

## **PRIMERA EXPERIENCIA DE CELDAS SOLARES ARGENTINAS EN EL ESPACIO: ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS RESULTADOS**

E.M.Godfrin, M.G. Martínez Bogado, M.J.L. Tamasi y J.C. Durán

Grupo Energía Solar - Depto. de Física - Centro Atómico Constituyentes  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Av. Gral. Paz 1499 - 1650 San Martín - Argentina  
Tel: (11) 4754-7132 - Fax: (11) 4754-7121 - E-mail: duran@cnea.gov.ar

### **RESUMEN**

Se inició la evaluación del funcionamiento en el ambiente espacial de los dispositivos solares argentinos montados en el satélite de aplicaciones científicas SAC-A, el cual se encuentra en órbita desde fines de 1998. Los datos recibidos por telemetría desde el satélite incluyen mediciones eléctricas (entre otras, tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito) y de temperatura de dichos dispositivos. Se presenta la variación de las características eléctricas de las celdas solares en función del tiempo para algunas órbitas y se analiza la dependencia de estas características con la temperatura de operación. En el caso particular de la tensión de circuito abierto, los datos analizados muestran una muy buena correlación lineal con la temperatura, en perfecto acuerdo con las simulaciones teóricas. La corriente de cortocircuito, en cambio, tiene un comportamiento más difícil de analizar debido a la influencia del albedo. Se evalúa la variación de las características eléctricas con el correr de los meses, a fin de estimar posibles deterioros asociados con daños por radiación.

### **INTRODUCCIÓN**

El 14 de diciembre de 1998 a la 1:30 de la madrugada el Transbordador Espacial "Endeavour" puso en órbita, a aproximadamente 410 km de altura, el satélite argentino SAC-A desarrollado por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y fabricado por la empresa INVAP S.E.. El SAC-A tiene un peso de 68 kilogramos y su misión es poner a prueba el funcionamiento en el espacio de una serie de instrumentos y desarrollos tecnológicos que serán aplicados en futuras misiones previstas en el Plan Espacial Nacional.

Entre otras experiencias, la carga del SAC-A incluye un sistema de comunicaciones para el proyecto de seguimiento de la ballena franca austral, una rueda de inercia para estabilizar el satélite en vuelo y un conjunto de celdas solares de silicio cristalino fabricadas en el país. Este primer experimento de celdas solares argentinas en el espacio se encuadra dentro de un acuerdo de colaboración entre la CNEA y la CONAE, cuyo objetivo principal es la puesta a punto en el país de la tecnología de fabricación de paneles solares para usos espaciales.

El satélite lleva dos experiencias relacionadas con las celdas solares nacionales:

- 1) 2 pequeños paneles, compuestos por 7 celdas solares de silicio cristalino cada uno, para estudiar el comportamiento eléctrico de las celdas en el ambiente espacial.
- 2) 4 celdas individuales y 1 en cada panel, distribuidas en diferentes caras del satélite, como sensores de posición angular, formando parte fundamental del sistema de orientación con respecto al Sol.

Todos estos dispositivos fueron íntegramente elaborados en el laboratorio del Grupo Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) [1]. El SAC-A estará operativo durante aproximadamente 9 ó 10 meses, tiempo durante el cual se está realizando el seguimiento y análisis del funcionamiento de las celdas solares nacionales en el espacio.

### **CARACTERÍSTICAS DE LA EXPERIENCIA**

Los dispositivos principales del ensayo son dos paneles de 160mm × 70mm con 7 celdas solares cada uno: 4 interconectadas en serie y 3 individuales. En cada panel, se miden la corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ), la tensión de circuito abierto ( $V_{ca}$ ) y un punto de trabajo cercano al de máxima potencia, en las 3 celdas individuales, y un punto de trabajo en las celdas interconectadas. En las 4 celdas individuales utilizadas como sensor de ángulo se mide  $I_{cc}$ .

Las celdas solares utilizadas son cuadradas de 25 mm de lado y fueron elaboradas a partir de obleas de Si monocristalino de origen comercial tipo Czochralski, dopadas con B y con una resistividad de aproximadamente 1  $\Omega$ cm. Poseen una estructura  $n^+pp^+$ , con una resistencia de capa en la cara frontal de aproximadamente 50-70  $\Omega/$ , y contactos metálicos frontal (tipo grilla) y posterior formados por una multicapa de Ti-Pd-Ag. La estructura del panel consta de una base de Al sobre la que se adhiere una lámina de Kapton. Sobre esta última se fijan las celdas solares ya interconectadas, las que a su vez van protegidas frontalmente con un vidrio dopado con cerio. El detalle de los procesos de elaboración de las celdas y paneles puede verse en detalle en la Ref. 1.

## DATOS DE LA TELEMETRIA

Los instrumentos que lleva a bordo el satélite SAC-A son los siguientes:

- Sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS), para medir la inclinación del satélite respecto de los ejes, la posición en la órbita y la velocidad.
- Cámara pancromática de teleobservación, para tomar fotografías digitales.
- Magnetómetro, para medir el campo magnético terrestre.
- Sistema para el seguimiento de la ballena franca austral, permite conocer detalles de su ruta migratoria en el hemisferio sur.
- Primeras celdas solares argentinas para uso espacial, desarrolladas en el GES-CNEA.

El sistema de telemetría del satélite SAC-A, produce dos tipos de datos:

- Datos LBR en tiempo real: los mismos incluyen datos de operación y científicos tomados en tiempo real, a una velocidad de 150 bps cada 16 segundos; éstos se generan a través de un flujo continuo por un microcontrolador C&D y están siempre presentes en la telemetría. Cada conjunto consta de 300 bytes con la siguiente estructura:
  - \* campo de sincronización (3 bytes, hexadecimal),
  - \* contador del tiempo a bordo (OBT) (3 bytes, hexadecimal),
  - \* datos de operación y científicos (292 bytes, hexadecimal) que incluyen información del DGPS y el magnetómetro, entre otros, y de los paneles y celdas solares del GES-CNEA,
  - \* CRC16 (2 bytes), conjuntamente con el primer campo, permite verificar la correcta transmisión de los datos.
- Vuelco de memoria: se transfieren los datos de la unidad central de memoria del SAC-A a 38400 bps mediante un comando terrestre (su duración es de aproximadamente 7,5 minutos y la capacidad mínima de almacenamiento es de 24 horas).

Para la transmisión telemétrica de los datos, el satélite SAC-A cuenta con un equipamiento de radio-frecuencia (RF). La recepción de los comandos y la transmisión telemétrica se efectúan a través del receptor principal, mientras que la recepción y retransmisión de datos de las ballenas se realiza a través del transmisor de seguimiento. Además, en caso de fallas de potencia o del transmisor/receptor principal, el transmisor de seguimiento de las ballenas puede realizar la recepción de los comandos y la transmisión de los datos.

## ANÁLISIS DE DATOS Y CONCLUSIONES PRELIMINARES

Se realizó un análisis de los datos correspondientes a las celdas de posicionamiento y a los paneles solares del GES. 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. En las figuras 1 y 2 se presentan 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.

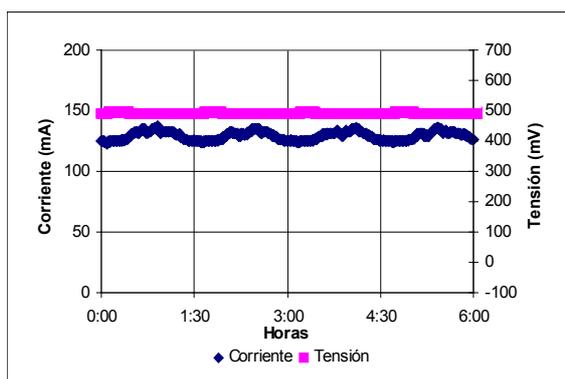


Fig. 1: Variación diaria de  $I_{cc}$  y de  $V_{ca}$  en función del tiempo para órbitas sin eclipse.

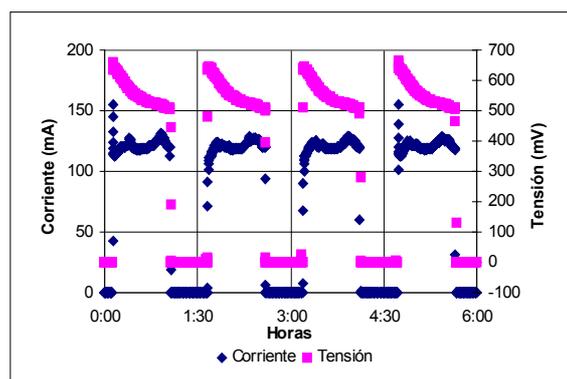


Fig. 2: Variación diaria de  $I_{cc}$  y de  $V_{ca}$  en función del tiempo para órbitas con eclipse.

Mediante un programa en lenguaje FORTRAN se seleccionaron los registros en los cuales el satélite se encontraba en zona con radiación solar y correctamente orientado. Posteriormente, se calcularon los promedios diarios de  $I_{cc}$  y de  $V_{ca}$ , y se analizó su dependencia con la temperatura.

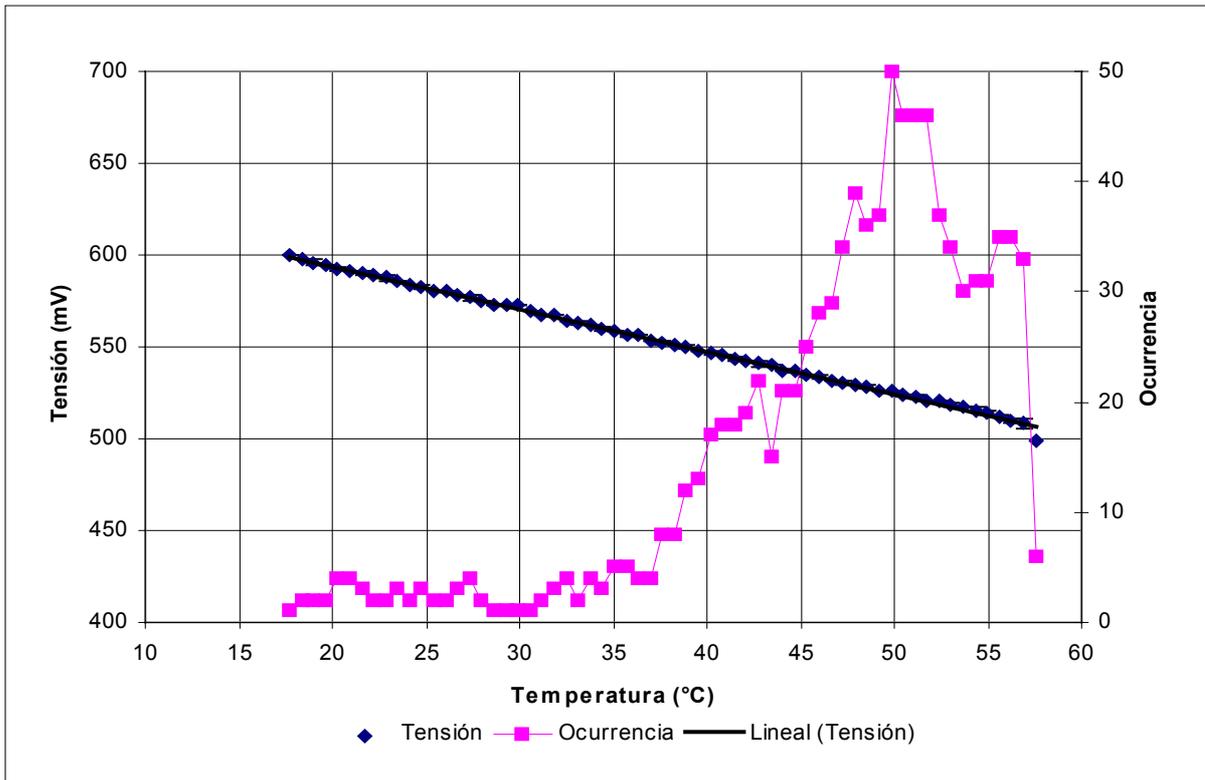


Fig. 3: Variación de  $V_{ca}$  y ocurrencia (número de veces en que se obtiene la misma medición) en función de la temperatura, para uno de los paneles. Datos correspondientes al día 3 de abril de 1999.

$V_{ca}$  presenta un comportamiento linealmente decreciente (Fig. 3), en buen acuerdo con el modelo teórico. Se calcularon las pendientes y ordenadas al origen de dichas rectas. La Tabla 1 presenta valores típicos de las pendientes y ordenadas al origen para un día de cada mes del período estudiado. El día 21 de enero es el único en esta tabla en el cual el satélite estuvo permanentemente al sol (o sea, sin eclipses). La gran diferencia entre los parámetros correspondientes a este día y el resto, parecen indicar la necesidad de un análisis más cuidadoso de estos casos. Dejando de lado, entonces, la primera fila de la Tabla 1, puede realizarse una evaluación preliminar de los parámetros correspondientes a los demás datos, a fin de analizar posibles deterioros de los dispositivos debidos a daños por radiación. Si bien una primera impresión podría indicar una caída en la tensión con el correr de los meses (ver ordenada al origen), las pequeñas diferencias obtenidas se encuentran dentro del error de determinación de estos parámetros, lo que no permite sacar conclusiones significativas.

Tabla 1: Valores típicos de los parámetros del ajuste lineal de  $V_{ca}$  para uno de los paneles.

Fecha	Pendiente	Panel 1		Pendiente	Panel 2	
		Ordenada al origen	$R^2$		Ordenada al origen	$R^2$
21 enero	-2.06	624.8	0.9959	-2.82	681.6	0.9802
22 febrero	-2.31	641.2	0.9988	-2.32	649.0	0.9986
31 marzo	-2.30	639.6	0.9988	-2.31	647.2	0.9985
22 abril	-2.30	638.8	0.9976	-2.30	646.5	0.9987
29 mayo	-2.28	637.6	0.9992	-2.29	645.3	0.9986
23 junio	-2.27	636.4	0.9998	-2.29	644.8	0.9999
10 julio	-2.28	637.6	0.9996	-2.29	644.8	0.9995

La Fig. 4 muestra la variación de  $I_{cc}$  en función de la temperatura. Si los paneles recibieran únicamente radiación solar directa,  $I_{cc}$  debería tener un comportamiento monótonamente creciente con la temperatura, hecho que no se refleja en el gráfico. Esto se debe a que, en gran parte de la órbita, los paneles reciben también radiación reflejada por la Tierra (albedo). Los puntos de mayor temperatura en la Fig. 4 corresponden a períodos en los cuales el satélite está entrando en zonas de eclipse, mientras que los de menor temperatura, a períodos en los cuales está saliendo de las zonas de eclipse. El efecto del albedo es notable en la medición de  $I_{cc}$  por la dependencia lineal de este parámetro con la intensidad de la radiación recibida. En cambio, dado que  $V_{ca}$  es una función logarítmica de esta intensidad, la influencia del albedo sobre la tensión de circuito abierto es prácticamente despreciable.

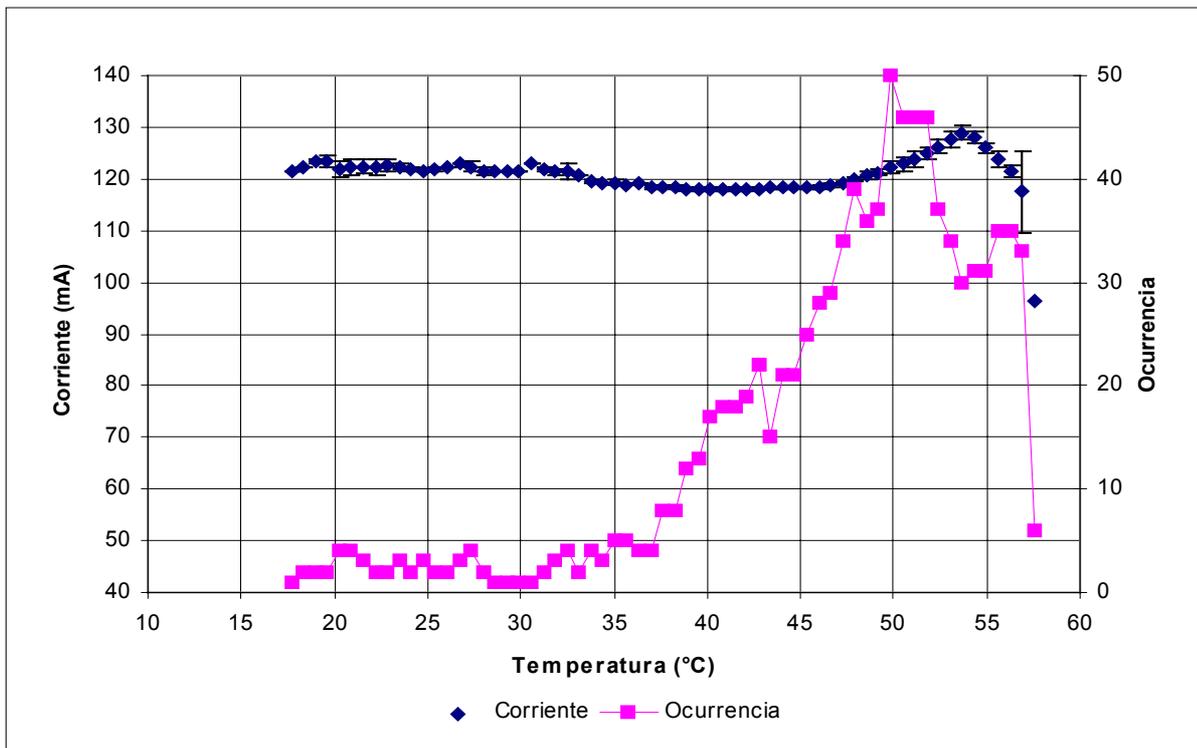


Fig. 4: Variación diaria de  $I_{cc}$  y ocurrencia en función de la temperatura, para uno de los paneles. Datos correspondientes al día 3 de abril de 1999.

Los análisis realizados hasta el presente muestran 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 encuentran en buen acuerdo con las estimaciones teóricas realizadas en base a las mediciones realizadas en Tierra.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los demás integrantes del Grupo Energía Solar de la CNEA por su activa participación en el proyecto de desarrollo de celdas solares para usos espaciales. Asimismo, agradecen a los profesionales y técnicos de la CONAE y de la empresa INVAP S.E que colaboraron en diversas etapas del presente proyecto.

#### REFERENCIAS

- [1] C.G. Bolzi et al., Elaboración y caracterización de celdas y paneles solares de Silicio cristalino para su ensayo en el satélite Sac-a. *Actas de la XIX Reunión de Trabajo de la ASADES*, pág. 05.1 (1996).