

## **SUBSISTEMA DE POTENCIA DEL SAC-D: COMPARACIÓN DE DATOS DE TELEMETRÍA CON SIMULACIONES**

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, godfrin@tandar.cnea.gov.ar

*Recibido 02/09/15, aceptado 02/10/15*

**RESUMEN:** El SAC-D, primer satélite argentino con paneles solares 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. En el presente trabajo se comparan los valores de los datos recibidos por telemetría con los de las simulaciones realizadas mediante un código numérico desarrollado en el DES. Se observa un buen acuerdo entre los valores simulados y los correspondientes provenientes de la telemetría, pudiéndose concluir entonces la funcionalidad del código y el correcto funcionamiento de los paneles.

**Palabras clave:** Energía solar, celdas solares, paneles solares, subsistema de potencia, simulación

### **INTRODUCCION**

El Departamento de Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) trabaja en proyectos de investigación y desarrollo vinculados a la conversión fotovoltaica de la energía solar para aplicaciones de uso espacial y terrestre. Desde el año 2007 se 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, a través del DES 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 (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 desarrollo de los paneles solares para la misión SAC-D/Aquarius incluyó la fabricación y los ensayos de calificación de un modelo de ingeniería ("Engineering Qualification Model", EQM), y las posterior elaboración e integración al satélite del modelo de vuelo ("Flight Model", FM) de los paneles solares. 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).

En el este trabajo, se presenta la comparación entre los valores de los datos recibidos por telemetría de las principales variables del subsistema de potencia con las simuladas mediante el código de simulación de dicho subsistema, código desarrollado en el DES (Godfrin et al., 2007).

## COMPARACIÓN DE DATOS DE TELEMETRÍA CON SIMULACIONES

Los principales componentes del sistema de potencia del SAC-D son los paneles solares, el regulador y la batería (Figura 1).

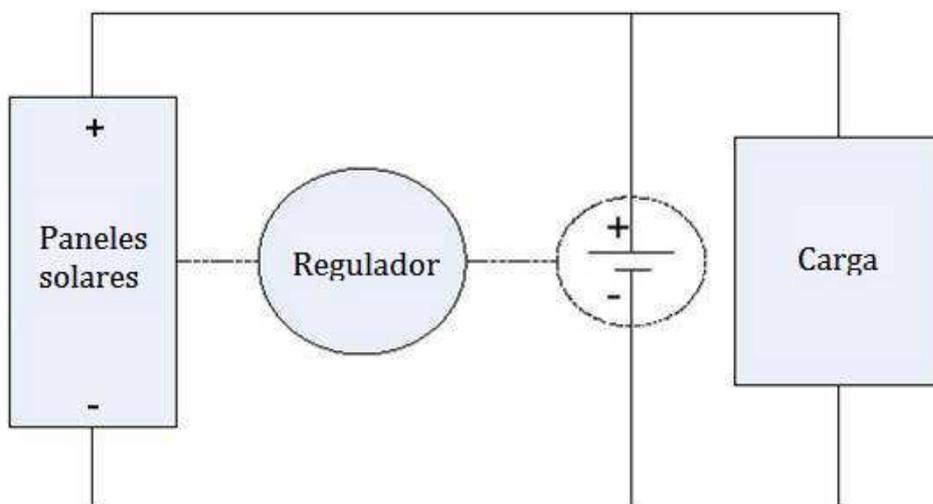


Figura 1: Esquema simplificado de un subsistema de potencia de un satélite.

Los paneles del SAC-D quedaron conformados por 24 módulos: 21 módulos de 6 cadenas, 2 de 5 cadenas y 1 de 7; cada cadena está compuesta por 18 celdas en serie (Godfrin et al., 2005, 2006, y 2009). La curva I-V de cada módulo fue simulada mediante el código de interconexión de celdas desarrollado en el DES (Godfrin et al., 2007) utilizando las curvas I-V medidas en condiciones estándar (Godfrin et al., 2010) de cada una de la celdas que lo componen.

El regulador considerado es un instrumento cuya función es controlar la sobrecarga o descarga excesiva de la batería ya que estos eventos afectan la vida útil de la batería y, en consecuencia, la vida útil del satélite. El regulador debe entonces

- desconectar módulos para prevenir la sobrecarga poniéndolos en estado de cortocircuito,
- reconectar módulos para prevenir las descargas excesivas,
- pasar a modo de emergencia (mínimo consumo para mantener activos los subsistemas esenciales del satélite) en condiciones extremas, de acuerdo con valores de tensión predefinidos.

Los datos utilizados en esta sección para las simulaciones del sistema de potencia del satélite SAC-D son los siguientes:

- las curvas I-V simuladas;
- la batería, compuesta por celdas de Li-ion, tiene una capacidad de 120 Ah en BOL (principio de vida útil, “Beginning of Life”);
- los perfiles de consumo considerados para la simulación son los reales y fueron obtenidos de la telemetría;

- los perfiles de duración del eclipse y del ángulo de la radiación solar sobre el panel están dados en las Figuras 2 y 3, respectivamente;
- el orden de conexión/desconexión de los módulos.

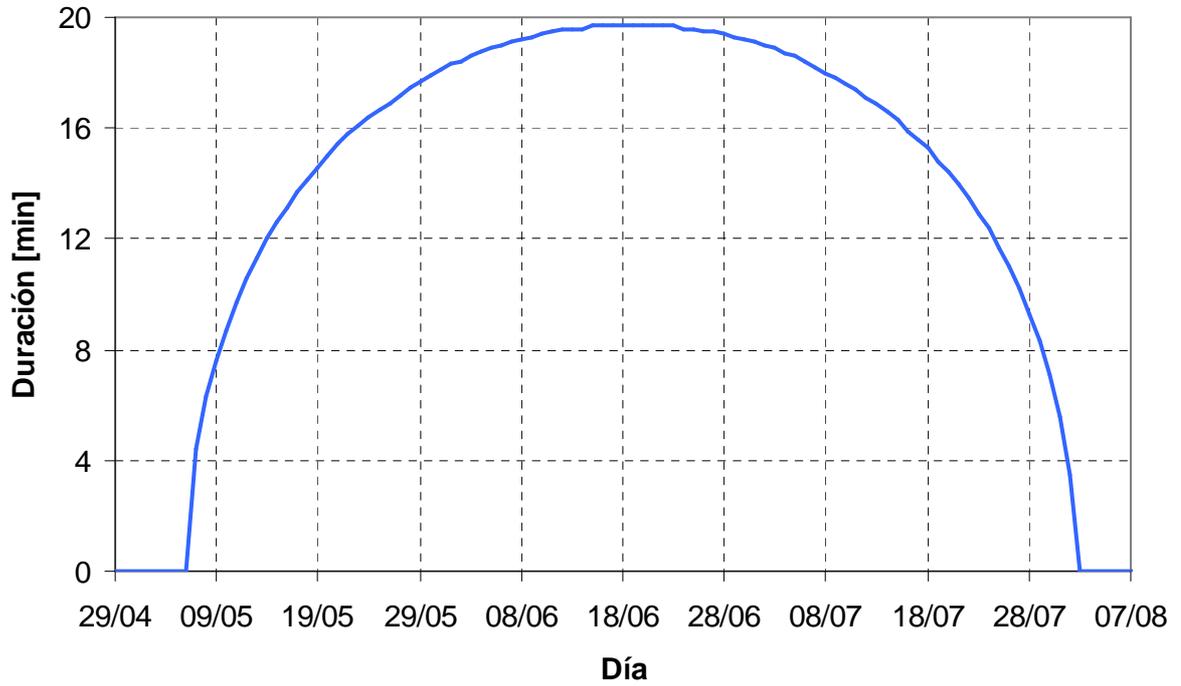


Figura 2: Perfil de duración del eclipse para el satélite SAC-D.

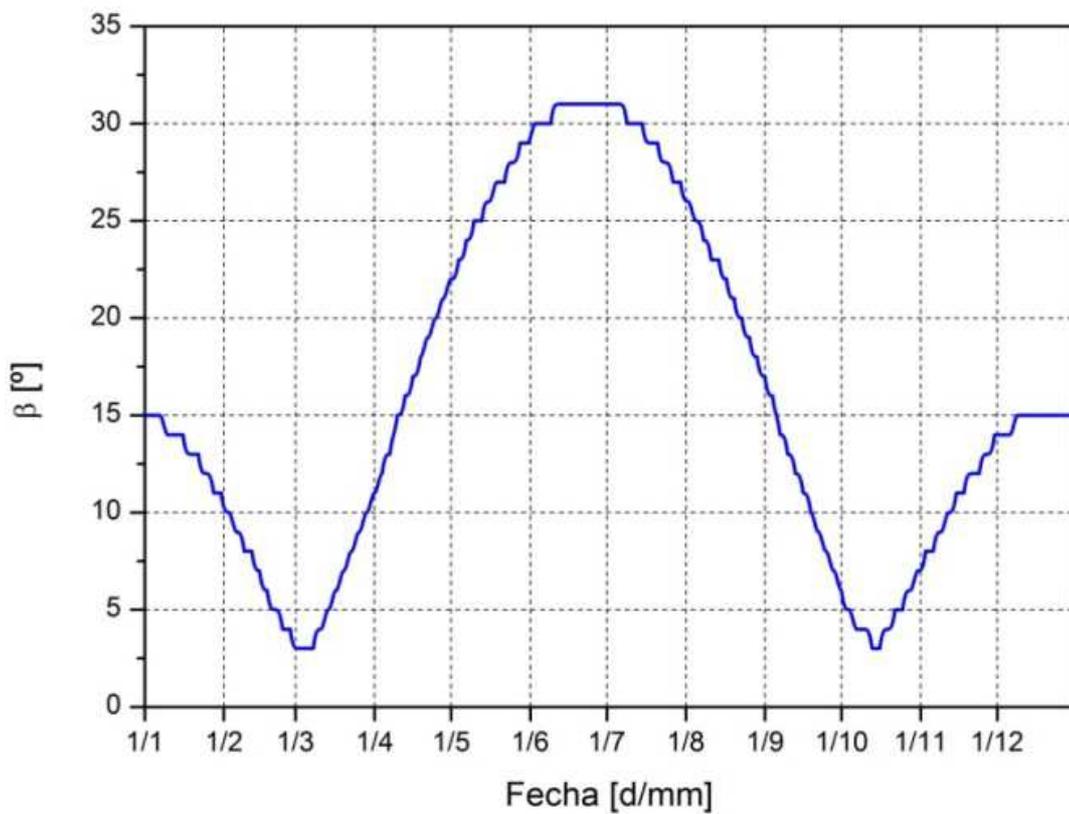


Figura 3: Perfil del ángulo de incidencia de la radiación solar sobre los paneles del satélite SAC-D.

Las simulaciones se realizaron para los días 30 de diciembre y 20 de junio. Las Figuras 4 y 5 muestran el perfil de consumo, la potencia generada por el panel solar y el estado de carga de la batería en función del tiempo, para cada una de las fechas consignadas.

En la Figura 4 puede observarse que la generación de los paneles simulada satisface plenamente el consumo y que el estado de carga de la batería se mantiene superior al 85%.

En la Figura 5, se aprecia la variación de la generación de los paneles: nula durante el eclipse, máxima a la salida del eclipse y decreciente hasta el siguiente eclipse. El estado de carga varía entre 80% y 87%, aproximadamente, alcanzando el mínimo al finalizar el eclipse y el máximo unos minutos antes de comenzar el mismo.

Dado que el estado de carga de la batería no es un parámetro que se mida en forma directa, la comparación entre las mediciones recibidas por telemetría y las simulaciones se realiza considerando las siguientes variables: tensión en los bornes de la batería, corrientes en los bornes de la batería y cantidad de módulos activos, en función de la hora, para ambas fechas (Figura 6, para el 30 de diciembre, y Figura 7, para el 20 de junio de 2013).

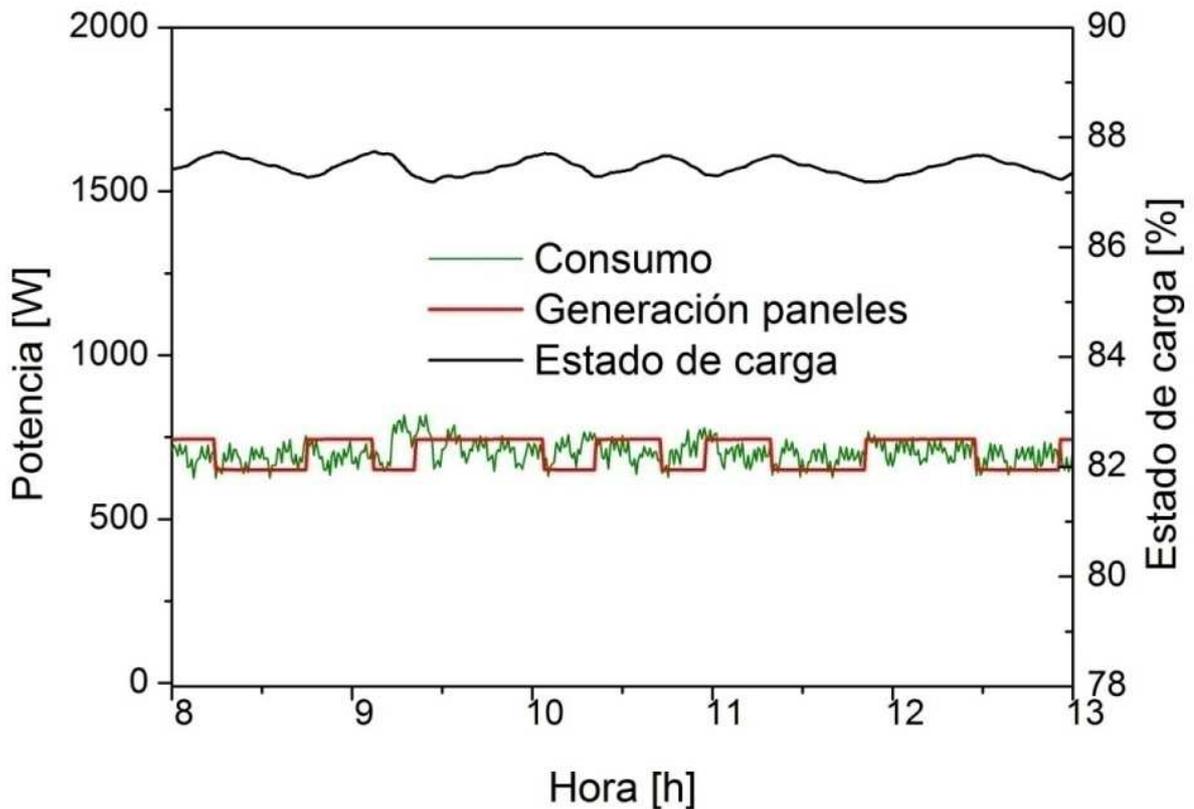


Figura 4: Consumo, potencia generada por el panel solar y estado de carga de la batería en la simulación realizada para día 30 de diciembre para el satélite SAC-D.

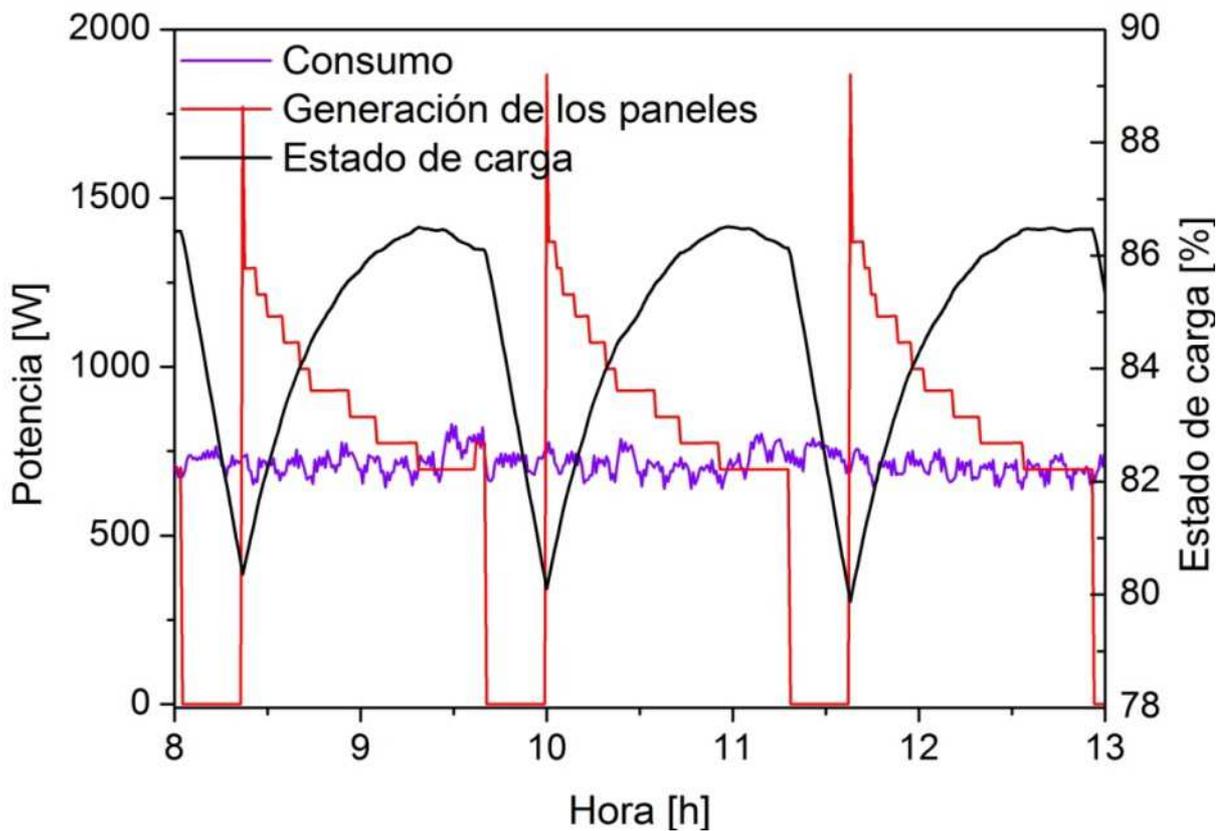


Figura 5: Consumo, potencia generada por el panel solar y estado de carga de la batería en la simulación realizada para día 30 de junio para el satélite SAC-D.

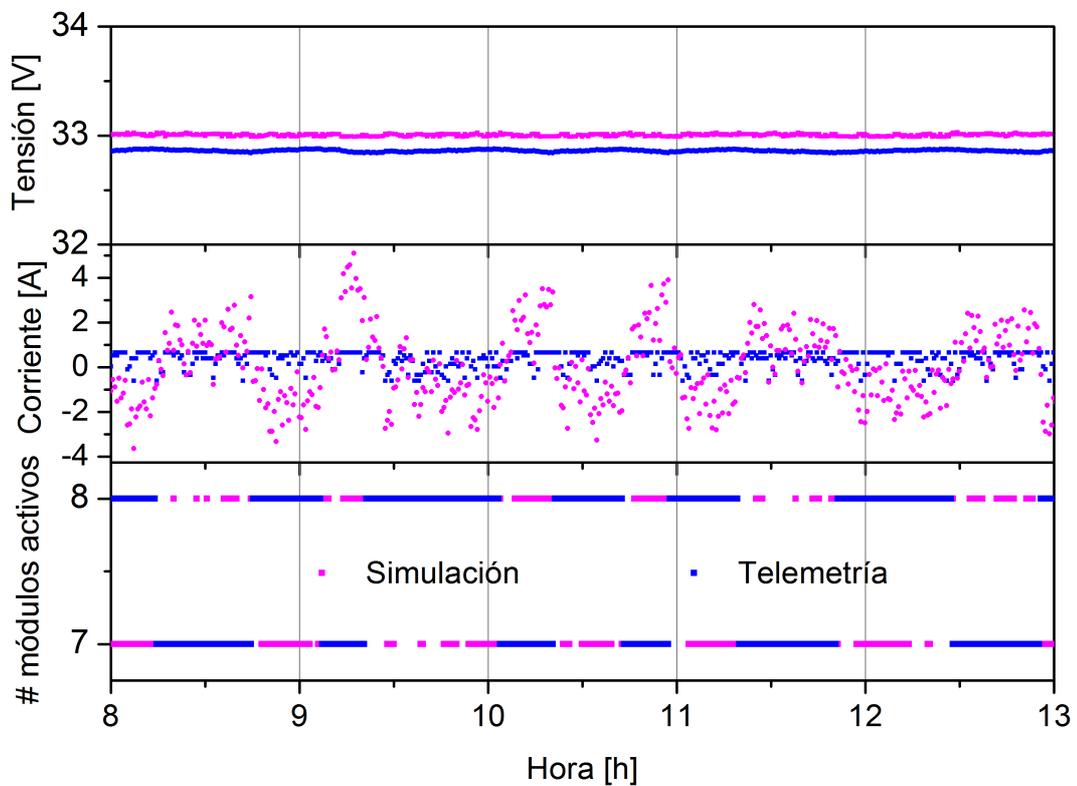


Figura 6: Comparación de los resultados de la simulación con los valores de la telemetría para el 30 de diciembre de 2012: tensión (arriba) y corriente (centro) en los bornes de la batería y cantidad de módulos activos (abajo) para el satélite SAC-D.

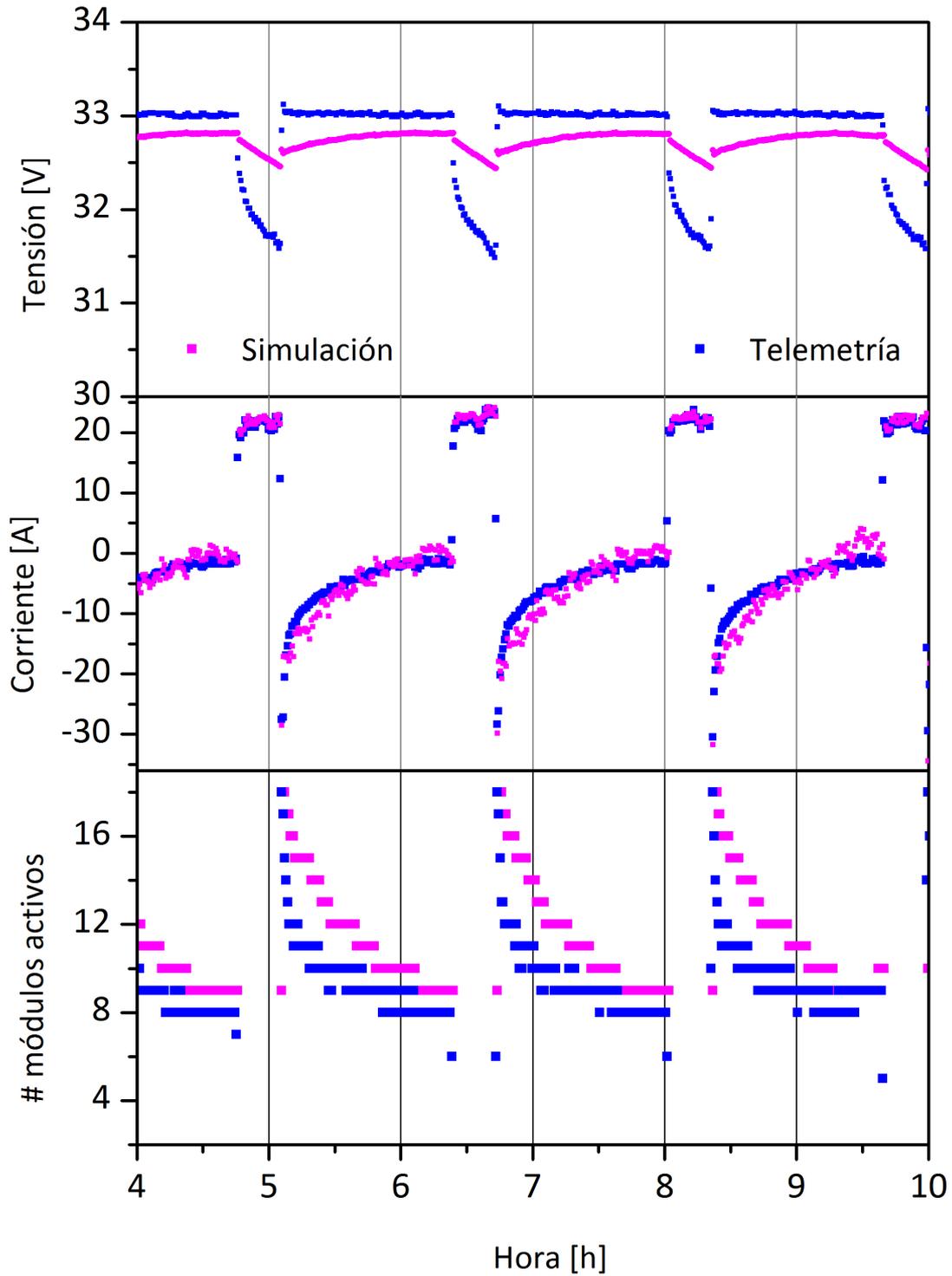


Figura 7: Comparación de los resultados de la simulación con los valores de la telemetría para el 20 de junio de 2013: tensión (arriba) y corriente (centro) en los bornes de la batería y cantidad de módulos activos (abajo) para el satélite SAC-D.

En la parte superior de la Figura 7, se presentan las tensiones de la telemetría y las simuladas para la batería para el 20 de junio de 2013. Cuando la batería está en carga, la diferencia relativa porcentual entre los valores medidos y simulados es prácticamente despreciable, con un promedio de 0,8% y una desviación estándar de 0,2% mientras que, cuando la batería se encuentra en descarga, el promedio de la diferencia es de 2,4% y una desviación estándar de 0,5%. Esta diferencia mayor probablemente se se

deba a una discrepancia entre las curvas reales de carga y descarga de la batería y las utilizadas en la simulación.

En la parte central de la Figura 7, se muestran los gráficos de las corrientes medidas y simuladas. Cuando la batería está en carga, el promedio de la diferencia entre el valor medido y el simulado es de 0,8 A y la desviación estándar de 0,2 A mientras que en descarga, el promedio es de 2,4 A y la desviación de 0,4 A.

Los valores de la cantidad de módulos activos estimados a partir de la telemetría y los obtenidos mediante la simulación se encuentran en la parte inferior de la Figura 7. Se observa que ambos tienen un comportamiento similar pero los correspondientes a la telemetría indican menor cantidad de módulos activos debido al hecho que en las simulaciones no se ha tenido en cuenta la contribución del albedo.

## CONCLUSIONES

El código de simulación de subsistemas de potencia de satélites desarrollado permite analizar la evolución temporal de parámetros de gran importancia para el estudio del funcionamiento del subsistema de potencia del satélite: la potencia generada por el panel solar, el estado de carga de la batería y la corriente provista por el panel a la batería y otros subsistemas, entre otros. Este código permite obtener los resultados en BOL, EOL (fin de vida útil, "End of Life") o cualquier estadio de la misión siendo entonces una herramienta de gran utilidad para el seguimiento del subsistema de potencia en órbita en situaciones normales o para el tratamiento de contingencias.

Las simulaciones realizadas para el satélite SAC-D muestran que la demanda es totalmente satisfecha por la generación de los paneles solares. Los valores de tensión y de corriente en los bornes de la batería y de la cantidad de módulos activos obtenidos por simulación están en buen acuerdo con los correspondientes valores de la telemetría recibida a partir de su puesta en órbita, pudiéndose deducir entonces la funcionalidad del código.

## 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., 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 Technology, doi: 10.1016/j.ast.2012.02.012, en prensa.
- 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-aquarius-los-logros-de-una-exitosa-mision-satelital-argentina>.
- 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 into orbit on June 10, 2011, from Vandenberg Air Force Base, USA. From that moment began transmitting telemetry measurements of the variables of different satellite subsystems and in particular, the electrical parameters of the solar panels. In this paper the values of the telemetry data received with those of the simulations (performed by a numerical code developed at the Solar Energy Department) are compared. A good agreement between simulated and corresponding values from telemetry is observed, allowing to conclude the functionality of the code and the good performance of the panels.

**Key words:** Solar Energy, Solar Array, Satellite, Power system, Simulation, Solar cells