



# **Celdas solares para usos espaciales nivel laboratorio hacia la transferencia de tecnología**

Simón Saint-André – INN CONICET, Departamento Energía Solar – CNEA

Javier Garcia - Departamento Energía Solar – CNEA

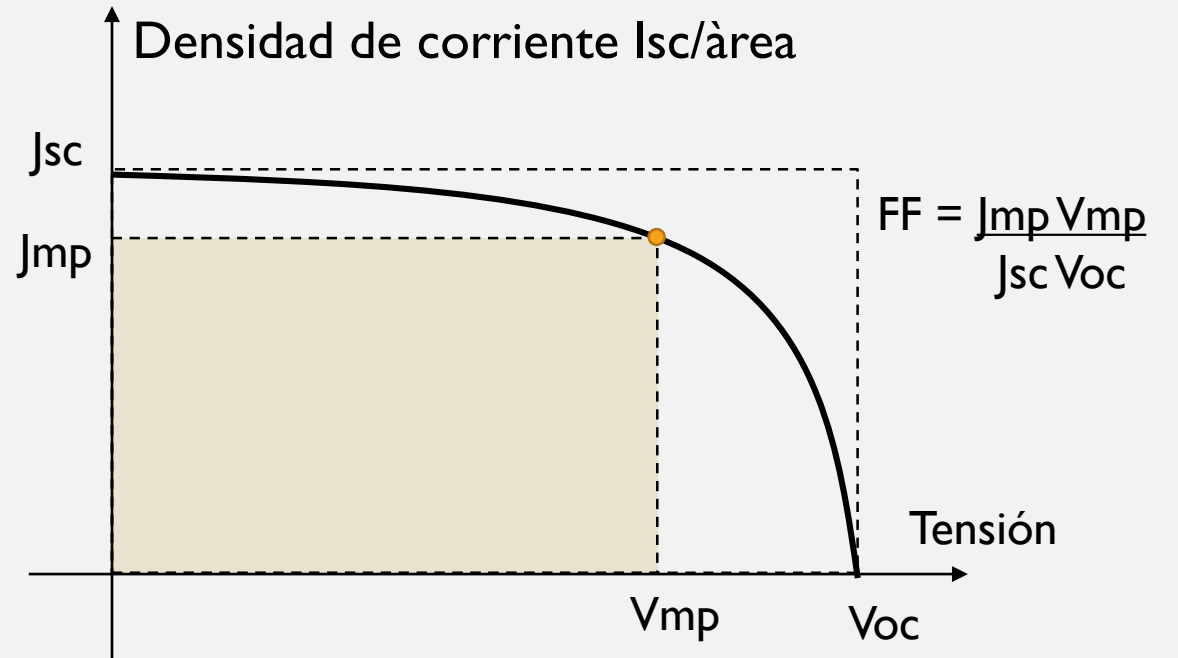
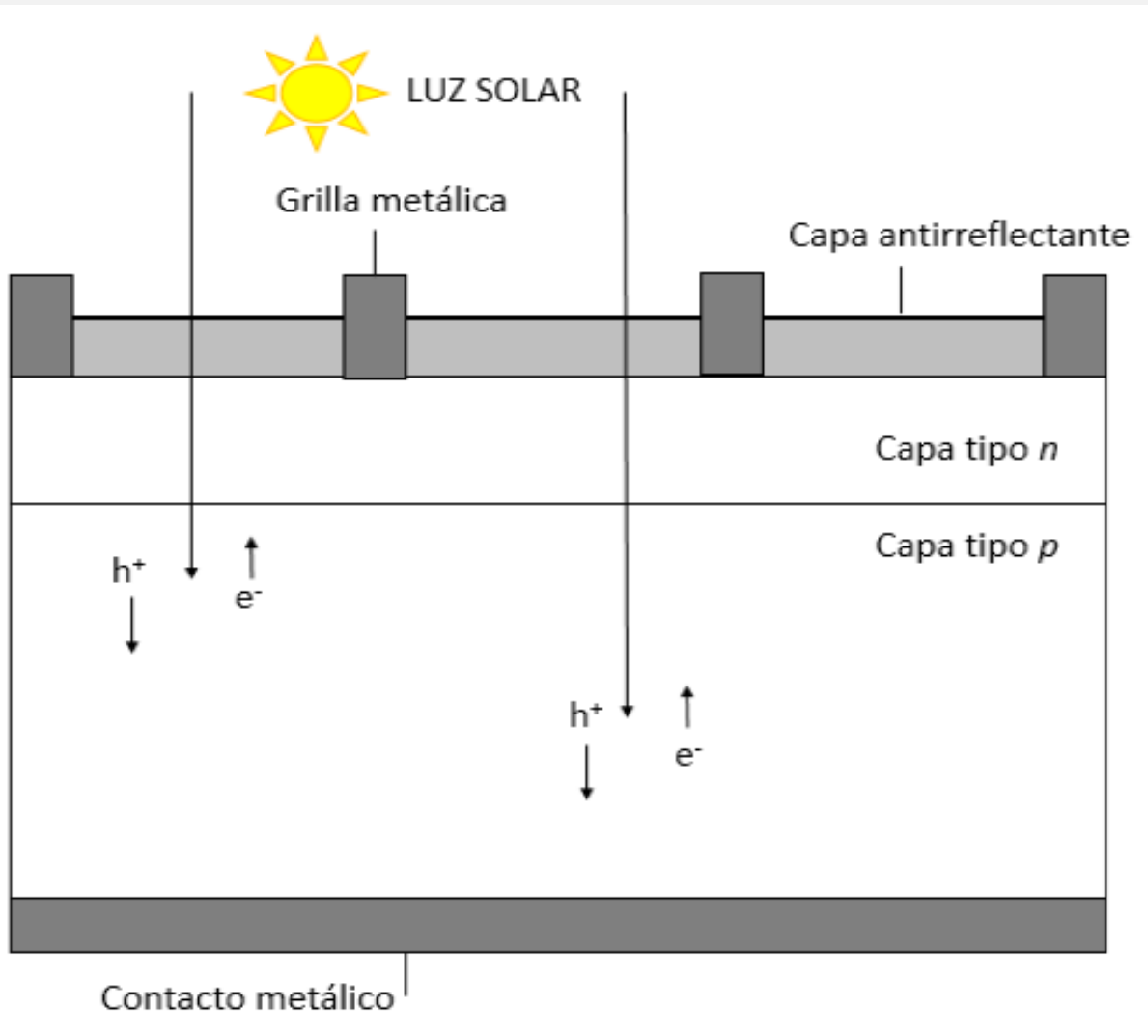
Marcela Barrera - INN CONICET, Departamento Energía Solar – CNEA

# Resumen

Las celdas solares basadas en semiconductores III-V poseen una eficiencia que, en el caso de multijunturas, supera el 30%. Resulta de importancia entonces diseñar y estudiar celdas solares basadas en semiconductores III-V y Ge así como también estudiar sus propiedades físicas y comportamiento eléctrico. Se presentan algunos resultados obtenidos en los últimos años en cuanto al estudio de películas antirreflectantes, simulación numérica de dispositivos y primeros pasos en la fabricación. Todo el trabajo tiene como finalidad lograr un aprendizaje que conduzca hacia la transferencia de tecnología de celdas y paneles solares para satélites a nivel regional. Como ejemplo se muestran algunas aplicaciones del uso de los dispositivos en pequeños satélites surgidas de la vinculación tecnológica con una *start up* del sector espacial.

**Contacto:** [saintand@tandar.cnea.gov.ar](mailto:saintand@tandar.cnea.gov.ar), [jgarcia@tandar.cnea.gov.ar](mailto:jgarcia@tandar.cnea.gov.ar),  
[barrera@tandar.cnea.gov.ar](mailto:barrera@tandar.cnea.gov.ar)

# Funcionamiento de una celda solar



$$\text{Eficiencia: } \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}}$$

## **Materiales apropiados**

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. Además, tanto el diseño del dispositivo como los materiales empleados dependen fuertemente de la aplicación, por ejemplo si se emplea en satélites se tendrá en cuenta la órbita. En el caso de misiones interplanetarias se tendrán en cuenta las condiciones ambientales, como por ejemplo la temperatura.

Son importantes también los materiales empleados en la película antirreflectante (AR) y en los contactos eléctricos.

# Materiales empleados en celdas solares y eficiencias

Classification	Efficiency (%)	Area (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	Fill factor (%)	Test centre (date)	Description
<i>Silicon</i>							
Si (crystalline cell)	26.7 ± 0.5	79.0 (da)	0.738	42.65 <sup>a</sup>	84.9	AIST (3/17)	Kaneka, n-type rear IBC <sup>3</sup>
<i>III-V multi-junctions</i>							
Five-junction cell (bonded)	38.8 ± 1.2	1.021 (ap)	4.767	9.564	85.2	NREL (7/13)	Spectrolab, two-terminal <sup>38</sup>
(2.17/1.68/1.40/1.06/.73 eV)							
InGaP/GaAs/InGaAs	37.9 ± 1.2	1.047 (ap)	3.065	14.27 <sup>a</sup>	86.7	AIST (2/13)	Sharp, two-terminal <sup>39</sup>
GaInP/GaAs (monolithic)	32.8 ± 1.4	1.000 (ap)	2.568	14.56 <sup>b</sup>	87.7	NREL (9/17)	LG Electronics, two-terminal
<i>Multi-junctions with c-Si</i>							
GaInP/GaAs/Si (mech. stack)	35.9 ± 0.5 <sup>c</sup>	1.002 (da)	2.52/0.681	13.6/11.0	87.5/78.5	NREL (2/17)	NREL/CSEM/EPFL, four-terminal <sup>40</sup>

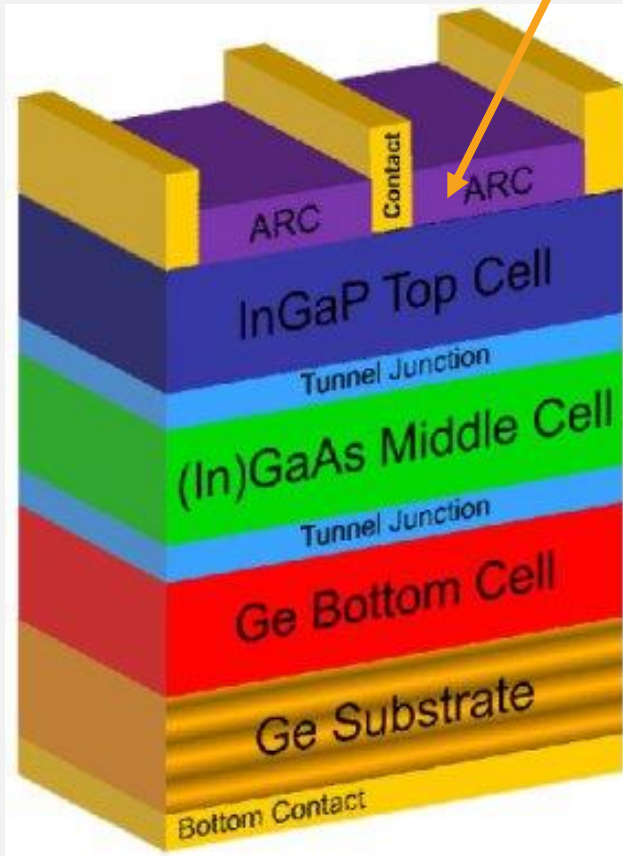
global AM1.5 spectrum (1000 W/m<sup>2</sup>) at 25°C

Progress in Photovoltaics Research and Applications 65 (2021) 657-667. *Solar cell efficiency tables (version 58)* Martin A. Green et al.

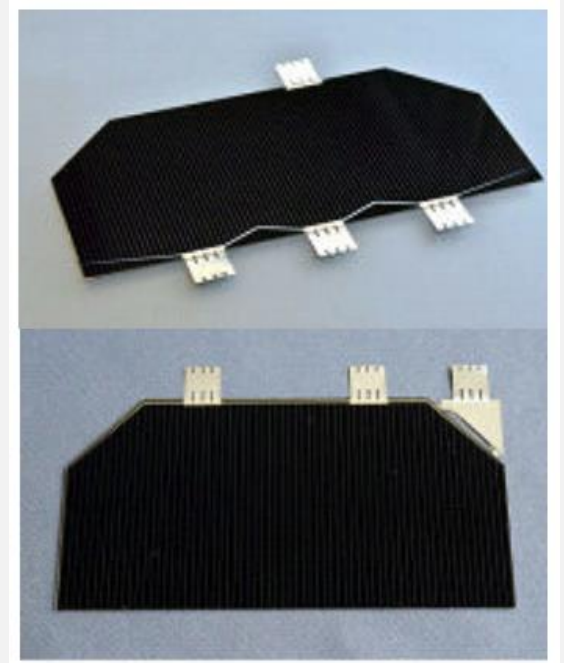
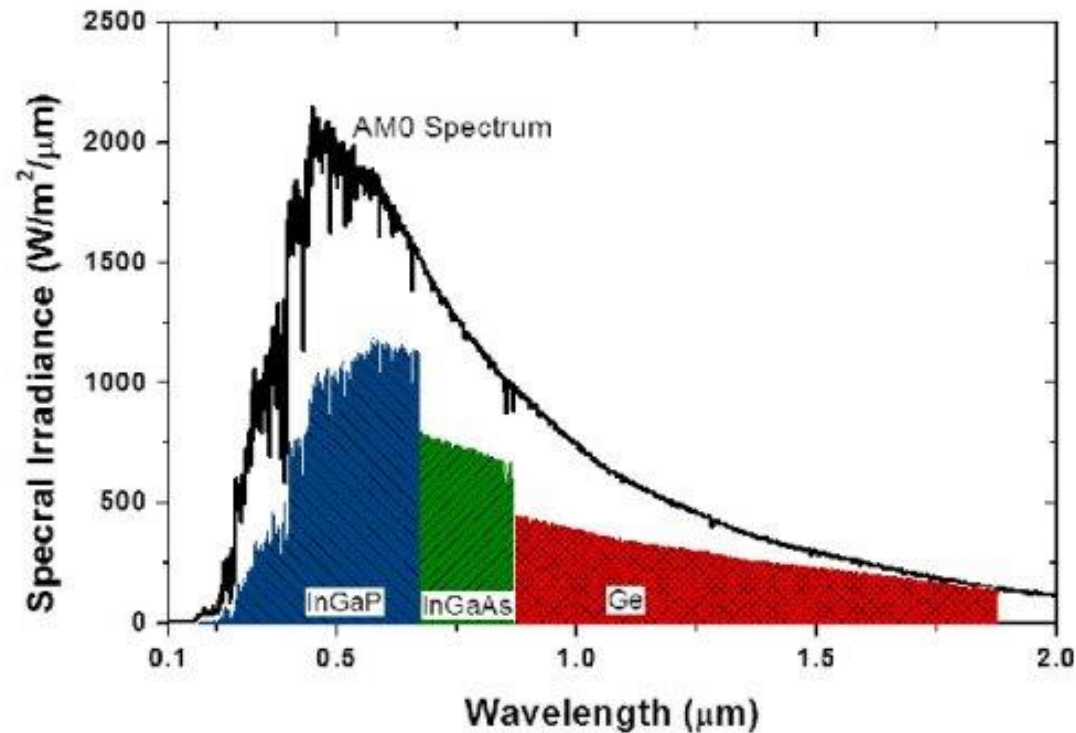
# Aplicaciones espaciales

- Celdas multijuntura (3J) basadas en semiconductores III-V, con sustrato de Ge
- Eficiencia de ~30%

Película antirreflectante  
(Antireflective Coating, ARC)



## Espectro solar



Celdas Triple Juntura

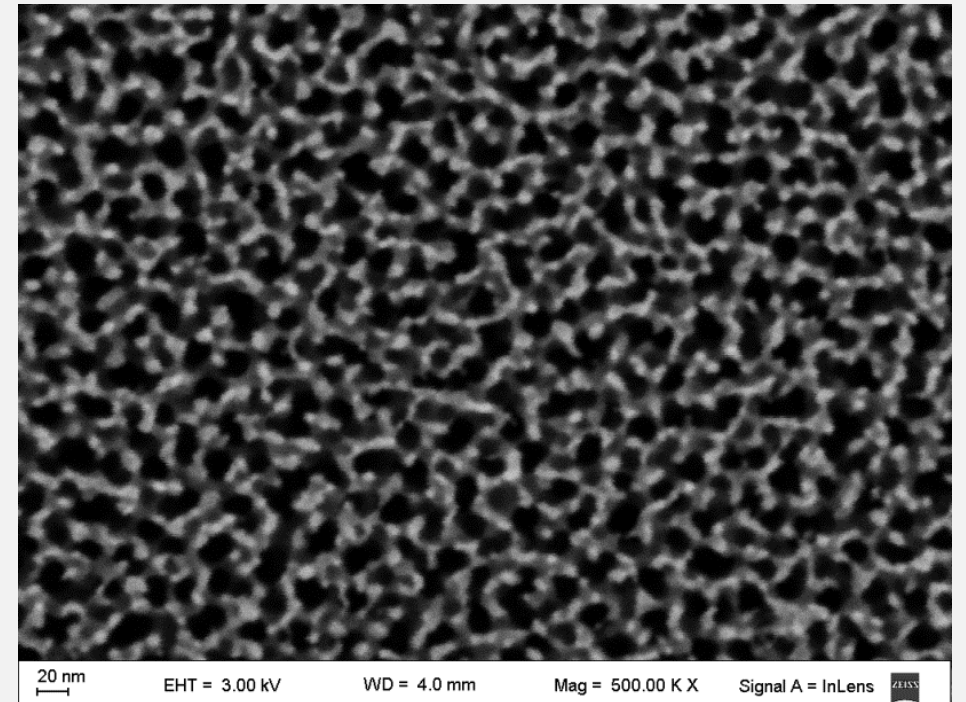
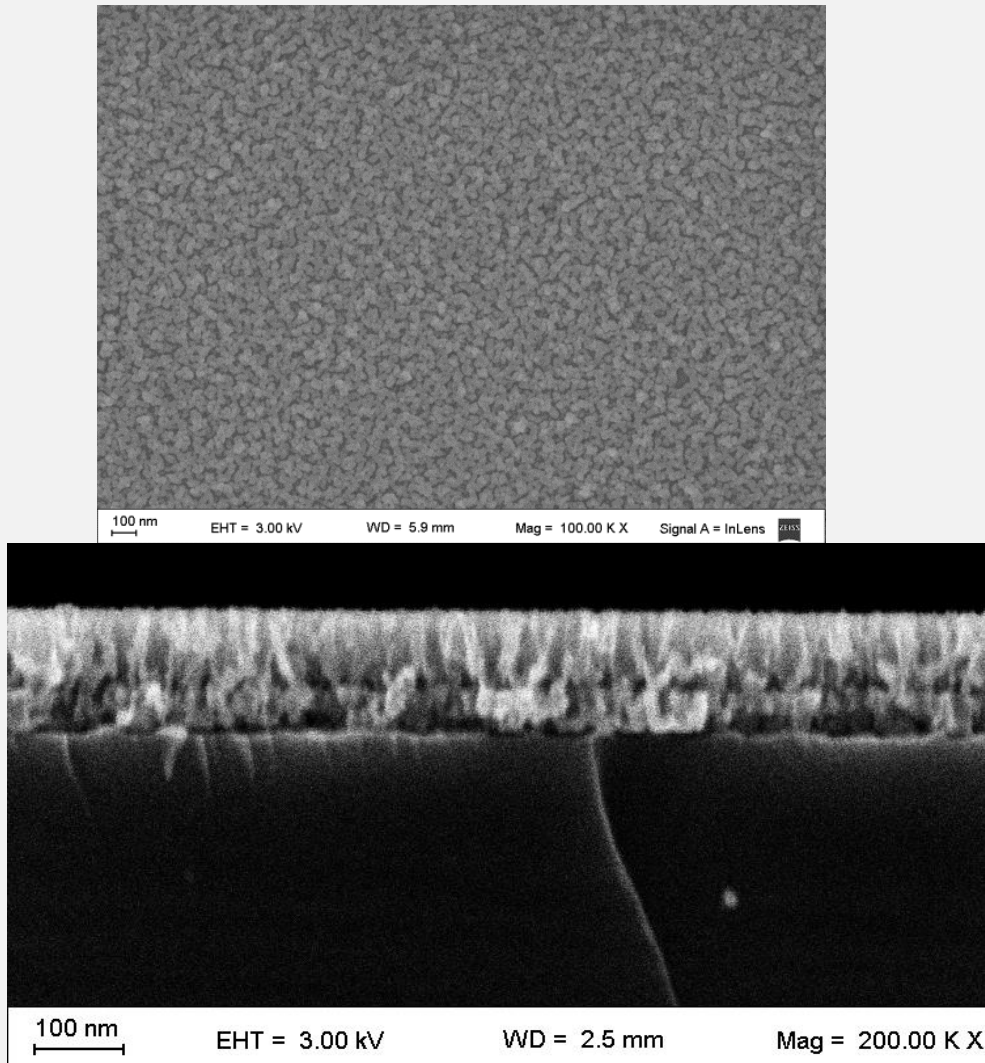
# Películas Antirreflectantes (AR)

- Se utilizan en celdas solares de distintas tecnologías, entre ellas celdas solares de Si y celdas solares III-V. En aplicaciones terrestres y **espaciales**.
- Se utilizan para disminuir la alta reflectividad de los semiconductores ( 30% aprox. en Si y en GaAs)
- Una forma de incrementar la eficiencia de los dispositivos es disminuyendo la reflectividad
- Técnicas AR:
  - depósito de capas dieléctricas: materiales transparentes de índice intermedio entre vidrio y el semiconductor: ZnS, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> nanoestructurado
  - textura superficial: ataques químicos anisótropos
  - textura + capa AR

# Experiencia en depósito de nanotubos de $\text{TiO}_2$

Fabricación: 80 nm de Ti mediante *e-beam* sobre Si y GaAs seguido de anodizado electroquímico y recocido térmico [1].

1806-2

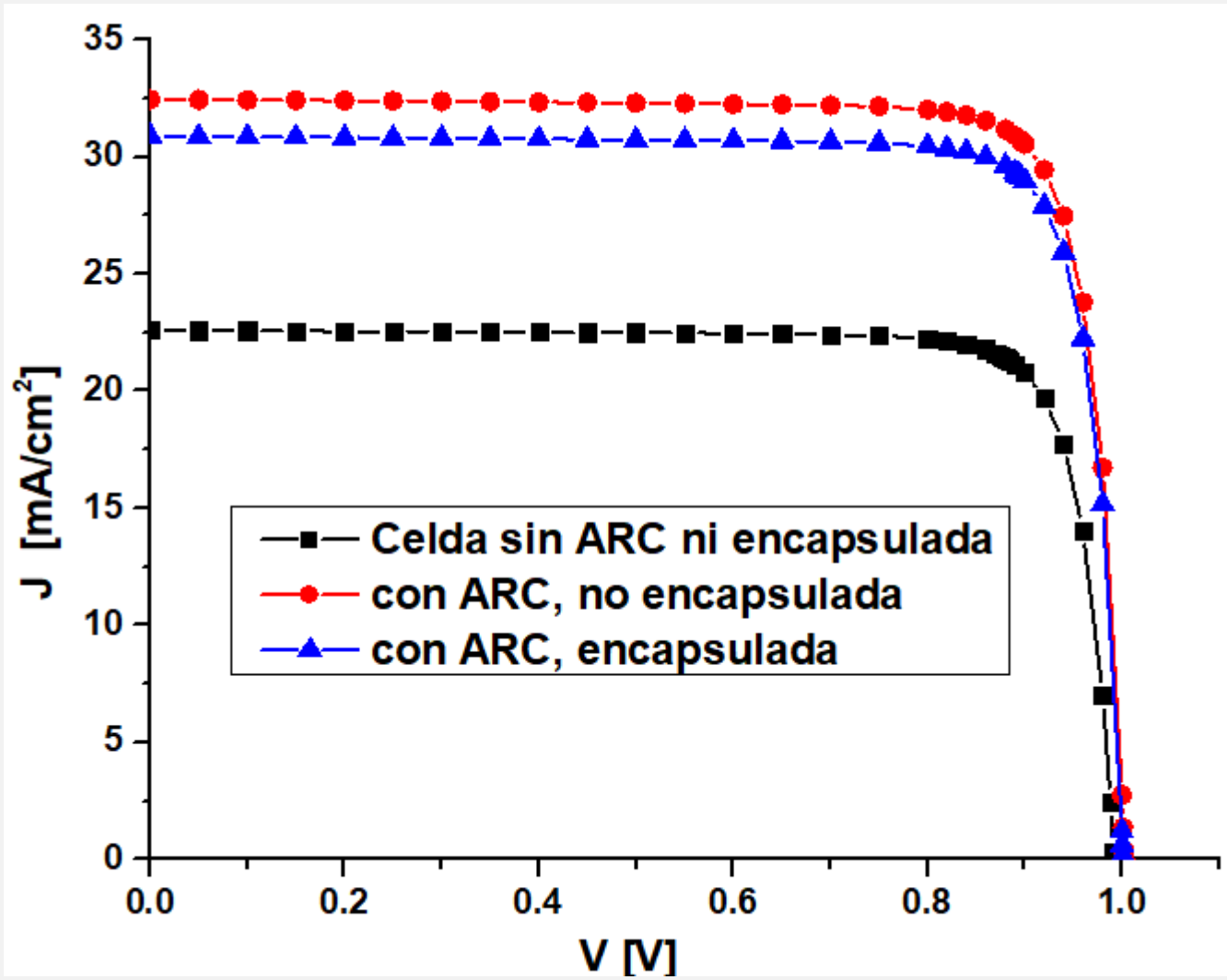


Espesores medidos por SEM:

Película superior  $86 \pm 3$  nm

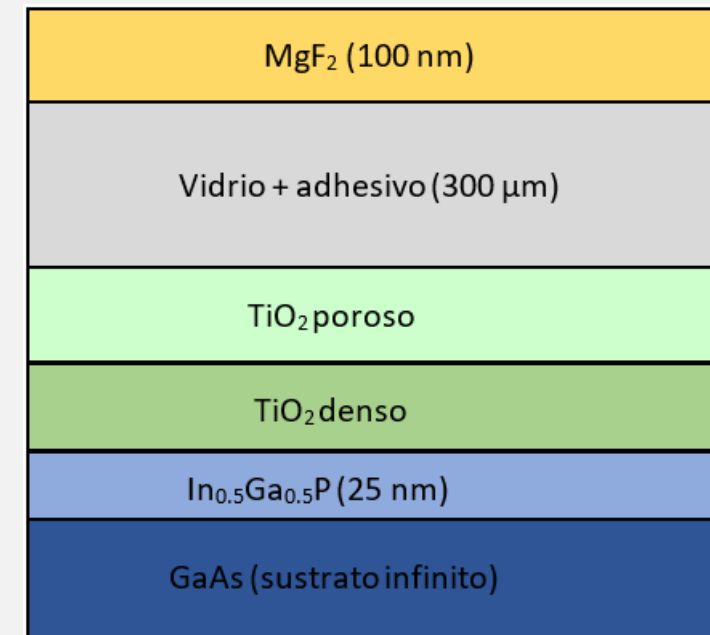
Película inferior  $52 \pm 3$  nm

# Simulación numérica de la celda solar



Curva J-V simulada, un Sol (AM0) 1366 W/m<sup>2</sup>.

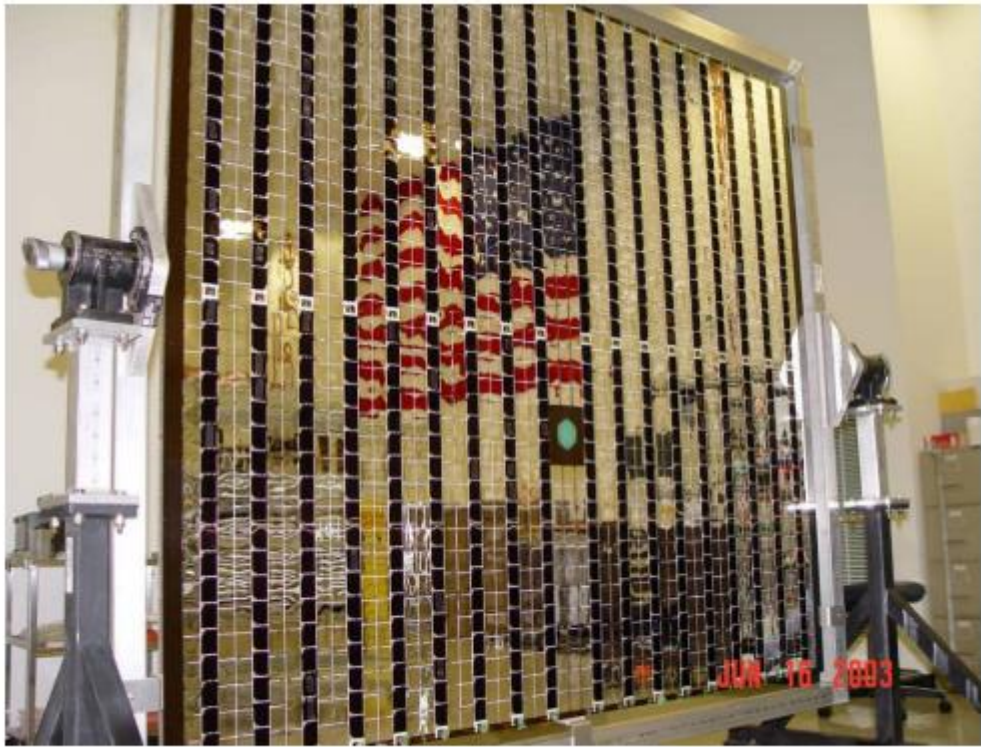
Se simuló numéricamente el dispositivo con el código D-AMPS-1D (*Analysis of Microelectronic and Photonic Devices, New Developments, One dimensional*) [2].



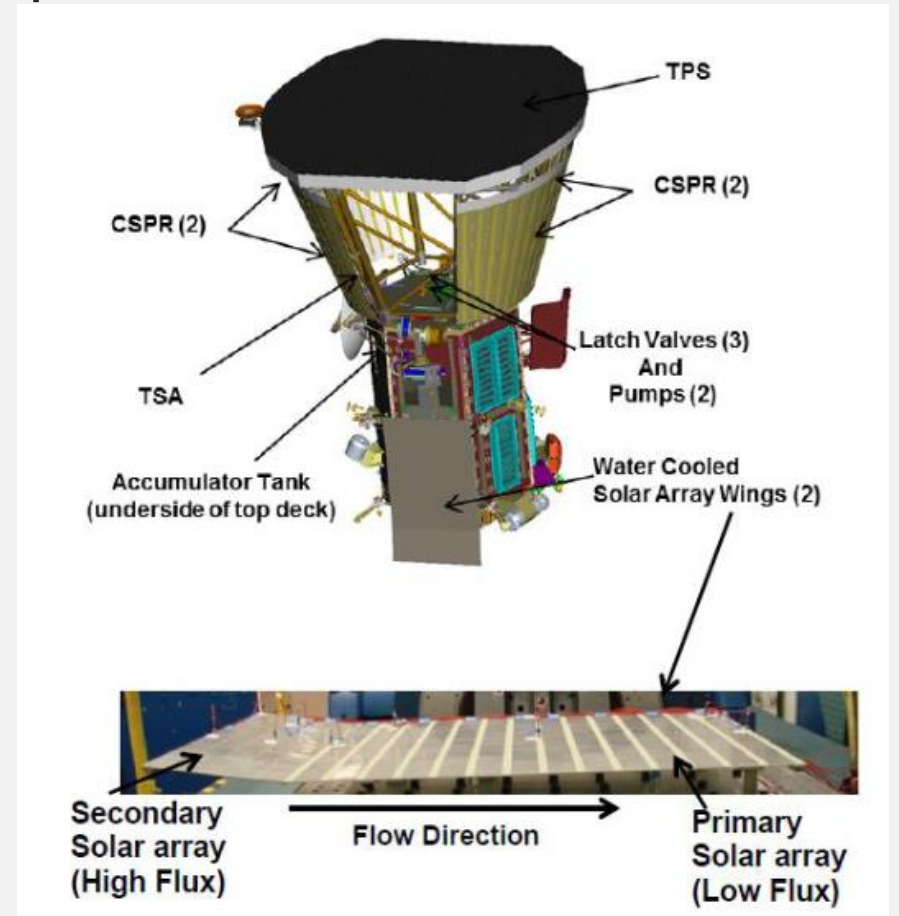
Estructura considerada para las simulaciones

# Misiones espaciales cercanas al Sol

Las altas temperaturas son un problema en el espacio en particular, porque los sistemas de disipación agregan peso y aumentan los costos de la misión. En misiones cercanas al sol pueden ser una parte importante del sistema fotovoltaico.

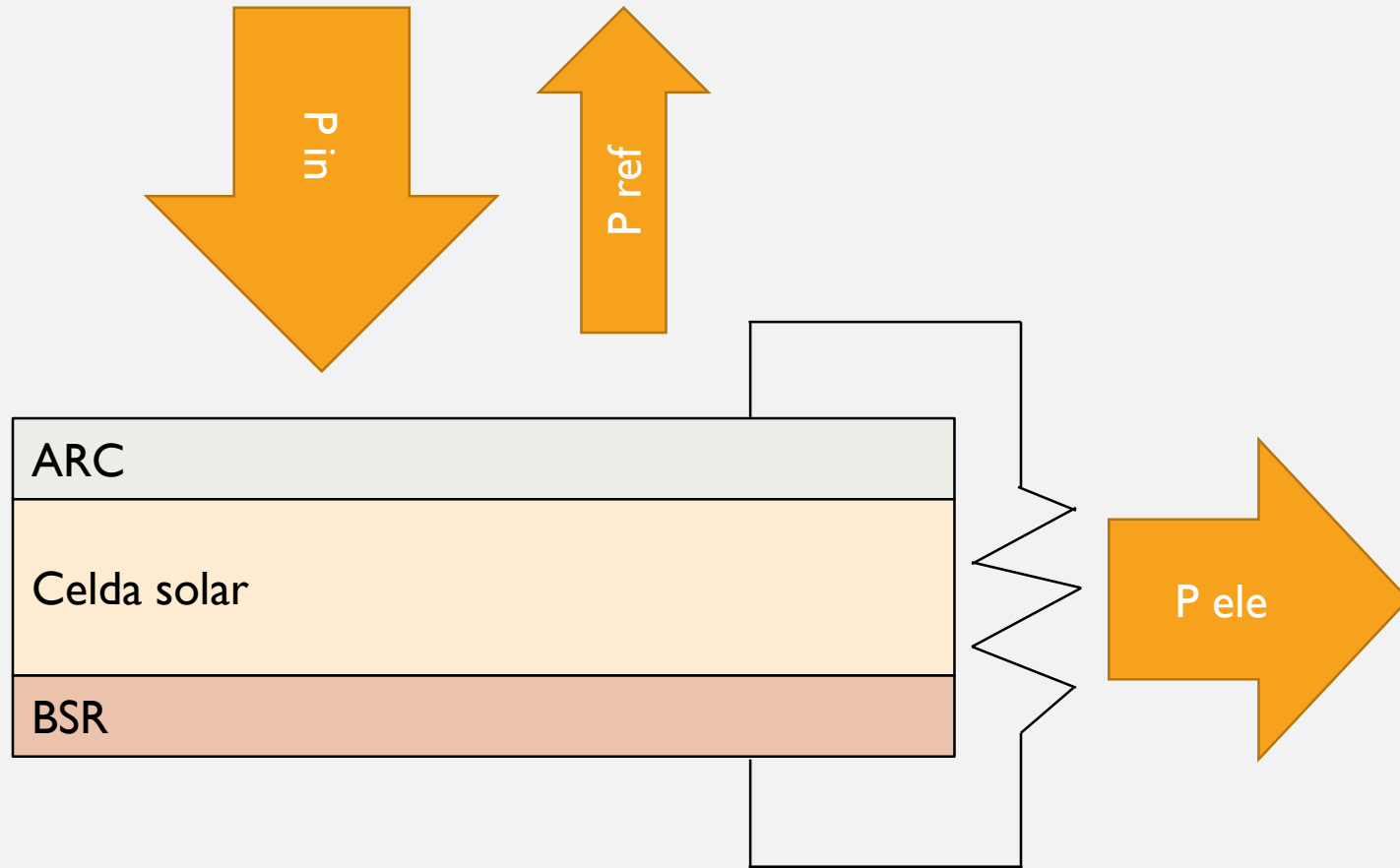


Misión Messenger



Misión Parker Solar Probe

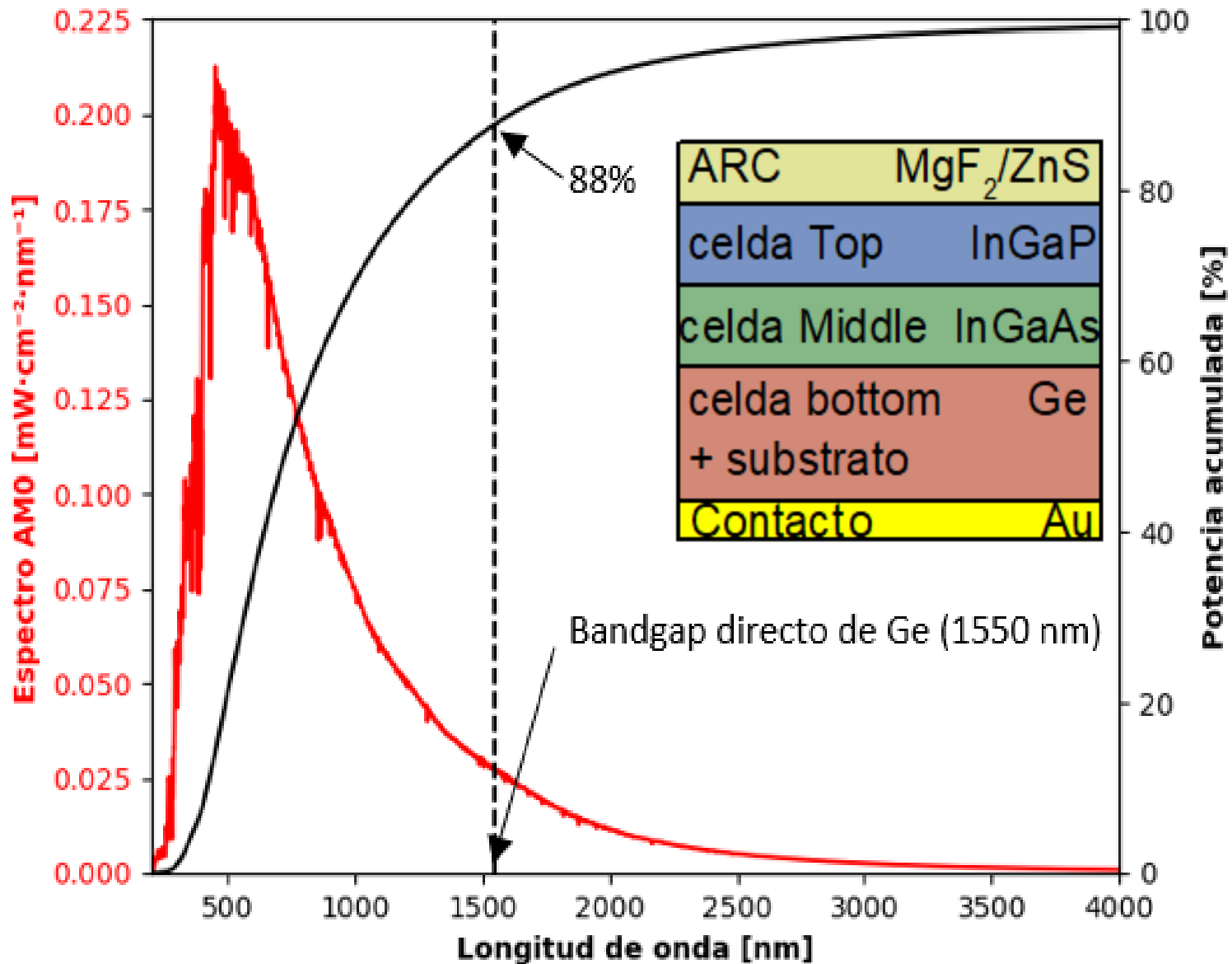
## Desarrollo teórico. Carga térmica



La potencia incidente que no es reflejada ni extraída como electricidad, contribuye a calentar la celda.

Aumentar la reflectividad en la región del espectro que no genera electricidad contribuye a disminuir la carga térmica de la celda. Esto se logra mediante un buen reflector en la cara posterior (BSR) [3].

$$P_{in} = P_{ele} + P_{ref} + \text{Carga térmica}$$



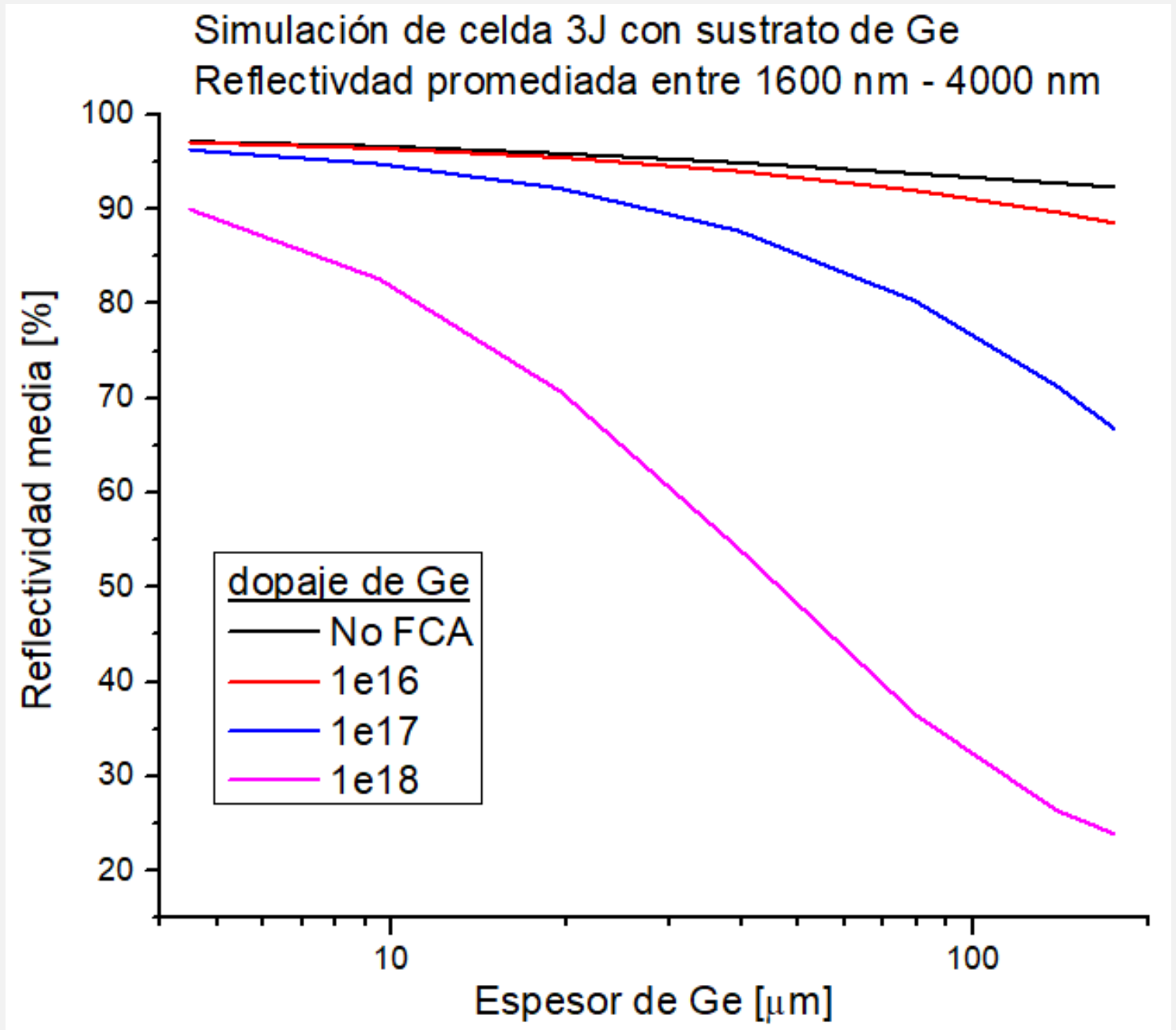
12% de la energía del solar disponible en el espacio no contribuye a la generación de energía eléctrica. Sin embargo, en gran parte es absorbida en el Ge y contribuye a calentar la celda. Lograr un buen espejo en la cara posterior y adelgazar el sustrato ayudan a disminuir la absorción de radiación IR de longitudes mayores al bandgap de Ge.

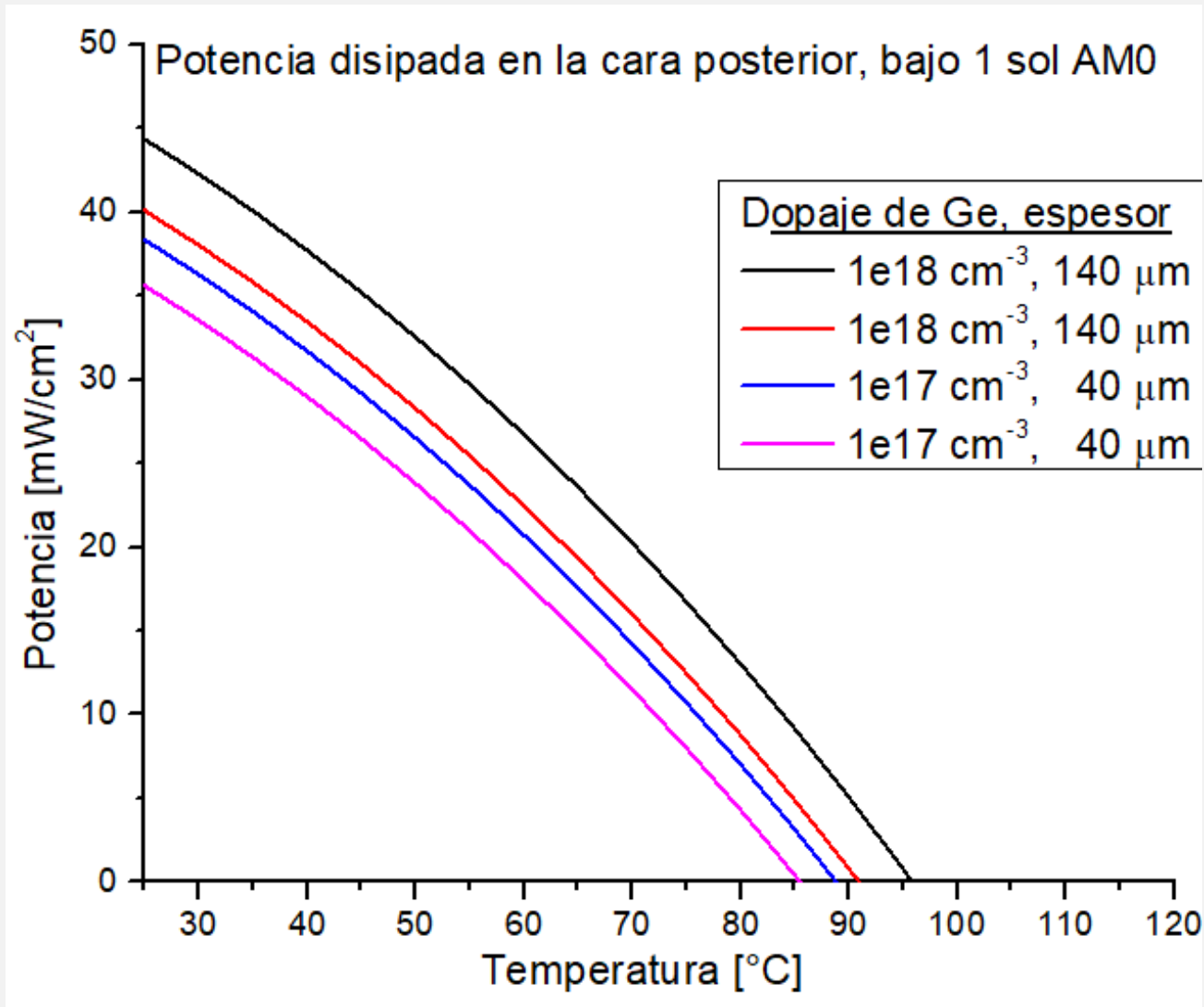
# Simulación numérica de celdas solares con BSR

La absorción en el Ge para longitudes mayores al bandgap (1550 nm) está dominada por la absorción por portadores libres (FCA), que depende fuertemente del dopaje, y del espesor.

Adelgazar la oblea de Ge trae otras ventajas, como disminuir el peso de la celda.

Se simularon las propiedades ópticas de celdas con distintos dopajes y espesores de Ge.



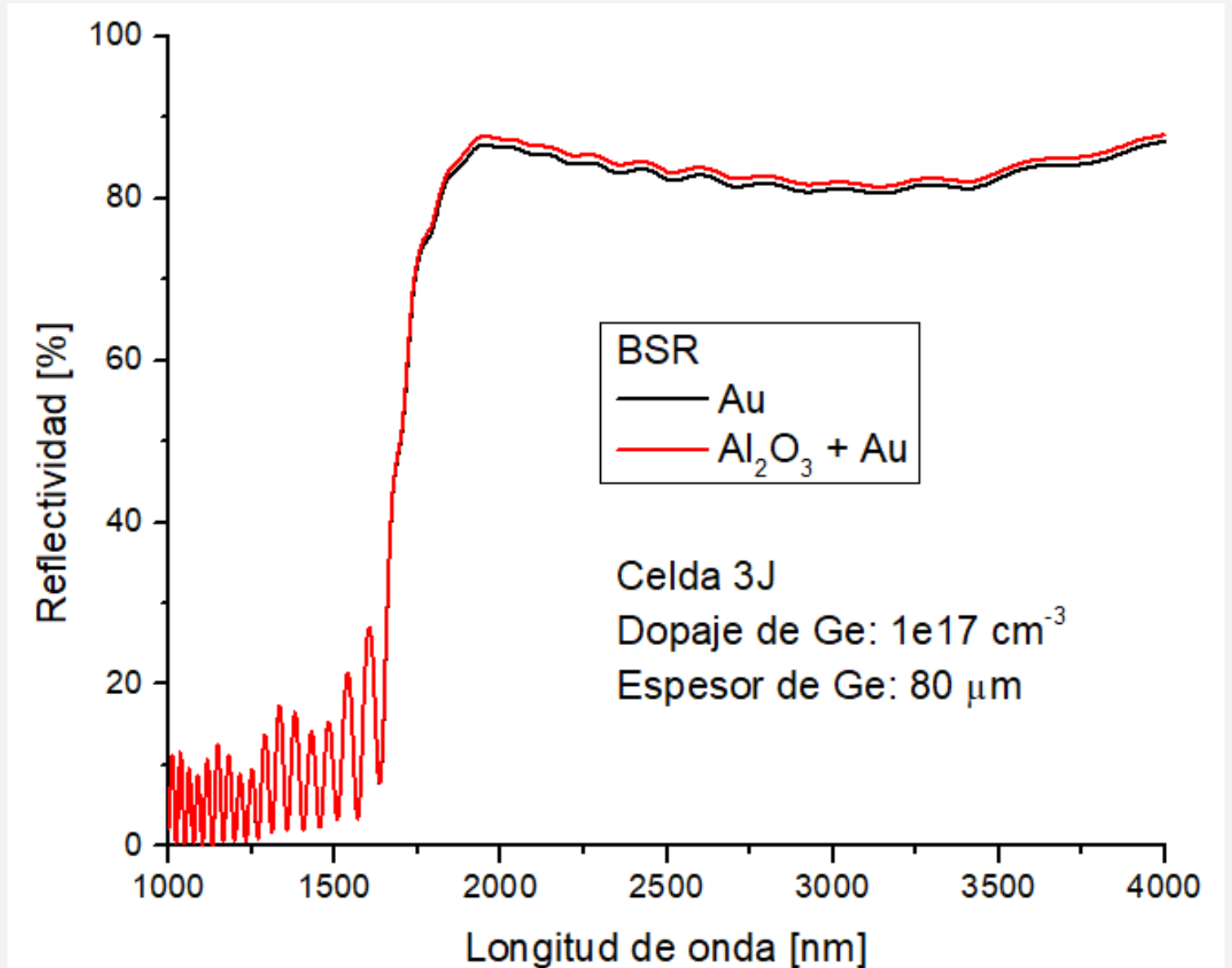


Las celdas con menor dopaje y/o espesor en el Ge presentan menor carga térmica y requieren menor disipación para mantenerse a una temperatura de operación dada.

Para una potencia de disipación fija, las celdas estudiadas operan entre 5°C y 20°C más frías que el caso convencional, lo que se traduce en mejoras en la eficiencia entre 3% y 6%.

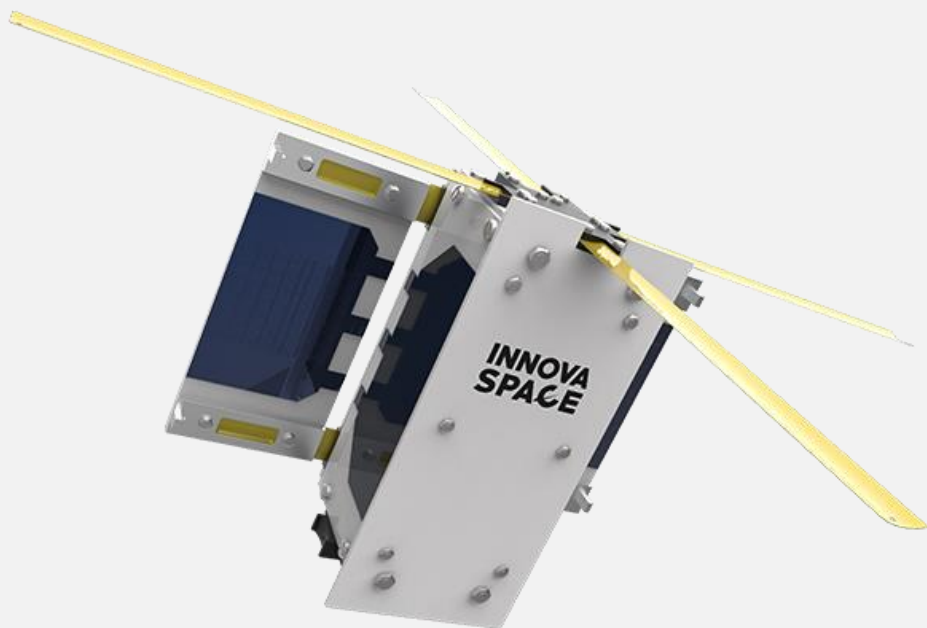
Un aspecto importante para garantizar una buena reflectividad es tener una baja rugosidad en la cara posterior de la celda, ya que las simulaciones realizadas asumen interfaces planas entre los distintos materiales.

A nivel experimental, es necesario medir la reflectividad de obleas de Ge de distintos espesores y dopajes, y corroborar el aumento en la reflectividad con la incorporación del BSR.



## Desarrollo, transferencia y vinculación tecnológica

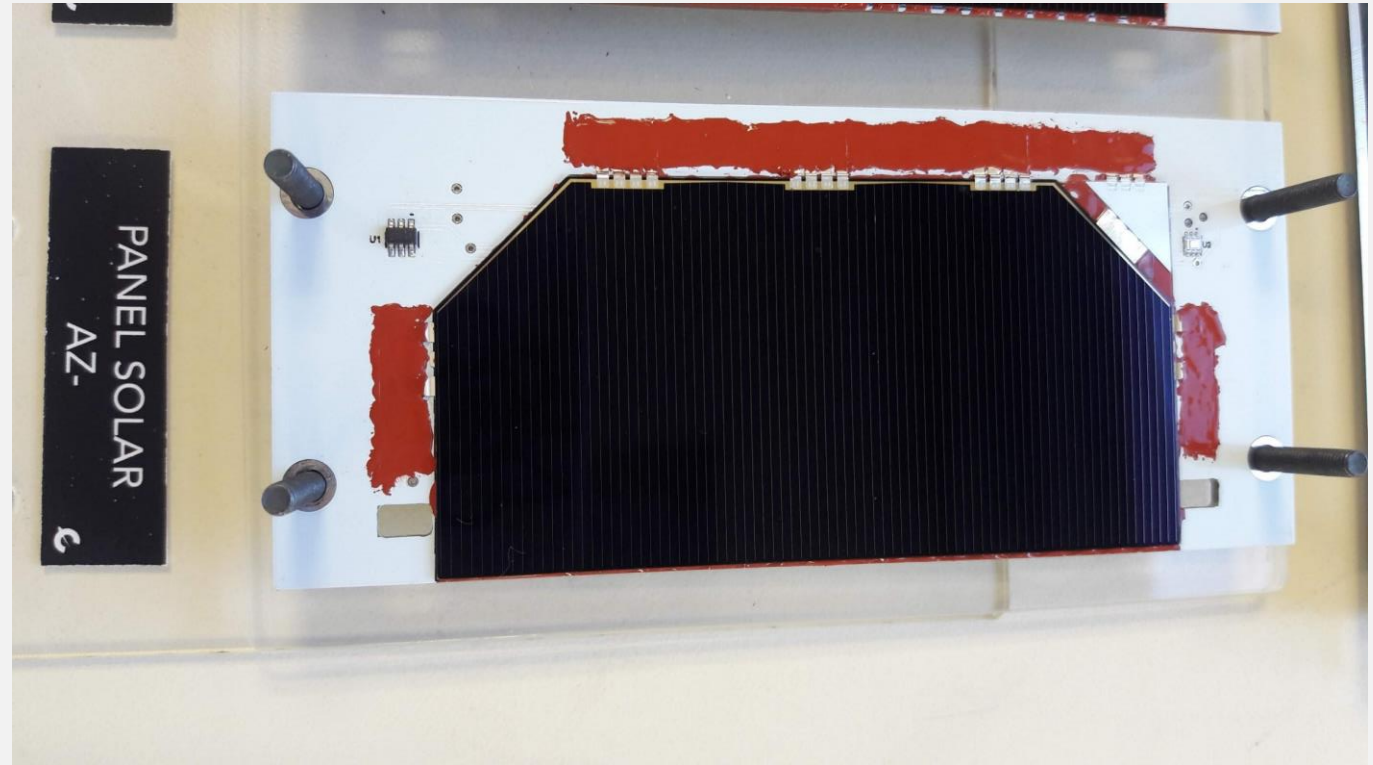
La *startup* marplatense Innova Space y el Departamento Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica (DES-CNEA), celebraron dos contratos de Tecnología y Servicios (asistencia tecnológica). El objetivo fue diseñar y fabricar los paneles solares de los dos primeros pico-satélites (satélites de menos de 1 kg de masa) de la empresa.



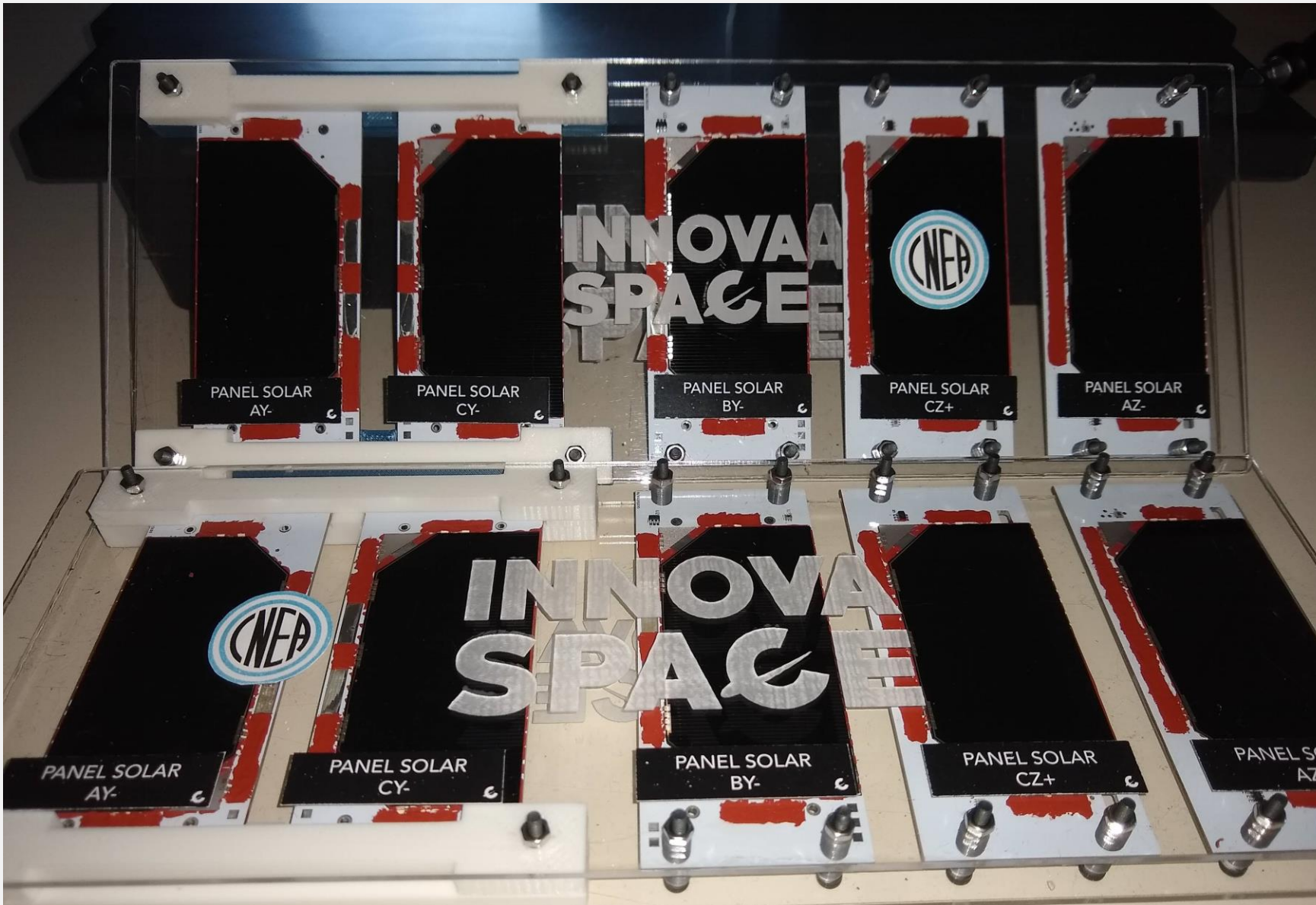
El primero de estos pico-satélites, llamado MDQubeSAT-1, será lanzado a fin de este año por la compañía SpaceX. El objetivo de Innova Space es diseñar la primera arquitectura satelital IoT (Internet de las cosas) de Sudamérica y América Latina de bajo costo y alto impacto, con el fin de dar acceso a la comunicación en áreas sin cobertura, especialmente para aplicaciones agrícolas.

Las tareas del DES se centraron, en el diseño de los paneles en conjunto con el personal de la empresa Innova Space.

Posteriormente el personal del DES integró los paneles en área limpia utilizando las técnicas y conocimientos adquiridos previamente en la fabricación de los paneles de las Misiones SAC-D y SAOCOM. Cabe aclarar que las celdas solares utilizadas son comerciales con estructura InGaP-GaAs-Ge.



Uno de los 5 Paneles solares fabricado en DES que será integrado al satélite MDQubeSAT-1



Diez paneles solares terminados para los pico-satelites MDQubeSAT-1 (cinco paneles) y su posible gemelo (cinco paneles) ya colocados en su soporte para traslado e integración al satélite.

El lanzamiento del satélite está previsto para diciembre de 2021.

# Conclusiones

- Se continuará trabajando en investigación en celdas solares para fortalecer el conocimiento sobre los dispositivos y de esta manera poder incrementar las capacidades en transferencia de tecnología.
- Es fundamental el apoyo del sector de I+D+i a las empresas de base tecnológica para su supervivencia y crecimiento. Esto solo se puede lograr mediante políticas eficaces de las instituciones en lo referente a vinculación tecnológica, que permitan dar respuesta rápidas a las solicitudes. Por otro sin personal capacitado e interesado en realizar dicha vinculación entre el sector público y privado las empresas suelen recurrir a soluciones contratadas en el extranjero que conllevan, no solo pérdidas de capital, sino que también en muchos casos incumplimientos de plazos y costos más elevados que adoptando la solución local.
- En lo que se refiere a transferencia y vinculación se continuará colaborando con el sector aeroespacial para fortalecer el ecosistema. Por otro lado se prevé desarrollar un panel solar espacial estándar para cubesats a fin de proveer las universidades y empresas locales y regionales.

# Referencias

- [1] D.F. Rodríguez, P.M. Perillo, M. Barrera, High performance TiO<sub>2</sub> nanotubes antireflection coating, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 71 (2017) 427-432. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mssp.2017.08.037>.
- [2] M. Barrera, F. Rubinelli, I. Rey-Stolle, J. Plá, Numerical simulation of Ge solar cells using D-AMPS-1D code, *Physica B* 407 (2012) 3282-3284. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.12.087>.
- [3] J. F. Geisz *et al.*, “Cell-level thermal management issues in concentrator III-V multijunction solar cells,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 2021–2025, 2010, <https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5616973> .

Este trabajo fue financiado por la CNEA, la ANPCyT a través del Proyecto PICT 2015 N° 1615.

Simón Saint-André fue parcialmente financiado por becas de la ANPCyT , CONICET y la Fundación Carolina.

## **Agradecimientos:**

Se agradece a las personas que trabajaron en la integración de paneles solares del contrato DES - INNOVA SPACE: Javier A. Garcia, Hernán P. Socolovsky, Daniel O. Raggio, Laura P. Gonzalez y Oscar A. Romanelli