

ENERGIA FOTOVOLTAICA



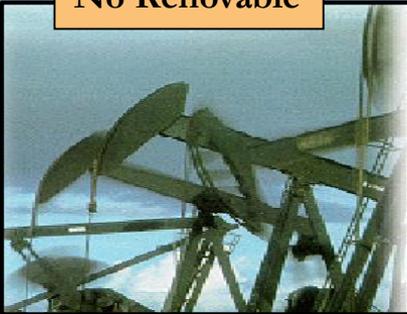
Proceso de Transformación de la Energía

Recurso Energético

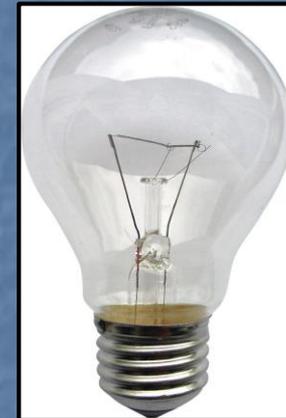
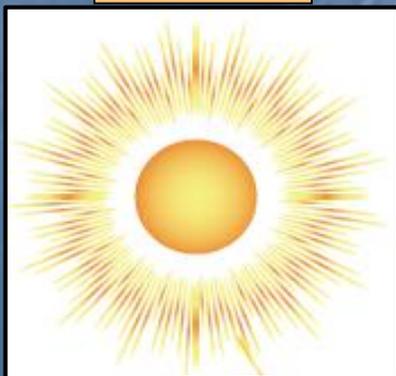
Sistema Tecnológico

Demanda de Energía

No Renovables



Renovable



Sistema Fotovoltaico

Un Sistema es un conjunto de **Elementos Interrelacionados** para cumplir con un determinado **Objetivo**.

Sistema Fotovoltaico

Elementos:

- **Célula - Módulo FV**
- **Regulador**
- **Batería**
- **Inversor**
- **Protecciones**
- **Cables**
- **etc.**



Objetivo de un SFV

Alimentar de energía eléctrica a una demanda eléctrica, en la cantidad y calidad requerida.

El panel FV genera en CC. Si se necesita alimentar cargas de CA se deberá usar un inversor.

Interrelación de los Elementos

Se vinculan los diferentes elementos del SFV para suministrar de energía eléctrica a la demanda.

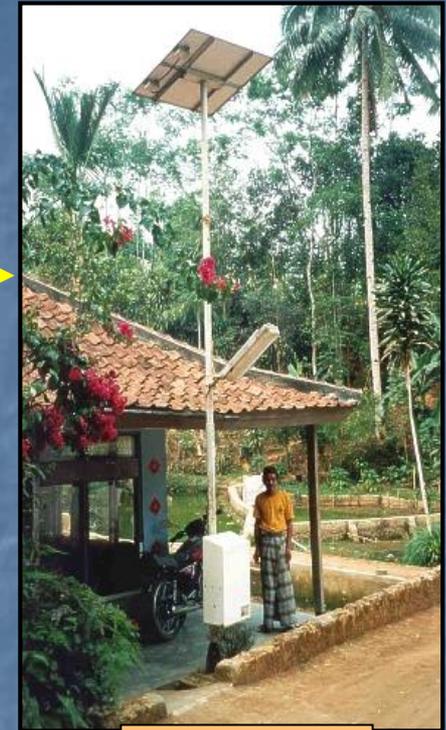
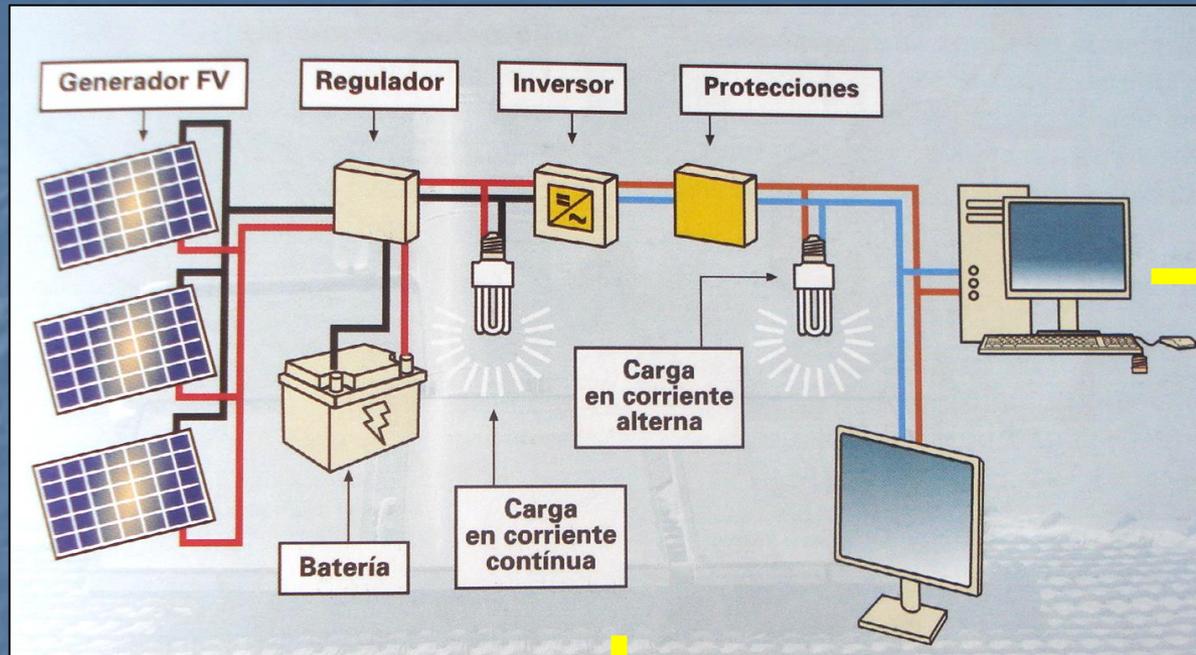
La configuración resultante será función de que si el SFV está conectado o no a la Red eléctrica:

- 1.- *SFV aislados de la Red*
- 2.- *SFV conectados a la Red*

1.- SFV aislados de la Red: tienen baterías y regulador, a veces inversor (si hay consumo de AC), el SFV está cercano a la demanda.

2.- SFV conectados a la Red: en general no tienen baterías ni regulador, pero si inversor. Estos a su vez presentan características de estar distribuidos en residencias, edificios (generación distribuida) de una ciudad y/o centralizados en una huerta FV (generación centralizada).

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: Aislados de la Red

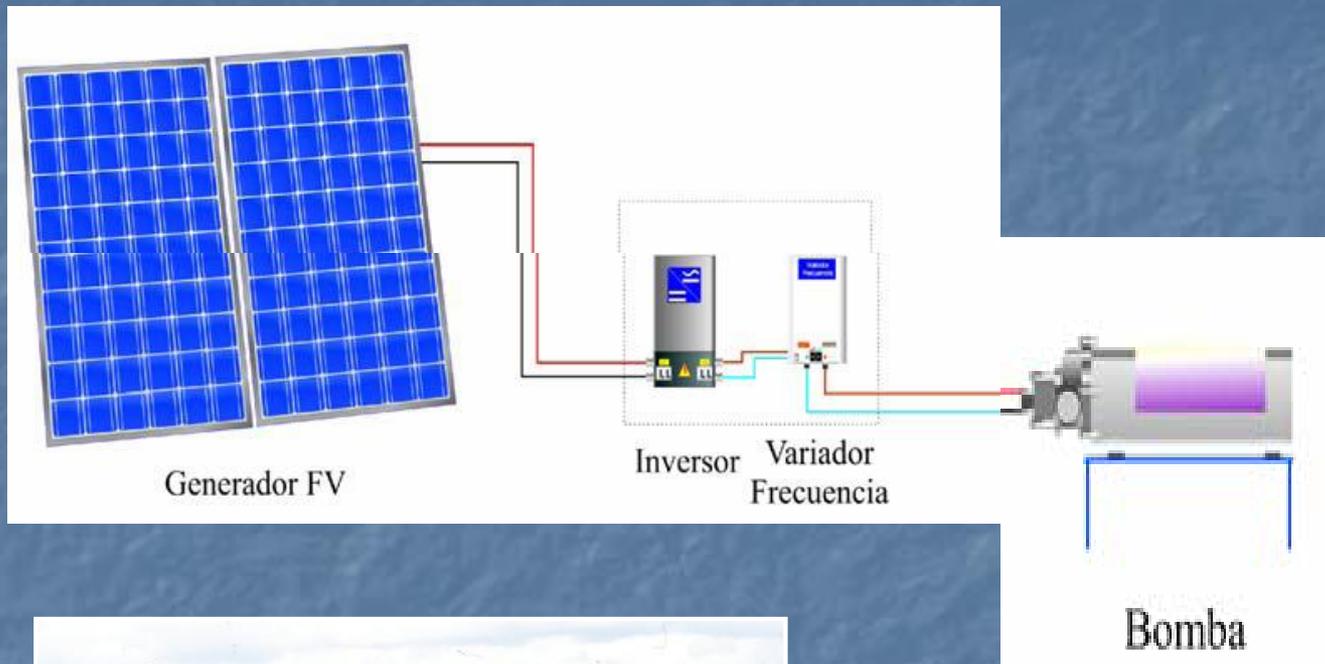


Residencia,
Dispensario,
Escuela

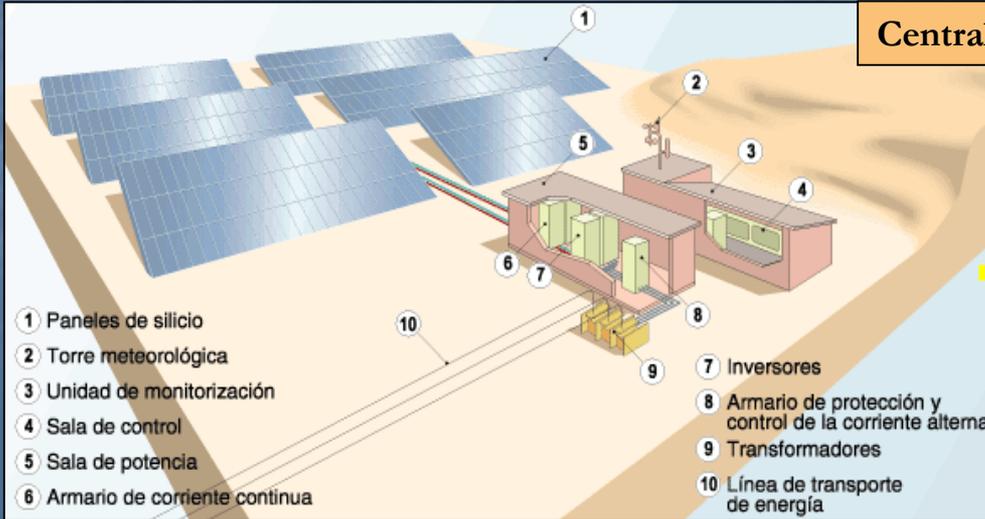
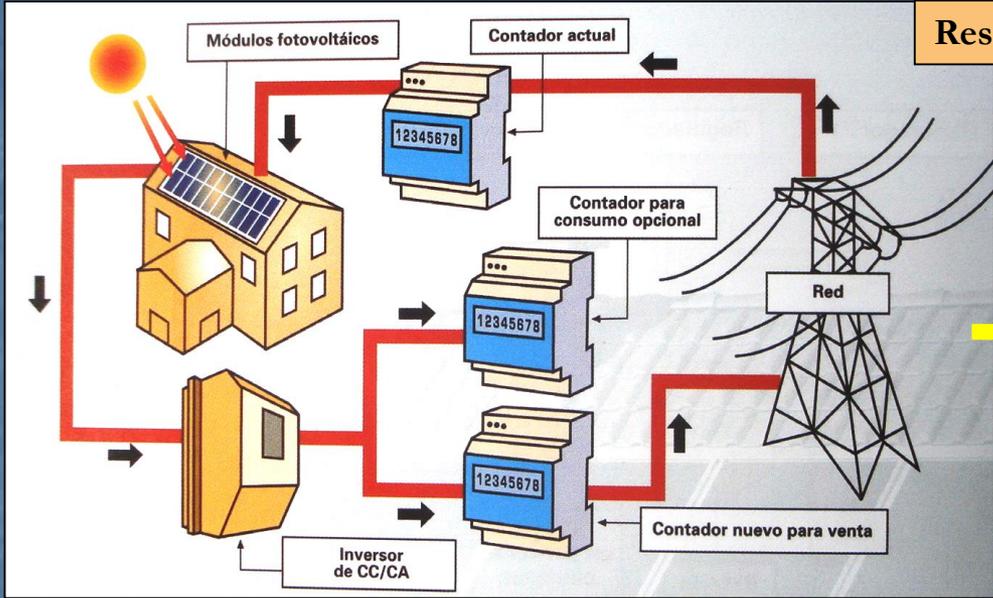


Por ejemplo, comunicaciones

SVF aislado de Red: Bombeo de agua



SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: Conectados a la Red



Central FV de Puebla de Montalbán de 1 MWp, Toledo, España

**Campo solar de tres subcampos, dos de ellos fijos (900 kW, inclinación 30° sur) y el tercero con seguimiento en un eje NS (100 kW) que consume 700 Wh/día.
Area ocupada = 20000 m²
Area módulos = 8000 m²
Nº total de módulos de Si mc= 8000
E producida ≈ 1200 MWh/año**

<http://www.toledopv.com>





Módulos Superpuestos



como elemento de revestimiento,
tejas FV.



como elemento de cerramiento
(Ministerio de Econo., Alemania)

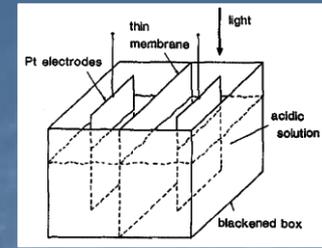
**Sistemas FV en
Edificios y su
Integración
Arquitectónica**



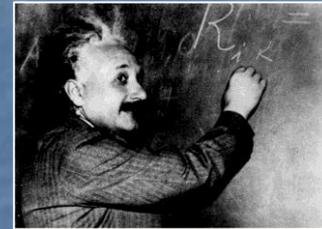
como elemento de sombreado
(Parque de las Ciencias, Granada)

EL INICIO DE LA HISTORIA

Edmund Becquerel (1839): Iluminó un electrodo metálico inmerso en una solución electrolítica y produjo una tensión eléctrica.



Albert Einstein (1905): Teoría del Efecto FV, por lo que recibió el premio Nobel (1921)



Chapin, Fuller, Pearson (1953): En Lab. Bell, comenzaron a investigar el efecto FV en semiconductores dopados.



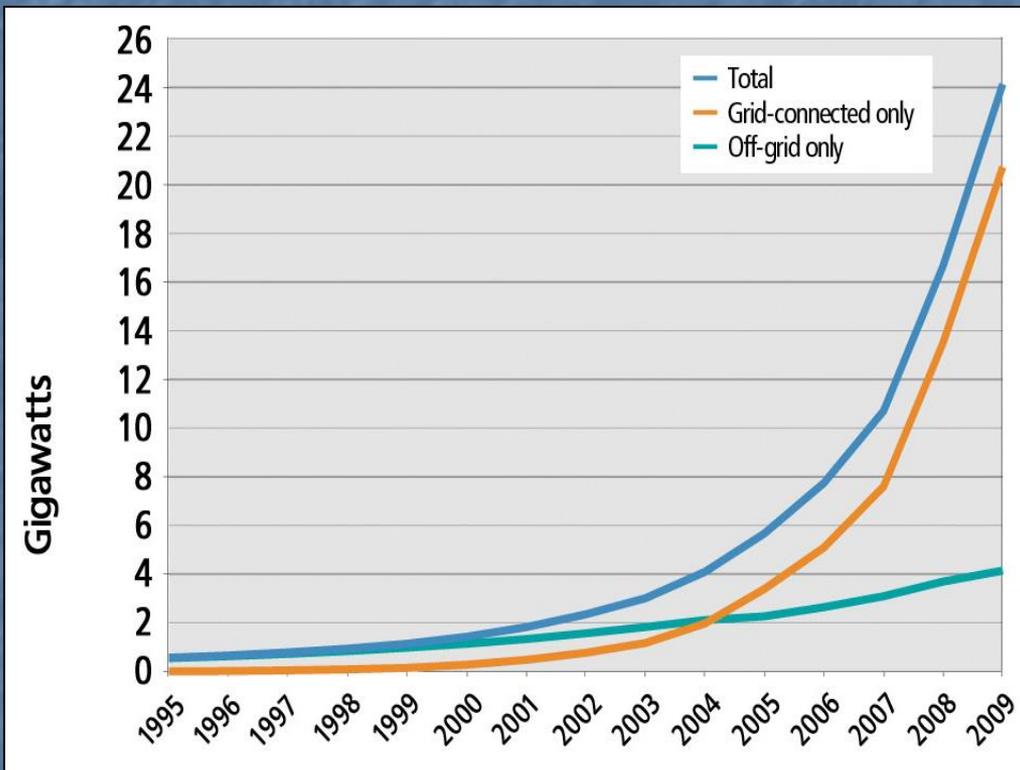
Entrada Comercial (1958): Celdas FV en satélites espaciales (Vanguard I) y en equipos de comunicación en puntos remotos de la Tierra.



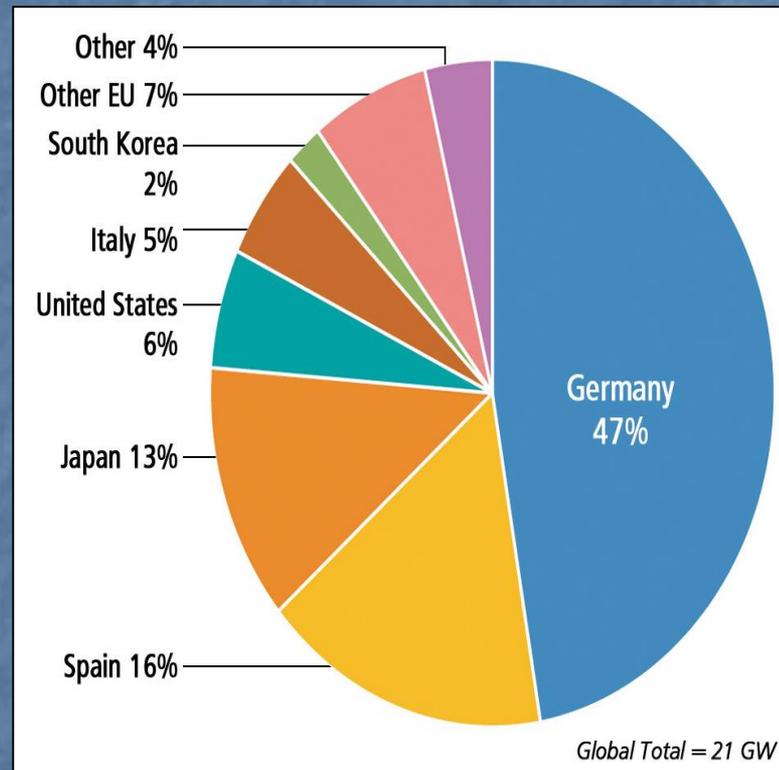
Aplicaciones Terrestres (1970): A partir de la crisis petrolera de los 70 obtiene un gran impulso a su desarrollo.

¿ COMO EVOLUCIONA HASTA HOY ?

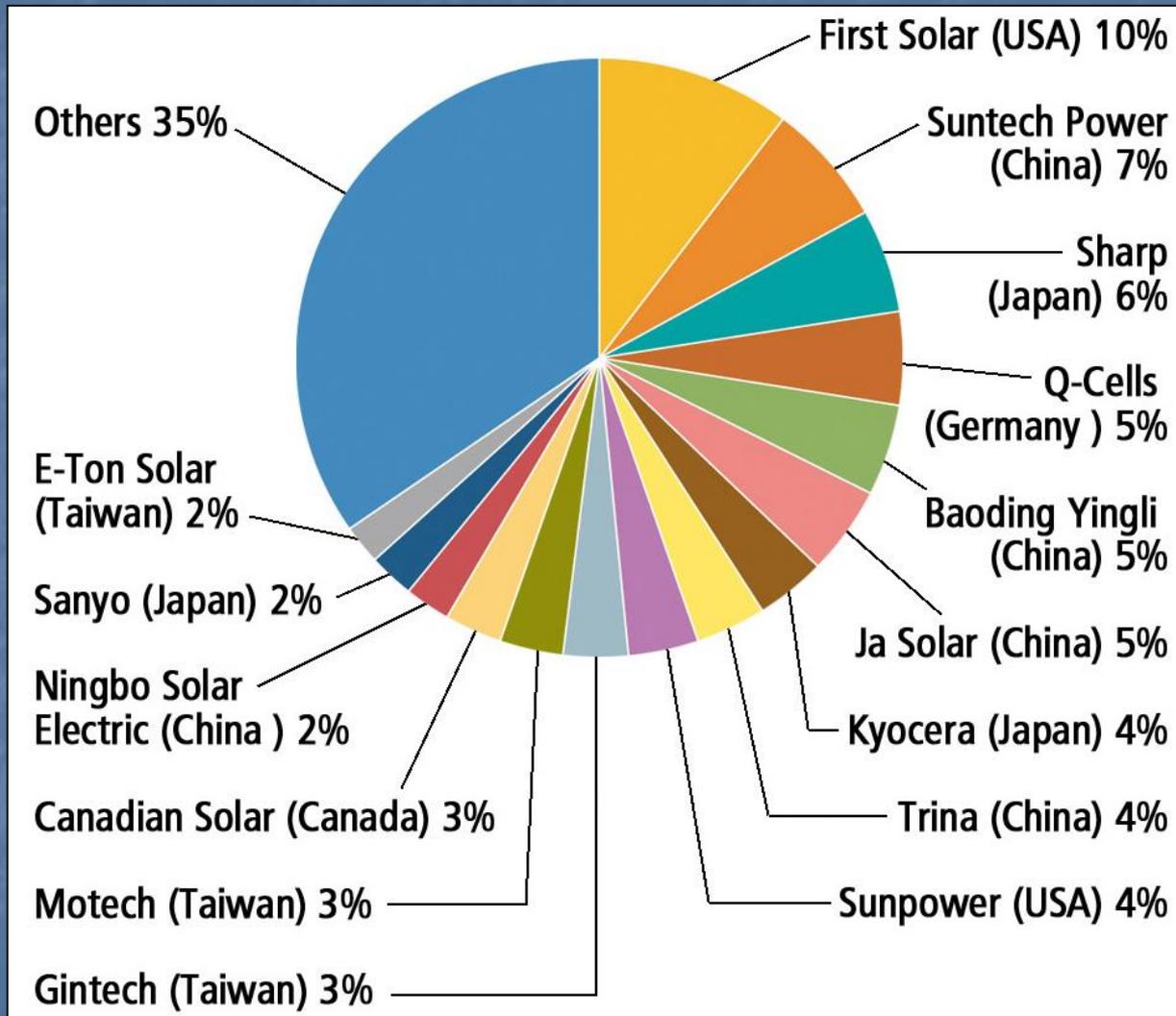
Evolución de la Potencia FV Instalada Mundial

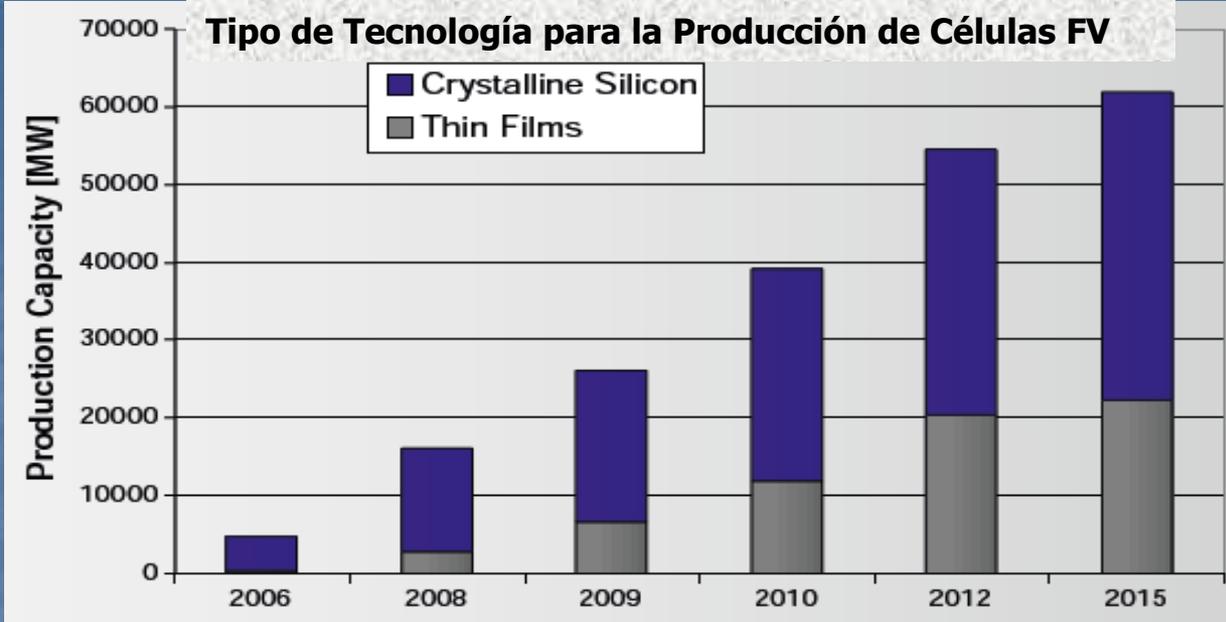


Potencia FV Instalada en 6 países líderes, 2009



Empresas FV Líderes, 2009





En 2008 \approx 80 % de los módulos se basan en el Si c \rightarrow hoy hay también una gran inversión en tecnologías de **Capa Fina** (Si a, CdTe, CIS, CIGS)

SFV de Si c \rightarrow Producto Confiable, Mercado Establecido, 25 años de vida útil.

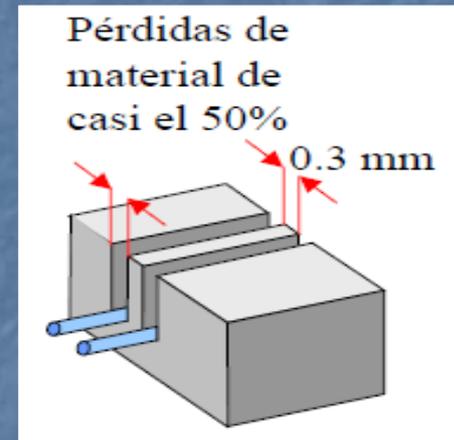
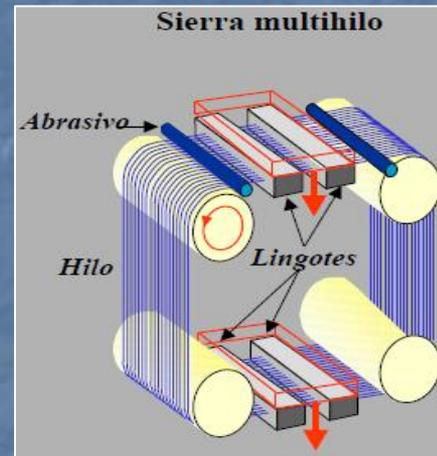
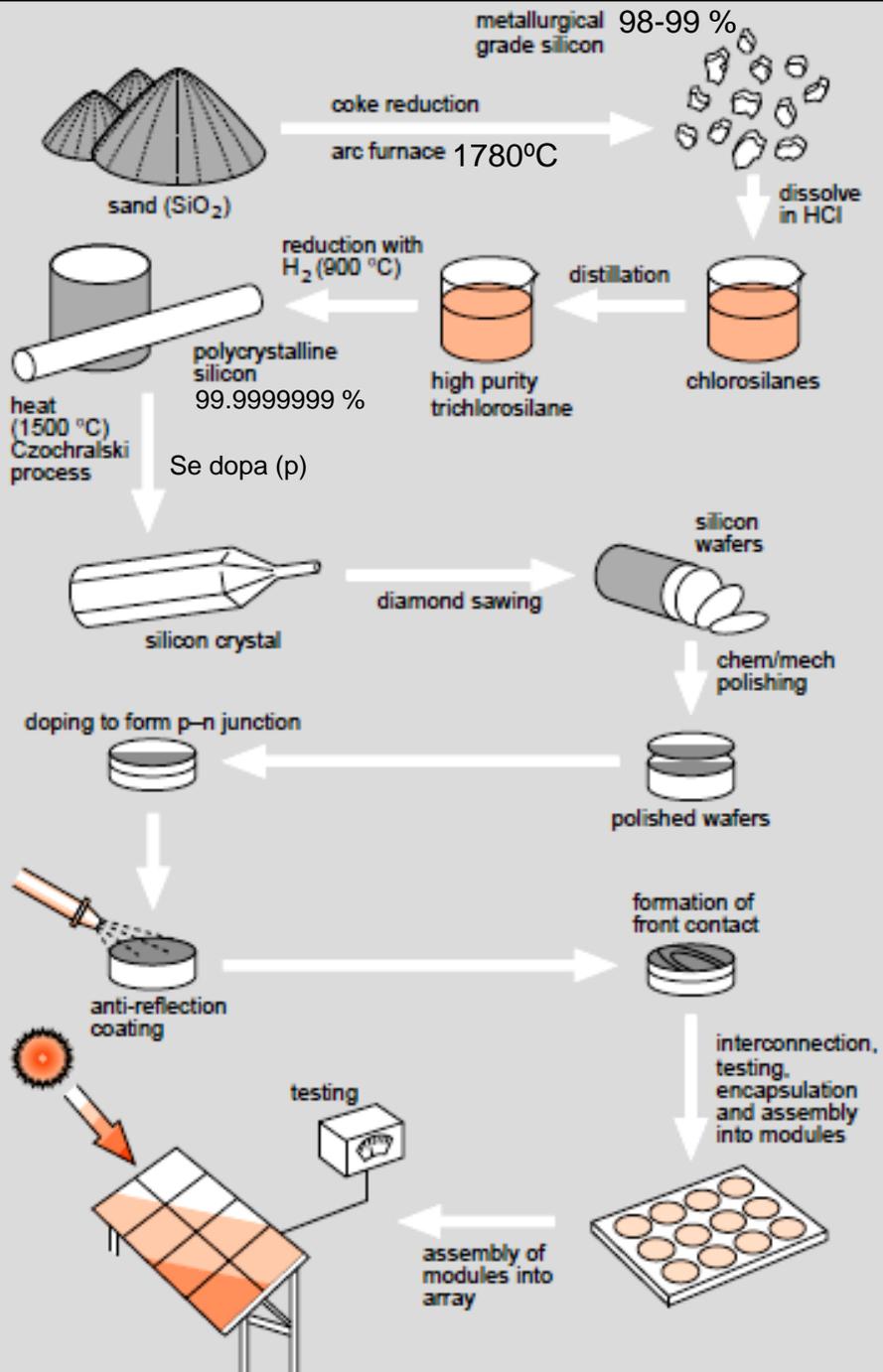
El Si c fue la materia prima dominante en los últimos 30 años debido a:

(+) \rightarrow Abundancia de materia prima SiO₂, Experiencia en la industria electrónica, Posibilidad de Reducción de costos.

Pero:

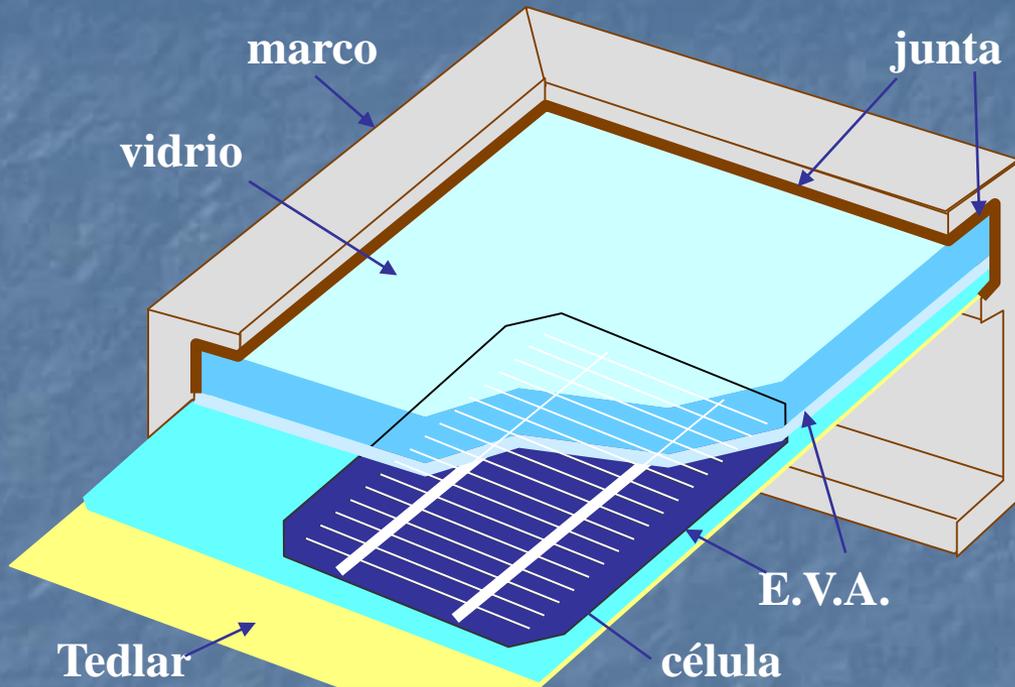
(-) \rightarrow Gran requerimiento de Energía para la obtención del Si c (6000 [kWh/kWp], Pérdida de material en la manufactura de las FC (\approx 50%), Complejidad del Proceso

PROCESO DE FABRICACION DE UN MODULO FV DE Si c



Tiempo de recuperación energética =
 = Energía Invertida [kWh/kWp] /
 Energía Producida Anual [kWh/kWp]
 ≈ 2-4 años (depende tecnología y sitio)

Característica Estructural de un Módulo FV



Materiales

- Vidrio templado (bajo Fe)
- E.V.A. Etileno-Vinil-Acetato
- Tedlar polivinilo fluoruro
- Contactos
- Marcos de Al
- Junta de silicona
- Tornillería inoxidable

Funciones

- Rigidez estructural
- Protección intemperie
 - Fatiga térmica
 - Radiación UV
 - Abrasión
- Aislamiento eléctrico

Efecto FV, Célula y Módulo FV

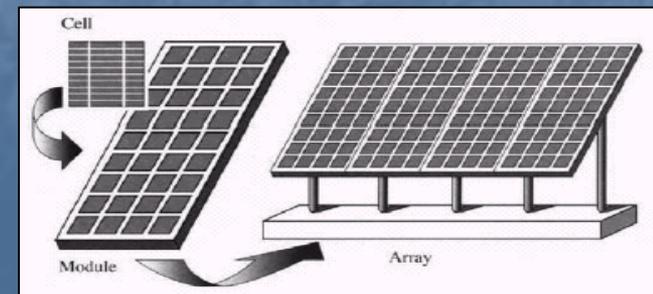
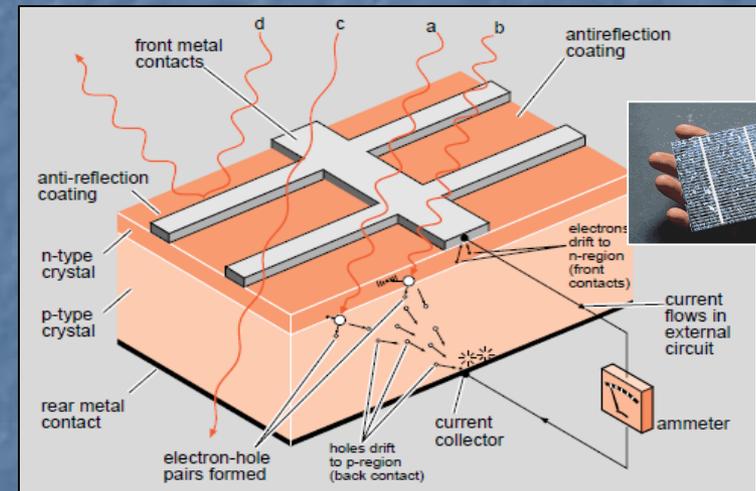
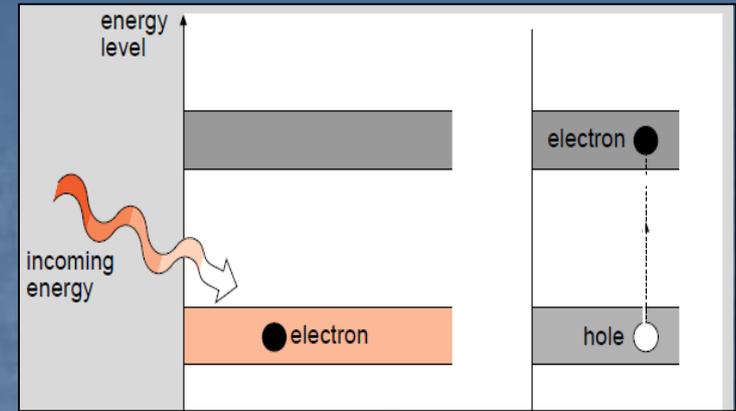
Efecto FV: saltos de electrones en materiales semiconductores cuando se excitan por la radiación solar (fotones o cuantos de luz) → producción de electricidad de forma directa .

Célula FV: Unidad básica donde se produce el efecto FV.

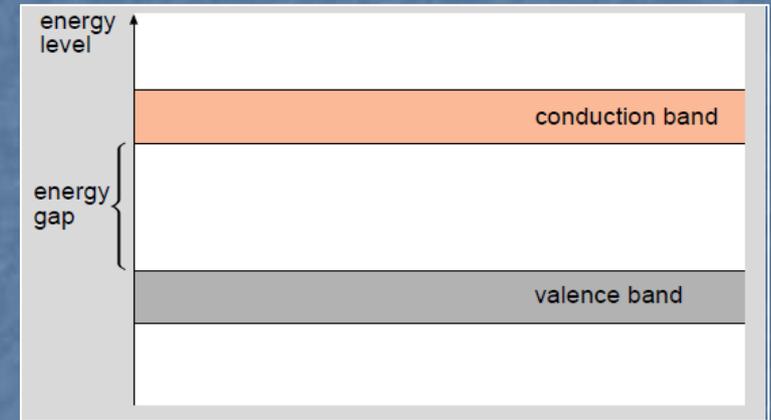
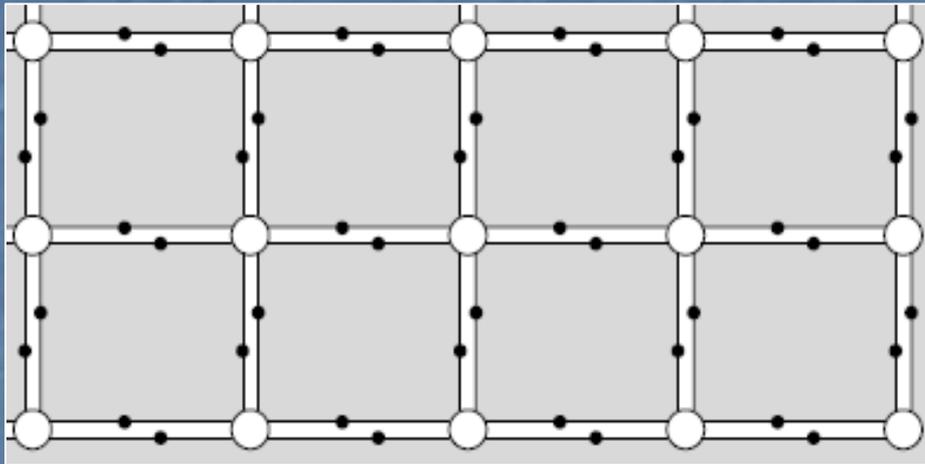
La FC más común → Si-c → dos delgadas láminas de Si ($\approx 300\mu\text{m}$), dopadas con P-Boro y N-Fósforo.

Si es de $10 \times 10 \text{ cm}$ → $\approx 3 \text{ A}$ - $0,5 \text{ V}$ → 1.5 W

Módulo FV: Conexión de FC en serie y/o paralelo (aumenta la U e I) → aumenta la Potencia de salida

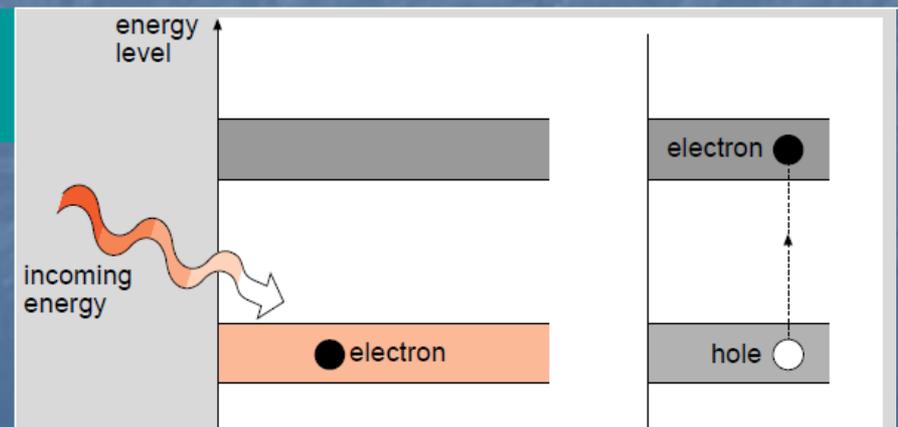


Cristal de Si puro presenta una estructura tetraédrica ordenada con enlaces covalentes entre sus átomos (4 e- en la órbita externa de cada átomo).



¿Qué sucede cuando la luz incide en este material semiconductor?

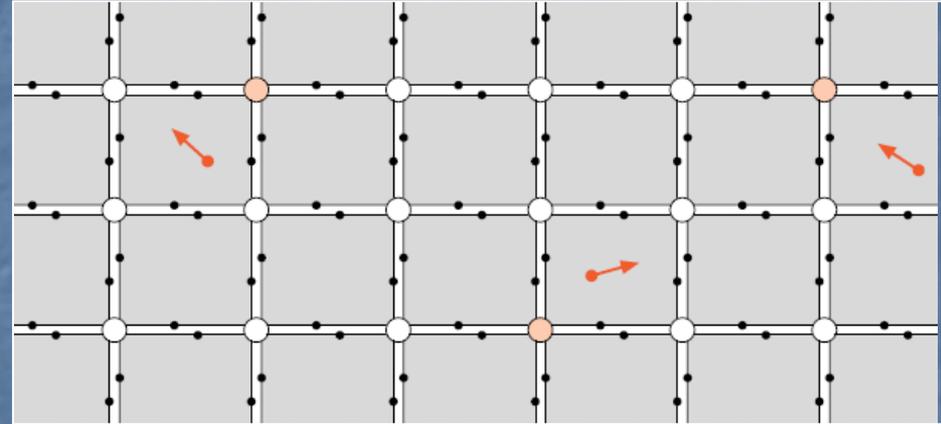
$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$



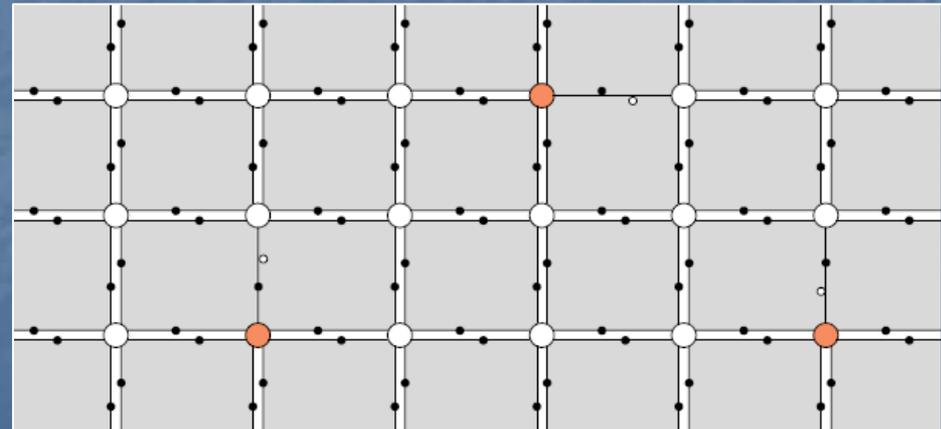
E_{gap} del Si $c = 1.1$ eV

Se deben hacer circular los e- excitados presentes en la BC, antes que se recombinen → se crea una juntura PN con Si tipo P y N y con esta un campo eléctrico que permite que los e- de la BC fluyan en una dirección y los h+ de la BV en la otra.

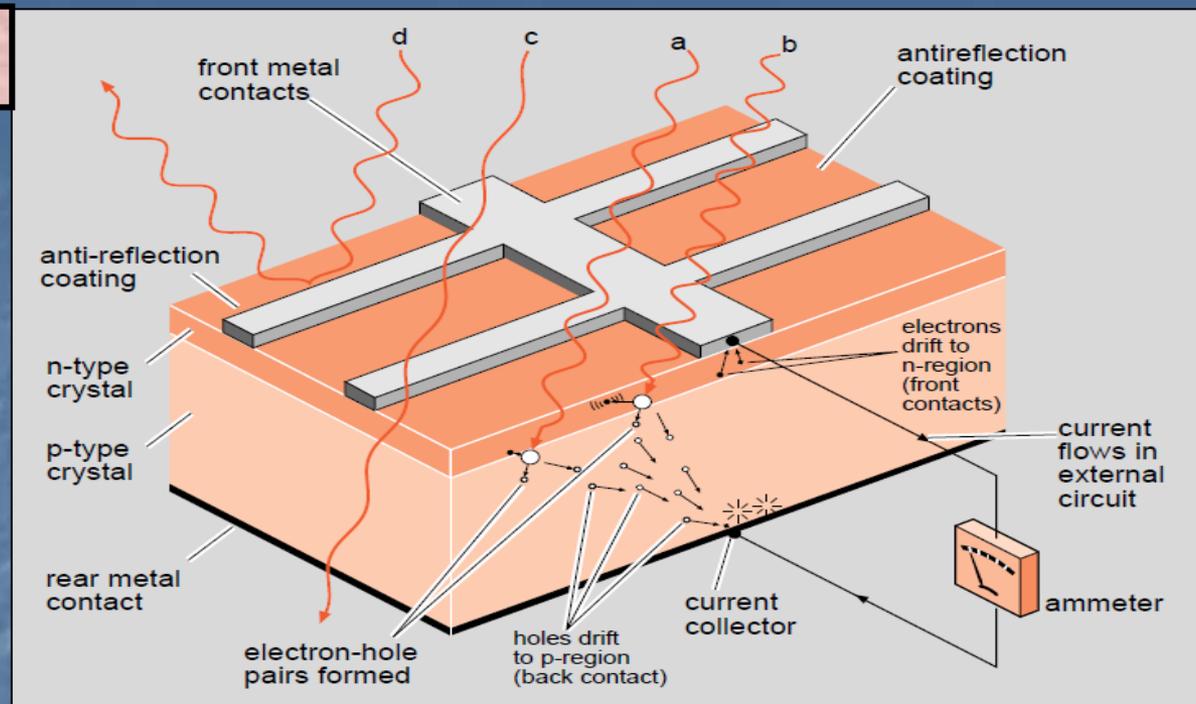
Si tipo N: puede ser creado dopando al Si puro con trazas de p.e. fósforo (5 e- de valencia) → no todos ellos pueden compartir e- en la red cristalina → contiene un exceso de e- libres → tipo N (negativo).



Si tipo P: puede ser creado dopando al Si puro con trazas de p.e. boro (3 e- de valencia) → contiene un exceso de h+ → tipo P (positivo).



Célula FV

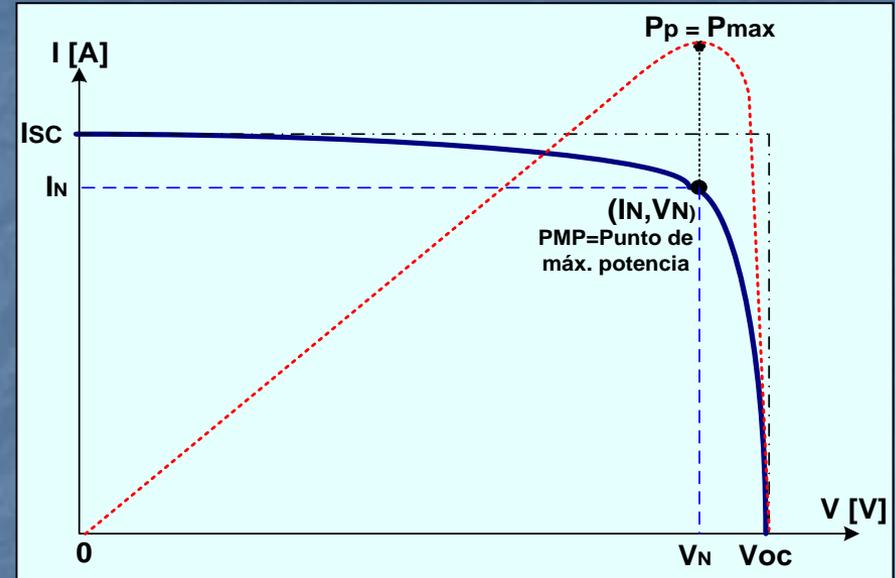
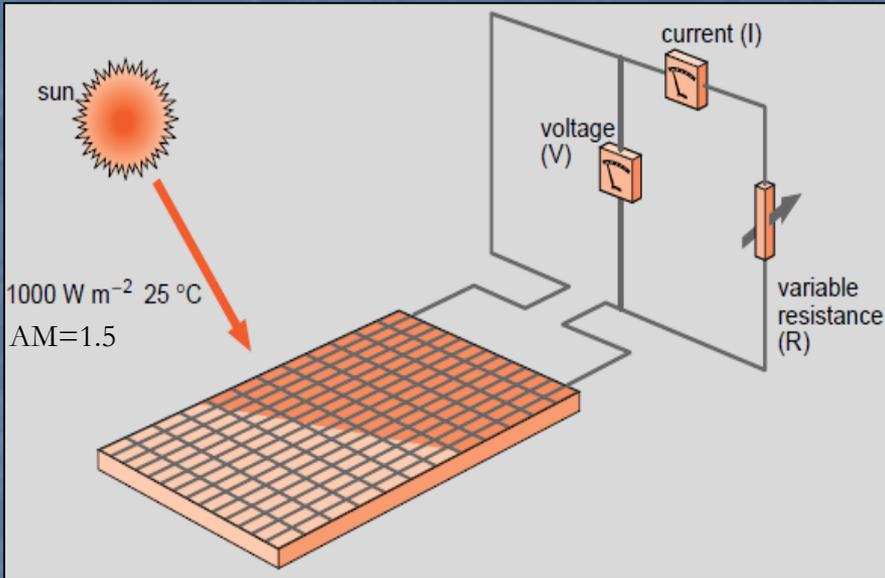


Qué pasa con los Fotones incidentes ?

- $E_{\text{fotón}} = E_g$ del material \rightarrow crea un par e-h $^+$.
- $E_{\text{fotón}} > E_g \rightarrow$ crea un par e-h $^+$ \rightarrow exceso de energía convertido en calor.
- $E_{\text{fotón}} < E_g$ del material \rightarrow no excita los e $^-$ de la BV. Sólo atraviesa y calienta el material. Es un fotón que se gasta.
- En la sup. frontal de la FC, algunos son Reflejados (aún con cubiertas antireflectantes), otros son Bloqueados por los contactos metálicos.

Característica Eléctrica de un dispositivo FV

Curva U-I obtenida según Normas de Ensayo (STC)

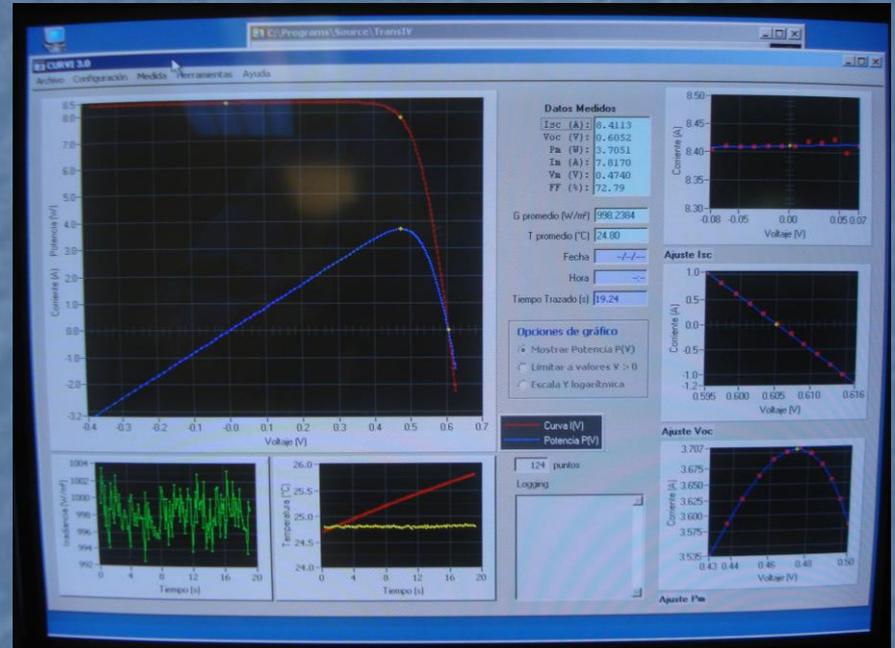
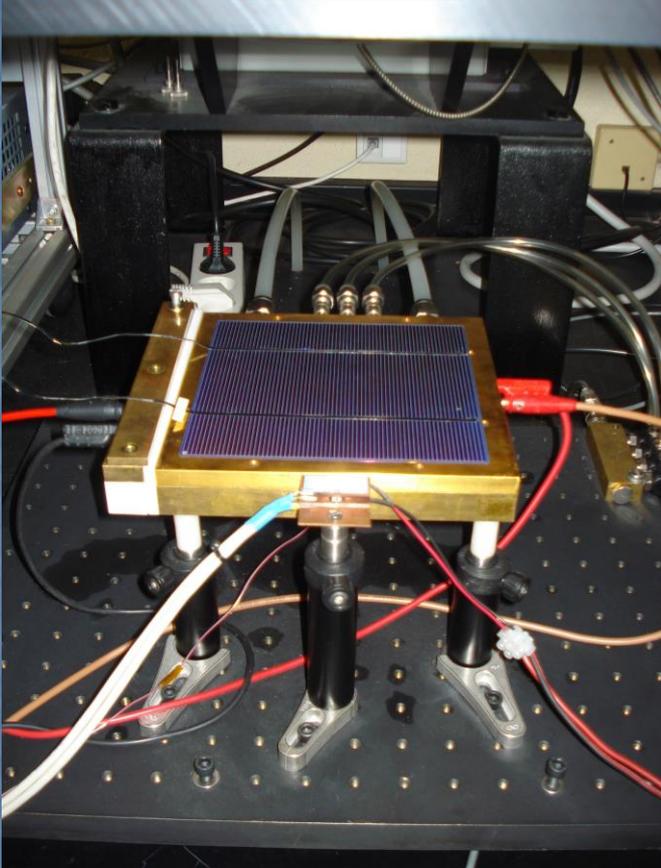


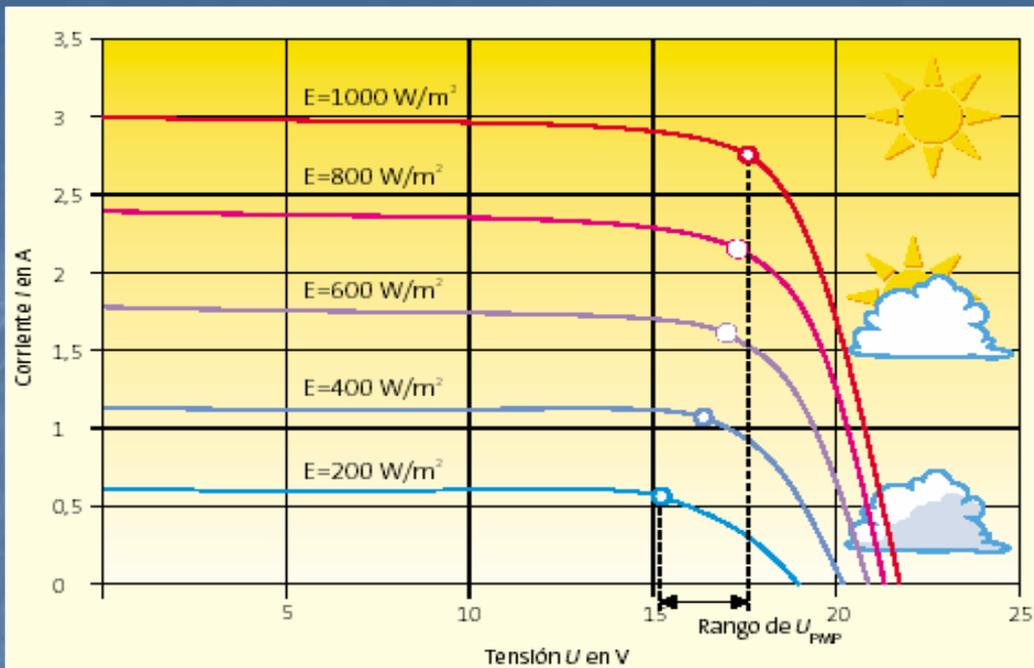
Punto de Máxima Potencia PMP \rightarrow punto de la curva en que el producto de las variables V , I , es máximo $\rightarrow (V_N, I_N)$.

$P_p =$ Potencia Pico $= V_N \times I_N \rightarrow P$ máxima entregada por el dispositivo bajo STC.

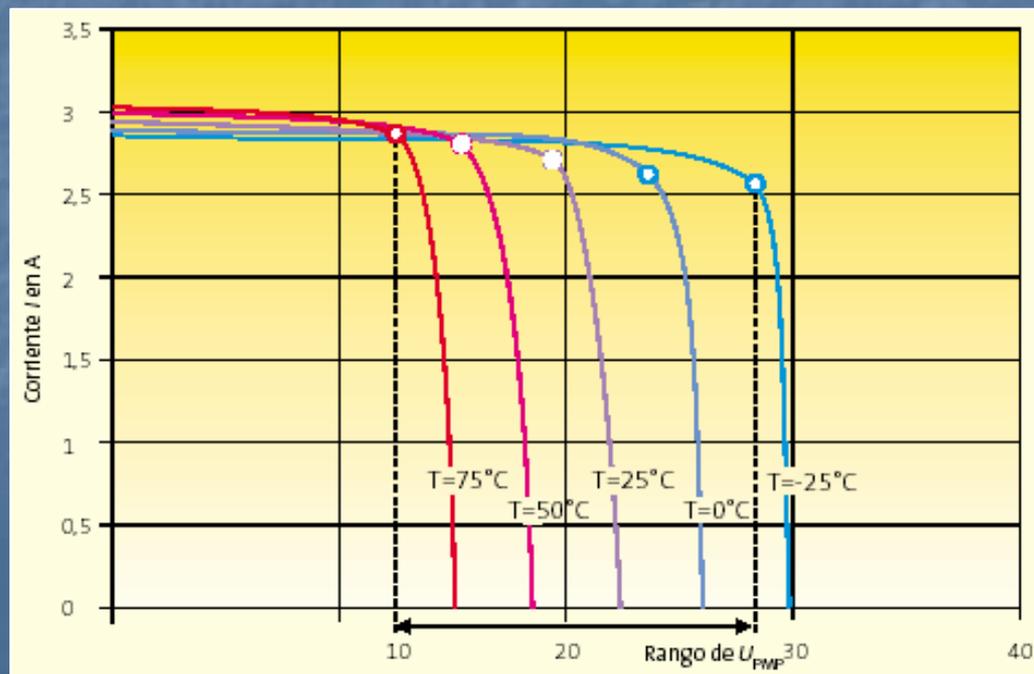
Nota: Bajo STC, el PMP es el punto $(V_N \times I_N)$. Para otras condiciones de irradiancia y temperatura las curvas se modifican, obteniéndose otros PMP.

Obtención de la Curva





- **Condiciones Estándar de Ensayo**
- $G = 1000 \text{ W/m}^2$
- $T_c = 25^\circ\text{C}$
- Incidencia normal
- Distribución espectral AM 1.5

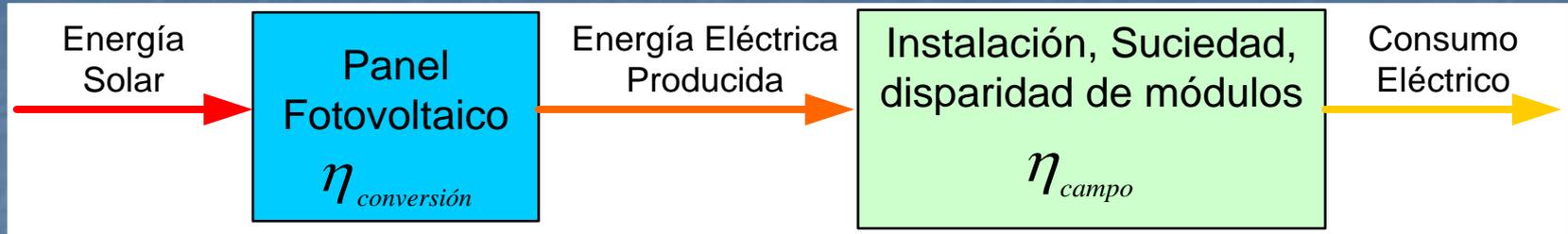


- **Condiciones Estándar de Operación Real**
- $G = 800 \text{ W/m}^2$
- $T_a = 20^\circ\text{C}$
- Incidencia normal
- Distribución espectral AM 1.5
- Velocidad del viento = 1 m/s

$$T_{NOC} = \frac{G}{800} \left(\frac{1}{1 - \beta} \right)$$

T_{NOC} = Temperatura Nominal de Operación de Célula

RENDIMIENTO del Generador FV



Debido al no aprovechamiento de todos los fotones que inciden en la FC, recombinación de pares e-h+, resistencia eléctrica interna, etc, la eficiencia de conversión η es baja

	Rendimiento de una FC [%]	
FC	Laboratorio	Comercial
Si monoc	25	15-17
Si multic	20.4	14-16
Si a	9.6	5-7
AsGa cristalino	25.1	
Capa Fina CIGS	19.4	
Capa Fina CdTe	16.7	

$$\eta_{conversión} = \frac{P_N [W]}{G[W / m^2] * A[m^2]}$$

El rendimiento de una FC o módulo bajo STC:

$$\eta_{\text{conversión}} = \frac{P_{\text{eléctrica-en-el-PMP}}}{P_{\text{RadiaciónSolar}}} = \frac{V_N [\text{V}] I_N [\text{A}]}{G \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] x A [\text{m}^2]} \longrightarrow \eta_c = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{G x A}$$

FF = factor de llenado de la curva característica U-I

Según datos usados, encontrar el η de conversión de una FC de Si m

$$\eta_c = \frac{0.6 x 3 x 0.75}{1000 x 0.01} \longrightarrow \eta = 0.135$$

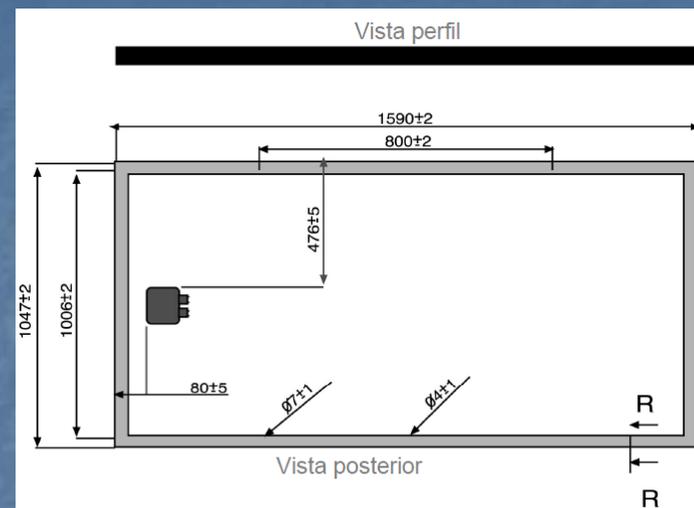
Características de un Módulo FV Comercial Isofotón: IS-200/32 (200 Wp)

Físicas

DIMENSIONES	1.590 x 1.047 x 39,5 mm
PESO	22,0 Kg
CONDICIONES DE EMBALAJE	4 módulos por caja
TAMAÑO CAJA EMBALAJE	1.720 x 1.170 x 230 mm

Constructivas

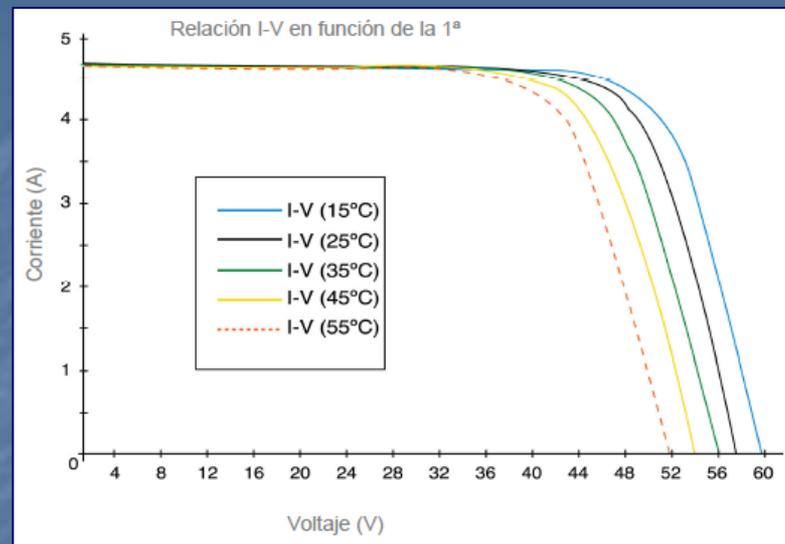
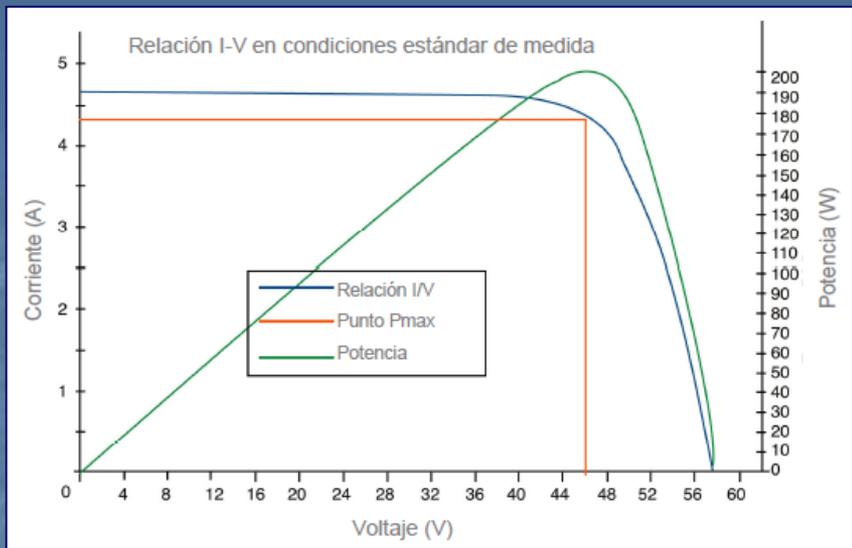
TIPO DE CÉLULA: Si MONOCRISTALINO, TEXTURADA Y CON CAPA ANTIRREFLEXIVA	125 x 125 mm
CONTACTOS	Contactos redundantes, múltiples, en cada célula
Nº DE CÉLULAS EN SERIE	96
Nº DE CÉLULAS EN PARALELO	1
LAMINADO	EVA (etilen – vinil acetato)
CARA POSTERIOR	Protegida con Tedlar de varias capas
CARA FRONTAL	Vidrio templado y microestructurado de alta transmisividad
MARCO	Aluminio anodizado
TOMA DE TIERRA	Sí
CERTIFICACIONES	IEC 61215, Clase II mediante certificado TÜV, CE



Caja de Conexión

MEDIDAS (LARGO X ANCHO X ALTURA)	100 x 110 x 30 mm
CAJAS DE CONEXIÓN	1 x IP 65 con diodo de bypass
TERMINAL DE CONEXIÓN	Bomera atomillable con posibilidad de soldadura
CABLES (*)	400 mm (+); 1.000 mm (-); 4 mm ²

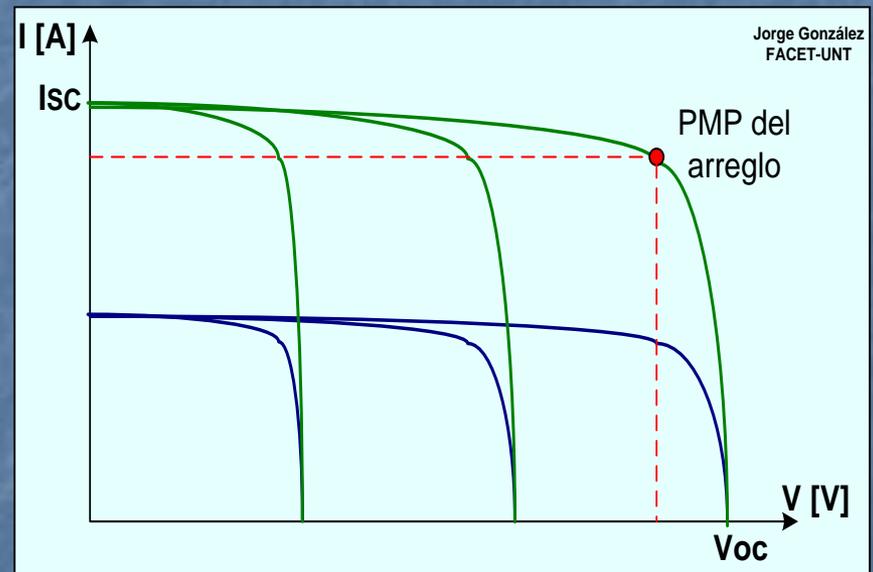
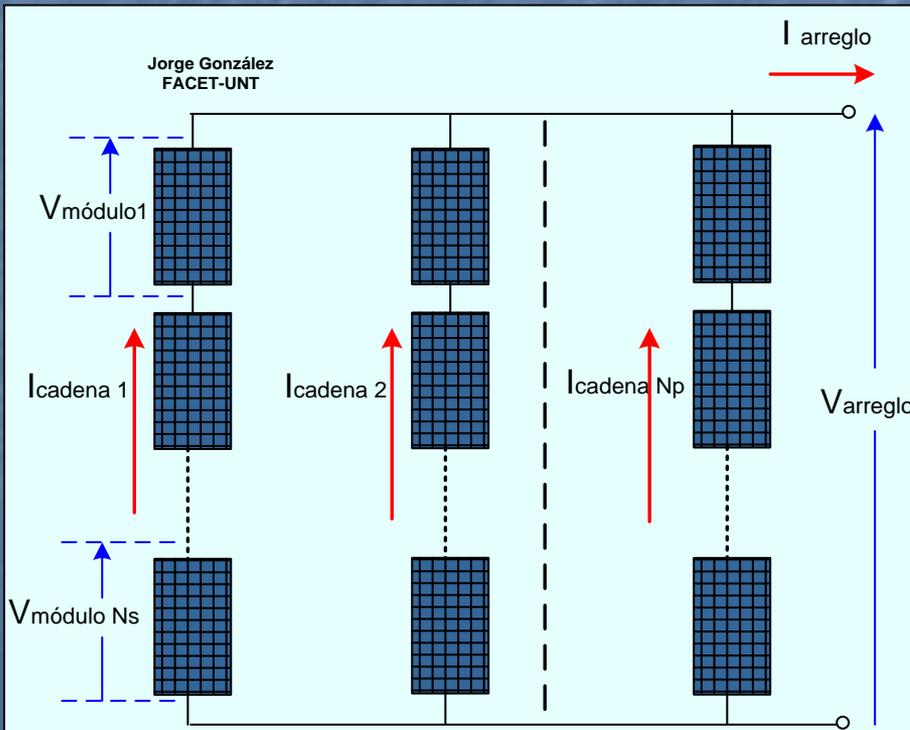
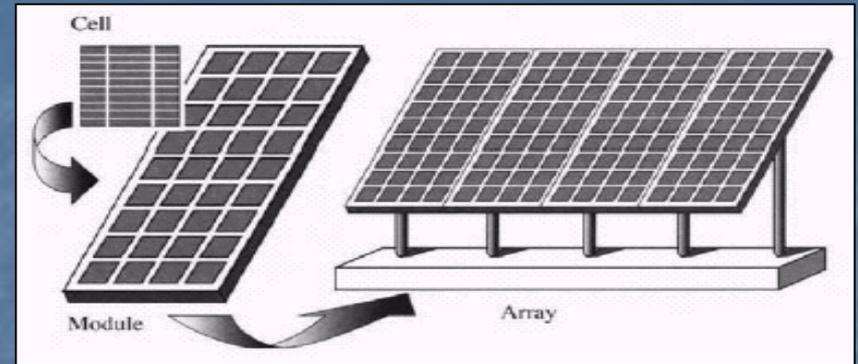
Características Eléctricas



POTENCIA MÁXIMA (P_{MAX})	200 Wp +/- 5%
CORRIENTE DE MÁXIMA POTENCIA (I_{MAX})	4,35 A
TENSIÓN DE MÁXIMA POTENCIA (V_{MAX})	46,08 V
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (I_{SC})	4,7 A
TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO (V_{OC})	57,6 V
TONC (800 W / m ² , 20° C, AM 1.5, 1 m / s)	47° C
MÍNIMO VALOR DEL FUSIBLE EN SERIE	10 A
TENSIÓN MÁXIMA DEL SISTEMA	760 V

Conexión serie paralela de módulos

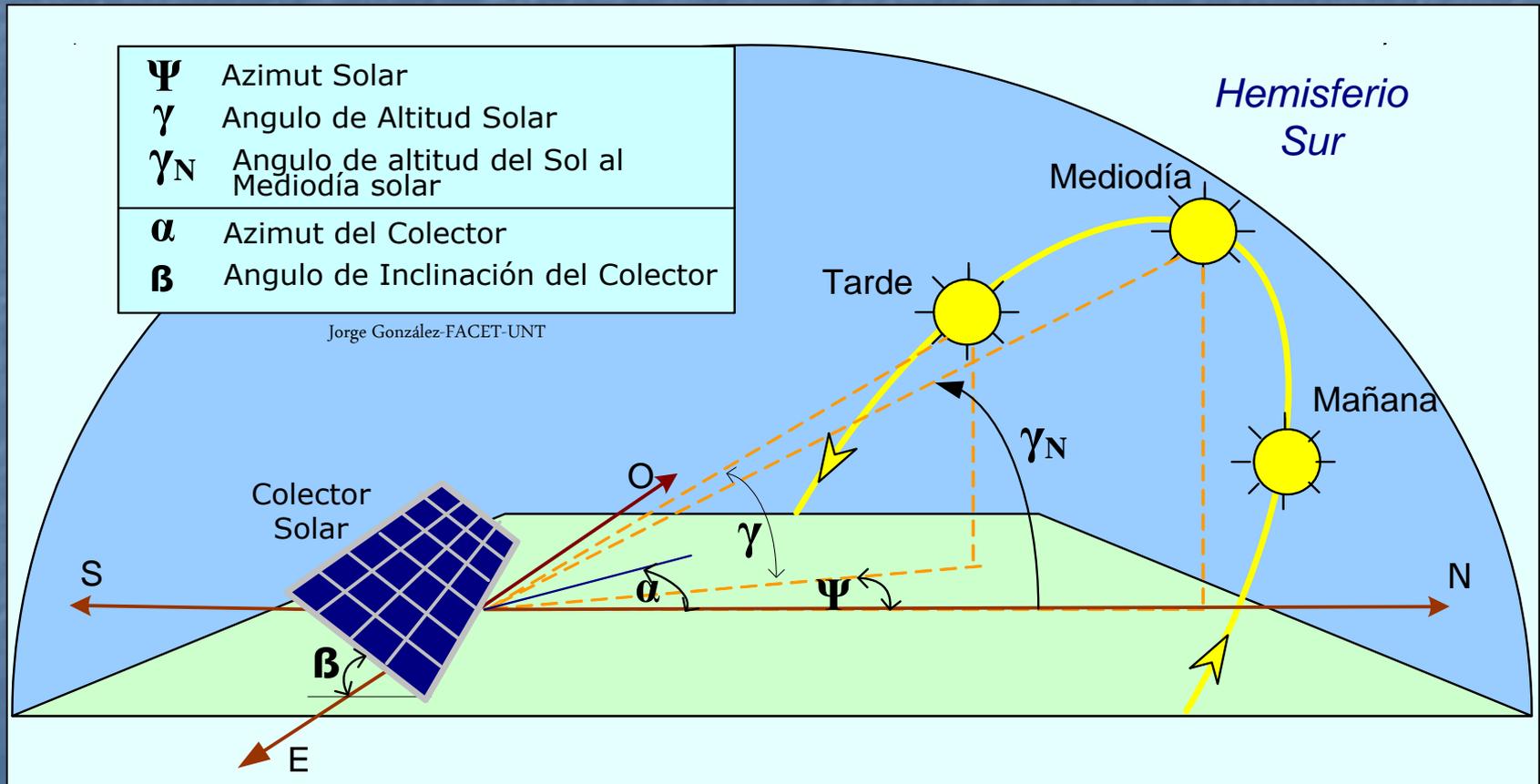
Para aumentar la potencia del arreglo FV, se conectan los elementos FV en serie (aumenta la U) y en paralelo (aumenta la I)

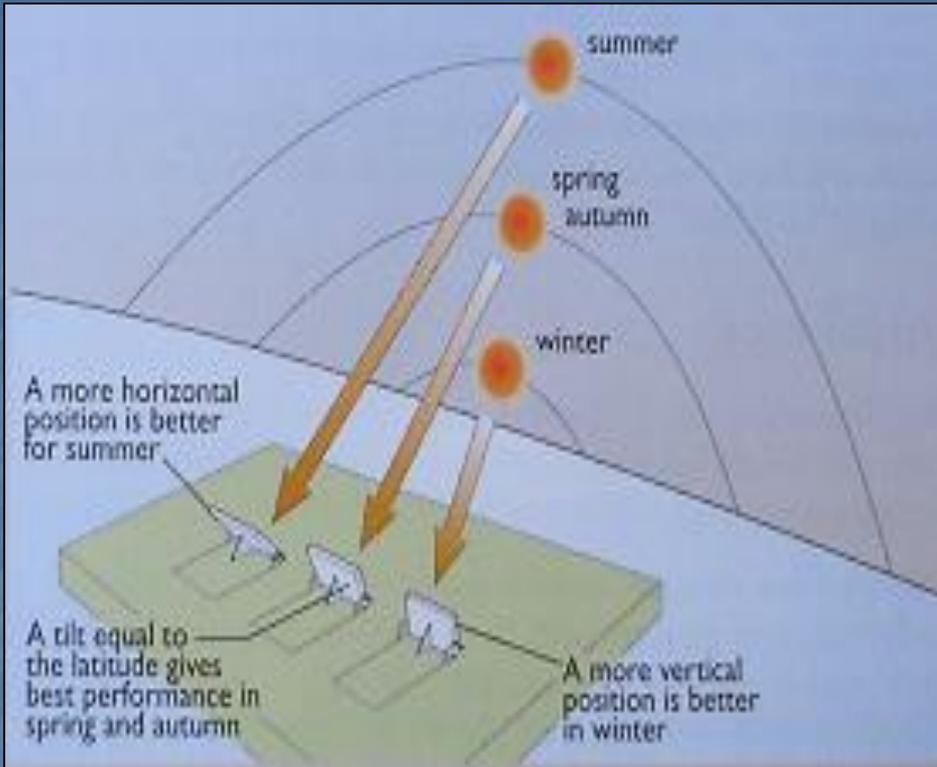


PMP de un arreglo formado por una cadena de tres elementos FV conectados en serie y dos cadenas en paralelo

Módulo FV sin y con Seguidor Solar

Si se tiene un Módulo FV fijo, la irradiación solar será diferente a lo largo del día y del año → *Energía Eléctrica Producida 1 = E1*





Colectar la máx. cantidad de energía

a) Anual:

Inclinac. del Colector Solar = $\beta = L$

Azimuth del Colector = $\alpha = 0^\circ$

b) En Invierno:

$\beta \approx L + 10^\circ$

$\alpha = 0^\circ$

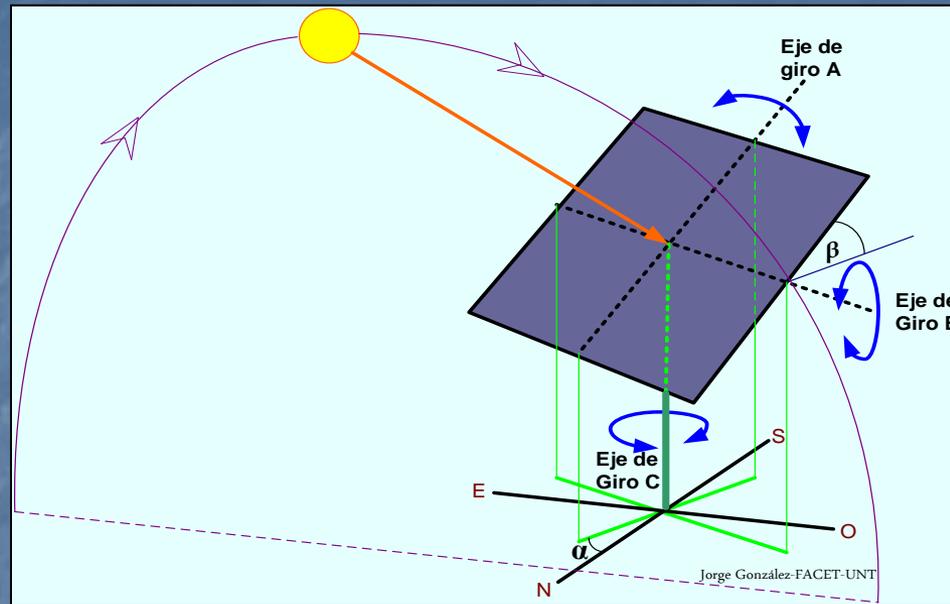
c) En Verano:

$\beta \approx L - 10^\circ$

$\alpha = 0^\circ$

La radiación anual colectada es poco sensible a pequeñas variaciones de β y α

Seguidor Físico del Sol



Seguidor de dos ejes: se mueve cambiando dos ángulos.
El colector siempre queda normal a la radiación directa del Sol.

Seguidor de un eje: se mueve cambiando un ángulo

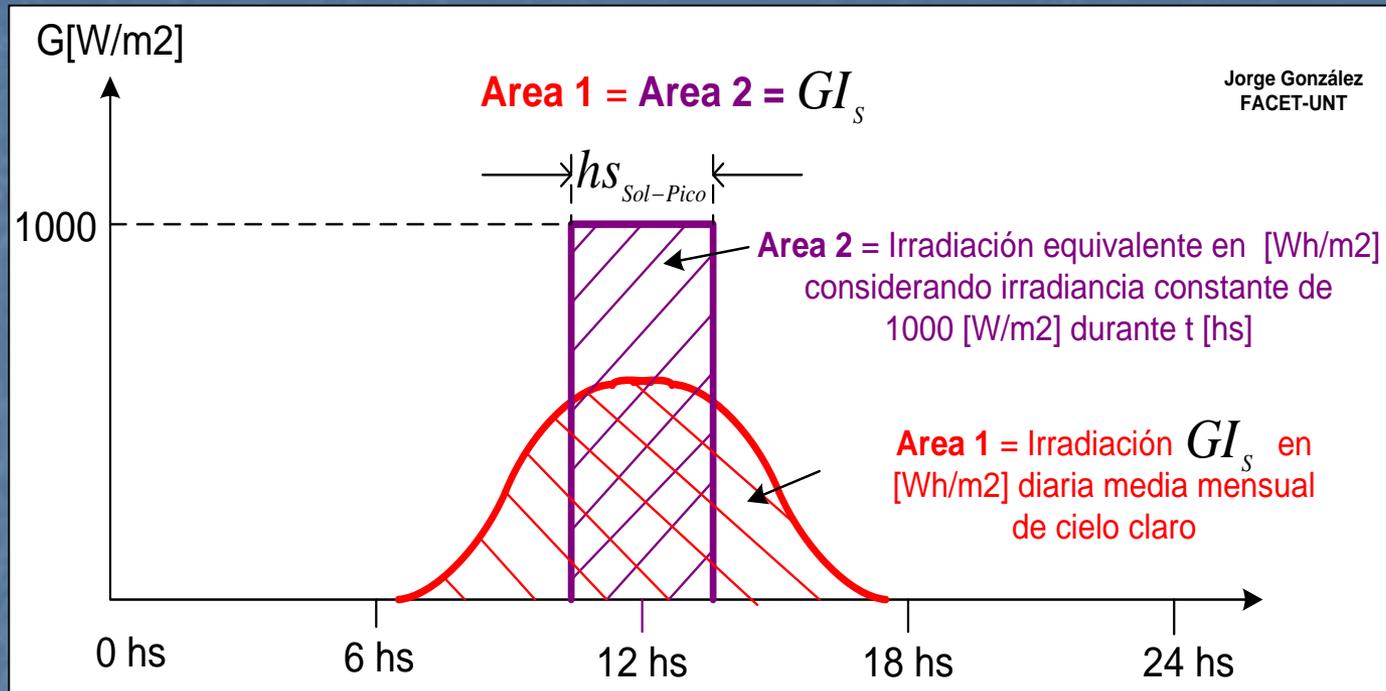
Energía obtenida \rightarrow ***Energía Eléctrica Producida 2 = E2***

Ganancia de Energía \rightarrow ***E2 - E1*** (Puede alcanzar hasta un 35 %)

Se justifica la inversión?

SFV entre 10-100 kW con seguimiento \rightarrow \approx 6% más caro que uno fijo

Estimación de la energía entregada por un GFV mediante la aproximación “Hora Pico”



$$E_{G \text{ sistema},d} = P_N \times [h_{s_{\text{SolPico}}} / \text{día}] * PR$$

Dado un SFV de 3,3 kWp, una Irradiación diaria media anual de 5 $[\text{kWh/m}^2 \text{ día}]$ y un rendimiento de la instalación del 80% (PR), Cual es la energía producida en el año?

$$E_{G \text{ sistema},\text{año}} = P_N \times [h_{s_{\text{SolPico}}} / \text{día}] * PR * 365 = 3,3 \text{ kW} * 5 \text{ h} / \text{d} * 0.8 * 365 \text{ d} \approx 4800 \text{ kWh} / \text{año}$$

ESTADO ACTUAL

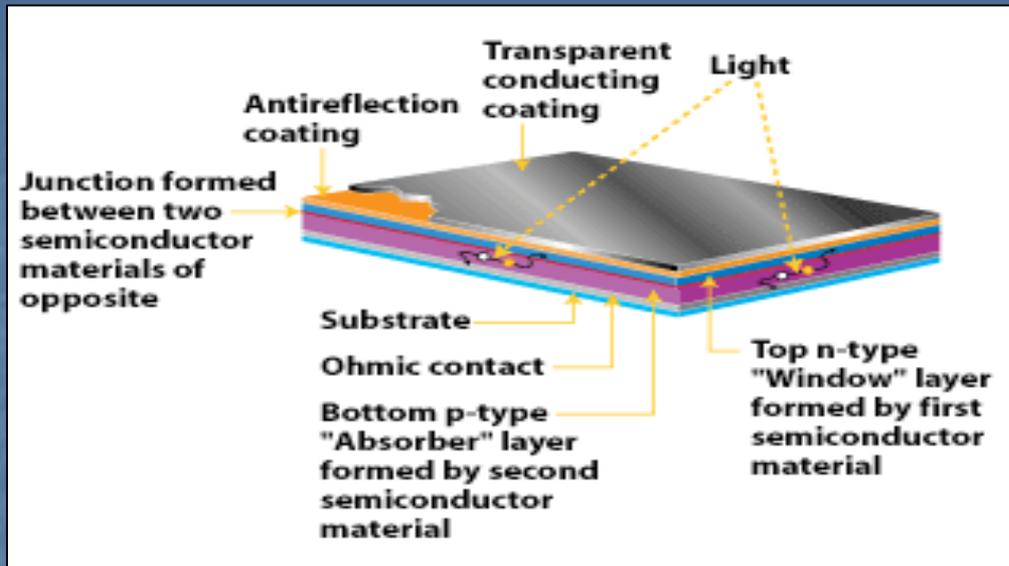
Etapla Comercial ya Madura → FC de Si c y Dispositivos de Capa Fina (Si a, CIS, CIGS, CdTe).

Etapla Inicial de Comercialización → FC de alto rendimiento (son muy caras) de una juntura (GaAs) y múltiple juntura (Ga, Indio, Fósforo, Germanio, elementos de la columna III y V de la Tabla Periódica).
Uso de Sistema Concentrador.

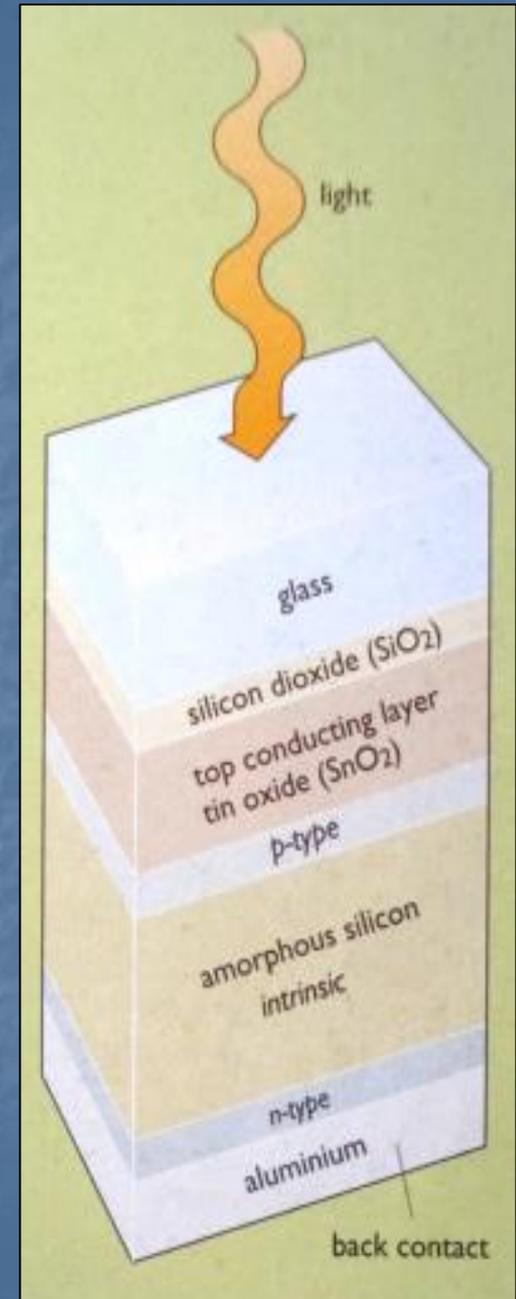
Investigación Avanzada: FC Solares Orgánicas (polímeros orgánicos conductores o pequeñas moléculas orgánicas para la absorción de la luz y el transporte de carga) y Tinte Fotosensible (sistema foto-electroquímico, formado por un ánodo fotosensible y un electrolito).

Concepto Nuevo: Nanotecnología

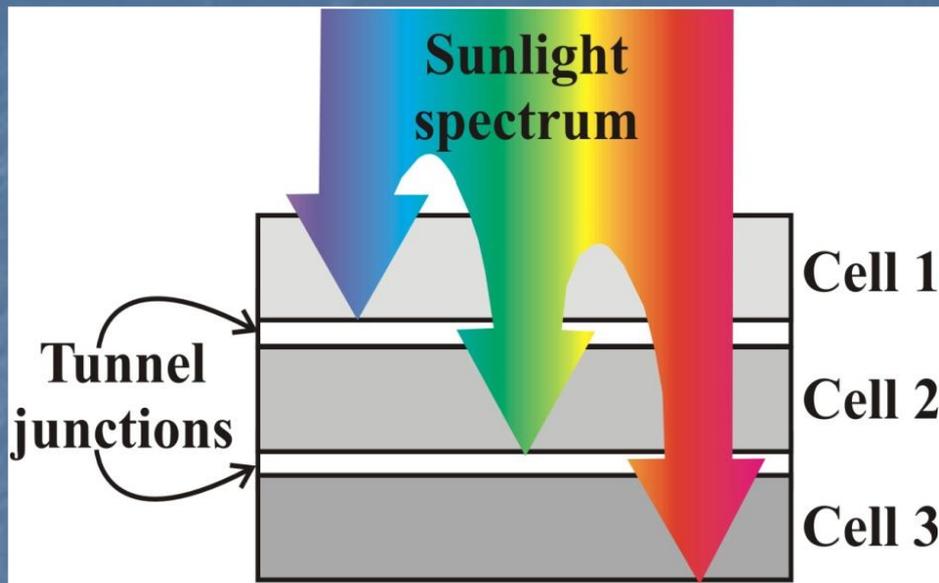
CAPA FINA



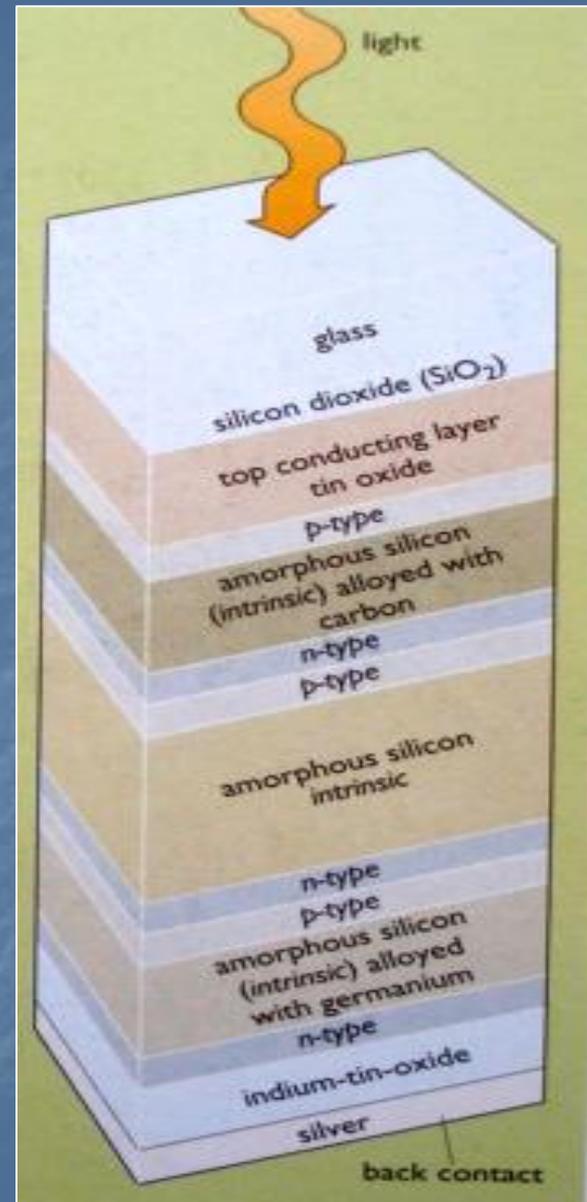
- El módulo es una simple unidad. Espesor de la capa de 1 a 10 μm . Requiere menos material activo, que se puede depositar sobre vidrio, acero, plástico.
- Manufactura de bajo costo en producción a escala.
- Menos η que la tecnología cristalina (se necesita mayor superficie para una misma performance).
- No presenta una red de conductores al frente, tiene una capa de óxido conductor transparente.



CELULA MULTIUNION



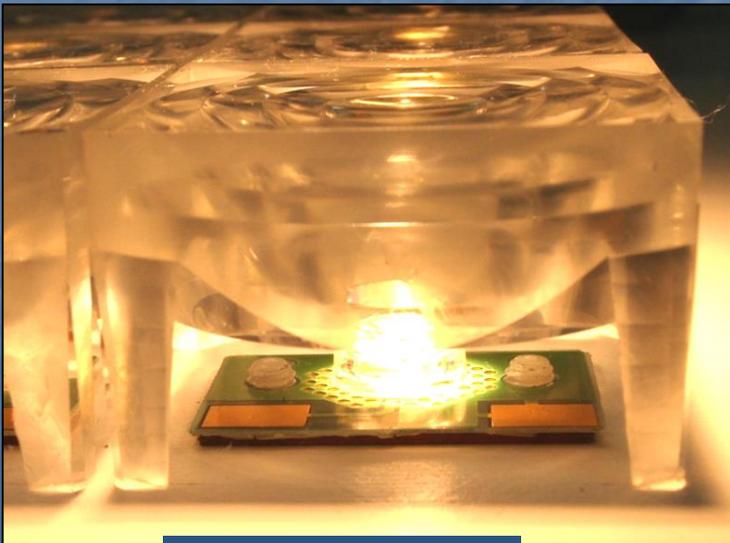
Célula multiunión: pila compacta de células de bandas prohibidas diferentes. La célula "1", tiene la mayor E_g (azul). Sucesivamente los E_g van disminuyendo. Esto permite absorber mucha energía del espectro solar, con un alto η de conversión.



SISTEMA DE CONCENTRACION

Concentra radiación solar directa en una pequeña superficie de una FC (en general de gran η). En FC de alto η en tándem $\approx 41\%$. Substituye FC muy cara, por sistema óptico de concentración mas barato. Los η son superiores en un 30% respecto de tecnologías sin concentración. Su costo sigue siendo alto 0.30 a 0.38 [euros/kWh]

Las concentraciones se pueden dividir en muy altas > 300 soles (luz que cae en 300 cm^2 de óptica y es enfocada sobre 1 cm^2 de material FV), o medianas y bajas, entre 2 y 300. Hay un límite a la concentración dada por la R serie de la FC. El sistema requiere seguidor solar y refrigeración (plato de Cu del tamaño del área óptica o circulación de aire). Para maximizar beneficio debe estar situado en regiones de alta insolación.



Lente Fresnel



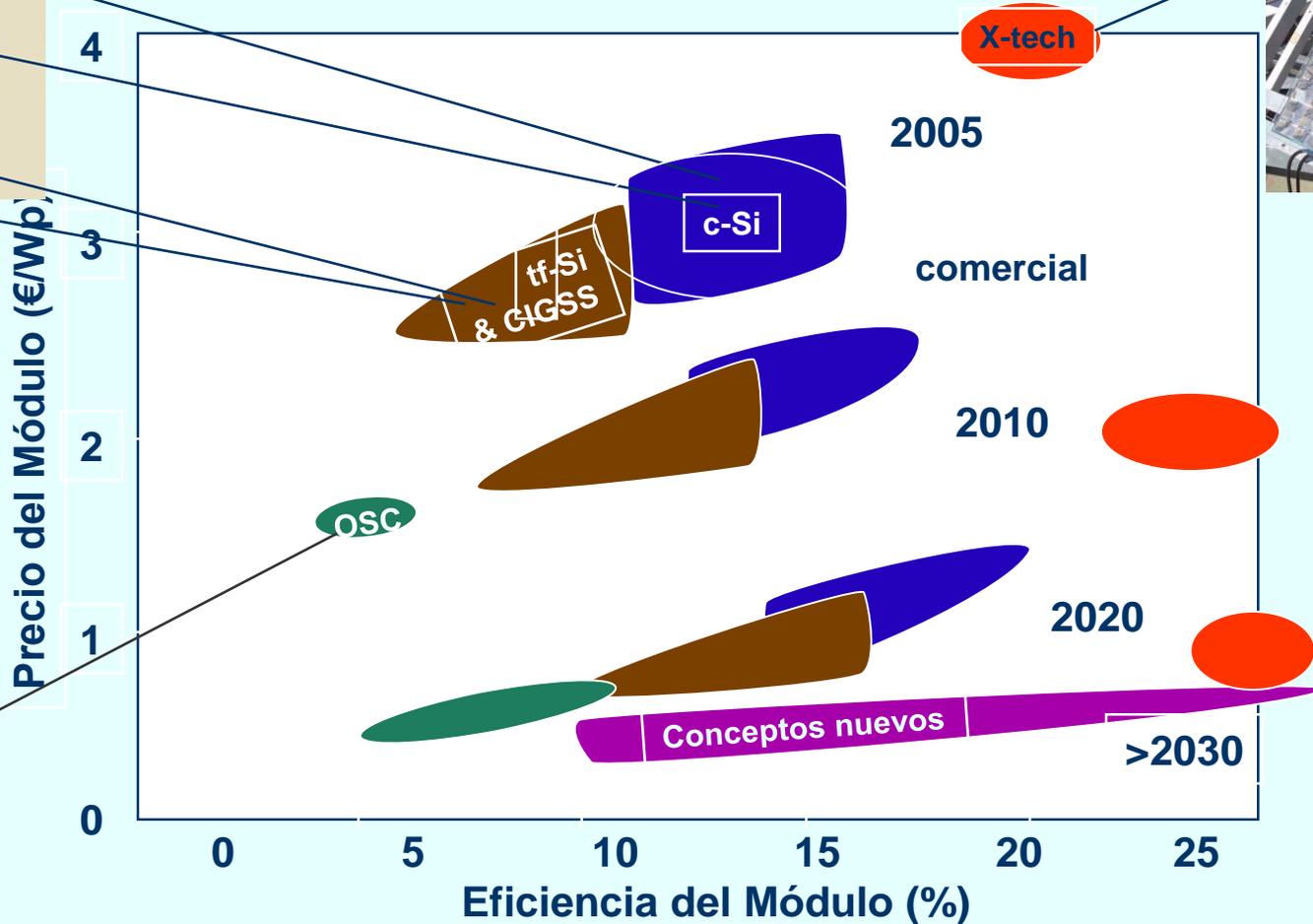
Sistema FV con Concentrador

Multiplicidad de tecnologías FV

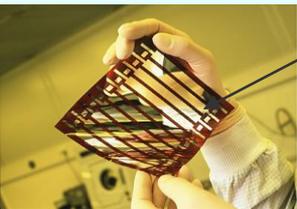
Si c y Capa Fina



Sistemas de Concentración



Orgánicas

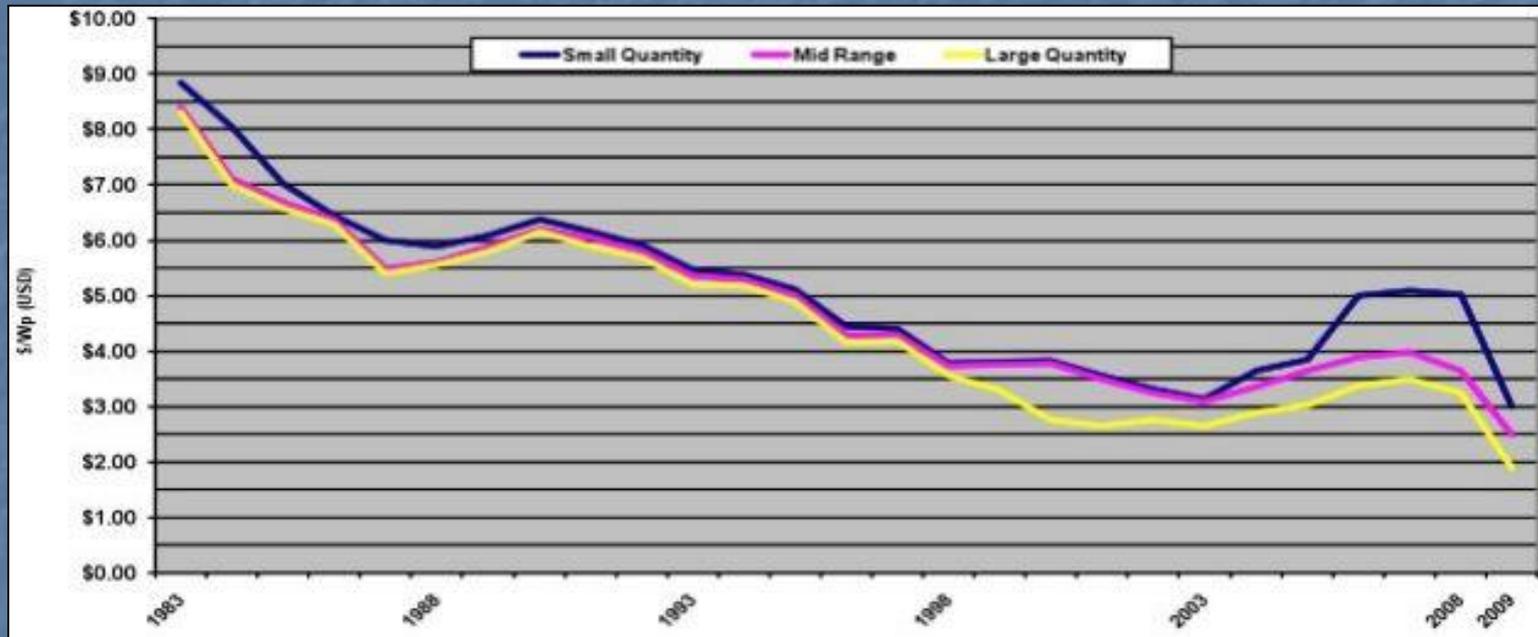


COSTOS

- SFV \approx 60 % más baratos que en los 90.
- El costo de todo el sistema \approx 5-6 [euros/Wp] en instalaciones conectadas a red.
- Instalación familiar de 4 kWp \approx 24000 euros
- Un SFV sin apoyo del estado recupera su capital en \approx 9 años. Con apoyo en \approx 5 años (considerando una vida útil de \approx 25-30 años).
- Central FV muy costosa 5000-7000 [U\$/kW instalado], 16-25 [cU\$/kWh].
- La E producida es unas 4-5 veces más cara que en un sistema convencional.

Objetivo: Reducir Costos y Elevar Eficiencia de Conversión → Encontrar nuevos materiales activos, disminuir materia activa empleada, disminuir energía de procesamiento del material y manufactura, modificar radiación solar incidente

Evolución del precio de los Módulos FV



ALGUNOS IMPACTOS AMBIENTALES

Son función del tipo y tamaño de células utilizada y del tipo de proyecto.

mayor cantidad de SFV → mayor cantidad de residuos (celdas + baterías)

Impactos en las Diferentes Fases

➤ *Fase de Fabricación de las células FV*: Algunos materiales usados son tóxicos y peligrosos. Riesgos similares a los de una industria química. Algunos tipos de celdas como las CdTe y CIS utilizan minerales cuyas reservas son escasas. La energía usada es muy alta

➤ *Fase Constructiva*: En grandes centrales FV → efecto sobre el ecosistema

➤ *Fase Operacional*: Impactos visuales

➤ *Fase de Desarme de las instalaciones*: Disposición final de las baterías (sistemas aislados) y celdas CdTe puede suponer un riesgo a la salud pública (alta toxicidad del Cd), aunque el Cd está presente en bajas concentraciones en los módulos FV .

La mayor parte de los potenciales IA asociados a las celdas FV son moderados (si se asume que se trabajará con una buena gestión ambiental)

Se deben desarrollar empresas que reciclen metales pesados provenientes de estos sistemas, para reducir el enterramiento de estas sustancias.