

**MISIÓN SATELITAL AQUARIUS/SAC-D:
DISEÑO PRELIMINAR DEL PANEL SOLAR Y
SIMULACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL SUBSISTEMA DE POTENCIA***

E.M. Godfrin¹, D. Fernández Slezak², J.C. Durán¹

¹Departamento de Física – Centro Atómico Constituyentes – 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, duran@tandar.cnea.gov.ar

²Departamento de Computación – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – UBA
Pabellón I – Ciudad Universitaria – 1428 Buenos Aires – Argentina
Tel/Fax (011) 4576-3359, www.dc.uba.ar, dslezak@dc.uba.ar

RESUMEN

Se presenta el diseño preliminar del panel solar del subsistema de potencia para la misión satelital Aquarius/SAC-D, realizado en base a valores promedios de los parámetros eléctricos característicos de un lote de 2700 celdas solares ATJ (“Advanced Triple Junction”) de la firma Emcore Corp.. Se analizaron cadenas de 16, 18 y 20 celdas en serie y distintas temperaturas de operación en el espacio. Se descartaron las cadenas de 16 celdas por no cumplir con los requerimientos de tensión.

Se realizó la simulación del comportamiento del subsistema de potencia al final de la vida útil de la misión, considerando una temperatura de operación en el espacio de 70°C. En particular, se analizó su funcionamiento para la época del año con mayor duración del eclipse y máximo ángulo de incidencia, con dos consumos cercanos al máximo esperable con todo el instrumental y la plataforma de servicios del satélite operando.

Palabras claves : paneles solares – uso espacial – simulación – diseño circuito

INTRODUCCIÓN

En mayo de 2005 se firmó el decreto por el que se declara a la actividad espacial como política de Estado y de prioridad nacional, y se aprobó el Plan Espacial Nacional en su versión 2004-2015, manejado por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y que comprende varias misiones satelitales, en particular las misiones SAOCOM y Aquarius/SAC-D.

EL proyecto Aquarius/SAC-D es una colaboración entre la CONAE y dos laboratorios de la NASA, el Jet Propulsión Laboratory (JPL) y el Goddard Space Flight Center (GSFC), con el objetivo de desarrollar mapas de salinidad de la superficie del mar (misión Aquarius) y obtener mediciones atmosféricas y observaciones topológicas especialmente en la región de Sudamérica (misión SAC-D). El instrumento del Aquarius consiste en un radiómetro de microondas de banda-L y un sistema de medición de la radiación electromagnética dispersada (“scatterometer”). El radiómetro medirá la temperatura de la superficie, mientras que el “scatterometer” proveerá información sobre la rugosidad de la superficie del mar. Los instrumentos del SAC-D incluyen una cámara de alta sensibilidad, una cámara infrarroja y un radiómetro.

El subsistema de potencia del satélite Aquarius/SAC-D está compuesto, entre otros elementos, por un panel solar que será construido en el Centro Atómico Constituyentes (CAC) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) dentro del marco de un convenio de cooperación entre la CNEA y la CONAE.

CARACTERÍSTICAS

ÓRBITA

La selección y diseño de la órbita de la misión Aquarius/SAC-D tuvo en cuenta los siguientes requerimientos:

- Se deberá cubrir desde 75° latitud norte a 75° latitud sur.
- La órbita deberá tener un ciclo de repetición que no exceda los 9 días.
- Órbita heliosincrónica con hora orbital del nodo ascendente a las 18:00 horas.
- La altitud deberá ser superior a los 550 km, para prevenir un frenado excesivo por la atmósfera, e inferior a los 700 km.
- La órbita será prácticamente invariante (excentricidad y perigeo) a fin de simplificar el seguimiento desde Tierra y de minimizar las variaciones de altura.

La órbita nominal seleccionada tiene las características señaladas en la Tabla I.

Parámetro	Valor Nominal	Observaciones
Altitud en el Ecuador	657 km	7 días (103 revoluciones) de ciclo de repetición
Excentricidad promedio	0,0012	Fijo
Inclinación	98,01°	Sol-sincrónico
Nodo Ascendente	18:00 hs	Órbita Dawn-Dusk
Perigeo	90°	Fijo
Período Orbital	98 minutos	

Tabla I: Características de la órbita seleccionada para el Aquarius/SAC-D

La distancia entre dos órbitas consecutivas es de 2723 km medida en el Ecuador, mientras que la proyección sobre la Tierra de dicha distancia es de 389 km. Las órbitas de perigeo y excentricidad fijos tienen la propiedad interesante de minimizar la distancia entre dos órbitas consecutivas y la variación de altitud para una latitud geográfica dada.

ECLIPSES

El cambio anual de la posición del Sol respecto del plano orbital produce cortos períodos de eclipse (aproximadamente 3 meses por año) entre mayo y agosto para latitudes del sur. El perfil de duración del eclipse durante el año se muestra en la figura 1.

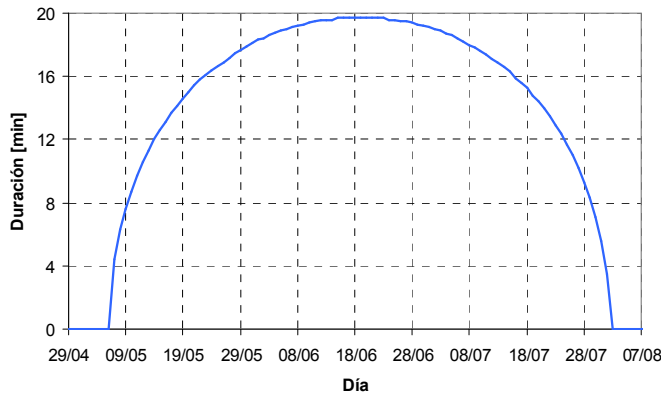


Figura 1: Perfil de duración de eclipse durante el año del Aquarius/SAC-D.

REQUERIMIENTOS DE POTENCIA

El diseño preliminar del satélite prevé un requerimiento de potencia constante del Aquarius/SAC-D de 1300 Watts, valor que incluye factores de seguridad por posibles incrementos futuros. Dicho consumo incluye tanto el del equipamiento básico cuanto el del instrumental de medición.

DURACIÓN DE LA MISIÓN

El Aquarius tiene una expectativa de vida mínima de tres años y el resto del satélite, cinco años.

DISEÑO PRELIMINAR DEL SUBSISTEMA DE POTENCIA

El subsistema de potencia del Aquarius/SAC-D está formado por un panel solar, una batería y un sistema de regulación de corriente.

El área destinada al panel solar es de aproximadamente 9 m². Para la fabricación de este panel se utilizarán celdas de triple juntura (GaInP-GaInAs-Ge) de 27,5% de eficiencia promedio. El panel estará formado por módulos que podrán desconectarse o conectarse según el estado de carga de la batería.

Con el objeto de estimar la cantidad de celdas en serie necesarias por cadena, al final de la vida útil del satélite (*“end of life”*, EOL) y para el mayor ángulo de incidencia solar durante la misión (aproximadamente 30°), se procedió de la siguiente manera:

1. Se trabajó sobre un lote de datos (corriente de cortocircuito, I_{cc} ; tensión de circuito abierto, V_{ca} ; tensión, corriente y potencia en el punto de máxima potencia, V_{max} , I_{max} y P_{max} respectivamente) de 2700 celdas medidas en AM0 a 28°C.
2. Se promediaron los parámetros cada 25 celdas.
3. Se seleccionó el grupo de celdas que tuviera menor valor medio de V_{ca} , al que se denominó “celda tipo”.
4. Se le aplicaron los coeficientes de daño por radiación y de variación de temperatura de la Tabla II, obteniéndose los parámetros de la celda en EOL para varias temperaturas.

5. A partir de estos valores, se estimaron los valores de los parámetros eléctricos de cadenas de 16, 18 y 20 celdas conectadas en serie para diferentes temperaturas y con un ángulo de incidencia de la radiación solar de 30° (Tabla II). Los resultados se presentan en la Tabla III.

	V _{ca}	I _{cc}	V _{max}	I _{max}	P _{max}
Celda tipo	2597 mV	474 mA	2271 mV	459 mA	1044 mW
Fluencias	1,83E+14 e/cm2	1,05E+14 e/cm2	---	---	1,56E+14 e/cm2
Factores de corrección por daño por radiación	0,952	1,000	0,954	0,994	---
Factores de corrección por temperatura	-5,49 mV/°C	0,290 mA/°C	-5,70 mV/°C	0,225 mA/°C	---
Factores de corrección por incidencia (30°)	0,994	0,845	0,995	0,843	

Tabla II: Parámetros eléctricos de la celda tipo, fluencias y factores de corrección considerados debidos al daño por radiación, a la temperatura y a la incidencia de 30°

EOL	V _{ca} [V]	I _{cc} [A]	V _{max} [V]	I _{max} [A]
16 celdas en serie				
53°	37,2	0,407	32,2	0,390
60°	36,5	0,408	31,6	0,391
70°	35,6	0,411	30,7	0,393
18 celdas en serie				
53°	41,8	0,407	36,2	0,390
60°	41,1	0,408	35,6	0,391
70°	40,1	0,411	34,5	0,393
20 celdas en serie				
53°	46,4	0,407	40,3	0,390
60°	45,6	0,408	39,5	0,391
70°	44,5	0,411	38,4	0,393

Tabla III: Valores de los parámetros eléctricos calculados para cadenas de 16, 18 y 20 celdas en serie en EOL, para un ángulo de incidencia de la radiación solar de 30° y para distintas temperaturas

Las tensiones de trabajo de la batería a plena carga se encuentran en el rango de 34 a 38 V (ver próxima sección), por lo cual quedaron descartadas las cadenas de 16 celdas en serie.

Considerando un consumo constante de 1300 W y la generación máxima ($V_{max} \times I_{max}$) por cadena dada en la Tabla III, y teniendo en cuenta que en el caso más desfavorable los paneles solares se encuentran iluminados durante aproximadamente 78 minutos de los 98 minutos de período orbital, se puede estimar el número de cadenas mínimas necesarias para satisfacer la demanda EOL en el peor día del año. Por ejemplo, para cadenas de 20 celdas solares en serie y 70° de temperatura de operación de los paneles, se obtiene: $1300 \text{ W} / (38,4 \text{ V} \times 0,393 \text{ A}) \times (98 \text{ min} / 78 \text{ min}) \cong 108$ cadenas.

Cabe destacar que, en este primer paso, no se consideraron los factores de corrección asociados a:

- la variación de la distancia Tierra-Sol en función de la época del año,
- la degradación por micrometeoritos y radiación ultravioleta,
- pérdidas en la batería.

Dado que estos factores son todos menores que 1, se requerirá un número de cadenas mayor que el obtenido según lo indicado en el párrafo precedente.

SIMULACIÓN

A fin de obtener las curvas I-V de los módulos que integran el panel y realizar la simulación del comportamiento del subsistema de potencia (Berbeglia et al., 2003), se procedió de la siguiente manera:

1. se clasificaron las celdas por corriente en el punto de máxima potencia;
2. usando los factores de corrección asociados al daño por radiación y los coeficientes de variación por temperatura, dados en la Tabla II, se obtuvieron los valores de los parámetros eléctricos de las 2700 celdas en EOL para 70° (temperatura que corresponde al caso más desfavorable);
3. se introdujo un error aleatorio de $\pm 2\%$ en el valor de la corriente en el punto de máxima potencia para simular el error en las mediciones utilizadas para clasificar las celdas;

4. se generaron las curvas de las 2700 celdas en EOL;
5. se generaron los módulos (Godfrin y Durán, 2002): cada celda con un diodo de paso, cadenas de 18 ó 20 celdas solares en serie con diodo de bloqueo y resistencia serie debida al cableado de la cadena ($0,32 \Omega$), módulos de 6 (para 18 celdas en serie) ó 5 cadenas (para 20 celdas en serie) en paralelo, diodo de bloqueo y resistencia serie por cableado del módulo ($0,37 \Omega$);
6. se consideró un número total de cadenas compatible con la máxima área disponible en el satélite para los paneles solares, la cual da lugar a 128 (142) cadenas de 20 (18) celdas solares en serie cada una.

La batería está compuesta por celdas de NiH conectadas en serie, 22 en el caso de cadenas con 18 celdas solares y 24 para el caso de 20 celdas, con una capacidad total de 65 Ah. La tensión de la batería define la tensión de trabajo del panel. A modo de ejemplo, en la tabla IV se muestran tensiones de trabajo a plena carga de una celda, a diferentes temperaturas típicas de operación en el espacio.

	1 celda	22 celdas	24 celdas
Temperatura [°C]	Tensión [V]	Tensión [V]	Tensión [V]
-10,00	1,557	34.25	37.36
-5,00	1,544	33.97	37.06
0,00	1,532	33.70	36.76

Tabla IV: Tensiones de trabajo a plena carga de una, 22 y 24 celdas de batería, a diferentes temperaturas de operación típicas en el espacio.

Las funciones del regulador no han sido aún completamente especificadas. En el presente trabajo, se considera que el regulador debe:

- evitar la sobrecarga de la batería desconectando módulos del panel cuando la tensión alcanza valores prefijados dependientes de la temperatura (ver Tabla IV),
- reconectar módulos cuando el estado de carga de la batería es inferior al 80%,
- limitar la profundidad de descarga al 40%.

Se realizaron simulaciones EOL sobre 700 órbitas a partir del 8 de mayo a fin de cubrir la mayor parte del período de eclipses y obtener, en particular, el estado de carga de la batería para el 21 de junio, día en que la duración del eclipse es máxima. En estas simulaciones también se consideró un factor por daño por micrometeoritos de 0,98.

Los resultados obtenidos para el 21 de junio, correspondientes a cadenas de 20 celdas solares en serie, se presentan en las figuras 2 y 3 para dos consumos constantes: 1200 W y 1400 W. Se observa que en el primer caso (1200 W) el sistema de generación es apropiado para satisfacer la demanda ya que la profundidad de descarga de la batería nunca excede el valor prefijado. Por el contrario, en el segundo caso (consumo = 1400 W) la generación de energía durante el período iluminado no es suficiente para proveer la energía requerida durante toda la órbita, motivo por el cual el subsistema de potencia debe entrar en estado de emergencia (esto significa disminuir el consumo desconectando cargas no esenciales) a fin de evitar que la profundidad de descarga supere el 40%.

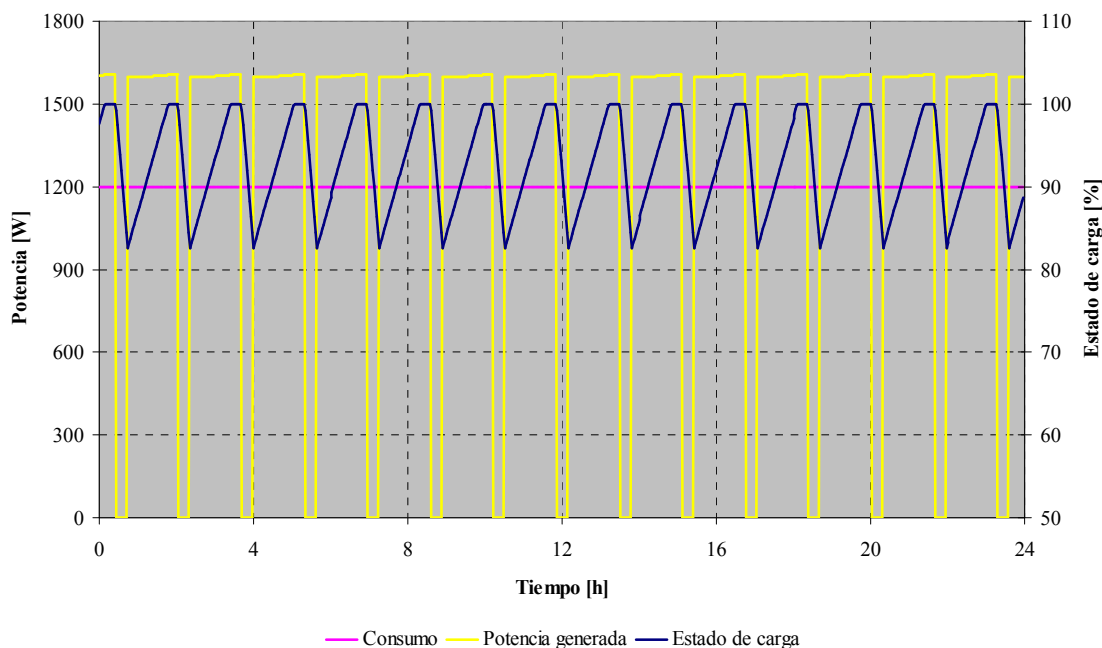


Figura 2: Simulación del subsistema de potencia compuesto por módulos de 5 cadenas en paralelo, cada una formada por 20 celdas solares en serie, y 24 celdas de batería en serie para el 21 de junio, EOL, y con un consumo constante de 1200 W.

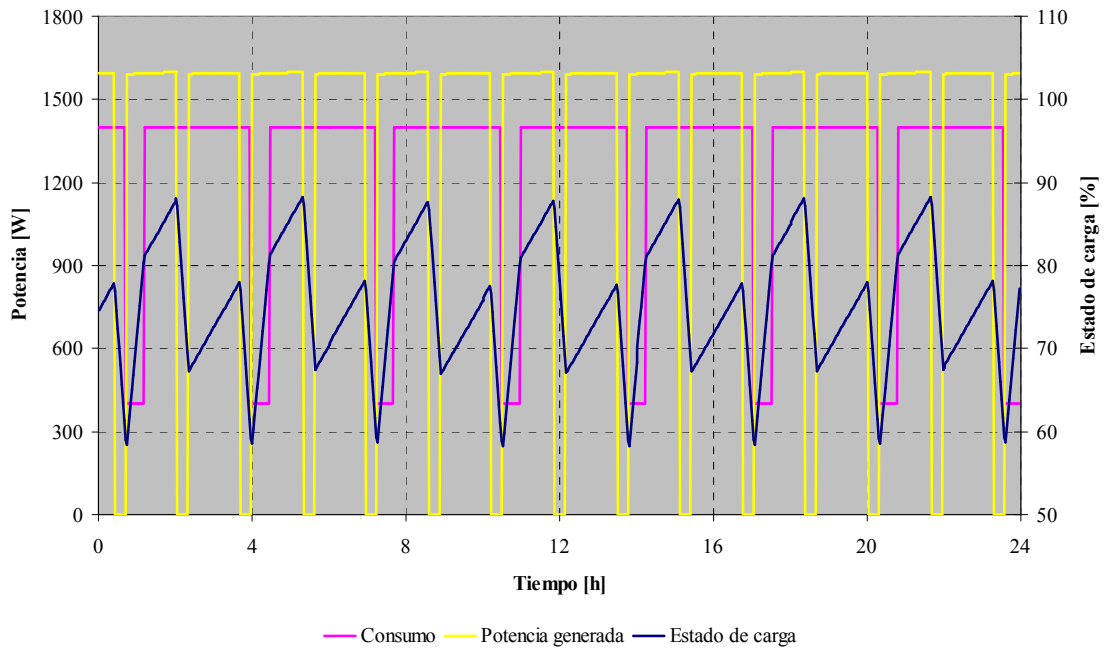


Figura 3: Simulación del subsistema de potencia compuesto por módulos de 5 cadenas en paralelo, cada una formada por 20 celdas solares en serie, y 24 celdas de batería en serie, para el 21 de junio, EOL, y con un consumo constante de 1400 W.

CONCLUSIONES

Se realizó un diseño preliminar del subsistema de potencia de la misión satelital Aquarius/SAC-D en base a valores promedios de los parámetros característicos de un lote de 2700 celdas solares ATJ (“Advanced Triple Junction”) provistas por la firma Emcore Corp.. Para ello, se analizaron cadenas de 16, 18 y 20 celdas en serie a distintas temperaturas de operación del panel solar. Asimismo, se evaluaron dos configuraciones para la batería: una compuesta por 22 celdas de NiH conectadas en serie, y otra compuesta por 24, ambas con una capacidad total de 65 Ah. Dadas las tensiones de trabajo de ambas configuraciones, se descartaron las cadenas de 16 celdas solares ya que no permiten alcanzar plena carga de la batería. Se puede apreciar, en cambio, que las cadenas de 18 (20) celdas solares en serie son apropiadas para operar con 22 (24) celdas de NiH en serie a las temperaturas de operación esperadas en órbita.

Se realizaron simulaciones del subsistema de potencia con ambas configuraciones (18 y 20 celdas en serie por cadena), durante 700 órbitas a partir del 8 de mayo, y para diferentes consumos. Los resultados obtenidos para la peor época del año (máxima duración del eclipse y mayor ángulo de incidencia) y con el máximo de celdas solares que pueden integrarse en el área disponible en el satélite, muestran que el sistema diseñado permite satisfacer completamente una demanda constante de 1200 W al final de la vida útil, pero no así una demanda de 1400 W, la que obligaría a pasar a un consumo de emergencia a fin de evitar una descarga excesiva de la batería.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a Martín Alurralde por proveer la información relacionada con la degradación de las celdas solares como consecuencia del daño por radiación, a Guillermo Garaventa (INIFTA) y Christian Tisot (INVAP) por sus aportes para la simulación de las baterías y del sistema de regulación. Asimismo, desean agradecer la colaboración de todo el personal del Grupo Energía Solar por su constante apoyo y útiles consejos.

REFERENCIAS

- Berbeglia G., Fernández Slezak D., Godfrin E.M. y Durán J.C. (2003), Simulación del sistema eléctrico de la misión satelital SAOCOM, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **7**, 08.31.
- 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.
- Godfrin E.M. y Durán J.C. (2002), Paneles solares para la misión satelital SAOCOM: primeras etapas de diseño, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **6**, 04.19.

ABSTRACT

The preliminary design for the solar array of the Aquarius/SAC-D satellite mission is presented. This design has been realized using the mean values of the electrical parameters of 2700 ATJ (Advanced Triple Junction) cells from Emcore Corp. Strings composed by 16, 18 and 20 cells connected in series for different operation temperatures in space were analyzed. 16 cells strings do not satisfy the voltage requirements and were discarded.

The performance of the power subsystem at the end of life was simulated, considering an operating temperature of 70°C. In particular, its performance during the worst period (largest eclipses and incident angle of the solar radiation) were analyzed, using two values of the consumption near the maximum expected for all instruments and service platform in operation.