

MISIÓN SATELITAL SAOCOM 1A: ESTIMACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS CELDAS SOLARES TRAS 5 AÑOS DE OPERACIÓN EN ÓRBITA

Elena M. Godfrin y Julio C. Durán

Departamento Energía Solar, Centro Atómico Constituyentes, CNEA
(B1650) San Martín, Provincia de Buenos Aires - Argentina
Tel. +54 11 67727132 - e-mail: godfrin.cnea@gmail.com

RESUMEN: El satélite SAOCOM 1A de la Misión SAOCOM 1 fue desarrollado y construido por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) junto con organismos y empresas del sistema científico y tecnológico nacional de la República Argentina. El instrumento principal de este satélite es una antena radar de apertura sintética cuyo consumo en operación es de alrededor de 4 kW. La alimentación eléctrica de la plataforma y los instrumentos del satélite se obtiene mediante paneles solares que fueron diseñados y fabricados en el Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Desde la puesta en órbita del satélite, la CONAE recibe por telemetría datos referentes al funcionamiento de sus instrumentos y de los paneles solares. A fin de evaluar la degradación de las celdas solares luego de 5 años en órbita se realizó un análisis de los datos disponibles. Además, se calculó una cota inferior de la potencia media orbital generada por los paneles solares. Los resultados obtenidos muestran una degradación inferior a la esperada y que la potencia media orbital cumple con el requerimiento “*Interface Control Document SOG-PAS-IC-00100-A SA ICD*”.

Palabras clave: energía solar, satélite, celdas solares, degradación, ambiente espacial

INTRODUCCIÓN

El satélite SAOCOM 1A, junto con el SAOCOM 1B forman parte de la Constelación SAOCOM 1 que se encuadra dentro del Plan Espacial Nacional. Dicho Plan desde su primera versión, que abarcó el período 1995-2000, viene siendo revisado y actualizado periódicamente (CONAE. Plan Espacial Nacional, 2024).

El objetivo central de los satélites SAOCOM de Observación de la Tierra es la medición de la humedad del suelo y aplicaciones en emergencias, tales como detección de derrames de hidrocarburos en el mar y seguimiento de la cobertura de agua durante inundaciones. Es un proyecto desarrollado en colaboración con la Agencia Espacial Italiana (ASI) e integra de manera operacional, junto con los satélites italianos COSMO-SkyMed, el Sistema Italo-Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias (CONAE. Misiones satelitales – SIASGE, 2024).

Los satélites de la constelación SAOCOM 1 fueron construidos junto con organismos y empresas del sistema científico y tecnológico nacional, como INVAP (contratista principal), CNEA y VENG (empresa argentina de servicios y desarrollos tecnológicos de alto valor agregado especializada en la actividad espacial); comparten los mismos requerimientos de diseño, funcionalidad y operatividad, por lo que su desarrollo se llevó a cabo en simultáneo dando como resultado dos satélites idénticos (CONAE Misiones satelitales - SAOCOM, 2024).

El SAOCOM 1A fue puesto en órbita el 7 de octubre de 2018 y el SAOCOM 1B el 30 de agosto de 2020, con un tiempo de vida útil estimado de, por lo menos, 5 años para cada satélite. Ambos satélites

son de cobertura global y poseen un ciclo de repetición orbital de 16 días para cada satélite, lo que resulta en 8 días para la constelación.

Los satélites SAOCOM 1A y 1B se desplazan sobre una órbita polar heliosincrónica, situada a una altura nominal de 620 km, con una inclinación de 98° , siendo la hora orbital del nodo ascendente las 6 horas. El período orbital es de 98 minutos, con períodos de eclipse de duración variable durante aproximadamente 3 meses por año (principios de noviembre a principios de febrero), con una duración máxima de aproximadamente 20 minutos el 21 de diciembre. El ángulo comprendido entre la normal a la órbita y la eclíptica varía entre 31° (en diciembre) y 4° (en abril y septiembre).

El instrumento principal es una antena radar de apertura sintética, con una potencia de 4 kW, diseñada especialmente para detectar pequeñas variaciones de humedad del suelo en la dirección horizontal. También por tratarse de una banda L, puede penetrar por debajo de la superficie generando información del perfil de humedad del suelo hasta 2 m de profundidad. Adicionalmente, dado que es un instrumento que opera en las microondas, posee una gran capacidad para identificar estructuras geométricas sobre la superficie terrestre. Esto le permite generar información de suma utilidad para la geología y la geomorfología. Los mayores consumos de los satélites están asociados a la operación de la antena radar y también a las maniobras de posicionamiento del satélite que le permiten observar en la dirección requerida. El satélite realiza observaciones a derecha en forma de operación nominal y, eventualmente, hacia la izquierda, mediante una rotación del satélite.

La alimentación eléctrica de la plataforma y los instrumentos de los satélites se obtiene mediante paneles solares que fueron diseñados y fabricados en el DES de la CNEA. El sistema de alimentación consta de 3 paneles, cada uno cuenta con 8 módulos de 4 o 5 cadenas interconectadas en paralelo, cada cadena posee 32 celdas interconectadas en serie. En Godfrin (2021) se dan las características de los paneles solares y la estimación de los parámetros característicos (corrientes de cortocircuito y de máxima potencia, tensiones a circuito abierto y de máxima potencia) de cada uno de ellos para ambos satélites.

En el espacio, los componentes electrónicos (incluidas las celdas solares) están expuestos a un entorno extremadamente hostil. La presencia de un fuerte campo de radiación debido a los rayos cósmicos y las partículas atrapadas por el campo magnético de la Tierra tiene efectos significativos en los dispositivos electrónicos, reduciendo eventualmente su vida útil en órbita (Ibarra et al, 2019; Duzellier, 2005). Por tal motivo, es importante realizar un seguimiento del funcionamiento de los paneles solares a lo largo de la misión.

Desde su puesta en órbita, los satélites transmiten por telemetría datos de su plataforma e instrumentos, la mayoría de las mediciones se realiza cada 8 segundos y otras, cada 40 segundos. Los datos de interés para este trabajo corresponden principalmente a los módulos de los paneles solares, el banco de baterías y los parámetros de la antena radar SAR. Para verificar el correcto funcionamiento, posibles anomalías, fallas o degradación de las celdas solares se analizan las corrientes medidas por telemetría de cada módulo, día a día, siguiendo el mismo procedimiento que el presentado en Godfrin (2021).

ESTIMACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS CELDAS SOLARES DEL SAOCOM 1A

Utilizando los datos del proveedor de las celdas (EMCORE, 2018), se realizaron simulaciones mediante la facilidad SPENVIS (Alurralde, 2008) para estimar la degradación de las celdas solares en el ambiente espacial. La disminución de la tensión a circuito abierto, luego de 5 años en órbita, da lugar a una reducción en la corriente entregada por los módulos a una tensión de trabajo constante y, por lo tanto, de la potencia que generan, con porcentajes de degradación que no superan el 5 % al cabo de 5 años.

A fin de evaluar el funcionamiento de los paneles solares en órbita y su evolución a lo largo de la misión, se seleccionó el 31 de octubre de 2018 (fecha cercana al lanzamiento y en la que el posicionamiento del satélite demostraba estabilidad) y de años sucesivos hasta 2023. El ángulo de incidencia de la radiación solar sobre los paneles (β) varía entre 3° y 27° a lo largo del día, con un promedio $\beta_{\text{prom}} = 22^\circ$ y no es época de eclipses. Se consideraron los datos en que la tensión de trabajo del bus de los paneles solares es de $V_{\text{trab}} = 61.15$ V, valor típico de dicha tensión, menor que la del punto de máxima potencia (PMP).

Además, se debe tener en cuenta que:

- los módulos se activan según el requerimiento de potencia del satélite, 4 ó 5 en funcionamiento de base y los 24 durante las observaciones con la antena SAR o a la salida de los eclipses;
- el 31 de octubre de 2018 no se realizaron observaciones con la antena SAR, sólo se encontraban operativos 4 módulos en forma continua y 5 módulos con conmutaciones;
- hasta junio de 2019, la antena SAR sólo se activaba en contadas ocasiones;
- cuando un módulo se activa (comienza a entregar potencia) o desactiva, el proceso de conmutación produce transitorios en la corriente que no permiten analizar su evolución;
- no se tienen datos de las tensiones de cada módulo, sólo se dispone de la tensión de operación del bus.

Las Tablas 1 a 4 y sus correspondientes gráficos (Figuras 1 a 4) muestran la evolución de los promedios diarios de las corrientes de los módulos que entregan potencia en forma permanente y de las corrientes en el punto de máxima potencia (I_{pmp}) obtenidas por simulación. El decaimiento de la corriente de los módulos al cabo de 5 años de misión es menor a 2 %. Las Figuras 1 a 4 presentan también el ajuste de la corriente de los módulos mediante regresión lineal. En todos los casos se observa que los promedios de las corrientes medidas son superiores a I_{pmp} , indicando que la tensión de trabajo en órbita es menor a la tensión del punto de máxima potencia, según lo previsto.

Los módulos se denominan SAPAn-MODm donde m indica el módulo y n el panel al que pertenece el mismo. Los módulos se presentan según el orden en que se van conectando, dependiendo de los requerimientos de potencia del satélite: SAPA1-MOD1, SAPA2-MOD1, SAPA3-MOD1 y SAPA1-MOD2.

Tabla 1: Decaimiento respecto de 2018 del promedio de la corriente en el punto de trabajo del SAPA1-MOD1 para el 31 de octubre.

SAPA1-MOD1	Corriente [A]	Decaimiento respecto de 2018 [%]	I_{pmp} simulada [A]
2018	2,166		2,123
2019	2,151	0,7	2,120
2020	2,146	0,9	2,118
2021	2,141	1,1	2,117
2022	2,141	1,2	2,123
2023	2,133	1,6	2,120

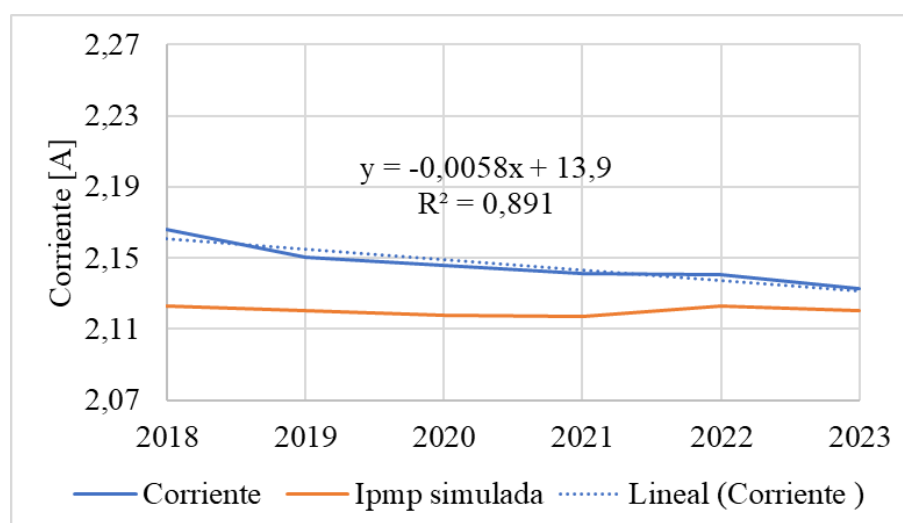


Figura 1: Evolución de la corriente del módulo SAPA1-MOD1 para el 31 de octubre entre 2018 y 2023, y su ajuste mediante regresión lineal. Se incluye como referencia I_{pmp} obtenida por simulación.

Tabla 2: Decaimiento respecto de 2018 del promedio de la corriente en el punto de trabajo del SAPA2-MOD1 para el 31 de octubre.

SAPA2-MOD1	Corriente [A]	Decaimiento respecto de 2018 [%]	I _{pmp} simulada [A]
2018	2,205		2,152
2019	2,193	0,5	2,150
2020	2,181	1,1	2,147
2021	2,175	1,4	2,146
2022	2,174	1,4	2,149
2023	2,166	1,8	2,150

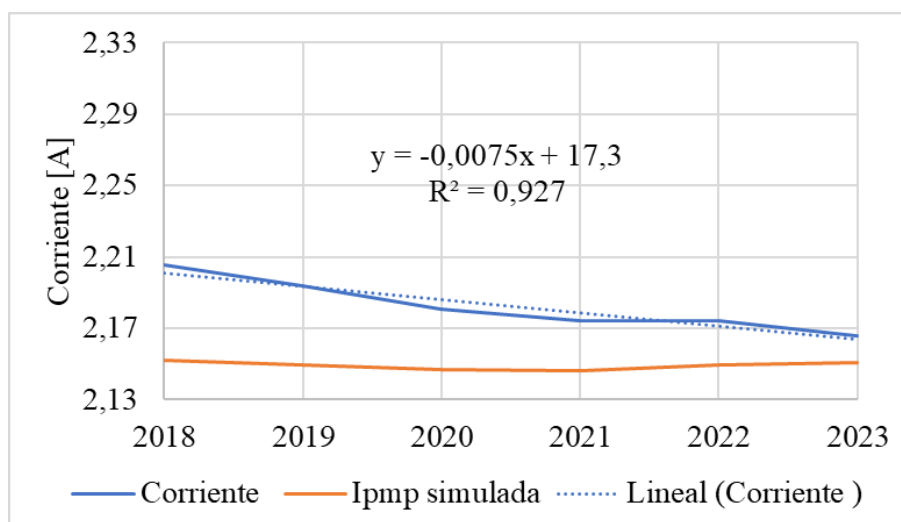


Figura 2: Evolución de la corriente del módulo SAPA2-MOD1 para el 31 de octubre entre 2018 y 2023, y su ajuste mediante regresión lineal. Se incluye como referencia I_{pmp} obtenida por simulación.

Tabla 3: Decaimiento respecto de 2018 del promedio de la corriente en el punto de trabajo del SAPA3-MOD1 para el 31 de octubre.

SAPA3-MOD1	Corriente [A]	Decaimiento respecto de 2018 [%]	I _{pmp} simulada [A]
2018	2,194		2,151
2019	2,181	0,6	2,149
2020	2,180	0,6	2,146
2021	2,175	0,9	2,145
2022	2,176	0,8	2,148
2023	2,170	1,1	2,150

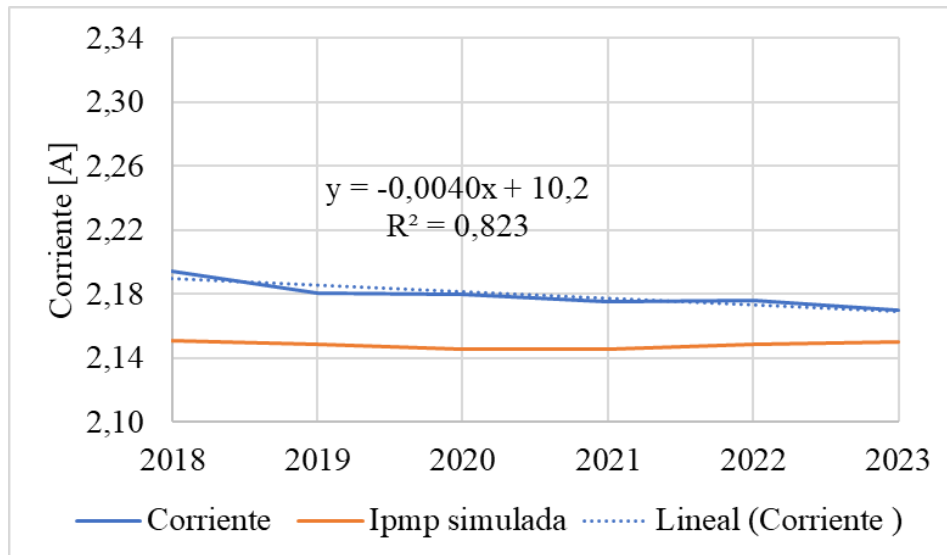


Figura 3: Evolución de la corriente del módulo SAPA3-MOD1 para el 31 de octubre entre 2018 y 2023, y su ajuste mediante regresión lineal. Se incluye como referencia I_{pmp} obtenida por simulación.

Tabla 4: Decaimiento respecto de 2018 del promedio de la corriente en el punto de trabajo del SAPA1-MOD2 para el 31 de octubre.

SAPA1-MOD2	Corriente [A]	Decaimiento respecto de 2018 [%]	I _{pmp} simulada [A]
2018	2,192		2,151
2019	2,174	0,8	2,149
2020	2,170	1,0	2,146
2021	2,164	1,3	2,145
2022	2,162	1,3	2,148
2023	2,154	1,7	2,150

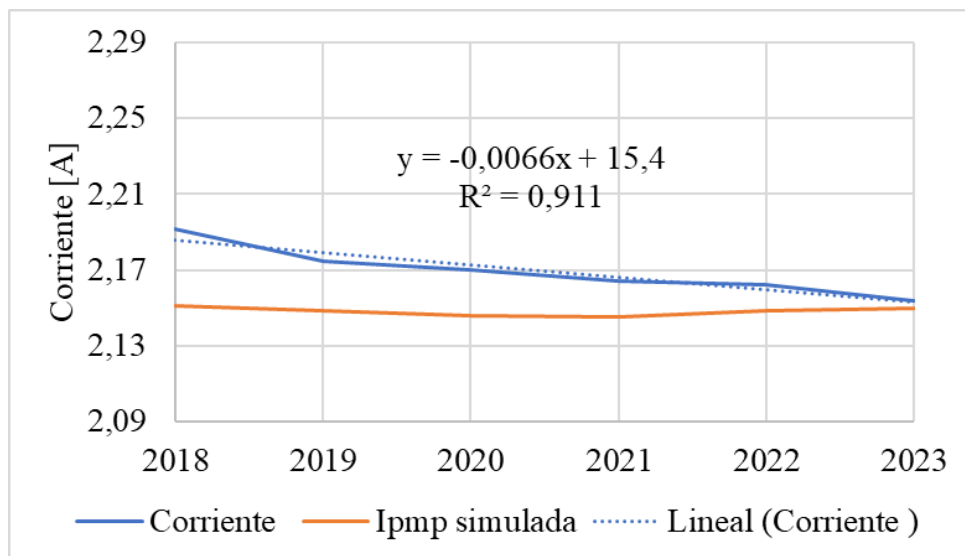


Figura 4: Evolución de la corriente del módulo SAPA1-MOD2 para el 31 de octubre entre 2018 y 2023, y su ajuste mediante regresión lineal. Se incluye como referencia I_{pmp} obtenida por simulación.

Simulaciones

Finalmente, con las curvas generadas para los módulos en base a las curvas de las celdas medidas en Tierra en el DES, se simularon las curvas I-V en BOL (comienzo de la misión, “*Beginning of Life*”) y EOL (fin de la vida útil del satélite, “*End of Life*”) para el 31 de octubre de 2018 y de 2023 respectivamente, utilizando los valores promedio de β y de la temperatura de operación obtenidos por telemetría (Godfrin, 2015). En la Figuras 5 a 8 se presentan las curvas obtenidas para BOL y EOL, con sus respectivos puntos de máxima potencia simulados y los promedios de las corrientes obtenidas de la telemetría. La recta vertical corresponde a la tensión de trabajo ($V_{\text{trab}} = 61.15 \text{ V}$), prácticamente constante, fijada por el banco de baterías del satélite.

Se observa un buen acuerdo entre los valores simulados y los promedios de los valores medidos en órbita para los cuatro módulos que no conmutan (MOD1 de los 3 paneles y MOD2 del SAPA1).

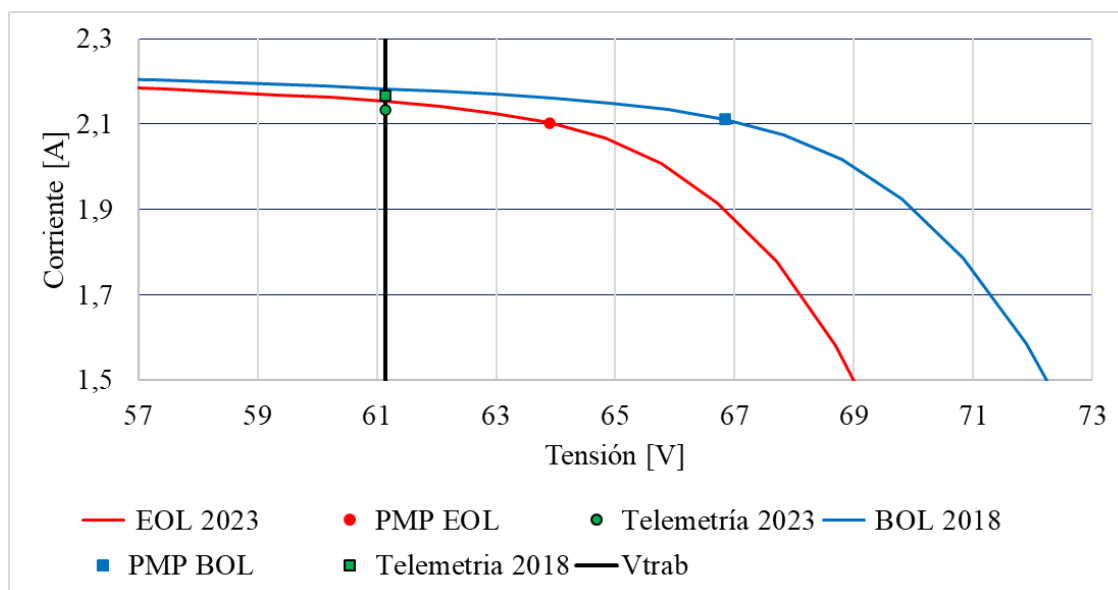


Figura 5: Curvas I-V simuladas en BOL y EOL, con sus respectivos puntos de máxima potencia y valores medidos (telemetría) de la corriente en el punto de trabajo de la tensión SAPA1-MOD1 para el 31 de octubre.

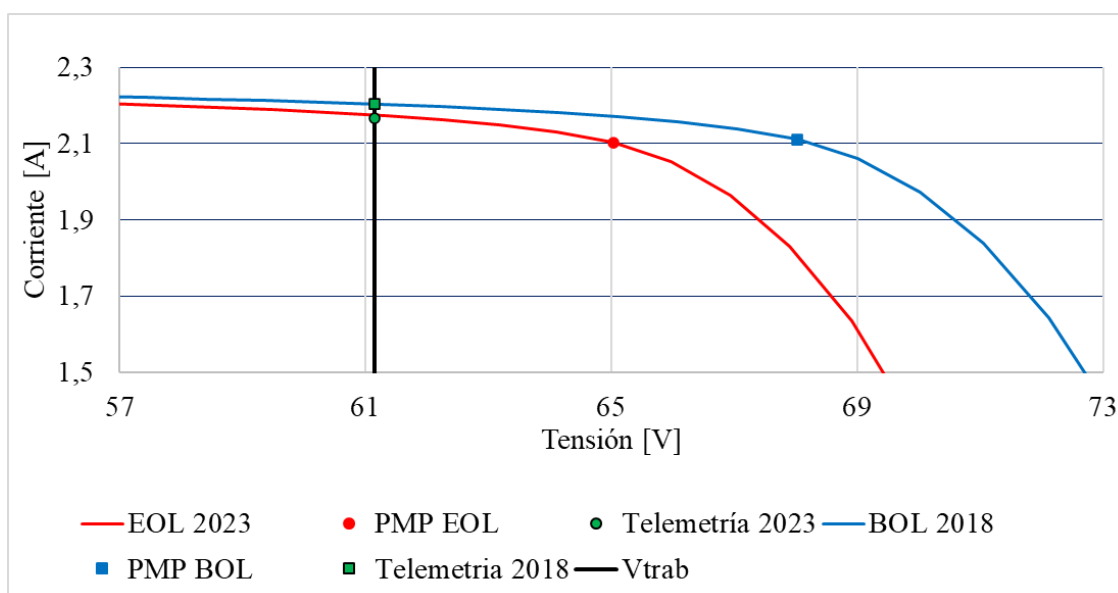


Figura 6: Curvas I-V simuladas en BOL y EOL, con sus respectivos puntos de máxima potencia y valores medidos (telemetría) de la corriente en el punto de trabajo de la tensión SAPA2-MOD1 para el 31 de octubre.

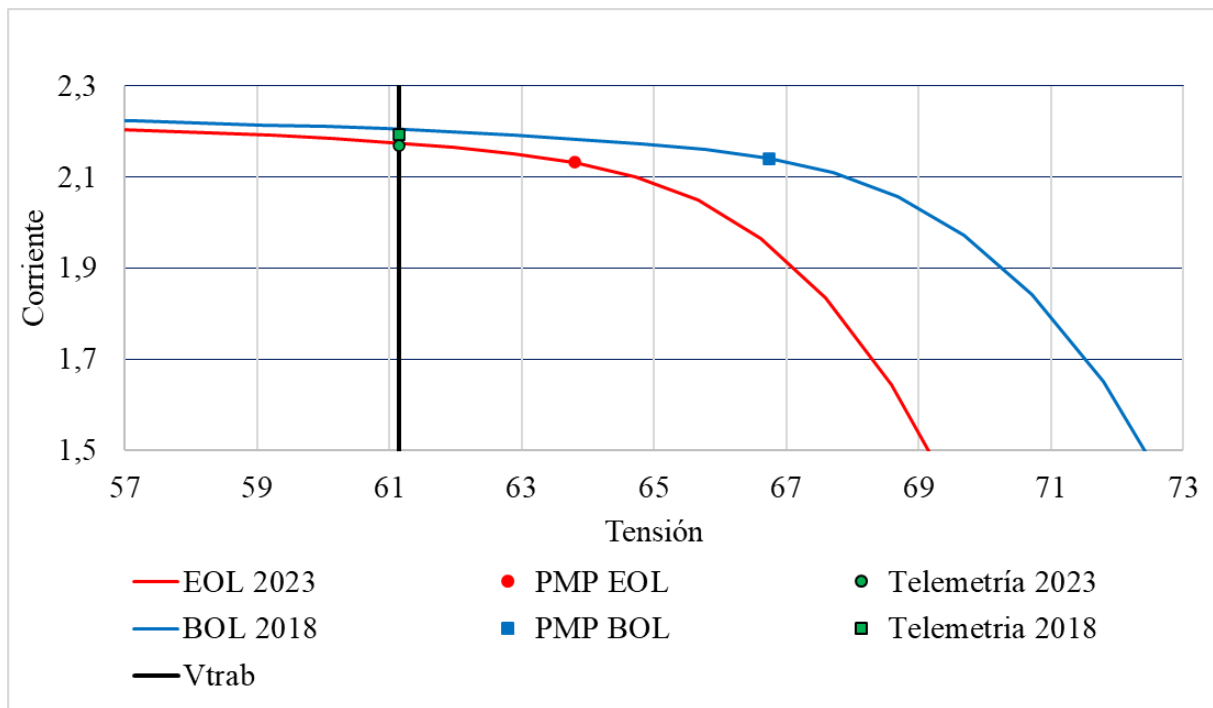


Figura 7: Curvas I-V simuladas en BOL y EOL, con sus respectivos puntos de máxima potencia y valores medidos (telemetría) de la corriente en el punto de trabajo de la tensión SAPA3-MOD1 para el 31 de octubre.

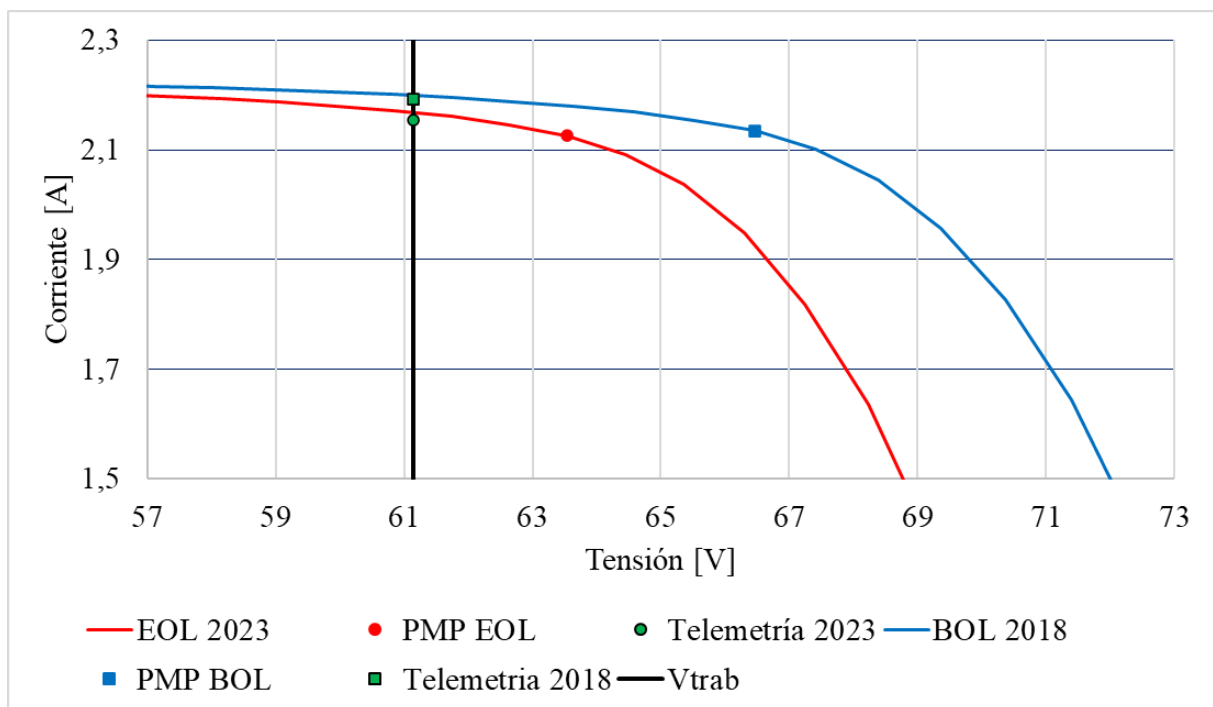


Figura 8: Curvas I-V simuladas en BOL y EOL, con sus respectivos puntos de máxima potencia y valores medidos (telemetría) de la corriente en el punto de trabajo de la tensión SAPA1-MOD2 para el 31 de octubre.

ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA MEDIA ORBITAL

El documento “Interface Control Document SOG-PAS-IC-00100-A SA ICD” (Garategaray L., 2010) establece que la potencia media orbital debe ser de 1900 W en las peores condiciones de iluminación (hecho que ocurre el 21 de diciembre cuando el eclipse tiene mayor duración), con la pérdida de un módulo, al final de la vida útil del satélite (al menos 5 años).

La potencia media orbital que podrían entregar los paneles solares en época de eclipses de máxima duración puede estimarse mediante la siguiente fórmula (Ecuación 1):

$$P_{orb} = P_{ent} * T_{ilum} / T_{orb} \quad (1)$$

donde P_{orb} es la potencia media orbital;

P_{ent} , la potencia entregada;

T_{ilum} , la duración del período orbital en que los paneles solares reciben radiación solar;

T_{orb} , la duración de la órbita.

A fin de determinar una cota mínima de la generación de los paneles en estas condiciones, se seleccionó una observación cercana al comienzo del eclipse (período de mínima generación) el 21 de diciembre de 2023. En las Figuras 9 y 10 se muestra la corriente en función del tiempo de los módulos SAPA3-MOD1 y SAPA3-MOD8 respectivamente, para la órbita seleccionada, junto con el indicador de observación (el valor 0 indica que no se están realizando observaciones, mientras que el valor 1 indica que se realiza una observación).

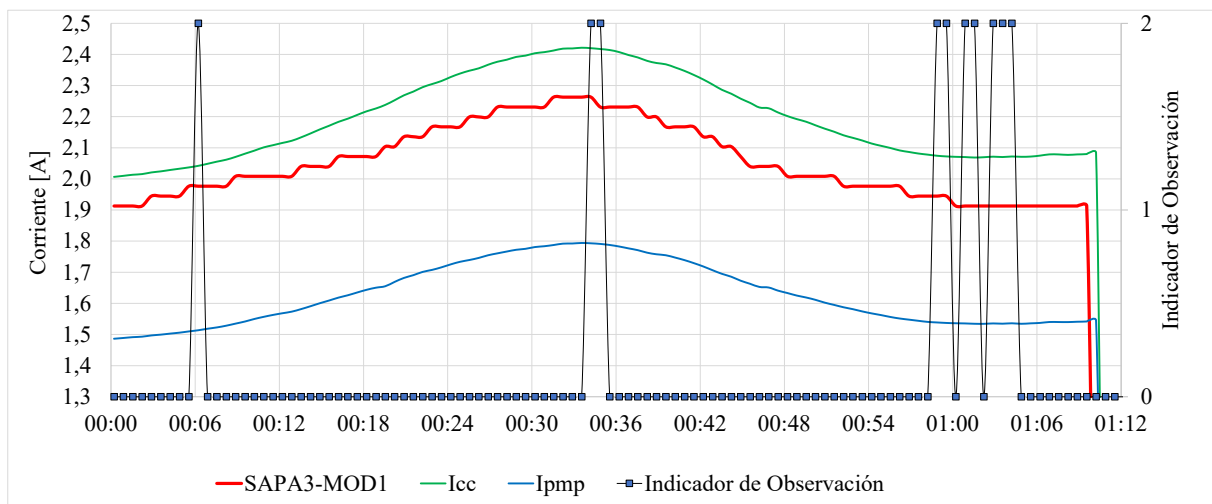


Figura 9. Corriente provista por telemetría, corriente de cortocircuito simulada, corriente del punto de máxima potencia simulada correspondientes a SAPA3-MOD1 e indicador de observación para el 21 de diciembre de 2023.

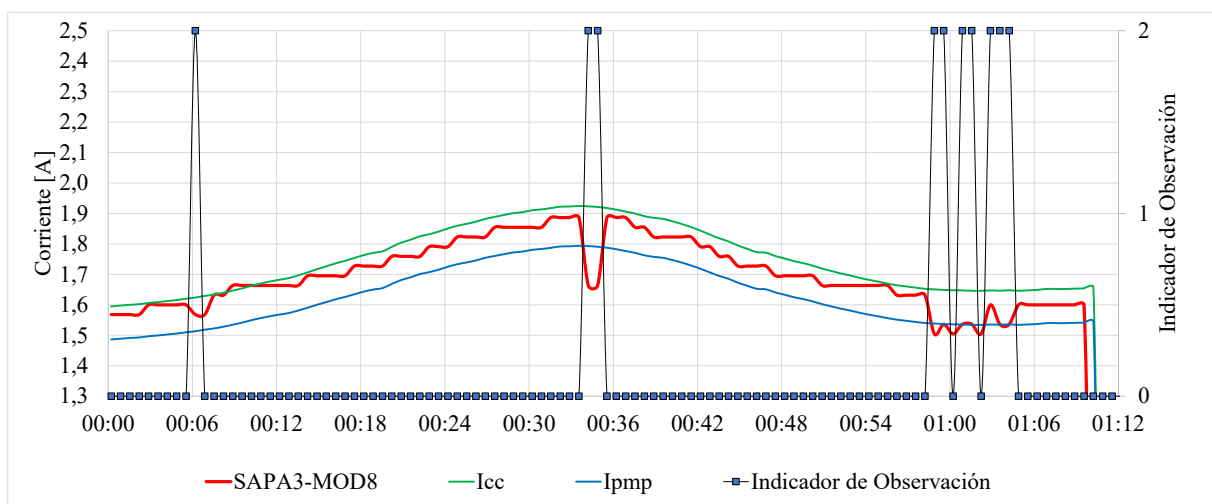


Figura 10. Corriente provista por telemetría, corriente de cortocircuito simulada, corriente del punto de máxima potencia simulada correspondientes a SAPA3-MOD8 e indicador de observación para el 21 de diciembre de 2023.

Los valores obtenidos de la potencia generada por los paneles solares para el 21 de diciembre de 2023 durante la observación y de la potencia media orbital con la pérdida de un módulo de 5 cadenas se consignan en la Tabla 5.

Tabla 5: Potencia generada por los paneles solares durante una observación y potencia media orbital estimada en las peores condiciones de iluminación, con la pérdida de un módulo de 5 cadenas para el SAOCOM 1A.

Fecha	Potencia generada por los 24 módulos [W]	Potencia media orbital (23 módulos) [W]
21/12/2023 00:58	2669	2029

La potencia orbital calculada en las peores condiciones de iluminación supera la cota de 1900 W impuesta en el requerimiento.

CONCLUSIONES

El satélite SAOCOM 1A forma parte de la Constelación SAOCOM 1 del Plan Espacial Nacional, cuyo objetivo principal es obtener productos específicos derivados de la información SAR, en particular mapas de humedad de suelo, con aplicaciones centrales dirigidas a la agricultura y la hidrología, también a la detección de derrames de hidrocarburos en el mar y seguimiento de la cobertura de agua durante inundaciones entre otras aplicaciones para la gestión de emergencias.

El instrumento principal es una antena radar de apertura sintética diseñada especialmente para detectar pequeñas variaciones de humedad del suelo en la dirección horizontal. También por tratarse de una banda L, puede penetrar por debajo de la superficie generando información del perfil de humedad del suelo hasta 2 m en profundidad. Adicionalmente, dado que es un instrumento que opera en las microondas, posee una gran capacidad para identificar estructuras geométricas sobre la superficie terrestre. Esto le permite generar información de suma utilidad para la geología y la geomorfología. Los mayores consumos de estos satélites están asociados a la operación de dicha antena, siendo de vital importancia que el suministro eléctrico provisto por los paneles solares sea el adecuado.

Desde su puesta en órbita, el satélite transmite por telemetría datos referentes a la plataforma, en particular de los paneles solares (tensión de trabajo y corrientes en dicha tensión), que permiten hacer un seguimiento del funcionamiento de los paneles solares.

Se analizó la evolución de los promedios diarios de las corrientes de los módulos que entregan potencia en forma permanente y se concluyó que el decaimiento de dichas corrientes al cabo de 5 años de misión es menor a 2 %. En todos los casos se observa que los promedios de las corrientes medidas son superiores a I_{pmp} , indicando que la tensión de trabajo en órbita es menor a la tensión del punto de máxima potencia, según lo previsto.

Se realizó una estimación de la potencia media orbital entregada por los paneles solares en las peores condiciones de iluminación y con un módulo menos, obteniéndose un valor que supera la cota de 1900 W impuesta en el requerimiento del Control de interfaz.

Por lo expuesto anteriormente, puede concluirse que los paneles solares del satélite SAOCOM 1A funcionan correctamente y de acuerdo con lo previsto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la importante colaboración del equipo de las misiones satelitales SAOCOM de la CONAE, en particular a David Macat, Mauricio Bazán y Lucas Bruno. Asimismo, agradecen a Laura Frulla y Laura Sarrate de la CONAE por la lectura y corrección constructiva del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Alurralde M. (2008). CAC-PSE-ENV-03000A-IN, EMCORE ATJ cells degradation prediction for five years missions using JPL method. Documento de circulación restringida.
- CONAE. Misiones Satelitales – SAOCOM (2024). <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/saocom>. (Último acceso: 11/08/2024).
- CONAE. Misiones satelitales – SIASGE (2024). <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/siasge>. (Último acceso: 11/08/2024).
- CONAE. Plan Espacial Nacional (2024). <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/plan-espacial>. (Último acceso: 11/08/2024).
- Duzellier S. (2005). Radiation effects on electronic devices in space. *Aerospace Science and Technology* 9,1, 93-99.
- EMCORE (2012). ATJ Photovoltaic cell. <http://dshett.com/doc/1248074/atj-photovoltaic-cell> (Último acceso: 08/08/2024).
- Garategaray L. (2010). Interface Control Document SOG-PAS-IC-00100-A SA ICD. Documento de CONAE de circulación restringida.
- Godfrin E.M. (2015). Simulación y modelización de paneles solares y de sistemas de potencia para aplicaciones espaciales. Tesis doctoral, Instituto Sábató, UNSAM-CNEA. <http://www.tandar.cnea.gov.ar/doctorado/tesis.html>. (Último acceso: 02/08/2024)
- Godfrin E.M. (2021). Misiones satelitales SAOCOM 1: Análisis del funcionamiento de los paneles solares en órbita, ERMA 47, 1-9. ISSN en línea: 2684-0073.
- Ibarra M.L., García J.A., Dato A., Yaccuzzi E., Prario I., Filevich A., Barrera M., Alurralde M. (2019). E.D.R.A., the Argentine facility to simulate radiation damage in space. *Radiation Physics and Chemistry* 154, 79-84. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.08.032>.

SAOCOM 1A SATELLITE MISSION: ESTIMATION OF THE DEGRADATION OF SOLAR CELLS AFTER 5 YEARS OF OPERATION IN ORBIT

ABSTRACT: The SAOCOM 1A satellite was developed and built by the National Commission for Space Activities (CONAE) together with organizations and companies of the national scientific and technological system of the Argentine Republic. The main instrument of this satellite is a synthetic aperture radar antenna whose operating consumption is around 4 kW. The electrical power for the platform and satellite instruments is obtained through solar panels that were designed and manufactured in the Solar Energy Department (DES) of the National Atomic Energy Commission (CNEA). Since the satellite was launched, CONAE receives data via telemetry regarding the operation of its instruments and solar panels. After 5 years in orbit and having detected a decrease in the working current of the modules that deliver power continuously, an analysis of the available data was carried out to estimate the degradation of the solar cells. In addition, a lower bound on the orbital mean power generated by the solar panels was calculated. The results obtained show a degradation lower than expected and that the orbital mean power meets the requirement established in the Interface Control Document.

Keywords: solar energy, satellite, solar cells, degradation, space environment