

## MISIÓN SATELITAL AQUARIUS/SAC-D: ANÁLISIS PRELIMINAR DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS PANELES SOLARES EN ÓRBITA A PARTIR DE DATOS DE TELEMETRÍA

E.M. Godfrin, J.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), [duan@tandar.cnea.gov.ar](mailto:duan@tandar.cnea.gov.ar)

**RESUMEN:** El 10 de junio de 2011, el lanzador Delta II puso en órbita exitosamente el satélite Aquarius/SAC-D desde la base de la fuerza aérea norteamericana en Vandenberg (VAFB), EE.UU. Se trata del primer satélite argentino con sus paneles solares fabricados en el país, más específicamente en el Centro Atómico Constituyentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica. En este trabajo se presenta un análisis preliminar del funcionamiento de los paneles solares en órbita mediante mediciones eléctricas recibidas por telemetría, comparándose las mismas con los resultados de las simulaciones teóricas realizadas previamente. Los resultados obtenidos muestran el correcto funcionamiento de los 24 módulos que conforman los 2 paneles solares del satélite.

**Palabras clave:** fotovoltaico, panel solar, satélite artificial, simulación, telemetría

### INTRODUCCIÓN

El satélite argentino de observación de la Tierra Aquarius/SAC-D (CONAE, 2011) es un emprendimiento conjunto entre la CONAE y la agencia espacial de los Estados Unidos (National Aeronautics and Space Administration, NASA), en el que participan también las agencias espaciales de Italia, Canadá, Francia y Brasil. Este nuevo satélite del Plan Espacial Nacional fue construido en nuestro país con la participación de diversos entes del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología y empresas de base tecnológica. La CNEA, a través de su Departamento Energía Solar y con la participación de personal de otros sectores del Centro Atómico Constituyentes, tuvo la responsabilidad del desarrollo, fabricación y ensayo funcional de los paneles solares, única fuente de alimentación eléctrica del satélite.

A diferencia de los anteriores satélites de la serie SAC, que contaban con instrumental óptico para la adquisición de imágenes en los rangos de luz visible e infrarroja, este observatorio espacial lleva varios instrumentos que operan en el rango de las microondas, siendo los principales dos radiómetros y un escatómetro. El SAC-D es todo un logro de la tecnología espacial argentina y el satélite más grande y complejo desarrollado en el país: pesa 1.341 kg y mide 2,7 m de diámetro y 7 m de largo. El objetivo principal de esta misión es medir la salinidad de mares y océanos en forma global para elaborar modelos climáticos a largo plazo. También medirá la humedad del suelo a gran escala, dato que permitirá elaborar alertas tempranas de inundaciones y aparición o dispersión de enfermedades. Por su parte, el conocimiento de la salinidad de los mares es de vital importancia para estudiar el cambio climático y entender los efectos de las interacciones entre el ciclo del agua, la circulación oceánica y el clima.

Superadas con éxito todas las etapas de pruebas realizadas durante la campaña de lanzamiento (Fig. 1), el satélite fue puesto en órbita por el lanzador Delta II desde la base de la Fuerza Aérea Norteamericana en Vandenberg, California, el 10 de junio de 2011 (Fig. 2). Luego de la separación del satélite de la última etapa del lanzador, los paneles solares se desplegaron sin inconvenientes, recibándose poco después los primeros datos de telemetría que confirmaron el correcto funcionamiento de los mismos. Los primeros dos meses de la misión se dedican esencialmente a la verificación de los diferentes subsistemas de la plataforma de servicios, en especial del subsistema de potencia del cual los paneles forman parte, antes del encendido de los instrumentos de observación de la Tierra.

La puesta en órbita de esta misión, es un hito histórico en la implementación del Plan Espacial Nacional, ya que se trata del primer satélite con sus paneles solares desarrollados y fabricados en el país.

En este trabajo se presenta el análisis preliminar de los primeros datos de telemetría recibidos desde el satélite y se comparan los mismos con simulaciones del funcionamiento de los paneles solares realizadas previamente (Godfrin et al., 2007; Godfrin et al., 2009).

### SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS PANELES SOLARES

Los paneles solares de la misión Aquarius/SAC-D tienen un área total de aproximadamente 9 m<sup>2</sup> y están compuestos por 2574 celdas de triple juntura (ATJ, por “*Advanced Triple Junction*”), provistas por Emcore, interconectadas entre sí formando cadenas de 18 celdas en serie. A su vez, las cadenas se conectan entre sí en paralelo, formando módulos de 5, 6 o 7 cadenas. Cada uno de los paneles posee 12 módulos pero con configuraciones levemente diferentes. En el Panel +X, 11 módulos están

formados por 6 cadenas y 1, por 7 cadenas, mientras que en el Panel -X 10 módulos están formados por 6 cadenas y 2, por 5 cadenas.

La simulación del funcionamiento de los paneles solares se realizó mediante herramientas numéricas desarrolladas previamente (Godfrin et al., 2007), utilizando como datos de entrada las características eléctricas de corriente vs. tensión (I-V) de las celdas que conforman dichos módulos (Godfrin et al., 2009), medidas en condiciones normalizadas (AM0, 1367 W/m<sup>2</sup>, 28 °C). La Fig. 3 muestra, a modo de ejemplo, la curva I-V simulada, para 2 temperaturas, junto con los valores experimentales medidos en laboratorio mediante lámpara de Xe pulsada, para uno de los módulos de 6 cadenas en paralelo. Las características eléctricas de los módulos para temperaturas diferentes a 28°C se obtienen mediante los coeficientes de temperatura provistos por el fabricante (ver Tabla 1), en particular los correspondientes a las celdas solares no degradadas por el ambiente espacial, o sea a principios de su vida útil (BOL, "Beginning Of Life"). Por su parte, la Tabla 2 da los valores de los parámetros eléctricos obtenidos por simulación para los 24 módulos, 12 del panel +X (módulos 1 a 12) y 12 del panel -X (módulos 13 a 24). El módulo 6 está formado por 7 cadenas en paralelo, los módulos 19 y 20, por 5 cadenas en paralelo, y el resto, por 6 cadenas en paralelo.  $V_{ca}$  representa la tensión de circuito abierto;  $I_{cc}$ , la corriente de cortocircuito; y  $P_{pmp}$ ,  $V_{pmp}$  y  $I_{pmp}$ , la potencia, tensión y corriente, respectivamente, en el punto de máxima potencia.



Figura 1: Paneles solares montados en el satélite SAC-D, en la base de lanzamiento en Vandenberg, California.



Figura 2: Lanzador en el momento del despegue, Vandenberg, California, 10 de junio de 2011.

	<b>BOL</b>
$\Delta V_{ca}/\Delta T$ [mV/°C]	-5,48
$\Delta I_{cc}/\Delta T$ [mA/°C]	0,331
$\Delta V_{pmp}/\Delta T$ [mV/°C]	-5,93
$\Delta I_{pmp}/\Delta T$ [mA/°C]	0,310

Tabla 1: Coeficientes de temperatura de las celdas solares ATJ de Emcore (Emcore, 2002).

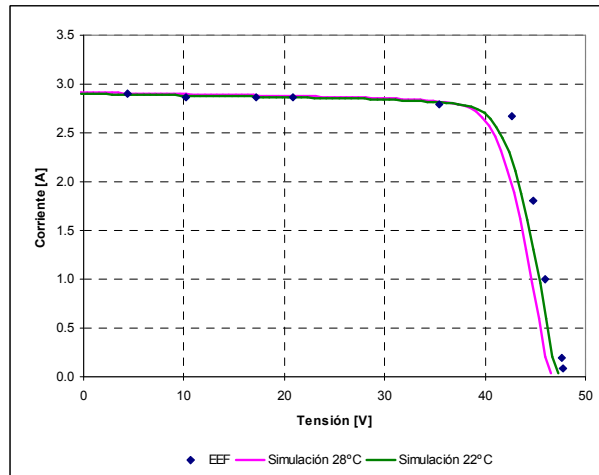


Figura 3: Curva I-V simulada, para 2 temperaturas y valores experimentales medidos en laboratorio mediante lámpara de Xe pulsada (ensayo eléctrico funcional, EEF), para uno de los módulos de 6 cadenas en paralelo..

Módulo	$V_{ca}$ [V]	$I_{cc}$ [A]	P [W]	$V_{pmp}$ [V]	$I_{pmp}$ [A]
1	46,9	2,90	106	39,0	2,72
2	47,1	2,92	109	39,5	2,74
3	46,9	2,91	107	39,0	2,74
4	46,9	2,91	106	38,8	2,73
5	46,8	2,91	106	38,9	2,73
6	46,9	3,38	125	39,2	3,19
7	46,9	2,90	106	38,9	2,73
8	46,7	2,91	106	39,0	2,73
9	46,9	2,92	108	39,5	2,74
10	46,8	2,91	106	38,8	2,73
11	47,0	2,91	107	39,1	2,74
12	47,0	2,92	109	39,6	2,74
13	46,6	2,87	106	39,0	2,71
14	46,5	2,89	105	38,9	2,71
15	46,7	2,91	106	39,0	2,73
16	46,4	2,91	105	38,7	2,72
17	46,7	2,88	106	39,1	2,72
18	46,5	2,90	106	39,1	2,72
19	46,8	2,41	89	39,3	2,27
20	46,4	2,43	89	39,0	2,28
21	46,7	2,89	107	39,1	2,73
22	46,7	2,90	106	38,9	2,72
23	46,6	2,92	106	39,0	2,73
24	46,6	2,89	107	39,2	2,72

Tabla 2: Características eléctricas de los 24 módulos que conforman los paneles solares, obtenidas por simulación a partir de las curvas I-V de las celdas solares medidas en condiciones normalizadas (AM0, 1367 W/m<sup>2</sup>, 28 °C).

## ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS DE TELEMETRÍA

El Aquarius/SAC-D describe una órbita circular helio-sincrónica cuasi polar (98°), a una altura de 658 km (medida cuando pasa sobre el Ecuador), y con el nodo ascendente a las 18:00 horas. Esta órbita tiene un período orbital de 98 minutos, con eclipses\* de una duración máxima de 20 minutos por órbita que se producen durante 3 meses del año centrados en el solsticio de invierno en el hemisferio sur (21 de junio). Estos eclipses se producen cuando el satélite pasa sobre el Polo Sur.

Las mediciones de los múltiples parámetros de los diferentes subsistemas del satélite se realizan cada 8 segundos, se almacenan en la memoria de la computadora de abordo y se transmiten posteriormente a las diferentes estaciones terrenas ubicadas en diferentes partes del mundo. En el caso del subsistema de potencia, se miden, entre otros, los siguientes parámetros: corriente entregada por cada uno de los 24 módulos, temperatura de los paneles solares, tensión en los bornes de las baterías, y corriente de carga o descarga de las baterías. La Fig. 4 muestra una de las primeras pantallas de telemetría obtenida a las pocas horas del lanzamiento, donde pueden observarse las corrientes medidas para los 24 módulos de los paneles solares (“Solar Array”).

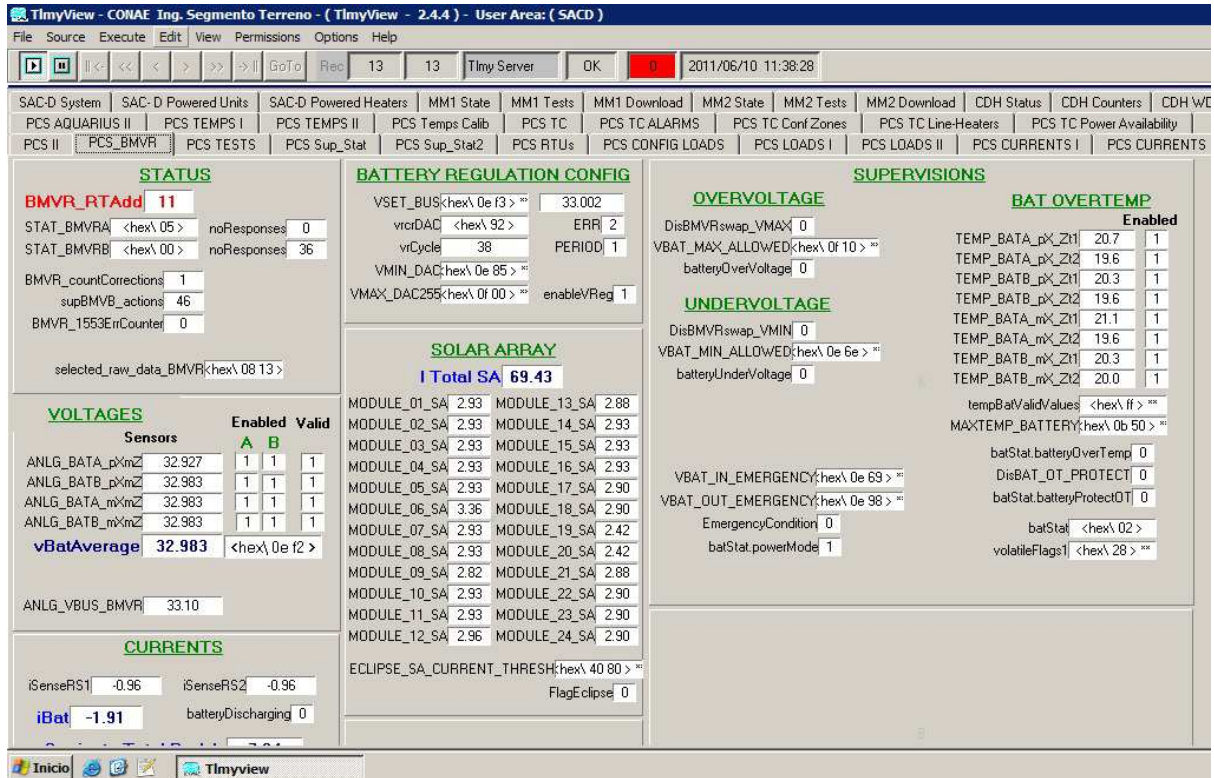


Figura 4: Pantalla con datos de telemetría de los paneles solares y las baterías, correspondiente al día del lanzamiento.

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento de los 24 módulos antes del encendido de los instrumentos del satélite, se analizaron las mediciones de los días 1 al 3 de agosto, inclusive. En esta época del año, los eclipses duran aproximadamente 9 minutos, alcanzando los paneles solares una temperatura máxima cercana a 70°C, en su paso por el Polo Norte, y una mínima de alrededor de 10°C, durante los eclipses. En las Figs. 5 y 6 se dan, para los módulos 24 (de 6 cadenas en paralelo) y 6 (de 7 cadenas en paralelo) los valores de la corriente obtenida por telemetría, juntamente con la temperatura de operación del panel, en función de la posición angular del satélite medida con respecto al eje de la Tierra y con origen en el Polo Norte. Los ángulos negativos representan el nodo ascendente (satélite viajando del Polo Sur al Norte, a la salida del eclipse), mientras que los positivos representan el nodo descendente (satélite yendo del Polo Norte al Sur). La dispersión que se observa en la temperatura y la corriente muestra las variaciones de estos parámetros entre las 44 órbitas que recorrió el satélite en el período estudiado. Como referencia, en ambas figuras se indican la corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ) y la corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{pmp}$ ) obtenidas por simulación para ambos módulos.

\* Satélite entrando al cono de sombra de la Tierra.

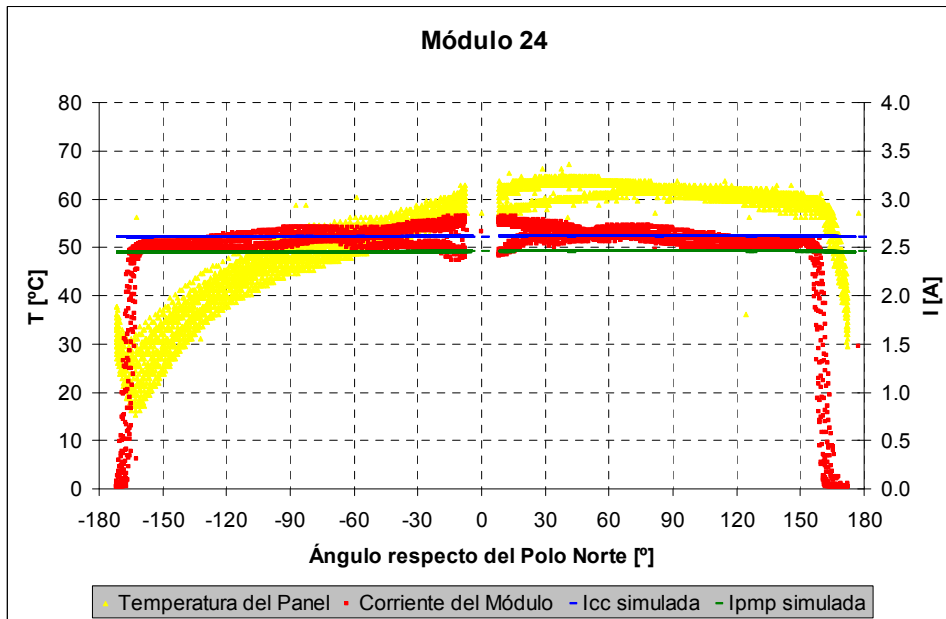


Figura 5 Corriente (rojo) entregada por el Módulo 24 y temperatura de operación (amarillo) a lo largo de la órbita en el período 1/08/2011 al 03/08/2011. Como referencia, se indican la  $I_{cc}$  (azul) y la  $I_{pm}$  (verde) obtenidas por simulación.

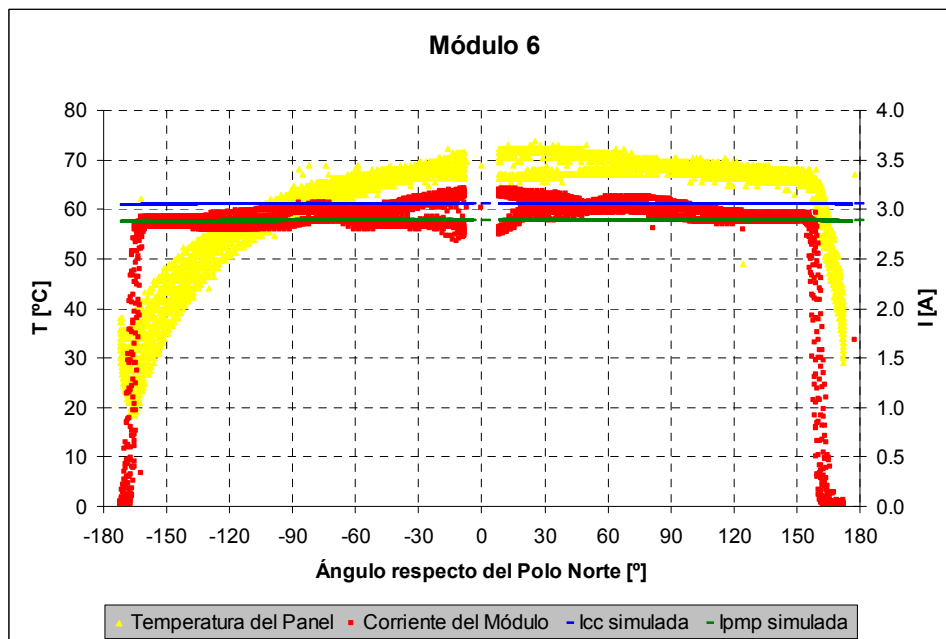


Figura 6: Corriente (en rojo) entregada por el Módulo 6 y temperatura de operación (en amarillo) a lo largo de la órbita en el período 1/08/2011 al 03/08/2011. Como referencia, se indican la  $I_{cc}$  y la  $I_{pm}$  obtenidas por simulación.

## CONCLUSIONES

El análisis preliminar de los datos de telemetría correspondientes al período 01/08/2011 al 03/08/2011 muestra un comportamiento de los 24 módulos según lo esperado y en muy buen acuerdo con las estimaciones teóricas previas, pudiéndose concluir en consecuencia que los paneles solares de la misión Aquarius/SAC-D se encuentran completamente operativos luego de la puesta en órbita del satélite.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los demás integrantes del Proyecto de Integración de Paneles Solares que trabajaron en la integración y ensayo de los paneles solares para el satélite SAC-D. En particular, desean agradecer a C.J. Bruno, J. Fernández Vázquez, H. Socolovsky y D. Raggio, quienes realizaron los ensayos eléctricos funcionales, y a J. Plá, quien realizó, junto con uno de los autores, las mediciones eléctricas de las celdas solares.

Este trabajo fue financiado principalmente por la CNEA y la CONAE, contándose también con apoyo de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## REFERENCIAS

CONAE (2011) <http://www.conae.gov.ar>

Emcore ID EWRP036 (2002), Informe Técnico.

Godfrin E.M., Durán J.C., Fernández Slezak D., Berbeglia G. (2007). Design and simulation of the power subsystems for two argentine satellites. Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milán, Italia, pág. 692.

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 Vol. 13, 04.37-04.46.

**ABSTRACT:** On 10<sup>th</sup> June 2011 Aquarius/SAC-D satellite was successfully launched from Vandenberg Air Force Base in California, U.S.A., by Delta II launcher. This satellite is the first one with the solar panels integrated in Argentina, specifically in the Constituyentes Atomic Center of the National Atomic Energy Commission. In this paper a preliminary analysis of the performance of the solar array in orbit is presented and electrical data received by telemetry are compared with theoretical simulations previously performed. Results obtained show that the 24 modules of the solar array are working according to the expectations.

**Keywords:** photovoltaic, solar array, satellite, simulation, telemetry