plá J., Prario I., Raffo Calderón M.C., Raggio D., Rinaldi C., Rodríguez S.E., Socolovsky H., Tamasi M.J.L.,(2012). Development of solar arrays for Argentine satellite missions. Aerospace Science and Technologie, doi: 10.1016/j.ast.2012.02.012.
- Alurralde M., Barrera M., Bolzi C.G., Bruno C.J., Cabot P., Carella E., Di Santo, J., Durán J.C., Fernández Slezak D., Fernández Vázquez J., Filevich A., Franciulli C.D., Godfrin E.M., González L., Goldbeck V., Iglesias A., Martínez Bogado M.G., Mezzabolta E., Moglioni A., Muñoz S., Nigri C., Nigro S.L., Plá J., Prario I., Raffo Calderón M.C., Raggio D., Rinaldi C., Rodríguez S.E., Socolovsky H., Tamasi M.J.L. (2008). Solar array qualification models for Aquarius/SAC-D satellite mission. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 785-789.
- 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, characterisation, and telemetry data analysis from SAC-A satellite. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 73, 269-280.
- CONAE noticias (2015), <http://www.conae.gov.ar/index.php/espanol/component/content/article/19-conae/noticias/787-sac-d-aquariusos-logros-de-una-exitosa-mision-satelital-argentina>.
- Godfrin E.M. (2015). Simulación y modelización de paneles solares y de sistemas de potencia para aplicaciones espaciales. Tesis doctoral, Universidad de General San Martín, Comisión Nacional de Energía Atómica, Instituto de Tecnología Prof. Jorge Sábató, <http://www.tandar.cnea.gov.ar/doctorado/Tesis/Godfrin.pdf>.
- Godfrin E.M., Durán J.C., (2011). Misión satelital Aquarius/SAC-D: análisis preliminar del funcionamiento de los paneles solares en órbita a partir de datos de telemetría. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 15, 04.21
- Godfrin E.M., Durán J.C., Fernández Slezak D., Berbeglia G. (2007). Design and simulation of the power subsystems for two argentine satellites. 22nd EUPVSC, 692-696.
- Godfrin E., Plá J., Durán J.C., (2010). Misión satelital Aquarius/SAC-D: análisis estadístico de las celdas del modelo de vuelo de los paneles solares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 14, 04.33.
- Godfrin E.M., Prario I., Durán J.C. (2012). Aquarius/SAC-D mission: data analysis for the first year. 38th IEEE PVSC, 2851-2855.
- Godfrin E.M., Durán J.C. (2006). Dimensionamiento de los paneles solares para la misión satelital Aquarius/SAC-D en base a dos casos extremos, E.M. Godfrin, J.C. Durán, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 10, 04-41.
- Godfrin E.M., Fernández Slezak D., Durán J.C., (2005). Misión satelital AQUARIUS/SAC-D: diseño preliminar del panel solar y simulaciones del comportamiento del subsistema de potencia. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 9, 04-13.
- Godfrin E.M., Fernández Slezak D., Durán J.C., (2009). Misión satelital Aquarius/SAC-D: simulación y estimación de la potencia del modelo de vuelo de los paneles solares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 13, 04.37.

## ABSTRACT

The SAC-D, first Argentine satellite with solar panels manufactured in the country, was successfully launched on June 10, 2011, from Vandenberg Air Force Base, USA. From that moment, it began transmitting telemetry measurements of the variables of different satellite subsystems and, in particular, the electrical parameters of the solar panels and coarse solar sensors. In the present work, the values of the data received by telemetry are analyzed to determine their correct operation and the degradations of these components.

**Keywords:** photovoltaic solar energy, solar cells, coarse solar sensors, solar panel, degradation, power subsystem.