

PANELES SOLARES PARA LA MISIÓN SATELITAL SAOCOM: PRIMERAS ETAPAS DE DISEÑO*

E.M. Godfrin y J.C. Durán

Departamento de Física – Centro Atómico Constituyentes – CNEA

Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín - Argentina

Tel. (011) 6772-7007, Fax (011) 6772-7121, www.tandar.cnea.gov.ar, godfrin@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN

En abril de 2001, la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) suscribieron un convenio de cooperación que dio lugar a la iniciación del Subproyecto Paneles Solares en el ámbito del Centro Atómico Constituyentes. El objetivo de este Subproyecto es diseñar, fabricar, ensayar y calificar en el país los paneles solares para la misión satelital SAOCOM. Los requerimientos de potencia y las diferentes restricciones impuestas por el proyecto hacen necesario un cuidadoso estudio del diseño del subsistema de potencia. En este trabajo se presenta el diseño preliminar de los paneles para el SAOCOM y los resultados de un conjunto de simulaciones de funcionamiento de los mismos a principios de la misión y al final de la misma.

paneles solares – uso espacial – simulación – diseño circuito

INTRODUCCIÓN

Con el objeto de diseñar, fabricar, ensayar y calificar en el país los paneles solares para la misión satelital SAOCOM, la CNEA y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) suscribieron un Convenio en el marco de la Ley N° 23.877 de innovación tecnológica. Este Convenio dio lugar a la iniciación, en abril de 2001, del Subproyecto Paneles Solares, el cual forma parte del Proyecto SAOCOM de la CONAE. Para la ejecución de este Subproyecto (Bolzi et al., 2001) se constituyó en el Centro Atómico Constituyentes un grupo de trabajo interdepartamental, contándose también con la participación de profesionales externos a la CNEA.

Los sistemas espaciales para usos no militares pueden clasificarse en tres grandes categorías: científicos, de comunicaciones y de observación de la Tierra. Las características orbitales de las diferentes misiones satelitales son muy variadas: órbitas polares circulares o excéntricas, órbitas geoestacionarias, etc.. El SAOCOM es, básicamente, un satélite de observación que operará en una órbita polar circular y que tendrá un importante requerimiento de potencia eléctrica (cercano a 1 kW, en promedio), debido en gran parte a su instrumento principal: una antena de aproximadamente 25 m² de superficie. Como en todo satélite artificial, el correcto funcionamiento del subsistema de potencia es clave para el éxito de la misión.

Las necesidades de potencia elevadas junto con una disponibilidad de superficie relativamente chica hacen necesario un estudio muy cuidadoso del diseño del subsistema de potencia: paneles solares, baterías y dispositivos de regulación. En particular, debe analizarse la capacidad de generación de los paneles durante la misión, teniendo en cuenta parámetros tales como: ángulo de incidencia de la radiación en función del tiempo, períodos en que el satélite está a la sombra de la Tierra, variación de la radiación solar a lo largo del año, temperatura de operación y degradación de las celdas solares como consecuencia del daño por radiación. En este trabajo se presenta el diseño preliminar de los paneles para el SAOCOM y los resultados de un conjunto de simulaciones de funcionamiento de los mismos a principios de la misión (BOL, *Begining Of Life*) y al final de la misma (EOL, *End Of Life*).

CARACTERÍSTICA ORBITAL Y REQUERIMIENTOS DE POTENCIA DE LA MISIÓN SAOCOM

El satélite SAOCOM se desplazará según una órbita polar, situada a 659 km de altura, con una inclinación de 98,02°, siendo la hora orbital del nodo descendente las 18 hs.. El período orbital tendrá una duración de 98 minutos, con períodos de eclipse de duración variable durante aproximadamente 4 meses por año, con una duración máxima de 19 minutos el 21 de diciembre.

El requerimiento de potencia media del satélite se ha estimado en 914 W, con picos de consumo que superan los 4 kW. En esta primer etapa de diseño, las características de las baterías sólo fueron utilizadas para definir el punto de trabajo de los paneles solares en 2 regímenes de operación:

- (i) paneles iluminados, antena apagada, consumo menor que la generación de los paneles y batería en carga;
- (ii) paneles iluminados, antena operando, consumo mayor que la generación de los paneles y batería en descarga.

* Trabajo financiado fundamentalmente por la CONAE y la CNEA. Cuenta también con aportes de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del subsidio BID 1201/OC-AR, PICT N° 10-06981.

La máxima tensión de trabajo de los paneles solares será de 90,6 V y se alcanzará para el caso (i) con las baterías casi a plena carga. La tensión de trabajo en descarga será de 70 V.

Los paneles solares constarán de un sustrato de material compuesto (panel de abeja de aluminio/fibra de carbono reforzada CFRP/aislante eléctrico), celdas solares e interconectores, cableado, elementos de control (diodos, resistores, etc.) y conectores. El diseño de los paneles está condicionado por diversas variables y requisitos impuestos por otros componentes del subsistema de potencia y por los demás subsistemas:

- flujo de radiación solar,
- orientación respecto del Sol,
- períodos de eclipse,
- peso y costo combinados de los paneles solares y de la batería,
- disponibilidad de espacio y peso (teniendo en cuenta los posibles lanzadores) del satélite,
- tensión de barra,
- capacidad de las baterías,
- corriente de carga y descarga máximas admitidas por las baterías,
- degradación de los paneles,
- cableado e interconexiones redundantes,
- minimización del momento dipolar magnético,
- máxima temperatura de operación estimada (70°C),
- factor de empaque del panel solar (aprovechamiento efectivo de la superficie).

Teniendo en cuenta estas variables y requisitos, se prevé que la generación de potencia estará provista por 3 paneles fotovoltaicos, uno central de 1,96 m × 2,24 m y dos laterales de 9,55 m × 2,24 m, con un área total aproximada de 8,7 m².

SIMULACIÓN

El diseño de los sistemas de generación debe garantizar la provisión de energía eléctrica requerida por todos los subsistemas del satélite durante toda la misión. El primer paso en el diseño consiste en determinar la cantidad de celdas en serie necesarias para satisfacer el requerimiento de tensión, estimando asimismo la corriente generada por una cadena. Se obtiene entonces una estimación de la potencia de cada cadena y se deduce la cantidad mínima de cadenas en paralelo que conformarán el panel. Finalmente, se aplican los factores de seguridad (pérdidas en las baterías y cableado, posibles daños en las celdas, etc.) para obtener el diseño definitivo del sistema.

Se comenzó entonces el análisis mediante la simulación de la interconexión de celdas en serie utilizando un programa de cálculo desarrollado en el GES a tal efecto (Bolzi et al, 2001), el cual permite

1. Clasificar las celdas según:
 - la corriente de cortocircuito (I_{cc});
 - la tensión en el punto de máxima potencia (V_{max});
 - la potencia máxima (P_{max});
 - la tensión a circuito abierto (V_{ca});
 - la corriente en el punto de máxima potencia (I_{max});
 - un orden arbitrario.
2. Obtener, a partir de las curvas I-V de las celdas, la curva I-V del panel resultante de interconectar las celdas en serie y/o paralelo, incluyendo diodos de paso ("by-pass") y de bloqueo, según un circuito especificado. Ello permite, en consecuencia, obtener los parámetros eléctricos característicos del panel.

APLICACIÓN DEL MODELO A CELDAS DE GaAs

Considerando los requerimientos de potencia y la superficie disponible en el satélite mencionados anteriormente, resulta imprescindible seleccionar las celdas solares de mayor eficiencia disponibles en el mercado: celdas de triple juntura (TJ) InGaP-GaAs-Ge con diodo de paso integrado y 26,6 cm² de área activa.

Dado que sólo se disponía de los parámetros eléctricos de 12 celdas medidas a 28 °C (provistos por el fabricante), utilizando los valores medios y dispersiones de V_{ca} e I_{cc} se generaron 3000 conjuntos de valores (V_{ca} , I_{cc} , V_{max} , I_{max}). Los valores de V_{max} y de I_{max} se calcularon a partir de los valores de V_{ca} e I_{cc} generados utilizando los promedios de los cocientes V_{max}/V_{ca} e I_{max}/I_{cc} de los datos. En la Tabla I se presentan los promedios y dispersiones de los datos y de los valores generados.

Se clasificaron las celdas según diferentes criterios, en particular: (i) corriente en el punto de máxima potencia (I_{max}), (ii) potencia máxima (P_{max}), y (iii) corriente de corto circuito (I_{cc}). Una vez ordenadas las celdas, se seleccionaron para cada criterio de clasificación 7 conjuntos de 50 celdas cada uno, representativos de: el valor medio del parámetro de clasificación, valor medio +/- σ , +/- 2σ , y +/- 3σ .

		V _{ca} [mV]	I _{cc} [mA]	V _{max} [mV]	I _{max} [mA]	P _{max} [mW]	FF [%]	Ef [%]
Datos	Promedio	2617,6	448,4	430,4	2315,8	996,7	84,9	27,4
	Dispersión	14,7	3,8	5,1	16,6	9,9	0,7	0,3
Generados	Promedio	2617,0	448,2	430,1	2315,7	995,9	84,9	27,4
	Dispersión	16,1	4,2	6,7	20,0	18,0	1,2	0,5

Tabla I: Promedios y dispersiones de los parámetros eléctricos provistos por el fabricante y de los generados

Para cada una de las 350 celdas seleccionadas, se realizó un ajuste numérico (Nuñez et al., 1992) para estimar el circuito equivalente y a partir de él generar la curva I-V completa (sin diodo de paso). Luego, se utilizó el modelo para simular la interconexión de un diodo de paso en paralelo en cada celda y obtener las curvas I-V de cadenas de 45 y 48 celdas en serie para cada uno de los 7 lotes. Los resultados obtenidos corresponden a condiciones de medición en Tierra y a 28 °C.

Considerando que la temperatura de operación en el satélite será de aproximadamente 70 °C, se aplicó el coeficiente de variación debido a la temperatura (Tabla II) a los parámetros eléctricos de cada celda en cada una de las clasificaciones y se procedió nuevamente a la simulación, obteniéndose la curva I-V de las cadenas en condiciones del comienzo de la misión (BOL) en el espacio.

$\Delta V_{ca}/\Delta t$ [mV/°C]	$\Delta I_{cc}/\Delta t$ [mA/°C]	$\Delta V_{max}/\Delta t$ [mV/°C]	$\Delta I_{max}/\Delta t$ [mA/°C]
-5,48 ± 0,052	0,048 ± 0,012	-5,93 ± 0,63	0,028 ± 0,016

Tabla II: Coeficientes de variación de los parámetros eléctricos debido a la temperatura (datos suministrados por el fabricante)

Posteriormente, considerando una duración de la misión de 5 años en la órbita mencionada anteriormente, se determinaron las fluencias equivalentes de electrones de 1 MeV (en e/cm²) y, a partir de ellas, los factores de corrección asociados a cada parámetro eléctrico (Tabla III) (Alurralde et al., 2001). Finalmente, aplicando los coeficientes de variación en función de la temperatura (Tabla IV) a los parámetros de cada celda y para cada clasificación, se procedió a realizar una nueva simulación, resultando las curvas I-V de las cadenas al final de la misión (EOL) y a la temperatura de operación.

	V _{ca}	I _{cc}	P _{max}
Fluencia [e/cm ²]	1,2E14	4,5E13	8,4E13
Factor de corrección	0,95	1,00	0,95

Tabla III: Fluencias consideradas y sus correspondientes factores de corrección de los parámetros eléctricos

$\Delta V_{ca}/\Delta t$ [mV/°C]	$\Delta I_{cc}/\Delta t$ [mA/°C]	$\Delta V_{max}/\Delta t$ [mV/°C]	$\Delta I_{max}/\Delta t$ [mA/°C]
-5,46 ± 0,064	0,040 ± 0,011	-5,66 ± 0,79	0,028 ± 0,016

Tabla IV: Coeficientes de variación de los parámetros eléctricos debido a la temperatura al final de la misión (datos suministrados por el fabricante)

A modo de ejemplo, en la Tabla V, se presentan los resultados para 28 °C, BOL a 70 °C y EOL a 70 °C, para la cadena formada por 45 celdas clasificadas por I_{max}, cuyos parámetros eléctricos pertenecen al lote del valor medio (cadena media).

	V _{ca} [V]	I _{cc} [A]	V _{max} [V]	I _{max} [A]	P _{max} [W]	FF
28 °C	117,7	0,449	104,4	0,425	44,4	0,840
BOL a 70 °C	107,3	0,451	93,2	0,427	39,8	0,823
EOL a 70 °C	101,5	0,450	88,7	0,427	37,8	0,828

Tabla V: Valores de los parámetros eléctricos de la cadena media en las distintas fases de la simulación

INTEGRACIÓN SOBRE LAS ÓRBITAS

Con el objeto de estimar la energía generada a lo largo de la órbita del satélite por las cadenas operando en el punto de máxima potencia y a una tensión de carga determinada, se desarrolló un programa FORTRAN que contempla, además de las características de la órbita, la variación del ángulo de incidencia del Sol sobre los paneles (ϕ), el factor de distancia Tierra-Sol en función del mes y los parámetros del circuito equivalente de un elemento fotovoltaico (celda, cadena o panel) para iluminación con incidencia normal.

A partir de la corriente fotogenerada con iluminación normal (I_{FN}), se clacula la corriente fotogenerada en función de ϕ , mediante la siguiente expresión

$$I_F(\phi) = I_{FN} \times \text{facdis} \times \text{cosrad} \quad (1)$$

donde *facdis* es el factor de distancia Tierra-Sol,

$$\text{cosrad} = \cos(\pi - \phi) \times \text{sen}(\delta) \times \text{sen}(\varepsilon + i - \pi/2) + \cos(\delta) \times \cos(\varepsilon + i - \pi/2)$$

siendo δ el ángulo comprendido entre el panel y la órbita,

ε el ángulo comprendido entre la Eclíptica y el Ecuador,

i el ángulo comprendido entre la órbita y el eje de la Tierra.

Utilizando los demás parámetros del circuito equivalente, se genera la curva I-V en función de ϕ , se calculan P_{\max} y la potencia para un valor determinado de tensión (V_{carga}). Finalmente, integrando sobre la órbita, se obtiene la energía en el punto de máxima potencia (E_{\max}) y para la tensión determinada (E_{carga}).

Mediante un nuevo ajuste numérico para representar cada cadena mediante una expresión analítica (con un circuito equivalente similar al de la celda individual), se obtuvieron los parámetros de los circuitos equivalentes y se procedió al cálculo de las energías para los meses de junio (órbitas sin eclipses) y diciembre (órbitas con eclipses de duración máxima).

Posteriormente, se estimaron las resistencias de conectores, diodos, etc., de cada cadena, obteniéndose valores inferiores a 1 Ω . Se incrementó en consecuencia el valor de la resistencia serie del circuito equivalente en 1 Ω y se procedió nuevamente al cálculo de las energías. En la Tabla VI se muestran los resultados obtenidos y en la Figura 1 se presenta el gráfico de generación de energía sobre una órbita en función del tiempo.

		JUNIO			DICIEMBRE		
		E_{\max} [Wh]	Ecarga [Wh]		E_{\max} [Wh]	Ecarga [Wh]	
			70,0 V	90,6 V		70,0 V	90,6 V
45 celdas	28 °C	60,8	41,8	53,6	43,2	29,6	38,0
	+ resistencias	60,6	41,8	53,6	43,1	29,6	38,0
	BOL	54,8	41,9	53,7	39,0	29,7	38,0
	+ resistencias	54,6	41,9	53,6	38,9	29,7	38,0
48 celdas	EOL	51,9	41,8	51,3	36,9	29,6	36,6
	+ resistencias	51,7	41,8	50,8	36,8	29,6	36,3
	28 °C	65,1	41,9	53,8	46,2	29,7	38,1
	+ resistencias	64,8	41,9	53,8	46,1	29,7	38,1
48 celdas	BOL	58,4	42,0	53,9	41,5	29,8	38,1
	+ resistencias	58,1	42,0	53,9	41,4	29,8	38,1
	EOL	55,4	41,9	53,7	39,4	29,7	38,0
	+ resistencias	55,2	41,9	53,7	39,3	29,7	38,0

Tabla VI: Energías integradas sobre la órbita: a) con seguimiento sobre del punto de máxima potencia, b) dos puntos de carga (90.6 V y 70 V) para celdas clasificadas por I_{\max} .

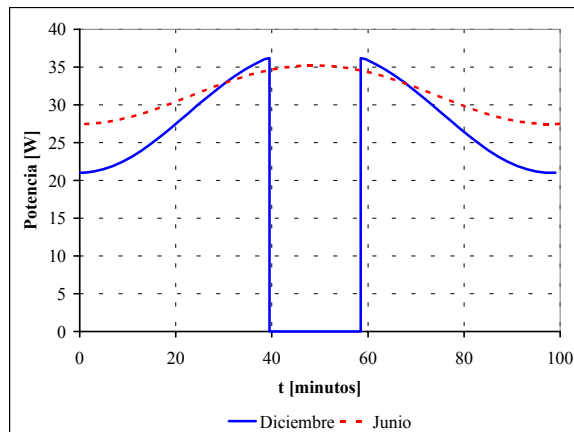


Figura 1: Generación de potencia sobre la órbita en función del tiempo para una cadena de 45 celdas en serie y una tensión de carga de 90.6 V.

PÉRDIDA DE POTENCIA DEBIDO A DETERIORO DE CELDAS

El deterioro de las celdas o las sombras producidas sobre un panel producen una pérdida significativa de la potencia del mismo (Nuñez, 1992), siendo entonces un factor importante a tener en cuenta en el dimensionamiento de los paneles si se tiene en cuenta el posible fallo de algunas celdas como consecuencia de factores externos (por ejemplo, micrometeoritos).

Se estudió la variación de los parámetros eléctricos y las pérdidas de potencia de la cadena media para la clasificación por I_{max} en los casos en que una o dos celdas no generen electricidad, en cuyo caso entran a operar los diodos de paso correspondientes. Para ello, se seleccionaron 4 celdas: las 2 de mayor I_{max} y las dos de menor I_{max} ; se consideró $I_F = 0$ A y con los parámetros de los circuitos equivalentes calculados en cada uno de los casos, se generaron las curvas I-V de las 4 celdas no activas. Se procedió nuevamente a aplicar el modelo de interconexión para obtener las curvas I-V de las cadenas con una o con dos celdas en oscuridad. Los resultados se presentan en la Tabla VII.

	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	P_{max} [W]	V_{max} [V]	I_{max} [A]	I_{carga} [A]	Pérdidas			
							P_{max}		P_{carga}	
							[W]	[%]	[W]	[%]
Iluminada BOL	107,3	0,451	39,8	93,2	0,427	0,433				
1M_BOL	105,6	0,451	38,5	90,2	0,427	0,425	1,3	3,2	0,7	1,8
1P_BOL	105,4	0,451	38,5	90,2	0,427	0,425	1,3	3,3	0,7	1,8
2M_BOL	103,8	0,451	37,2	87,2	0,427	0,379	2,6	6,5	4,8	12,3
2P_BOL	103,7	0,451	37,2	87,3	0,427	0,380	2,6	6,5	4,8	12,2
Iluminada EOL	101,5	0,450	39,8	88,7	0,427	0,408				
1M_EOL	99,8	0,450	36,6	85,8	0,426	0,334	1,2	3,3	6,6	18,0
1P_EOL	99,9	0,450	36,6	85,9	0,426	0,336	1,2	3,3	6,6	17,7
2M_EOL	98,0	0,450	35,4	83,0	0,426	0,222	2,5	6,5	16,8	45,5
2P_EOL	97,9	0,450	35,4	83,0	0,426	0,223	2,5	6,6	16,8	45,4

Tabla VII: Valores de los parámetros eléctricos de la cadena media en BOL y EOL para todas las celdas iluminadas, para una en oscuridad (1M_ y 1P_, celda con mayor I_{max} y menor I_{max} , respectivamente) y para dos celdas en oscuridad (2M_ y 2P_, celdas con mayor I_{max} y menor I_{max} , respectivamente). La corriente de carga corresponde a una tensión de 90.6 V

CONCLUSIONES

Los requerimientos de potencia del satélite SAOCOM y las restricciones propias del Proyecto imponen un estudio cuidadoso del diseño del subsistema de potencia. Para ello, se desarrolló un método de dimensionamiento y diseño de los paneles solares para uso espacial que contempla los diferentes parámetros de operación, órbita y degradación de las celdas solares.

Considerando celdas de triple juntura de GaAs, se aplicó el método al SAOCOM para determinar la cantidad de celdas necesarias en las cadenas para satisfacer los requerimientos de tensión. En base al resultado de la integración sobre la órbita, se definió el número mínimo de cadenas en paralelo para satisfacer la demanda energética del satélite. El subsistema de potencia deberá consistir, sin considerar los factores de confiabilidad que deberá definirse a posteriori, de 44 cadenas interconectadas en paralelo, donde cada cadena estará formada por 45 celdas interconectadas en serie.

Los cálculos de pérdida de potencia debida al deterioro de celdas muestra que es necesario realizar un estudio más detallado a fin de evaluar si el número de celdas de cada cadena es compatible con los factores de confiabilidad requeridos.

Además, es necesario incluir los parámetros de la batería y del sistema de regulación para determinar el diseño definitivo del subsistema de potencia. A tal fin, se está desarrollando un programa para la simulación del sistema completo panel-baterías-elementos de regulación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a C. Alonso (Jefe del Proyecto SAOCOM), D. Gestal (Representante Técnico de la CONAE), G. Bisaccio y C. Hofmann por su permanente disposición para resolver los problemas que se suscitan durante la ejecución del Subproyecto, así como también por su colaboración desde el punto de vista técnico. Agradecen asimismo a los demás integrantes del grupo de trabajo y, en particular, a C. Bruno por sus aportes técnicos al tema.

REFERENCIAS

Alurralde M., Tamasi M.J.L., Bruno C.J., Martínez Bogado M.G., Plá J.C. y Fernández Vázquez J. (2001). Estudios de daño por radiación con protones de 10 MeV en celdas solares de silicio cristalino utilizando el acelerador TANDAR, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **5**, 08.43.

C.G. Bolzi C.G., Bruno C.J., Godfrin E.M., Martínez Bogado M.G., Plá J.C., Rodríguez S.E., Tamasi M.J.L., Alurralde M.,

Cabot P., Carella E., Fernández Vázquez J., Franciulli C.D., Goldbeck V., Mezzabolta E., Antonuccio F., Nigro S.L. y Durán J.C. (2001). Convenio de cooperación Conae-Cnea: desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **5**, 04.07.

Nuñez T. (1992). Simulación de paneles fotovoltaicos. Informe final de la signatura Trabajos de Seminario de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Nuñez T., Durán J.C. y Godfrin E.M. (1992). Curve fitting methods for solar cells I-V characteristics under illumination and darkness conditions. *Proceedings of the Workshop on Materials Science and Physics of Non-conventional Energy Sources, Argentina*, 251.

Robinson N. (1966) *Solar Radiation*. Elsevier Publishing Company.

ABSTRACT

In April 2001, the National Atomic Energy Commission (CNEA) and the National Commission for Space Activities (CONAE) signed a Cooperation Agreement for the execution of the Solar Panels Project. The aim of this project is to design, manufacture, test and qualify in Argentina the solar panels for the SAOCOM mission. A careful analysis of the power system design is needed due to power requirements and different imposed restrictions of this mission. A preliminary design for the SAOCOM solar panels and the results of several simulations, for beginning of life (BOL) and end of life (EOL), are presented.