

## DESARROLLO, FABRICACIÓN Y ENSAYOS EN ARGENTINA DE PANELES SOLARES PARA USO ESPACIAL

**J.C. Durán** - duran@tandar.cnea.gov.ar

**C.G. Bolzi** - bolzi@tandar.cnea.gov.ar

**C.J. Bruno** - cjbruno@tandar.cnea.gov.ar

**J. Fernández Vázquez** - jfvazque@tandar.cnea.gov.ar

**E.M. Godfrin** - godfrin@tandar.cnea.gov.ar

**S.E. Rodríguez** - srodrigu@tandar.cnea.gov.ar

**M. Alurralde** - alurrald@cnea.gov.ar

**F. Antonuccio** - antonucc@tandar.cnea.gov.ar

**S.L. Nigro** - nigro@cnea.gov.ar

Departamento de Física, Centro Atómico Constituyentes (CAC), Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina

**M. Barrera** - barrera@tandar.cnea.gov.ar

**A. Filevich** - afaf@tandar.cnea.gov.ar

**M.G. Martínez Bogado** - mbogado@tandar.cnea.gov.ar

**J. Plá** - jpla@tandar.cnea.gov.ar

**I. Prario** - prarioi@cnea.gov.ar

**M.J.L. Tamasi** - tamasi@tandar.cnea.gov.ar

**A. Vertanessian** - vertanes@tandar.cnea.gov.ar

Departamento de Física, CAC, CNEA, Argentina y  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas

**V. Goldbeck** - goldbeck@cnea.gov.ar

Departamento de Materiales, CAC, CNEA, Argentina

**P. Cabot** - cabot@cnea.gov.ar

**E. Carella** - carella@cnea.gov.ar

**A. Moglioni** - moglioni@cnea.gov.ar

Departamento de Ensayos No Destructivos y Estructurales, CAC, CNEA, Argentina

**A. Iglesias** - albesias@cnea.gov.ar

**M. Raffo Calderón** - calderon@cnea.gov.a

Departamento de Química, CAC, CNEA, Argentina

**J. Di Santo** - disanto@tandar.cnea.gov.ar

**C.D. Franciulli** - cfranciulli@fibertel.com.ar

**E. Mezzabolta** - mezzabol@tandar.cnea.gov.ar

Profesional Independiente, Argentina

### 3.3 Módulos Fotovoltaicos

**Resumen.** El Grupo Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) de la Argentina inició actividades de investigación y desarrollo relacionadas con la conversión fotovoltaica de la energía solar a mediados de la década del ochenta. En 1995 comenzó a trabajar en el desarrollo de dispositivos solares para satélites artificiales dentro del marco de un acuerdo de cooperación con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Estas actividades dieron lugar al primer "Experimento de celdas solares argentinas en el espacio", que se llevó a cabo en el satélite argentino SAC-A el cual fue puesto en órbita a fines de 1998.

Luego de la exitosa experiencia en el SAC-A y a fin de proveer los paneles solares para las futuras misiones satelitales previstas en el Plan Espacial Nacional, en marzo de 2001 la CONAE y la CNEA suscribieron un convenio de cooperación con el objeto de desarrollar en el país las herramientas de diseño y las técnicas de fabricación, caracterización y ensayo de paneles solares

para usos espaciales, y diseñar, integrar y ensayar los paneles de vuelo para las misiones satelitales SAOCOM y SAC-D. Para tal fin, se constituyó en el Centro Atómico Constituyentes un grupo de trabajo interdepartamental.

En este trabajo se presentan las actividades desarrolladas que comprenden la instalación del laboratorio de integración de paneles solares, elaboración y caracterización de celdas solares, puesta a punto de los procesos de soldadura y pegado, desarrollo de técnicas de ensayos, diseño y simulación del subsistema de potencia y daño por radiación. Se describe además la elaboración y el ensayo del primer módulo fabricado para la calificación de procesos según requerimientos de la tecnología espacial.

**Palabras clave:** Paneles solares, uso espacial, daño por radiación

## 1. INTRODUCCIÓN

El Grupo Energía Solar (GES) inició sus actividades en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en el año 1976. Los primeros trabajos se desarrollaron en el área de la conversión fototérmica mediante la utilización de concentradores de radiación aptos para la producción de fluidos calientes para usos industriales o generación de electricidad.

A mediados de la década del ochenta, el GES comenzó a realizar actividades de investigación y desarrollo sobre conversión fotovoltaica de la energía solar. En 1986 se puso a punto el proceso de crecimiento de cristales de silicio mediante la técnica Czochralski. A partir de 1992, la actividad se centró en el diseño, elaboración y caracterización de celdas solares de silicio cristalino.

A fines de 1995, el GES inició actividades relacionadas con el desarrollo de celdas y paneles solares para satélites artificiales, dentro del marco de un acuerdo de cooperación entre la CNEA y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Ello dio lugar al primer "Experimento de celdas solares argentinas en el espacio" (Bolzi *et al.*, 2002), que se llevó a cabo en el satélite argentino SAC-A, el cual fue puesto en órbita a fines de 1998.

Luego de la exitosa experiencia en el SAC-A y a fin de proveer los paneles solares para las futuras misiones satelitales previstas en el Plan Espacial Nacional, en marzo de 2001 CONAE y la CNEA suscribieron un convenio de cooperación cuyo objetivo final es proveer los paneles solares de vuelo para el satélite de observación argentino SAOCOM (Bolzi *et al.*, 2001, Alurralde *et al.*, 2005a). 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 y con una duración prevista de 3 años. La ejecución de dicho subproyecto permitió disponer en el país de las herramientas de diseño y de las técnicas de fabricación, caracterización, calificación y ensayo de paneles solares para usos espaciales. Para tal fin, se constituyó en el Centro Atómico Constituyentes un grupo de trabajo interdepartamental. En 2004 se firmó un nuevo convenio, que puede ser considerado como continuidad del anterior, para la "Simulación del Ambiente Espacial, Nuevas Tecnologías de Diseño, Integración y Ensayo de Paneles Solares para Satélites, y Estudio de Celdas Multijuntura", habiéndose iniciado asimismo actividades conducentes al diseño, fabricación y ensayo de los paneles solares de la misión Aquarius/SAC-D (Alurralde *et al.*, 2005b, Godfrin *et al.* 2005, Godfrin y Durán, 2006).

En este artículo se describen las actividades de desarrollo y puesta a punto de las tecnologías asociadas con la construcción de paneles solares para usos satelitales a fin de mostrar el grado de complejidad asociado con la fabricación y ensayo de los mismos; en particular, se muestran los desarrollos involucrados en la misión SAOCOM. Se presenta además, la elaboración y ensayos del primer panel de ingeniería integrado en el laboratorio del GES.

## 2. DISEÑO DE LOS PANELES SOLARES

El satélite SAOCOM se desplazará sobre una órbita polar, situada a 659 km de altura, con una inclinación de 98° y un período orbital 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 será algo superior a los 900 W, con picos de consumo que superan los 4 kW, y la tensión nominal de trabajo de las baterías será de 50 V. Estos requerimientos de energía deberán ser provistos utilizando un área total de aproximadamente 8,7 m<sup>2</sup>, distribuidos en 3 paneles que se desplegarán luego de la puesta en órbita del satélite.

Las necesidades de energía del satélite combinadas con el área disponible, determinaron la necesidad de utilizar las celdas solares de mayor eficiencia disponibles en el mercado espacial internacional: celdas solares de triple juntura InGaP/GaAs/Ge, de 27,5 cm<sup>2</sup> de área activa y eficiencia media mínima de 27,5% (28°C, AM0). Teniendo en cuenta, además, las características de la órbita ya mencionadas, la geometría y la orientación del satélite y los requerimientos de alta confiabilidad, se realizó un diseño preliminar (Godfrin y Durán, 2002) de los paneles solares con las siguientes características principales:

- 80 cadenas de 32 celdas en serie cada una, es decir un total de 2560 celdas,
- 1 diodo de paso integrado en cada celda,
- 1 diodo de bloqueo por cadena,
- 2 interconectores de Kovar plateado por celda,
- 1 cubierta de vidrio resistente a la radiación, de 100 µm de espesor, en cada celda,
- cableado y conexiones redundantes,
- configuración del circuito de celdas y cableado compatible con una minimización del momento dipolar magnético.

A fin de minimizar el peso de los paneles, los sustratos tendrán una estructura de tipo compuesto formada por una base tipo panal de abeja de Al, recubierta con fibra de carbono y con una capa de Kapton como aislante eléctrico.

La misión Aquarius/SAC-D tendrá características orbitales similares, y se está trabajando en el diseño del subsistema de potencia considerando las particularidades de esta misión; algunos detalles acerca de dicho subsistema pueden encontrarse en Godfrin *et al.* (2005) y Godfrin y Durán (2006).

### 3. TAREAS DESARROLLADAS

Las tareas que conducen a la integración de los prototipos de ensayo y de vuelo para las misiones satelitales de la CONAE son las siguientes:

- montaje del laboratorio de desarrollo, integración y ensayo,
- análisis teórico y ensayos en Tierra del daño por radiación sobre las celdas solares,
- fabricación y ensayo de interconectores,
- puesta a punto de los procesos de soldadura y de las técnicas de ensayo correspondientes,
- desarrollo de técnicas de alineación y pegado de los vidrios sobre las celdas y de las celdas sobre el sustrato,
- diseño del circuito eléctrico de los paneles y su interconexión al satélite, con las interfaces correspondientes,
- estudio y desarrollo de modelos para la estimación de la energía generada por los paneles solares durante la misión espacial, al principio de la misma (*Beginning of Life, BOL*) y al final de su vida útil (*End of Life, EOL*) (Berbeglia *et al.*, 2003),
- elaboración de sensores de radiación solar y paneles de ingeniería para la realización de ensayos de calificación en Tierra y/o en el espacio,
- integración de paneles de vuelo,
- realización de ensayos eléctricos, mecánicos y de termovació sobre los diferentes componentes y sobre los paneles de ingeniería y de vuelo.

Estos procesos se realizan en un laboratorio montado específicamente a tal fin (Figura 1), ubicado en el Centro Atómico Constituyentes de la CNEA. El laboratorio propiamente dicho tiene una superficie total de alrededor de 220 m<sup>2</sup>. Todo el sector está acondicionado como área limpia

Clase 10.000 (FED-STD-209D, “Clasificación de Áreas Limpias”), con temperatura y humedad controladas.



Figura 1. Laboratorio de integración.

#### **4. ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES**

Desde el comienzo del proyecto se está trabajando en la puesta a punto de la tecnología de fabricación de celdas solares de Si cristalino para usos espaciales. Estos dispositivos, de bajo costo comparados con las celdas de vuelo, se utilizaron en un principio en ensayos de pegado y de soldadura. Se desarrollaron también nuevas máscaras para fotolitografía para la grilla de contactos frontal que permitirán la elaboración de dispositivos de Si de idénticas dimensiones a los que se utilizarán en el panel de vuelo, de manera tal que será posible realizar otros ensayos que requieran un mayor grado de mimetismo. Los detalles acerca de los últimos avances realizados en la elaboración de celdas de Si pueden encontrarse en Barrera *et al.*, 2004. Con la misma tecnología se diseñaron y elaboraron sensores fotovoltaicos de pequeñas dimensiones (típicamente,  $10\text{mm}^2$ ) que se utilizarán como sensores gruesos de posición en distintas misiones satelitales.

Por otra parte, las celdas que se utilizarán en los paneles solares espaciales son dispositivos multijuntura donde se debe considerar con especial cuidado la distribución espectral del simulador solar que se utiliza. Para la medición de la curva I-V de estas celdas en condiciones controladas, se adquirió un simulador solar TS-Space con espectro AM0 e irradiancia ( $1367\text{ W/m}^2$ ) normalizados, y para el control de la temperatura se construyó una base que utiliza una celda Peltier a tal fin.

En cuanto a la caracterización electrónica de las celdas de silicio, se ha desarrollado en el GES un equipo sencillo para la medición de tiempo de vida medio de los portadores minoritarios ( $\tau_{ef}$ ) mediante la técnica OCVD modificada (Bruno *et al.*, 1999). Como complemento para la caracterización electrónica se diseñó y montó un equipo de medición de respuesta espectral diseñado para celdas de silicio, pero posteriormente modificado para la medición de celdas multijuntura (Fortin *et al.*, 2005). Otros desarrollos que se encuentran en curso se refieren a la fabricación de diodos de paso de Si (Altamirano *et al.*, 2006) y la optimización de celdas solares de Si para aplicaciones espaciales (Yang y Plá, 2006).

#### **5. ENSAYOS DE DAÑO POR RADIACIÓN**

En los últimos años ha crecido el interés en el estudio de las celdas de multijuntura basadas en compuestos III-V para aplicaciones espaciales, debido a su mayor resistencia a la radiación y eficiencia de conversión respecto de las celdas de Si.

Se desarrolló un montaje experimental con el que se realizaron ensayos de daño por radiación con protones de 10 MeV y fluencias entre  $10^8$  y  $10^{13}$  p/cm<sup>2</sup> sobre celdas de Si, multijuntura InGaP/GaAs/Ge y heterojuntura a-Si/c-Si, utilizando un haz externo del acelerador TANDAR del

Centro Atómico Constituyentes de la CNEA, así como experiencias de radiación con electrones de 2,6 MeV en el acelerador LINAC del Centro Atómico Bariloche de la CNEA. En estas experiencias se midió *in situ* la curva característica corriente-tensión entre irradiaciones de cada una de las celdas estudiadas (Filevich *et al.*, 2003).

Asimismo, se realizaron simulaciones teóricas y mediciones experimentales con el fin de verificar la relación entre las características eléctricas de las celdas (corriente de cortocircuito, tensión a circuito abierto y factor de forma) y la vida media de los portadores minoritarios en la base, la cual se ve afectada directamente en este tipo de ensayo (Tamasi *et al.*, 2002, Alurralde *et al.*, 2004).

Se encuentra en desarrollo, además, una cámara para la simulación del ambiente espacial apta para el ensayo de celdas solares, componentes electrónicos, y demás partes de satélites artificiales, la cual se encuentra instalada en una de las líneas del acelerador TANDAR del CAC-CNEA (Alurralde *et al.*, 2006). Dicha cámara permitirá la simulación del espectro de radiación de protones espaciales, el ciclado térmico en condiciones de alto vacío, la simulación de la radiación solar, y la medición *in situ* de las características eléctricas de celdas solares y otros dispositivos electrónicos.

## 6. ETAPAS DE FABRICACIÓN DEL PANEL SOLAR

### 6.1 Interconectores

Las celdas 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  $\mu\text{m}$ . 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. Se ha seleccionado el Kovar como material de base para los interconectores a ser utilizados para los paneles solares del satélite SAOCOM por su elevada resistencia a la fatiga. La fabricación de interconectores a partir de cintas de Kovar 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 bicapa de Ni-Ag sobre cintas de Kovar de 20  $\mu\text{m}$  de espesor. Se evaluaron las diferentes muestras de Kovar plateado mediante observaciones con lupa y microscopio óptico para determinar rugosidad, observación con microscopio electrónico de barrido para determinar la estructura de los recubrimientos y el espesor de los mismos, además de ensayos de adherencia y medición del espesor total de la lámina por medio de un micrómetro.

A fin de lograr una buena repetibilidad y confiabilidad del proceso, se diseñó y construyó un equipo destinado a realizar el plateado de cintas de Kovar de 250 mm de largo por 38 mm de ancho. En cuanto al corte y conformado de los interconectores, luego de algunos ensayos de corte por electroerosión que no resultaron satisfactorios, se desarrolló una matriz de corte convencional. Asimismo, se diseñó y construyó una matriz para el conformado del lazo de alivio.

Teniendo en cuenta que durante la operación del panel solar en órbita los interconectores son traccionados y comprimidos como consecuencia del ciclado térmico, se desarrolló y construyó una máquina para la realización de ensayos de fatiga mecánica sobre los interconectores. Los ensayos realizados a temperatura ambiente y a 70°C (temperatura máxima de operación) sobre interconectores de Kovar plateado, con desplazamientos de  $\pm 50\mu\text{m}$ , demostraron una resistencia a la fatiga superior a los 100.000 ciclos, o sea unas 15 veces más que el número total de ciclos esperado para toda la misión.

### 6.2 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 para 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 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 (Figura 3), se trabajó principalmente en la puesta a punto de esta técnica. Se realizaron numerosas pruebas de soldadura por resistencia en celdas solares de triple junta provistas por Emcore Corp., utilizando principalmente interconectores de Kovar plateado provistos por la misma empresa y también conectores de Kovar plateados desarrollados en la CNEA, las cuales concluyeron en el desarrollo de procesos de soldadura específicos (soldadura de interconectores a la cara frontal de la celda, a la cara posterior de la misma, y al diodo de paso).

Por otra parte, se completó el diseño y se construyó un dispositivo motorizado para la realización de ensayos de tracción en las soldaduras de los interconectores a las celdas solares.



Figura 2. Sistema de soldadura mediante electrodos paralelos.

### 6.3 Pegado

El encapsulado de las celdas espaciales se diferencia del terrestre debido a que las primeras no son agredidas por las condiciones climáticas tales como humedad, granizo, polvo ambiental, entre otros. Por otra parte, deben soportar alta intensidad de radiación ultravioleta, sufren degradación por partículas cargadas provenientes del Sol y su peso debe ser el menor posible. Es por ello que cada celda se encapsula en forma individual mediante un vidrio protector muy delgado (de 80-150  $\mu\text{m}$  de espesor) dopado con Ce para prevenir el oscurecimiento del mismo.

Las actividades relacionadas con técnicas de pegado pueden dividirse esencialmente en cuatro: pegado de la cobertura de vidrio en forma individual sobre cada celda, pegado sobre el sustrato de un conjunto de celdas (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 repetitividad 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 boquillas de aplicación (Figura 3), un dispositivo de posicionamiento y colocación del vidrio, así como los procedimientos asociados al pegado de los vidrios a las celdas y de éstas al sustrato. 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.

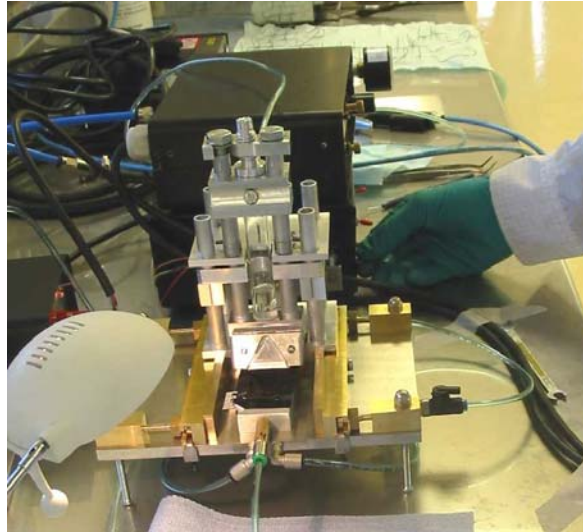


Figura 3. Aplicador de adhesivo sobre la celda.

## 7. MÓDULO DE INGENIERÍA PARA ENSAYOS

La integración de los paneles solares para usos espaciales se resume en los siguientes procesos:

- i) inspección visual de las celdas solares,
- ii) soldadura de interconectores a la cara frontal de las celdas,
- iii) pegado de vidrios a la cara frontal de las celdas,
- iv) medición de la curva I-V y clasificación de las celdas solares,
- v) formación de cadenas de celdas en serie,
- vi) cableado eléctrico del panel,
- vii) pegado de las cadenas de celdas al sustrato e interconexión al cableado,
- viii) ensayos eléctricos.

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. También se fabricó un segundo módulo de similares características pero orientado a la configuración del SAC-D y al ensayo de nuevos procesos de integración (Alurralde *et al.*, 2005b). A continuación, se describen brevemente los componentes y procesos utilizados para la fabricación, como también algunos de los ensayos realizados.

### 7.1 Medición eléctrica, clasificación de celdas CIC y armado de las subcadenas

Se midió la curva I-V con iluminación AM0, en el simulador solar TS-Space, a temperatura ( $T = 28^{\circ}\text{C}$ ) e irradiancia ( $1367 \text{ W/m}^2$ ) normalizadas de todas las celdas CIC (*Covered and Interconnected Cell*) elaboradas. Posteriormente se realizó una clasificación a partir del ordenamiento según su potencia máxima, seleccionando las mejores 72 celdas y dividiéndolas en 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. Estos dispositivos fueron agrupados de a cuatro y se procedió al soldado de los interconectores de una celda a la cara posterior de la celda contigua. Cada subgrupo fue caracterizado midiendo su curva I-V y verificando el funcionamiento de los diodos de paso.

### 7.2 Pegado de componentes al sustrato, conexión e inspección final

Como primer paso para la integración final del panel se pegaron los colectores al sustrato y se completó el cableado y soldado de los cables a los colectores. Luego se pegaron las subcadenas al sustrato y por último se soldaron los interconectores terminales (frontales y posteriores) de las subcadenas a los colectores.

Una vez secado el pegamento del panel ya integrado se procedió a la inspección visual de las celdas con lupa para detectar e identificar posibles fisuras, fallas o problemas estéticos antes de la realización de los ensayos de calificación. En la Figura 4 puede verse el panel terminado.

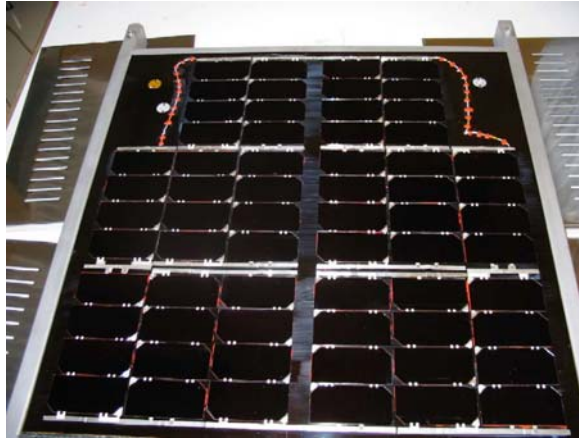


Figura 4. Módulo de ingeniería terminado.

### 7.3 Verificación eléctrica y ensayos

La verificación del funcionamiento eléctrico de las cadenas se realizó mediante iluminación pulsada (*flash*) y osciloscopio. El módulo de ingeniería fue sometido a dos tipos de ensayos: vibraciones y ciclado térmico en vacío, realizados en la empresa INVAP S.E. en S. C de Bariloche. El ensayo de vibraciones consistió 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.

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.

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

El ensayo de termovacío se realizó en una cámara de acero a una presión de vacío de aproximadamente  $1 \times 10^{-7}$  torr. Para registrar las temperaturas durante el ensayo se instalaron sensores de temperatura (termocuplas o termorresistores). Estos sensores se colocaron a ambos lados del módulo de ingeniería para poder determinar la temperatura del panel durante el ensayo.

Se realizaron 10 ciclos térmicos entre  $-100^{\circ}\text{C}$  y  $100^{\circ}\text{C}$ , a una presión media de  $1 \times 10^{-5}$  torr, en forma ininterrumpida. Una vez concluido el ensayo de termovacío, se realizó una inspección visual a simple vista y con lupa, y la correspondiente verificación eléctrica mediante la medición con luz pulsada de las dos cadenas.

## 8. CONCLUSIONES

Se construyó en el CAC de la CNEA el primer laboratorio apto para la integración de paneles solares para aplicaciones espaciales de la Argentina. Se lograron asimismo avances significativos en la puesta a punto de los procesos de fabricación y caracterización de paneles solares para usos satelitales. Utilizando las técnicas desarrolladas, se elaboraron los primeros de ingeniería para calificación de componentes y procesos. La inspección visual y la medición de las características

eléctricas realizadas antes y después de los ensayos de vibraciones y termovaciación no mostraron diferencias relevantes, pudiéndose considerar entonces la experiencia como una calificación preliminar de los componentes y procedimientos de fabricación desarrollados.

Tanto las experiencias de daño por radiación como los ensayos realizados en el módulo de ensayo, proporcionaron los elementos y la capacitación necesarios para realizar en Argentina los ensayos de calificación sobre los dispositivos y paneles de ingeniería y de vuelo que se utilizarán tanto en el satélite SAOCOM como en futuras misiones satelitales.

### **Agradecimientos**

Este trabajo fue financiado fundamentalmente por la CNEA y la CONAE. Cuenta también con aportes de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnología (PICT 2003 N° 10-14327).

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 de la CONAE e INVAP que hizo posible la realización de los ensayos de calificación del módulo de ingeniería.

### **REFERENCIAS**

- Altamirano M., Cadena C.A., Martínez Bogado M.G., Rodríguez S.E., Tamasi M.J.L., 2006. Primeras experiencias de diseño, fabricación y caracterización de diodos de paso para celdas solares de uso espacial, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 10, en prensa.
- Alurralde M., Tamasi M.J.L., Bruno C.J., Martínez Bogado M.G., Plá J., Fernández Vázquez J., Durán J., Schuff J., Burlon A.A., Stoliar P., Kreiner A.J., 2004. Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* vol. 82, pp. 531-542.
- 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., Di Santo J., Franciulli C.D., Moglioni A., Berbeglia G., Fernández Slezak D., 2005a. Development of photovoltaic modules for space applications in Argentina, *Proceedings of the 20<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Barcelona, España, pp. 538-541.
- Alurralde M., Antonuccio F., Barrera M., Bolzi C.G., Bruno C.J., Cabot P., Carella E., Di Santo J., Durán J.C., Fernández Vázquez J., Filevich A., Franciulli C.D., Godfrin E.M., Goldbeck V., Iglesias A., Martínez Bogado M.G., Mezzabolta E., Moglioni A., Nigro S.L., Plá J., Prario I., Raffo Calderón M.C., Rodríguez S.E., Tamasi M.J.L., Vertanessian A., 2005b. Fabricación y ensayo de paneles solares para uso espacial: módulo de ingeniería para la misión Aquarius/SAC-D, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 9, pp. 04.07-04.12.
- Alurralde M., Durán J.C., Filevich A., Nigri C., Prario I., Palumbo F., Sager G.E., Velazco R., Vertanessian A., 2006. A radiation damage test facility at Tandem, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> IEEE Latin-American Test Workshop LATW-2006*, Buenos Aires, Argentina, pp. 179-183
- Barrera M., Bolzi C.G., Corvalán D., Martínez Bogado M.G., Plá J., Tamasi M.J.L., 2004. Últimos desarrollos en celdas solares de silicio cristalino en la CNEA, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 8, 04.19-04.24.
- Berbeglia G., Fernández Slezak D., Godfrin E.M., Durán J.C., 2003. Simulación del sistema eléctrico de la misión satelital SAOCOM, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 7, pp. 08.31-08.35.
- Bolzi C.G., Bruno C.J., Durán J.C., Godfrin E.M., Martínez Bogado M.G., Merino L.M., Plá J.C., Tamasi M.J.L., Barrera M., 2002. First experiment of argentine solar cells in space: modules fabrication, characterisation, and telemetry data analysis from SAC-A satellite, *Solar Energy Materials and Solar Cells* vol. 73, pp. 269-280.

- 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* vol. 5, pp. 4.07-4.12.
- Bruno C.J., Martínez Bogado M.G., Plá J.C., Durán J.C., 1999. Determination of the minority carrier lifetime in solar cells: a novel biased OCVD technique, *Physica Status Solidi (a)* vol. 174, pp. 231-238.
- Filevich A., Bruno C.J., Fernández Vázquez J., Alurralde M., Prario I., Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Plá J.C., Duran J.C., Schuff J., Burlon A., Stoliar P., Minsky D., Kreiner A., Mayer R., 2003. A compact portable setup for *in situ* solar cells degradation, *IEEE Transactions on Nuclear Science* vol. 50, pp. 2380-2384.
- Fortin S., Martínez Bogado M.G., Plá J., 2005. Respuesta espectral de celdas solares multijuntura para aplicaciones espaciales: diseño del equipo y primeras mediciones, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 9, pp. 4.01-4.06.
- 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* vol. 6, pp. 04.19-04-24.
- Godfrin E.M., Fernández Slezak D., Durán J.C., 2005. Misión satelital Aquarius/SAC-D: diseño preliminar del panel solar y simulaciones del comportamiento del subsistema de potencia, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 9, pp. 04.13-04.18.
- Godfrin E.M. y Durán J.C., 2006. Dimensionamiento de los paneles solares para la misión satelital Aquarius/SAC-D en base a dos casos extremos, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 10, en prensa.
- Tamasi M.J.L., Alurralde M., Prario I., Filevich A., Durán J.C., Martínez Bogado M.G., Plá J., Bruno C.J., Fernández Vázquez J., Mayer R.E., Scuff J., Burlon A.A., Kreiner A.J., 2004. Comparison of electron and proton radiation damage on solar cells for space uses, *Proceedings of the 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, Francia*, pp. 3719-3122.
- Yang S. M. y Plá J., 2006. Simulaciones numéricas de celdas de silicio cristalino para uso espacial, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 10, en prensa.

## **DEVELOPMENT, FABRICATION AND TESTING IN ARGENTINA OF SOLAR PANELS FOR SPACE APPLICATIONS**

**Abstract.** *The CNEA Solar Energy Group (GES) began R&D activities related with PV conversion at mid of 80's. At 1995, the GES began to work on PV devices for space applications in the frame of a cooperation agreement with the Argentine National Commission for Space Activities (CONAE). These activities concluded with the first experiment of Argentinean solar cells in space in the SAC-A satellite launched at the end of 1998.*

*After this successful experience, and with the objective of providing the solar panels for the future Argentinean satellite missions, CNEA and CONAE signed a new agreement, in order to develop the design, fabrication, and testing tools of flight panels for the missions SAOCOM and SAC-D. For this end, an interdepartmental group was constituted at Constituyentes Atomic Center of CNEA.*

*In this work, activities related with installation of the integration lab, elaboration and characterization of solar cells, bonding and soldering processes, testing techniques, design and simulation of the power subsystem, and radiation damage issues, are presented. Furthermore, the fabrication and testing of the first qualification module is described.*

**Keywords:** *Solar panels, space applications, radiation damage*