

## DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE CELDAS SOLARES EN EL ESPACIO A PARTIR DE MEDICIONES RECIBIDAS POR TELEMETRÍA\*

E.M. Godfrin, M.G. Martínez Bogado<sup>1</sup>, M.J.L. Tamasi y J.C. Durán  
Grupo Energía Solar - Departamento de Física - Centro Atómico Constituyentes - CNEA  
Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín - Argentina  
Tel. (011) 4754-7132, Fax (011) 4754-7121, www.tandar.cnea.gov.ar, duran@cnea.gov.ar

### RESUMEN

El satélite argentino SAC-A fue puesto en órbita en diciembre de 1998 y su misión se extendió durante aproximadamente 10 meses. Este satélite llevó al espacio un conjunto de 18 celdas solares de silicio fabricadas en la CNEA. Se analizó el funcionamiento de dichas celdas mediante las mediciones eléctricas recibidas por telemetría entre enero y julio de 1999. Se estudió la variación de la tensión de circuito abierto ( $V_{ca}$ ) con la temperatura (0-70°C) y con la intensidad de la radiación solar incidente. Esta última varía debido a la presencia del albedo. Se calculó el coeficiente de temperatura para  $V_{ca}$ . A partir de la variación de  $V_{ca}$  con la intensidad, se realizaron estimaciones de parámetros del circuito equivalente de las celdas. La evolución temporal de los parámetros medidos no permite detectar degradación durante la misión. Los resultados obtenidos se comparan con mediciones en Tierra y con simulaciones teóricas.

celdas solares - silicio cristalino – uso espacial – características eléctricas

### INTRODUCCIÓN

El satélite argentino SAC-A, desarrollado por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y fabricado por la empresa INVAP S.E., fue puesto en órbita a mediados de diciembre de 1998 a una altura de aproximadamente 410 km. Por tratarse de un satélite experimental, no poseía sistema de propulsión propia que le permitiera corregir la pérdida de velocidad producida por el rozamiento con la atmósfera. Como consecuencia de ello y tal cual estaba previsto, su misión finalizó por la caída del satélite al cabo de alrededor de 10 meses de su puesta en órbita.

Entre otras experiencias y como parte de un acuerdo de colaboración entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la CONAE, la carga del SAC-A incluyó el primer ensayo de celdas solares argentinas en el espacio. Los dispositivos correspondientes, basados en celdas solares de silicio cristalino fabricadas por el Grupo Energía Solar (GES) de la CNEA, estuvieron asociados a dos objetivos diferentes:

- 2 paneles de 160mm × 70mm, compuestos por 7 celdas solares cada uno, para estudiar el comportamiento eléctrico de las celdas en el ambiente espacial;
- 4 celdas individuales, distribuidas en diferentes caras del satélite, las que, combinadas con 1 celda de cada panel, se utilizaron como sensores de posición angular, formando parte fundamental del sistema de orientación con respecto al Sol.

Se utilizaron celdas cuadradas de 25 mm de lado y 460 mm<sup>2</sup> de área activa, elaboradas a partir de obleas de Si monocristalino de origen comercial tipo Czochralski, dopadas con B y con una resistividad de aproximadamente 1 Ωcm. Poseían una estructura  $n^+pp^+$ , con una resistencia de capa en la cara frontal de aproximadamente 50-70 Ω/ , y contactos metálicos frontal (tipo grilla) y posterior formados por una multicapa de Ti-Pd-Ag. La estructura de los paneles y celdas individuales constaba de una base de Al con una lámina de Kapton. Sobre esta última se fijaron las celdas solares ya interconectadas, las que a su vez iban protegidas frontalmente con un vidrio dopado con cerio. El detalle de los procesos de elaboración de las celdas y paneles puede verse en la Ref. Bolzi et al. (1997).

En el presente trabajo se evalúan los parámetros característicos de las celdas de Si en el ambiente espacial a partir de las mediciones eléctricas recibidas por telemetría. Previamente, se presentan simulaciones teóricas y mediciones equivalentes realizadas en Tierra sobre dispositivos solares similares a los integrados en el satélite SAC-A.

### MEDICIONES EN TIERRA

Se realizaron en laboratorio mediciones de la curva corriente-tensión (I-V) de celdas solares con cobertura de vidrio y

---

\* Trabajo parcialmente financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica mediante subsidio BID 802/OC-AR, PICT'97 N°. 10-00000-00673.

<sup>1</sup> Becaria de Doctorado, subsidio BID 802/OC-AR, PICT'97 No. 10-00000-00673.

similares características a las integradas al satélite SAC-A. Para ello, se utilizó como fuente de iluminación un simulador solar simple, basado en lámparas halógenas de tungsteno con reflector dicróico, junto con un sistema de adquisición de datos y una carga electrónica variable que permite obtener la curva I-V en los 4 cuadrantes.

Utilizando una base termostatizada, se repitió la medición sobre cada celda para diferentes temperaturas, a fin de determinar los coeficientes de temperatura para la tensión de circuito abierto ( $V_{ca}$ ) y para la corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ). Las Figs. 1 y 2 muestran, respectivamente, la variación de  $V_{ca}$  e  $I_{cc}$  en función de la temperatura, juntamente con el resultado de las regresiones lineales correspondientes. Mientras que para  $V_{ca}$  se observa una buena correlación,  $I_{cc}$  muestra oscilaciones aleatorias importantes como consecuencia de que las variaciones asociadas al rango de temperatura barrido son similares al error de medición correspondiente.

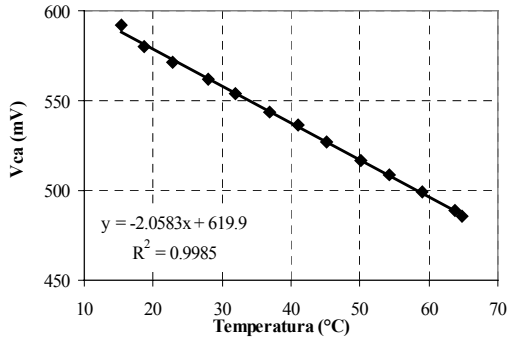


Fig. 1: Variación de  $V_{ca}$  con la temperatura para una celda solar de Si cristalino.

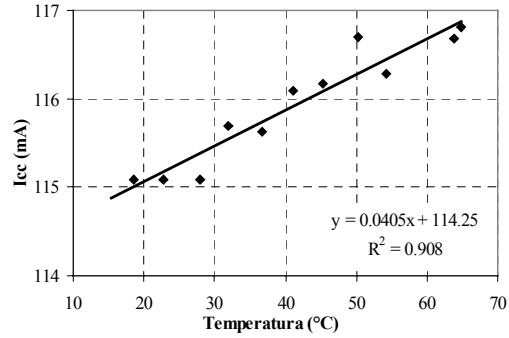


Fig. 2: Variación de  $I_{cc}$  con la temperatura para una celda solar de Si cristalino.

A fin de comparar los resultados experimentales con valores teóricos, se utilizó el programa de simulación cuasi-unidimensional PC-1D/5 (Clugstone et al., 1997). Se obtuvieron los siguientes coeficientes de temperatura:  $-2,26$  mV/°C para  $V_{ca}$  y  $0,052$  mA/°C para  $I_{cc}$ , prácticamente independientes del espectro de iluminación utilizado (AM0, AM1.5 o lámparas dicróicas) y de la intensidad de la radiación dentro del rango de interés.

Por otra parte, es posible encontrar una expresión aproximada que relaciona  $V_{ca}$  con  $I_{cc}$  a partir de la ecuación:

$$I = I_f - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + I r_s)}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + I r_s}{r_p} \quad (1)$$

donde  $I_f$  es la corriente fotogenerada,  $I_0$ , la corriente de saturación del diodo,  $q$ , la carga del electrón,  $k$ , la constante de Boltzmann,  $T$ , la temperatura absoluta,  $A$ , el factor de idealidad del diodo,  $r_s$ , la resistencia serie del dispositivo, y  $r_p$ , la resistencia paralelo.

Considerando la celda en cortocircuito ( $I = 0$ ), despreciando el término asociado a  $r_p$  (o sea,  $r_p = \infty$ ) y aproximando la corriente fotogenerada por  $I_{cc}$ , se obtiene la siguiente expresión que relaciona  $V_{ca}$  con  $I_{cc}$ :

$$V_{ca} = AV_T \ln(I_{cc}) - AV_T \ln(I_0) \quad (2)$$

donde, por simplicidad de notación, se ha introducido el parámetro  $V_T = \frac{kT}{q}$ .

Midiendo, a temperatura controlada,  $V_{ca}$  en función del  $\ln(I_{cc})$  variando la intensidad de la radiación incidente mediante filtros neutros, de manera tal de no modificar el espectro, y realizando la regresión lineal, se pueden obtener el factor de idealidad,  $A$ , y la corriente de saturación del diodo,  $I_0$ .

Se midieron  $V_{ca}$  e  $I_{cc}$  a una temperatura de celda de  $45^\circ\text{C}$  y con tres intensidades equivalentes a  $1 \text{ kW/m}^2$  (sin filtro),  $0,5 \text{ kW/m}^2$  (con filtro neutro de 50% de transmitancia) y  $0,25 \text{ kW/m}^2$  (con filtro del 25%), obteniéndose  $A = 1,2$  y una densidad de corriente de saturación  $J_0 = 2,3 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2$ .

## ANÁLISIS DE DATOS RECIBIDOS POR TELEMETRÍA

Se analizaron los datos recibidos por telemetría en el periodo comprendido entre los meses de enero y julio de 1999. Durante los intervalos de medición, se recibía un juego completo de datos de los diferentes subsistemas del satélite (entre los cuales se encontraban los dispositivos de Si cristalino) cada 16 segundos. Información adicional sobre las características del sistema de telemetría del SAC-A puede verse en la Ref. Godfrin et al. (1999).

Durante los períodos de iluminación (esto es, con el satélite fuera de las regiones de eclipse), el satélite se encontraba generalmente con su cara frontal orientada al Sol, a fin de maximizar la potencia generada por los paneles solares de alimentación (de origen italiano y basados en celdas de GaAs). El sistema de control de posición angular del SAC-A utilizaba 4 de las celdas de Si (1 en cada panel y 2 individuales), inclinadas a  $45^\circ$  con relación a la cara frontal, para determinar y corregir la orientación con respecto al Sol. Resumiendo, el satélite orientado correctamente corresponde a igual radiación (en consecuencia, igual  $I_{cc}$ ) sobre dichas celdas y, en particular, sobre los paneles nacionales. Todos los datos presentados en adelante corresponden a estas condiciones.

La corriente de cortocircuito presenta importantes variaciones debido a la presencia del albedo (radiación reflejada en la Tierra). Se observan, incluso, valores de  $I_{cc}$  muy por debajo del correspondiente a la radiación solar directa ( $967 \text{ W/m}^2 = 1367 \text{ W/m}^2 \times \cos 45^\circ$ ) con el satélite correctamente orientado. Ello significa que el satélite logra orientarse en casos en los que sólo recibe radiación de la Tierra. Se distinguieron esencialmente tres tipos de iluminaciones: sólo radiación solar ( $967 \text{ W/m}^2$ ), radiación solar más albedo y sólo albedo, dependiendo de la posición relativa del satélite con respecto al Sol y la Tierra.

Las Figs. 3 a 5 muestran ejemplos característicos de la variación de  $I_{cc}$  y  $V_{ca}$  con el tiempo para diferentes tipos de órbitas. La Fig. 3 corresponde a un conjunto de órbitas sin eclipses, las que se obtienen cuando el eje de rotación de la órbita es prácticamente paralelo al eje Tierra-Sol. En estas órbitas se observa una leve variación de  $I_{cc}$  asociada a modificaciones en el albedo y una tensión de circuito abierto prácticamente invariante, debido a que la temperatura en estas órbitas sufre escasas modificaciones. Por su parte, la Fig. 4 muestra el caso de órbitas con eclipses. Aquí se observa una  $I_{cc}$  con pequeñas variaciones durante los períodos de iluminación, saltos muy bruscos de la corriente a la entrada y salida de los eclipses y una variación relativamente importante de  $V_{ca}$  asociada al calentamiento que sufre el satélite a la salida del eclipse. Finalmente, la Fig. 5 corresponde a un ejemplo de un caso intermedio entre los anteriores, en el cual el satélite entra en zonas de eclipse parcial, observándose numerosas mediciones con valores de  $I_{cc}$  muy por debajo de la radiación solar directa.

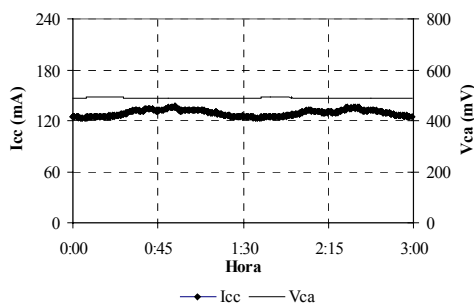


Fig. 3:  $I_{cc}$  y  $V_{ca}$  vs. tiempo para órbitas sin eclipse (21 de enero).

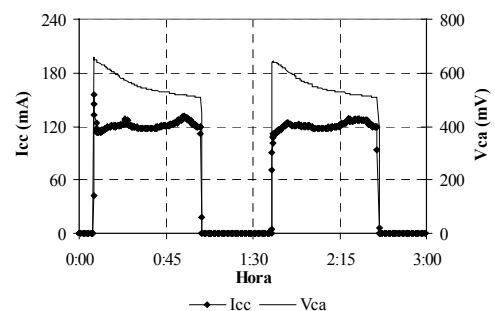


Fig. 4:  $I_{cc}$  y  $V_{ca}$  vs. tiempo para órbitas con eclipse (3 de abril).

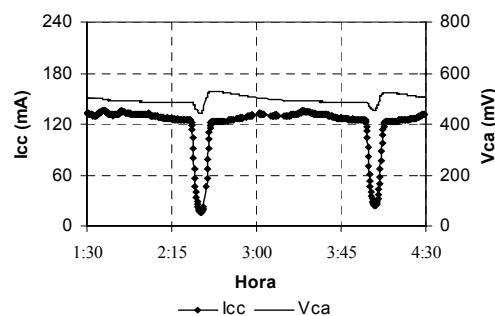


Fig. 5:  $I_{cc}$  y  $V_{ca}$  vs. tiempo para órbitas con eclipse parcial (19 de enero).

Del total de datos recibidos por telemetría, se seleccionaron los registros en los cuales el satélite se encontraba iluminado (radiación recibida por los sensores de ángulo frontales mayor que  $300 \text{ W/m}^2$ ) y correctamente orientado. Utilizando estos registros, se analizó la dependencia con la temperatura de  $I_{cc}$  y  $V_{ca}$ . En el caso de la corriente, se observó que las variaciones en la señal están esencialmente asociadas a las modificaciones en la radiación incidente según se describió previamente. En

consecuencia, no es posible evaluar el coeficiente de temperatura para  $I_{cc}$  a partir de los datos satelitales.

Por el contrario, la débil dependencia (logarítmica) de la tensión de circuito abierto con la radiación, da lugar a gráficos de  $V_{ca}$  vs.  $T$  con buena correlación lineal. Los apartamientos observados se deben a variaciones importantes en la radiación incidente y pueden ser corregidos en forma aproximada utilizando la Ec. (2), en la cual  $I_{cc}$  representa una medida de la radiación incidente sobre los paneles. La Fig. 6 muestra  $V_{ca}$  vs.  $T$  (datos directos del satélite) y el ajuste lineal correspondiente, para el día 19/1 (día con eclipses parciales). Por su parte, la Fig. 7 representa el mismo gráfico pero con los valores de  $V_{ca}$  normalizados para una radiación de  $967 \text{ W/m}^2$ , obteniéndose una mejor correlación. La pendiente de la recta obtenida por cuadrados mínimos representa el coeficiente de temperatura para  $V_{ca}$ .

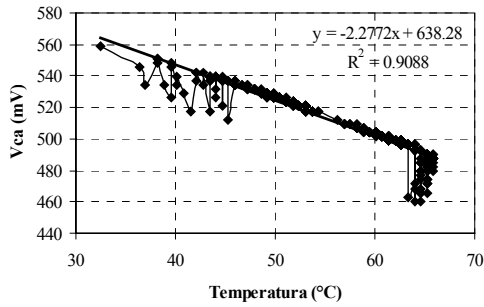


Fig. 6:  $V_{ca}$  vs.  $T$  sin normalización (datos directos del satélite) y ajuste lineal correspondiente (19 de enero).

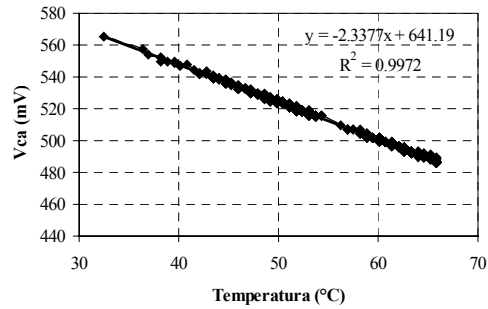


Fig. 7:  $V_{ca}$  vs.  $T$  normalizados y ajuste lineal correspondiente (19 de enero).

Siguiendo los lineamientos descritos en el párrafo precedente, se realizó la regresión lineal día por día desde el 9/1 hasta el 10/7 a fin de evaluar la posible degradación de la tensión de circuito abierto de los dispositivos. La Tabla 1 muestra las pendientes, ordenadas al origen y coeficientes de correlación para un conjunto de días que cubren el período completo.

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

Fecha	Panel 1			Panel 2		
	Pendiente	Ordenada al origen	$R^2$	Pendiente	Ordenada al origen	$R^2$
9 enero	-2.26	638	0,9876	-2.29	649	0,9920
20 enero	-2.39	644	0,9775	-2.39	651	0,9644
1 febrero	-2.31	640	0,9929	-2.33	648	0,9961
14 febrero	-2.29	639	0,9996	-2.30	646	0,9997
28 febrero	-2.28	638	0,9996	-2.29	645	0,9996
30 marzo	-2.29	639	0,9951	-2.33	647	0,9965
17 abril	-2.30	639	0,9994	-2.32	647	0,9995
1 mayo	-2.29	638	0,9996	-2.29	646	0,9996
15 mayo	-2.29	638	0,9993	-2.30	646	0,9995
1 junio	-2.29	638	0,9977	-2.30	646	0,9984
14 junio	-2.30	639	0,9995	-2.31	646	0,9995
1 julio	-2.9	638	0,9994	-2.30	646	0,9995
10 julio	-2.29	638	0,9992	-2.30	646	0,9993

Finalmente, se determinaron el factor de idealidad  $A$  y la corriente de saturación del diodo a partir de la variación de  $V_{ca}$  con  $I_{cc}$  (o sea, con la intensidad de la radiación) a temperatura constante (Ec. (2)). Es de destacar que para la mayoría de las temperaturas en las que operaron los paneles en el espacio, el rango de la intensidad de la radiación recibida es relativamente pequeño, no siendo apropiado para realizar la correlación. Los mejores días para estudiar la dependencia con la radiación fueron aquéllos en los que el satélite entraba en eclipse parcial durante parte de la órbita. En la Fig. 8 se observa el gráfico correspondiente a  $V_{ca}$  vs.  $\ln(I_{cc})$  y su correspondiente regresión lineal. Los valores de la pendiente y de la ordenada al origen permiten calcular el factor de idealidad  $A$ , la corriente de saturación del diodo  $I_0$  y la densidad de corriente  $J_0$ , resultando:

$$A = 1,06$$

$$I_0 = 1.17 \times 10^{-6} \text{ mA}$$

$$J_0 = 2,5 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2$$

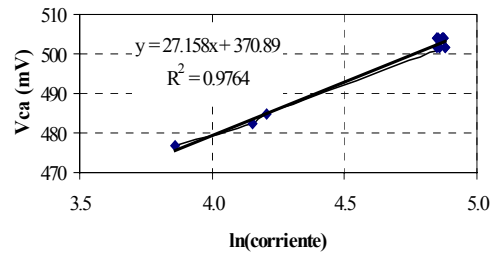


Fig. 8:  $V_{ca}$  vs.  $\ln(I_{cc})$  y su correspondiente regresión lineal para el 19 de enero.

## CONCLUSIONES

El satélite argentino SAC-A fue puesto en órbita en diciembre de 1998 y su misión se extendió durante aproximadamente 10 meses. En este satélite se llevó al espacio, por primera vez, un conjunto de 18 celdas solares de silicio fabricadas íntegramente en la Argentina. Se analizó el funcionamiento de dichas celdas mediante las mediciones eléctricas recibidas por telemetría entre enero y julio de 1999, estudiándose la variación de la tensión de circuito abierto ( $V_{ca}$ ) con la temperatura (0-70°C) y con la intensidad de la radiación solar incidente, dado que esta última varía debido a la presencia del albedo. Se realizó el cálculo del coeficiente de temperatura para  $V_{ca}$ . Asimismo, a partir de la variación de  $V_{ca}$  con la intensidad, se realizaron estimaciones de parámetros del circuito equivalente de las celdas.

Dado que con el equipamiento disponible no fue posible obtener en forma confiable en laboratorio el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito, la determinación de la radiación incidente en el espacio se realizó utilizando la corriente de cortocircuito corregida empleando el coeficiente resultante de la simulación numérica.

Los valores del factor de idealidad y de la densidad de la corriente de saturación del diodo calculados a partir de los datos directos del satélite resultan similares a los obtenidos a partir de mediciones en Tierra.

En cuanto a la calibración de las celdas que se utilizaron como sensores de radiación, se identificaron los datos correspondientes al satélite ubicado entre el Sol y la Tierra, a fin de garantizar que las 4 celdas frontales recibieran sólo radiación solar directa. En estas condiciones, las celdas de la cara posterior reciben de la Tierra una iluminación relativamente alta (típicamente, 1/3 de la frontal) y con igual intensidad en ambas. Este fue el criterio utilizado para calibrar los sensores de radiación.

Los análisis realizados 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 obtenidas en base a las mediciones realizadas en Tierra. La evolución temporal de los parámetros medidos no permite detectar degradación de los mismos durante la duración de la misión.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los demás integrantes del Grupo Energía Solar de la CNEA, en particular a C.J. Bruno y C.G. Bolzi, 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

- Bolzi C.G., Merino L.M., Tamasi M.J.L., Plá J.C., Durán J.C., Bruno C.J., Godfrin E.M., Lamagna A., Barrera M.P. y 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 I, Nro. 2, 1.*
- Clugstone D. y Basore P. (1997). PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers. *26th Photovoltaic Specialist Conference, Anaheim, California, 207.*
- Godfrin E.M., Martínez Bogado M.G., Tamasi M.J.L., Durán J.C., Primera experiencia de celdas solares argentinas en el espacio.: análisis preliminar de los resultados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 3, pág. 04.25 (1999).*

## ABSTRACT

SAC-A Argentine satellite was launched on December 1998 and it has been in orbit during approximately 10 months. This satellite brought to the space a set of 18 silicon solar cells fabricated in the Argentine National Atomic Energy Commission

(CNEA). The operation of those cells has been analyzed by means of the electrical measurements received from January till July 1999. The variation of the open circuit voltage of the cells has been studied as a function of temperature operation (0-70°C) and solar radiation intensity. The temperature coefficient for the open circuit voltage has been obtained. From the variation of this voltage as a function of the intensity, some parameters of equivalent circuit of the solar cells have been estimated. No relevant degradation of the electrical characteristics of the cells could be observed during the mission. Results obtained from telemetry data are compared with measurements in Earth and theoretical simulations.