



Universidad Nacional Autónoma de México  
Centro de Investigación en Energía

## CURSO-TALLER SISTEMAS FOTOVOLTAICOS



# CELDA SOLARES



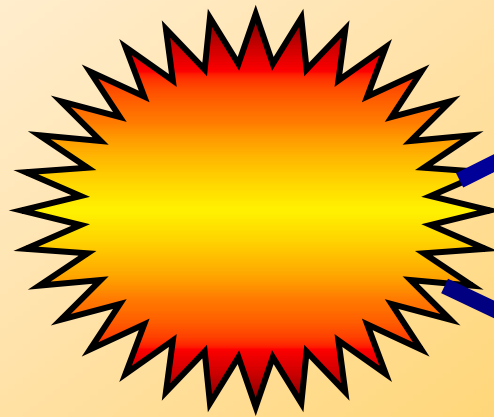
# El sol...



***El sol, emite  $3.85 \times 10^{28}$  J/s de energía luminosa que se propaga en el espacio interplanetario y solo una fracción relativamente pequeña es interceptada por la tierra, pero ¡suficiente para perfilarse como la fuente primordial energética del planeta!***

**Energía renovable universal responsable de:**

- ✓ **Energía del viento**
- ✓ **Hidroeléctrica**
- ✓ **Maremotríz**
- ✓ **Biomasa**



**Procesos fototérmicos**

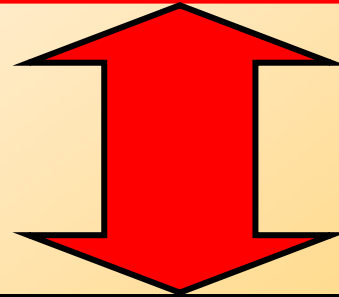
**Procesos fotovoltaicos**



# El efecto fotovoltaico



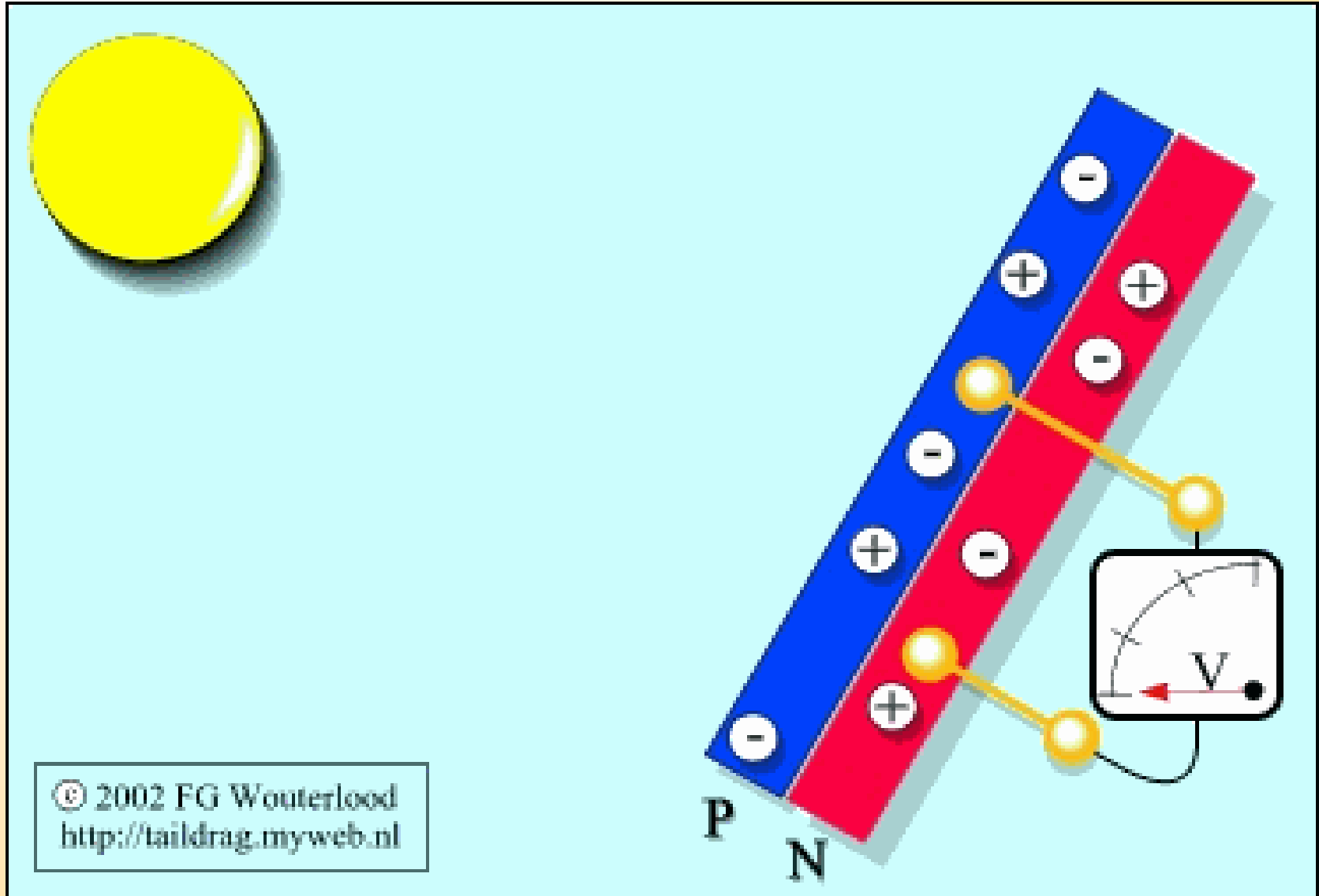
***El Efecto fotovoltaico consiste en la generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar.***



**Los dispositivos que generan energía a través del efecto fotovoltaico se llaman generadores fotovoltaicos y la unidad mínima donde se lleva a cabo dicho efecto se llama  
CELDA SOLAR**



# La Generación Fotovoltaica



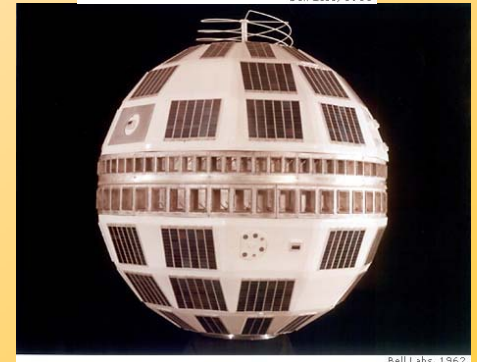
© 2002 FG Wouterlood  
<http://taikdrag.myweb.nl>



# El nublado pasado de la energía fotovoltaica



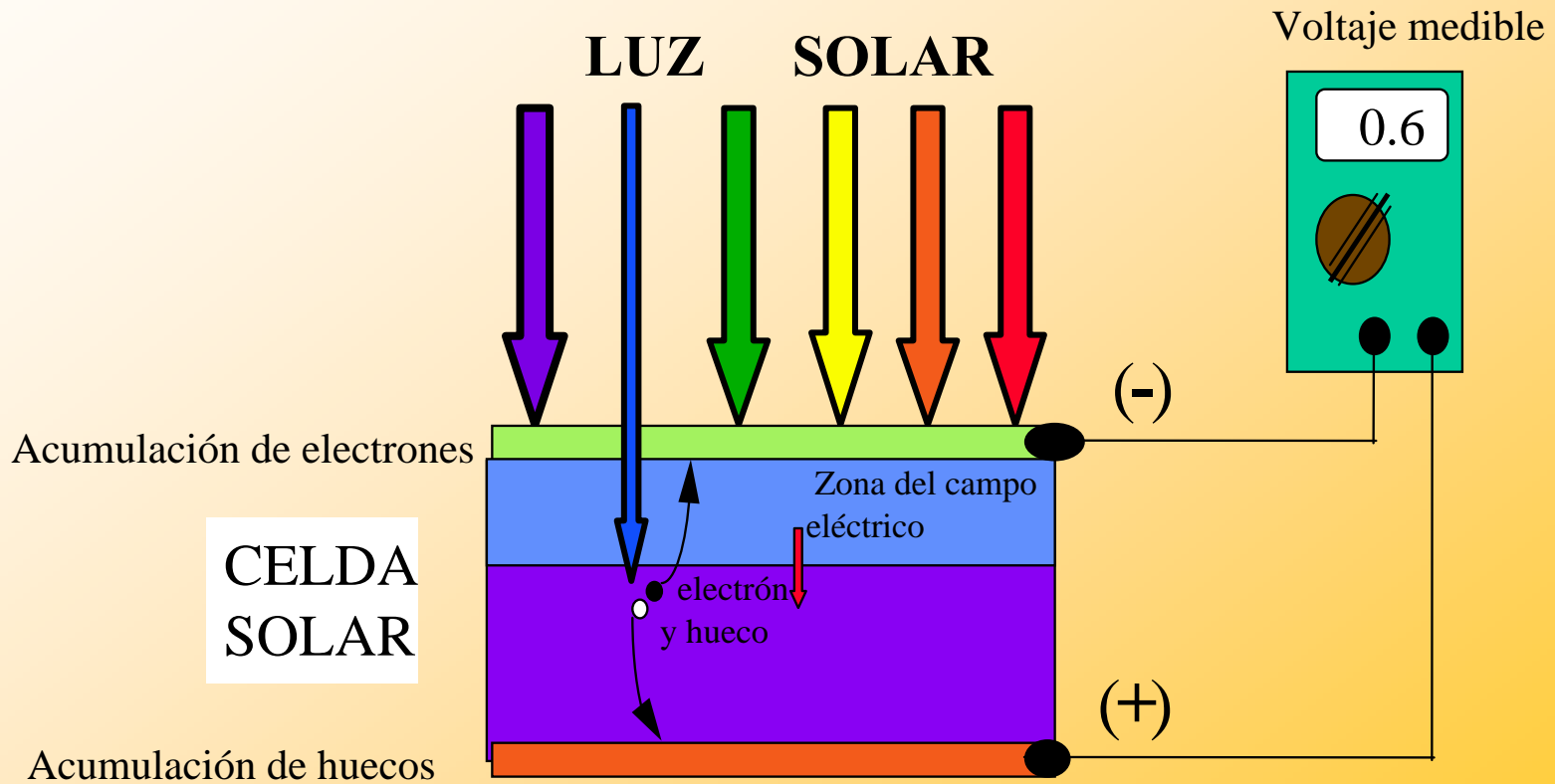
- 1839** → E. Bequerel descubre el efecto FV
- 1870** → Estudios del efecto FV en sólidos. Celdas solares de Se con eficiencias del 1% - 2 %
- 1954** → Bell Lab. presenta su primera celda solar de Si cristalino con 6% de eficiencia
- 1960** → Primer satélite espacial con tecnología FV
- 1970** → Aumenta el interés en la tecnología FV, crisis mundial petrolera



Evolución de precios en módulos FV basados en silicio (USD \$ /watt)					
1968	1965-74	1980	1990	Actual	2010
1500	200	20	7-10	4-6	2???
Eficiencias de conversión en módulos FV comerciales: 5-17 %					
Eficiencias de conversión en celdas solares en laboratorios: 30-32 % (AsGa)					

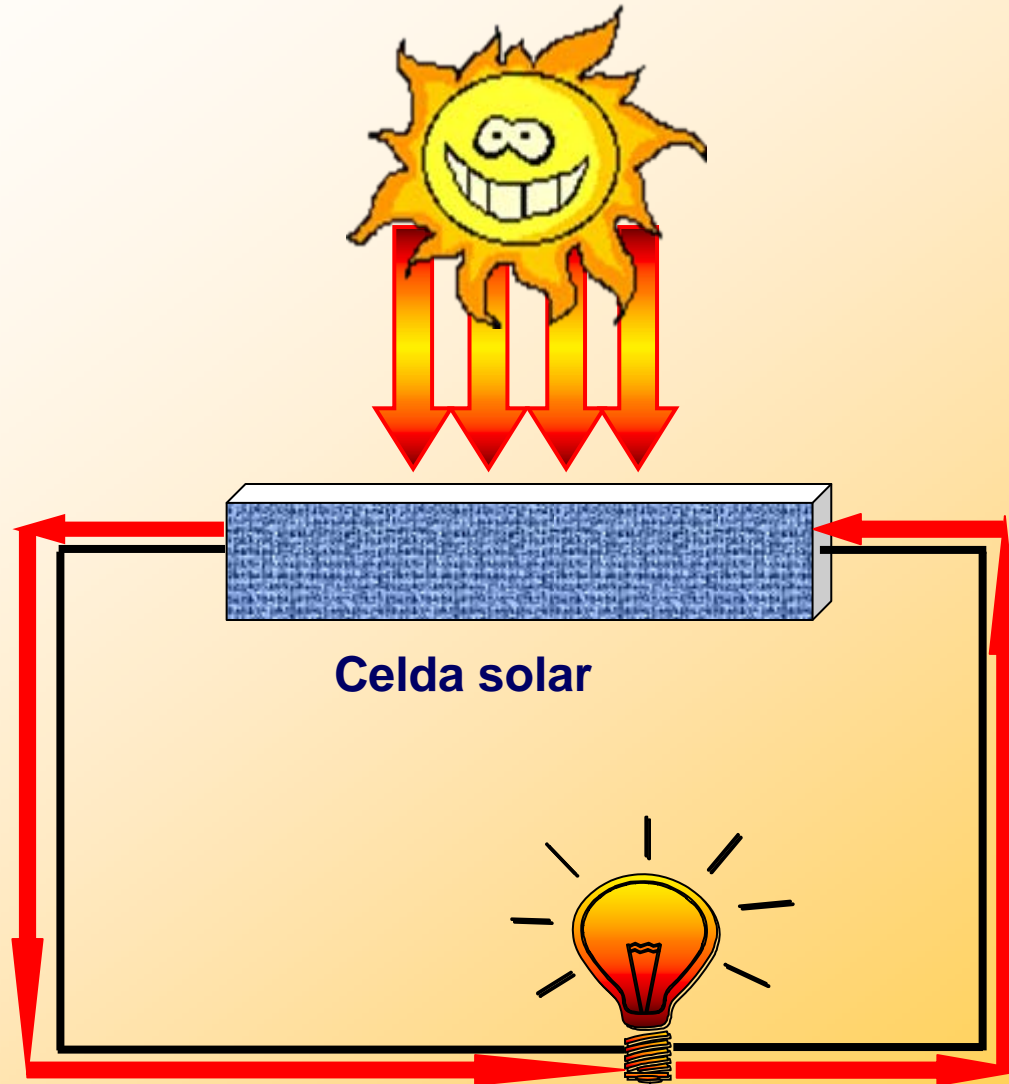


# FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA SOLAR





# Generación de Potencia eléctrica



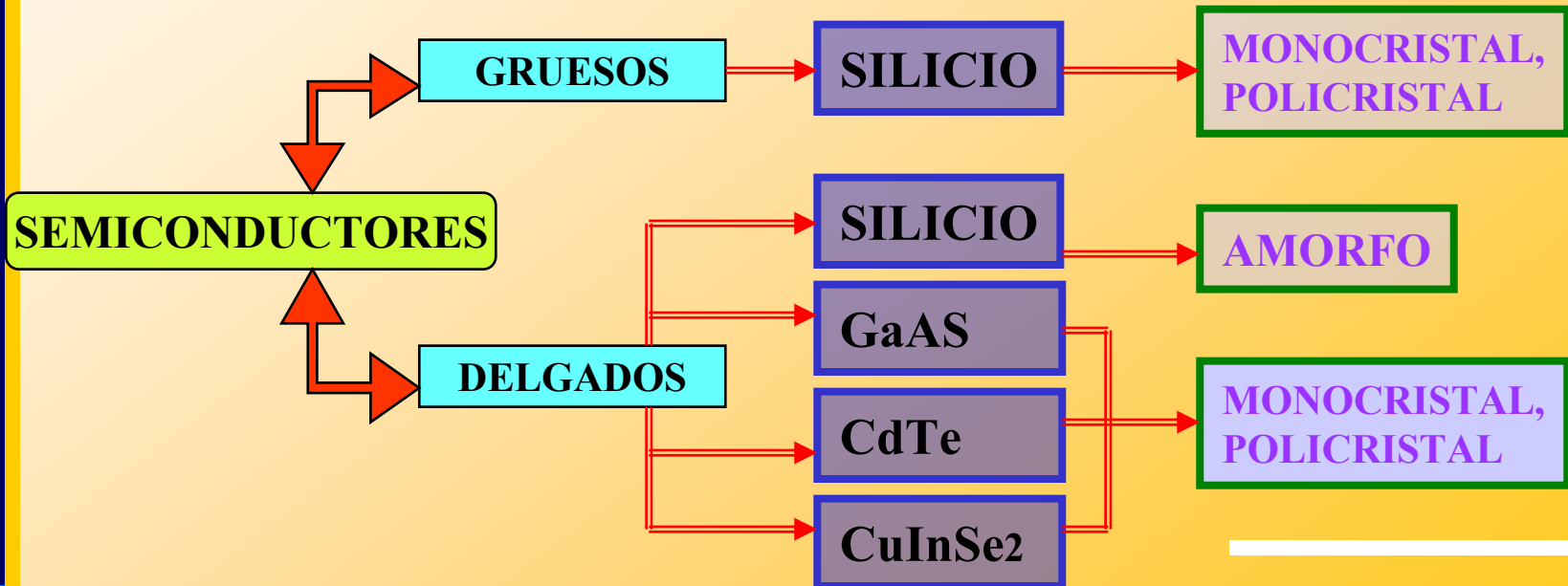
**Generación de fotocorriente directa !!!**



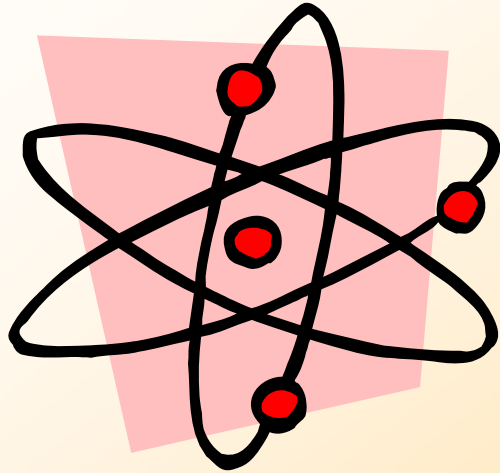
¿EN DONDE SE LLEVA A CABO DICHO EFECTO?

EN UNIONES ENTRE MATERIALES SÓLIDOS, LÍQUIDOS Y GASES.

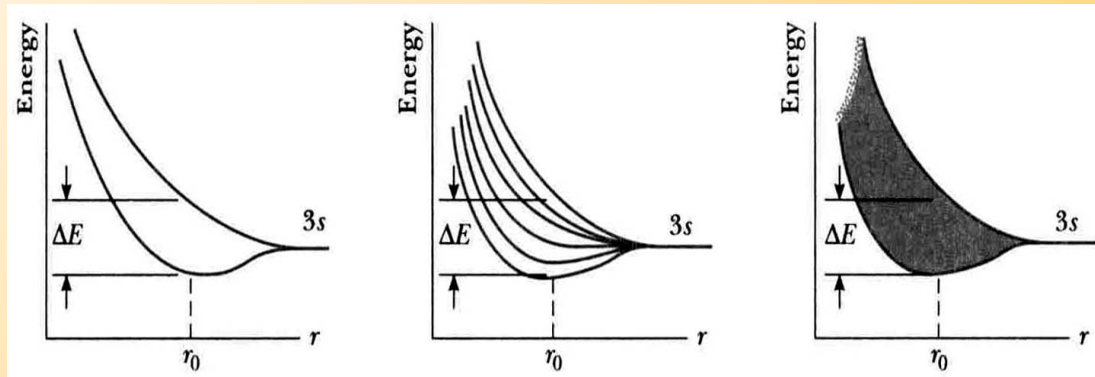
MÁXIMAS EFICIENCIAS EN SÓLIDOS SEMICONDUCTORES, COMO **EL SILICIO**, ARSENIURO DE GALIO TELURIO DE CADMIO, SELENIURO DE COBRE/INDIO.







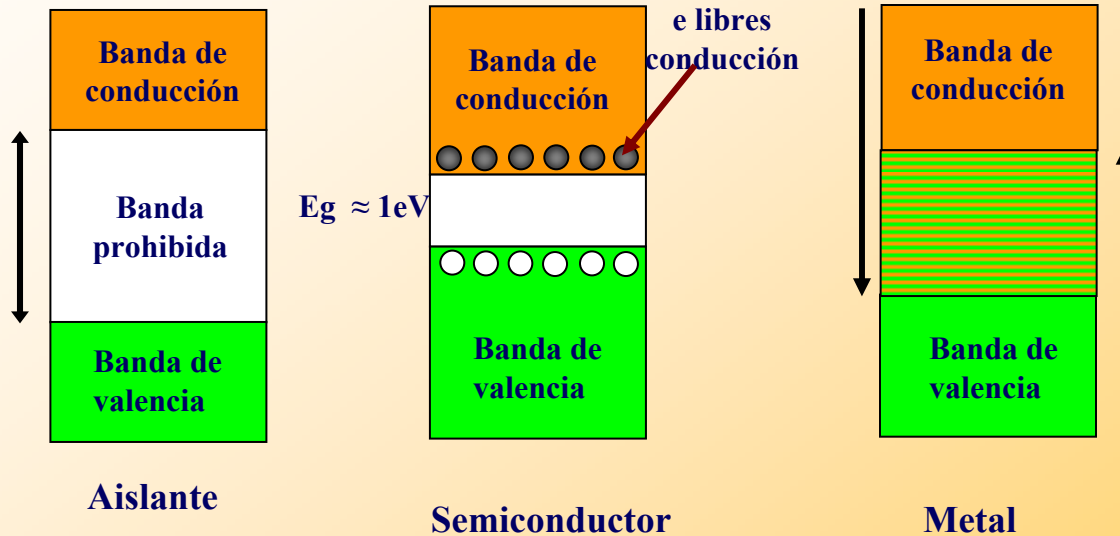
Los *electrones* son los *responsables del comportamiento eléctrico* de los átomos y se les conoce con el nombre de *portadores de carga*



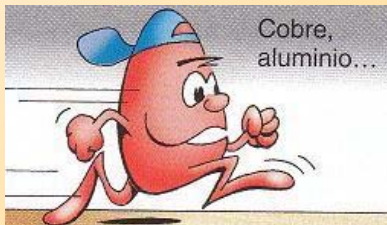
Cuando los átomos de un material empiezan a aproximarse, los electrones que se encuentran en los orbitales externos comienzan a interactuar, los orbitales superpuestos ahora reciben el nombre de **bandas de energías**



# Bandas de energía en sólidos



Por su capacidad de conducir electricidad los materiales se clasifican en:



**conductores**

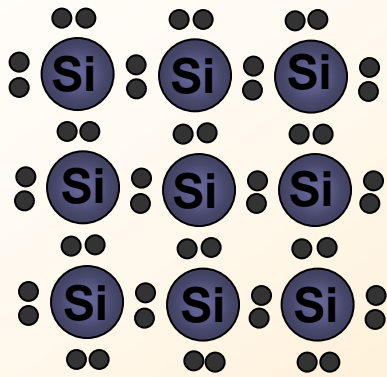


**aislantes**

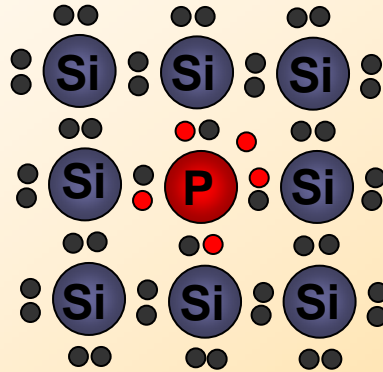
**Y semiconductores...**



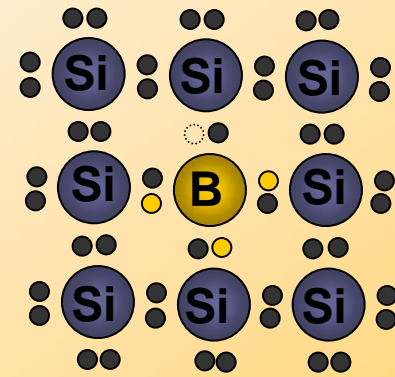
# Semiconductores



Silicio intrínseco

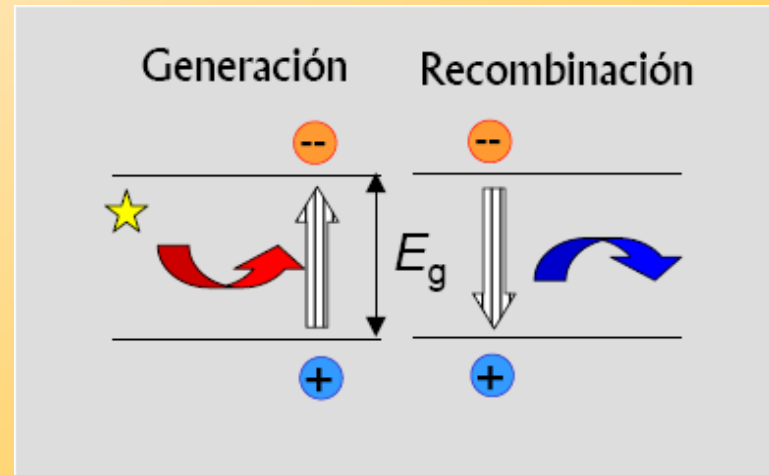
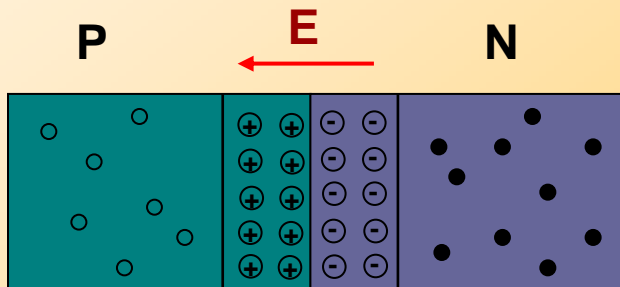


Silicio tipo N



Silicio tipo P

## La unión P-N





# Semiconductores



- Los semiconductores son utilizados en la fabricación de las celdas solares porque la energía que liga a los electrones de valencia al núcleo es similar a la energía que poseen los fotones que constituyen la radiación solar.
- Cuando la luz solar incide sobre el semiconductor, sus fotones suministran la cantidad de energía necesaria a los electrones de valencia para que se rompan los enlaces y queden libres para circular por el material.
- En esa zona de deplexión que se ha formado se crea un campo eléctrico  $E$  (de la región N a la región P o de los iones + a los iones -) con lo cual se produce una caída de potencial sobre dicha región. Por cada electrón que se libera (carga negativa), aparece un hueco (ausencia de carga negativa), los que se comportan como partículas con carga positiva (+)
- Cuando en el semiconductor se generan pares electrón-hueco debido a la absorción de la luz, se dice que hay una fotogeneración de portadores de carga negativos y positivos.
- Aplicando un campo eléctrico, o una polarización podemos separar a las cargas positivas y negativas generadas en el material (corriente fotogenerada).



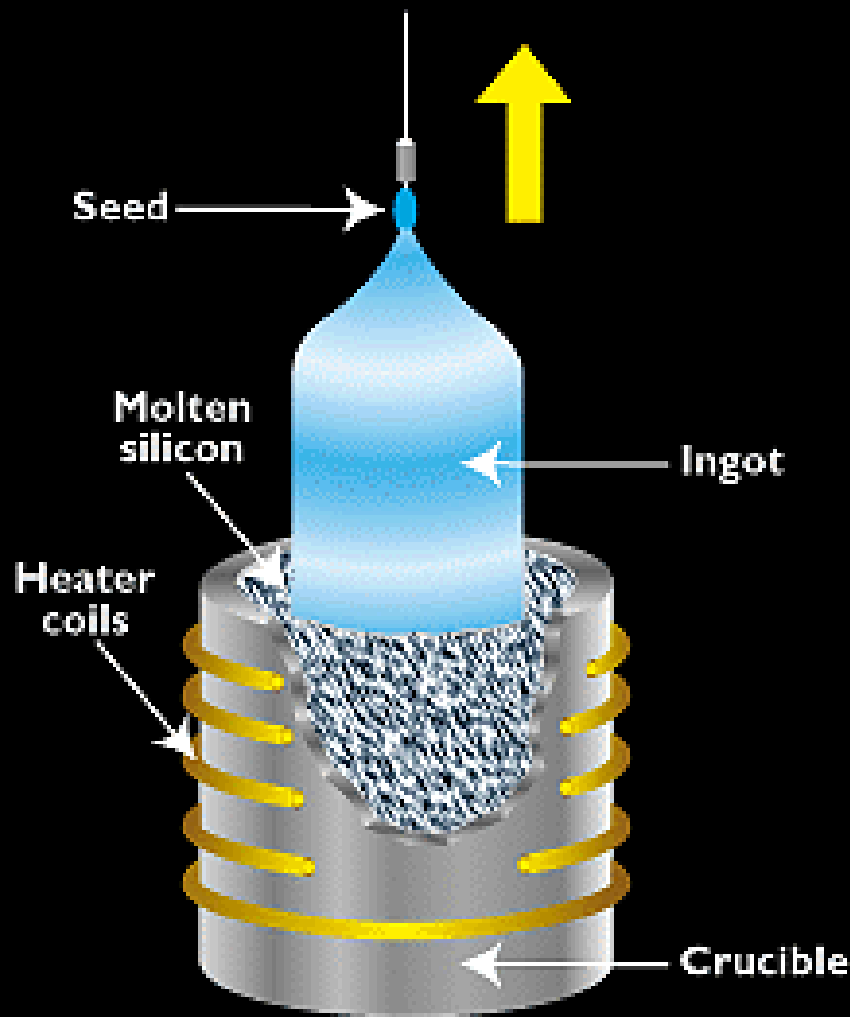
# Materiales de fabricación



- *Silicio Monocristalino:* Las celdas están hechas de un solo cristal de silicio de muy alta pureza. La eficiencia de estos módulos ha llegado hasta el 17%. Los módulos con estas celdas son los más maduros del mercado.
- *Silicio Policristalino:* Celdas están formadas por varios cristales de silicio. Esta tecnología fue desarrollada buscando disminuir los costos de fabricación. Dichas celdas presentan eficiencias de conversión un poco inferiores a las monocristalinas.
- *Silicio Amorfo:* La tecnología de los módulos de silicio amorfo ha estado cambiando aceleradamente en los últimos años. En la actualidad su eficiencia ha subido hasta establecerse en el rango del 10% y promete incrementarse.



# Silicio Monocristalino

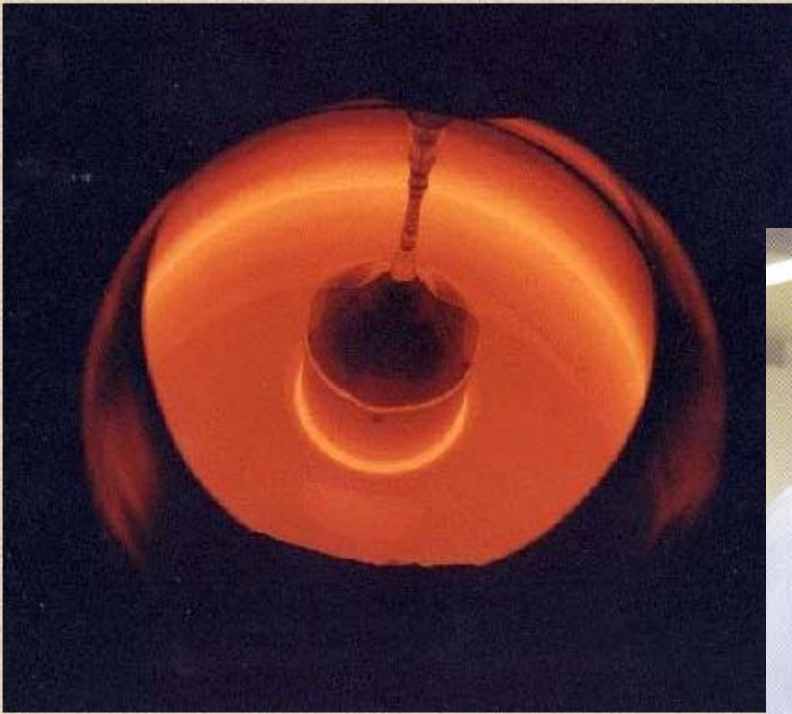


La técnica más común para elaborar monocristales de Si es el proceso de Czochralski. Una semilla de un m-Si se coloca sobre la superficie del silicio fundido. Cuando la semilla se gira sobre un eje vertical y se mueve hacia arriba, los átomos del Si fundido solidifican siguiendo la misma estructura cristalina que la semilla.



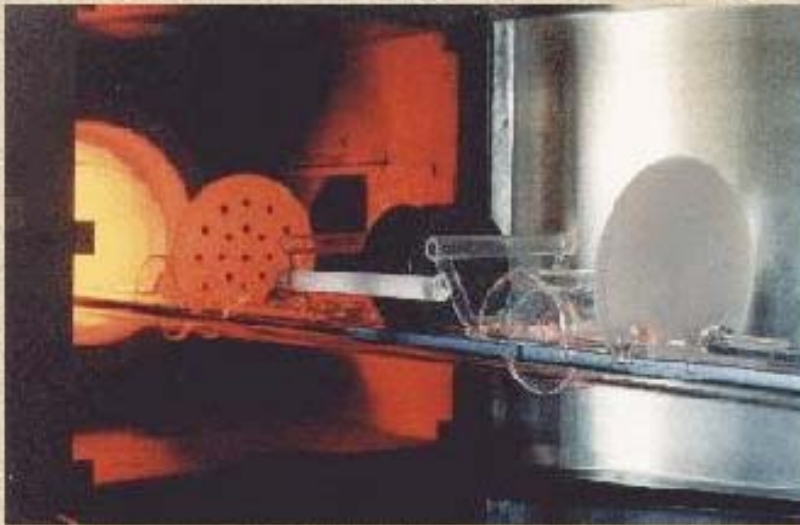
# Estado tecnológico actual para el Silicio Monocristalino

Centro de Investigación en Energía, UNAM





# Estado tecnológico actual para el Silicio Monocristalino



Vista de una de las bocas del horno de difusión.

Del silicio al dispositivo:

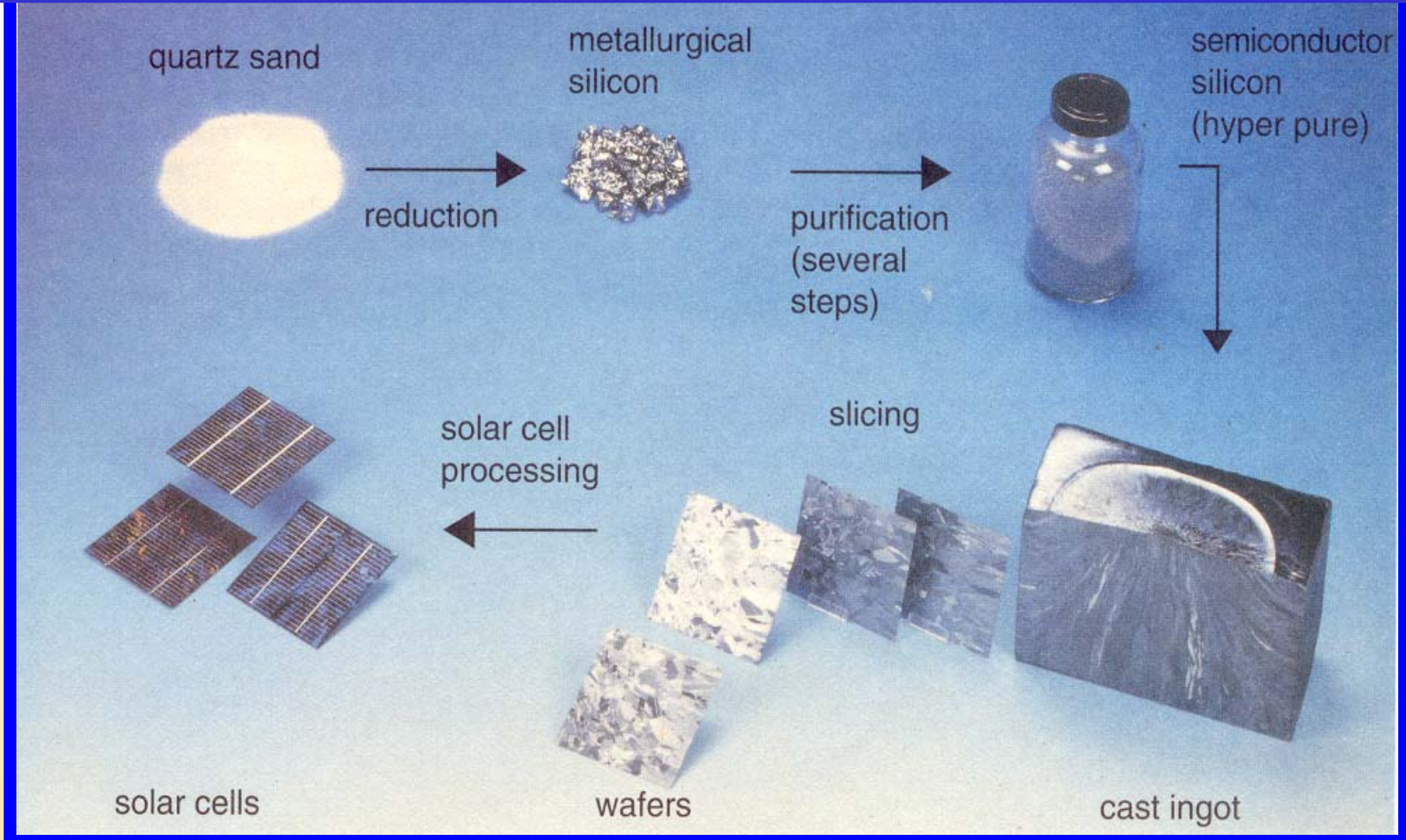
- silicio policristalino pureza electrónica,
- lingote monocristalino,
- oblea,
- celdas,
- pequeño ventilador solar.





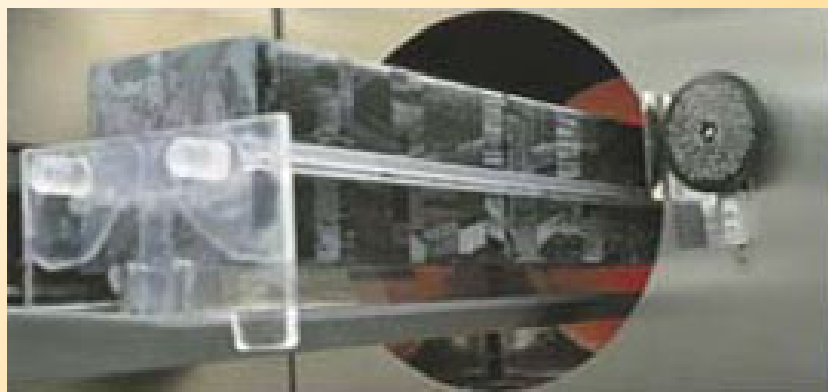


# Origen de la Celda Solar de Silicio Policristalino





# Línea de Producción

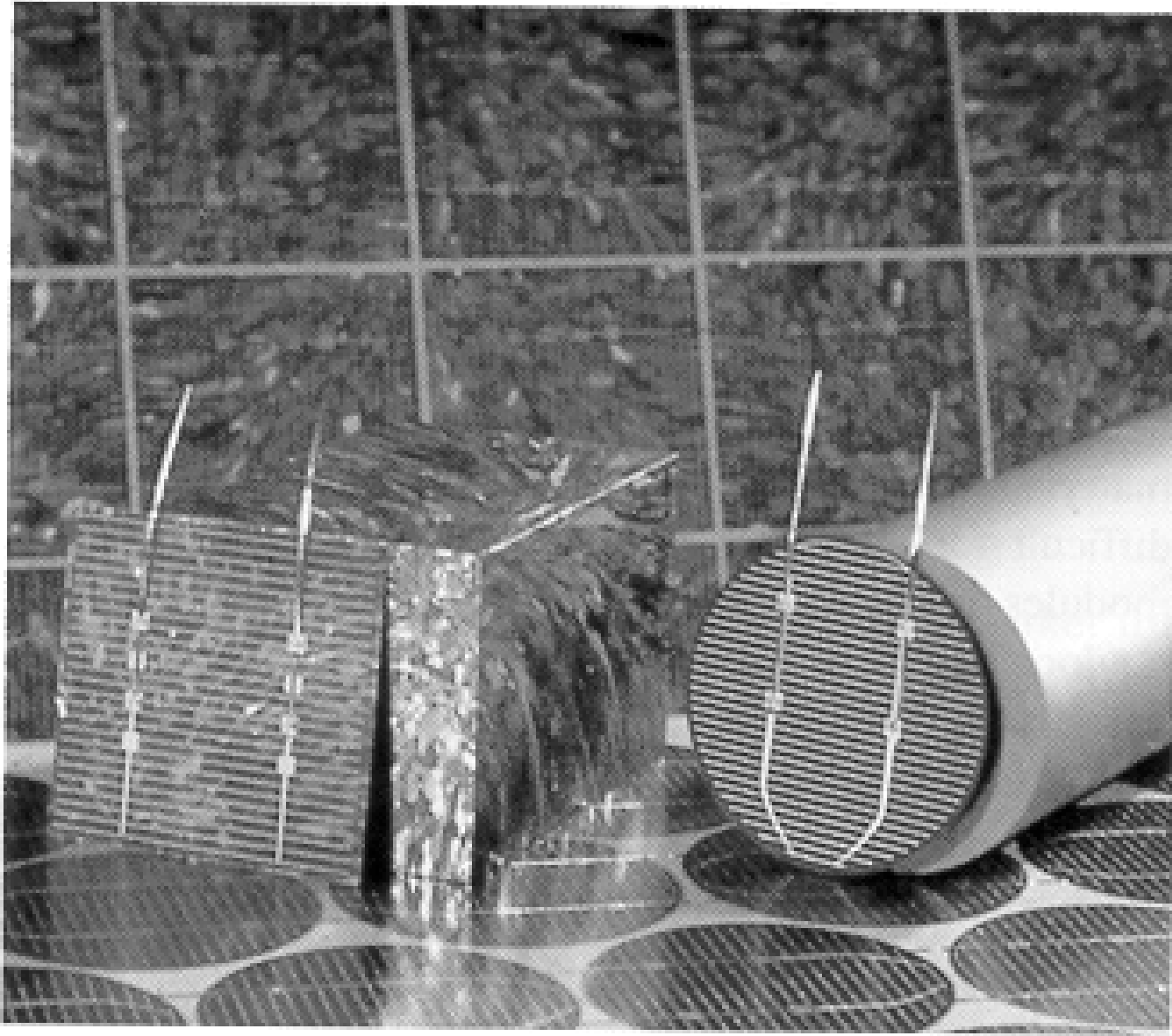




# CELDA SOLARES DE SILICIO



*Centro de Investigación en Energía, UNAM*

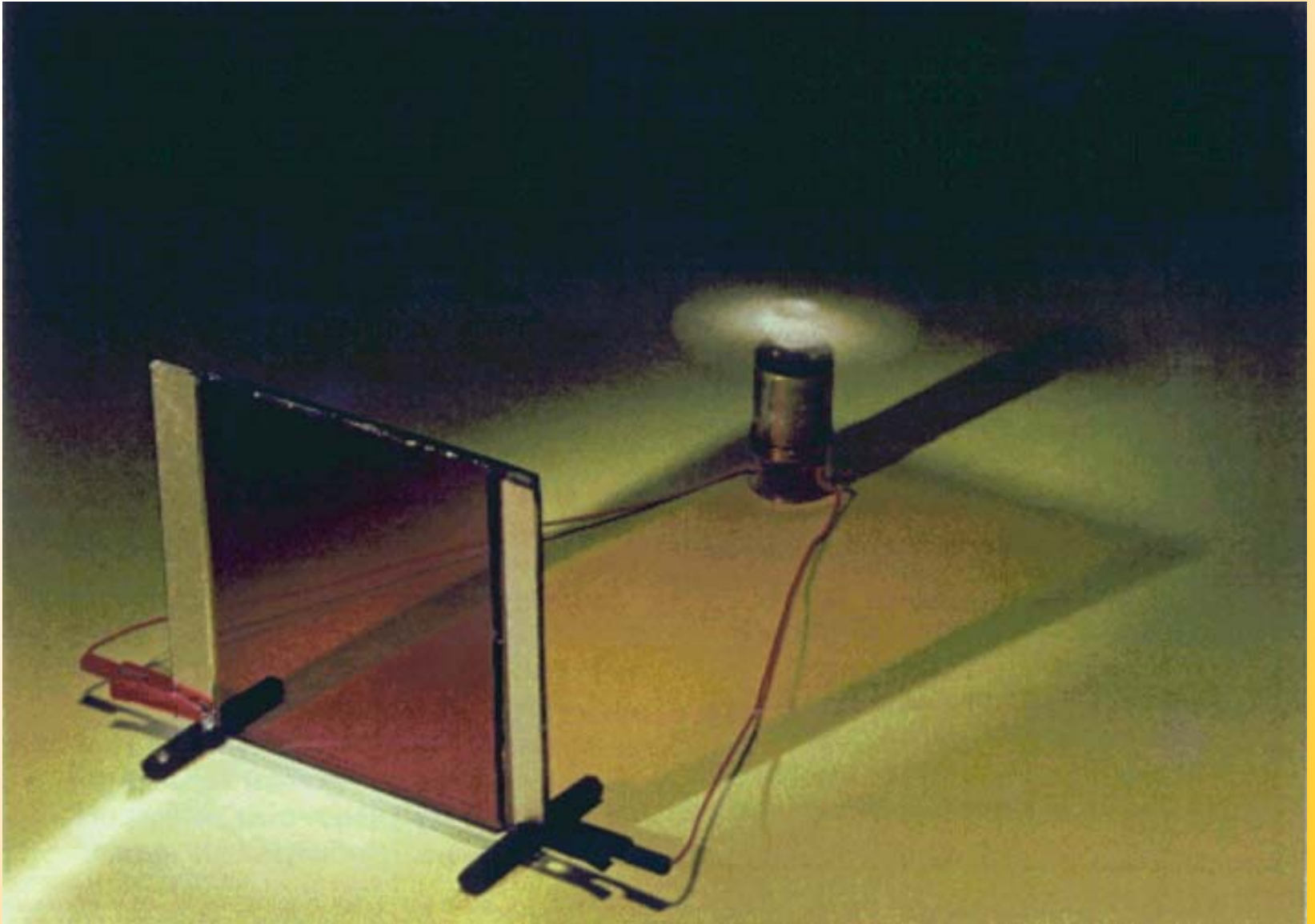




# SILICIO AMORFO: Película Delgada

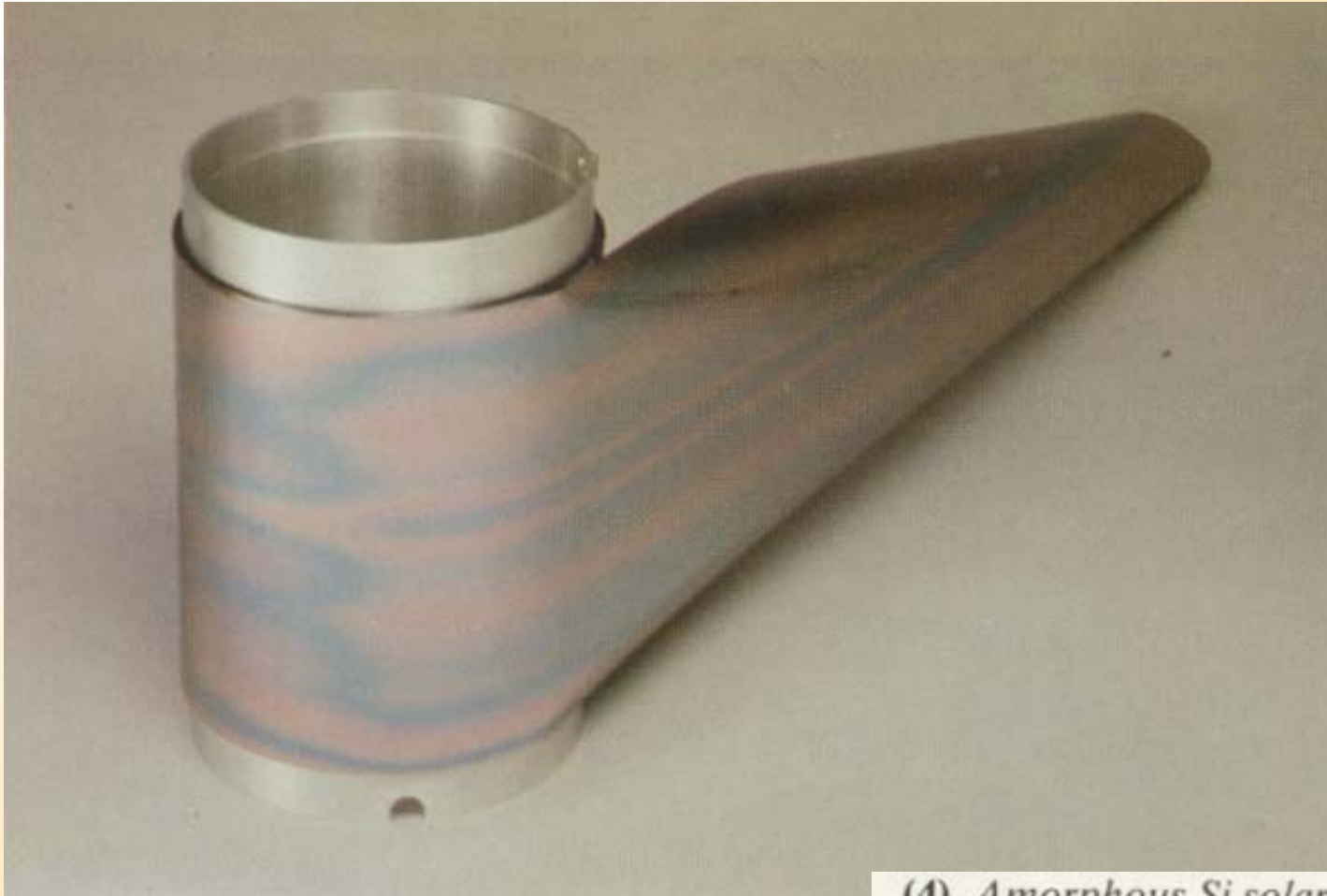


Centro de Investigación en Energía, UNAM





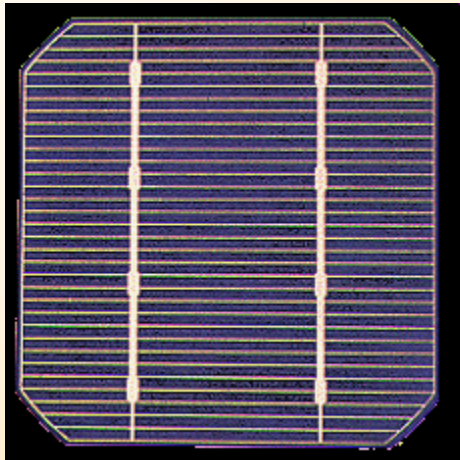
# SILICIO AMORFO: Película Delgada



*(4) Amorphous Si solar cell formed on a flexible (macromolecular) film (photograph supplied by Teijin).*



# Materiales de fabricación



**Silicio monocristalino**



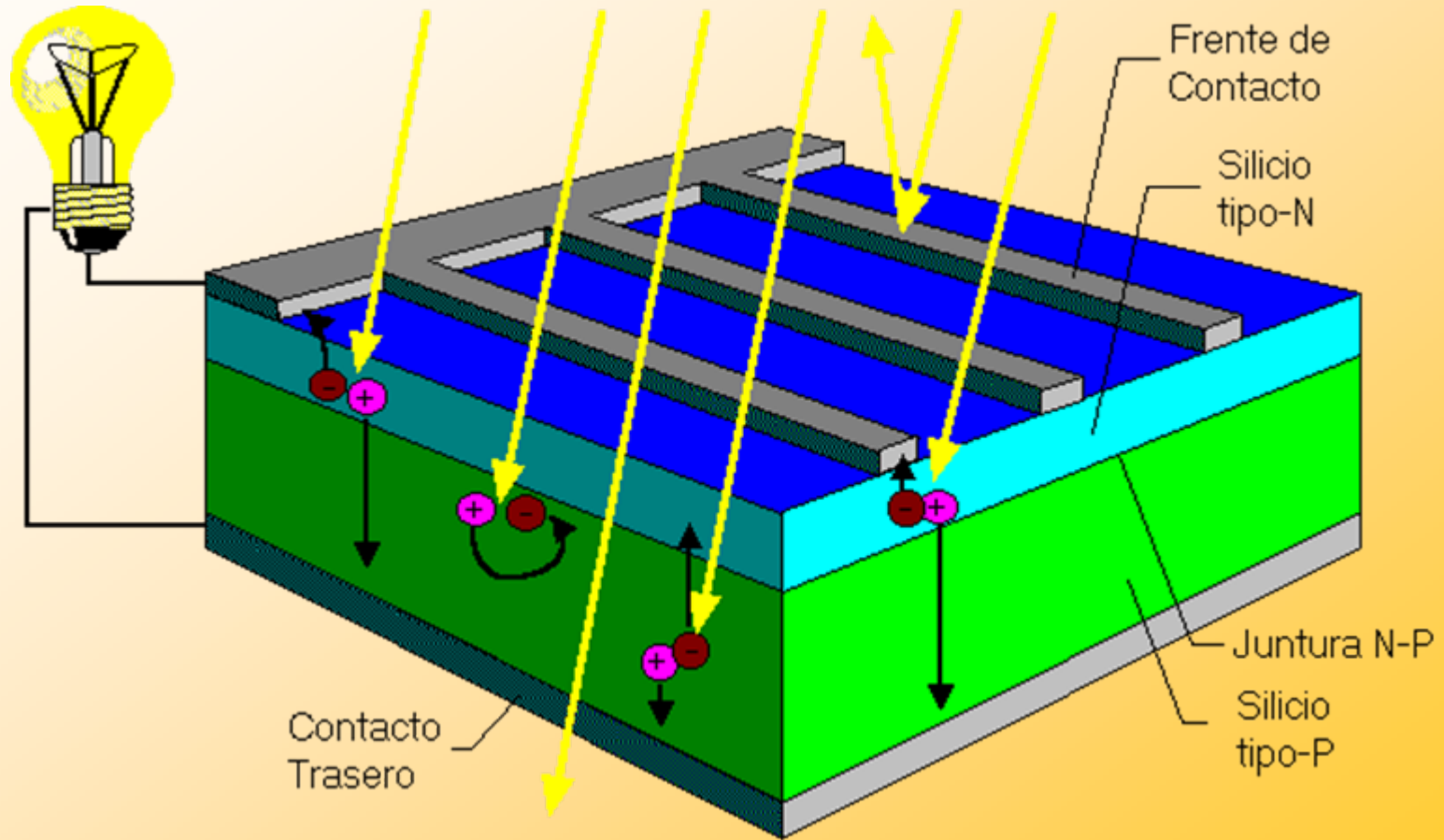
**Silicio policristalino**



**Silicio amorfo**

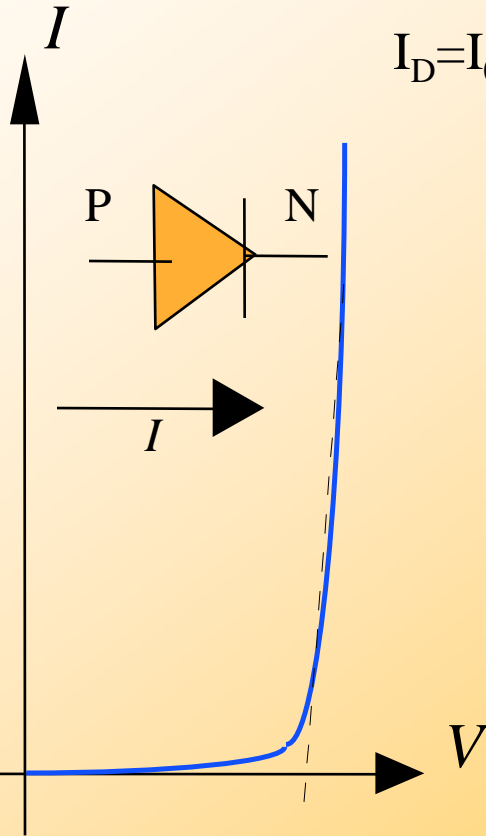


# Estructura típica de una celda solar Unión P-N

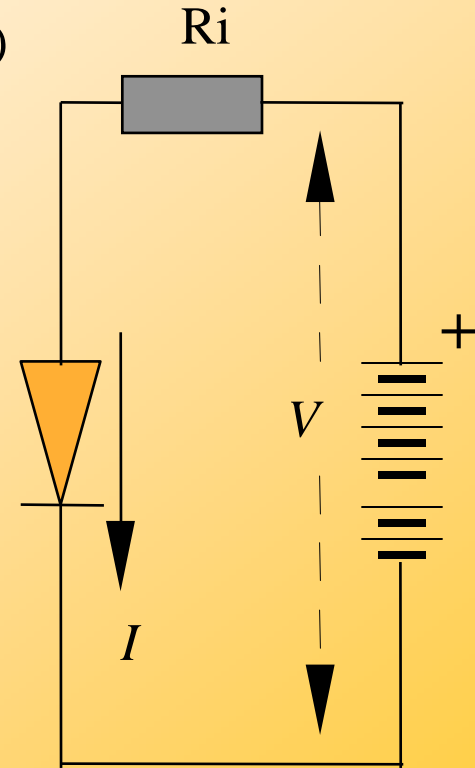




# Comportamiento Corriente-Voltaje Bajo oscuridad



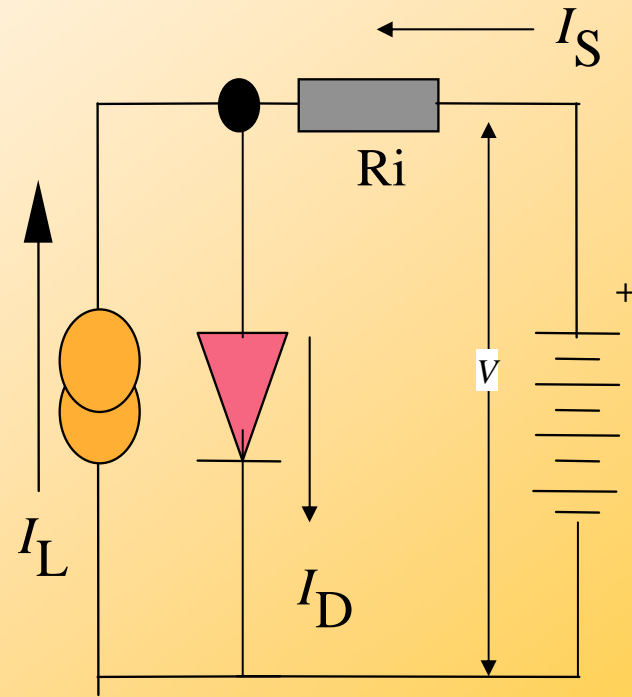
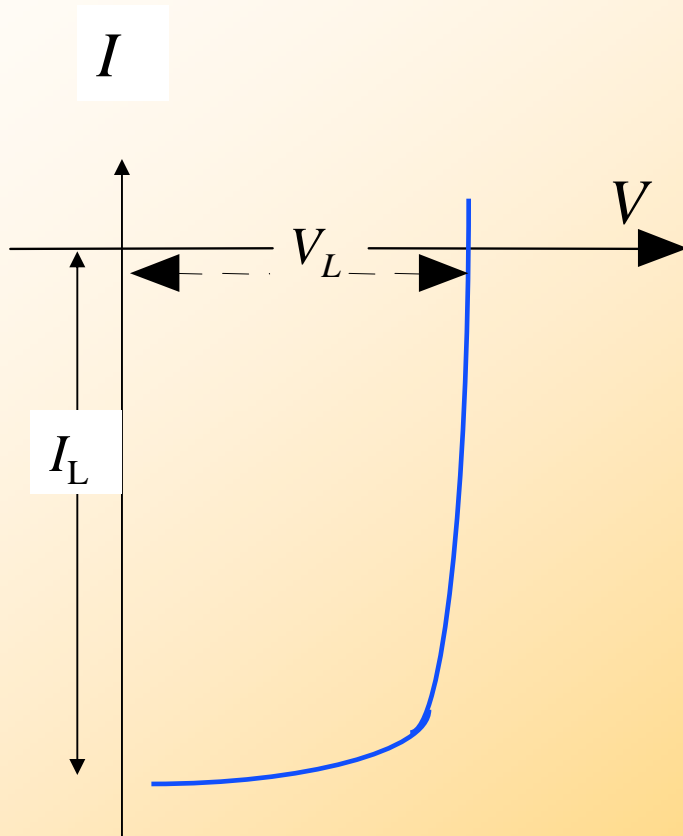
$$I_D = I_0 (e^{qV/AkT} - 1)$$







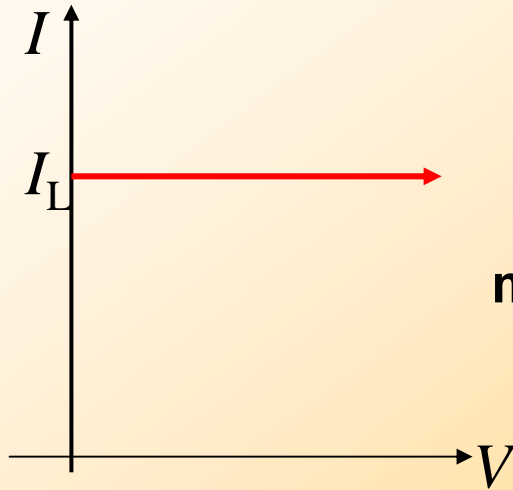
# Comportamiento Corriente-Voltaje Bajo iluminación



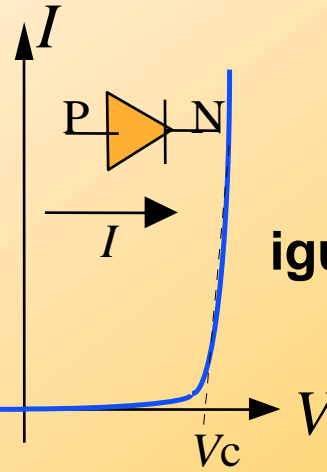
$$I_S = I_D - I_L$$



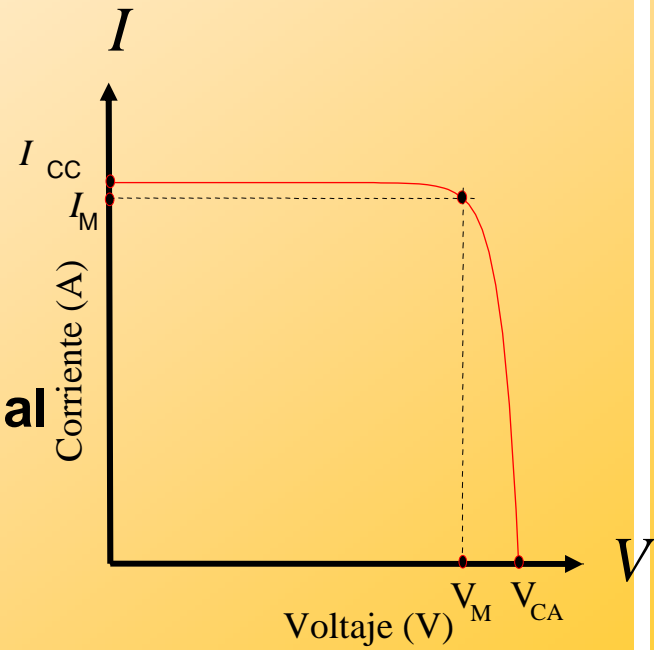
# Interpretación Gráfica I-V



menos

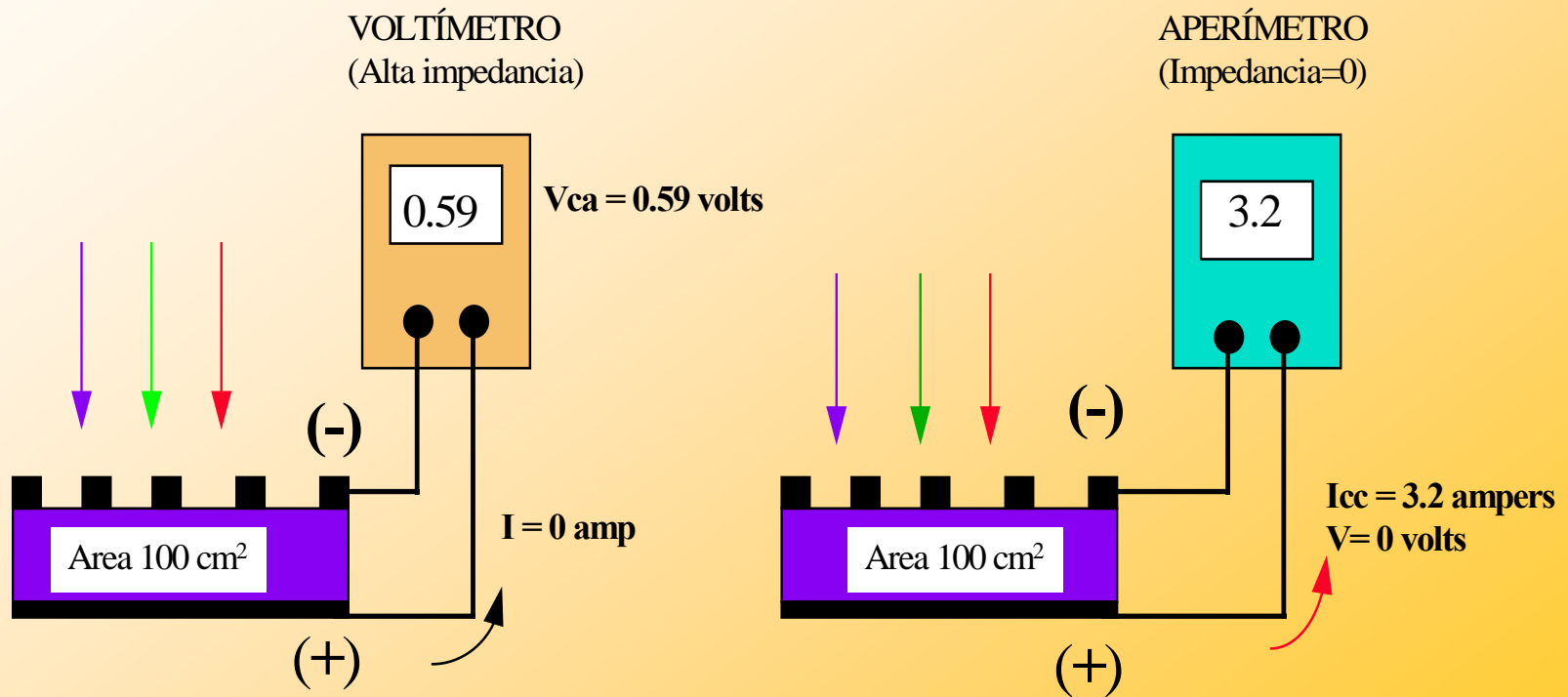


igual



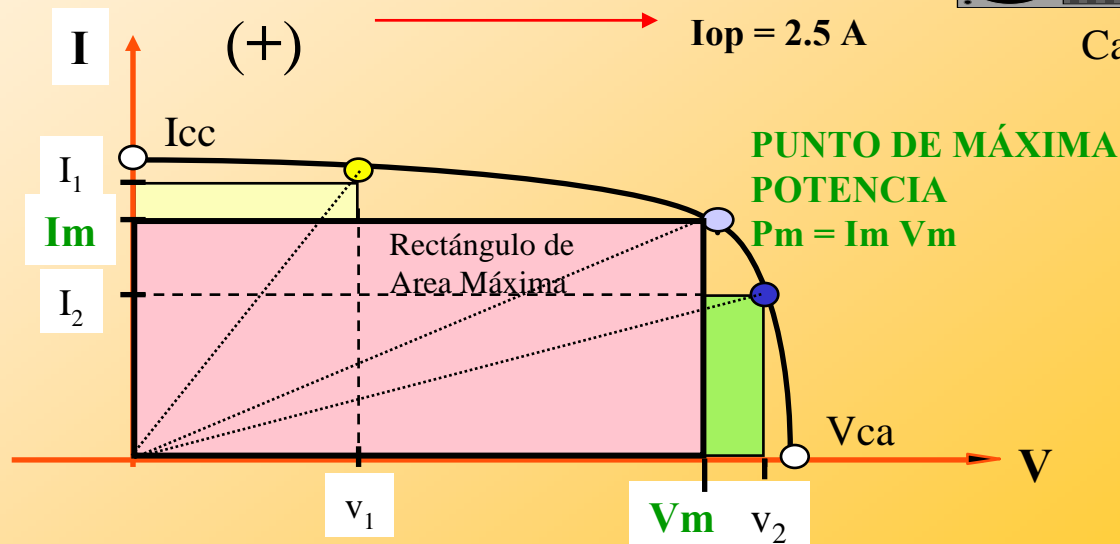
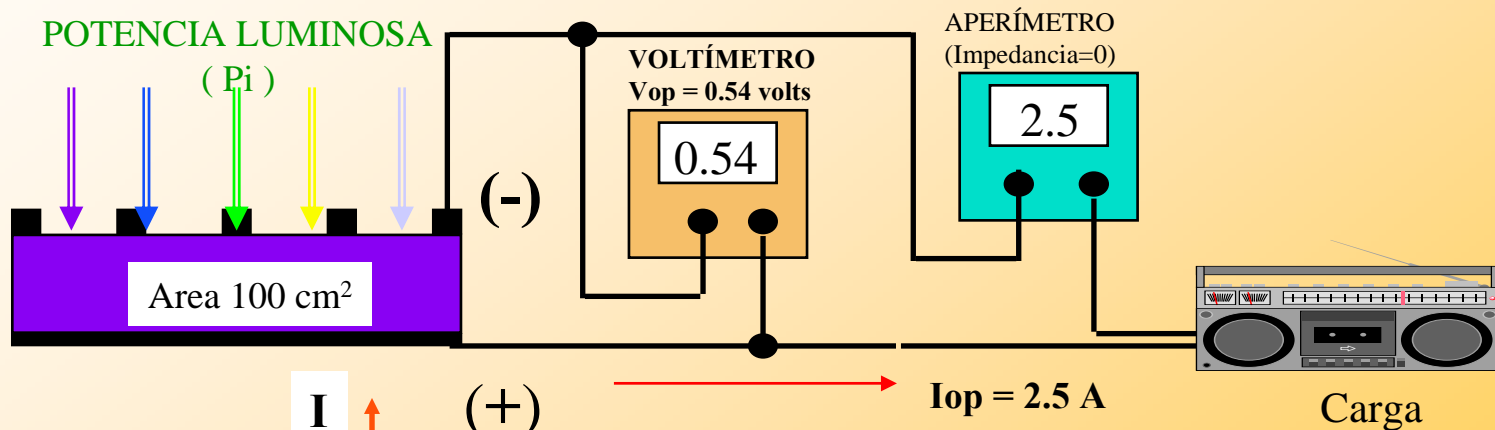


# Procedimiento para medir Voltaje a Circuito abierto, $V_{ca}$ , y la Corriente de Corto circuito $I_{cc}$ en una CELDA SOLAR



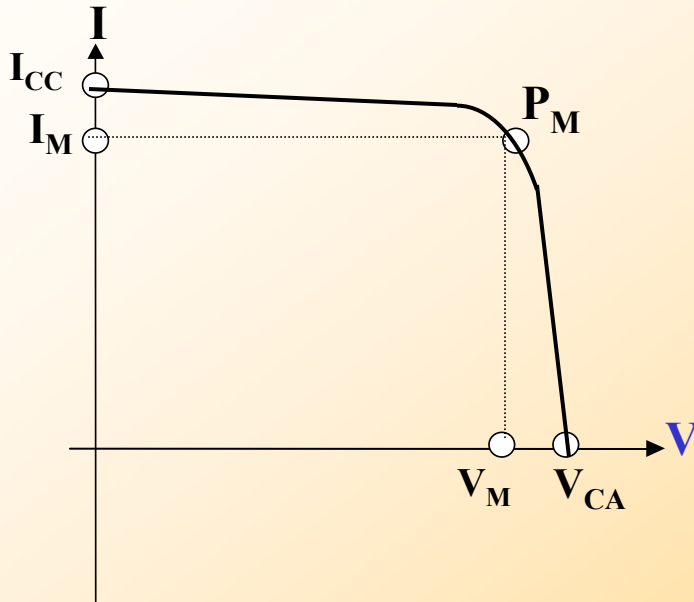


# Voltaje y corriente de operación ( $V_{op}$ e $I_{op}$ de una "Carga" acoplada a una celda solar.





# Parámetros Eléctricos de una Celda Solar



## VOLTAJE A CIRCUITO ABIERTO

$V_{CA}$  MÁXIMO VOLTAJE GENERADO POR LA CELDA.

## CORRIENTE A CORTO CIRCUITO

$I_{CC}$  MÁXIMA CORRIENTE GENERADA POR LA CELDA.

## PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

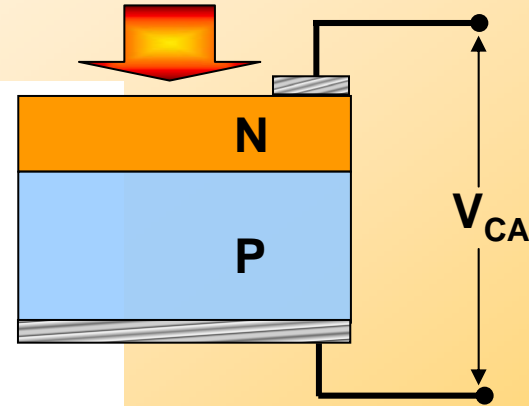
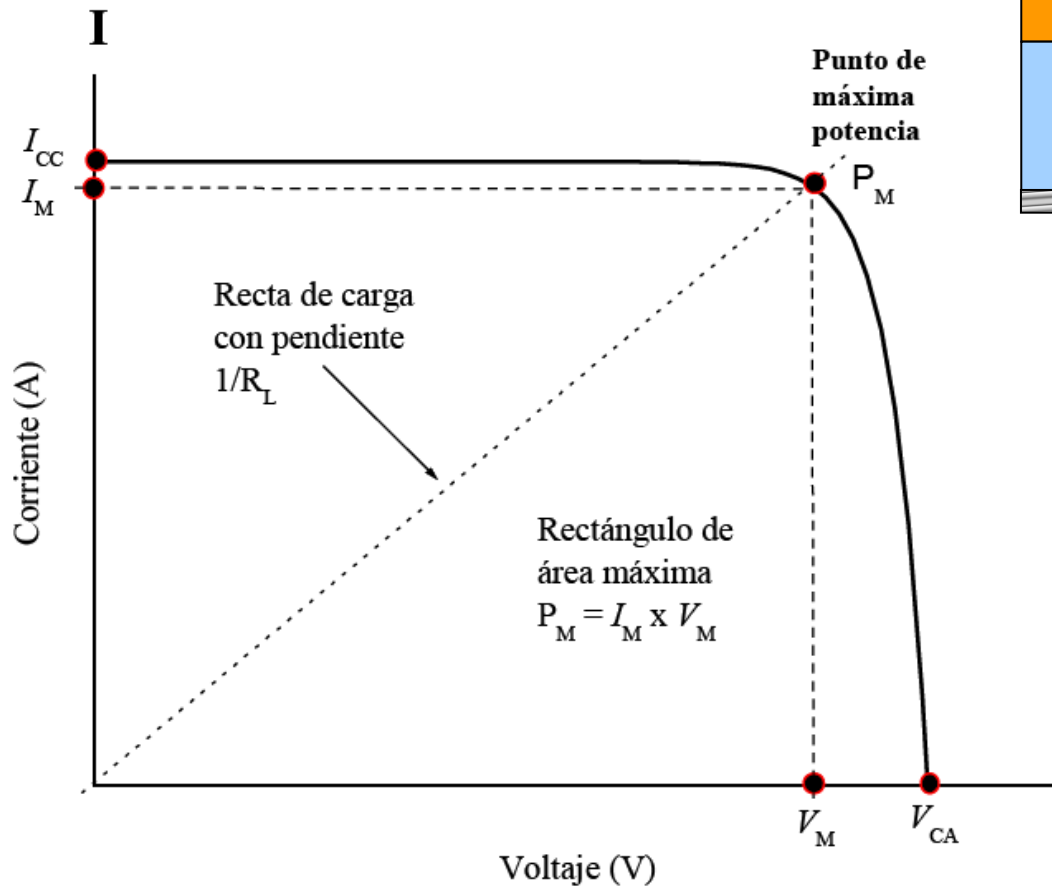
$P_M$  ES UN PUNTO SOBRE LA CURVA PARA EL CUAL EL PRODUCTO DE  $V$  CON  $I$  ES EL MÁXIMO.

## EFICIENCIA DE CONVERSIÓN

ES LA RAZÓN ENTRE LA POTENCIA GENERADA POR LA CELDA CUANDO SOBRE ELLA INCIDE UNA POTENCIA LUMINOSA

$$\eta = P_M / P_I \times 100$$

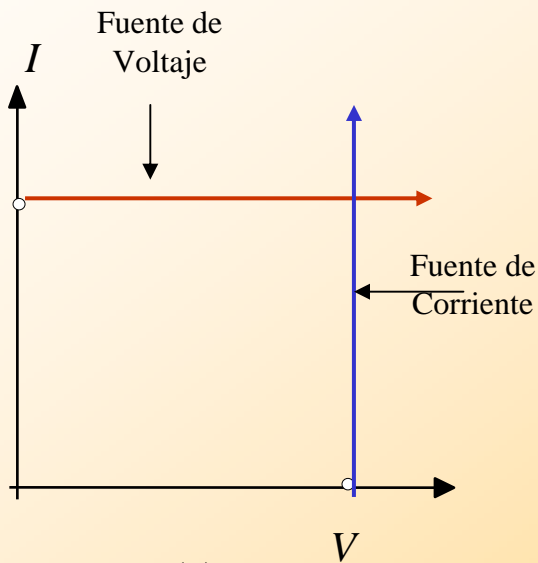
Donde  $P_I$  es la irradiancia por el área efectiva de la celda



- ✓ Corriente a corto circuito  $I_{CC}$
- ✓ Voltaje a circuito abierto  $V_{CA}$
- ✓ Potencia máxima generada  $P_M$

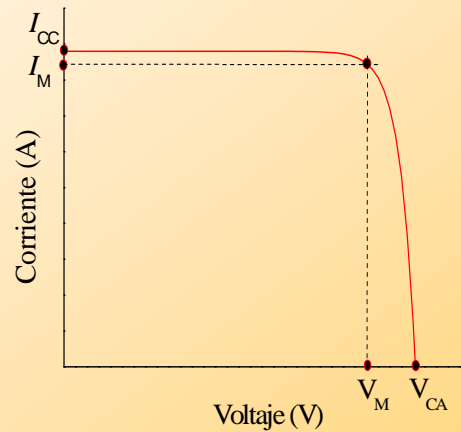


# Características Eléctricas

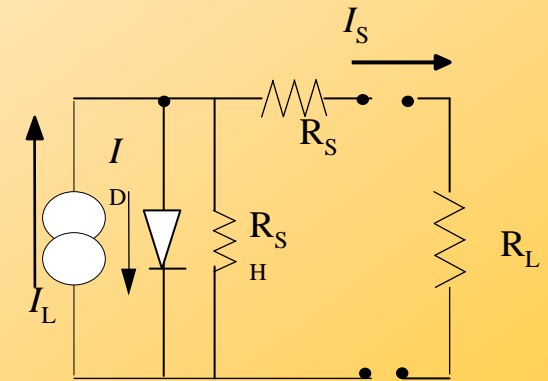


(a)

**FUENTES DE POTENCIA**



(b)



(c)

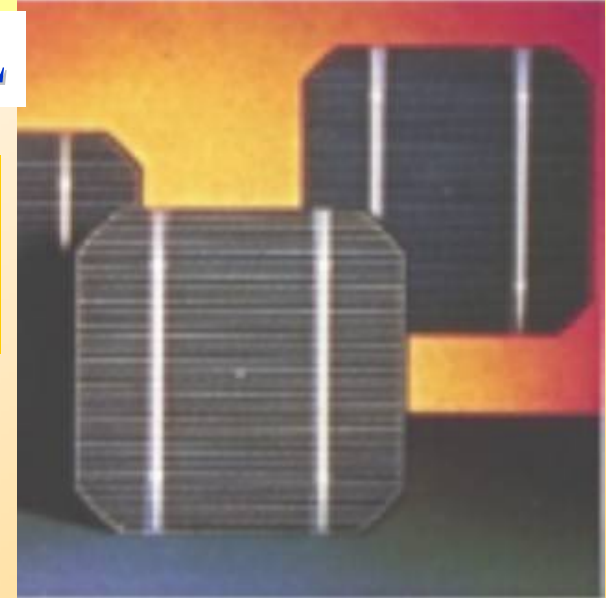
**RESISTENCIA INTRÍNSECA**

# TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA COMERCIAL

## MONOCRISTAL

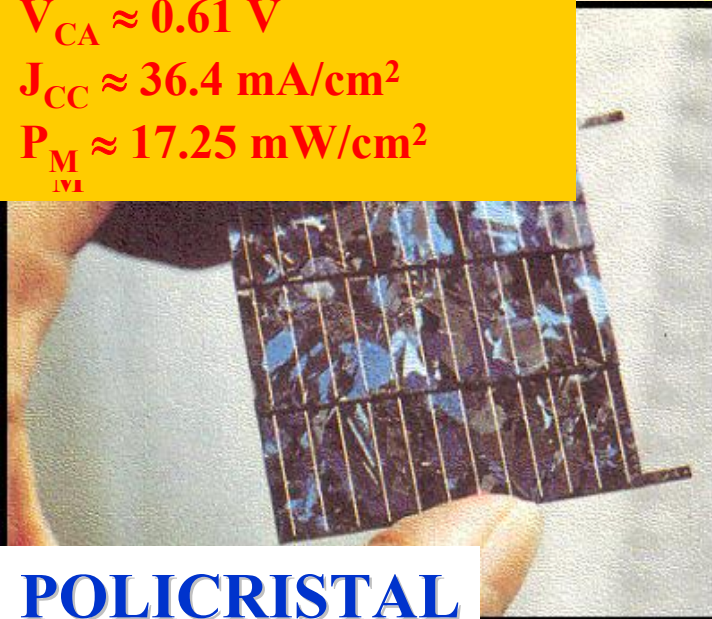


$V_{CA} \approx 0.74 \text{ V}$   
 $J_{CC} \approx 41.6 \text{ mA/cm}^2$   
 $P_M \approx 24.67 \text{ mW/cm}^2$



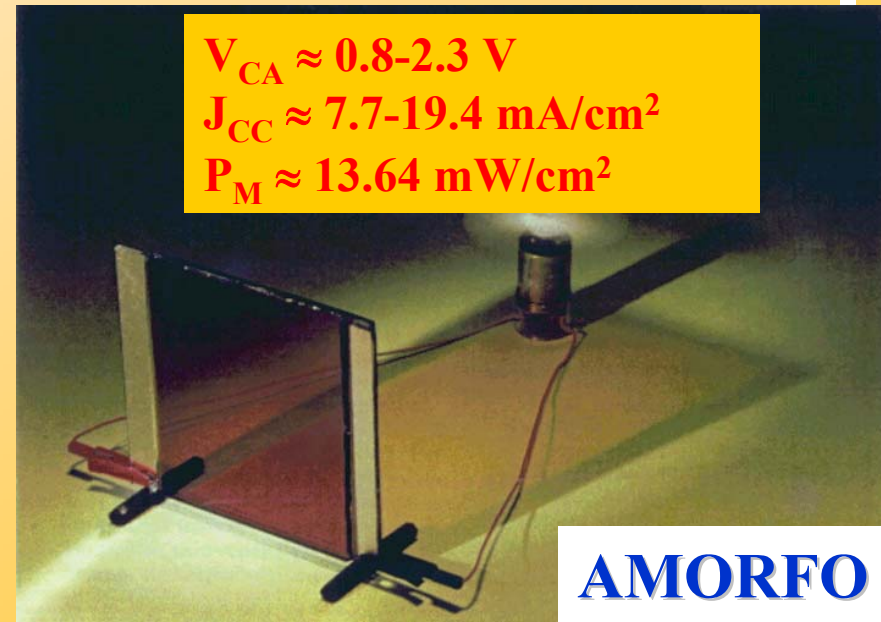
## SILICIO

$V_{CA} \approx 0.61 \text{ V}$   
 $J_{CC} \approx 36.4 \text{ mA/cm}^2$   
 $P_M \approx 17.25 \text{ mW/cm}^2$



## POLICRISTAL

$V_{CA} \approx 0.8-2.3 \text{ V}$   
 $J_{CC} \approx 7.7-19.4 \text{ mA/cm}^2$   
 $P_M \approx 13.64 \text{ mW/cm}^2$

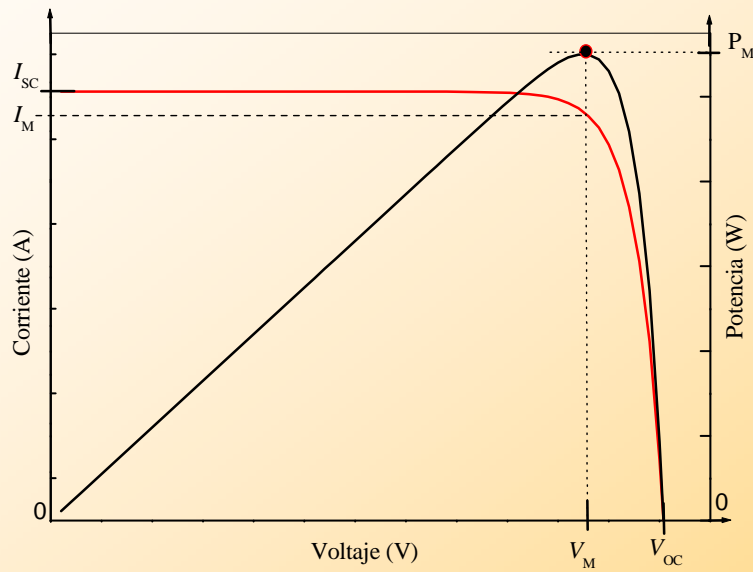


## AMORFO

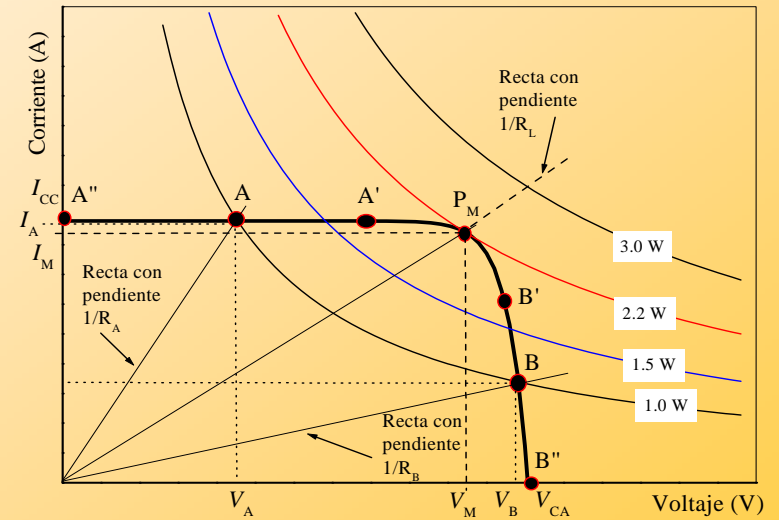




# Concepto de Potencia Máxima



(a)



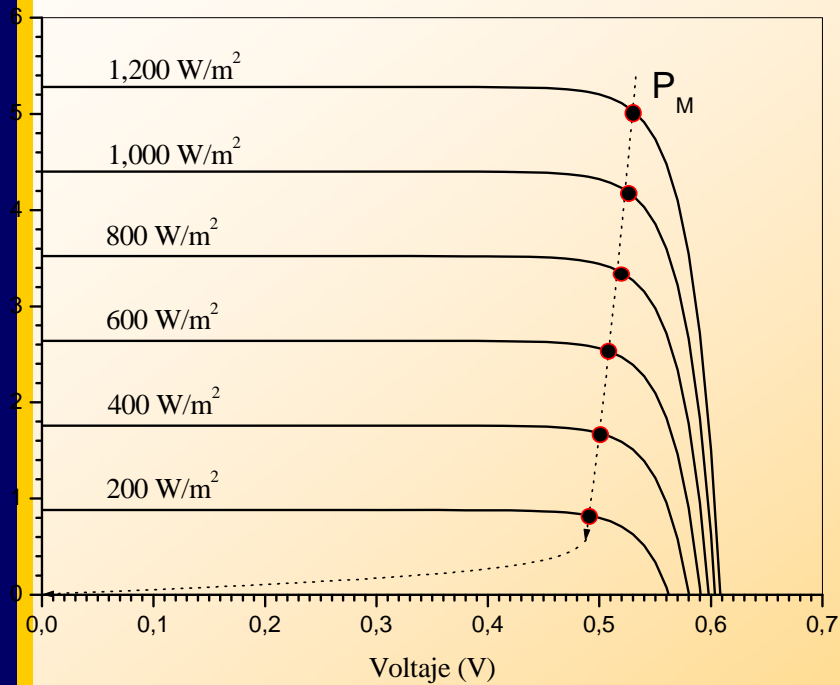
(b)



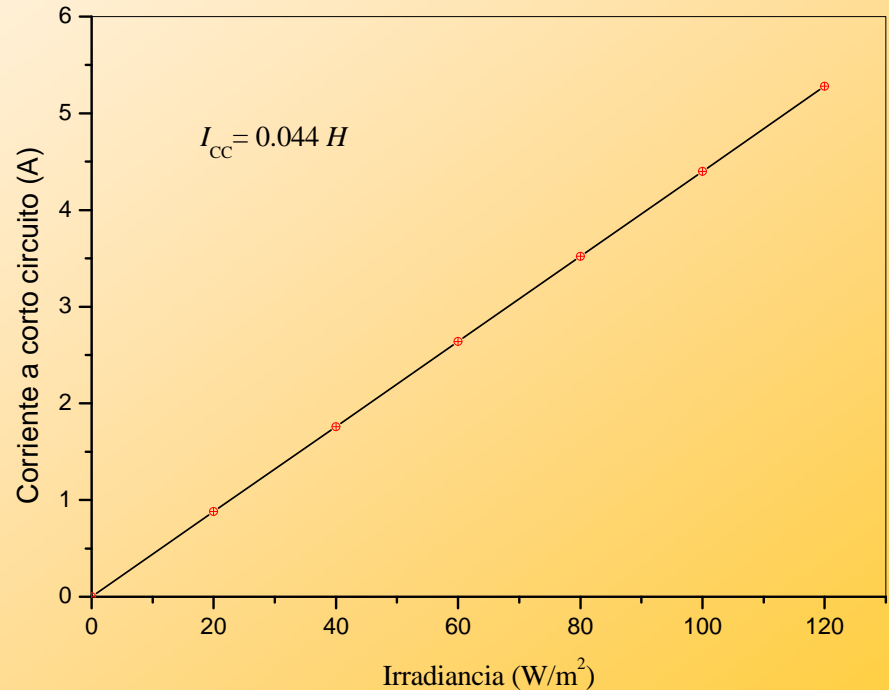
# Efecto de la Irradiancia



La corriente de corto circuito es directamente proporcional a la magnitud de la irradiancia



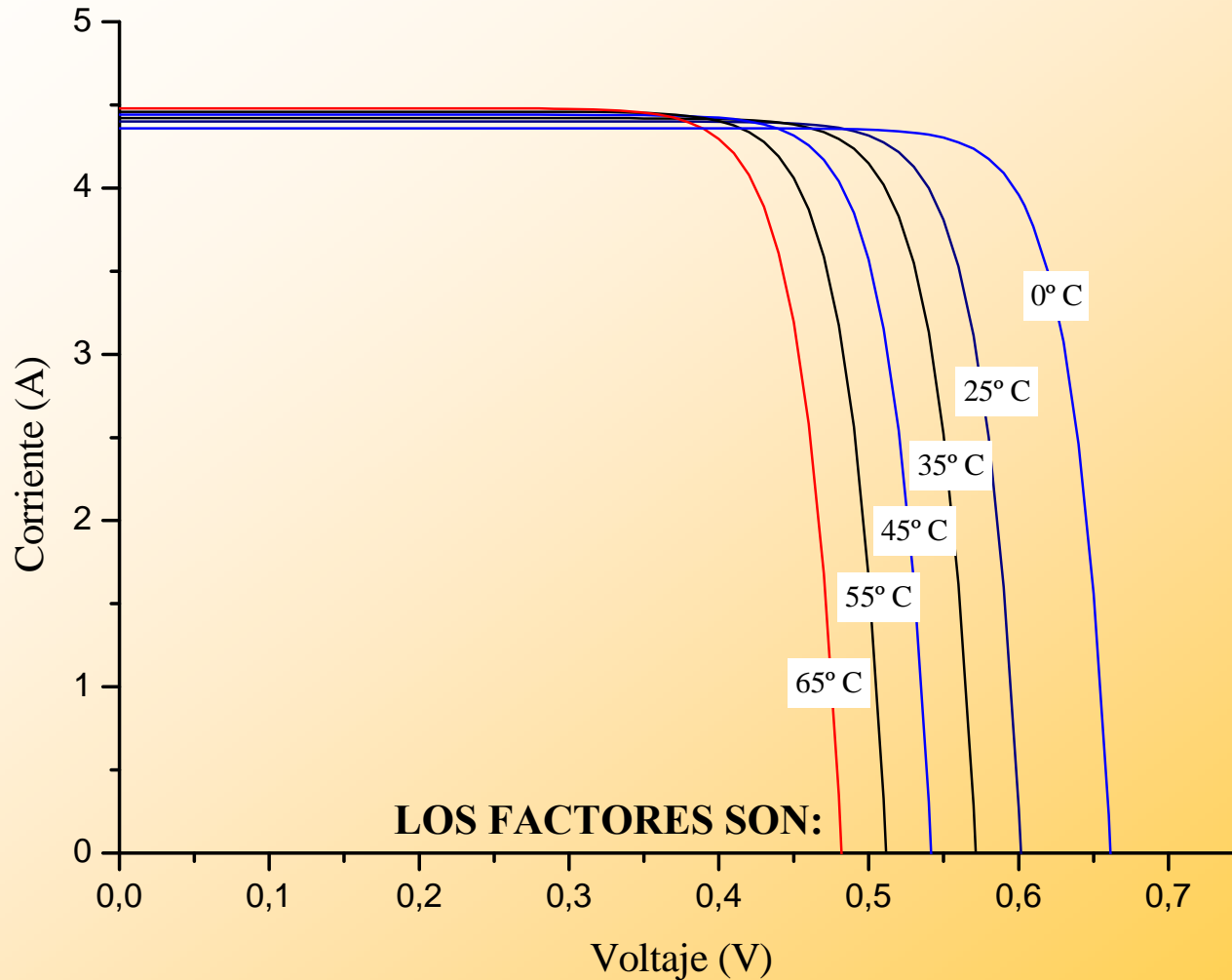
(a)



(b)



# Efecto de la Temperatura



**V<sub>ca</sub>**: Reducción del orden de 2.1 mVolt por cada grado centígrado.

**I<sub>cc</sub>**: Aumento del 0.1% de su valor, a temperatura ambiente, por cada grado centígrado.



# Efecto del área de la celda

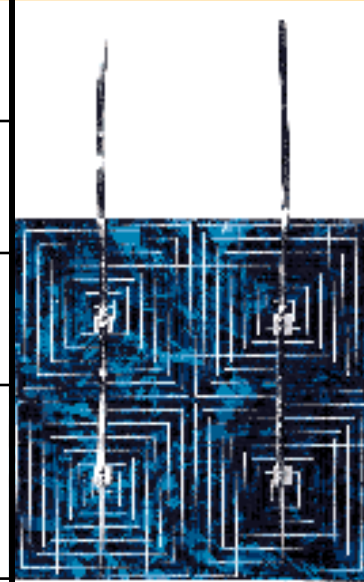


## CARACTERISTICAS

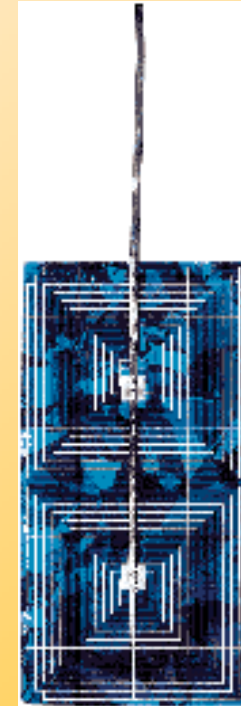
## DIMENSIONES [mm]

Valores típicos a  $1\text{kW/m}^2$  y  $25^\circ\text{C}$

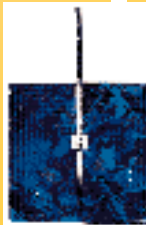
			Celda	$\frac{1}{2}$ Celda	$\frac{1}{4}$ Celda
Voltaje a cto. abierto	Voc	(V)	0.6	0.6	0.6
Corriente de corto cto	Isc	(A)	2.9	1.45	0.72
Pot. máx. ( $\pm 10\%$ )	Pm	(W)	1.35	0.60	0.3
Voltaje a Pot. máx.	Vm	(V)	0.47	0.47	0.47
Corriente a Pot. máx.	Im	(A)	2.6	1.3	0.65
Peso		(g)	6	3	1.5



**1 Celda**  
**101 x 101**



**$\frac{1}{2}$  Celda**  
**101 x 50.5**



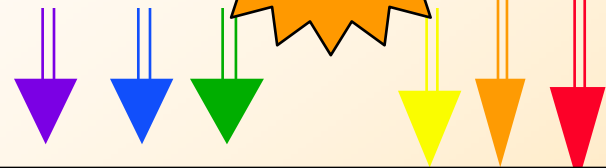
**$\frac{1}{4}$  Celda**  
**50.5 x 50.5**

# PARÁMETROS LIMITA

# DORES DE LA EFICIENCIA

100 mW

SILICIO CRISTALINO



21 mW falta de absorción para energías del fotón menores al borde de absorción.  
31 mW fotones con energía en exceso generan calentamiento.

Voltaje disponible 1.1 V

Corriente disponible 44mA

Recombinación

Eficiencia de colección; Absorción incompleta  
Reflexión en la superficie; Sombreado x contc.

Voltaje a circuito abierto  
0.6 V (0.7 V)

Corriente a corto circuito  
28 mA (41 mA)

Pérdidas por resistencia serie  
Factor de forma 0.75 (0.8)

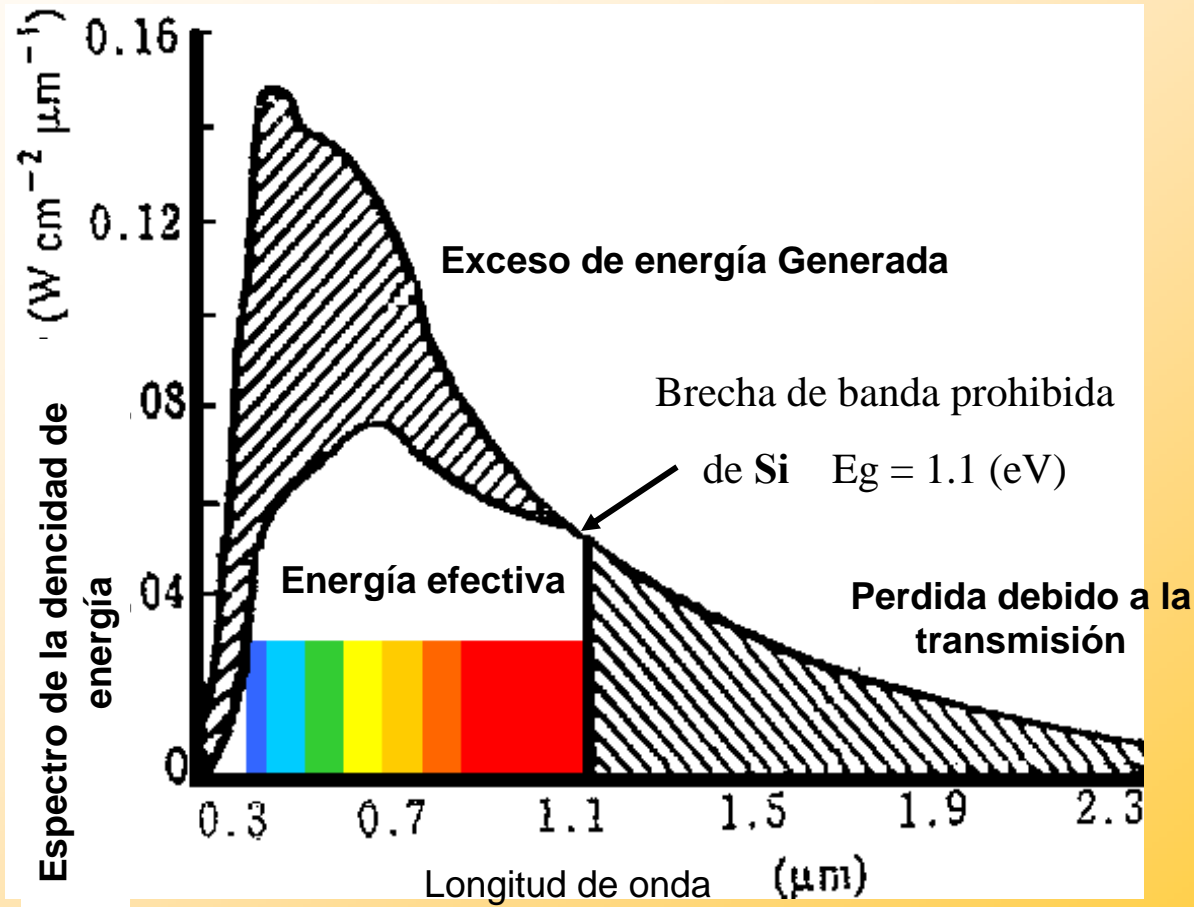
Potencia de Salida de la celda  
14 mW (23mW)

Centro de Investigación en Energía, UNAM





# Celda Solar de Silicio





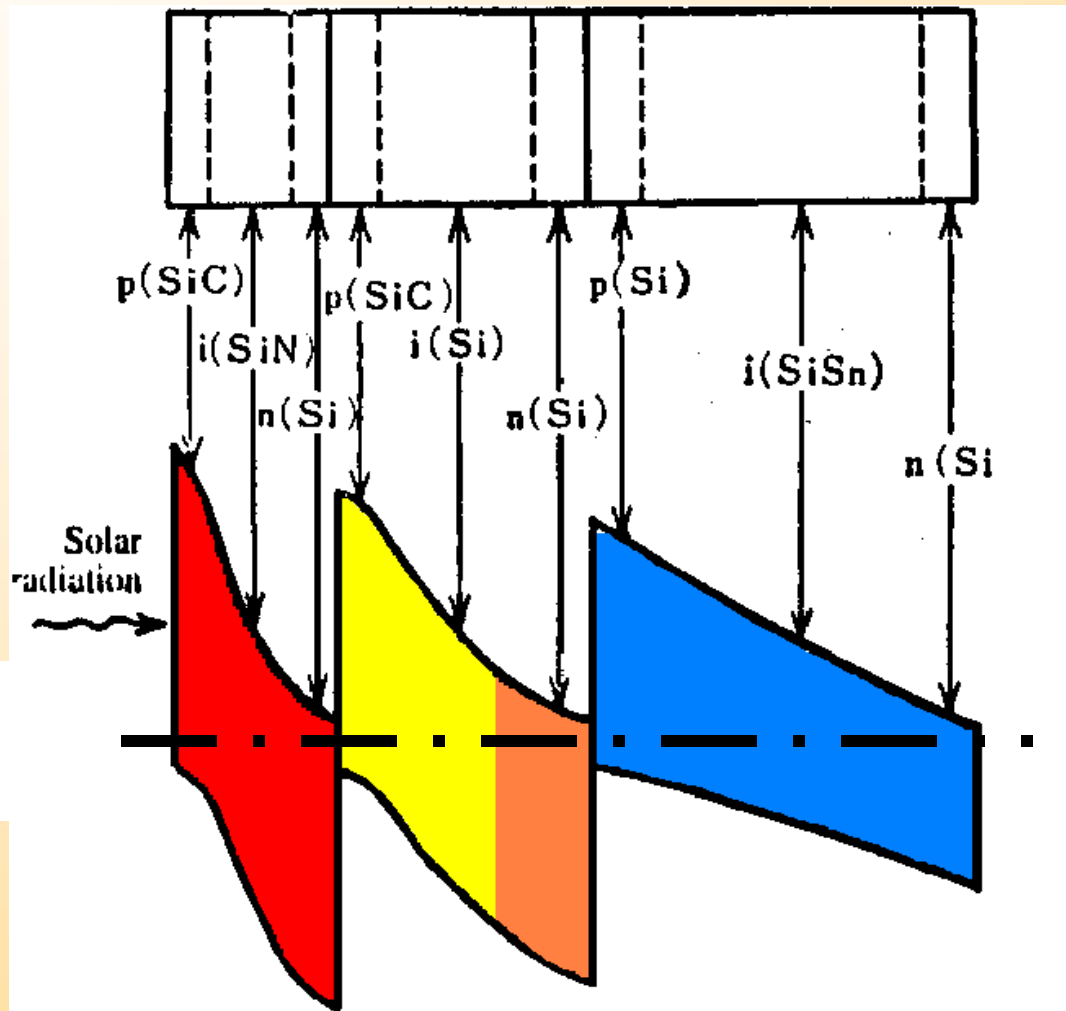
# Celda Solar de Ga As





# Celda Solar Tandem

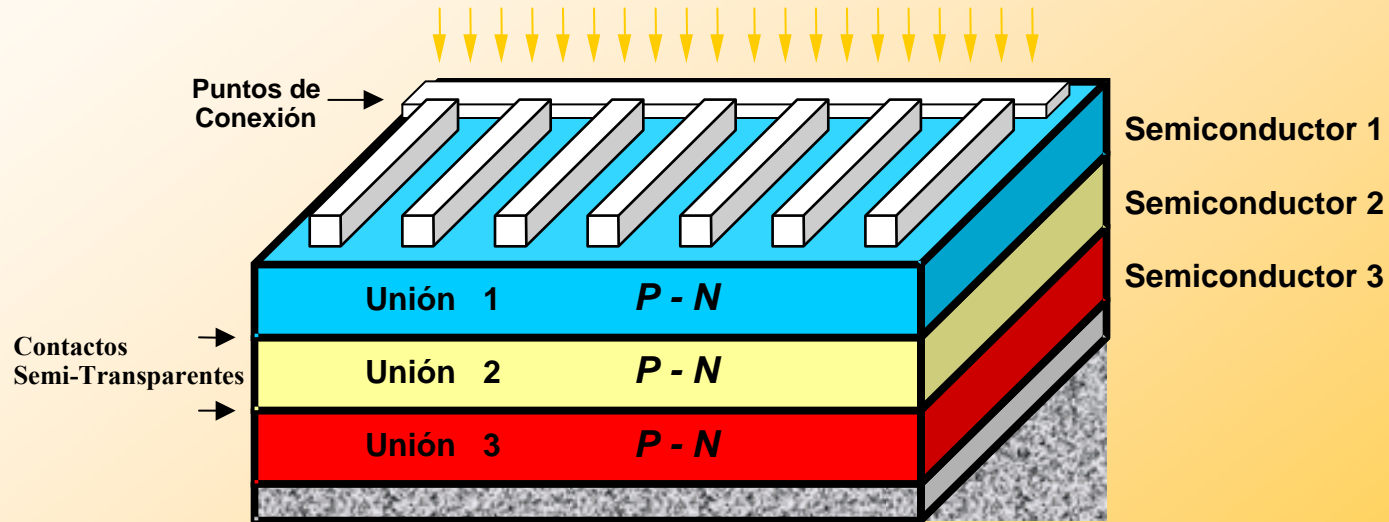
$$E_{g3} < E_{g2} < E_{g1}$$





# Celda Solar Unión Múltiple

Iluminación



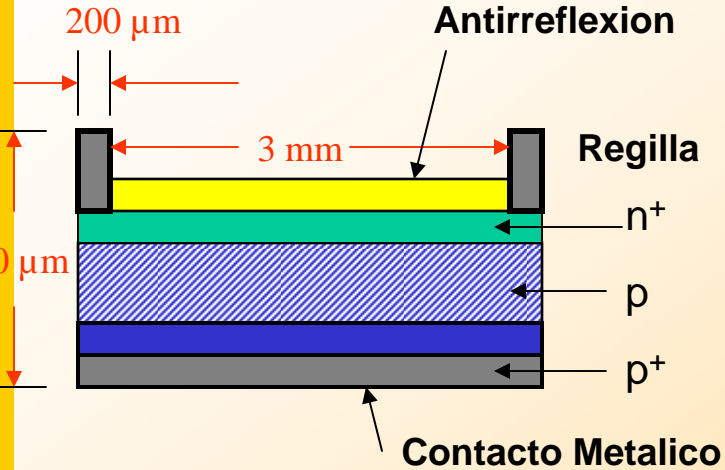
$$E_{g3} < E_{g2} < E_{g1}$$



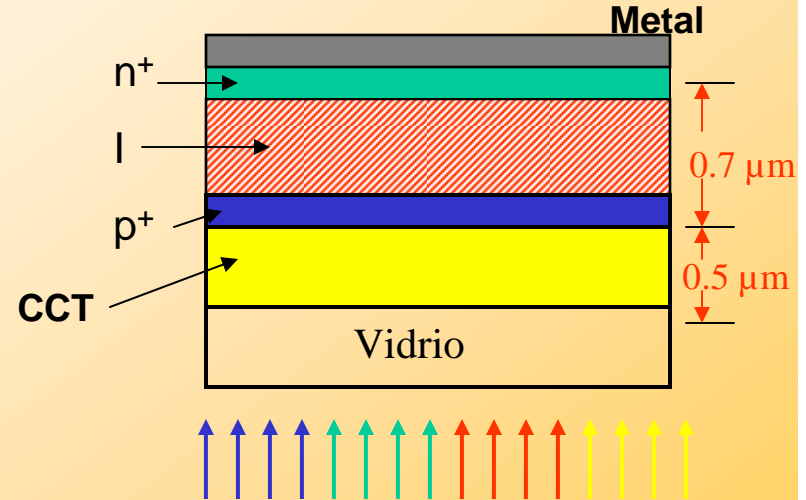
# Estructuras y Celdas Solares Aplicación terrestre



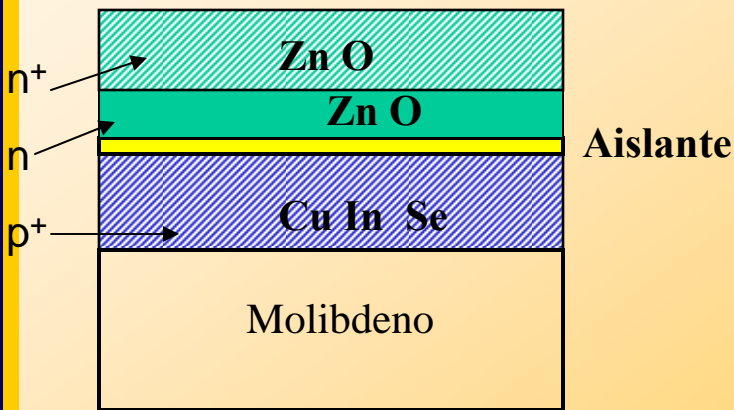
### Homounión Si



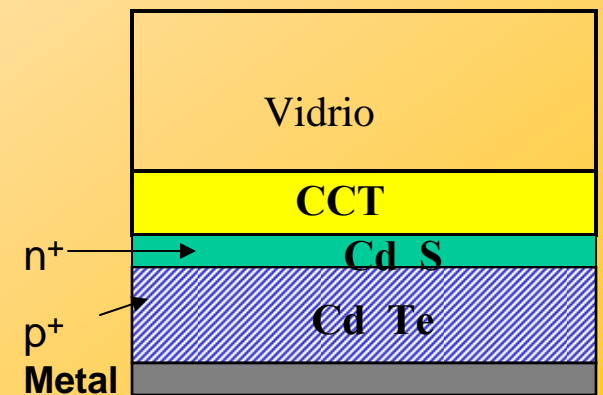
### Unión PIN de a-Si : H



Centro de Investigación en Energía, UNAM



Eficiencia	Area
16.9%	0.33 cm <sup>2</sup>



Eficiencia	Area
15.8%	1.05 cm <sup>2</sup>

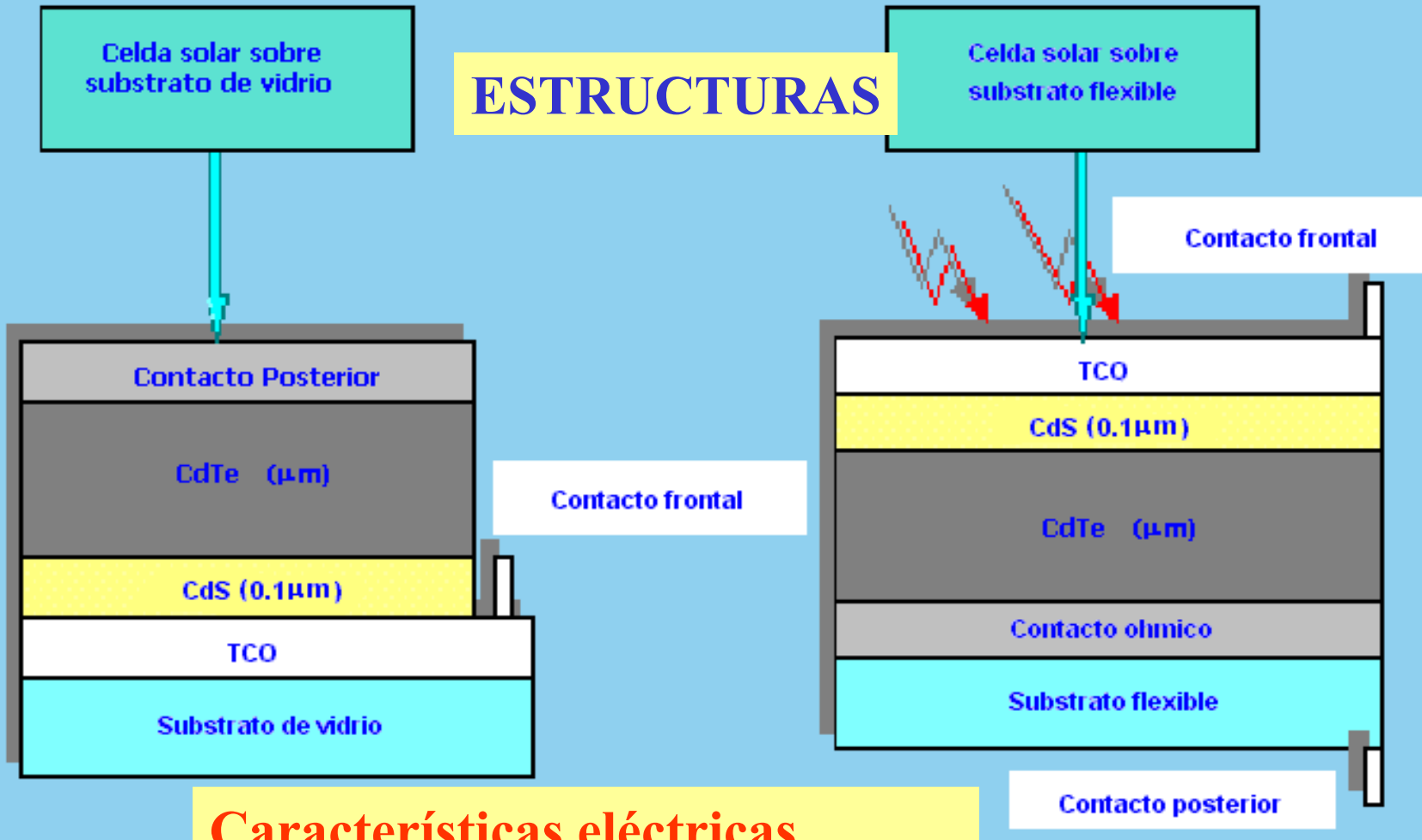


# TELURIO DE CADMIO



Métodos: Varios

## ESTRUCTURAS



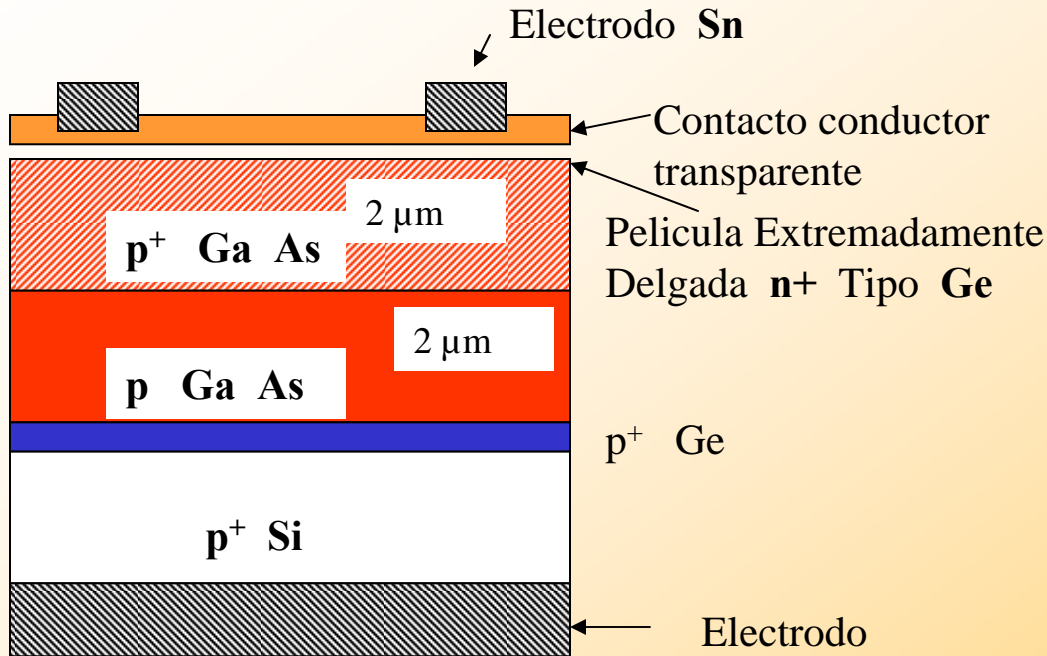
### Características eléctricas

$V_{ca} = 0.84 \text{ V}$  ;  $J_{cc} = 26.1 \text{ mA/cm}^2$

$FF = 73.1$  ;  $\eta = 16.0$



# ARSENIURO DE GALIO



$$V_{oc} = 1.02 \text{ V}$$

$$I_{sc} = 28.2 \text{ mA / cm}^2$$

$$FF = 87.1$$

$$\eta = 25.1\%$$



# ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

	<b>Diseño en homounión</b>	<b>Estatus</b>
TIPO DE TECNOLOGÍA	*Silicio monocristalino (gruesa) *Silicio policristalino (gruesa) *Silicio amorfo (película delgada) Películas delgadas monocristalinas *Arsenuro de Galio (GaAs)	Disponible comercialmente  Bajo desarrollo
	<b>Diseño en Heterounión</b>	<b>Estatus</b>
TIPO DE TECNOLOGÍA	Películas delgadas policristalinas: *Cobre-Indio-Diselenio *Telenuro de Cadmio	Próximamente Disponibles comercialmente
	<b>Diseño de unión múltiple</b>	<b>Estatus</b>
TIPO DE TECNOLOGÍA	a-SiC/a-Si a-Si/a-Si a-Si/a-SiGe a-Si/poli-Si a-Si/CuInSe GaAs/GaSb	Bajo Desarrollo
CONFIGURACIÓN DE MÓDULOS	Módulos Planos  Módulos con concentrador	Disponible comercialmente  Disponible comercialmente



# EFICIENCIA DE CELDAS DE SILICIO CRISTALINO

CELIDAS SOLARES BASADAS EN SILICIO CRISTALINO; IRRADIANCIA AM1.5					
TÉCNICA DE ELABORACIÓN		TIPO DE CELDA	ORGANIZACIÓN	ÁREA (cm <sup>2</sup> )	h (%)
Zona Flotante	MX	PERL	Univ. de Nueva Gales AUSTRALIA	4	24.2
(ZF mx)		BPCC	Stanford	37.5	22.7
		Simple BCC	Stanford	10	21.2
		BCSC	Univ. de Nueva Gales AUSTRALIA	12	21.3
Czochralski	MX	BCSC	Univ. de Nueva Gales AUSTRALIA	47	18.3
(CZ mx)		n <sup>+</sup> pp <sup>+</sup>	Telefunken, Siemens	113	18.0
		n <sup>+</sup> pp <sup>+</sup>	Sharp	100	17.3
		comercial	Varios	100	13.0
Silicio Moldeado	PX	PESC	Univ. de Nueva Gales AUSTRALIA	4	17.1
(CS px)		BCSC	Univ. de Nueva Gales AUSTRALIA	10.5	16.2
		n <sup>+</sup> pp <sup>+</sup>	Sharp	100	15.8
		n <sup>+</sup> pp <sup>+</sup>	Telefunken	142	13.5
		comercial	Varios (Solarex, Kyocera,...)	100	12.0



# EFICIENCIA DE CELDAS Y MODULOS DE SILICIO CRISTALINO

MODULOS PLANOS					
Zona Flotante	<b>MX</b>	BCSC	Univ. de Nueva Gales AUSTRALIA	806	16.4
Czochralski	<b>MX</b>	n + pp+	Telefunken, Siemens	1000	16.8
Silicio Moldeado	<b>PX</b>	Comercial	Solarex	2000	13
Silicio Moldeado	<b>PX</b>	Comercial	Solarex, Kyocera, Photowatt	1260	12

# TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA COMERCIAL

## TELURIO DE CADMIO

First Solar

$$V_{CA} \approx 0.84 \text{ V}$$

$$J_{CC} \approx 26.7 \text{ mA/cm}^2$$

$$P_M \approx 16.93 \text{ mW/cm}^2$$



## SELENIURO DE COBRE-INDIO

Siemens Solar Industries

$$V_{CA} \approx 0.669 \text{ V}$$

$$J_{CC} \approx 35.7 \text{ mA/cm}^2$$

$$P_M \approx 18.39 \text{ mW/cm}^2$$

