

Departamento Energía Solar

Comisión Nacional de Energía Atómica



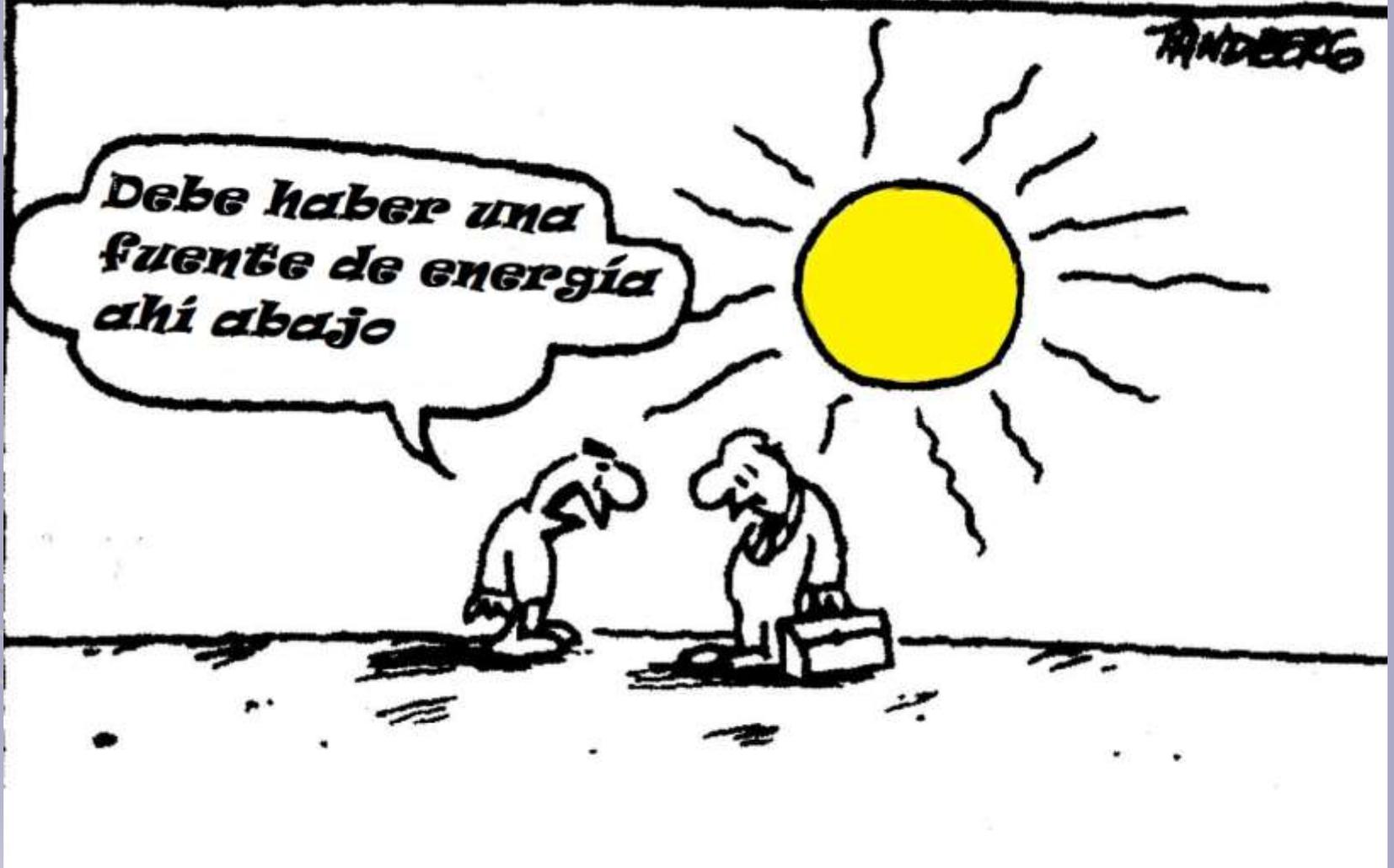
Nuestro Sol, fuente inagotable de energía

Claudio Bolzi (bolzi@tandar.cnea.gov.ar)

Gabriela I. Duran (gduran@tandar.cnea.gov.ar)

Javier A. Garcia (jgarcia@tandar.cnea.gov.ar)

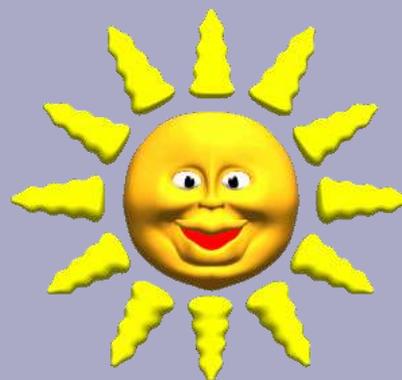
Mónica Martínez Bogado (mbogado@tandar.cnea.gov.ar)



Energía Solar

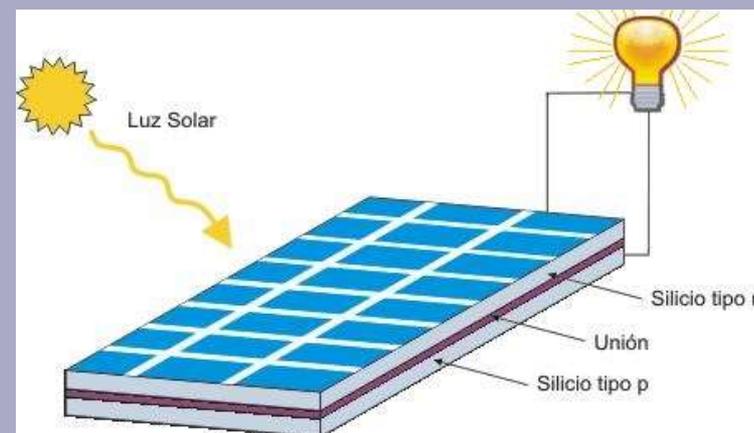
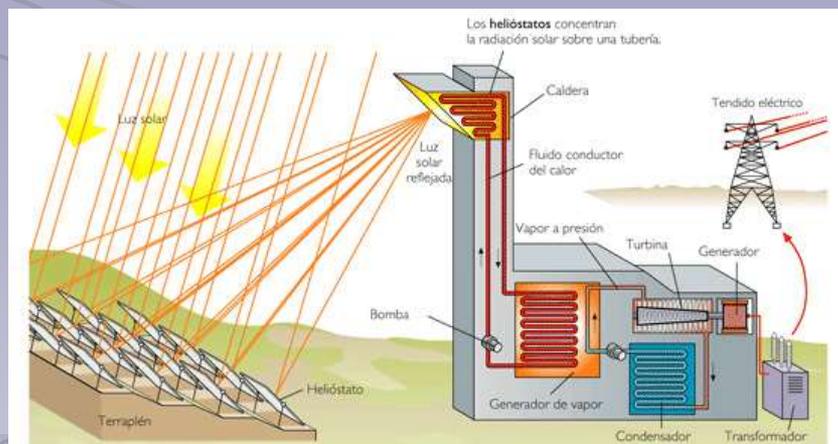
¿QUE ES LA ENERGÍA SOLAR?

Es simplemente la luz que proviene del sol.



APLICACIÓN TÉRMICA
Calentamiento de agua

APLICACIÓN FOTOVOLTAICA
Generación directa de electricidad



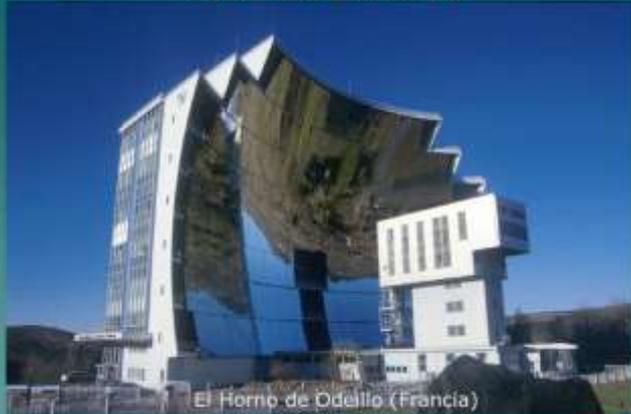
Veamos algunos ejemplos....

Energía Solar térmica

Aplicaciones



Hornos Solares



El Horno de Odeillo (Francia)

1 MW térmico en el foco

Horno solar para ensayo de materiales a altas temperaturas.

Central de torre central 100MW en California, EEUU



Horno solar y termotanque solar.



Energía Solar fotovoltaica

Aplicaciones



Techos de viviendas para abastecimiento propio o conexión a red de energía



Prototipos de autos y aviones solares autónomos.



Grandes centrales de potencia



Ejemplo en Argentina



- Promedio anual de energía solar

(Fuente H. Grossi Gallego y V. Ghini, HYFUSEN (2011) / ASADES (2012))

	Plano Horizontal	Plano Inclinado
Ushuaia	0 kWh/(m ² año)	1.240 kWh/(m ² año)
San Miguel	1.000 kWh/(m ² año)	2.000 kWh/(m ² año)
San Juan	1.500 kWh/(m ² año)	3.000 kWh/(m ² año)

• Radiación promedio
4,5 kWh/(m².día)

- Eficiencia de conversión en electricidad
- Factor de ocupación

Demanda eléctrica año 2013:
100 x 10⁹ kWh

Area total requerida: 1015 km²

Resultado de $\cong 64\%$ a la que cubre el espejo de agua de la represa Yacimientos (1600 km² con la cota de 83 msnm), generando 7 veces más energía



Introducción a celdas solares

Vivimos en una sociedad profundamente dependiente de la ciencia y la tecnología y en la que nadie sabe nada de estos temas. Ello constituye una fórmula segura para el desastre.

Carl Sagan



Conversión Fotovoltaica

- Generación directa de electricidad
- Depende del Efecto Fotovoltaico para su funcionamiento. Descubierta por Henry Becquerel en 1839 (en 1876 por primera vez en un sólido)
- 1º Reporte de un dispositivo fotovoltaico en 1941 por Russell Ohl, de Laboratorios Bell, con una eficiencia estimada menor que el 1 %,

1958 → Vanguard I, paneles fotovoltaicos con celdas de silicio p-n (eficiencia \cong 10%)

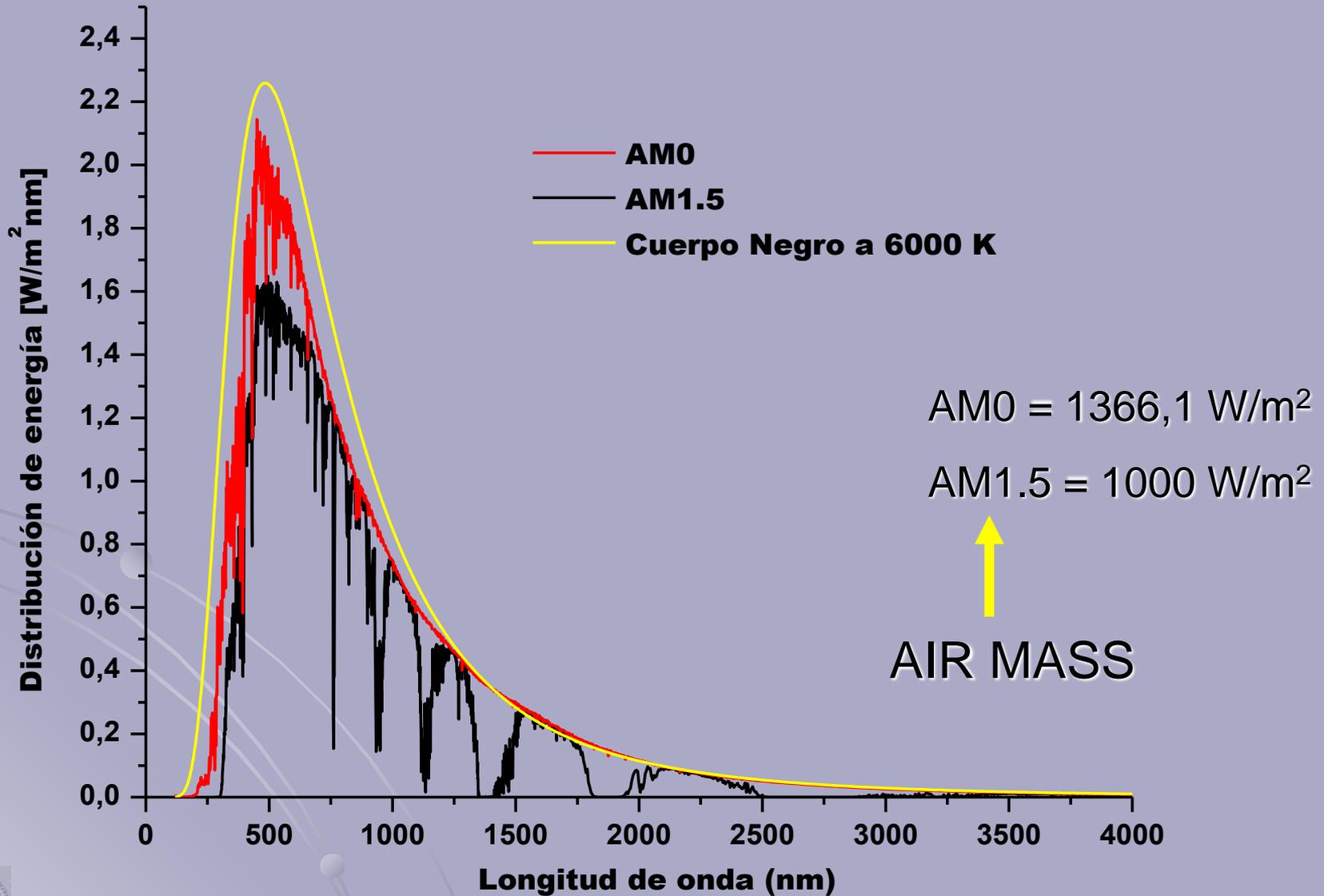
Hasta 1973 → usos espaciales y militares

Crisis del petróleo → usos terrestres de FV

Década del '90, nuevo impulso por cuestiones ecológicas

Actualidad → > 38% en celdas multi-juntura y > al 44 % con radiación concentrada por métodos ópticos.

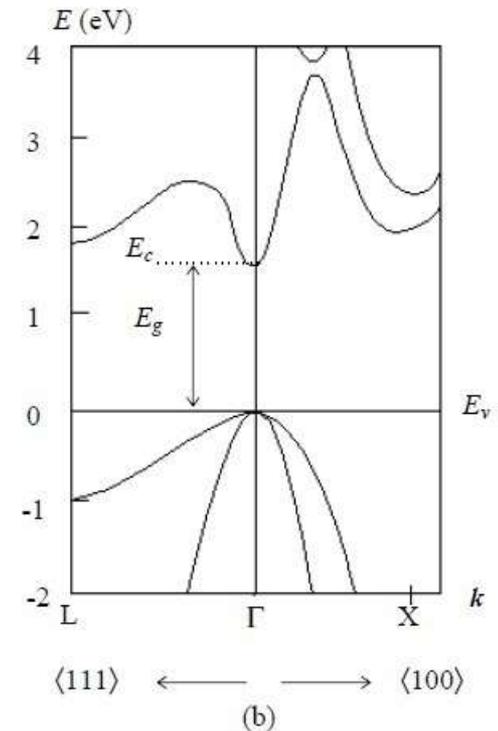
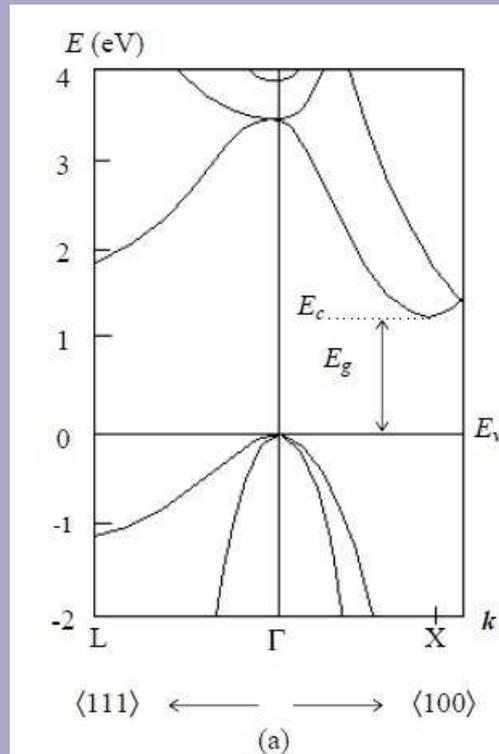
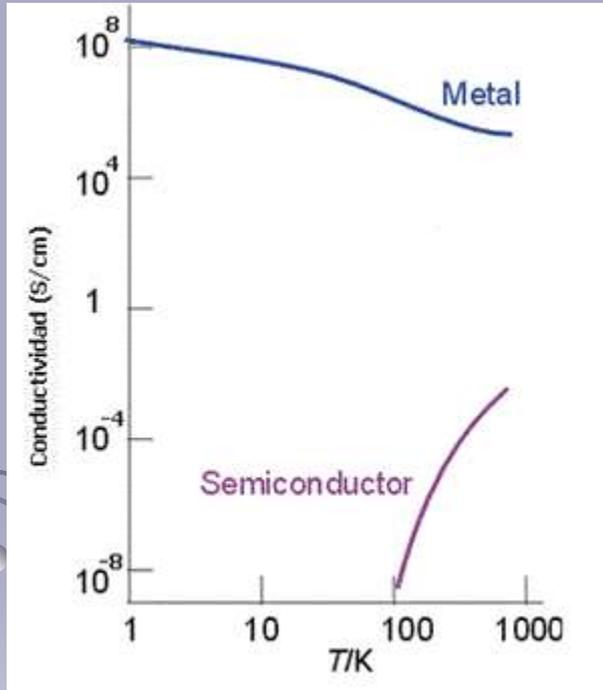
Radiación Solar



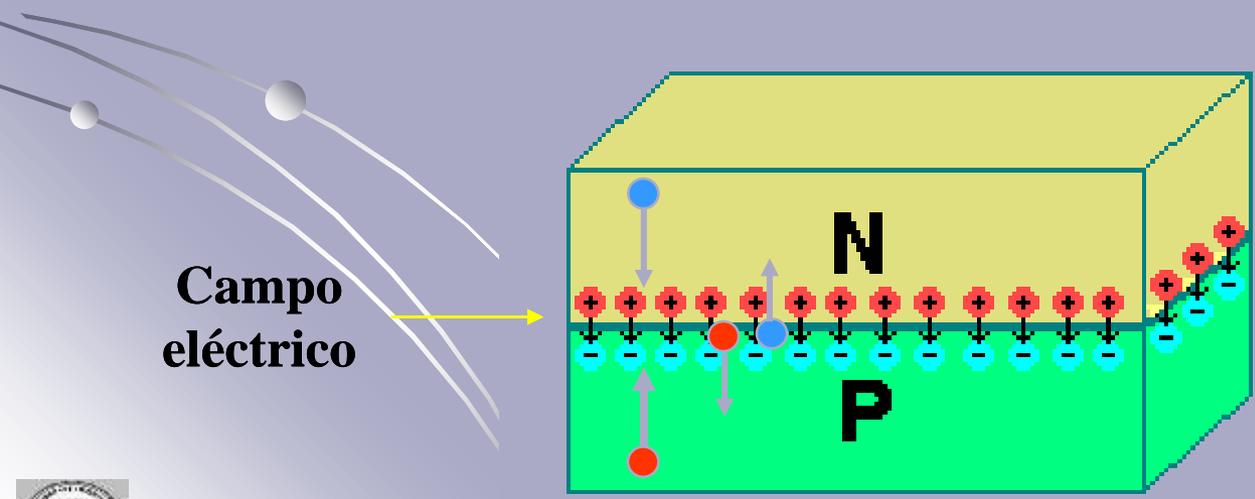
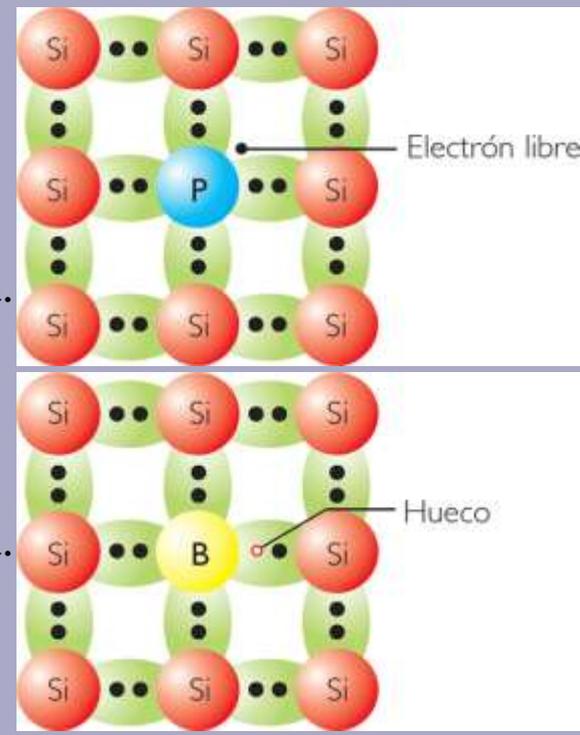
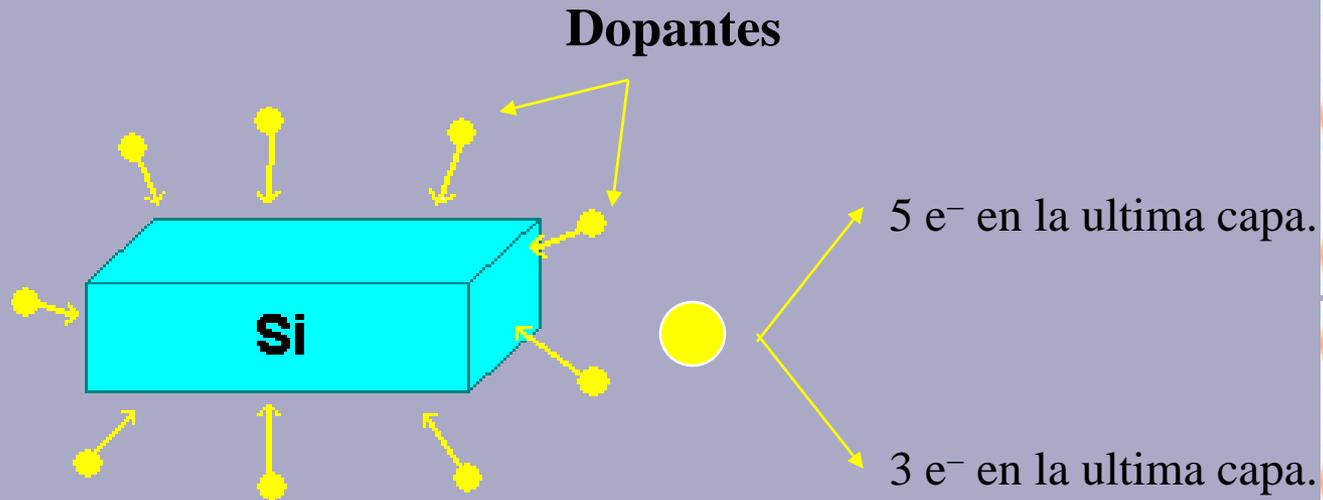
¿Cómo funciona una celda solar?



- Semiconductores



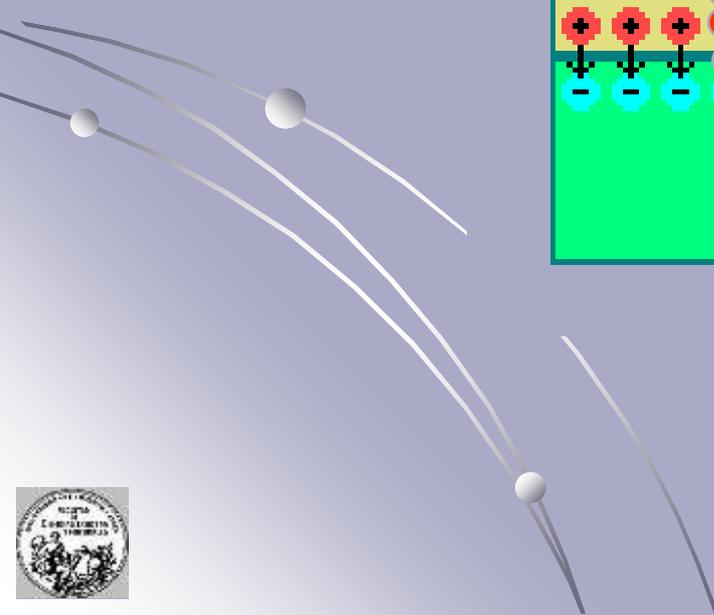
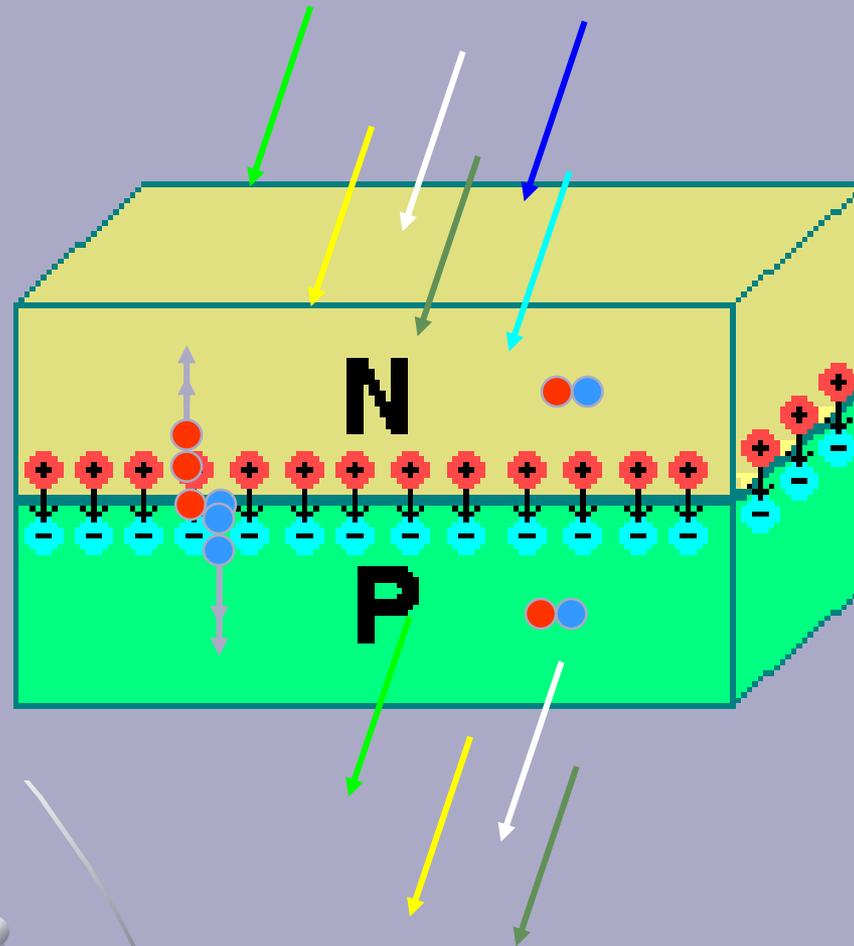
• Juntura p-n



Efecto Fotovoltaico y celdas solares



Fotones



Etapas de Fabricación de Celdas Solares de Silicio

Extracción de cuarzo

Purificación

Crecimiento del lingote

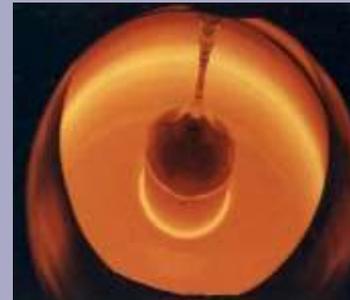
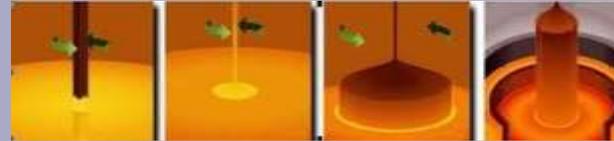
Obtención de la oblea



El silicio es segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y se extrae mediante minería.



Se realizan procesos químicos a través de los cuales se obtiene silicio de alta pureza



Se obtienen monocristales aplicando el método Czochralski por el cual se obtiene un cristal a partir de una semilla depositada en un baño de silicio fundido



A partir del silicio purificado se obtiene un lingote cristalino que es cortado en obleas de aproximadamente 0.3 cm de espesor.



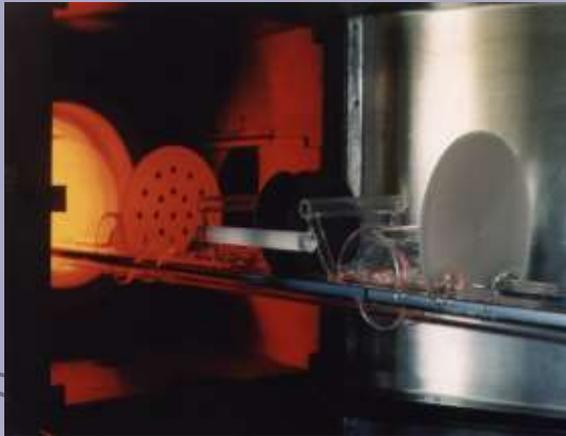
Etapas de Fabricación de Celdas Solares de Silicio



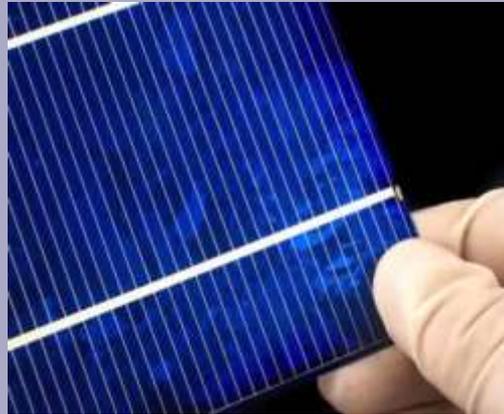
Difusión

Fabricación de la Celda

Desarrollo de paneles



La oblea de silicio se somete a un proceso llamado difusión, a través del cual se le introducen las impurezas que crean la juntura *n-p*.



Posteriormente se agregan los contactos metálicos de la celda, en particular en forma de rejilla en la cara iluminada por el sol.



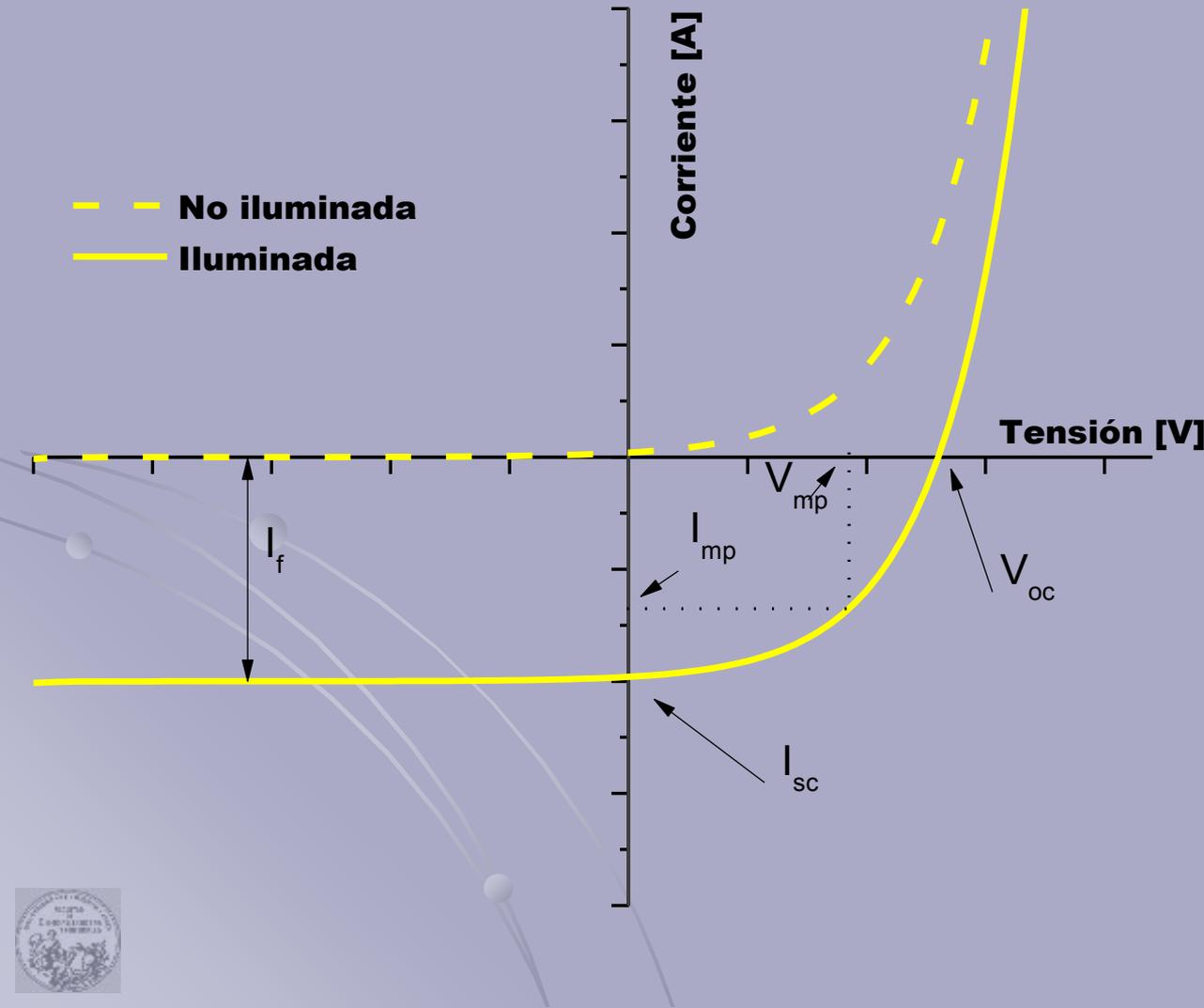
Los paneles solares se fabrican realizando la conexión de celdas entre si, a fin de lograr la tensión requerida. Las celdas solares interconectadas se protegen con vidrio transparente frontal, a fin de darles rigidez mecánica y protegerlas de agentes ambientales.



Parámetros de salida de las celdas solares



-- No iluminada
— Iluminada



- Corriente de cortocircuito (I_{sc})
- Tensión de circuito abierto (V_{oc})
- Factor de Forma (Fill Factor)

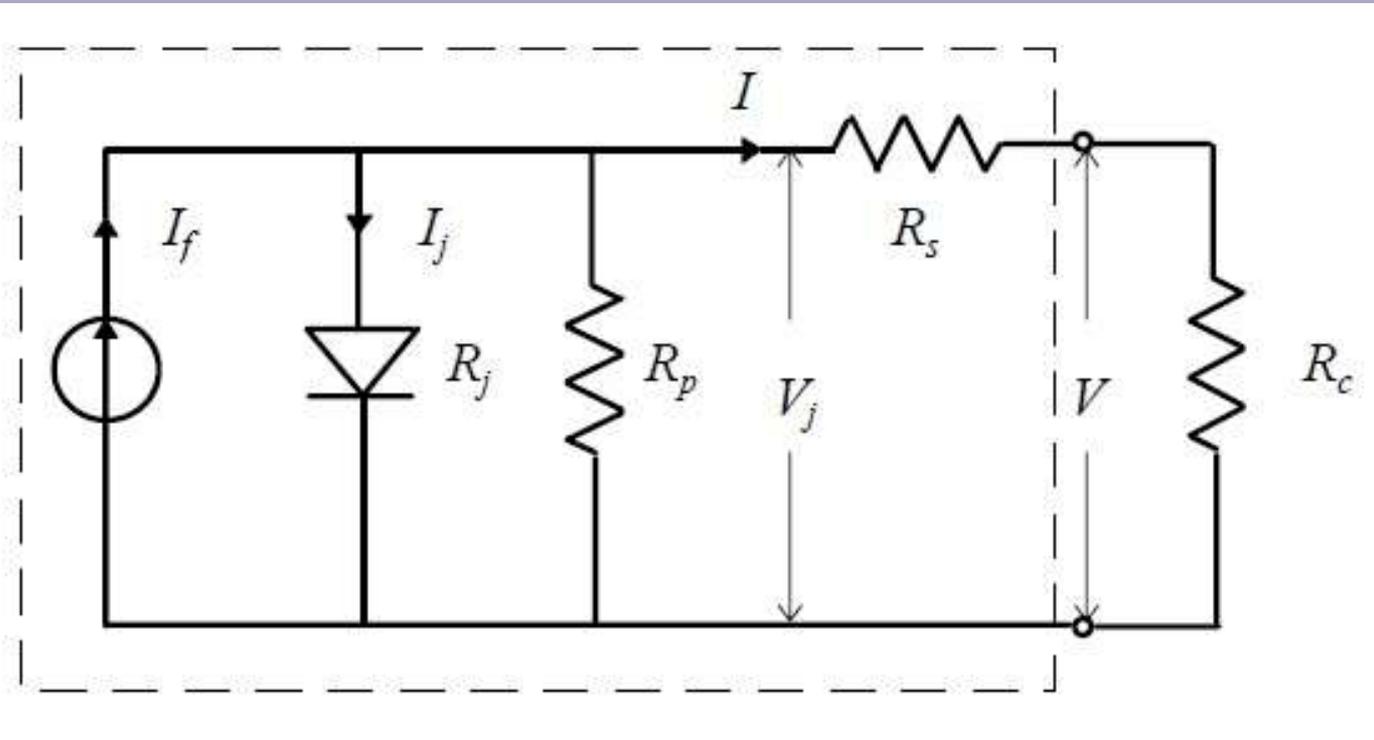
$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}}$$

- Eficiencia de conversión

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}}$$

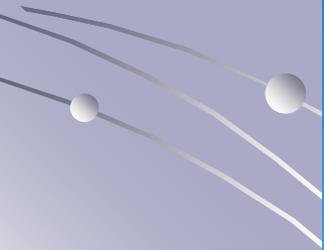


Circuito equivalente

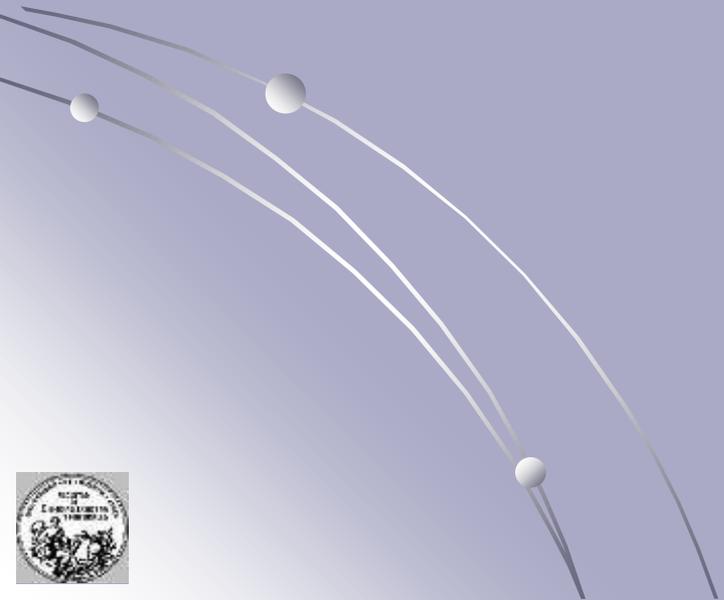


- I_f = Fuente de corriente que representa la fotogeneración
- R_j = Impedancia no lineal dada por la juntura
- R_s = Resistencias serie
- R_p = Resistencias paralelo
- R_c = Resistencia de carga asociada al circuito externo





Estación I: Parámetro Eléctricos vs Área



Fabricando paneles solares para uso espacial



Misión

SAC-D / Aquarius

Laboratorio de Integración



- Edificio Tandar (CAC)
- Superficie 220 m²
- Sistema de filtrado de aire para “área limpia clase 10.000”
- Control de T y H.R.
- Estaciones de trabajo

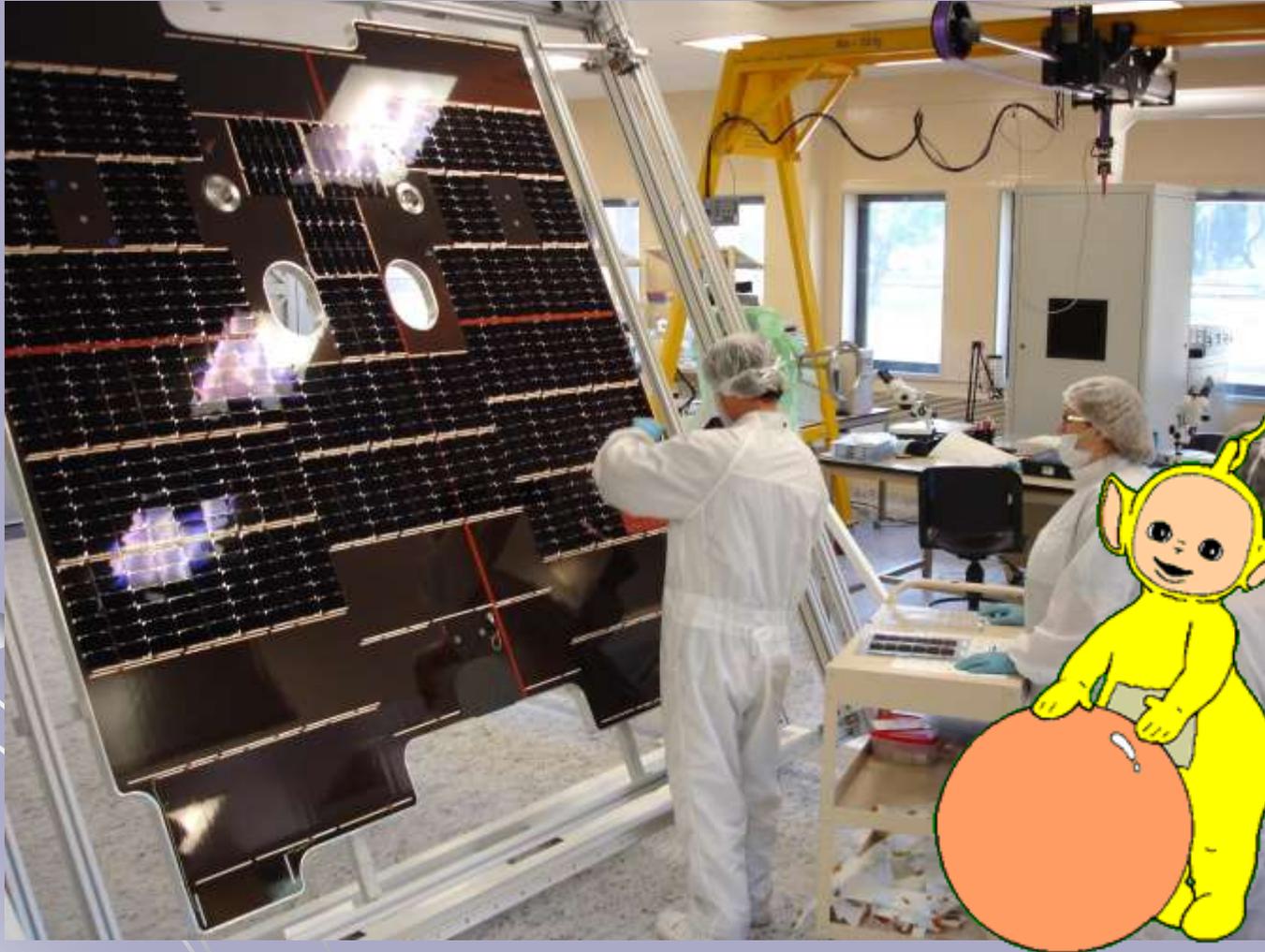


Componentes de un Panel Solar

- Sustrato (base del panel)
- Celdas solares
- Vidrios de protección
- Interconectores eléctricos para celdas
- Diodos
- Cables
- Sensores solares de posición
- Sensores de temperatura
- Resistores de descarga



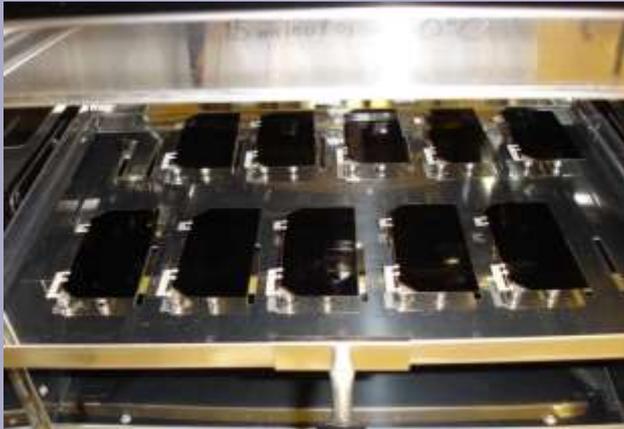
Trabajando en el área limpia



Integración de los paneles solares de la misión espacial Aquarius/SAC-D



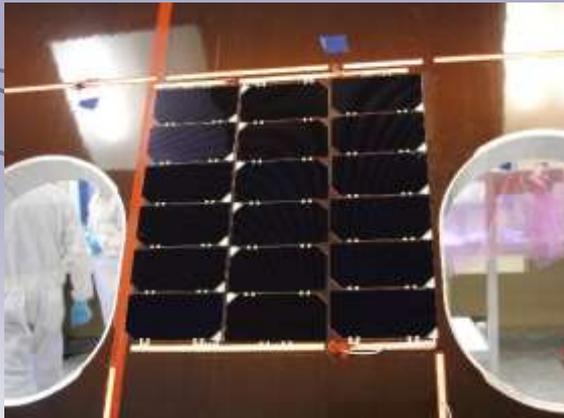
Proceso de Fabricación



Celdas Solares en Proceso de Pegado de Vidrio



Inspección visual de subcadenas de celdas



Cadena de 18 celdas conectadas en serie



Trabajos de pegado de celdas sobre el sustrato



Simulando el ambiente espacial



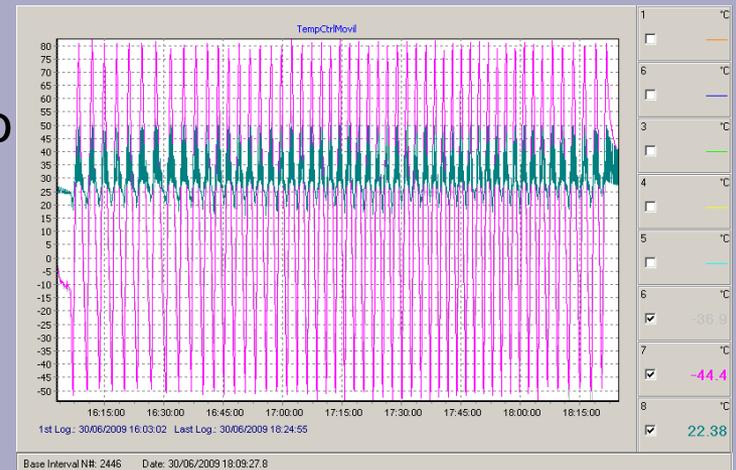
Cámara de vacío para ensayo de daño por radiación de protones de 10 MeV



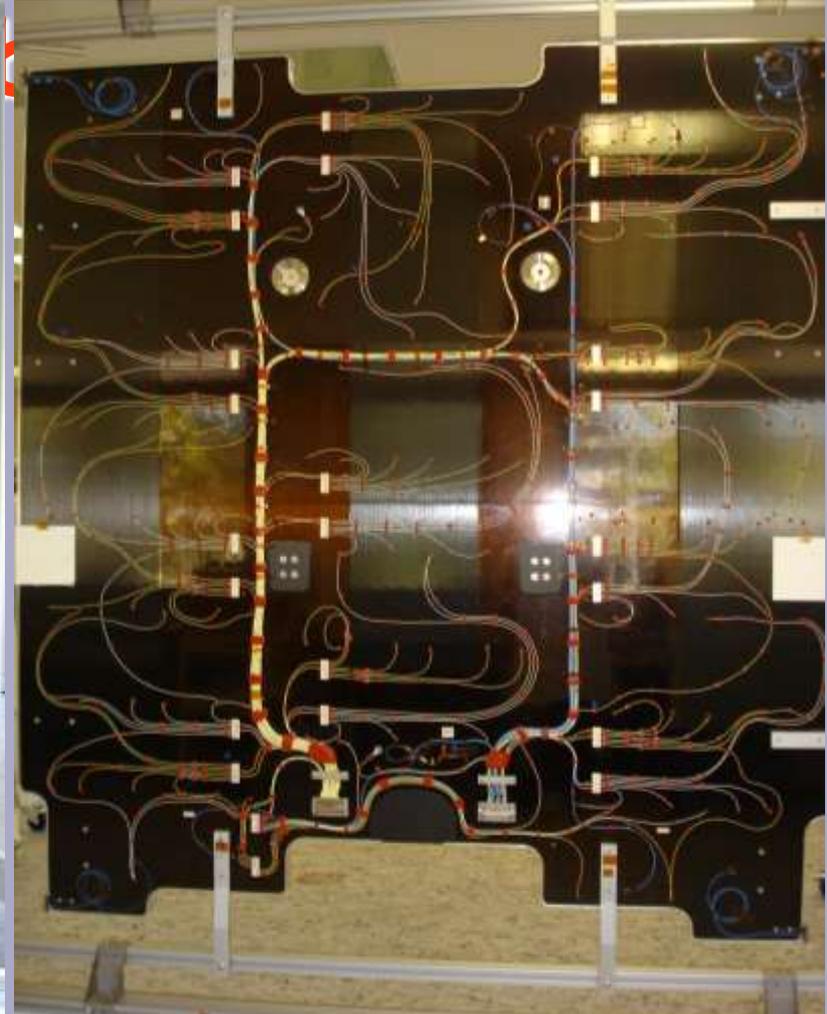
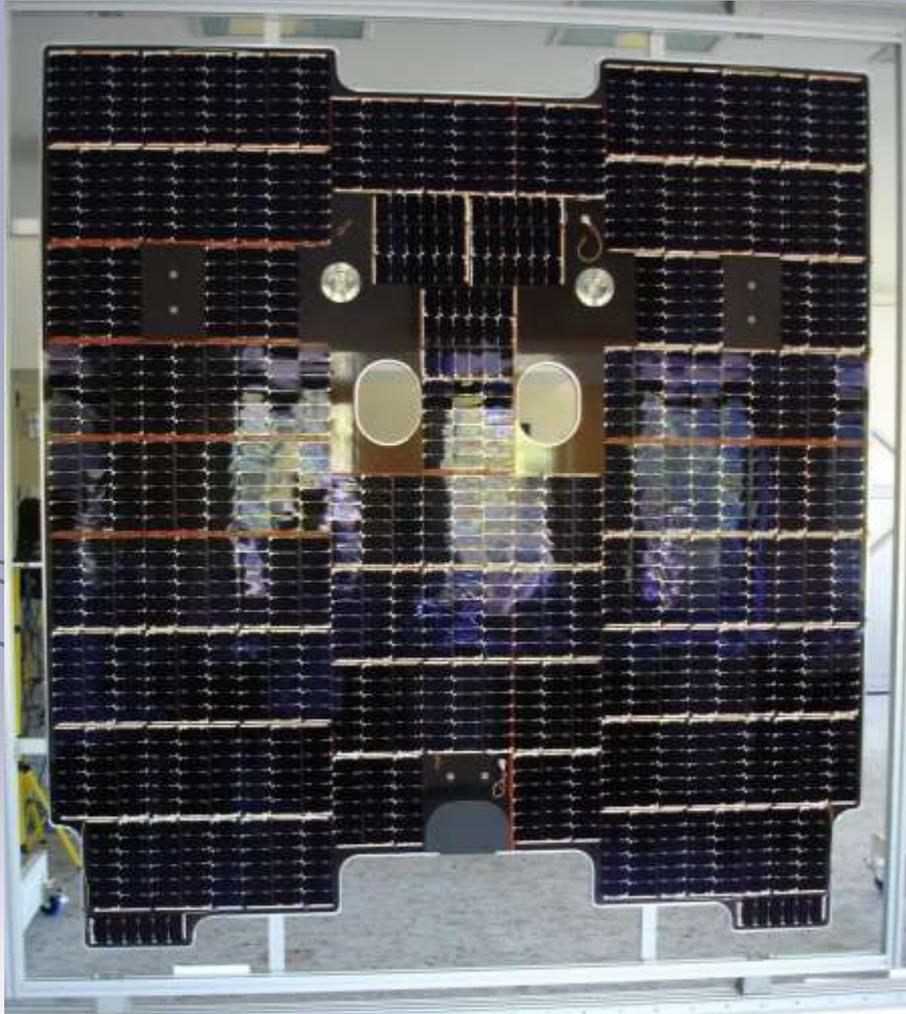
Cámaras para Ciclado Térmico



Ensayos de ciclado térmico rápido y termovació sobre paneles solares. (100°C y -100°C)

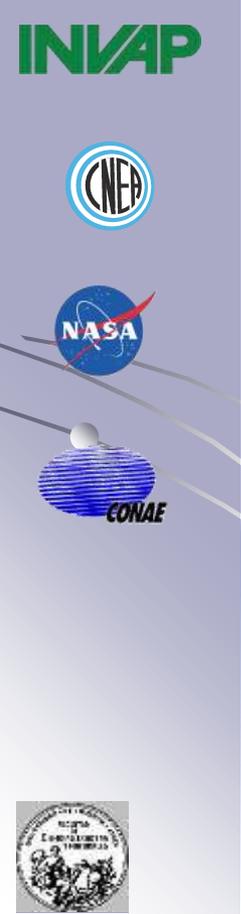


Panel -X Terminado Visto del Lado Celdas



Lanzamiento del satélite Argentino SAC-D, primeros paneles solares de fabricación nacional en el espacio

10 de Junio de 2011



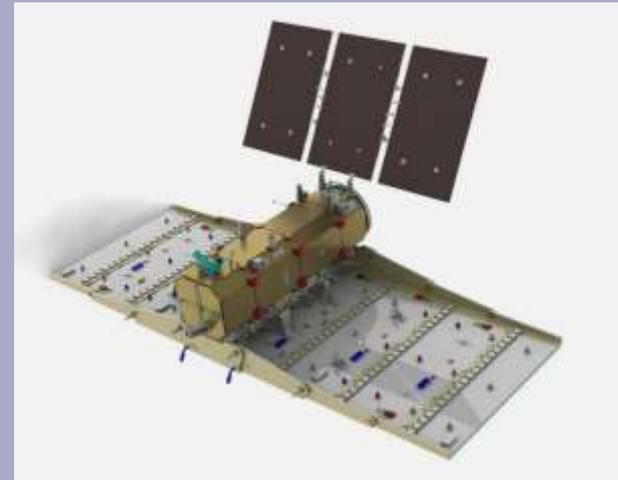
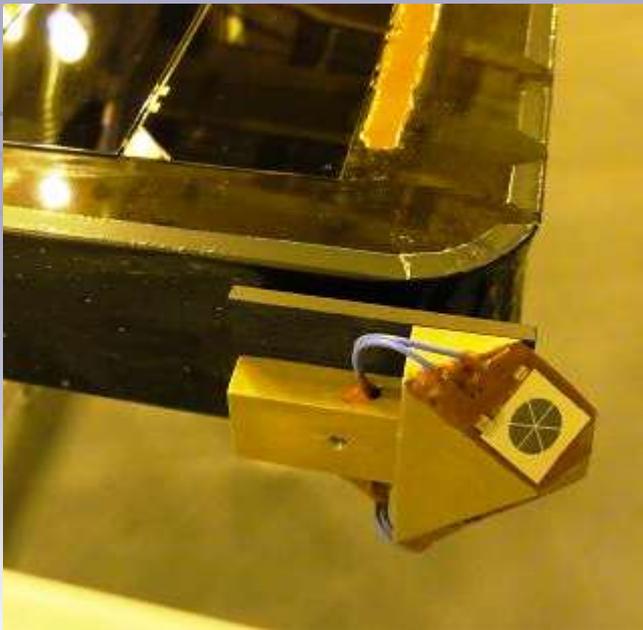
Proyectos Espaciales Satélites



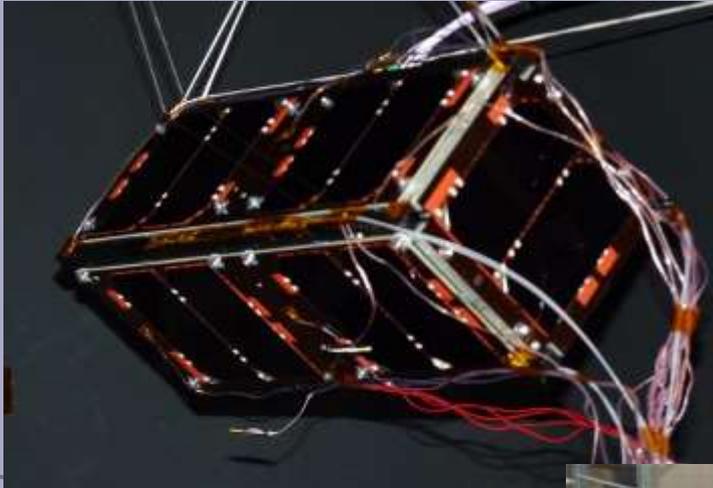
- SAOCOM
- NANOSATELITES
- Sensores de Posición
- SARE



Paneles de Ingeniería del Satélite SAOCOM



Proyectos Espaciales Nanosatelites



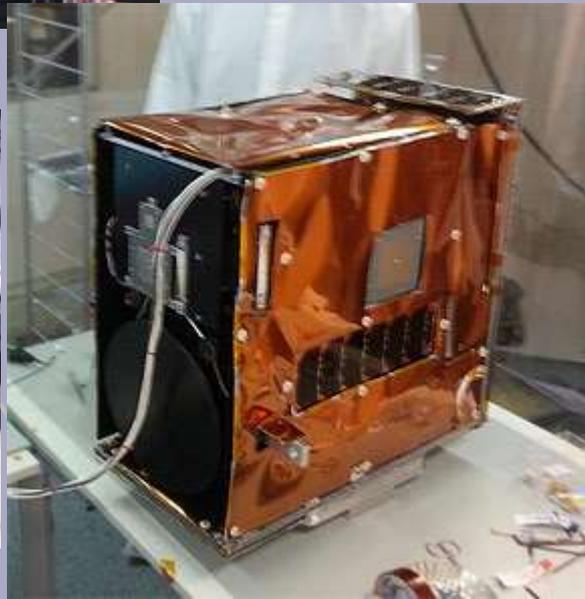
CUBEBUG-1 – “El capitán Beto”



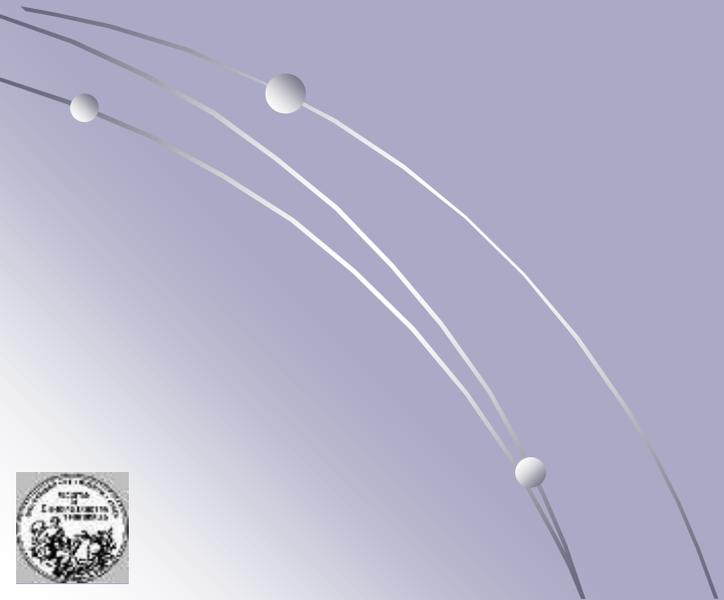
CUBEBUG-2 – “Manolito”



BUGSAT-1: “Tita”



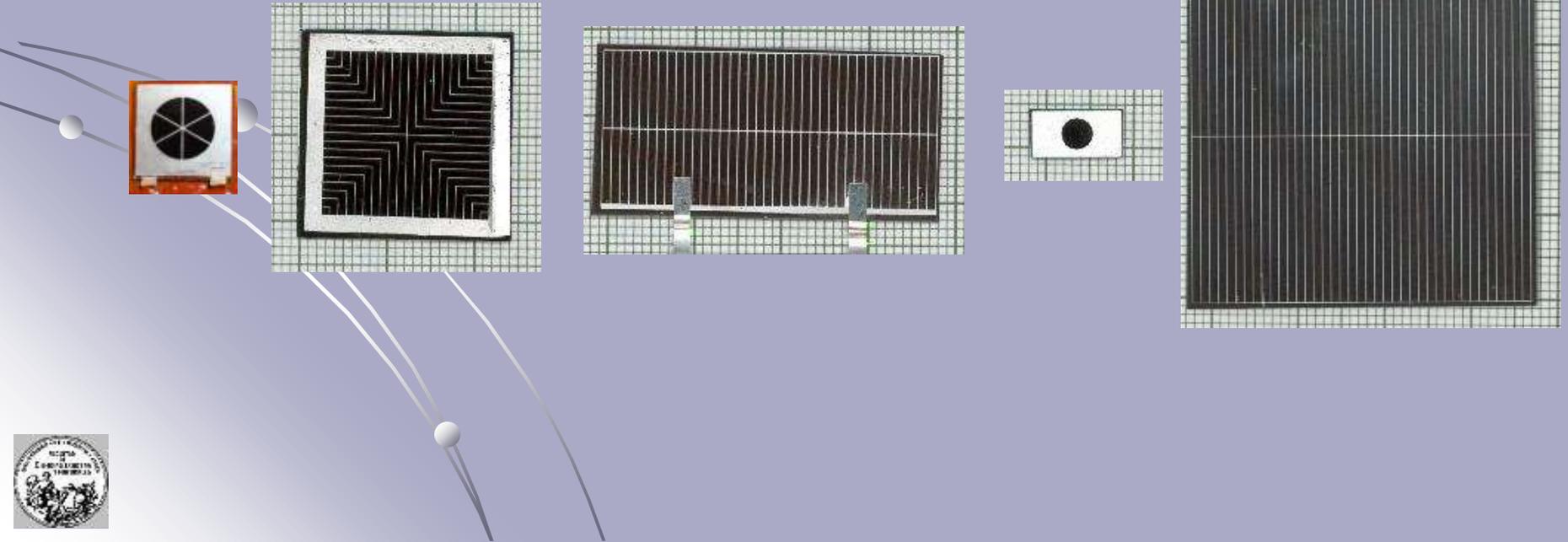
Estación II: Radiación Solar



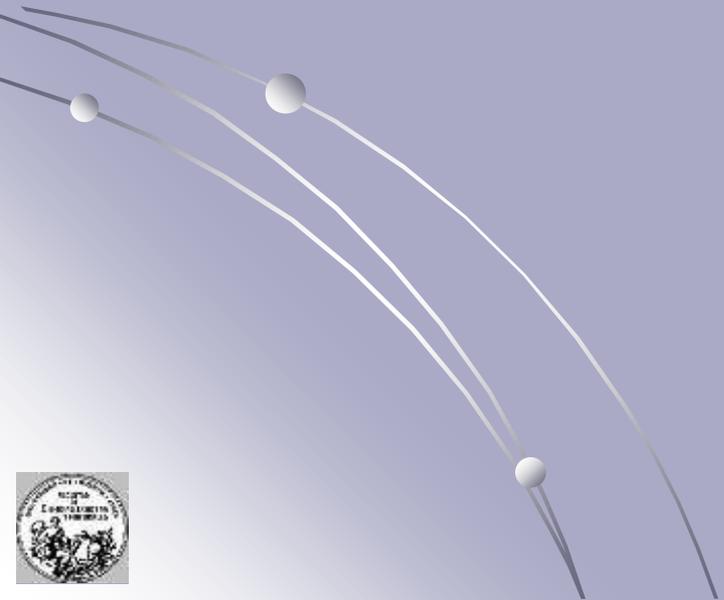
SENSORES USO ESPACIAL

ELABORACIÓN E INTEGRACIÓN

- **Sensores:** celdas solares de Si adaptadas en tamaño y corriente para ser integradas al sistema de control de actitud del satélite.
- **Grilla frontal:** define el área activa y se diseña según la corriente requerida en cada misión pudiendo ajustar la señal del dispositivo a las necesidades de cada misión (ventaja)



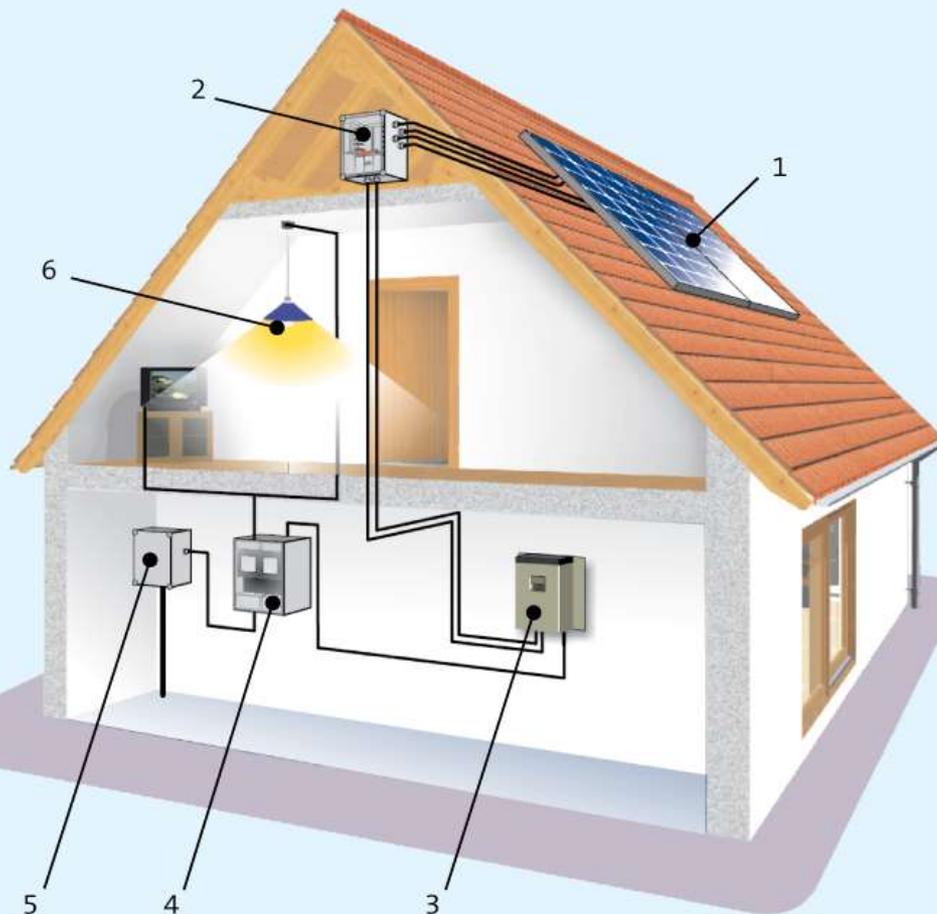
Estación III: Instalación Fotovoltaica



Interconexión De Sistemas FV A La Red Eléctrica En Ambientes Urbanos



Sistema FV Conectado a la Red



1 Generador solar, 2 Caja de conexión del generador, 3 Inversor, 4 Contador bidireccional de consumo e inyección, 5 Conexión a red, 6 Punto de consumo

IRESUD



Proyecto destinado a promover y probar tecnologías de sistemas fotovoltaicos conectados a la red de 220 V en áreas urbanas. El consorcio IRESUD esta compuesto por instituciones gubernamentales y por empresas del sector privado.



Actualmente cuenta con de 41 instalaciones previstas en las cuales participan 15 provincias y la Antártida.

(con potencias entre 1,5 kW y 17 kW)



Primer instalación

Asociación Argentina Amigos de la Astronomía



Instalación piloto de 2 kW conectada a la red interna del Observatorio de la Ciudad de Buenos Aires en el Parque Centenario.

Cumplió 2 años de funcionamiento!

(En el primer año entregó 2.525 kWh, o lo que es lo mismo 7 kWh diarios aprox.)

Algunas de las Instalaciones del proyecto



Granadero Baigorria- Santa Fe



Neuquén-
Neuquén



UNLP -
La Plata

UNNE -
Corrientes



Algunas de las Instalaciones del proyecto



Edificio TANDAR, Centro Atómico Constituyentes



Pérgola fotovoltaica instalado en el balcón del tercer piso del Tandar. Veintitrés módulos FV de 235 Wp c/u. Potencia total 4.9 KW

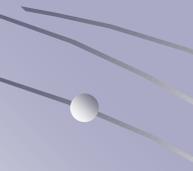


Sistema fotovoltaico instalado en la terraza del Tandar. Veinte módulos FV de 240 Wp c/u. Potencia total 4.7 KW

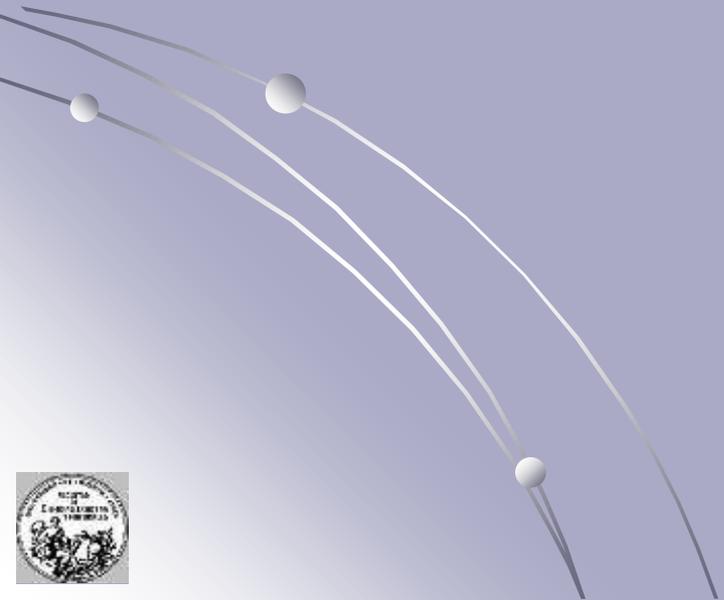


Algunas de las Instalaciones del proyecto

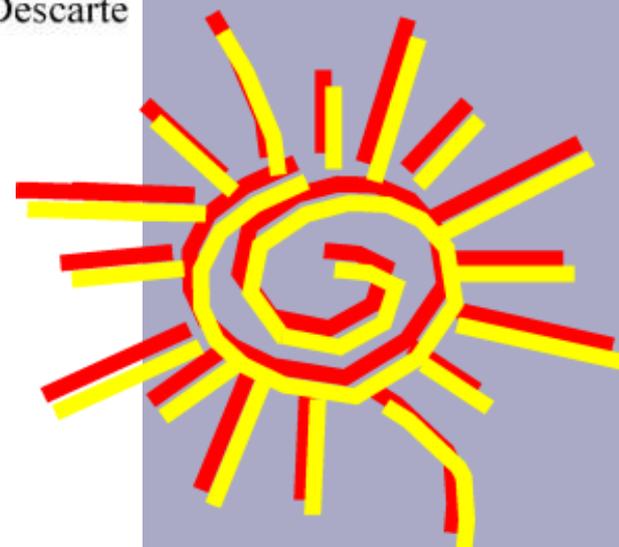
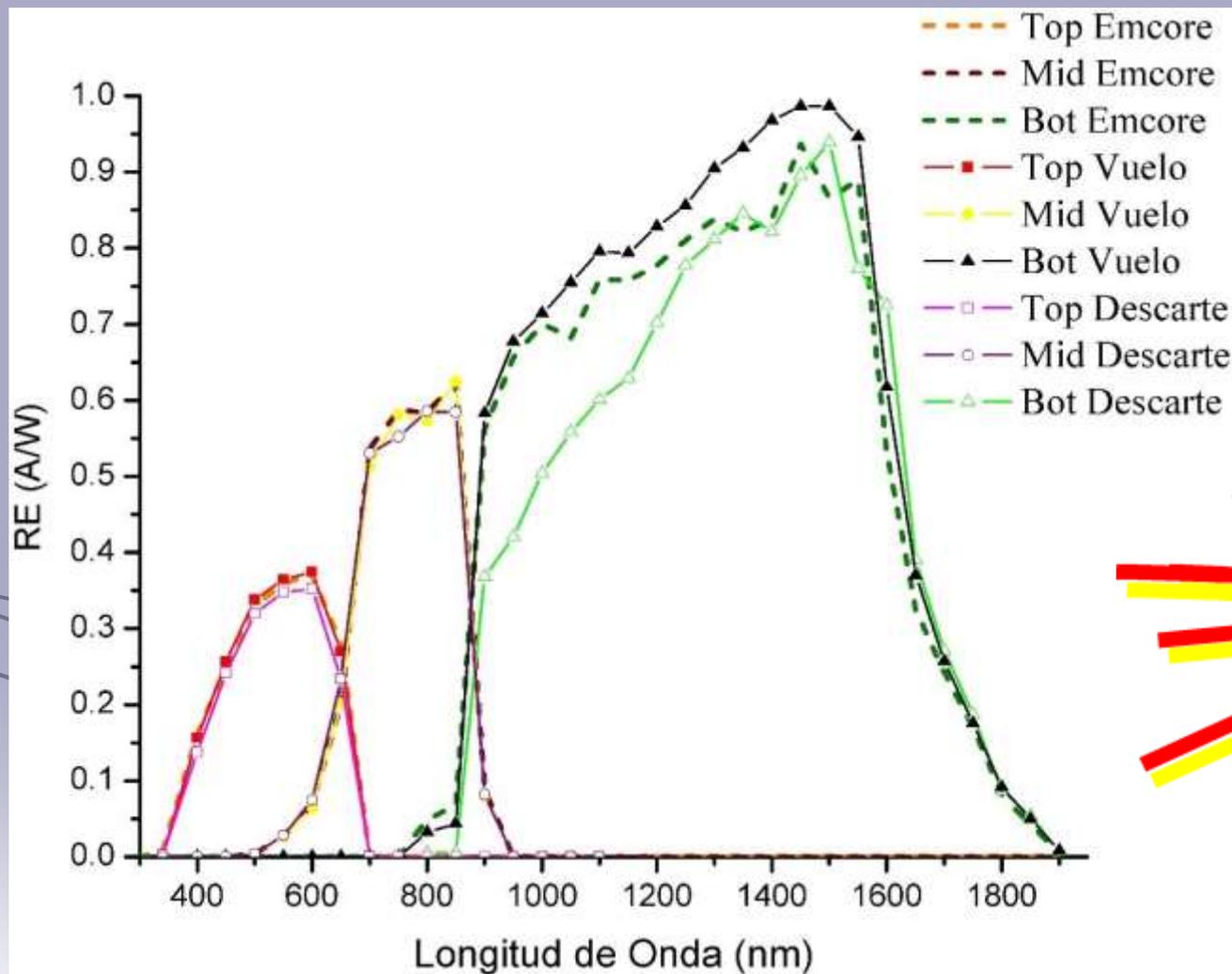
Base Marambio, Antártida



Estación IV: Diferentes tecnología en celdas solares



I+D en celdas solares



Fabricación de dispositivos y Aplicaciones



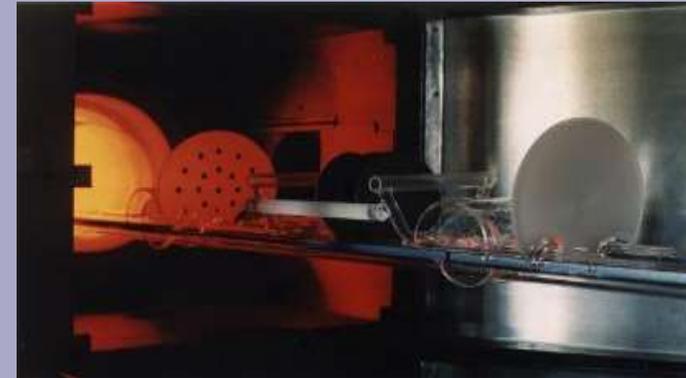
- Actividades de investigación y desarrollo en nuevas y más eficientes tecnologías de celdas solares
- Formación de recursos humanos
- Fabricación de dispositivos para medición de radiación solar
- Implementación de método de fabricación de celdas solares multijuntura de semiconductores III-V



Algunos materiales involucrados en la fabricación de celdas solares de Silicio



Radiómetro para la medición de la radiación solar



Horno de difusión térmica para la fabricación de celdas solares



Estructura de una celda triplejuntura

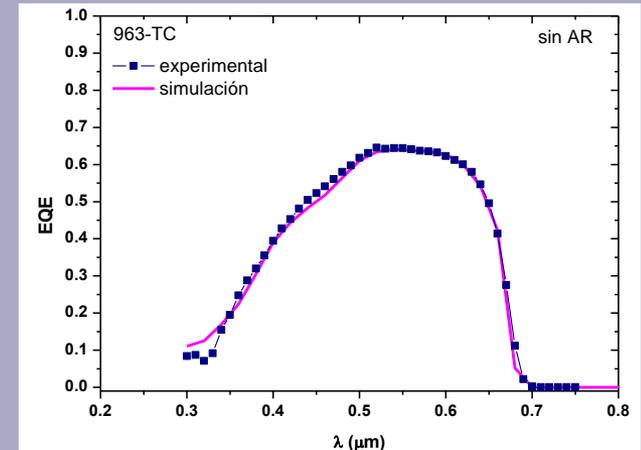


Simulación de celdas solares y paneles solares

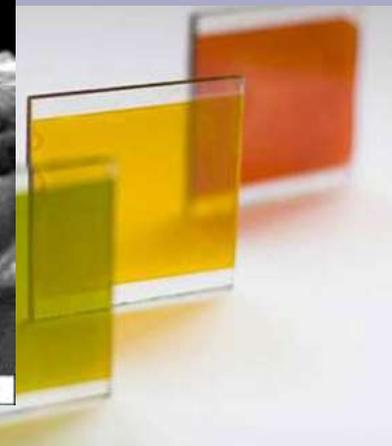
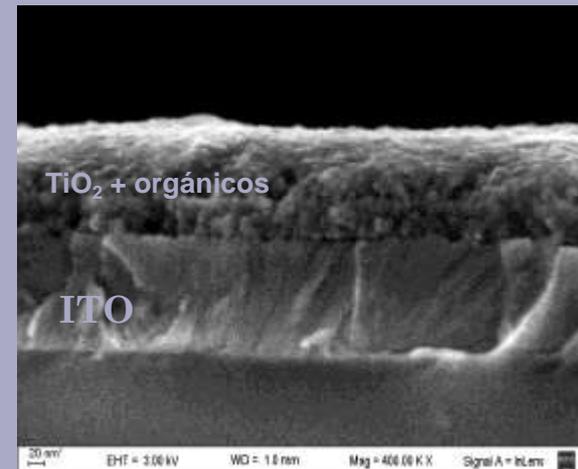
- Herramientas de simulación numérica de dispositivos
- Herramientas de simulación numérica de Paneles solares y parámetros térmicos.

Celdas Solares Híbridas. (Orgánicas-Inorgánicas)

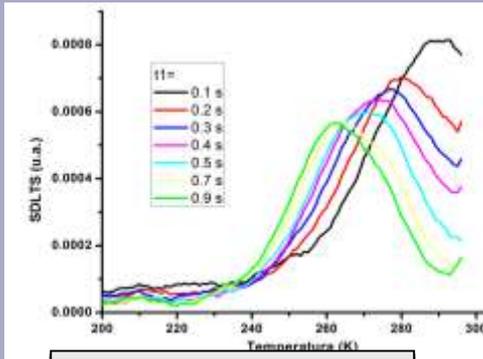
- Inorgánico: Robustez de estructura tridimensional con alta superficie de interfaz
- Orgánico: Versatilidad de los compuestos orgánicos, acompañado por bajos costos.



Simulación de la Eficiencia Cuántica Externa (EQE) de homojunturas de InGaP



Implementación de técnicas de Caracterización:



Espectros DLTS

- Primeras mediciones con la técnica Deep Level Transient Spectroscopy para caracterización de defectos en semiconductores
- Armado del setup de fotoluminiscencia para medición de celdas solares.
- Curva Corriente-Tensión
- Respuesta Espectral
- Curva Capacidad-Tensión

Evaluación estadística de parámetros eléctricos

- Estudio de la variación de los parámetros eléctricos de celdas solares utilizadas para la integración de los paneles de vuelo de la misión.

Estudio de Daño por Radiación en ambiente espacial



Se realizan ensayos de degradación de dispositivos semiconductores y celdas solares bajo irradiación de iones pesados simulando el espectro espacial.



TANDAR: Acelerador de partículas tandem Van der Graff electroestático

Los efectos mas importantes son:

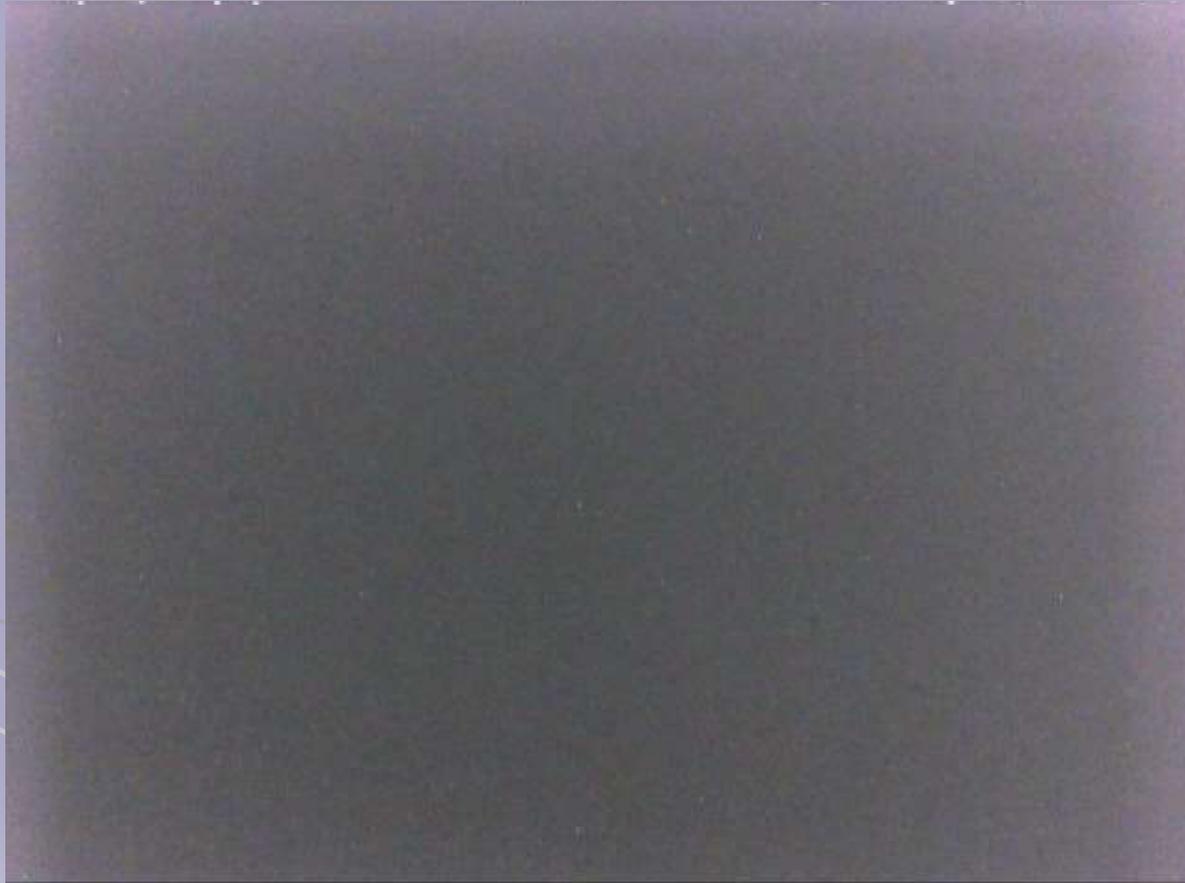
- el daño acumulado inducido por una continua exposición a protones y electrones, TID (*Total Ionising Dose*)
- la degradación de la eficiencia del dispositivo sensible al daño por desplazamiento de átomos, DD (*Displacement Damage*)
- el daño instantáneo causado por una única partícula, SEE (*Single Event Effects*)



E.D.R.A: Línea de Ensayos de Daño por Radiación y Ambiente



- Experimentos de Daño SEU: (Single Event Upset)



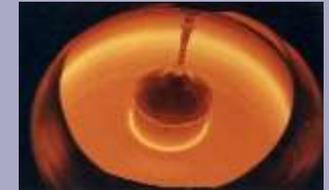
Filtro de Ta con perforaciones de 80 μm aprox. para atenuar el haz

Experimento Single Event Effect:
Cámara web irradiada con H^+ de 8 MeV y 1,1 nA.

Departamento Energía Solar



Un poco de historia...



- 1976 Primeras actividades, conversión fototérmica
- 1986 Producción de lingotes de silicio monocristalino para uso fotovoltaico. Se comenzó con el diseño, elaboración y caracterización de celdas solares de Silicio.
- 1995 Acuerdo CNEA-CONAE para la fabricación de dispositivos FV para uso espacial
- 2011 Lanzamiento del SAC-D, primer satélite con paneles argentinos
- 2011 Proyecto FONARSEC para la interconexión a red de sistemas FV en áreas urbanas. Creación de IRESUD.
- 2012 Primera instalación piloto conectada a red
- 2013 Nacionalización del proyecto IRESUD
- 2015 Proyecto IRESUD RI: Interconexión y redes inteligentes



Departamento Energía Solar Integrantes



¡¡ GRACIAS POR SU ATENCION !!

**La ignorancia afirma o niega rotundamente;
la ciencia duda.**

Voltaire (1694-1778)

Fin