

ULTIMOS DESARROLLOS RELACIONADOS CON LA FABRICACIÓN Y EL ENSAYO DE PANELES SOLARES Y COMPONENTES PARA USOS ESPACIALES*

M. Alurralde¹, M. Barrera^{2,3}, C.G. Bolzi², C.J. Bruno², J.C. Durán², J. Fernández Vázquez², A. Filevich^{2,3}, E.M. Godfrin², V. Goldbeck¹, A. Iglesias⁴, M.G. Martínez Bogado²⁺, E. Mezzabolta⁵, S.L. Nigro², J. Plá^{2,3}, I. Prario^{1,3}, M.C. Raffo Calderón⁴, S.E. Rodríguez², M.J.L. Tamasi^{2,3}, A. Vertanessian^{2,3}, F. Antonuccio², P. Cabot⁶, E. Carella⁶, C.D. Franciulli⁵, A. Mogliani⁶

¹Departamento de Materiales - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

²Departamento de Física - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)

⁴Departamento de Química - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

⁵Profesional Independiente

⁶Departamento de Ensayos No Destructivos y Estructurales - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

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

Tel. (011) 6772-7132, Fax (011) 6772-7121, www.tandar.cnea.gov.ar, duran@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN

Se presentan los avances más importantes logrados durante el último año en el desarrollo de los paneles solares para la misión satelital SAOCOM, el cual se lleva a cabo en el marco del convenio de cooperación vigente entre la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales. En particular, se muestran el estado de avance de la instalación de una cámara para el ensayo de celdas solares y otros componentes satelitales en ambiente espacial simulado y los últimos desarrollos en el proceso de pegado y la elaboración de interconectores para celdas solares. Asimismo, se presentan los ensayos realizados sobre un módulo de ingeniería.

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

INTRODUCCIÓN

Las tareas que conducen a la integración de los paneles solares de ensayo y de vuelo para la misión satelital SAOCOM fueron analizadas en detalle en publicaciones anteriores (Bolzi et al., 2001; Durán et al., 2002; Bolzi et al., 2003). El presente trabajo tiene por objetivo describir los avances realizados durante el último año en algunas de las técnicas relevantes del proceso de fabricación y en el desarrollo de equipamiento y procedimientos de ensayo de dichos paneles solares y sus componentes. En particular, se presenta el estado de avance de la construcción de una cámara para emular las condiciones del ambiente espacial, especialmente en órbitas de baja altura (LEO). Los ensayos realizados en Tierra, bajo condiciones controladas y normalizadas, permiten estudiar la resistencia de los dispositivos al ambiente espacial y predecir el comportamiento de los mismos al final de su vida útil, pudiéndose realizar entonces un diseño apropiado de los paneles solares de un satélite. Se describen asimismo los desarrollos en otros temas relevantes: caracterización de celdas solares, puesta a punto de los procesos de pegado y fabricación de interconectores. Finalmente, se presentan los ensayos realizados sobre el panel de ingeniería fabricado con anterioridad (Bolzi et al., 2003), llevados a cabo en el Centro Atómico Constituyentes (CAC) de la CNEA, en el caso de los ensayos eléctricos, y en instalaciones de INVAP S.E. en San Carlos de Bariloche, en el caso de los ensayos de vibraciones y termovacio. En un artículo aparte se resumen los avances en lo referido a celdas solares de silicio cristalino (Barrera et al., 2004).

CÁMARA DE SIMULACIÓN DE AMBIENTE ESPACIAL

Se ha iniciado la instalación en el CAC de un laboratorio para ensayo y caracterización de materiales, recubrimientos, componentes electrónicos y dispositivos electromecánicos, sometidos a la acción de distinto tipo de radiaciones y fuerzas presentes en el entorno espacial y durante las etapas de lanzamiento de satélites, sondas y otros dispositivos aeroespaciales. Como parte de estas actividades, se está construyendo una cámara para la emulación del ambiente espacial.

El estudio de la influencia de los factores ambientales en sistemas o componentes satelitales se realiza habitualmente considerando los distintos factores por separado. Los estudios de ciclo térmico e irradiaciones, por ejemplo, se suelen llevar a cabo en experiencias separadas y en diferentes períodos de tiempo. Este procedimiento no reproduce adecuadamente la situación real en vuelo y puede llevar a conclusiones erróneas.

* 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.

+ Becaria de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.



Figura 1: Fotografía de la cámara de ensayos.

Con el fin de realizar ensayos más realistas, se instaló una cámara de vacío de 76 cm de diámetro en una de las líneas del acelerador TANDAR de la CNEA. Esta cámara permitirá estudiar el comportamiento de materiales y componentes electrónicos bajo condiciones similares al ambiente espacial. Se podrá irradiar en vacío con protones o iones pesados provenientes del acelerador Van der Graff, cuya máxima energía posible es 15 MeV para protones. Además, se podrán iluminar las muestras a estudiar con radiación electromagnética espectralmente similar a la del Sol, mediante un simulador solar, permitiendo caracterizar el comportamiento de dispositivos fotovoltaicos, optoelectrónicos, sensores, etc. En la Figura 1 se muestra el equipo.

Las condiciones ambientales que se podrán simular en un mismo ensayo son: ciclado térmico para reproducir los gradientes de temperatura en órbita, vacío, irradiación con partículas a diferentes energías y ángulos de incidencia, paredes frías para emular el fondo de radiación térmica espacial, y el espectro solar usando el simulador solar mencionado. Se espera poder observar efectos producidos por la variación simultánea de varios de estos factores.

Se ha desarrollado una base calefactora/enfriadora que permite la realización de ciclos térmicos, típicamente entre -100°C y $+100^{\circ}\text{C}$, en períodos relativamente cortos. El dispositivo se compone de tres partes

principales en contacto térmico entre sí: una platina calefactora, un separador y una placa refrigerante. La platina, de $8\text{ cm} \times 16\text{ cm} \times 1,3\text{ cm}$, está compuesta por tres piezas de aluminio con surcos tallados donde se ubican las resistencias calefactoras de Cr-Ni entubadas en acero inoxidable con aislamiento de óxido mineral. Su característica coaxial evita la introducción de ruido en la electrónica de medición. El separador está construido en chapa de bronce de $0,1\text{ cm}$ de espesor y se encuentra ubicado entre la platina y la placa refrigerante, introduciendo en consecuencia una resistencia térmica que permite regular el flujo de calor entre ambas. La placa refrigerante de bronce actúa como fuente fría, para lo cual por su interior circula N_2 líquido en flujo turbulento, logrando mantener su temperatura en aproximadamente -200°C .

Se elaboró un modelo térmico sencillo para desarrollar el prototipo y poder predecir el comportamiento del dispositivo ante posibles cambios de diseño en función del ciclo térmico deseado.

El ciclo térmico se controla mediante un regulador de temperatura marca Novus N1100, el cual utiliza una termorresistencia Pt-100 para monitorear la temperatura sobre la platina y actúa sobre la salida de potencia mediante un relé de estado sólido. La medición de temperatura de la muestra y el portamuestra se realiza utilizando termorresistencias ubicadas convenientemente y mediante una placa de adquisición de datos de 8 canales. La comunicación con la PC se realiza con una vía RS-485, que permite extender el cableado hasta 1000 m. La Figura 2 a) muestra, a modo de ejemplo, la variación temporal de la temperatura del portamuestra, con pruebas de estabilización de la temperatura en 130°C , -10°C y -120°C . En la Figura 2 b) puede observarse la temperatura en 2 puntos diferentes durante un ciclado térmico entre -120°C y $+110^{\circ}\text{C}$.

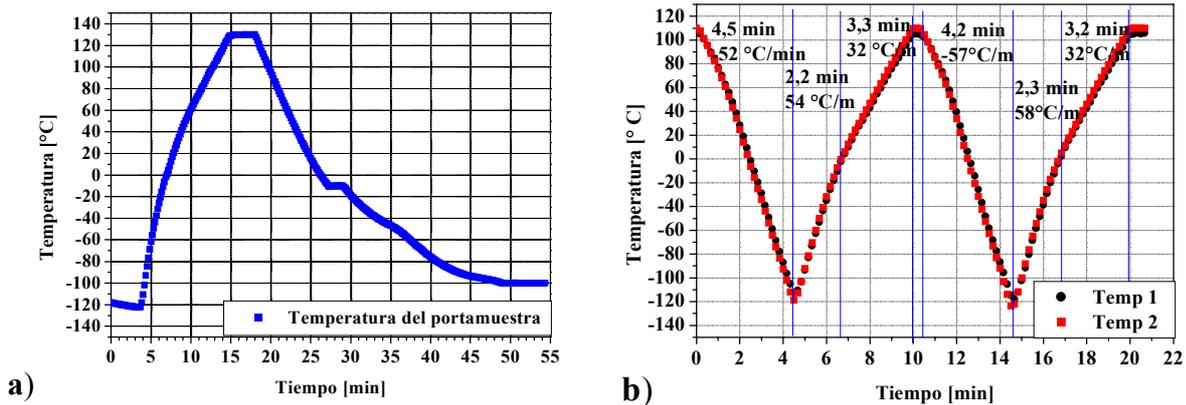


Figura 2: a) Temperatura del portamuestra con períodos de estabilización.. b) Ciclado térmico.

DESARROLLOS EN EL PROCESO DE PEGADO

Según lo descrito en detalle previamente (ver, por ejemplo, Bolzi et al. 2003), los procesos de pegado juegan un papel fundamental en diversas etapas de la fabricación de un panel solar para uso espacial: pegado de los vidrios a las celdas en forma individual, pegado de las subcadenas de celdas en serie al sustrato y fijación mediante adhesivo de los cables, diodos de bloqueo y otros componentes al sustrato. La puesta a punto de estos procesos requirió el desarrollo de dosificadores para la aplicación y distribución de los diferentes adhesivos, y de sistemas neumáticos especiales para la manipulación de los

vidrios, celdas e interconectores. La aplicación de los procedimientos desarrollados en la fabricación del primer módulo de ingeniería para ensayos permitió calificar los mismos (Bolzi et al. 2003).

De la experiencia lograda durante la etapa de desarrollo que finalizó con el armado del módulo de ingeniería mencionado, surgieron ideas para la mejora de algunos procedimientos y la modificación, en algún caso, del equipamiento correspondiente. En particular, se rediseñó el sistema de preparación, mezclado, carga y distribución del adhesivo para el pegado del vidrio con el fin de disminuir el tiempo necesario para la preparación, mezclado y llenado del distribuidor, lo cual resulta fundamental debido al relativamente corto tiempo de uso del adhesivo una vez preparado. El nuevo sistema permitirá también mejorar la repetibilidad en el espesor del adhesivo depositado. Asimismo, se modificaron los procesos de pegado del vidrio, dando lugar a etapas intermedias de desgasado del adhesivo distribuido (fundamental para evitar la formación de burbujas entre la celda y el vidrio), y se encuentra actualmente en experimentación un sistema para el pegado del vidrio en cámara de vacío.

En lo referente al pegado de las subcadenas de celdas al sustrato, se buscaron alternativas al corte con láser para la fabricación de las máscaras, habiéndose realizado pruebas preliminares satisfactorias con una fresadora a control numérico disponible en el Centro Atómico Constituyentes.

Respecto a los sistemas de distribución y aplicación de adhesivo para el pegado de las subcadenas, se está desarrollando un nuevo distribuidor que permitirá realizar la preparación, mezclado y desgasado del adhesivo en el mismo cuerpo del aplicador, buscando minimizar los tiempos de preparado y carga, con los consecuentes aumentos en el tiempo de uso.

Actualmente, se encuentran terminados dos pequeños módulos con subcadenas de 4 celdas conectadas en serie y seis muestras de celdas individuales con interconectores y vidrios pegadas sobre sustratos, para ser utilizados en distintos tipos de ensayos.

PLATEADO DE INTERCONECTORES

Las celdas solares que componen los paneles solares espaciales se conectan eléctricamente entre sí mediante interconectores metálicos de unos pocos milímetros de ancho y con espesores comprendidos entre 10 y 40 μm . Dado que los cambios dimensionales producidos por el ciclado térmico dan lugar a la modificación de la separación entre celdas contiguas, los interconectores serán los elementos que, además de cumplir la función de conductores eléctricos, deberán absorber dicha modificación. A tal fin, su geometría incluye un lazo de deformación destinado a servir de aliviador de tensiones generadas por el ciclado térmico.

Se ha seleccionado el molibdeno como material de base para los interconectores a ser utilizados para los paneles solares del satélite SAOCOM, por su elevada resistencia a la fatiga y su carácter no magnético. En una primer etapa y con la colaboración de la empresa Metal Finishing S.A., se realizó un conjunto de experiencias de plateado de Mo (con capas intermedias de Ni y/o Cu), lográndose definir un procedimiento preliminar para el depósito de la multicapa Cu-Ni-Ag.

El procedimiento desarrollado consiste en un conjunto de pasos que comprenden baños electrolíticos, inmersión en distintos ácidos y enjuagues. La temperatura de los baños varía entre temperatura ambiente y 80°C, y la densidad de corriente entre 0,5 A/dm² y 100 A/dm². Se utilizan ánodos de distintos materiales según el metal que se desee depositar (plomo, níquel, cobre, plata). En cada caso el tiempo necesario está determinado por el espesor requerido para cada recubrimiento.

Los depósitos para la puesta a punto del procedimiento fueron realizados sobre cintas de Mo de 20 μm de espesor, cortados en pequeñas tiras de 5 a 6 mm de ancho. Sobre algunas muestras se realizaron depósitos de Ni solamente, y en otras de Ni y Ag. Luego, estas muestras fueron observadas por microscopía electrónica de barrido y por microscopía óptica, pudiéndose determinar una adherencia muy buena del recubrimiento sobre el Mo y espesores uniformes en los depósitos.

En la segunda etapa, se realizaron depósitos de Cu, Ni y Ag sobre cintas de Mo de mayores dimensiones. Las primeras muestras presentaron buena adherencia de la multicapa pero con inhomogeneidad en el espesor. Por tal motivo, fue necesario rediseñar el dispositivo de sujeción a fin de mejorar la uniformidad de la densidad de corriente sobre toda la superficie de la cinta.

CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES

La caracterización de las celdas solares es un punto clave en el diseño de los paneles. De las curvas corriente-tensión (I-V) medidas, se obtienen la tensión a circuito abierto, la corriente de cortocircuito y la máxima potencia, permitiendo realizar una primera estimación de la cantidad de celdas necesarias para satisfacer los requisitos de potencia del satélite y, posteriormente, una simulación de interconexión de las celdas (Godfrin y Durán, 2002).

La caracterización de las celdas solares se realiza mediante un simulador solar TS-Space y un sistema electrónico desarrollado en la CNEA. Dicho simulador posee 2 lámparas de Xe de arco corto y 4 lámparas halógenas de W. Presenta una excelente estabilidad sobre tiempos largos, gracias a su sistema de realimentación sobre cada lámpara, pero con fluctuaciones de relativamente alta frecuencia asociadas con inestabilidades del arco de las lámparas de Xe. Si bien estas fluctuaciones son parcialmente filtradas por el sistema de medición, dan lugar a oscilaciones en la curva I-V de las celdas medidas asociadas con la variación de la irradiancia.

Con el objeto de estimar el error en el cálculo de los parámetros eléctricos como consecuencia de las fluctuaciones mencionadas en el párrafo precedente, se incorporó al programa de simulación de interconexión de celdas un procedimiento que permite obtener la curva correspondiente a la irradiancia media recibida por la celda durante el ensayo. A partir de dicha curva, se determinan las desviaciones en tensión y corriente de manera que los puntos medidos queden incluidos dentro de la banda así definida. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de caracterización eléctrica de una celda de triple junta de InGaP/InGaAs/Ge.

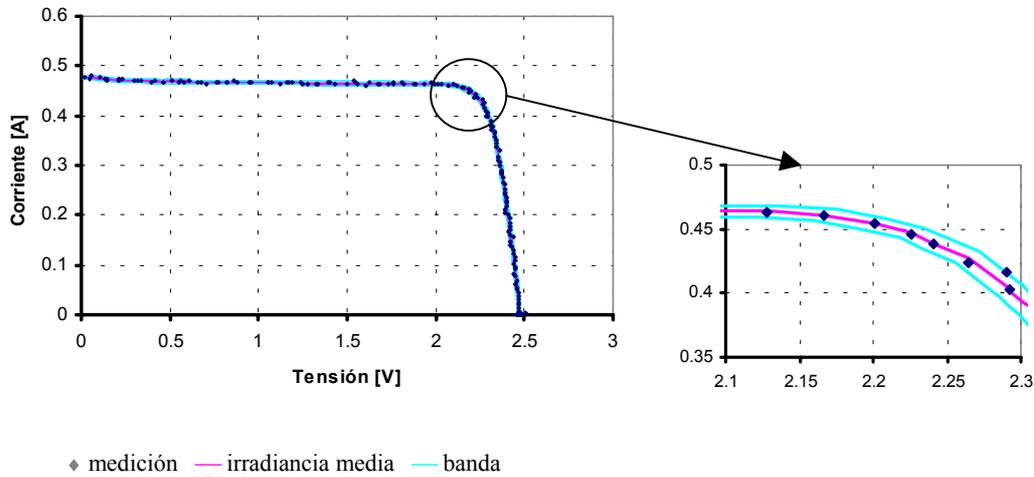


Figura 3: Caracterización de una celda de triple junta, curva de irradiancia media y banda de error correspondiente.

Los resultados obtenidos indican que los errores de cálculo de los parámetros eléctricos para celdas de triple junta son inferiores a 0,3 % para las tensiones y 0,7 % para las corrientes.

ENSAYO DEL MÓDULO DE INGENIERÍA

Caracterización eléctrica – medición de la curva I-V

El módulo de ingeniería fabricado consta de 2 cadenas de 32 celdas de triple junta conectadas en serie, según se describe en detalle en Bolzi et al. 2003. La verificación del funcionamiento eléctrico (curva I-V) de dichas cadenas se realizó iluminando el módulo con luz pulsada y con luz natural.

La medición con luz pulsada se realizó mediante el siguiente equipamiento: un “flash” fotográfico, un filtro neutro, un osciloscopio digital (con base de tiempo disparada, doble trazo y memoria), un par de puntas de osciloscopio (1X o 10X), una carga electrónica, un dispositivo para sombreado parcial y un multímetro de fondo de escala mayor a 100 V. La distancia entre la fuente pulsada y el panel solar se seleccionó de manera tal que la corriente de cortocircuito de una celda multijuntura usada como sensor de nivel de irradiancia coincidiera con el valor obtenido mediante el simulador solar. En la configuración de tres terminales, se conectó una cadena del panel a la carga electrónica y al osciloscopio. La medición del panel se realizó a temperatura ambiente ($T = 22,5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$), obteniéndose los pares corriente-tensión (I-V) para 10 valores de la carga electrónica (variados manualmente) entre un valor cercano a V_{ca} ($I = 0$) y un valor próximo a I_{cc} ($V = 0$), para cada cadena de 32 celdas. Se muestran en la Fig. 4 las mediciones realizadas.

La medición de la curva característica I-V de las cadenas de celdas al sol se realizó en las siguientes condiciones: irradiancia = $(887,9 \pm 17,8) \text{ W/m}^2$ y AM1.62 (Fig. 4), obteniéndose una tensión a circuito abierto de 82,5 V y una corriente de cortocircuito de 408 mA para la cadena 1, y $V_{ca} = 80,4 \text{ V}$ e $I_{cc} = 411 \text{ mA}$ para la cadena 2.

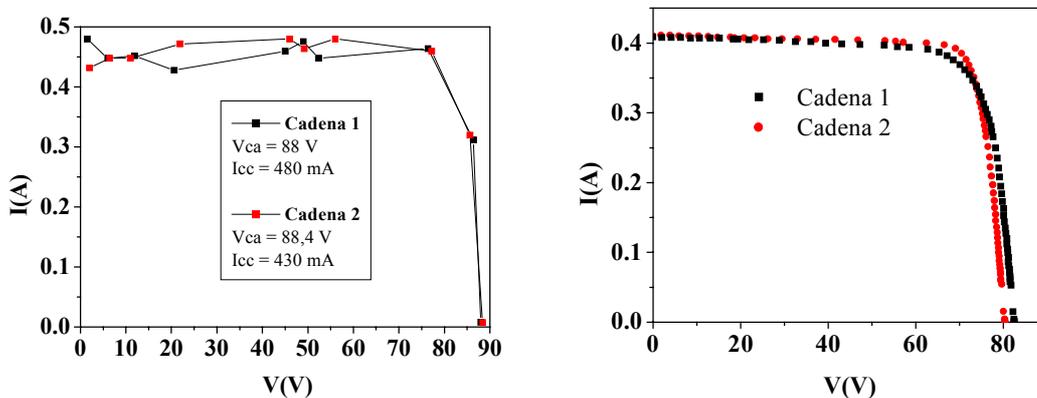


Figura 4: Curva característica I-V de cada cadena del panel de ingeniería medidas con “flash” (izq.) y al Sol (der.).

Ensayos de vibraciones

El ensayo de vibraciones consiste en emular las exigencias que tendría que enfrentar el panel en el momento del 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 (Fig. 5).

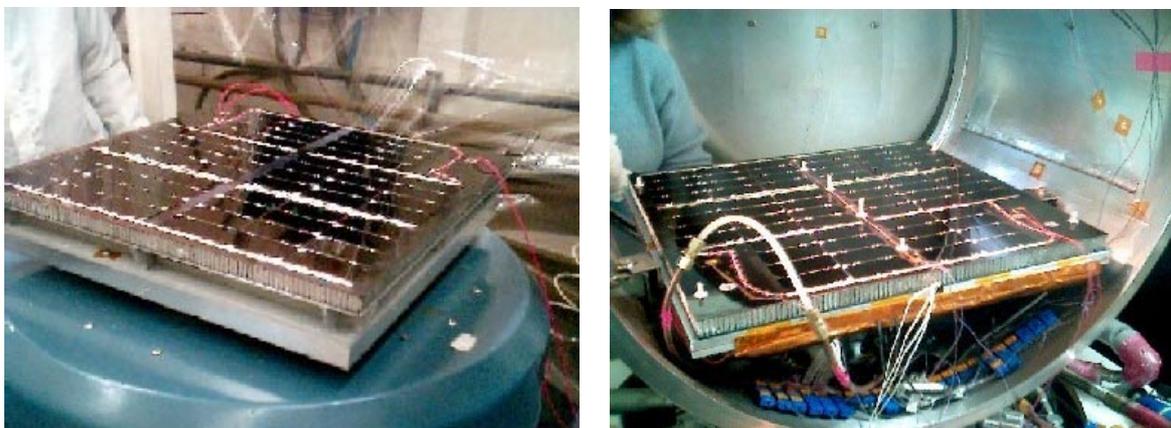


Figura 5: Montaje del panel en la base vibratoria para el ensayo de vibración (izq.) y en la cámara de termovacío (der.)

Se determinaron las frecuencias naturales del panel y se realizaron ensayos de vibraciones senoidales en el eje Z, imprimiéndose al panel una aceleración 25 veces la aceleración gravitatoria terrestre (g). También, se realizaron ensayos con aceleraciones de 50 g, 74 g y 100 g en el eje Z.

En otra etapa del ensayo de vibraciones se realizó un barrido aleatorio en frecuencias fuera de las frecuencias naturales, en donde el espectro aleatorio especificado representa las condiciones de vibración a las que estaría sometido el panel durante el lanzamiento, las cuales dependen del lanzador. En este caso se utilizó el nivel de calificación con el espectro vibracional del lanzador Cyclone-4. Finalmente, se realizó un ensayo de baja amplitud (o carga) en el eje Z.

Después de cada ensayo se verificó el funcionamiento del panel midiendo la tensión a circuito abierto de cada subcadena empleando un multímetro.

Ensayo de termovacío

El ensayo de termovacío se realizó en cámara de acero a una presión de vacío de aproximadamente 1×10^{-5} torr. El fondo de la cámara de termovacío está formado por una estructura de dos placas: una placa base inferior que lleva soldada la cañería del N_2 líquido y los calentadores, y otra superior, sujeta mecánicamente a la primera, sobre la que va montado el objeto a ensayar. Las resistencias calefactoras permiten que la placa superior alcance temperaturas de poco más de 100°C con rampas de temperaturas regulables manualmente. De la misma manera, la serpentina permite enfriar el sistema hasta -100°C . Para registrar las temperaturas durante el ensayo se instalaron sensores de temperatura (termocuplas y termorresistencias). Estos sensores se colocaron a ambos lados del módulo de ingeniería para poder determinar la temperatura del panel durante el ensayo.

La ubicación de los mismos se definió en función del análisis de un modelo térmico. Brevemente, consiste en colocarlos en posiciones tal que se pueda tener el gradiente de temperatura en los distintos ejes. Se colocaron 5 termocuplas, una termorresistencia de $2,4 \text{ k}\Omega$ (PT 2000) y 8 separadores (“stand-off”) sobre el sustrato. Los parámetros que se establecieron para el ensayo fueron los siguientes: las diferencias de temperatura entre las termocuplas debía ser menor a 7°C ; con una temperatura promedio $\langle T_i \rangle = (95 \pm 5)^\circ\text{C}$ al final de la rampa caliente y una temperatura promedio $\langle T_i \rangle = (-100 \pm 5)^\circ\text{C}$ al final de la rampa fría. Se estableció una meseta de estabilización de 5 minutos en cada temperatura extrema. En la figura 5 muestra el panel dentro de la cámara de ensayos térmicos.

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 termovacío, se realizó una inspección visual a simple vista y con lupa 2X, y la correspondiente verificación eléctrica mediante la medición con luz pulsada de las dos cadenas.

CONCLUSIONES

Se realizaron importantes avances en el desarrollo de una cámara para el ensayo de dispositivos solares y otros componentes satelitales en ambiente espacial simulado. La finalización de la instalación de esta cámara permitirá disponer en el país de una herramienta fundamental para el ensayo y calificación de materiales y componentes a ser utilizados en las próximas misiones

satelitales argentinas.

Se lograron adelantos significativos en los procesos de pegado vidrio-celda y subcadena-sustrato, en la fabricación de interconectores y en los modelos para la caracterización eléctrica de celdas solares.

El primer módulo de ingeniería fabricado fue sometido a ensayos de vibraciones (hasta aceleraciones de 100 g) y de ciclado térmico en vacío en laboratorios de INVAP S.E., en la ciudad de S.C. de Bariloche. La inspección visual y la medición de las características eléctricas realizadas antes y después de los ensayos no mostraron diferencias relevantes, pudiéndose considerar entonces la experiencia como una calificación preliminar de los componentes y procedimientos de fabricación desarrollados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a C. Alonso, E.C. Bottinelli 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

- Barrera M., Bolzi C.G., Corvalán D., Martínez Bogado M.G., Plá J. y Tamasi M.J.L. (2004). Últimos desarrollos en celdas solares de silicio cristalino en la CNEA. Enviado a *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **8**.
- 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.

ABSTRACT

This paper presents the more important advances performed during the last year in the development of the solar panels for the SAOCOM satellite mission. This activities are done within the frame of a cooperation agreement between the Argentine National Atomic Energy Commission and the Argentine National Commission for Space Activities. Particularly, a chamber for testing solar cells and other satellite devices in simulated space environment as well as the last developments on the bonding process and the fabrication of interconnectors for solar cells are presented. Finally, results of tests performed on an engineering module are also shown.

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