

## **DESARROLLO DE CÁMARA PARA CICLADO TÉRMICO Y ENSAYO DE UN PANEL SOLAR PARA CALIFICACIÓN DE USO EN ORBITA GEOESTACIONARIA**

**Di Santo José, Muñoz Sebastián, Olima José M., Raggio Daniel, Rinaldi Carlos, Bruno Cristián**

Departamento de Energía Solar – Gerencia de Investigación y Aplicaciones No Nucleares

Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

Av. Gral. Paz 1499 C.P. – San Martín – Buenos Aires – Argentina

Tel. 011-6772-7633 e-mail: disanto@tandar.cnea.gov.ar

**RESUMEN:** Se desarrolló una cámara de ciclado térmico para efectuar parte de los ensayos de calificación de paneles solares para uso en satélites de órbitas bajas, medias y del tipo geoestacionaria. En el presente trabajo se expone el desarrollo del equipo y el ensayo de ciclado térmico sobre un panel solar con 18 celdas de triple junta de la empresa Emcore, sobre el cual se efectuaron verificaciones eléctricas y visuales en diferentes etapas del ensayo. El equipo desarrollado funcionó según lo planificado y el panel solar pasó satisfactoriamente las verificaciones.

**Palabras clave:** cámara térmica, ciclado térmico, celdas solares de triple junta, satélite geoestacionario.

### **INTRODUCCIÓN**

Las variaciones térmicas extremas que tiene que soportar un panel solar en el espacio le imponen solicitaciones, térmicas, mecánicas y eléctricas severas. Debido a esto, uno de los ensayos ambientales más importantes para evaluar la capacidad de un panel solar para soportar las condiciones que encontrará en el espacio es el de ciclado térmico. Esta evaluación comprende tanto al diseño como a las partes y procesos empleados para la construcción de paneles solares de uso espacial. Para esto el DES desarrolló y construyó una cámara especial de ciclado térmico.

El equipo de ciclado térmico se diseñó para efectuar ciclos en períodos de tiempo breves entre las temperaturas típicas de operación de las misiones satelitales de órbitas bajas, medias y geoestacionarias. En este trabajo se expone este desarrollo y su empleo en un ensayo de calificación de un panel de prueba con 18 celdas de triple junta conectadas en serie. Debido a esto resulta necesario evaluar los procesos y las partes empleados para su construcción.

Se construyeron dos cámaras conectadas estructuralmente entre sí, que trabajan a distintas temperaturas, la cámara superior opera a la temperatura prevista cuando los paneles del satélite están bajo la irradiación directa del Sol (típicamente 100°C) y la otra cuando se encuentran en sombra (~-160°C).

### **DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE CICLADO**

#### *Cámara caliente*

Está constituida por una estructura sándwich metálica con su interior recubierto por aislamiento de lana mineral. Cuenta con una puerta trasera para el montaje del panel. Por el frente cuenta con una puerta de superficie vidriada para efectuar verificaciones visuales durante el ensayo.

El calentamiento del recinto lo efectúa un conjunto de tres lámparas infrarrojas de 1000 W. Como lo que se quiere observar es la resistencia mecánica de las soldaduras y verificar el funcionamiento eléctrico de las celdas posterior al ciclado térmico las lámparas se utilizan como fuente de calor. La temperatura se regula automáticamente mediante un sistema de control programable PID (Proporcional – Integral – Derivativo) que actúa sobre las lámparas a través de un relé de estado sólido. Para medir la temperatura se colocan varios sensores termorresistivos del tipo PT100 distribuidos sobre el objeto a ensayar.

#### *Cámara fría*

Se construyó un recipiente tipo termo con una camisa exterior y otra interior, evacuado a una presión de  $8 \times 10^{-6}$  mbar el espacio entre ambas. La camisa interior contiene al Nitrógeno líquido y sumergida en este baño de LN2 se encuentra la cámara receptora de (100 x 300 x 450 mm) donde se aloja el panel en el ciclo frío. Todo el conjunto está conformado en chapa de acero inoxidable 304 soldado con proceso TIG.

La temperatura dentro de la cámara alcanza los -195°C, y se mantiene constante mediante un control del nivel de LN2 que es provisto desde un tanque externo. Este control de nivel está compuesto por un flotante cilíndrico de bronce con imanes de neodimio en sus extremos superior e inferior que inducen un campo magnético sobre dos sensores que a su vez actúan sobre la válvula de ingreso de LN2.

Si bien las cámaras no están presurizadas con Nitrógeno, aprovechando la evaporación del mismo, se lo inyecta para desplazar el aire, obteniendo una atmósfera parcialmente inerte.

### Pistón para el movimiento alternativo

Para realizar el ciclado el panel solar a ensayar se desplaza alternativamente entre ambas cámaras mediante un pistón neumático. Este se alimenta desde una línea de presión de aire y está comandado por el controlador a través de una electroválvula.

En la Figura 1 se puede observar el esquema en corte de la máquina y en Figura 2 se presenta una vista general de la misma.

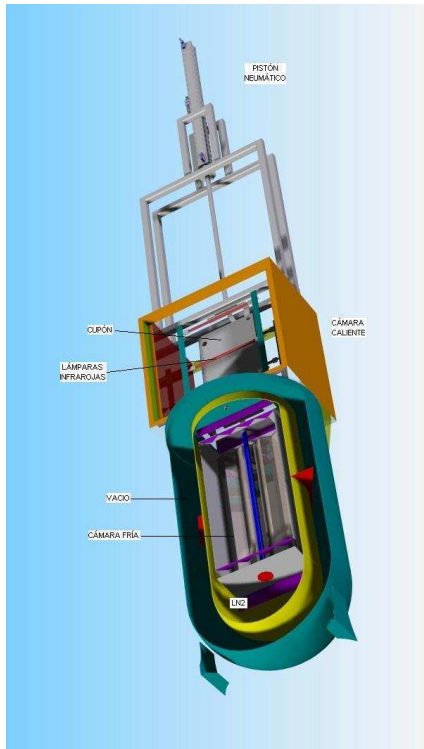


Figura 1: Corte esquemático de la cámara de ciclado térmico



Figura 2: Vista general del equipo

### Sistema eléctrico

Adicionalmente a lo ya descrito las puertas de la cámara caliente cuentan con sensores de apertura y por medio de un contactor cortan la corriente de las lámparas calefactoras en caso de apertura. En la figura 3 se observa el detalle del sistema eléctrico general.

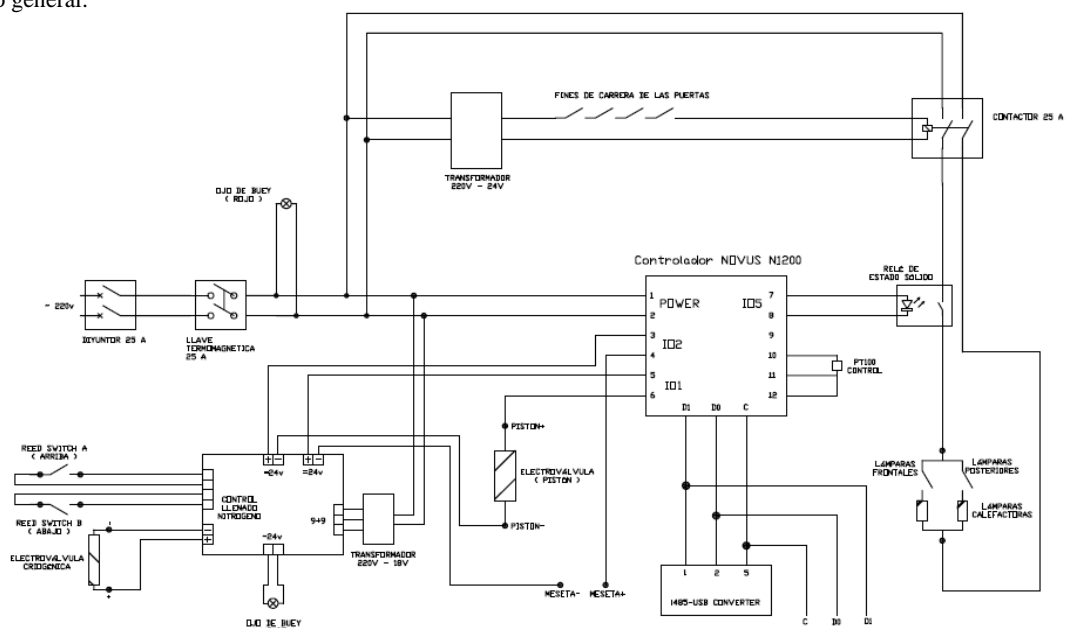


Figura 3: Esquema eléctrico general

## DESCRIPCION DEL ENSAYO SOBRE EL PANEL

El panel solar está compuesto por un sustrato con estructura de panal de abeja de aluminio para el cuerpo y fibra de carbono para las tapas. Tiene bujes pasacables de teflón con tratamiento químico para posibilitar su fijación. La parte frontal está recubierta con una lámina de poliimida que se utiliza como aislante eléctrico denominada comercialmente Kapton®.

Las celdas solares están dispuestas en tres subcadenas de 6 celdas en serie, cada celda tiene un diodo de paso y la cadena formada por las 18 celdas posee un diodo de bloqueo formando un módulo.

Características del módulo:

- Celdas avanzadas de triple juntura de InGaP-InGaAs-Ge de 150  $\mu\text{m}$  de espesor cada una con diodo de paso de Si y capa antirreflectante de  $\text{Mg}_2\text{F}$  y  $\text{ZnS}$ .
- Interconectores de Kovar® plateado
- Vidrio protector de borosilicato dopado con Cerio de 100  $\mu\text{m}$  de espesor con capa antirreflectante de  $\text{Mg}_2\text{F}$
- Eficiencia de la celda: 27,5% (@28°C y AM0)
- Características eléctricas de la cadena de 18 celdas en serie:
- $V_{ca} = 45 \text{ V}$
- $I_{cc} = 0,47 \text{ A}$
- $P_{\text{pmp}} = 21,2 \text{ W}$
- 1 diodo de bloqueo

Los cables de interconexión tienen una aislación de teflón y van por la cara posterior del panel. Los diodos de bloqueo están soldados sobre chapas de Kovar® plateado.

Se empleó el proceso de soldadura por resistencia para la soldadura de los interconectores a los contactos frontales de las celdas. En la figura 4 se puede observar una vista frontal del panel solar construido para este ensayo.



Figura 4: Vista general del panel bajo ensayo

### Ensayo Ambiental

La condición para que un ciclado térmico sea considerado como tal, es que las pendientes de cambio de temperatura no superen los 100°C/min. Esto es lo que indica por ejemplo, la norma AIAA S-112-2005. De otra manera se podría considerar como un choque térmico.

El presente ensayo tiene como objetivo realizar 1000 ciclos entre -180°C a +130°C y hacer inspecciones a los 1, 100, 500 y 1000 ciclos según procedimiento CAC-PSE-PAN-01950B-PR. Con este ensayo en particular los ciclos resultan de una duración de 15 min. La meseta en el extremo caliente tiene una duración de un minuto. Durante esta meseta se verifica la continuidad eléctrica del circuito mediante polarización directa de las celdas solares, haciendo circular una corriente igual a la de corto circuito.

Se instrumentó el panel con 5 sensores de temperatura Pt 100, 4 de ellos sobre la cara frontal (lado celdas) y el otro sobre la cara posterior (lado cables).

En la figura 5 se observa el gráfico de dos ciclos con las temperaturas de los sensores en colores verde, amarillo, celeste y violeta, el perfil de temperatura a seguir en azul y la indicación de continuidad eléctrica del circuito durante la meseta en color rosa.

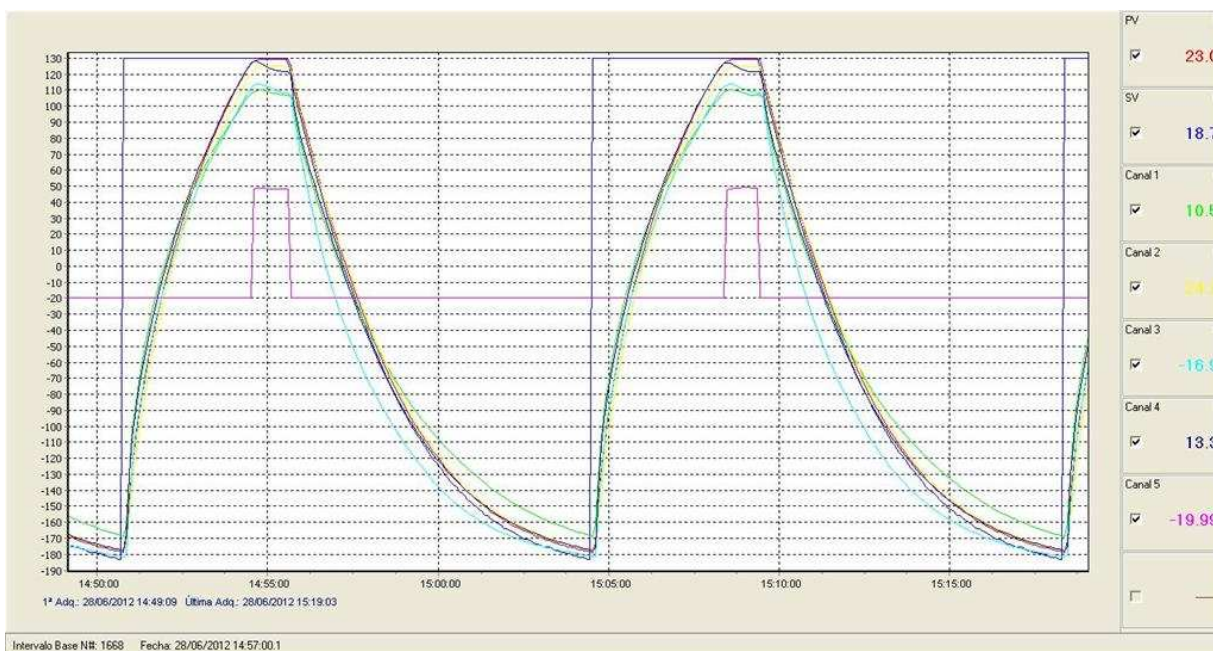


Figura 5: Temperatura de los sensores frontales y posteriores para dos ciclos completos

Para comprobar el estado del panel antes del ensayo se realizaron las siguientes inspecciones:

- Aislación eléctrica entre el sustrato y cada uno de los polos del panel a temperatura ambiente.
- Funcionamiento de los diodos de paso de las celdas. Se realiza haciendo circular una corriente igual a la corriente de trabajo de la cadena.
- Verificación de la funcionalidad eléctrica de las celdas solares por medio de la determinación de la característica corriente-tensión (curva I-V) empleando iluminación pulsada con lámpara de Xe.
- Inspección visual: se verifican los vidrios, celdas, soldaduras, diodos de paso y el cableado eléctrico.

Por otra parte para comprobar el estado del panel en los ciclos 1, 100, y 500 ciclos se realizaron las siguientes inspecciones:

- Aislación eléctrica entre el sustrato y cada uno de los polos del panel a temperatura ambiente, durante la meseta a +130°C y a los -180°C.
- Funcionamiento de los diodos de paso de las celdas. Se realiza haciendo circular una corriente igual a la corriente de trabajo de la cadena durante la meseta a +130°C y durante 1 minuto a -180°C.
- Verificación de la funcionalidad eléctrica de las celdas solares por medio de la determinación de la característica corriente-tensión (curva I-V) empleando iluminación pulsada con lámpara de Xe, a temperatura ambiente.
- Inspección visual: se verifican los vidrios, celdas, soldaduras, diodos de paso y el cableado eléctrico a temperatura ambiente.

En figura 6 se presenta la curva I-V previa al ensayo y a los 500 ciclos.

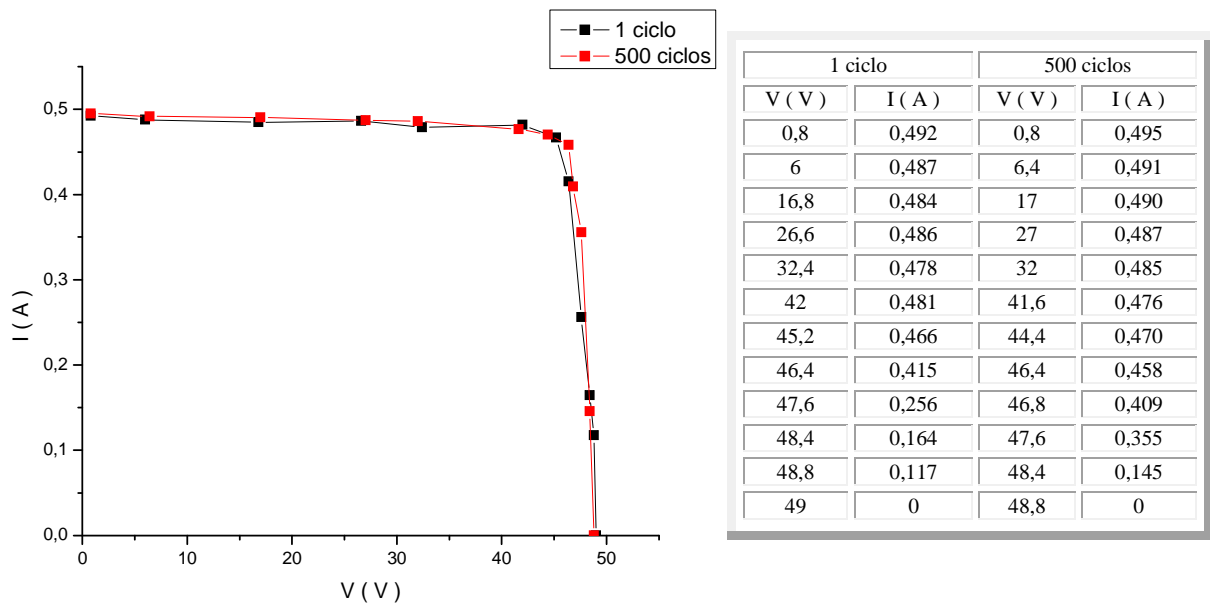


Figura 6: Curva y tabla I-V antes y después de 500 ciclos.

## CONCLUSIONES

El equipo de ciclado térmico desarrollado funciona según lo proyectado y hace disponer al Departamento de Energía Solar de la CNEA de una herramienta fundamental para la verificación del diseño, partes y procesos para la construcción de paneles solares de uso espacial.

Respecto al panel bajo prueba, antes y después de los ensayos ambientales las inspecciones realizadas hasta los 500 ciclos resultan satisfactorias ya que no se han observado diferencias significativas con las inspecciones iniciales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de profesionales, técnicos y personal administrativo de numerosos sectores y laboratorios del Centro Atómico Constituyentes que hicieron posible la ejecución del presente proyecto. Cabe mencionar muy especialmente a: M. Bogado; M. Tamasi; J. F. Vázquez; C. Bolzi; L. González y J. García; C. Sandín; M Igarzabal; D. Simoncelli, C. Piñeyro y H. Zárate (Talleres Especiales); Martin Ghiselli y N. Fuentes (Proyecto Antena SAR).

Este trabajo fue financiado por ARSAT través del convenio de asistencia tecnológica particular entre la Comisión Nacional de Energía Atómica, La Asociación Cooperadora del Departamento de Física de la CNEA y la empresa Argentina de Soluciones Satelitales S.A. (ARSAT) referido al “arreglo de cargas tecnológicas Argentinas (ACTA) – Panel Solar – FASE II”

## REFERENCIAS

AIAA S-112-2005 - Qualification and Quality Requirements for Electrical Components on Space Solar Panels  
 CAC-PSE-PAN-01950B-PR - Bruno-Bolzi (2010). Inspección visual y verificación funcional de los paneles solares durante la campaña del modelo de vuelo (Procedimiento interno CNEA)

## ABSTRACT

A chamber for thermal cycling have been developed to perform qualification testing of solar panel for use in low, medium and geostationary orbits. This paper discusses development of equipment and its use for a solar panel test qualification with 18 triple junction cells interconnected series. This includes design verification test, parts and processes employed in a solar panel integration. Visual inspections and electrical verifications before and after thermal cycling tests have do not reveal relevant differences. The equipment and solar panel have worked as expected.

**Keywords:** solar energy, thermal cycling, triple junction solar cells, geostationary satellite.