

EL INSÓLITO CAMINO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.

Desde la ciencia básica hasta el desarrollo tecnológico

Palabras clave: celdas solares, paneles, materiales, investigación, tecnología espacial.
Key words: solar cells, panels, materials, investigation, space technology.

Los paneles o módulos fotovoltaicos están constituidos por celdas solares, dispositivos capaces de generar energía eléctrica cuando son iluminados. Sus aplicaciones pueden variar desde meros productos de consumo a grandes centrales de potencia e incluso abastecer de energía a un satélite. En este último caso los requerimientos son muy estrictos y se exige que tengan el menor peso, mayor eficiencia, mayor confiabilidad y alta resistencia a la radiación. De esta manera resulta de interés realizar investigación y desarrollo sobre los dispositivos y los materiales intervinientes teniendo como finalidad el mejor desempeño tecnológico.

The photovoltaic solar cells are devices capable of generating electrical energy when they are illuminated. Its applications might vary from simple consumer products to large solar power plants and even supply energy in a space mission. For the last case the requirements for the solar cells are highly strict in order to have the lowest weight, highest efficiency, highest reliability and high radiation resistance. In this way it is of interest to carry out research and development on the devices and materials involved, aiming at the best technological performance.

■ ALGUNOS ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN LAS CELDAS SOLARES

Los paneles solares o módulos fotovoltaicos generan energía eléctrica a partir de la energía solar. A su vez los módulos están constituidos por celdas solares, que se pueden considerar como el dispositivo más importante en la etapa de conversión fotovoltaica.

Un material es apropiado para ser utilizado en celdas solares si cumple con ciertos requisitos, como

por ejemplo tener la absorción apropiada y estabilidad en tiempo. Además, desde el punto de vista de su uso comercial, la celda debe tener facilidad de producción, reproducibilidad en los parámetros eléctricos, buena eficiencia de conversión fotovoltaica y bajo costo de producción. Se deja de lado este último aspecto en el caso de las aplicaciones espaciales, ya que en ese caso cobra relevancia el requerimiento de eficiencia.

Ahora bien, desde el punto de

vista de la investigación y desarrollo, es importante estudiar materiales que logren avanzar en eficiencias y demás parámetros eléctricos y superar los problemas de degradación que puedan tener a lo largo de su vida útil.

El primer punto para comprender el comportamiento de los dispositivos fotovoltaicos y los materiales que lo conforman es comprender la naturaleza de la radiación solar [Grossi]. El espectro solar visible está compuesto por distintas longi-

■ Marcela Barrera y Hernán Socolovsky

Gerencia Investigación y Aplicaciones, Departamento Energía Solar, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

E-mail: barrera@tandar.cnea.gov.ar

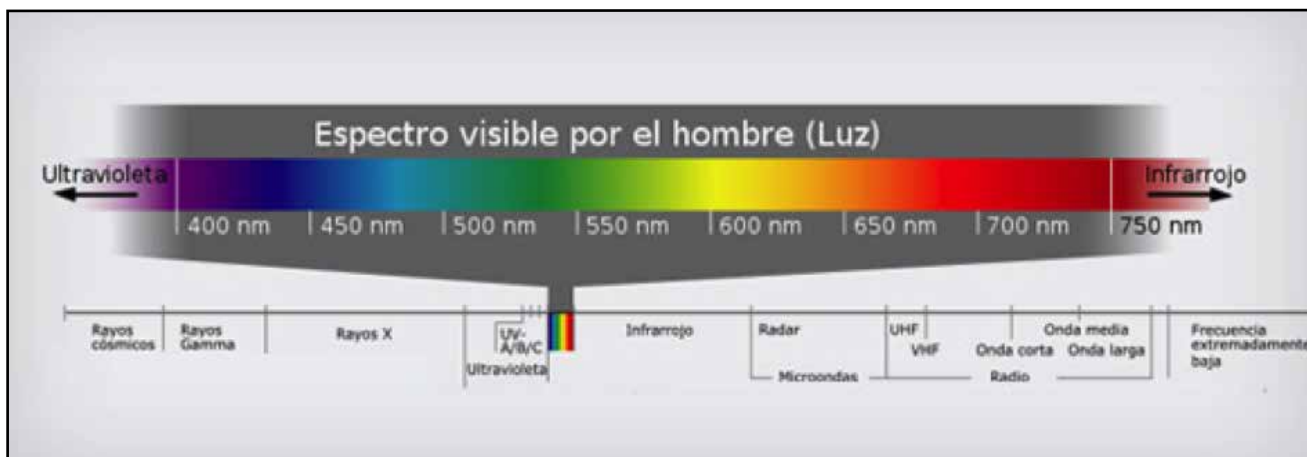


Figura 1. Radiación solar.

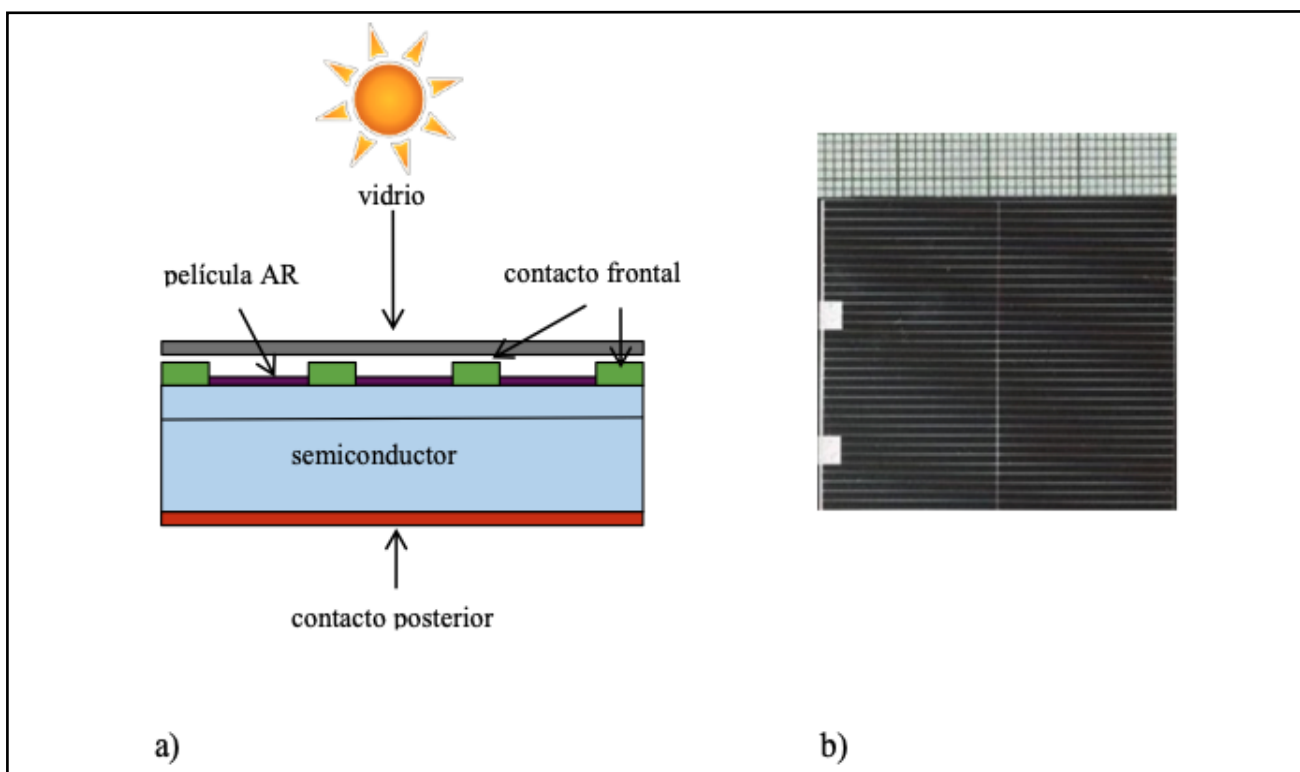


Figura 2. a) Esquema de una celda solar convencional. b) Fotografía de una celda solar de silicio fabricada en laboratorio.

tudes de onda. Además de esto existen longitudes de onda no visibles, como por ejemplo el ultravioleta (UV) y el infrarrojo (IR) (Figura 1).

El espectro de radiación solar posee mayor irradiancia (es más intenso) para longitudes de onda comprendidas entre 400 y 800 nm. Por lo tanto, es razonable pedir que los

materiales de interés fotovoltaico tengan la capacidad de absorber la radiación en ese intervalo. Por ejemplo, el silicio (Si) absorbe hasta aproximadamente 1100 nm, el arseniuro de galio (GaAs) hasta 880 nm y el germanio (Ge) hasta 1850 nm.

Una celda solar fotovoltaica convencional es básicamente un dio-

do^[1] (Figura 2). Posee un contacto frontal que es una grilla metálica frontal que cubre parcialmente la superficie; esto es para que la luz solar incida directamente sobre el material semiconductor, mientras que el contacto posterior cubre toda el área. Además presenta una película antirreflejante (AR) que tiene la finalidad de aumentar la radiación

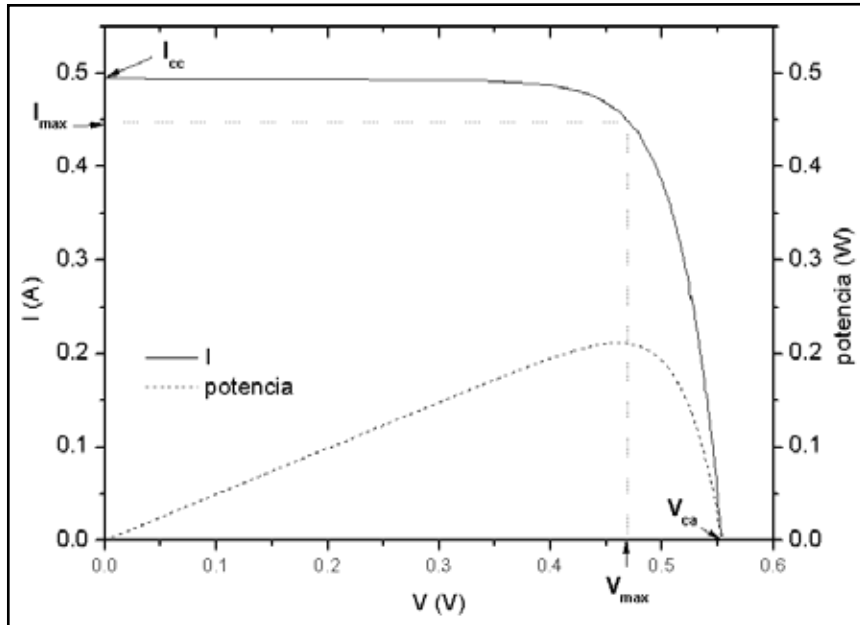


Figura 3. Curva I-V característica para una celda solar.

■ **MATERIALES DE INTERÉS FOTOVOLTAICO**

El silicio cristalino ha sido el material más utilizado para la producción de celdas solares desde 1954, año en que se desarrolló la primera celda solar [Chapin et al.]. Esto se debe a las ventajas inherentes del silicio como semiconductor, las que se presentan en la Tabla 1 [Bruton; Goetzberger et al.].

Actualmente el Si, ya sea cristalino o amorfo, continúa siendo utilizado como material de base para el desarrollo y fabricación de celdas fotovoltaicas comerciales.

Existe también una gran variedad de compuestos semiconductores, por ejemplo aquellos que se obtienen al combinar los elementos de las columnas III y V de la tabla periódica (Figura 4), como el GaAs y el InGaP. También son de interés los compuestos semiconductores de las columnas II y VI de la tabla periódica, como el CdS y el CdTe. En los últimos años cobraron relevancia las celdas solares orgánicas, que están formadas por moléculas orgánicas [Luque et al.].

En la Tabla 2 pueden apreciarse los parámetros eléctricos de celdas solares de distintos materiales. Estas celdas son de la máxima eficiencia certificada hasta el momento a nivel laboratorio [Green et al.].

solar absorbida.

Las celdas y paneles solares son caracterizados principalmente mediante la curva característica corriente - tensión (I-V), propia del dispositivo. La misma puede representarse en el primer cuadrante (Figura 3).

Algunos parámetros que se definen sobre la curva I-V son [Green (1986)]:

- La corriente de cortocircuito, correspondiente a una tensión nula entre contactos

$$I_{cc} \text{ o } J_{cc} \tag{1}$$

donde J_{cc} es la densidad de corriente de cortocircuito y surge al dividir I_{cc} por el área de la celda.

- tensión a circuito abierto, correspondiente a $I=0$

$$V_{ca} \tag{2}$$

- eficiencia de conversión, definida en el punto donde la potencia es máxima

$$h = \frac{V_{max} I_{max}}{P_i} \tag{3}$$

donde P_i es la potencia de la radiación solar incidente sobre la celda.

- factor de forma, da una medida de cuan alta es la potencia máxima $P_{máx}$ con respecto al tope ideal determinado por el producto entre V_{ca} e I_{cc}

$$F = \frac{I_{max} V_{max}}{I_c V_a} \tag{4}$$

Tabla 1
Ventajas del silicio como material para celdas solares

- es el segundo elemento en abundancia en la corteza terrestre
- no tóxico
- posee óxido nativo pasivante
- bajo coeficiente de segregación para muchos metales
- se puede dopar fácilmente (n o p)
- bajo costo
- vasto conocimiento de sus propiedades físicas

Las celdas solares constituidas por varias capas de diferentes materiales semiconductores III-V son las que poseen mayor eficiencia, y por ello son particularmente aptas para aplicaciones espaciales [Stan et al.]. Estos dispositivos están formados

por dos o más celdas de materiales con la capacidad de absorber un intervalo distinto de longitudes de onda del espectro solar. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de una celda solar de triple juntura, donde la subcelda “top” es de InGaP, la

subcelda “middle” es de GaAs y la subcelda “bottom” es de Ge.

Cada subcelda es un diodo y a su vez posee distintas capas que contribuyen a mejorar las características de los dispositivos. Por ejemplo, la



Figura 4. Tabla periódica de los elementos donde se muestran algunos de los semiconductores utilizados en celdas solares.

Tabla 2:
Parámetros eléctricos medidos en condiciones estándares (espectro AM1.5, 1 kW/m², 25°C).

	Eficiencia (%)	V _{ca} (V)	J _{cc}	FF
Si cristalino	26.7 ± 0.5	0.738	42.65	84.9
Si policristalino	22.3 ± 0.4	0.6742	41.08	80.5
Si amorfo	10.2 ± 0.3	0.896	16.36	69.8
GaAs	29.1 ± 0.6	1.1272	29.78	86.7
CIGS	23.3 ± 0.5	0.734	39.58	80.4
CdTe	21.0 ± 0.4	0.8759	30.25	79.4
Multijunturas				
III-V	38.8 ± 1.2	4.767	9.564	85.2
orgánicas	11.2 ± 0.3	0.780	19.3	74.2

función de la ventana es pasivar la superficie de la celda, que significa que va existir una menor pérdida en la corriente generada.

Por otra parte, para aumentar la eficiencia de celdas solares se deben implementar mejoras en el diseño, como por ejemplo la incorporación

de técnicas AR. Estas técnicas tienen como finalidad disminuir la reflectividad de la cara frontal del dispositivo, maximizando de este modo la fracción de luz absorbida. Pueden consistir de multicapas dieléctricas^[2] optimizadas o texturas en la superficie.

Dos materiales dieléctricos con las características adecuadas para funcionar como AR en celdas solares de Si son el TiO₂ y el ZnS (Figura 6). Mediante ataques químicos anisótropos puede conseguirse una estructura de pirámides sobre Si (Figura 7). Los dispositivos comerciales más conocidos poseen capas de nitruro de silicio (Si₃N₄)

■ **ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES**

El proceso de elaboración de las celdas solares depende fuertemente de los materiales. En el caso de celdas de silicio convencionales, la etapa más importante en la elaboración consiste en la formación del diodo n-p, donde n y p son regiones con características electrónicas distintas. Estas diferencias se consiguen mediante la adición de un pequeño porcentaje de átomos extraños (dopado) en la red cristalina regular del silicio. El agregado de átomos de impurezas con cinco electrones de valencia, por ejemplo el fósforo, produce semiconductores de tipo n, por la contribución de electrones extras. Semiconductores de tipo p pueden obtenerse, por el contrario, por el agregado de átomos de impurezas con tres electrones de valencia, entre otros el boro, porque llevan a la producción de "huecos" o deficiencia de electrones. Por ejemplo, una opción para formar el diodo partiendo de obleas tipo p dopadas con boro, es realizar una difusión de fósforo mediante un proceso térmico a alta temperatura, que puede ser de 900°C en ambiente de nitrógeno y/u

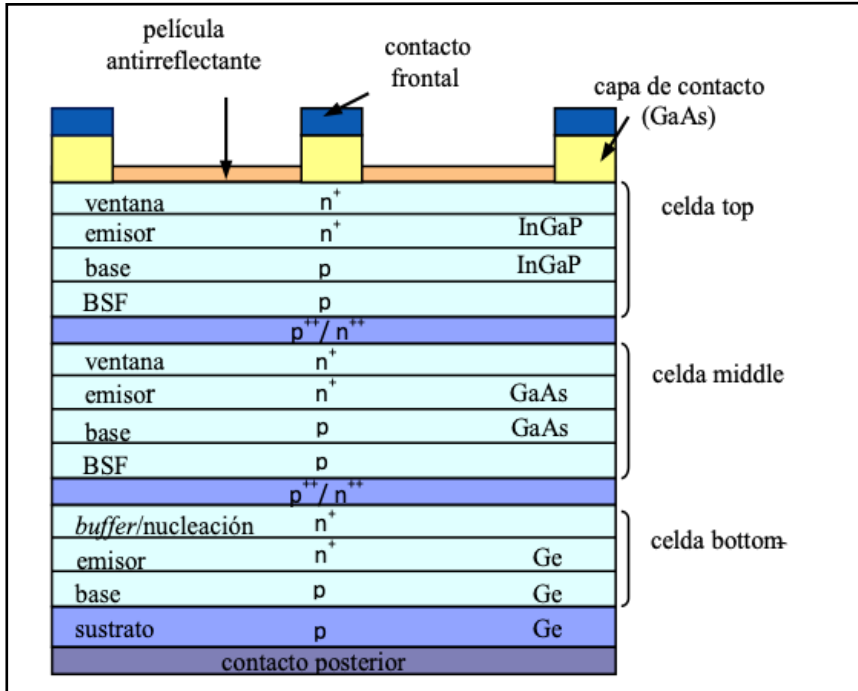


Figura 5. Vista transversal de una celda multijuntura InGaP/GaAs/Ge.

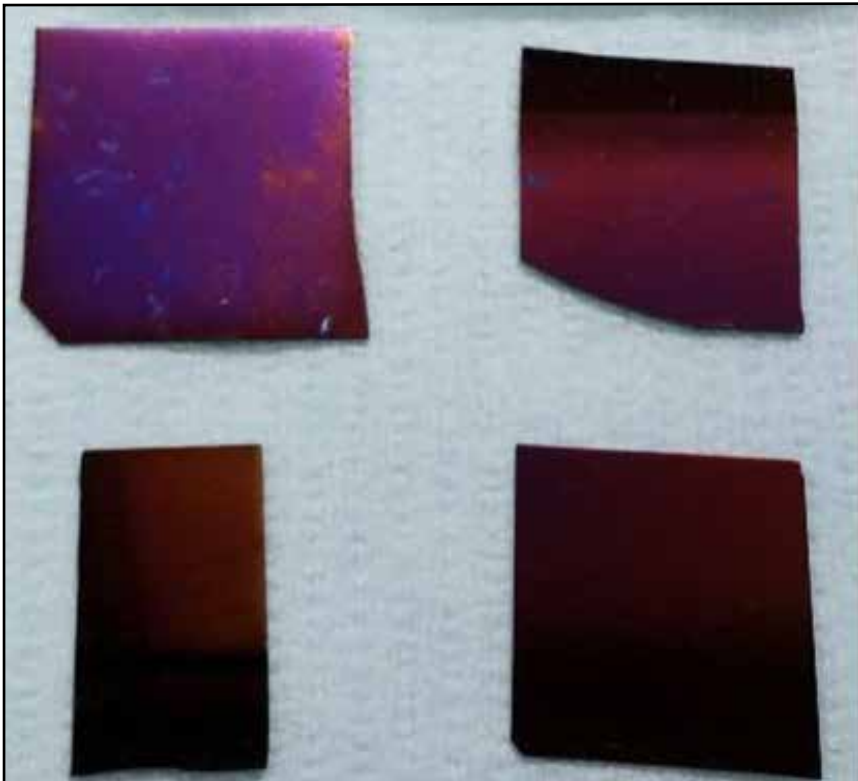


Figura 6. Muestras de Si con depósito de ZnS con espesor de 40 nm.

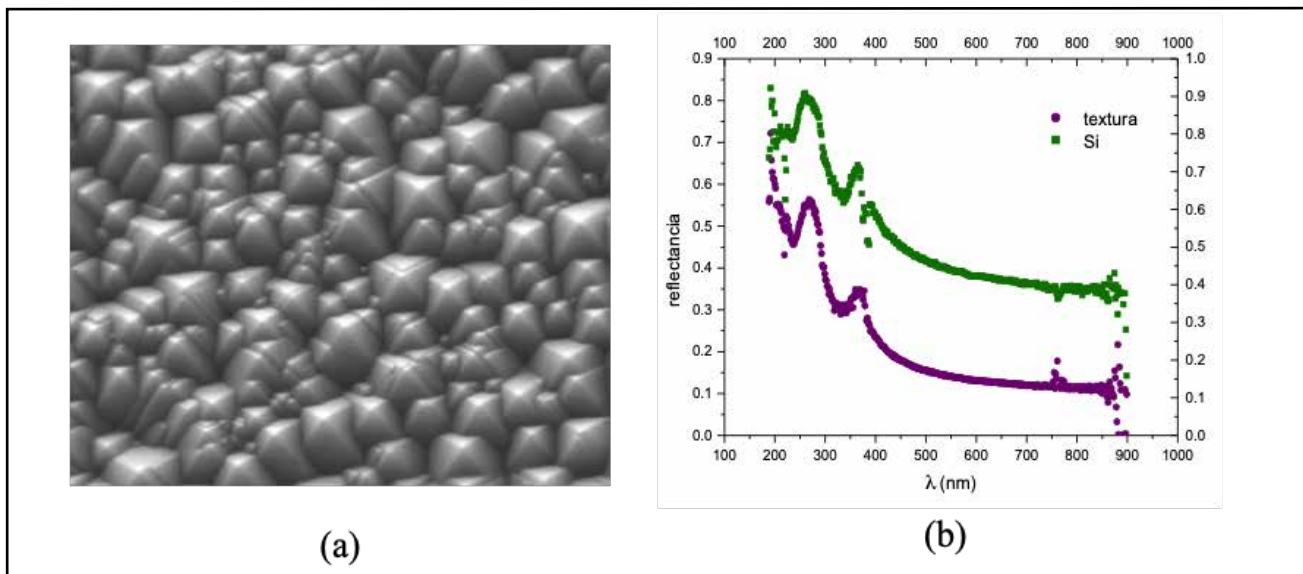


Figura 7. (a) Micrografía de una oblea de Si texturada obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), el tamaño de las pirámides varía entre 2 y 10 μm . (b) Reflectividad antes (verde) y después (violeta) del ataque químico para obtener la textura.

oxígeno según cuál sea la etapa del proceso.

La grilla metálica frontal que forma parte de la celda es diseñada para permitir que la luz incida en el material semiconductor y asegurar simultáneamente una máxima superficie de absorción y una baja resistencia eléctrica. El patrón de este contacto frontal se consigue, a nivel laboratorio, mediante un proceso denominado fotolitografía, que se utiliza con frecuencia en microelectrónica (Sze). Para esta técnica se recubre la oblea con un material sensible a la radiación UV llamado fotorresina. A su vez, la fotorresina se recubre con una máscara parcialmente transparente. En el caso en el que la fotorresina sea positiva, zonas que fueron expuestas a la radiación UV pueden ser removidas durante el revelado (Figura 8a).

Los contactos, en el caso de las celdas de laboratorio, pueden ser titanio - paladio - plata, que pueden ser depositados mediante distintas técnicas. La manera más común es mediante evaporación térmica. Para ello se utiliza una evaporado-

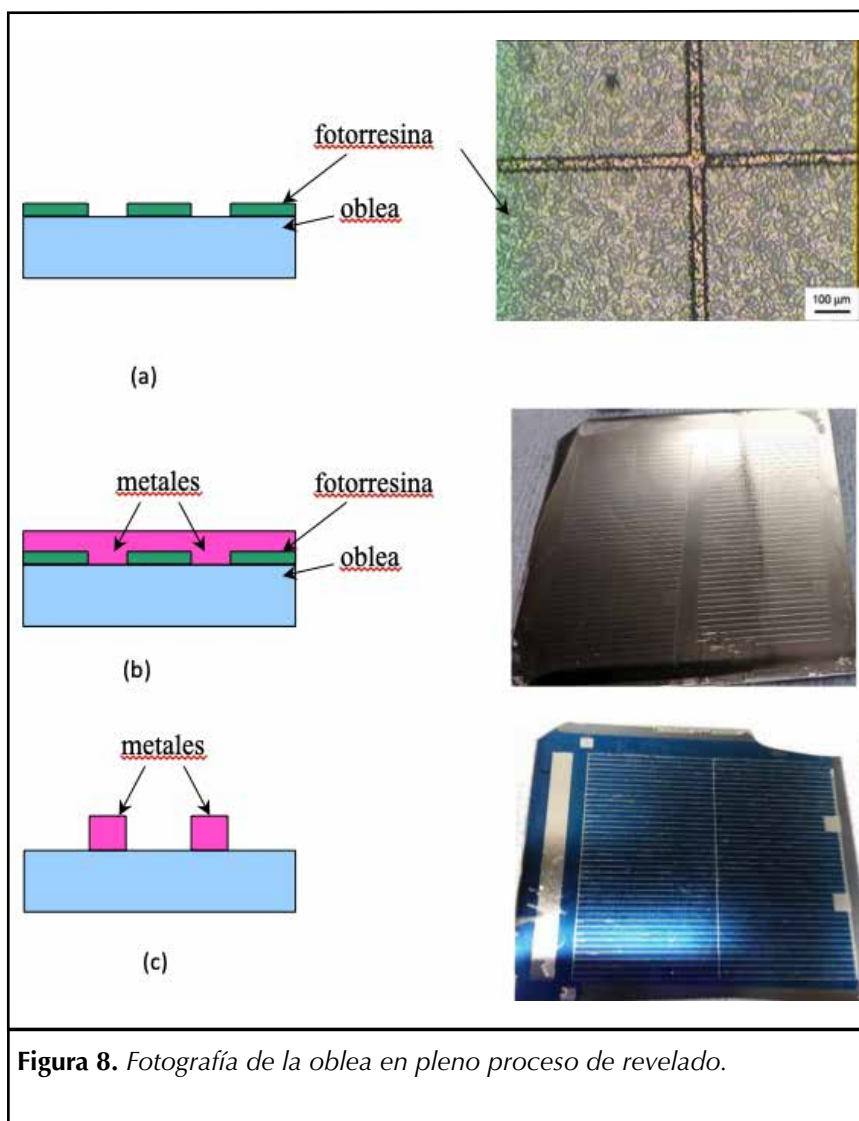


Figura 8. Fotografía de la oblea en pleno proceso de revelado.

ra, allí se calientan los metales, que se evaporan depositándose sobre las muestras (Figura 8b). Finalmente, se remueve la resina con acetona y, de ser necesario, bajo la acción de ultrasonido. De este modo, el metal depositado sobre la fotorresina se desprende, quedando solamente sobre la oblea el patrón de la grilla; esta técnica es conocida con el nombre de *lift-off* (Figura 8c).

Cabe aclarar que en el proceso industrial de fabricación de celdas solares los contactos se depositan mediante un proceso diferente llamado serigrafía (*screen - printing*).

Las celdas solares basadas en semiconductores III-V se fabrican mediante procesos más complejos que el de los dispositivos de silicio. Una de las técnicas que puede emplearse se denomina MOVPE (*Metalorganic Vapor Phase Epitaxy*). La epitaxia en fase vapor se produce cuando las moléculas o especies intermedias de dicho vapor se descomponen cerca

de la zona de crecimiento, pasando a formar parte de un cristal (Luque). De todos modos hay que tener en cuenta que el objetivo principal sigue siendo formar el diodo o unión n-p.

■ CARACTERIZACIÓN

La técnica de caracterización principal para las celdas solares y módulos fotovoltaicos es la medición de la curva corriente – tensión (I-V). La medición se realiza bajo condiciones estándares, donde se especifica las condiciones de iluminación y la temperatura del dispositivo [norma i-v].

En la Figura 9a se observa una fotografía del simulador solar, la celda en el plano de medición y un sistema de puntas destinado a la medición eléctrica. Además, se utiliza un equipo de adquisición de datos. En la Figura 9b se observa un dispositivo apoyado sobre una base termostatazada para mantener la tempera-

tura, que generalmente es de 25°C.

Otras caracterizaciones que tienen principal interés para comprender el funcionamiento de las celdas solares son la medición de la respuesta espectral [norma RE; Wenham et al.] y el tiempo de vida media de portadores minoritarios [Sinton et al]. La respuesta espectral caracteriza el comportamiento de la Icc para distintas longitudes de onda. Por otra parte, es importante mencionar que es preferible trabajar con materiales y dispositivos en los cuales los portadores minoritarios tengan un mayor tiempo de vida media.

■ SIMULACIÓN NUMÉRICA DE DISPOSITIVOS

Las herramientas de simulación, y en particular de celdas solares, nos permiten corroborar la validez de nuevas teorías y nos brinda una profunda comprensión de las relaciones existentes entre los parámetros de los materiales y del dispositi-

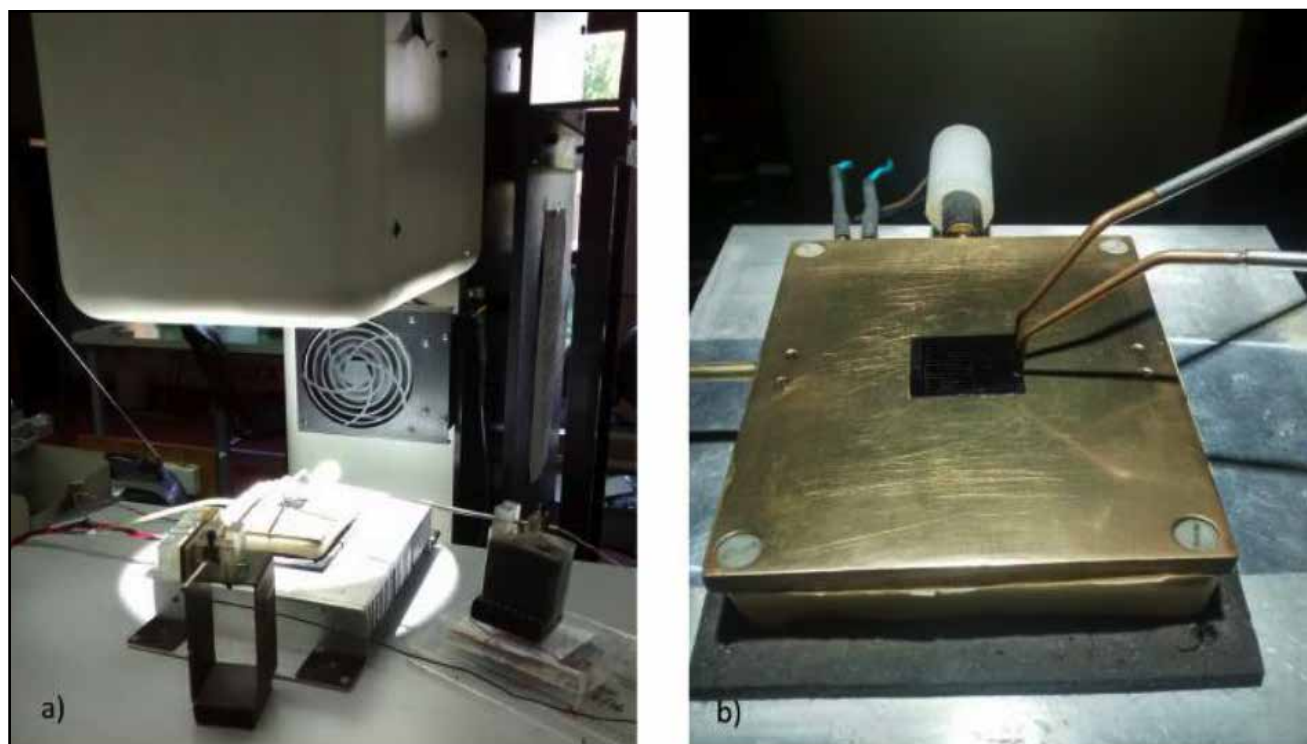


Figura 9. a) Medición de curva I-V de una celda solar en un laboratorio, b) Base de medición.

tivo. La principal ventaja es que el simulador permite evaluar diseños novedosos antes de la fabricación del dispositivo. También es muy importante validar las suposiciones hechas en los modelos mediante la comparación con los resultados experimentales.

Entre los códigos más conocidos para modelar detectores ópticos y celdas solares se encuentran, por un lado, los de origen académico como ASA desarrollado por Delft University, Holanda [Pieters et al.], ADEPT de Purdue University, USA [Gray et al.], AMPS de Penn State University, Estados Unidos [McElheney et al.], ASPIN de *Ljubljana University*, Eslovenia [Vukadinovic et al.], etc. También existen programas de origen comercial como el PC1D o PC2D [Basore et al.], el ATLAS [Michael et al.] y el Medici [Choe]. Todos resuelven ecuaciones habituales de física de dispositivos, como las de Poisson y de continuidad con distintos grados de aproximación.

Por ejemplo, se puede modelar numéricamente una celda solar de GaAs y luego reproducir los resultados experimentales [Barrera et al. (2007)]. En la Tabla 3 se presenta la comparación entre los parámetros eléctricos de la celda solar simulados y experimentales.

Otro ejemplo de simulación es el estudio del funcionamiento de una

celda solar para aplicaciones termofotovoltaicas en misiones espaciales lejanas al Sol [Barrera et al. (2012)]. El suministro de energía eléctrica para el vehículo o satélite proviene de celdas solares iluminadas con una fuente de calor. En este ejemplo se consideró una fuente de calor de Er_2O_3 y una celda de Ge, con la capa ventana de GaAs o InGaP. La figura 10 muestra cómo varía la curva J-V para distintos espesores y materiales de la capa ventana. Esto permitiría seleccionar la estructura óptima del dispositivo para las condiciones ambientales deseadas.

■ DEL LABORATORIO A LA APLICACIÓN TECNOLÓGICA

Las misiones espaciales requieren paneles solares diseñados específicamente para satisfacer la demanda de energía eléctrica del satélite y de todos sus subsistemas. Teniendo en cuenta el elevado precio de dichos paneles en el mercado internacional, y con el objeto de disponer en el país de las herramientas de diseño, fabricación, caracterización y ensayo de paneles solares para las misiones satelitales del Plan Espacial Nacional, la CNEA comenzó en el

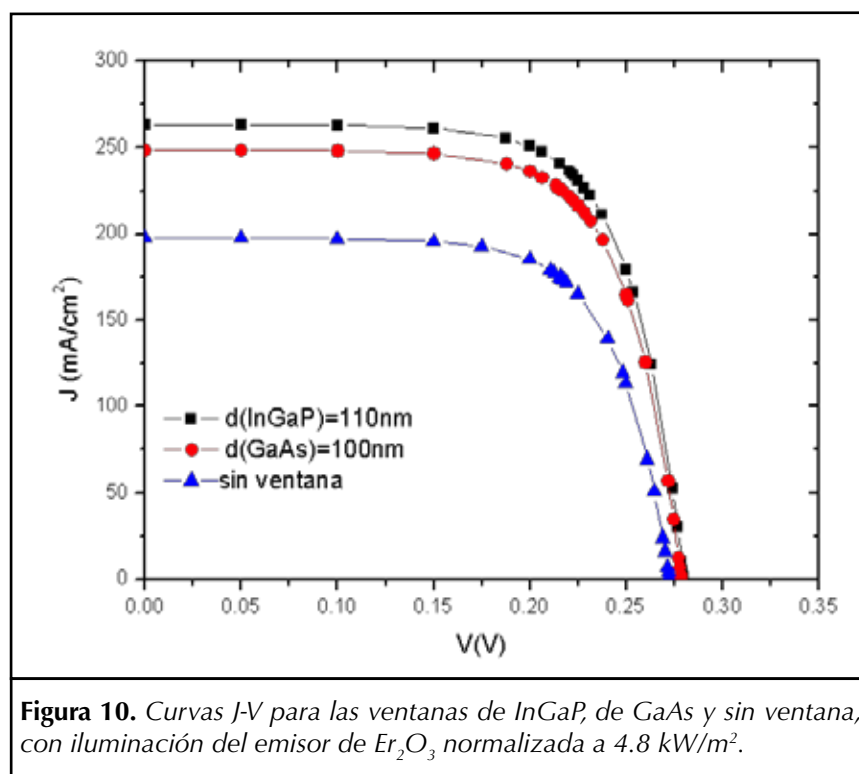


Figura 10. Curvas J-V para las ventanas de InGaP, de GaAs y sin ventana, con iluminación del emisor de Er_2O_3 normalizada a 4.8 kW/m^2 .

Tabla 3: Parámetros eléctricos experimentales y simulados con D-AMPS-1 D para la celda de GaAs.

	V_{ca} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
parámetros experimentales [12]	1035	26,7	84,3	23,3
parámetros simulados con D-AMPS-1D	1039	26,4	88,1	24,1

año 2001 una estrecha colaboración con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) a través de sucesivos contratos firmados en el marco de la Ley No 23.877 de Innovación Tecnológica. Como resultado de este proceso se pudieron fabricar los paneles solares de la misiones SAC-D, SAOCOM 1A y 1B en el Departamento Energía Solar (DES) de la CNEA (Alurralde et al.).

Las celdas solares que forman parte de un panel solar de uso espacial deben satisfacer una serie de requerimientos. Por un lado deben tener la mayor eficiencia posible, incidiendo este aspecto directamente en un menor tamaño de panel solar para una determinada potencia. Y un panel más pequeño es por supuesto más liviano, siendo esto muy crítico considerando el elevado costo que tiene poner en órbita cada kilogramo de carga.

Por otro lado, las celdas solares a diferencia de cualquier otro dispositivo electrónico que viaja en un satélite quedan directamente expuestas al ambiente espacial lo que

implica, por ejemplo, que van a recibir una mayor cuota de radiación (especialmente partículas cargadas y radiación UV) con respecto al resto de los componentes que van en el interior del satélite. Por ende, deben ser capaces de sobrevivir durante su vida útil al impacto permanente de protones, electrones y otras partículas provenientes del sol. Así mismo recibirán una dosis de radiación ultravioleta mucho mayor que la equivalente en la superficie de la tierra. La capacidad de resistir el ambiente espacial es fundamental a la hora de seleccionar una celda solar y cada componente que viaja al espacio.

Ambos requerimientos, alta eficiencia y resistencia a la radiación, son actualmente satisfechos por la tecnología denominada celdas solares multijuntura, las cuales están constituidas por materiales III-V crecidos en forma cristalina sobre un sustrato de germanio y que a su vez es la tecnología que actualmente ostenta el record mundial de eficiencia en celdas solares [NREL]. Como ya se mencionó, se trata de un arreglo de tres junturas n-p fabricadas en

forma de tándem que optimiza la generación de energía en función del espectro de la luz que incide. Este efecto se logra utilizando distintos materiales semiconductores capaces de absorber la radiación solar en distintas zonas del espectro. Hoy en día todo el mercado de celdas solares espaciales es exclusivamente dominado por esta tecnología debido a los aspectos ya mencionados. Existen algunos pocos proveedores a nivel global que fabrican y comercializan estos dispositivos calificados para uso espacial.

Por tal motivo, las celdas solares utilizadas en los satélites del plan espacial nacional llevado adelante por CONAE son también celdas comerciales, quedando el dimensionamiento del sistema y su adaptación al ambiente espacial (el cual es específico de cada tipo de órbita) a manos del diseñador, es decir nuestro departamento. A modo de ejemplo, cuando el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA diseña un panel solar para un Rover marciano, utiliza las mismas celdas solares multijuntura pero el diseño



Figura 11. Vista interior del laboratorio de integración de paneles solares para uso espacial del Departamento Energía Solar (DES) de la CNEA.

se adapta a las condiciones particulares del ambiente en Marte.

■ FABRICANDO PANELES SOLARES ESPACIALES

La integración de los modelos de vuelo se realiza en el Laboratorio de Integración de Paneles Solares Espaciales del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA (CAC-CNEA). Se trata de un área limpia con temperatura y humedad controladas de 220m² de superficie clasificada como ISO7 ó clase 10.000 (Figura 11). Dicha clasificación implica que en un volumen de aire de un pie cúbico no puede haber más de 10.000 partículas que superen el tamaño de medio micrón. El sistema de aseguramiento de la calidad desarrollado en la CNEA está basado, principalmente, en la trazabilidad de todo el proceso de integración cumpliendo con los estándares habituales de la industria espacial de NASA y de la agencia espacial europea ESA [Nasa std.; ESA std.].

El primer paso de la integración eléctrica de una celda (Figura 12) es el soldado de los interconectores y un diodo de paso de silicio para posteriormente realizar el pegado de la cubierta protectora de vidrio de 100 micrones de espesor. Los interconectores utilizados están formados por una delgada lámina de Kovar[®] [3] plateada y fueron fabricados en la CNEA (Figura 13). Los conjuntos formados por la celda solar, el diodo de paso, los interconectores soldados y la cobertura de vidrio, denominados CIC (por su nombre en inglés, "Covered Interconnected Cell"), se interconectan entre sí en serie, formando subcadenas de N cantidad de celdas dependiendo de la tensión que se desee alcanzar. La interconexión de estas subcadenas, para formar cadenas de celdas en serie, se realiza sobre el sustrato

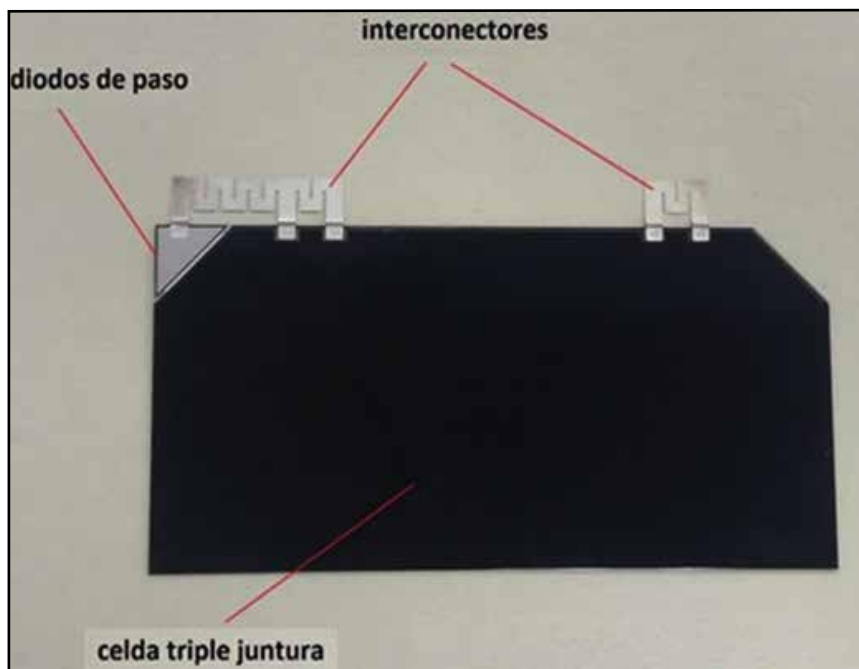


Figura 12. Celda solar triple junta integrada con los interconectores plateados, el diodo de paso y la cubierta protectora de vidrio de 100 micrones.

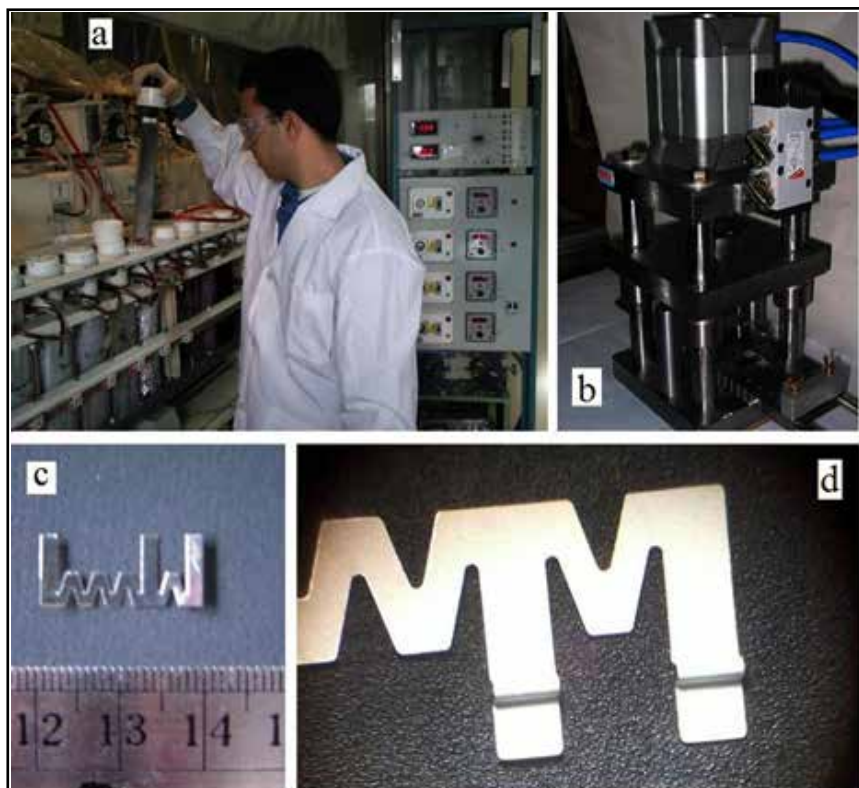


Figura 13. a) Cubas electrolíticas para el plateado de cintas de Kovar[®]; b) matriz de corte de interconectores; c) dimensión del interconector de Kovar[®]; d) lazo de alivio para absorber dilataciones/contracciones del sustrato por ciclados térmicos.

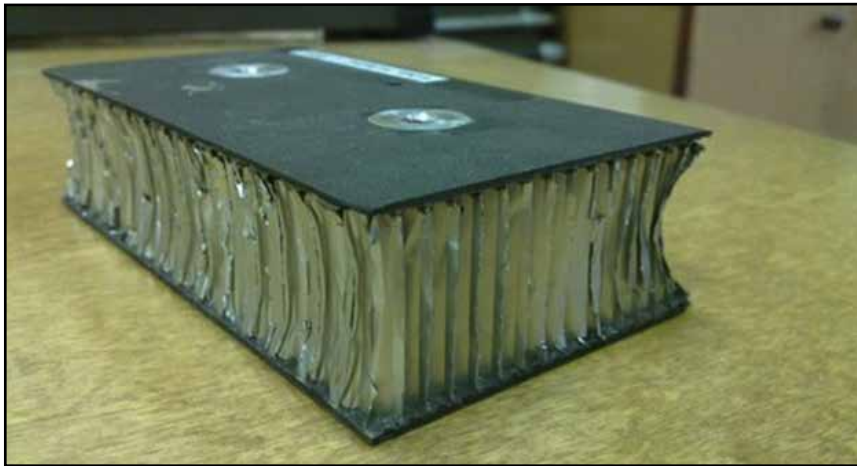


Figura 14. Recorte de un sustrato de panel solar con la estructura de panel de abejas de aluminio y las tapas de fibra de carbono laminadas sobre él. El sustrato fue fabricado en CNEA.

(base rígida sobre la cual se pegan las celdas solares) mediante cintas de conexión de Kovar[®] plateadas llamadas buses. Dicho sustrato está fabricado mediante el laminado^[4] de dos caras de fibra de carbono conteniendo en su interior una estructura del tipo "honey-comb" (panel

de abejas) de aluminio dando como resultado una pieza de gran rigidez y de muy bajo peso (Figura 14). Entre el sustrato y las celdas es necesario intercalar una delgada lámina de kapton[®] [5] que cumple las veces de material aislante y que además mejora la adherencia del pegamen-

to que se utiliza en las celdas. Así por ejemplo, en el caso de los paneles solares del satélite SAOCOM se fabricaron cadenas de 32 celdas en serie alcanzando una tensión de aproximadamente 80V. A su vez, las cadenas se conectan entre sí en paralelo, mediante cables, formando módulos de M cadenas dependiendo ahora de la corriente eléctrica necesaria. Nuevamente para las misiones SAOCOM se colocaron 5 cadenas en paralelo para alcanzar un valor de corriente de módulo cercana a 2,5A. Cada sección del panel maneja entonces una potencia cercana a 150 W. Entre los tres paneles solares de satélite se totalizan 24 módulos de modo tal de completar la potencia requerida por la misión de aproximadamente 3600 W.

Para la soldadura de los interconectores a la cara frontal de cada celda solar se utilizó la técnica de soldadura por resistencia (*Resistance*

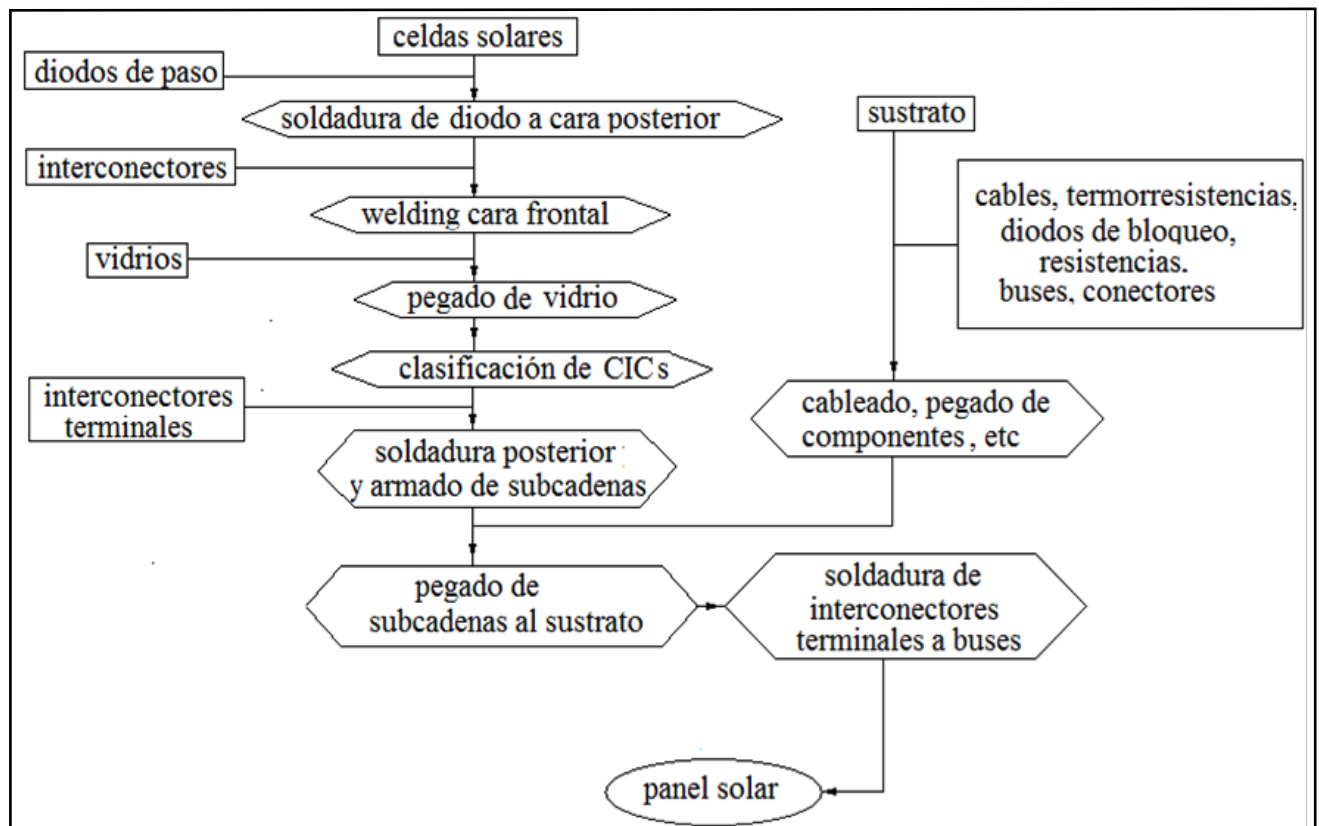


Figura 15. Esquema de la secuencia de integración de un panel solar para uso espacial en el CAC.

welding). El vidrio protector que lleva cada celda solar es pegado con un adhesivo siliconado transparente apto para uso espacial (Dow Corning® 93-500). El proceso de pegado se realiza en una cámara de vacío para minimizar la posibilidad de la formación de burbujas en el adhesi-

vo, ya que las mismas podrían llegar a romper la celda o el vidrio protector al intentar despresurizarse en el vacío del espacio. Para tal fin, se desarrollaron tres dispositivos: un sistema de alineación para el vidrio y la celda solar, un distribuidor de adhesivo y la cámara de vacío. El control

de calidad se basó en inspección visual y ensayos de adherencia en probetas por cada lote de adhesivo preparado.

En la Figura 15 se muestra un esquema de las etapas de integración, en la Figura 16 una fotografía del proceso de detección de microfisuras en celdas mediante electroluminiscencia y en la Figura 17 un panel terminado.

Finalmente se cablean entre sí todas las cadenas de celdas en la parte posterior del panel y se sueldan todos los interconectores terminales a los buses de interconexión ya pegados sobre el sustrato. Para finalizar la integración del panel se colocan además sobre el sustrato dos termoresistencias de platino que brindarán información de temperatura del panel en vuelo (telemetría) y un par de resistores de descarga que garantizarán que los paneles solares y el satélite se mantengan equipotenciales frente a la carga electrostática del ambiente espacial.

■ ENSAYOS AMBIENTALES Y DE DAÑO POR RADIACIÓN

Los ensayos realizados en Tierra, bajo condiciones controladas y normalizadas, permiten estudiar la resistencia de los dispositivos al ambiente espacial y predecir su comportamiento al final de su vida útil, pudiéndose realizar entonces un diseño apropiado de los paneles solares de un satélite. En la industria espacial ensayar es siempre preferible a realizar simulaciones o estimaciones teóricas, otorgando mayor robustez y confiabilidad al desarrollo. Los ensayos ambientales a los que comúnmente se someten los componentes de un satélite son los de ciclado térmico y vacío dado que la ausencia de atmósfera en el espacio ocasionan temperaturas extremas, sobre todo en las partes



Figura 16. Detección de microfisuras en celdas mediante electroluminiscencia. La subcadena bajo inspección consiste de seis celdas soldadas en serie.



Figura 17. Uno de los tres paneles solares del SAOCOM 1B en el laboratorio de integración (CAC-CNEA). La potencia total del sistema de potencia es de 3584 W.

exteriores de un satélite. Por ejemplo, un panel solar expuesto al sol puede alcanzar temperaturas cercanas a $+100^{\circ}\text{C}$ en la cara iluminada mientras que en sombra (cuando es eclipsado por la tierra) la misma

puede descender a valores cercanos a -100°C . Estas enormes amplitudes térmicas pueden ocasionar que los componentes del panel solar fallen debido al continuo ciclo de dilatación-contracción que experimentan

junto con el sustrato por las variaciones de temperatura. Por ejemplo para un satélite de órbita LEO (Low Earth Orbit) se cumplen 16 de estos ciclos por día, lo que en una misión de cinco años implica cerca de 30.000 ciclos térmicos. En la figura 18 se muestra uno de los paneles solares de ingeniería de la misión SAC-D ingresando a una cámara de termovacío para realizar el ensayo de ciclado térmico. El objetivo de fabricar modelos de ingeniería es la de calificar y validar todos los procesos de integración y fabricación de los paneles solares sometiendo posteriormente a ensayos ambientales y mecánicos.

Una característica distintiva del CAC es que se cuenta con el acelerador de iones pesados "Tandar" el cual nos permite realizar ensayos de daño por radiación en celdas y componentes electrónicos. Si bien el fabricante de celdas solares espaciales reporta la degradación en tensión y corriente (y por ende de potencia) que la celda tendrá para distintas fluencias de electrones de 1MeV (e/cm^2), siempre es mejor tratar de re-



Figura 18. Panel de ingeniería del SAC-D ingresando a la cámara de termovacío en el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE-Brasil) en 2010. Los ensayos realizados incluyeron ciclos de $+85^{\circ}\text{C}$ a -100°C de amplitud térmica.



Figura 19. Cámara de termovacío para ensayos de daño por radiación y línea de haz de protones de 10MeV en el acelerador de iones "Tandar" del CAC-CNEA.

crear el ambiente espacial lo más parecido posible a las condiciones reales. En este aspecto, considerando que una importante cuota de la radiación de partículas provenientes del sol son protones de distintas energías contamos con la posibilidad de simular tales radiaciones en

la línea EDRA (ensayo de daño por radiación) (Figura 19). Esta línea de trabajo del Tandem cuenta con un haz de protones de 10 MeV y la fluencia del ensayo se iguala a la que recibiría en órbita el panel solar a lo largo de los cinco años de vida útil de la misión (Ibarra et al.). En la Figura 20 se muestra la diferencia entre los parámetros eléctricos de una celda solar de triple juntura antes y después de ser irradiada con una fluencia de $3,6 \cdot 10^{11}$ protones por cada centímetro cuadrado de celda.

Por último, dado que durante el lanzamiento de un cohete se producen enormes ondas vibratorias y presiones acústicas dentro del mismo, es necesario someter a los paneles y al satélite a ensayos de vibraciones y acústicos a fin de garantizar su supervivencia al shock recibido durante la etapa de despegue y puesta en órbita. En la Figura 21 se muestra uno de los paneles solares de la misión SAC-D siendo vibrado durante su campaña de aceptación en Brasil.

■ DESARROLLANDO SENSORES SOLARES DE POSICIÓN

Los sistemas de control de posición angular de los satélites artificiales utilizan habitualmente sensores de radiación solar para determinar en forma aproximada dicha posición con respecto al Sol (Figura 22). A estos sensores se los denomina "sensores solares gruesos" (CSS, por sus siglas en inglés) y son una parte fundamental del sistema de orientación del satélite. Los sensores solares de posición son pequeñas celdas fotovoltaicas cuya corriente eléctrica es proporcional a la radiación solar incidente. De este modo, la señal de corriente generada por el sensor sigue fielmente la ley del coseno de modo que midiendo una corriente eléctrica en distintos sensores es posible determinar la posición del sol con respecto a los mismos. En las

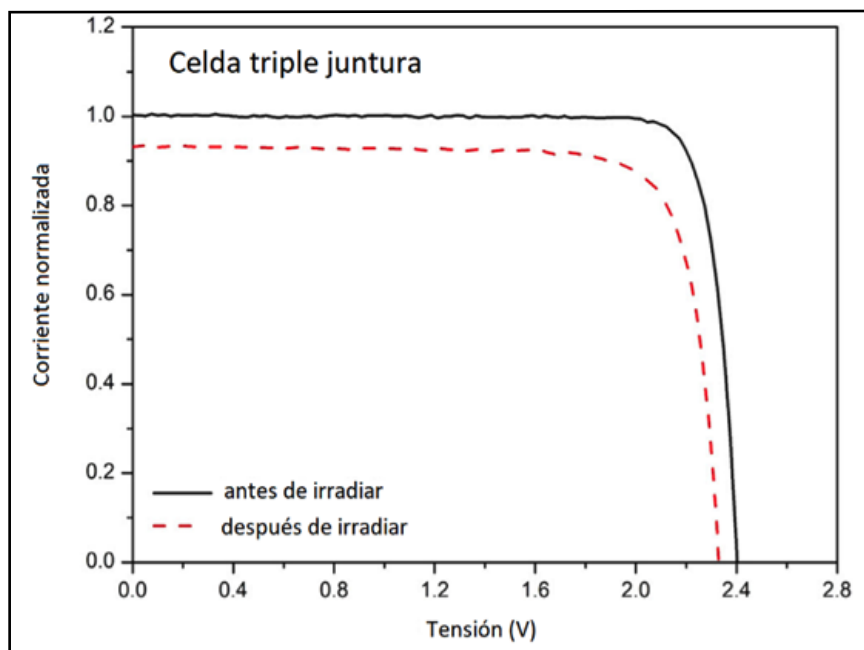


Figura 20. Degradación de los parámetros eléctricos de una celda solar de triple juntura luego de ser irradiada con 3.76×10^{11} p/cm² protones de 10MeV. Al final de la vida útil (End Of Life) la generación de potencia cae un poco más del 10% con respecto a su valor BOL (Beginning Of Life). El dispositivo ensayado es una celda de triple juntura desarrollada en laboratorio.

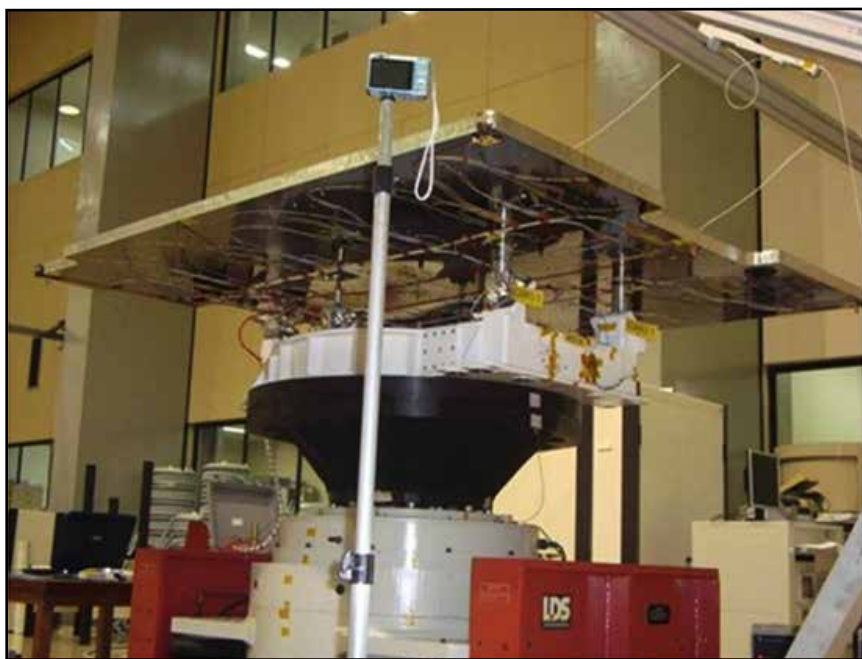


Figura 21. Panel solar del SAC-D montado sobre un "shaker" para ensayos de vibraciones en el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE-Brasil) en 2010.



Figura 22. Sensor solar de silicio fabricado en el DES-CNEA utilizado en las misiones SAOCOM 1A y 1B y en Aquarius/SAC-D.

misiones SAOCOM los paneles solares poseen 6 sensores gruesos que fueron diseñados y fabricados en uno de los laboratorios del Departamento Energía Solar de la CNEA. En este caso el proceso incluyó la difusión térmica de fósforo sobre una oblea de silicio y la deposición de los contactos metálicos de la cara frontal y posterior [Tamasi et al.].

■ EPÍLOGO

La energía solar fotovoltaica ofrece un amplio campo de trabajo que puede ir desde la investigación básica a la aplicación tecnológica. Si se tiene en cuenta el ámbito de investigación y desarrollo, se pueden explorar los distintos materiales de interés fotovoltaico y las mejoras que se pueden implementar en los dispositivos. Se puso énfasis en la explicación de la fabricación de celdas solares de silicio a nivel laboratorio, pero teniendo en cuenta también que distintos materiales involucran un proceso de fabricación diferente. A nivel laboratorio se puede elegir la propiedad o característica del dis-

positivo a estudiar o simular numéricamente. A este nivel puede o no ser necesario tener en cuenta si la aplicación de la celda solar va a ser terrestre o espacial.

Puede ocurrir que la necesidad de estudiar celdas o paneles solares surja a partir de una necesidad concreta tecnológica. Tal es el caso de las Misiones Satelitales Argentinas.

Con el objeto de disponer en el país de las herramientas de diseño, fabricación, caracterización y ensayo de paneles solares para las misiones satelitales del Plan Espacial Nacional, la CNEA comenzó en el año 2001 una estrecha colaboración con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Como resultado, en el Departamento Energía Solar (DES) del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA se pudieron fabricar los paneles solares de las misiones SAC-D, SAOCOM 1A y 1B. Estos paneles son diseñados para satisfacer la demanda de energía eléctrica del satélite y de todos sus subsistemas.

Las descripciones realizadas en el trabajo, permiten una recorrida por el Laboratorio de Integración de Paneles Solares Espaciales de ese departamento, un área limpia con temperatura y humedad controladas de 220m² de superficie clasificada como ISO7 ó clase 10.000, en la que se lleva a cabo la integración de los modelos de vuelo.

Por otra parte, también presentan los ensayos realizados en tierra, bajo condiciones controladas y normalizadas, que permiten conocer la resistencia de los dispositivos al ambiente espacial y predecir su comportamiento al final de su vida útil. Estos ensayos ambientales a los que han sido sometidos los componentes de nuestros satélites son los de ciclado térmico y vacío dado que la ausencia de atmósfera en el espacio ocasionan temperaturas extremas. Un apoyo particular con que cuenta el Laboratorio de Integración de Paneles Solares Espaciales lo da el acelerador de iones pesados "Tandar" del CAC que permite realizar ensayos de daño por radiación en celdas y componentes electrónicos. En particular, una línea de trabajo del Tandar cuenta con un haz de protones que permite recrear la importante cuota de la radiación de partículas provenientes del sol, protones de distintas energías y la fluencia del ensayo puede igualarse a la que recibiría en órbita el panel solar a lo largo de los cinco años de vida útil de la misión. Por otra parte, dado que durante el lanzamiento del vehículo espacial se producen enormes ondas vibratorias y presiones acústicas dentro del mismo, es indispensable someter a los paneles y al satélite a ensayos de vibraciones y acústicos a fin de garantizar su supervivencia al shock recibido durante la etapa de despegue y puesta en órbita.

Estudios en el laboratorio de las

celdas, integración de los paneles y ensayos ambientales de estos, son tres etapas indispensables para garantizar el éxito de conversión fotovoltaica.

■ REFERENCIAS

- Alurralde et. al. (2010) Integración y ensayos de los paneles solares de vuelo para la misión satelital aquarius/sac-d. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 14, 04.49. ISSN 0329-5184.
- Barrera M., Plá J., Rubineli F. (2007) Simulación numérica de celdas solares de GaAs. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11, 04.85.
- Barrera M., Rubinelli F., Rey-Stolle I., Plá J. (2012) Numerical simulation of Ge solar cells using D-AMPS-1D code. *Physica B* 407, 3282.
- Basore P.A., Cabanas-Holmen K. (2011) PC2D: A Circular-Reference Spreadsheet Solar Cell Device Simulator. *IEEE Journal of Photovoltaics* 1, 72.
- Bruton T.M. (2002) General trends about photovoltaics based on crystalline silicon. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 72, 3.
- Chapin D.M., Fuller C.S., Pearson G.L. (1954) A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics* 25, 676.
- Choe K.S. (2014) Parametric simulation of the back-surface field effect in the silicon solar cell. *Solid State Sciences* 29, 48.
- ESA (European Space Agency) (2004) *Space engineering - Photovoltaic assemblies and components*, document ECSS-E-20-08A.
- Goetzberger A.G., Luther J., Willeke G. (2002) Solar cells: past, present, future. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 74, 1.
- Gray J., Wang X., Vamsi R., Chavali K., Sun X., Kanti A., Wilcox J.R. (2015) Adept 2.1 disponible en doi:10.4231/D39S1KM3S.
- Green M.A. (1986) *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System applications*. University of New South Wales.
- Green M.A., Dunlop E.D., Levi D.H., Ebinger J.H., Yoshita M., Ho-Baillie A.W.Y. (2019) Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics* 27, 565.
- Grossi Gallegos H. (2004) "Notas sobre radiación solar". Universidad Nacional de Luján - Departamento de Ciencias Básicas.
- NREL <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Ibarra M. L. et.al. (2019) E.D.R.A., the Argentine facility to simulate radiation damage in space. *Radiation Physics and Chemistry* 154, 79–84.
- Luque A. y Hegedus S. editors (2011) *Handbook of photovoltaics*, John Wiley & Sons, Second Edition.
- McElheney P.J., Arch J.K, Lin H.S., Fonash S.J. (1988) Range of validity of the surface-photovoltage diffusion length measurement: A computer simulation. *Journal of Applied Physics* 64, 1254.
- Michael S., Bates A.D., Green M.S. (2005) Silvaco ATLAS as a solar cell modeling tool. Published in: *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 719.
- NASA (2004) *Solar Array Design, Development, and Evaluation for In House Spacecraft*, Directive N° 563-PG-8700.2.2A. *Procedures and Guidelines*.
- Norma i-v (2015) Norma IRAM 210013-2.
- Norma RE (2000) Norma IRAM 210013-12.
- Pieters B.E., Krc J., Zeman M. (2006) *Advanced Numerical Simulation Tool for Solar Cells - ASA5*. IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, 1513.
- Sze S.M. (1985) *Semiconductor devices. Physics and Technology*. John Wiley & Sons.
- Sinton R., Cuevas A. (1996) Contactless determination of current-voltage characteristics and minority carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data. *Applied Physics Letter* 69, 2510.
- Stan M.A., Sharps P.R., Fatemi N.S., Spadafora F., Aken D., Hou H.Q. (2000) Design and production of extremely radiation-hard 26% InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells. *Proceedings of 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1374.
- Tamasi M., Martínez Bogado M., Bolzi C., Prario I., Alurralde M. (2009). *Sensores fotovoltaicos para la misión satelital AQUARIUS-SAC-D: desarrollo y ensayos ambientales*. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 23, 19-25.
- Vukadinovic M., Krc J., Brecl K., Smole F., Topic M. (2003) Mode-

lling and simulation of optoelectronic devices with ASPIN. The IEEE Region 8 EUROCON 2003. Computer as a Tool, Ljubljana, Slovenia, 474.

Wenham S.R., Green M.A., Watt M.E. (1995) Applied photovoltaics. University of New South Wales.

■ GLOSARIO

[1] Diodo: es un dispositivo semiconductor que permite que la elec-

tricidad circule en un solo sentido. Consiste en la unión de dos regiones con características electrónicamente distintas (n y p).

[2] Dieléctrico: es un mal conductor de la electricidad.

[3] Kovar: es una aleación compuesta por hierro, níquel y cobalto diseñada para ser compatible con las características de dilatación térmica del vidrio.

[4] Laminado: proceso industrial por medio del cual se reduce el espesor de una lámina de metal o de materiales semejantes con la aplicación de presión.

[5] Kapton: es una película de polímero desarrollada por la empresa DuPont que se mantiene estable en un amplio rango de temperaturas. Se utiliza, entre otras cosas, en electrónica flexible y aplicaciones en satélites o naves espaciales.