



DESARROLLO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE PANELES SOLARES PARA MISIONES SATELITALES ARGENTINAS - PRIMER MÓDULO PARA ENSAYOS *

C.G. Bolzi¹, C.J. Bruno¹, P. Cabot², E. Carella², J.C. Durán¹, J. Fernández Vázquez¹, C.D. Franciulli³, E.M. Godfrin¹, V. Goldbeck⁴, M.G. Martínez Bogado¹, A. Moglioni², J. Plá¹, S.E. Rodríguez¹, M.J.L. Tamasi¹, M. Alurralde⁴, F. Antonuccio¹, A. Filevich¹, A. Iglesias⁵, E. Mezzabolta³, S.L. Nigro¹.

¹Departamento de Física – Centro Atómico Constituyentes – CNEA

²Departamento de Ensayos No Destructivos y Estructurales - Centro Atómico Constituyentes – CNEA

³Profesional Independiente

⁴Departamento de Materiales – Centro Atómico Constituyentes – CNEA

⁵Departamento de Química – 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, duan@cnea.gov.ar

RESUMEN

Se presentan los logros alcanzados durante el último año en el desarrollo de paneles solares para misiones satelitales argentinas, en el marco del convenio de cooperación vigente entre la Comisión Nacional de Actividades Espaciales y la CNEA. Se analizan las actividades desarrolladas en los temas más relevantes: caracterización de celdas solares, puesta a punto de los procesos de soldadura y pegado, y desarrollo de diversas técnicas y dispositivos para ensayos. En particular, se describe la elaboración y el ensayo del primer módulo fabricado para la calificación de procesos según requerimientos de la tecnología espacial.

paneles solares – uso espacial – celdas solares de triple juntura – soldadura – ensayos eléctricos

INTRODUCCIÓN

La Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) suscribieron, a fines de marzo de 2001, un convenio de cooperación cuyo objetivo final es proveer los paneles solares de vuelo para futuras misiones satelitales previstas en el Plan Espacial Nacional (Bolzi et al., 2001; Durán et al., 2002). Este convenio, encuadrado dentro de la Ley N° 23.877 de innovación tecnológica, dio lugar a la iniciación en el Centro Atómico Constituyentes (CAC) del Subproyecto Paneles Solares como parte del Proyecto SAOCOM de la CONAE.

Las tareas que conducen a la integración de los prototipos de ensayo y de vuelo para la misión satelital SAOCOM fueron presentadas en detalle en publicaciones anteriores (Bolzi et al., 2001; Durán et al., 2002). Por razones de completitud, se resumen a continuación:

1. Montaje del Laboratorio de Integración de Paneles Solares.
2. Elaboración y ensayo de celdas solares.
3. Estudios de daño por radiación sobre las celdas solares.
4. Fabricación y ensayo de interconectores.
5. Puesta a punto de los procesos de soldadura y de las técnicas de ensayo correspondientes.
6. Desarrollo de técnicas de alineación y pegado de los vidrios sobre las celdas y de las celdas sobre el sustrato.
7. Simulación teórica del funcionamiento del subsistema de generación eléctrica.
8. Fabricación y ensayo de paneles de ingeniería.
9. Integración de paneles de vuelo.

En el presente artículo se describen brevemente las actividades realizadas y los logros alcanzados durante el último año en relación con las distintas tareas enumeradas, exceptuando las asociadas con daño por radiación y simulación, las cuales se presentan en Refs. Tamasi et al. (2003) y Berbeglia et al. (2003).

LABORATORIO DE INTEGRACIÓN

El Laboratorio de Integración de Paneles Solares está ubicado en la planta baja del denominado Sector “C” del edificio TANDAR, en el Centro Atómico Constituyentes, y posee una superficie total de aproximadamente 220 m², incluyendo el área de ingreso de personal y una antecámara para el ingreso/egreso de equipos, insumos y productos. El sector está acondicionado como área limpia Clase 10.000 (FED-STD-209D, “Clasificación de Áreas Limpias”), con temperatura y

* 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.

humedad controladas.

Las obras de adaptación y terminación del edificio existente se iniciaron en agosto de 2001 y se finalizaron a comienzos de 2003. La principal actividad realizada al respecto durante el último año fue la puesta en marcha y regulación del sistema aire acondicionado, filtrado y presurización del Laboratorio, la cual se llevó a cabo luego de completada la instalación del equipamiento (equipo de frío, resistencias calefactoras, ventilador, humectadora, sistema de control, etc.) y de los filtros terminales absolutos. Resta por realizar la medición del número de partículas por unidad de volumen a fin de verificar, en condiciones de reposo (sin personal trabajando) y en operación, la calidad de aire alcanzada.

Otras tareas realizadas incluyeron: instalación de los servicios de vacío, aire comprimido y nitrógeno de alta pureza en puestos de trabajo, conexión de la red de datos del laboratorio a la red del edificio Tandar, montaje de un equipo enfriador de líquido para el sistema de refrigeración de equipamiento, e instalación de un sistema de detección de incendios.

En la Fig. 1 se muestran dos fotos del Laboratorio.



PROCESOS DE FABRICACIÓN

Interconectores

Las celdas solares que componen los paneles solares para aplicaciones espaciales se conectan eléctricamente entre sí mediante interconectores metálicos de unos pocos milímetros de ancho y con espesores comprendidos entre 10 y 40 μm . Estos interconectores poseen un lazo de deformación destinado a servir de aliviador de tensiones generadas por el ciclado térmico a que está sometido el satélite durante la misión. Como se mencionó en Durán et al. (2002), 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. La fabricación de interconectores a partir de cintas de Mo consta esencialmente de 3 etapas: plateado de cintas, corte y conformado.

Se trabajó en la puesta a punto de la técnica de deposición electrolítica de una multicapa de Cu-Ni-Ag sobre cintas de Mo de 20 μm de espesor. La mayor dificultad encontrada en el proceso estuvo asociada con la falta de adherencia de las capas, especialmente la de cobre, como resultado de una inapropiada preparación de la superficie de Mo. Luego de numerosos ensayos, se alcanzó una buena adherencia de las 3 capas mediante un proceso de 18 pasos, que incluye: desengrasas electrolíticos, enjuagues, ataques con ácido clorhídrico y sulfúrico, y finalmente depósito electrolítico sucesivo de Cu, Ni y Ag, con enjuagues intermedios. Se evaluaron las diferentes muestras de molibdeno plateado mediante observaciones con lupas y microscopio óptico para determinar rugosidad, observación con microscopio electrónico de barrido para determinar estructuras de los recubrimientos y espesor de los mismos, además de ensayos de adherencia y medición de espesores totales de la lámina por medio de micrómetro.

A fin de mejorar la repetibilidad y confiabilidad del proceso, se encaró el diseño y construcción de una unidad de laboratorio destinada a realizar el plateado de cintas de molibdeno, con un largo máximo de 250 mm y un ancho de hasta 38 mm. Esta unidad constará de un conjunto de probetas de vidrio Pirex, de 50 mm de diámetro interior y 320 mm de altura, destinadas a contener los diferentes tipos de baños y enjuagues que son necesarios para realizar el proceso completo. La misma será instalada en una campana de aspiración debido a la toxicidad de las soluciones utilizadas.

La unidad desarrollada está compuesta, esencialmente, por un soporte de madera de 1200 mm de largo por 500 mm de profundidad y 700 mm de altura, en el cual van montadas 11 probetas de vidrio, de las cuales 9 de ellas cumplen la función de cubas electrolíticas (4 de estas últimas calefaccionadas para mantener temperaturas del baño entre 55 y 85°C) en las que se realizan los diferentes pasos de proceso, con una agitación electromagnética de la solución por medio de un agitador magnético recubierto con teflon, y las 2 restantes se utilizan para enjuagues.

En cuanto al corte y conformado de los interconectores, luego de algunos ensayos de corte por electroerosión que no resultaron satisfactorios, se decidió encarar el desarrollo de una matriz progresiva que realice ambas etapas.

Soldadura

Los procesos de soldadura empleados para la interconexión de celdas solares para paneles espaciales deben producir soldaduras que aseguren un óptimo contacto eléctrico junto con una resistencia mecánica adecuada a las severas condiciones que se producen durante el despegue y la operación en órbita. Teniendo en cuenta que los fabricantes de celdas solares de alta eficiencia recomiendan fuertemente el uso de soldadura por resistencia con electrodos paralelos (*resistance parallel gap welding*), a partir de la recepción del equipo correspondiente a fines de 2002 (ver Fig. 2), se trabajó principalmente en la puesta a punto de esta técnica.

Se realizaron numerosas pruebas de soldadura por resistencia en celdas solares de triple juntura provistas por Emcore Corp., utilizando principalmente interconectores de Kovar plateado provistos por la misma empresa y también conectores de Mo plateados desarrollados en la CNEA. Las celdas utilizadas llevan adosado el diodo de paso en una de sus esquinas (ver Fig. 3), el cual se conecta en paralelo con la celda a través del interconector frontal de 3 patas y de un interconector posterior. En consecuencia, las experiencias realizadas incluyen cuatro tipos de uniones:

- interconector - cara frontal celda
- interconector - cara frontal diodo
- interconector del diodo - cara posterior celda
- interconector - cara posterior celda.

El sistema de “welding” utilizado permite controlar la presión de los electrodos sobre la pieza a soldar y programar el ciclo de soldado (rampas de calentamiento/enfriamiento, duración de los pulsos, número de pulsos, tensión de trabajo, etc.). A continuación se indican algunos de los parámetros variados durante los ensayos y sus intervalos característicos:

- Electrodo de cobre y de molibdeno.
- Presión: 10-20 Newtons para “welding”, y 3-10 Newtons para soldadura con aporte de material.
- Tensión: 0,2-0,7 V.
- Uno y dos ciclos de soldadura.
- Pulsos de 50-100 ms.

Por otra parte, se completó el diseño y construyó un dispositivo motorizado para la realización de ensayos de tracción en las soldaduras de los interconectores a las celdas solares (Fig. 4). Este dispositivo consta esencialmente de un tornillo de acero inoxidable accionado por un motor paso a paso, controlado por un circuito electrónico que permite fijar la velocidad de tracción y contar los pulsos, lo que equivale a medir desplazamientos. La tracción sobre el interconector se realiza a través de un resorte calibrado intercambiable, el cual fue calibrado con diferentes cargas.

Mediante el dispositivo desarrollado, se realizaron ensayos de tracción a 45° sobre interconectores de Kovar plateados soldados por *welding* a la cara frontal de las celdas de triple juntura y a los diodos de paso. Ello permitió seleccionar las características de los ciclos de soldadura como también la presión requerida. En los mejores casos, la resistencia a la tracción a 45° superó los 1600 g.

Pegado

Las actividades relacionadas con técnicas de pegado pueden dividirse esencialmente en cuatro: pegado de la cobertura de vidrio (de 80-150 μm de espesor) en forma individual sobre cada celda, pegado sobre el sustrato de un conjunto de celdas



Figura 2: Sistema de soldadura mediante electrodos paralelos.

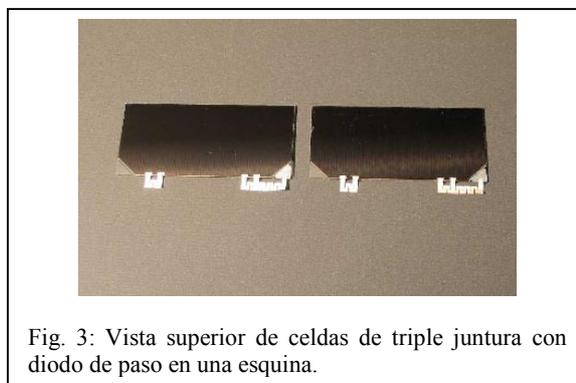


Fig. 3: Vista superior de celdas de triple juntura con diodo de paso en una esquina.



Figura 4: Máquina para ensayos de tracción de soldadura desarrollada en la CNEA (vista superior).

(típicamente 4 o 5) previamente interconectado, pegado de los colectores (*buses*) sobre el sustrato, y pegado de los cables al sustrato. Los métodos, dispositivos, equipamiento y procedimientos desarrollados tienen por objetivo lograr una alta confiabilidad y repetibilidad en procesos que necesariamente tienen una componente artesanal importante.

Se desarrolló un sistema para el pegado de la cobertura de vidrio sobre la celda compuesto básicamente por:

- Boquilla de aplicación del adhesivo controlada neumáticamente.
- Dispositivo de posicionamiento horizontal y vertical de la boquilla con respecto a la celda.
- Mecanismo de desplazamiento horizontal motorizado controlado electrónicamente (Fig. 5).
- Dispositivo de posicionamiento y colocación del vidrio sobre la celda (Fig. 6).

En lo referente al pegado de las cadenas de celdas al sustrato, se diseñaron y fabricaron las máscaras para la aplicación del adhesivo al sustrato y se completó la preparación de las boquillas aplicadoras.

Se trabajó también en el diseño de un sistema neumático para la manipulación de los colectores y de un dispositivo de alineación y posicionado para los mismos.

Se realizaron los primeros ensayos de tracción para la calificación de los procedimientos y de los adhesivos utilizados.

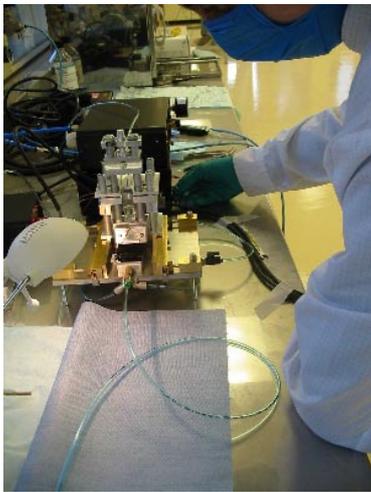


Fig.5: Aplicador de adhesivo sobre la celda.



Fig. 6 : Dispositivo para pegado del vidrio a la celda.

MÓDULO PARA ENSAYOS

A fin de realizar una calificación preliminar de los procedimientos desarrollados y los componentes utilizados, se diseñó, construyó y caracterizó eléctricamente un módulo de ingeniería compuesto por 2 cadenas de 32 celdas solares en serie cada una. Cada cadena está compuesta, a su vez, por 8 subcadenas de 4 celdas cada una. Dicho módulo fue sometido a ensayos mecánicos (vibraciones) y de ciclado térmico en vacío. A continuación, se describen brevemente los componentes y procesos utilizados para la fabricación, como también algunos de los ensayos realizados.

Componentes

- 72 celdas solares de triple juntura (*Advance Triple Junction*, ATJ) fabricadas por Emcore Corp., con un espesor de 150 μ m, eficiencia de aproximadamente 25% y un área activa de 27,5 cm².
- 72 diodos de paso de silicio de forma triangular, Emcore Corp..
- Interconectores (de 2 y 3 patas) de Kovar plateados, Emcore Corp., con lazo de alivio de tensiones fuera del plano.
- Conectores terminales posteriores de Ag, con lazo de alivio fuera del plano, para las subcadenas de 4 celdas en serie.
- Colectores (*buses*) de Ag con lazo de alivio para la interconexión de subcadenas entre sí y a los cables.
- Coberturas de vidrio OCLI-0214, del tipo borosilicato dopado con Cerio, con capa antirreflectante.
- Adhesivo Dow Corning 93500 para el pegado del vidrio.
- Adhesivo RTV 566 para el pegado de las celdas, los colectores y los cables al sustrato.
- Cables.
- Diodos de bloqueo.
- Sustrato tipo panal de abeja de aluminio, con piel de fibra de carbono y recubrimiento aislante de Kapton en cara frontal.

Recepción de componentes

- Celdas Emcore ATJ: inspección visual
- Diodos de paso de silicio: verificación eléctrica
- Coberturas de vidrio
- Interconectores y conectores terminales posteriores de las subcadenas de 4 celdas en serie
- Buses de conexión y cables
- Sustrato

Elaboración de conjuntos celda – interconectores frontales – cobertura de vidrio (CIC)

Como paso previo a la fabricación se realizó la inspección visual de los componentes y la verificación eléctrica de los diodos de paso. El proceso de elaboración de los conjuntos CIC consta básicamente de los siguientes pasos:

- Soldadura por resistencia de los interconectores de 2 y 3 patas sobre la cara frontal de la celda y el diodo.
- Pegado de la cobertura de vidrio a la cara frontal del conjunto celda-diodo-interconectores.
- Soldadura del interconector posterior del diodo a la cara posterior de la celda.
- Inspección visual del conjunto CIC.

Medición eléctrica, clasificación de celdas CIC y armado de subcadenas de 4 celdas cada una

- Medición de curva I-V con iluminación AM0, en simulador solar TS-Space (Figs. 7 y 8), a temperatura ($T = 28^{\circ}\text{C}$) e irradiancia ($1,367 \text{ kW/m}^2$) normalizadas.
- Clasificación de las 72 celdas CIC elaboradas, a partir de su ordenamiento por potencia máxima.
- Separación de 2 conjuntos de 36 celdas cada uno (32 para integración + 4 de repuesto) para el armado de las 2 cadenas de 32 celdas en serie cada una.
- Posicionado de 4 celdas CIC, con su cara posterior hacia arriba, y soldado de los interconectores de una celda a la cara posterior de la celda contigua (Fig. 9).
- Medición de la curva I-V de las subcadenas y verificación del funcionamiento de los diodos de paso.

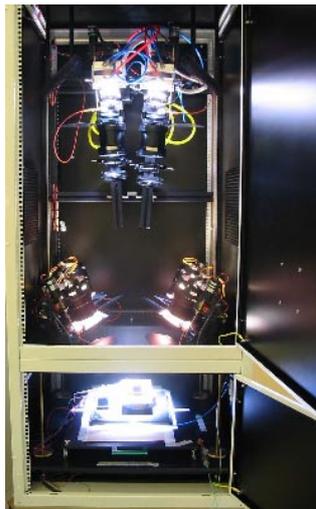


Figura 7: Simulador solar TS-Space; interior y plano de medición.



Figura 8: Simulador solar; fuentes de alimentación y sistemas de control.

Pegado de componentes al sustrato y conexión final

- Pegado de los "buses" al sustrato.
- Cableado y soldado de los cables a los colectores.
- Pegado de las subcadenas al sustrato (Fig. 10).
- Soldado de los interconectores terminales (frontales y posteriores) de las subcadenas a los colectores.

Inspección final y ensayos

- Inspección visual con lupa.
- Verificación del funcionamiento eléctrico de las cadenas mediante iluminación pulsada (*flash*) y osciloscopio.

En la Fig. 11 se muestra el panel terminado.



Fig. 11: Módulo terminado.

CONCLUSIONES

Se logró un avance significativo en la puesta a punto de los procesos de fabricación y caracterización de paneles solares para usos satelitales. Utilizando las técnicas desarrolladas, se elaboró el primer módulo de ingeniería para calificación de componentes y procesos. Este módulo fue sometido a ensayos vibro-acústicos (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 (Jefe del Proyecto SAOCOM), E.C. Bottinelli (Representante Técnico de la CONAE) y G. Bisaccio por su permanente apoyo durante la ejecución del Subproyecto.

REFERENCIAS

- Berbeglia G., Fernández Slezak D., Godfrin E.M. y Durán J.C. (2003). Simulación del sistema eléctrico de la misión satelital SAOCOM, enviado a *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 7.
- 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.
- 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.
- Tamasi M.J.L., Alurralde M., Prario I., Filevich A., Mayer R., Durán J.C., Martínez Bogado M.G. y Plá J. (2003). Comparación del daño por radiación producido por protones y electrones en celdas solares para uso espacial, enviado a *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 7.

ABSTRACT Achievements reached during the last year in the project for the development of solar panels for Argentine satellite missions, carried out within the frame of the agreement between CONAE and CNEA, are presented. Activities performed in the more relevant issues (solar cells characterization, set up of soldering and bonding processes, development of devices and techniques for testing) are reviewed. Particularly, the elaboration and test of the first module fabricated for qualification of processes are described.

Solar panels – space applications – triple junction solar cells – soldering – electrical test