

**FABRICACIÓN Y ENSAYO DE PANELES SOLARES PARA USO ESPACIAL
MÓDULO DE INGENIERÍA PARA LA MISIÓN AQUARIUS/SAC-D***

M. Alurralde¹, F. Antonuccio², M. Barrera^{2,3}, C.G. Bolzi², C.J. Bruno², P. Cabot⁴, E. Carella⁴, J. Di Santo⁵, J.C. Durán², J. Fernández Vázquez², A. Filevich^{2,3}, C.D. Franciulli³, E.M. Godfrin², V. Goldbeck¹, A. Iglesias⁶, M.G. Martínez Bogado^{2,3}, E. Mezzabolta⁵, A. Moglioni⁴, S.L. Nigro², J. Plá^{2,3}, I. Prario^{1,3}, M.C. Raffo Calderón⁶, S.E. Rodríguez², M.J.L. Tamasi^{2,3}, A. Vertanessian^{2,3}

¹Departamento de Materiales - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

²Departamento de Física - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)

⁴Departamento de Ensayos No Destructivos y Estructurales - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

⁵Profesional Independiente

⁶Departamento de Química - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

Av. General Paz 1499 - (B1650KNA) San Martín - Pvcia. de Buenos Aires - Argentina
Tel. (011) 6772-7132, Fax (011) 6772-7121, www.tandar.cnea.gov.ar, duvan@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN

El proyecto de desarrollo de paneles solares para misiones satelitales argentinas en ejecución en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) se lleva a cabo en el marco de la cooperación entre esta institución y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales. En este trabajo se presentan los avances logrados durante el último año, los cuales dieron lugar a la fabricación y ensayo de un segundo panel de ingeniería. Este módulo se desarrolló, en especial, para calificar los nuevos procesos con vistas a la integración de los paneles solares para la misión Aquarius/SAC-D, la cual es una misión conjunta entre la CONAE y el Goddard Space Flight Center (GSFC) y el Jet Propulsion Laboratory (JPL), ambos de la NASA.

paneles solares – uso espacial – ensayos ambiente espacial – ensayos eléctricos

INTRODUCCIÓN

En el marco del Plan Nacional Espacial, la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) ha definido dos familias de misiones satelitales, según los instrumentos argentinos principales a bordo: la Serie SAC con instrumentos argentinos centrados en el rango óptico y la Serie SAOCOM con instrumentos argentinos centrados en el rango de microondas (radar). Dentro de la serie SAC, el SAC-A y SAC-B ya han cumplido su misión, el SAC-C se encuentra en órbita y el satélite Aquarius/SAC-D está en desarrollo. El objetivo científico del SAC-D está orientado a obtener nueva información climática a partir de las mediciones de salinidad y una nueva visión de la circulación y procesos de mezcla en el océano, así como detectar focos de alta temperatura en la superficie terrestre para la obtención de mapas de riesgo de incendios y humedad del suelo para alerta temprana de inundaciones.

El Grupo Energía Solar de la CNEA junto a un grupo interdepartamental del Centro Atómico Constituyentes (CAC) se encuentra trabajando en el desarrollo de paneles solares para misiones satelitales previstas en el Plan Espacial Nacional desde la firma del convenio de cooperación específica entre la CNEA y la CONAE, en marzo de 2001. Este convenio, encuadrado dentro de la Ley No 23.877 de innovación tecnológica, dio lugar a la iniciación en el CAC del Subproyecto Paneles Solares como parte del Proyecto SAOCOM y en la actualidad, también del Proyecto SAC-D, para fabricar y ensayar los paneles fotovoltaicos de ambos satélites.

En base a la experiencia de trabajos previos (Bolzi et al., 2001 y Durán et al., 2002), de la integración del primer panel de ingeniería (Bolzi et al., 2003 y Alurralde et al., 2004) y en los desarrollos realizados hasta el momento, se diseñó y construyó un segundo módulo de ingeniería incorporando los requerimientos de configuración previstos para el satélite SAC-D.

Los ensayos realizados en Tierra, bajo condiciones controladas y normalizadas, permiten estudiar la resistencia de los dispositivos al ambiente espacial y predecir su comportamiento al final de su vida útil, pudiéndose realizar entonces un diseño apropiado de los paneles solares de un satélite. Se presentan los ensayos y caracterizaciones realizadas sobre el panel de ingeniería fabricado, llevados a cabo en el Centro Atómico Constituyentes (CAC) de la CNEA, y en instalaciones de INVAP S.E. en San Carlos de Bariloche.

* Trabajo financiado mayormente por la CONAE y la CNEA. Cuenta también con aportes del CONICET y de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del subsidio BID 1201/OC-AR, PICT N° 10-14327.

ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PANEL INGENIERÍA

Integración del panel

El panel de ingeniería elaborado se compone de 40 celdas agrupadas en dos cadenas de 20 celdas solares de triple juntura conectadas en serie. Cada cadena consta de cuatro subcadenas de cinco celdas en serie. Estas celdas fueron seleccionadas de un grupo de 80 celdas integradas en el laboratorio, según el método descrito en Godfrin y Durán (2002).

Como se presentó en trabajos previos (Bolzi et al., 2003 y Alurralde et al., 2004) la integración del panel requiere de distintos procesos, esquematizados en la Figura 1.

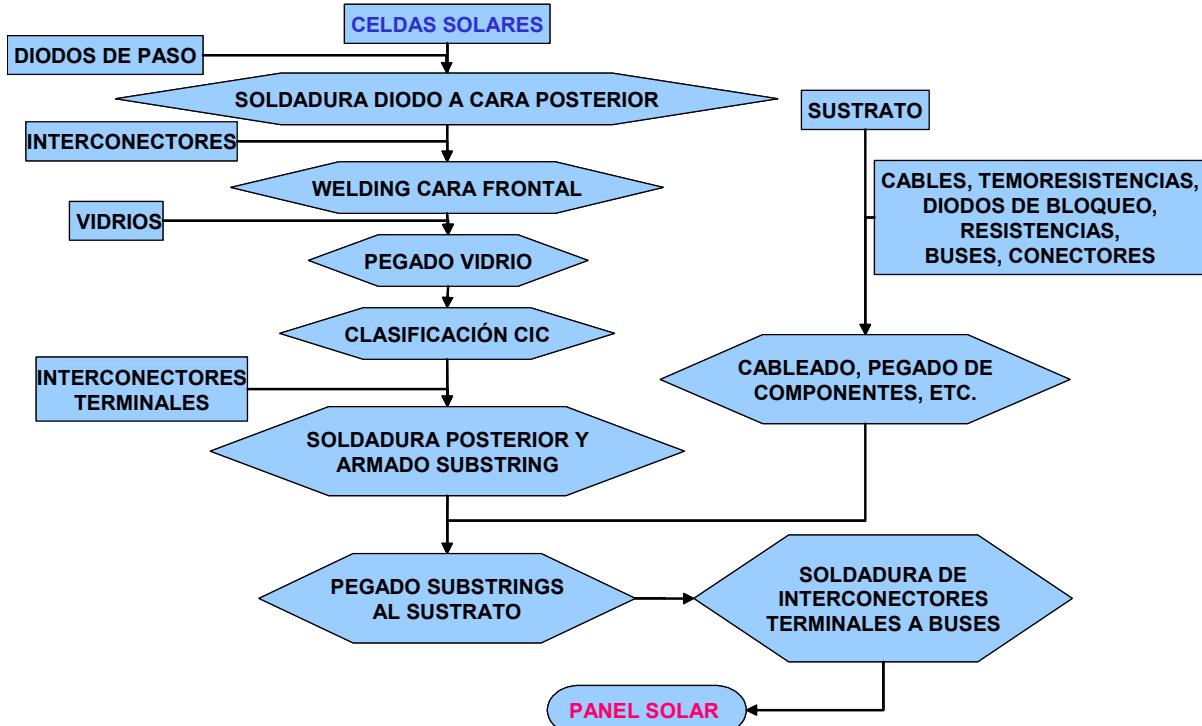


Figura 1. Esquema de la secuencia de integración del panel solar de ingeniería.

Los interconectores metálicos para soldar las celdas fueron desarrollados en el CAC (Bolzi et al., 2003). Estos interconectores fueron empleados en una de las cadenas de 20 celdas del panel (Cadena M), utilizando en la otra interconectores provistos por la empresa que fabrica las celdas (Cadena E).

Los procesos, tales como pegado de vidrio, soldadura de interconectores y diodos de paso, interconexión de celdas, entre otros, se llevaron a cabo de manera similar a los presentados anteriormente (Bolzi et al., 2003 y Alurralde et al., 2004). En la Figura 2 se muestra la foto del panel terminado.

Finalizada su integración se realizó en el panel una inspección visual a temperatura ambiente, previo a los ensayos mecánicos y de termovación registrándose, en caso de que existieran, defectos tales como fisuras y astillados en vidrios, burbujas en el adhesivo o fisuras en las celdas.

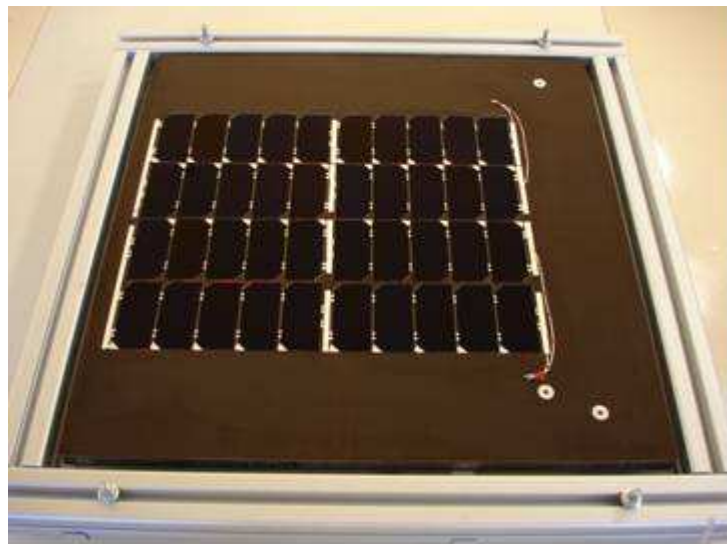


Figura 2. Módulo de ingeniería.

Caracterización eléctrica del panel

La verificación del funcionamiento eléctrico (curva I-V) de las dos cadenas (cadena M y cadena E), se realizó iluminando el módulo con luz pulsada. Se utilizó para ello un *flash* fotográfico, un osciloscopio digital, una carga electrónica y un

dispositivo para sombreado parcial. La determinación de la curva I-V del panel se realizó a temperatura ambiente ($T=22^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$), obteniéndose los pares corriente-tensión (I-V) para 25 valores de la carga electrónica entre un valor cercano a la tensión de circuito abierto ($I = 0$) y un valor próximo a la corriente de cortocircuito ($V = 0$), para cada cadena de 20 celdas.

Se midieron las curvas I-V de las dos cadenas totalmente iluminadas y luego parcialmente en sombra para verificar el correcto funcionamiento de los diodos de paso. Las mediciones se muestran en la Figura 3.

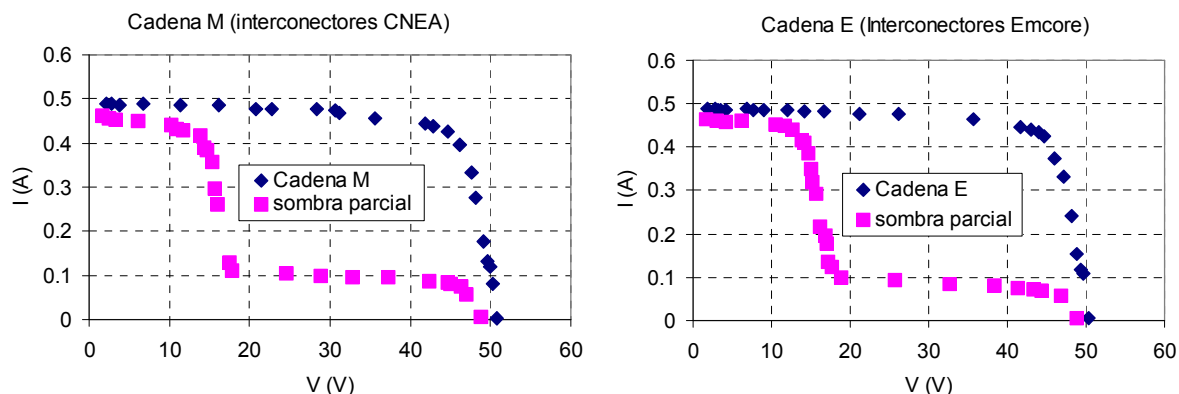


Figura 3. Verificación del funcionamiento eléctrico de las cadenas del módulo.

ENSAYOS DE CALIFICACIÓN

Ensayos de vibraciones

El segundo módulo de ingeniería fue sometido a ensayos mecánicos y de ciclado térmico en vacío, realizados en la empresa INVAP S.E., en S. C de Bariloche. El objetivo de estos ensayos fue calificar los procedimientos de fabricación de los paneles solares para la misión Aquarius/SAC-D. Si bien los ensayos fueron realizados por técnicos de INVAP S.E. (con supervisión de la CNEA y la CONAE), por completitud se dan a continuación las características más relevantes de los mismos.

En particular, el ensayo mecánico tiene como fin emular las exigencias que tendría que enfrentar el panel durante el lanzamiento. Para ello se montó el panel en un equipo de vibraciones y se colocaron acelerómetros sobre el sustrato para registrar las distintas etapas del ensayo. Se determinaron las frecuencias naturales del panel, se realizaron ensayos de vibraciones senoidales en el eje Z y se imprimió al panel aceleraciones 25, 50 y 100 veces la aceleración gravitatoria terrestre (g) en el eje Z.

En una segunda etapa del ensayo de vibraciones, se realizó un barrido aleatorio, en frecuencias lejanas de las naturales y finalmente, se realizó un ensayo de baja amplitud (o carga) en el eje Z.

Dado que en la integración al satélite el panel solar se deforma elásticamente de acuerdo a las cargas que sobre él actúan, se realizó un ensayo dinámico con montaje *cantilever* que representa simplificada esta situación.

El panel de ingeniería se sujetó en uno de sus extremos a un perfil doble T (Figura 4) el cual se encontraba fijo al equipo de vibraciones (*shaker*). Con esta configuración, se determinaron las frecuencias naturales de vibración y se imprimió dos ciclos con vibración senoidal, de aceleración de $10g$ y frecuencia 16 Hz en el eje Z.

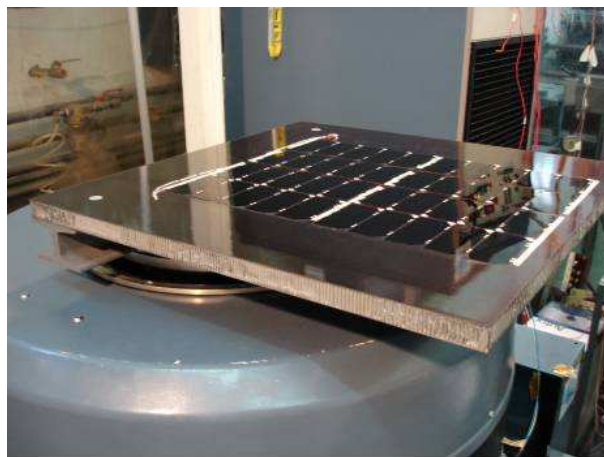


Figura 4. Montaje del panel en la base vibratoria para el ensayo de vibración *cantilever*.

Ensayo de termovació

El ensayo de termovació tiene como objeto emular los ciclados térmicos que sufre el módulo solar al entrar y salir del eclipse en atmósfera de vacío espacial.

El ensayo de ciclado térmico en vacío se realizó en una cámara de termovació de 200 litros de capacidad. Se realizaron 10 ciclos térmicos entre -100°C y 100°C , a una presión media de 1×10^{-5} torr, en forma ininterrumpida. Una vez concluido el ensayo de termovació, se realizó la inspección visual y la verificación eléctrica del panel de ingeniería.

Resultados

Antes y después de cada ensayo se realizó una inspección visual del panel a simple vista y con lupa 8X y la verificación eléctrica mediante la medición con luz pulsada de las dos cadenas.

La medición de la curva I-V de las dos cadenas realizadas en el laboratorio antes y después de finalizados todos los ensayos se presentan en la Figura 5.

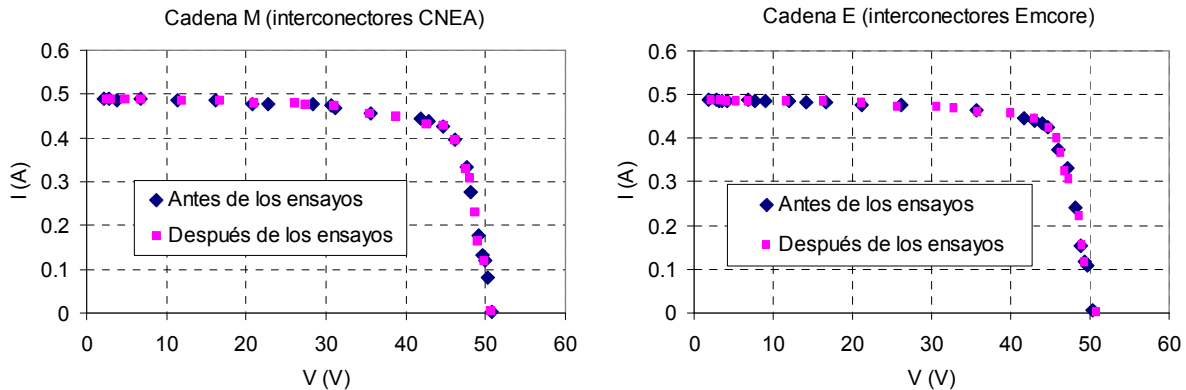


Figura 5. Medición de la curva I-V de ambas cadenas antes y después de los ensayos de vibraciones y termovacío.

ENSAYO DE CICLADO TÉRMICO EN SUBCADENA DE CELDAS

En el CAC, a mediados de 2004, se comenzó con la instalación de un laboratorio para ensayo y caracterización de materiales, recubrimientos, componentes electrónicos y dispositivos electromecánicos, que se someterán a condiciones similares a las existentes en el ambiente espacial. El objetivo fundamental de esta actividad es reemplazar los estudios tradicionales de ciclado térmico o irradiaciones con partículas (que se realizan habitualmente en forma independiente), por ensayos más sofisticados que combinen en una misma cámara varios factores, básicamente: vacío, radiación con partículas cargadas, ciclado térmico y radiación electromagnética. En una primera etapa de esta tarea se ha desarrollado una cámara de vacío para la realización de ensayos de ciclado térmico de larga duración (típicamente del orden de 1000 ciclos).

Los ensayos de ciclado térmico suelen realizarse en vacío ó en un gas inerte (típicamente N_2) para acelerar el proceso (Larue, 1976 y Hoffman y Scheiman, 1997). En esta ocasión se realizó el ciclado térmico de un subconjunto representativo del panel solar (una subcadena de 4 celdas de triple junta conectadas en serie) entre temperaturas extremas que exceden los márgenes a los que estará sometido el panel solar en el espacio. El objetivo del ensayo fue evaluar la confiabilidad de dicho subconjunto en cuanto a su resistencia a los cambios bruscos y repetidos de temperatura. En particular, se analiza el comportamiento de los interconectores, los adhesivos, las soldaduras y los componentes principales de la subcadena (celda solar, vidrio y diodo de paso).

Utilizando el sistema de ciclado térmico presentado en Alurralde et al.(2004) se realizaron ciclados térmicos, típicamente entre $-100^{\circ}C$ y $+100^{\circ}C$, en periodos de alrededor de 15 min.

Esta cadena estaba pegada sobre un sustrato de fibra de carbono recubierta por Kapton. Se fijó este subconjunto sobre un portamuestra para asegurar el contacto térmico. Se midió temperatura en tres puntos cercanos a las celdas mediante termorresistencias (tipo Pt-100) conectadas a un sistema de adquisición de datos. La presión se mantuvo entre $5E-6$ y $1E-5$ Torr y la temperatura de la pared de la cámara en $22^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$.

Para los primeros 264 ciclos la temperatura varió entre $-60^{\circ}C$ y $+80^{\circ}C$ y para los siguientes 745 ciclos entre $-100^{\circ}C$ y $+100^{\circ}C$. Las celdas se iluminaron durante el ciclado con una lámpara de tungsteno de 10W, midiéndose la corriente generada sobre una resistencia de carga, a fin de verificar el correcto funcionamiento de la subcadena durante todo el proceso. En la Figura 6 se presentan las curvas de temperatura en 3 zonas de la subcadena y la corriente sobre la resistencia de carga, durante 8 ciclos. Cabe destacar que la medición de la corriente debe considerarse solamente como una referencia ya que la iluminación de las celdas no es uniforme y la intensidad es mucho menor que la solar.

Se realizó una inspección visual a las celdas e interconectores antes del ensayo, después de los 264 ciclos y al completarlo. Se midió, además, la muestra con simulador solar (espectro AM0), sin control de temperatura, antes y después del experimento. En la Figura 7 se presentan ambas curvas, no hallándose diferencias significativas.

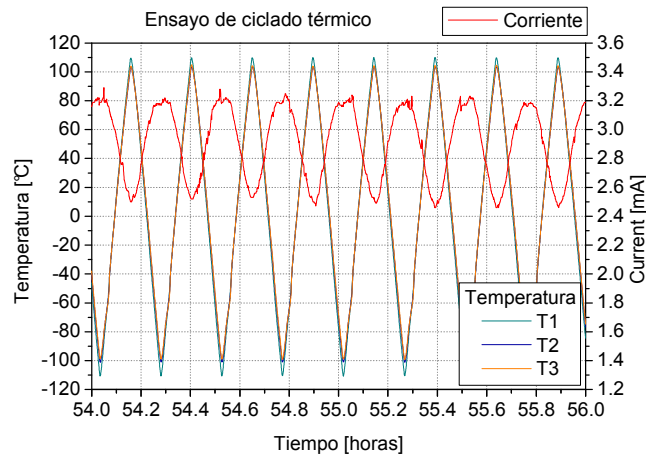


Figura 6. Curvas de temperatura durante el ciclado térmico y de la corriente para verificación del funcionamiento eléctrico de las celdas.

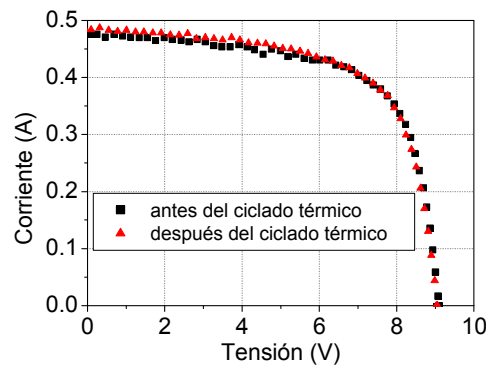


Figura 7. Medición de la curva IV de la subcadena antes y después de los 1000 ciclos térmicos.

OTROS DESARROLLOS: CÁMARA PARA INSPECCIÓN VISUAL DEL PANEL A ALTA TEMPERATURA

Con el objeto de detectar posibles fisuras o defectos que no sean visibles a temperatura ambiente pero que sí se revelen a temperaturas más elevadas, se construyó una cámara térmica para realizar la inspección visual y el ensayo eléctrico del panel solar a 70°C. En la Figura 8 se muestra la cámara durante el ensayo del primer panel de ingeniería.

Consiste en una caja de aluminio, de paredes aisladas con poliuretano expandido, utilizando como tapa un vidrio laminado a fin de poder realizar la inspección visual. Para mantener la temperatura en el interior de la caja, se inyecta por un extremo aire caliente.

La inspección visual y el ensayo eléctrico realizado en estas condiciones sobre el primer panel de ingeniería no mostraron diferencias con los resultados obtenidos a temperatura ambiente.



Figura 8. Cámara para inspección visual a 70°C

CONCLUSIONES

En la construcción del segundo panel de ingeniería se optimizaron procesos pendientes de ajustes en la fabricación del panel anterior. Las celdas solares integradas para este módulo presentaron una cantidad de defectos, tales como burbujas y bordes astillados, mucho menor que en el panel anterior.

La caracterización eléctrica del panel terminado permitió verificar el buen funcionamiento de cada una de las cadenas y de

los diodos de paso.

La instalación de la cámara para ciclado térmico permite disponer en el país de una herramienta fundamental para el ensayo y calificación de materiales y componentes a utilizarse en próximas misiones satelitales argentinas.

La inspección visual y la medición de las características eléctricas del panel de ingeniería y la subcadena de cuatro celdas realizadas antes y después de los ensayos, no mostraron diferencias relevantes, pudiendo considerarse esta experiencia como una calificación preliminar de los componentes y procedimientos de fabricación desarrollados.

El segundo módulo de ingeniería fabricado fue sometido a ensayos estructurales dinámicos y de ciclado térmico en vacío entre -100°C y $+100^{\circ}\text{C}$ a una presión de 10^{-5} Torr, en los laboratorios de INVAP S.E. en la ciudad de S.C. de Bariloche. La inspección visual y la verificación de las características eléctricas realizadas antes y después de los ensayos no mostraron diferencias relevantes, considerándose en consecuencia calificados los procedimientos de integración a ser utilizados para la misión Aquarius/SAC-D.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a E.C. Bottinelli, J. Vega y G. Bisaccio por su permanente apoyo durante la ejecución del Subproyecto Paneles Solares, y al personal profesional y técnico de la CONAE e INVAP que hizo posible la realización de los ensayos de calificación del módulo de ingeniería.

REFERENCIAS

Alurralde M., Barrera M., Bolzi C.G., Bruno C.J., Durán J.C., Fernández Vázquez J., Filevich A., Godfrin E.M., Goldbeck V., Iglesias A., Martínez Bogado M.G., Mezzabolta E., Nigro S.L., Plá J., Prario I., Raffo Calderón M.C., Rodríguez S.E., Tamasi M.J.L., Vertanessian A., Antonuccio F., Cabot P., Carella E., Franciulli C.D., Moglioni A.. Ultimos desarrollos relacionados con la fabricación y el ensayo de paneles solares y componentes para usos espaciales. *AVERMA* 8, pág. 04.01 (2004).

Bolzi C.G., Bruno C.J., Godfrin E.M., Martínez Bogado M.G., Plá J., 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, 04.07-04.12.

Bolzi C.G., Bruno C.J., Cabot P., Carella E., Durán J.C., Fernández Vázquez J., Franciulli C.D., Godfrin E.M., Goldbeck V., Martínez Bogado M.G., Moglioni A., Plá J., Rodríguez S.E., Tamasi M.J.L., Alurralde M., Antonuccio F., Filevich A., Iglesias A., Mezzabolta E., Nigro S.L. (2003) Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas - primer módulo para ensayos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 7, 04.07-04.12.

Durán J.C., Bruno C.J., Alurralde M., Antonuccio F., Bolzi C.G., Cabot P., Carella E., Fernández Vázquez J., Filevich A., Franciulli C.D., Godfrin E.M., Goldbeck V., Martínez Bogado M.G., Mezzabolta E., Nigro S.L., Plá J., Rodríguez S.E., Tamasi M.J.L. (2002). Convenio de cooperación CONAE-CNEA: desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6, 04.13-04.17.

Godfrin E.M. y Durán J.C. (2002). Paneles Solares para la Misión Satelital SAOCOM: primeras etapas del diseño. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6, 04-19.

Larue J C (1976). A gas stream thermal cycling apparatus. *Journal of Physics E-Scientific Instruments* Volume 9 pp. 890-893.

Hoffman D. y Scheiman D. (1997). Thermal Cycling of Mir Cooperative Solar Array (MCSA). *Test Panels NASA Technical Memorandum* 107511 IECEC-97144 pp 1-6.

ABSTRACT

The development in the National Atomic Energy Commission (CNEA) of solar arrays for Argentine space missions is being performed within the frame of a cooperation agreement between this agency and the National Commission for Space Activities (CONAE). In this paper, the advances achieved during the last year are presented. These advances conducted to the integration and testing of the second engineering module, which has been specially developed for the qualification of processes for the Aquarius/SAC-D mission. This mission is the result of a cooperation between CONAE and two laboratories from NASA: the Goddard Space Flight Center (GSFC) and the Jet Propulsion Laboratory (JPL).

solar panels – space applications – environmental space testing – electrical tests