

# ***Energía Solar Fotovoltaica: Perspectivas tecnológicas***



**POLITÉCNICA**  
Instituto de Energía Solar

**MIGUEL ÁNGEL EGIDO AGUILERA**

**Dr. Ing. en Telecomunicación**

**INSTITUTO DE ENERGÍA SOLAR**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

## INTRODUCCIÓN

- \* *Efecto fotovoltaico: la célula solar*
- \* *Recurso solar*

## TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS

## APLICACIONES CONECTADAS A LA RED

- \* *Consideraciones económicas y ambientales*
- \* *Integración en entornos urbanos*

## APLICACIONES AUTÓNOMAS

## MERCADOS FOTOVOLTAICOS

## RETOS PARA LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

## ¿QUÉ ES LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA?

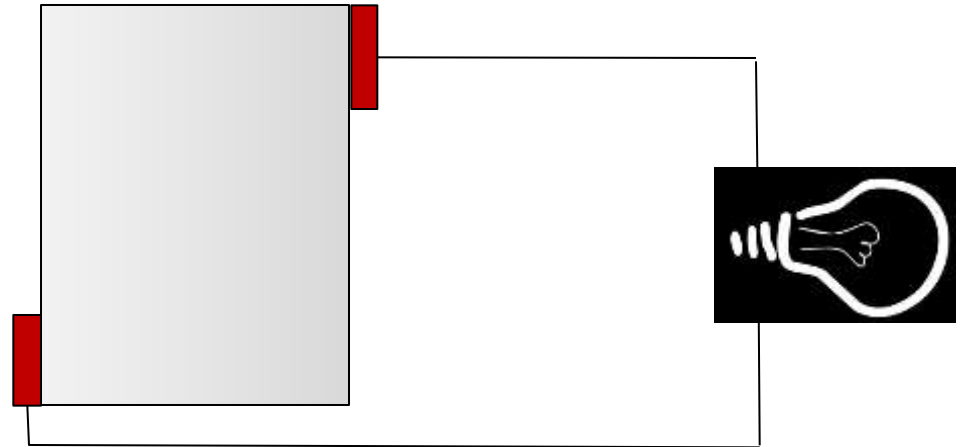
La **Conversión Fotovoltaica** consiste en la transformación directa de la radiación solar, la **luz del sol**, en **electricidad**, sin necesidad de ciclos térmicos, cambios químicos o procesos mecánicos que impliquen partes móviles.

Esta conversión se produce en dispositivos llamados **células solares** que explotan ciertas propiedades de los **materiales semiconductores**



## LA CÉLULA SOLAR: PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

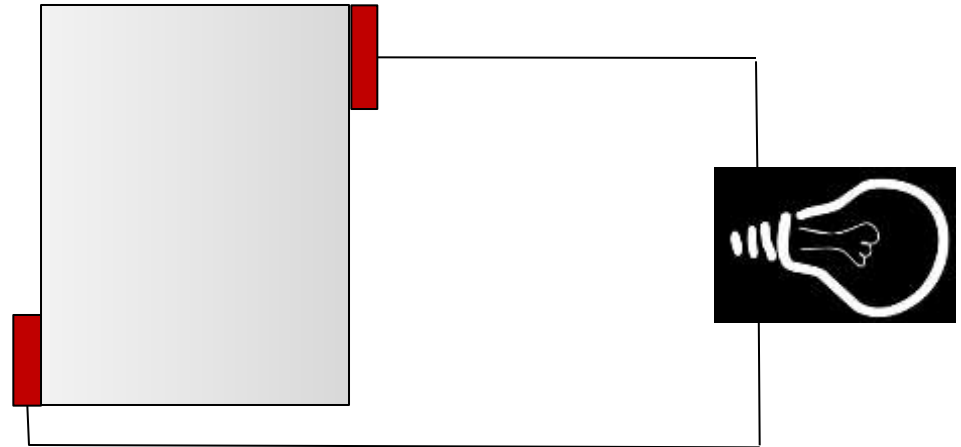
Un **semiconductor** es un sólido que permite la circulación de corriente a través de él bajo ciertas condiciones. De esta manera puede operar como un **conductor** o un **aislante** según, por ejemplo, la radiación luminosa incidente.



Cuando un **fotón** incide sobre una célula solar, puede reflejarse

## LA CÉLULA SOLAR: PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

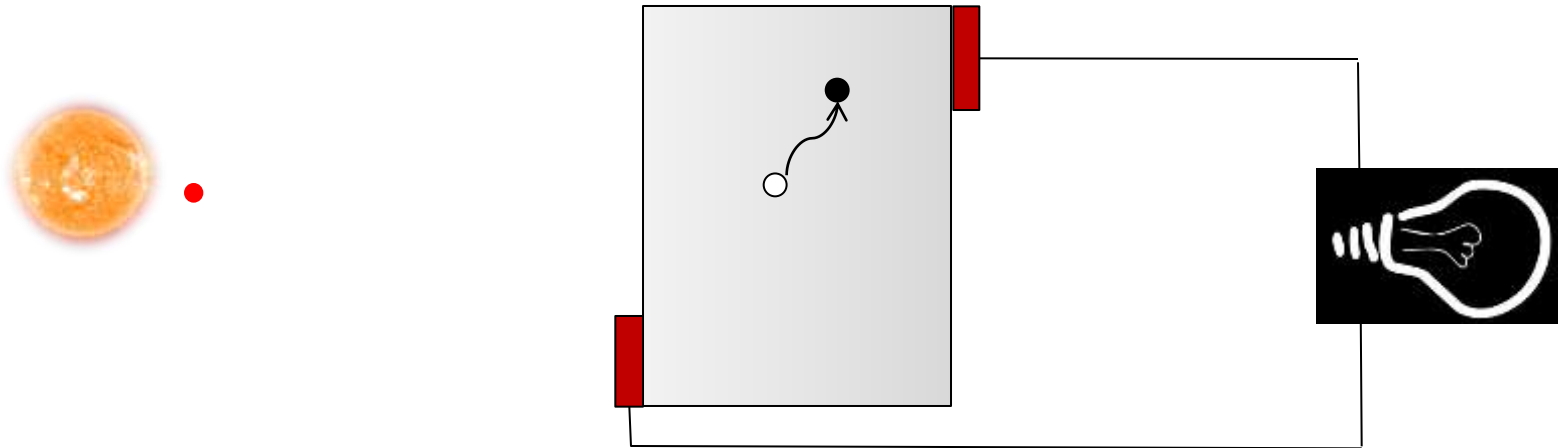
Un **semiconductor** es un sólido que permite la circulación de corriente a través de él bajo ciertas condiciones. De esta manera puede operar como un **conductor** o un **aislante** según, por ejemplo, la radiación luminosa incidente.



Cuando un **fotón** incide sobre una célula solar, puede reflejarse, puede transmitirse

## LA CÉLULA SOLAR: PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

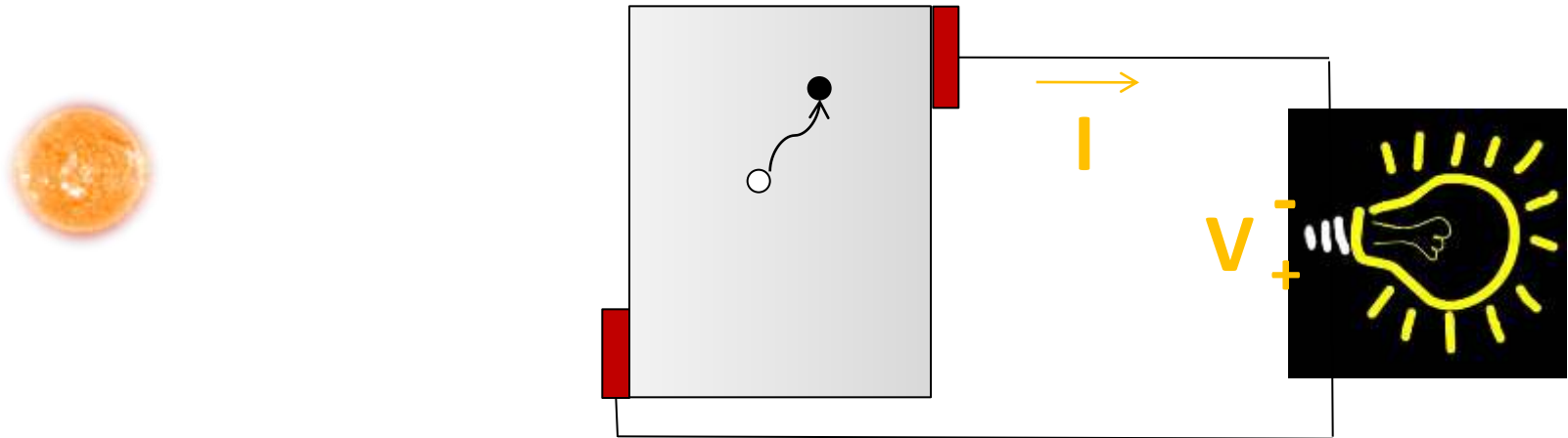
Un **semiconductor** es un sólido que permite la circulación de corriente a través de él bajo ciertas condiciones. De esta manera puede operar como un **conductor** o un **aislante** según, por ejemplo, la radiación luminosa incidente.



Cuando un **fotón** incide sobre una célula solar, puede reflejarse, puede transmitirse o puede absorberse, cediendo su energía a un electrón del material

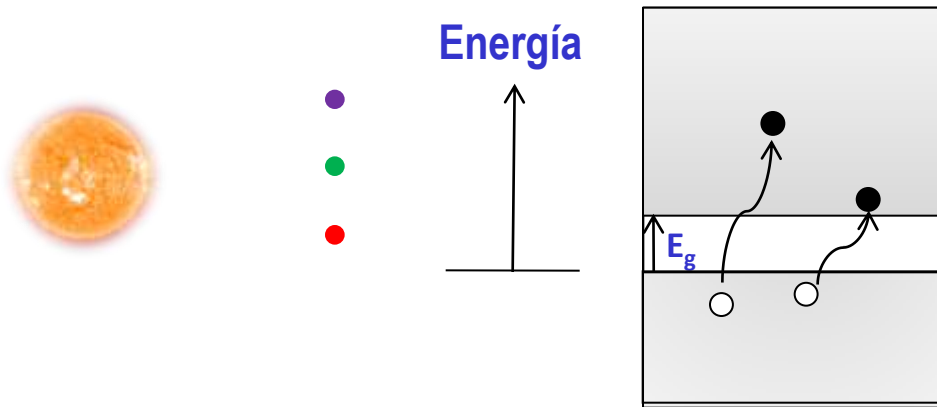
## LA CÉLULA SOLAR: PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Este **electrón** con un exceso de energía podrá moverse por el material hasta alcanzar un contacto. El resultado es la **generación por la luz de una corriente eléctrica**, o lo que es lo mismo, **fotocorriente ( $I$ )**.



## LA CÉLULA SOLAR: PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

El modo en que se absorben los fotones incidentes depende del material semiconductor y su **ancho de banda (*bandgap*)  $E_g$** , algo así como la separación entre baldas de una estantería...

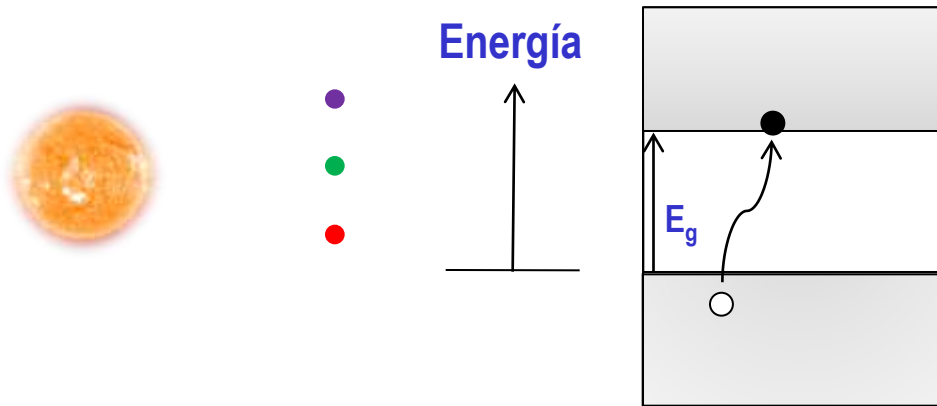


Los **fotones** con energías menores que el *bandgap* del material no serán absorbidos, aquellos **con energías mayores que el *bandgap* podrán ceder su energía a un electrón** del material y permitirle “saltar a la balda siguiente”, desde donde pueden **generar fotocorriente**.



## LA CÉLULA SOLAR: PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

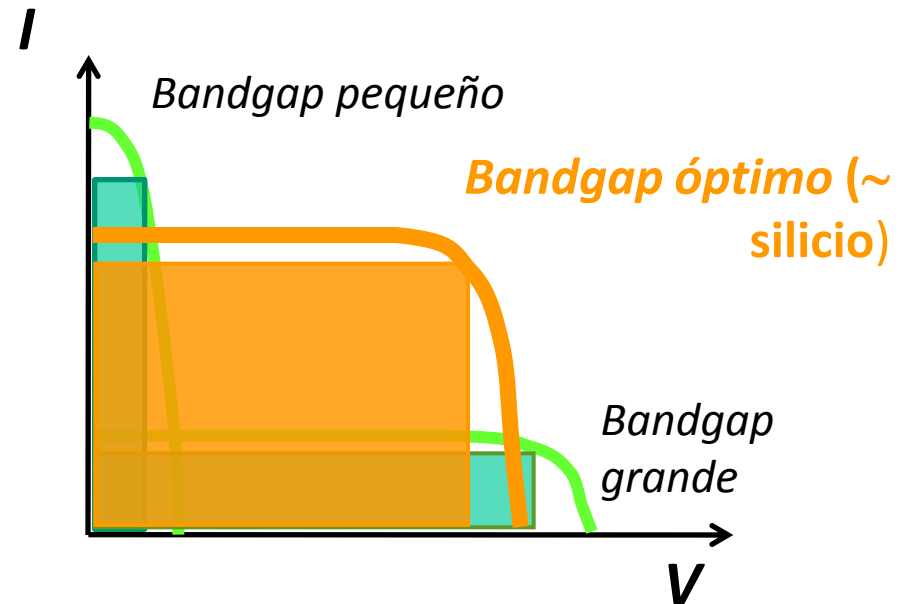
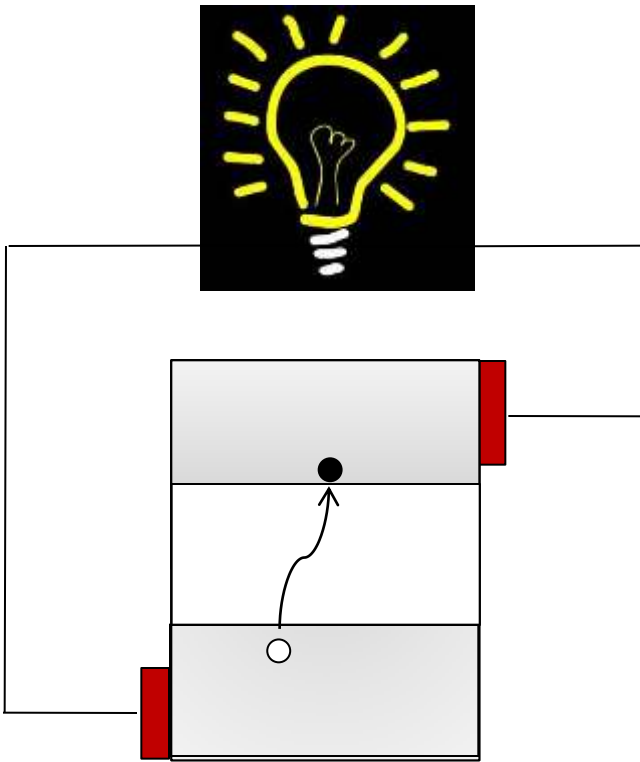
En un semiconductor con un **bandgap mayor** la absorción de fotones será menor y por tanto **menor será la fotocorriente**. Sin embargo, **estos electrones tendrán, al menos, la energía del bandgap** y esto determinará el **voltaje de salida de la célula (V)**.



## LA CÉLULA SOLAR: PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

¿Cuál es entonces la combinación ideal entre fotocorriente generada y voltaje de salida de la célula?

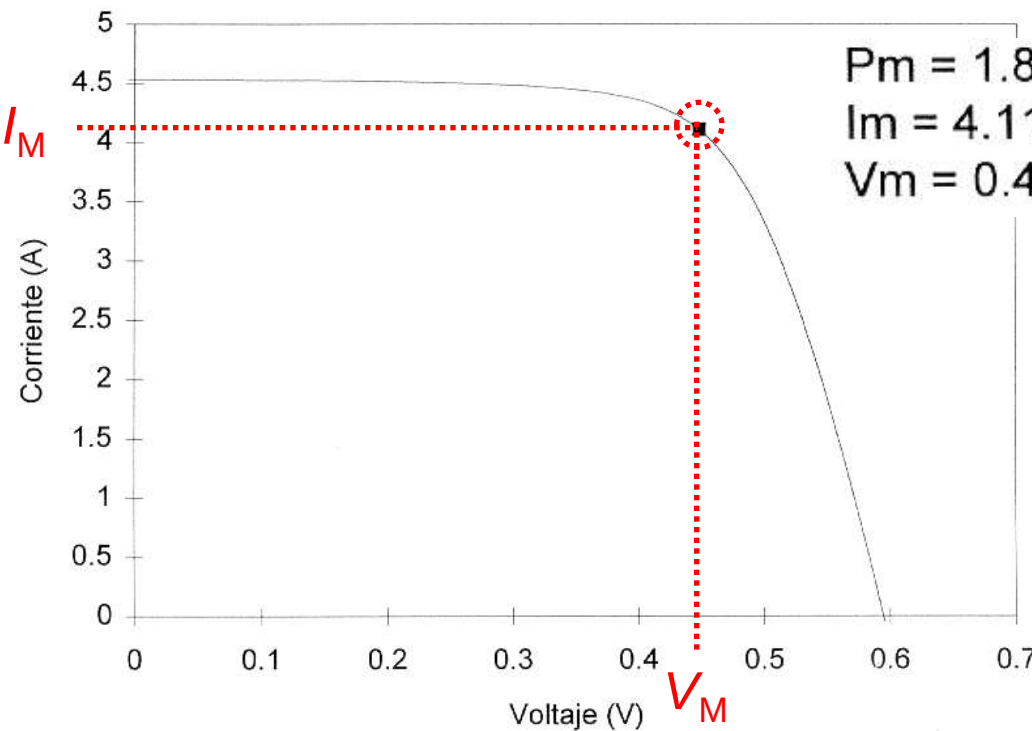
La que proporcione una mayor potencia de salida



$$P = I \times V$$

# LA CÉLULA SOLAR: PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

## Caracterización eléctrica de una célula solar



Potencia máxima

Corriente de máxima potencia

Tensión de máxima potencia

$$P_M = \text{Potencia máxima} = I_M \cdot V_M$$

## Eficiencia de conversión (rendimiento):

$$\eta = \frac{P_M}{S \cdot G}$$

$S$  = Área célula ( $\text{m}^2$ )

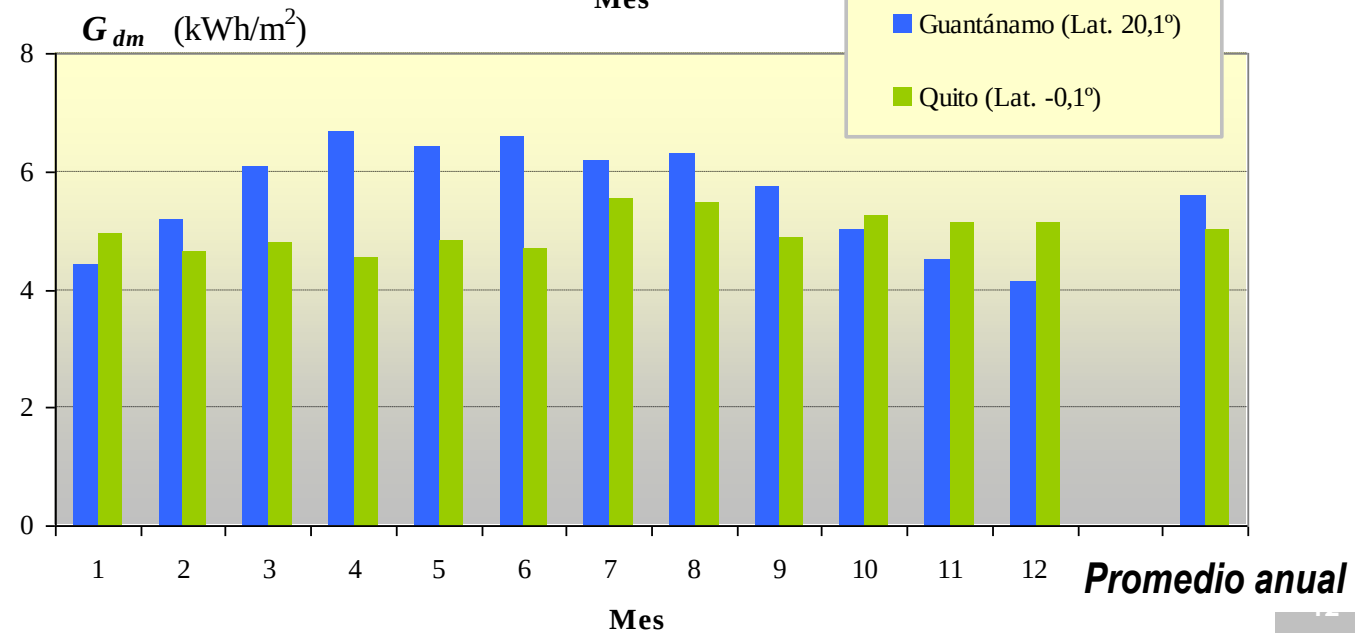
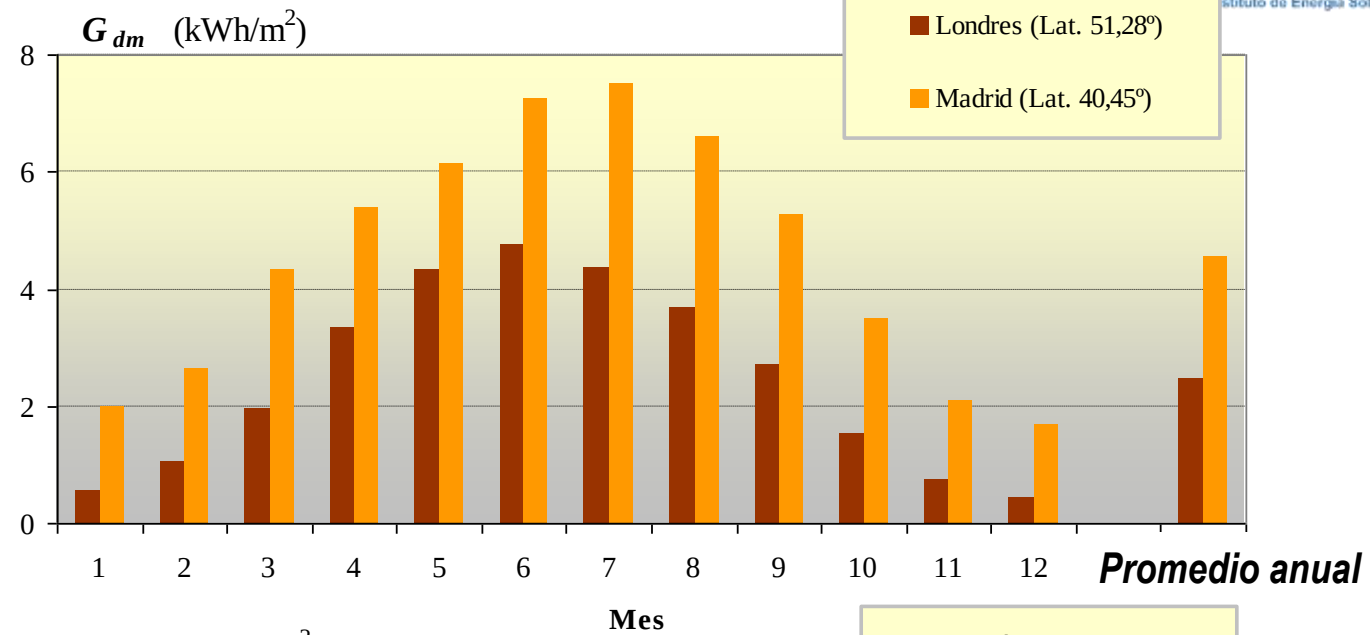
$G$  = Irradiancia incidente ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

# 1. Introducción



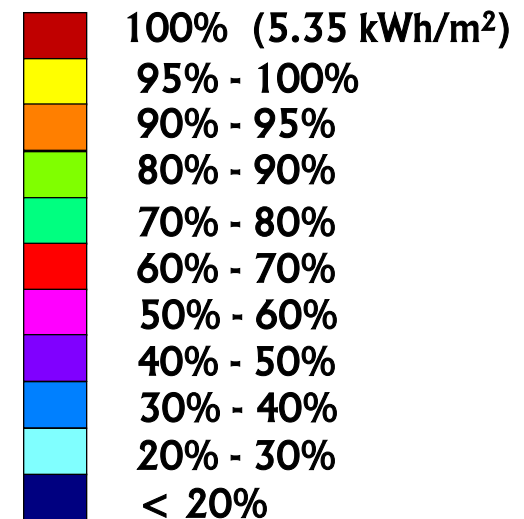
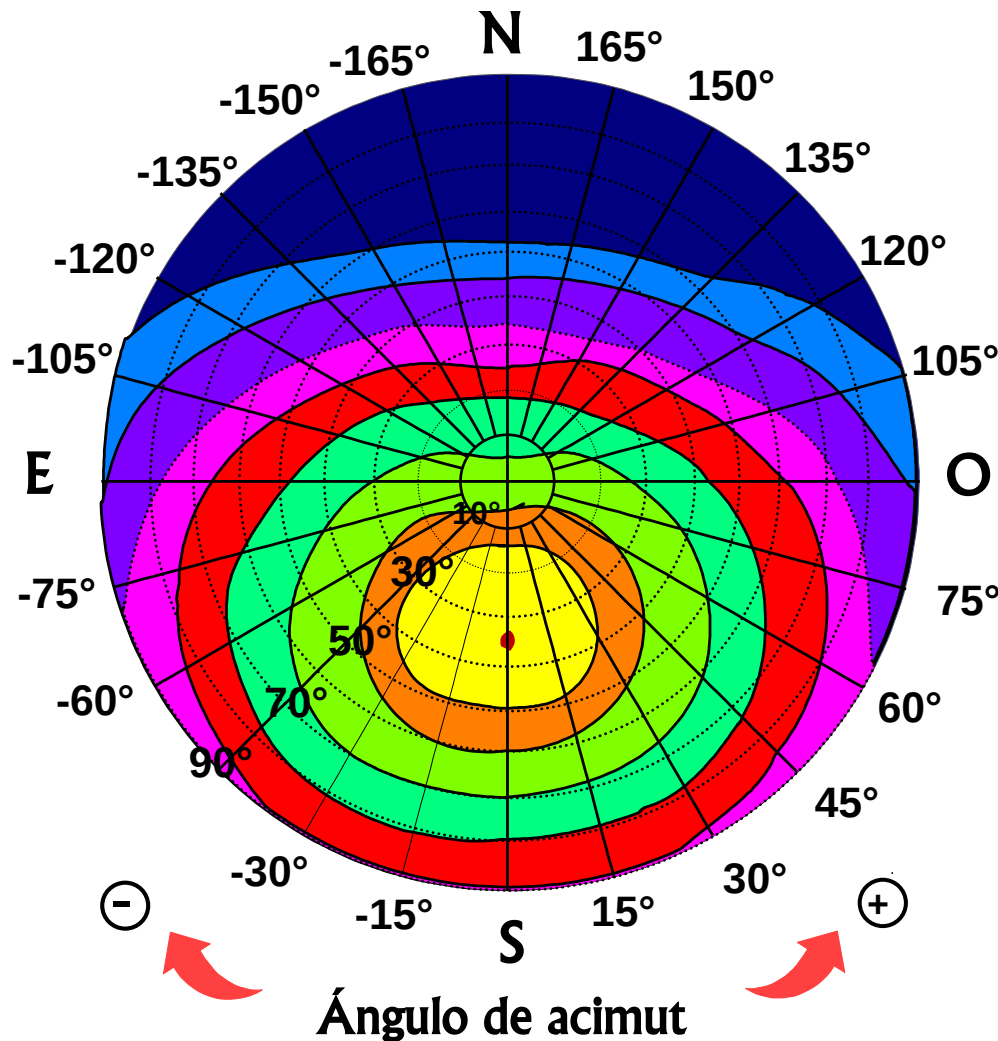
POLITÉCNICA  
Instituto de Energía Solar

## Ejemplos



## Ejemplo: Madrid

Promedio diario de una  
superficie óptima [ $G_{dm}(\alpha_{opt}, \beta_{opt})$ ],  
según el AMT de Madrid

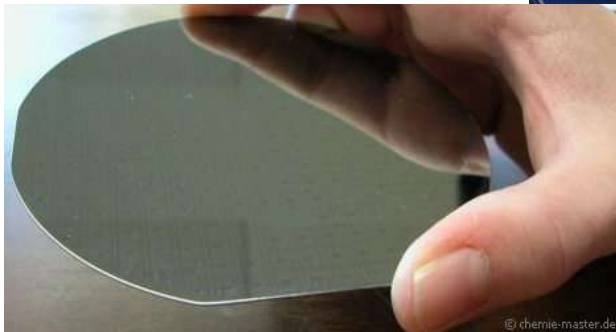


Pérdidas respecto máximo:  
 $\beta$ : 0,2% /° (entorno  $\pm 15^\circ$ )  
 $\alpha$ : 0,05% /° (entorno  $\pm 25^\circ$ )

## 2. TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS

### CÉLULAS SOLARES DE SILICIO

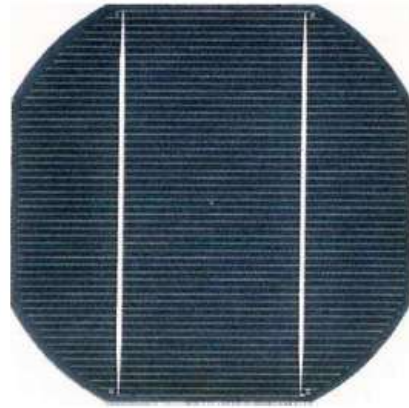
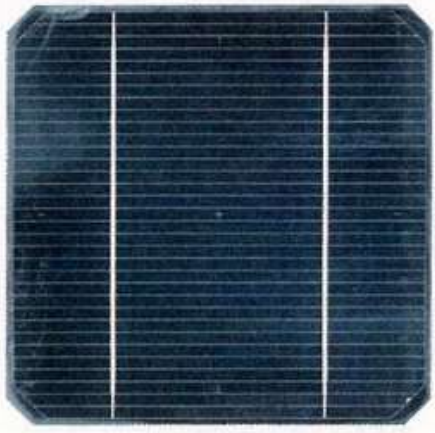
- Silicio: elemento más abundante en la corteza terrestre (más del 60%)
- Más del 80% de las células solares se fabrican con silicio cristalino





### \* CÉLULAS DE SILICIO MONOCRISTALINO

12,5 cm (5")  $\eta=14-18.5\%$



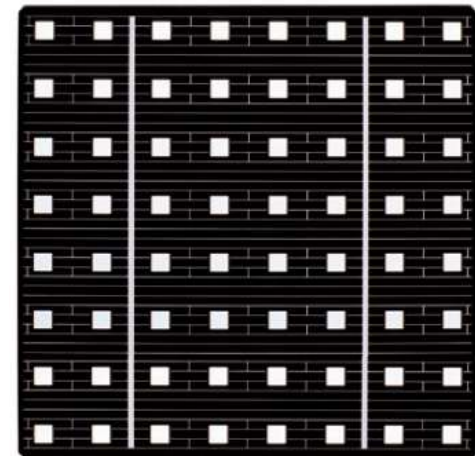
5"  $\eta=20\%$



15,6 cm (6")  $\eta=17-18.5\%$



5"; transparencia 10%;  $\eta=14\%$



### \* CÉLULAS DE SILICIO MULTICRISTALINO

$\eta=14-16\%$

5"

$\eta=14\%$



6"

$\eta=16-17\%$



De colores:

Color vs. espesor capa AR

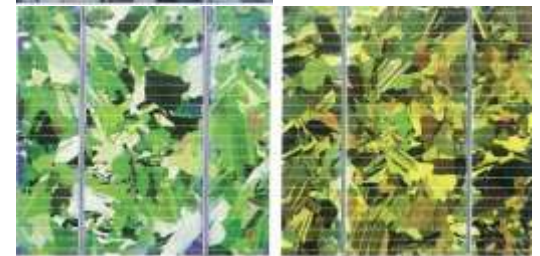


$\eta=10-12\%$

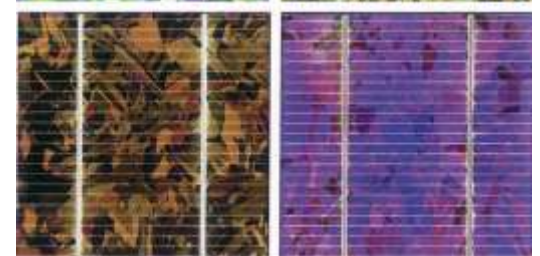


$\eta=12-14\%$

$\eta=12-14\%$

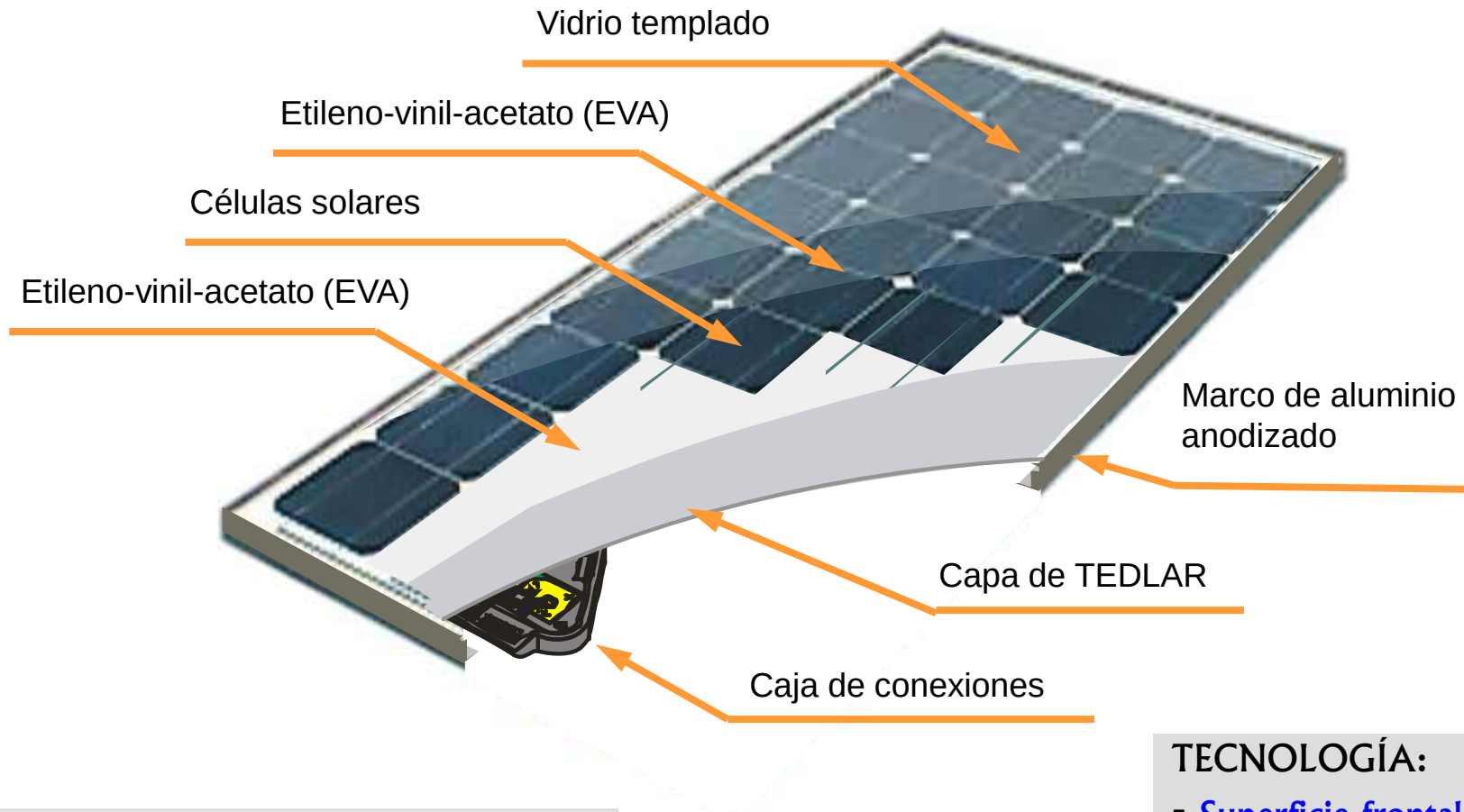


$\eta=12-14\%$





## 2. Tecnologías fotovoltaicas



### FUNCIONES:

- Niveles de voltaje y corriente
- Rigidez estructural
- Protección intemperie (fatiga térmica, radiación UV, abrasión)

- Aislamiento eléctrico
- Transparencia
- Facilidad de instalación
- Disipación del calor

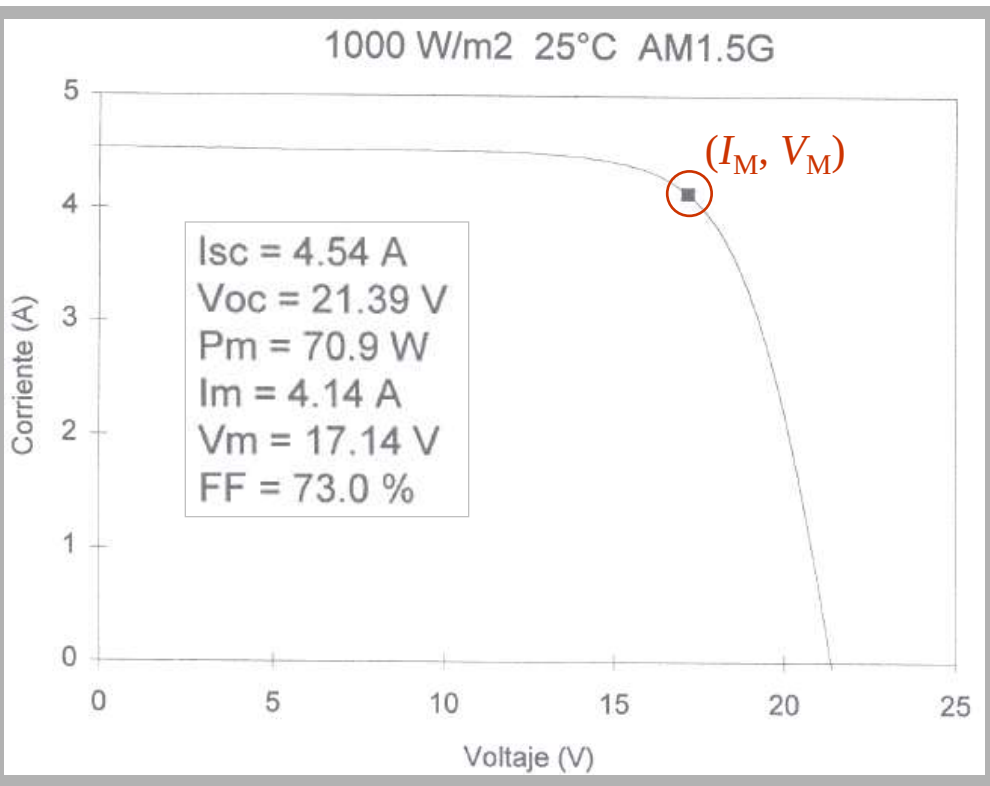
### TECNOLOGÍA:

- Superficie frontal: vidrio
- Superficies posterior: lámina
- Encapsulante: E.V.A.
- Contactos de Cu (Sn)
- Marco perimetral Aluminio
- Junta de silicona
- Tornillería inoxidable

### Caracterización eléctrica de un módulo fotovoltaico

Condiciones Estándar de Medida (*Standard Test Conditions*):

- Irradiancia incidente perpendicular al módulo:  $G = 1000 \text{ W/m}^2$
- Espectro de la radiación solar de un día claro (AM1.5G)
- Temperatura de células solares,  $T_C = 25^\circ\text{C}$



$P_M = I_M \cdot V_M$  : Potencia máxima

**Potencia nominal:**

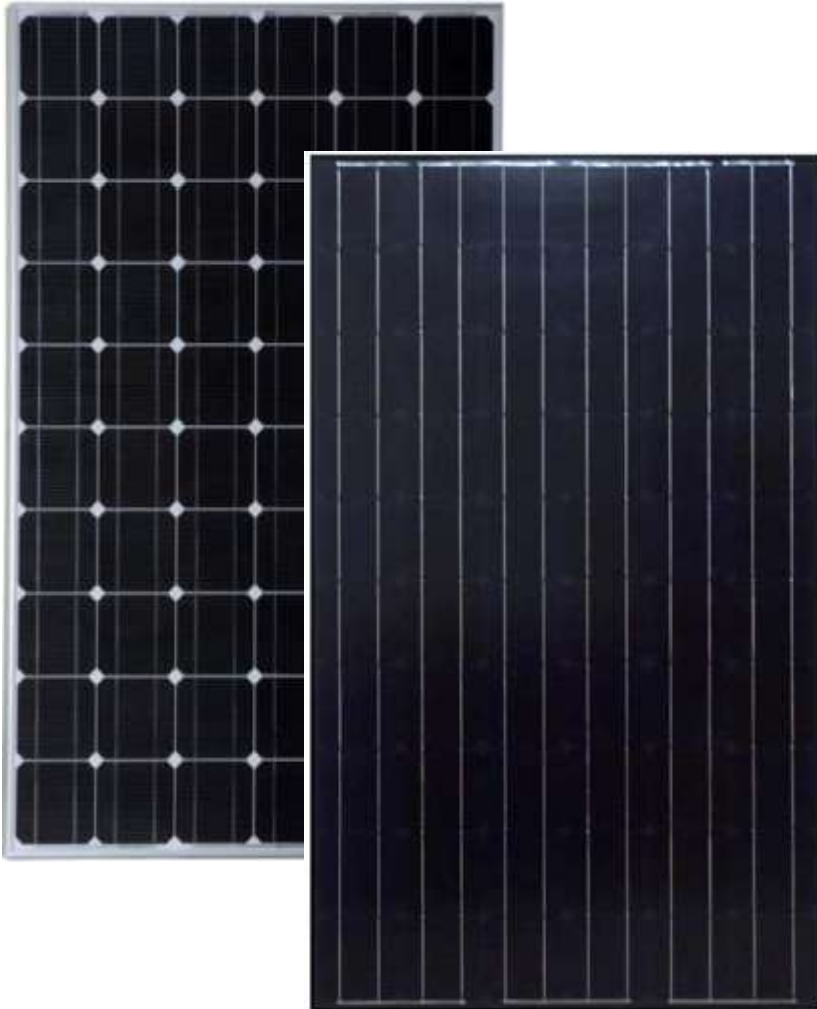
Potencia máxima en CEM (W ó Wp  
→ “vatios-pico”)

**Eficiencia de conversión:**

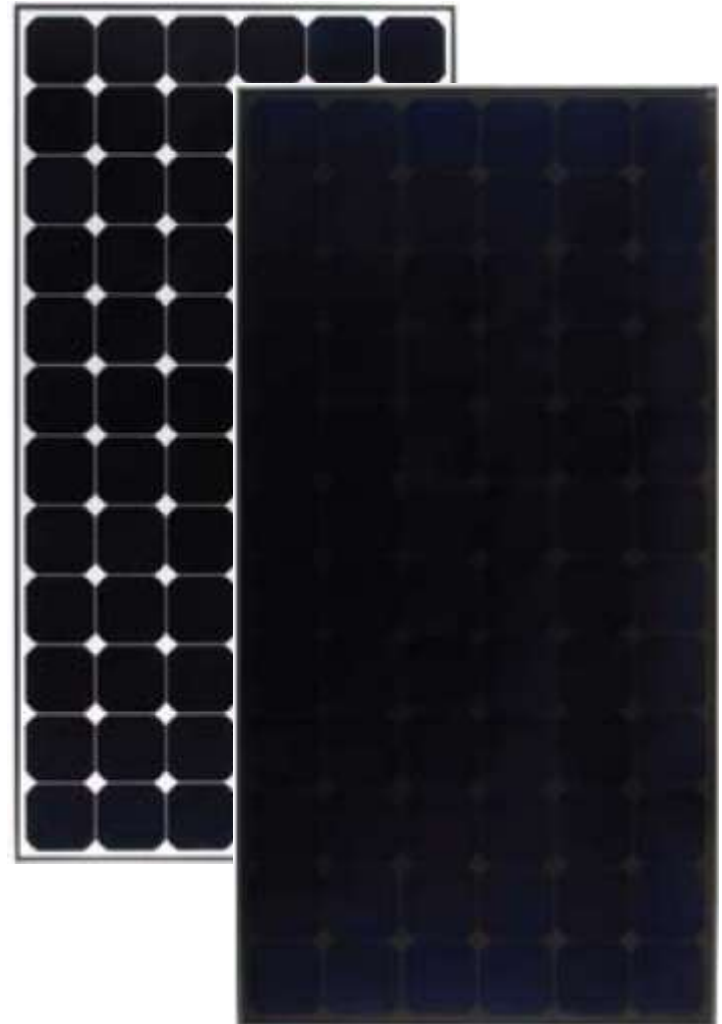
$$\eta = \frac{P_M}{A_M \cdot G} \quad \begin{array}{l} A_M = \text{Área de módulo (m}^2\text{)} \\ G = 1000 \text{ W/m}^2 \end{array}$$

### Ejemplos:

Silicio monocristalino



Silicio monocristalino  
(tecnología Back-contact)



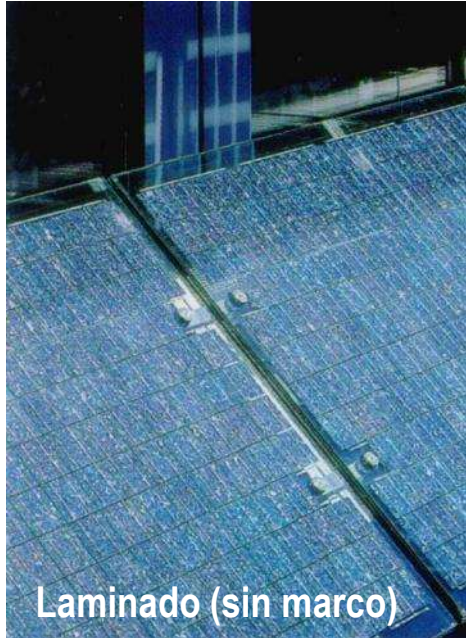
## 2. Tecnologías fotovoltaicas



POLITÉCNICA  
Instituto de Energía Solar

Módulos para integración arquitectónica:

Vidrio-vidrio



Laminado (sin marco)

Semi-transparentes



Vidrio-vidrio(/tedlar) con  
células espaciadas





## 2. Tecnologías fotovoltaicas



POLITÉCNICA  
Instituto de Energía Solar

### Vidrio-Vidrio con células perforadas



### Formas especiales





## 2. Tecnologías fotovoltaicas



POLITÉCNICA  
Instituto de Energía Solar

### Tejas fotovoltaicas



## 2. Tecnologías fotovoltaicas



POLITÉCNICA  
Instituto de Energía Solar

### Módulos compatibles con tejas



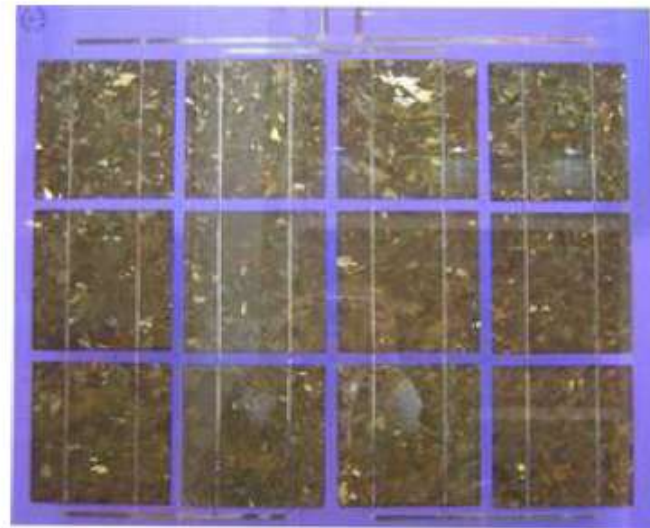
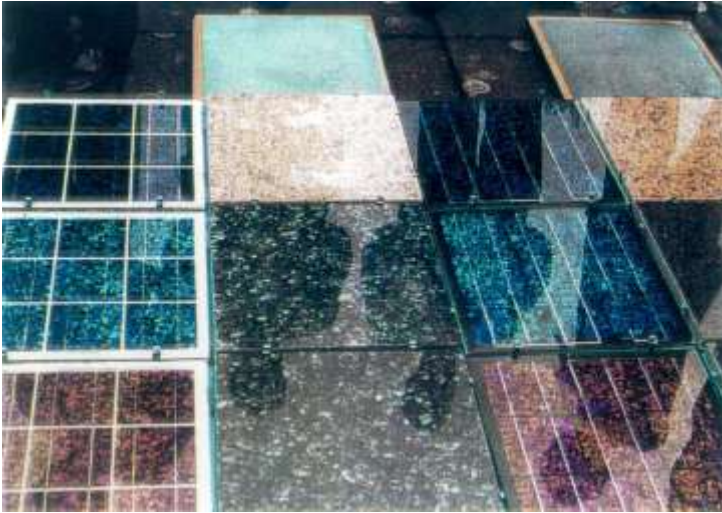


## 2. Tecnologías fotovoltaicas



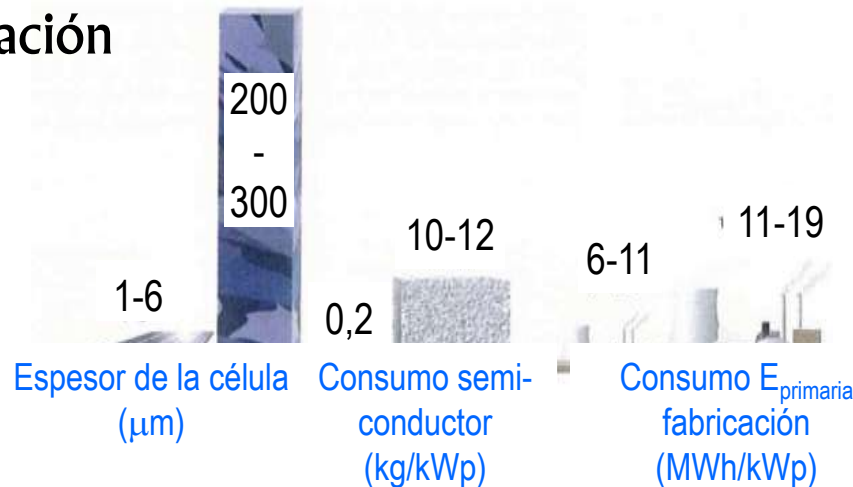
POLITÉCNICA  
Instituto de Energía Solar

### Diferentes colores y acabados



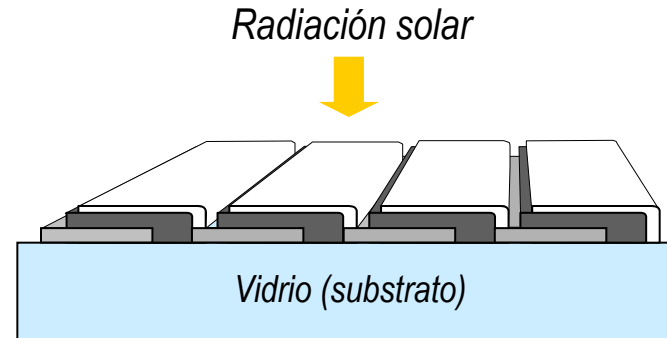
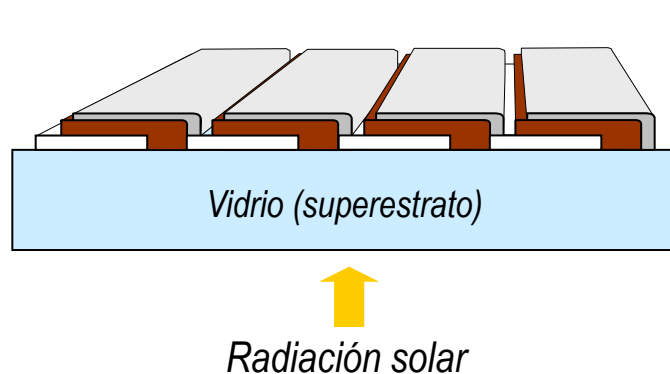
# TECNOLOGÍAS DE CAPA DELGADA

- La mayor parte de la radiación solar se absorbe en una capa de pocas micras de la célula solar → posibilidad de ahorro de material activo y energía de fabricación

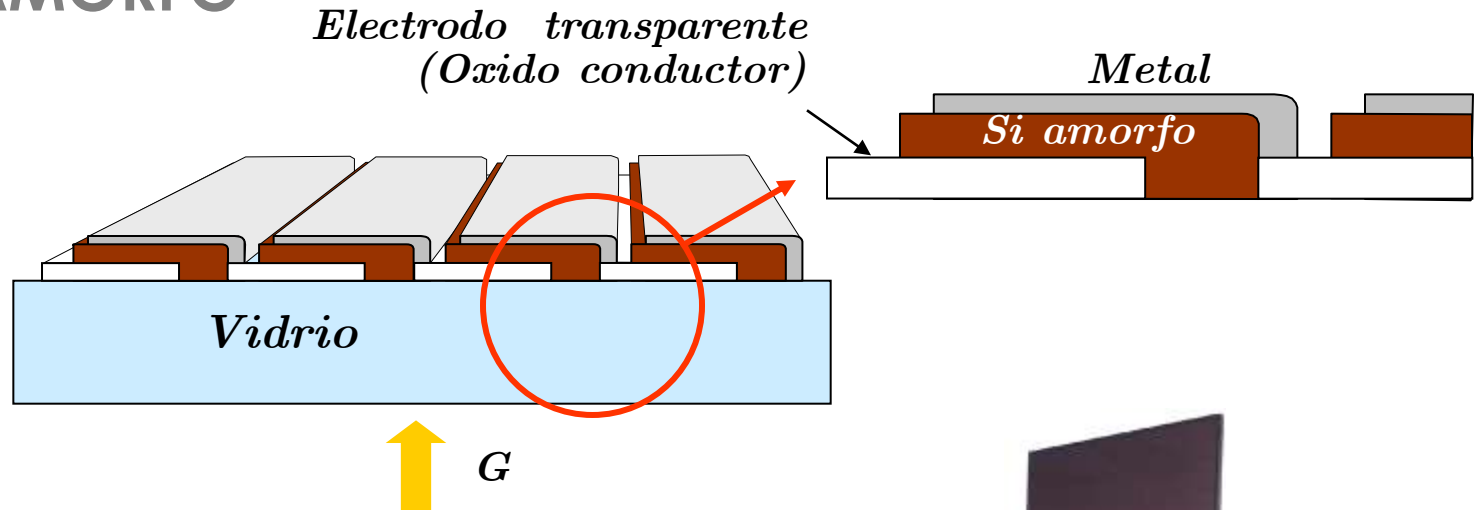


[Fuente: Planning and Installing Photovoltaic Systems, 2008]

- Fabricación integral del módulo: las capas se depositan e interconectan sobre un sustrato, en tiras longitudinales de 0.5 – 2 cm de anchura



### \* SILICIO AMORFO



- Eficiencia típica: 3 - 8% (estabilizada)
- Substratos rígidos (vidrio, metal) o flexibles (plásticos): 1-3 mm
- Aspecto: uniforme
- Color: marrón rojizo, azul, azul-violeta
- Posibilidad de distintas transparencias







### \* CIS (DISELENIURO DE COBRE E INDIO)

- Eficiencia típica: 9 - 11%
- Substratos rígidos (vidrio, 2-4 mm) o flexibles (plástico)
- Aspecto: uniforme
- Color: gris oscuro a negro



### \* CIGS (DISELENIURO DE COBRE, INDIO Y GALIO)

- Eficiencia típica: 11 - 14%



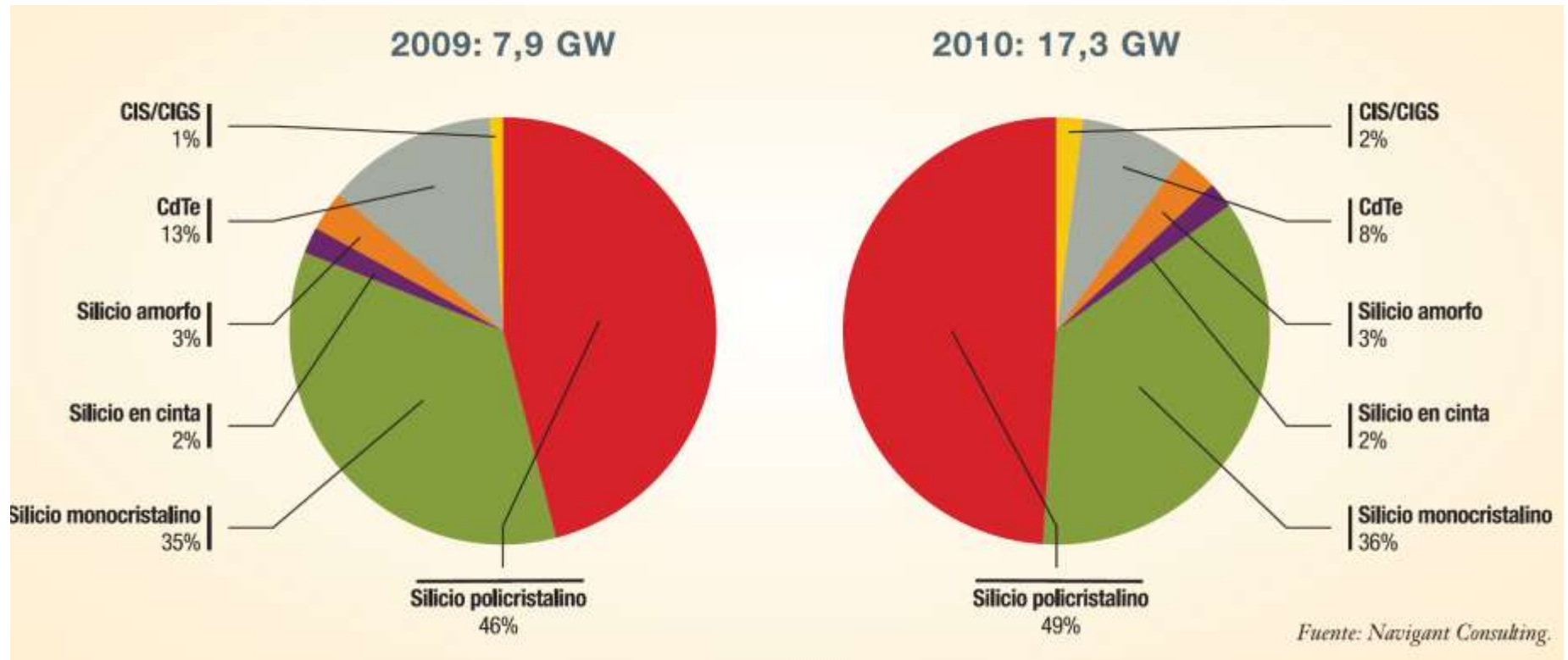
### \* CdTe (TELURURO DE CADMIO)

- Eficiencia típica: 8 - 10%
- Superestratos rígidos (vidrio, 3 mm)
- Aspecto: uniforme
- Color: verde oscuro a negro
- Inconvenientes: Toxicidad del Cadmio
- Menor coste de fabricación





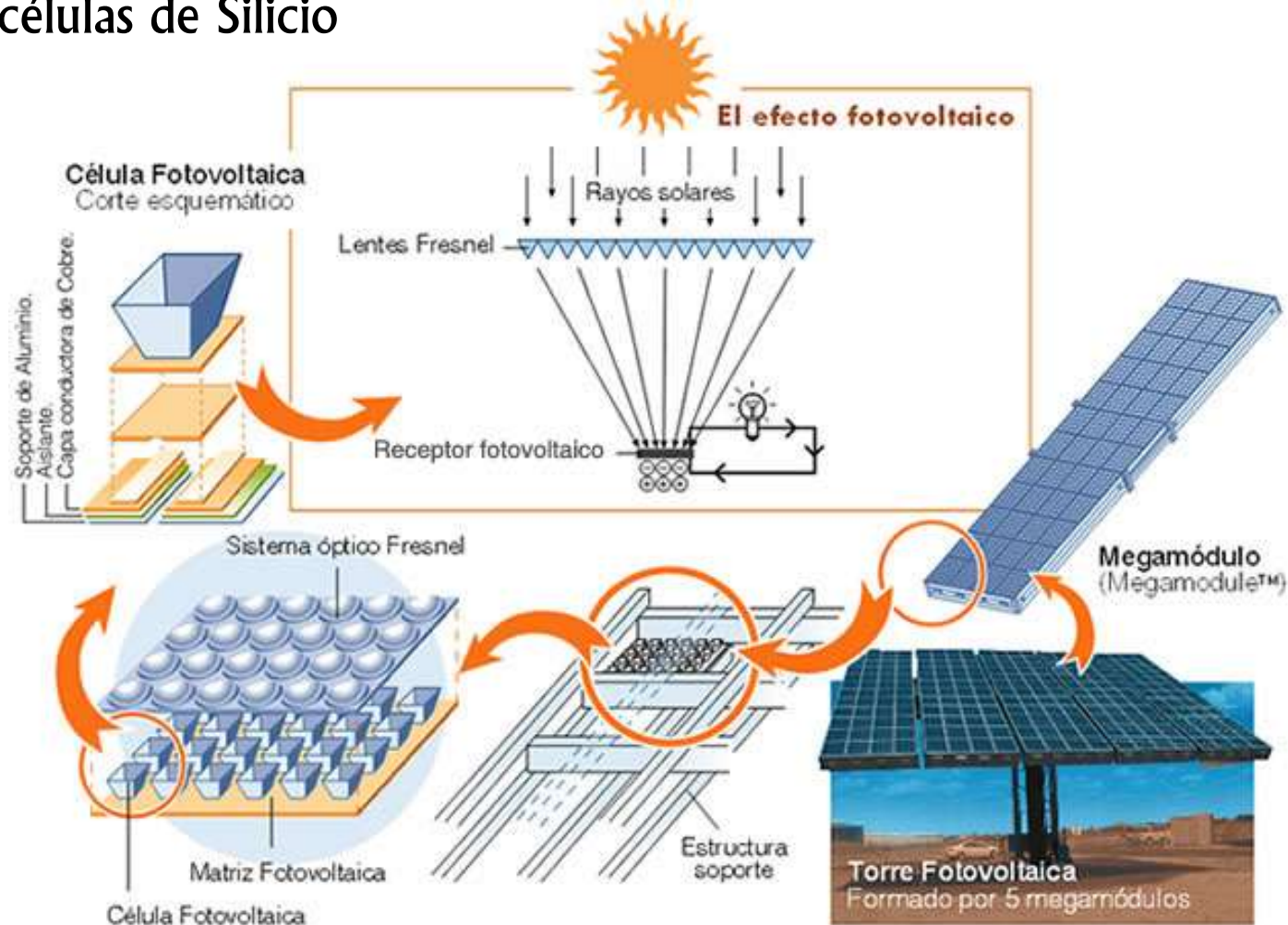
# REPARTO DEL MERCADO MUNDIAL POR TECNOLOGÍAS



[Fuente: ASIF, Informes anuales 2010-11]

# OTRAS TECNOLOGÍAS: CONCENTRACIÓN FV

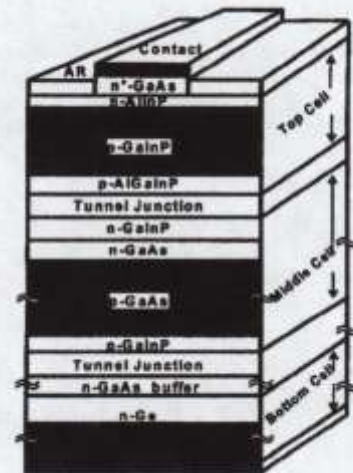
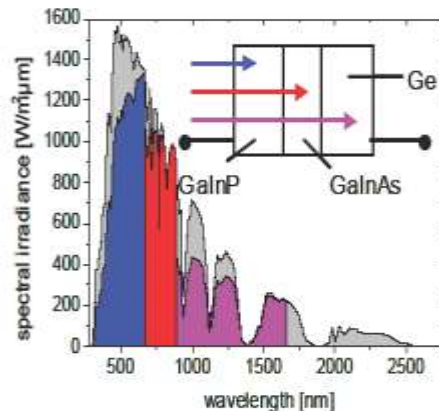
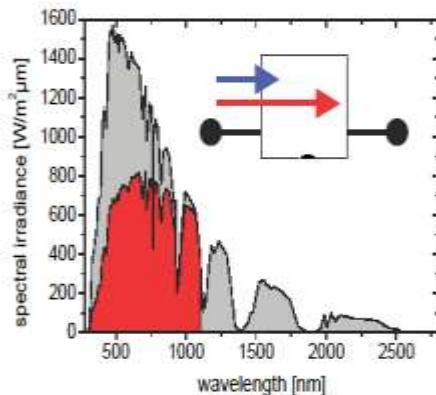
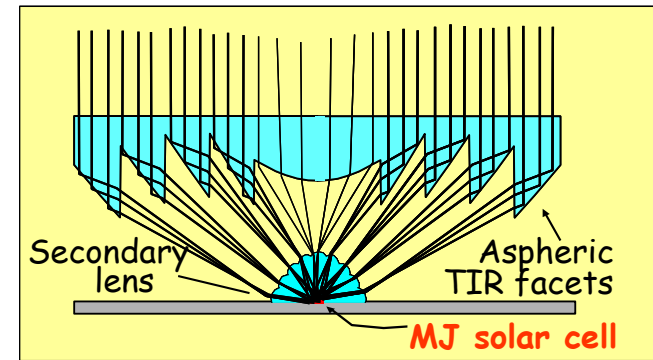
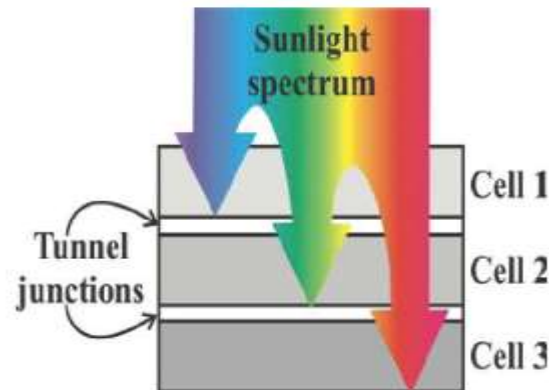
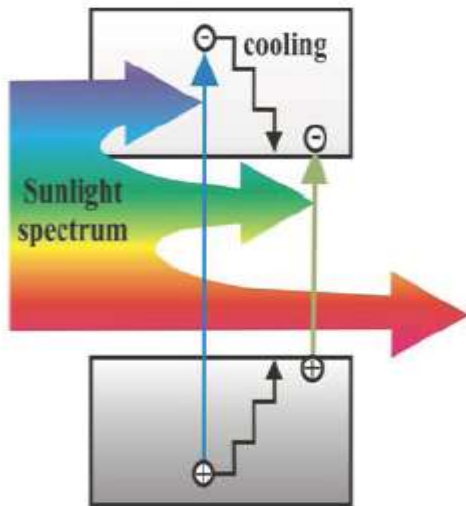
- Concentración de la radiación solar por procedimientos ópticos (ej.: lentes) + células de Silicio



# OTRAS TECNOLOGÍAS: CONCENTRACIÓN FV

- Concentración de la radiación solar por procedimientos ópticos +  
Células multiunión

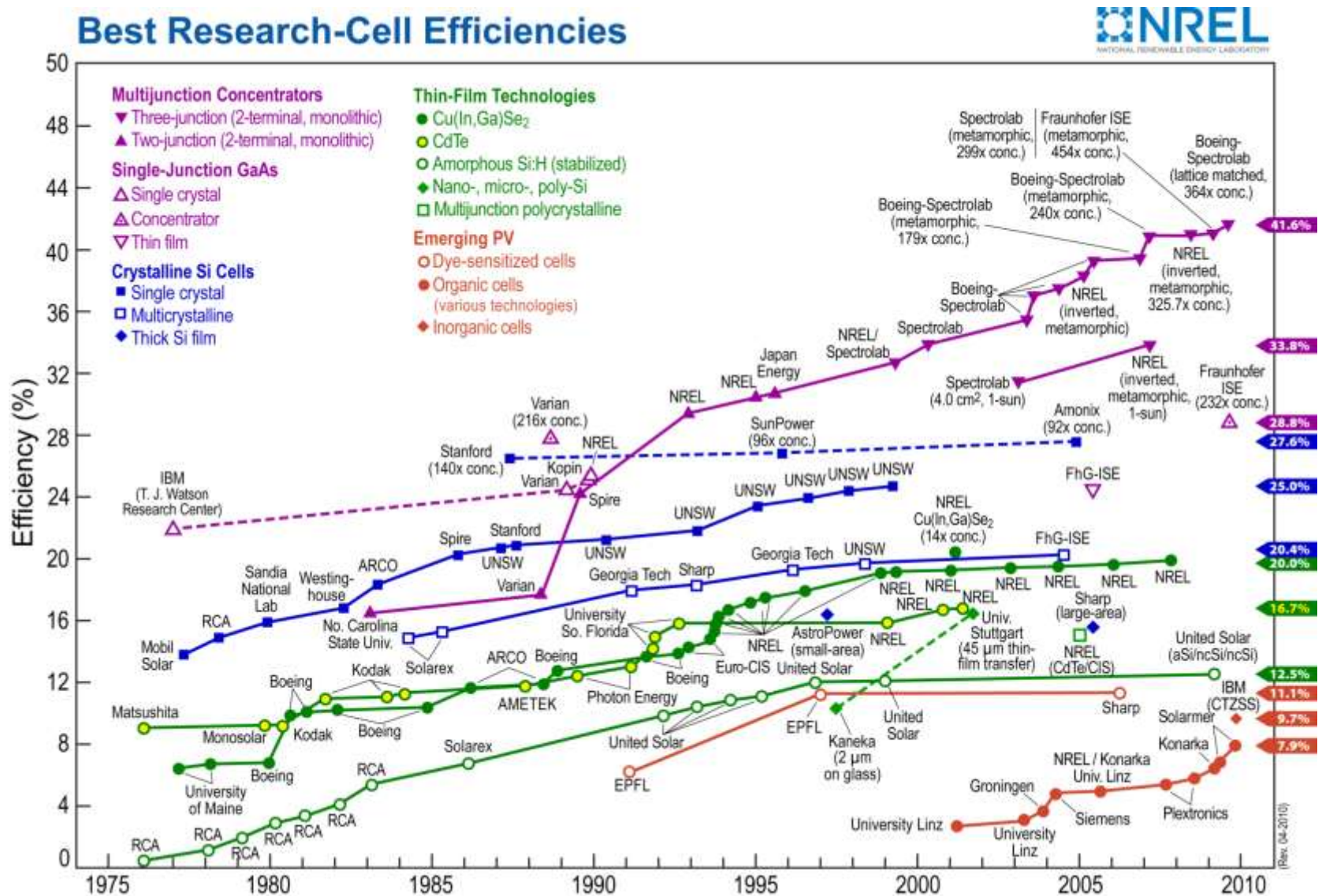
1.000 soles = 1 MW/m<sup>2</sup>



Tres uniones:  $\eta=40,2\%$

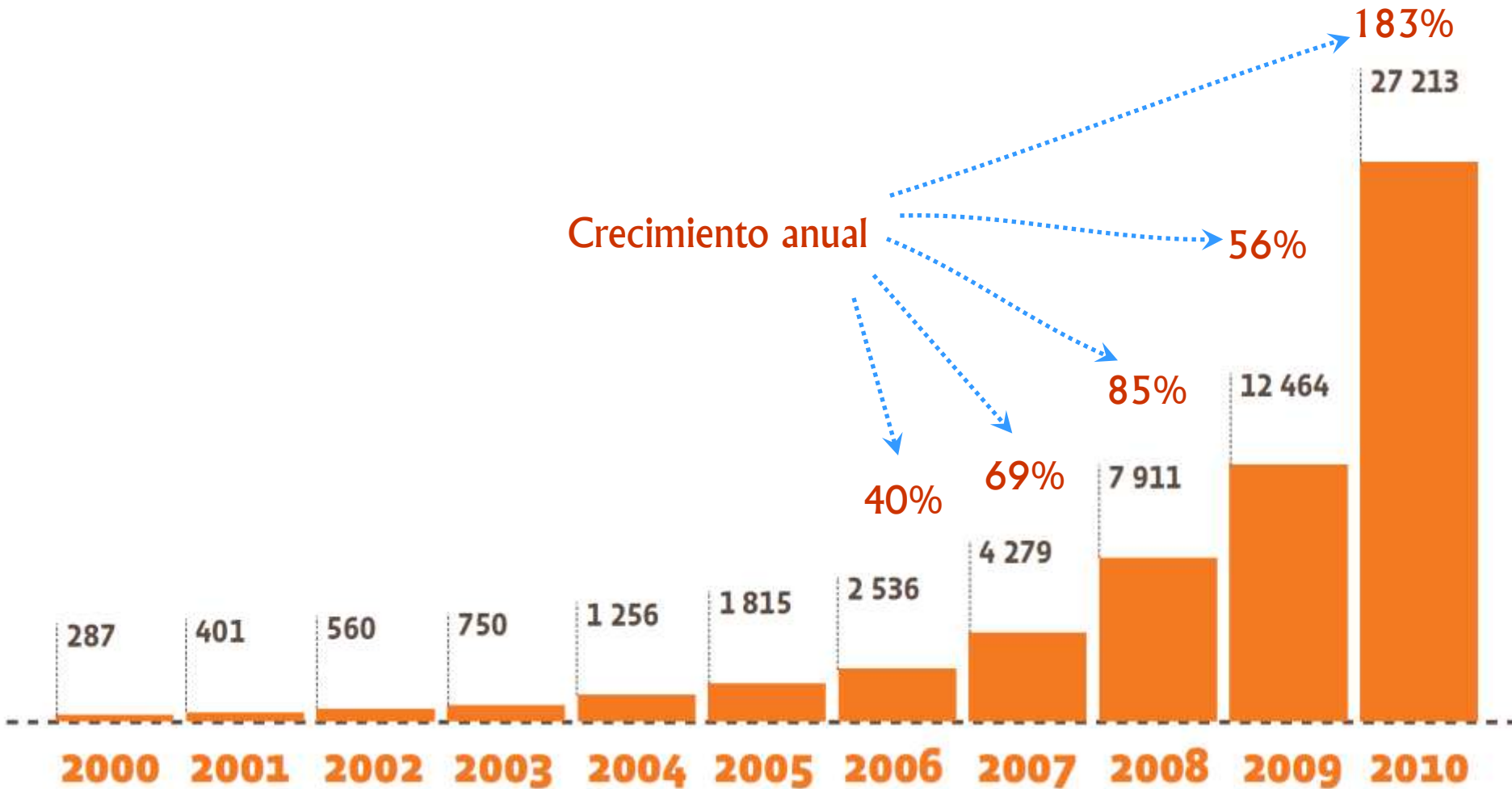


# EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO EN LABORATORIOS



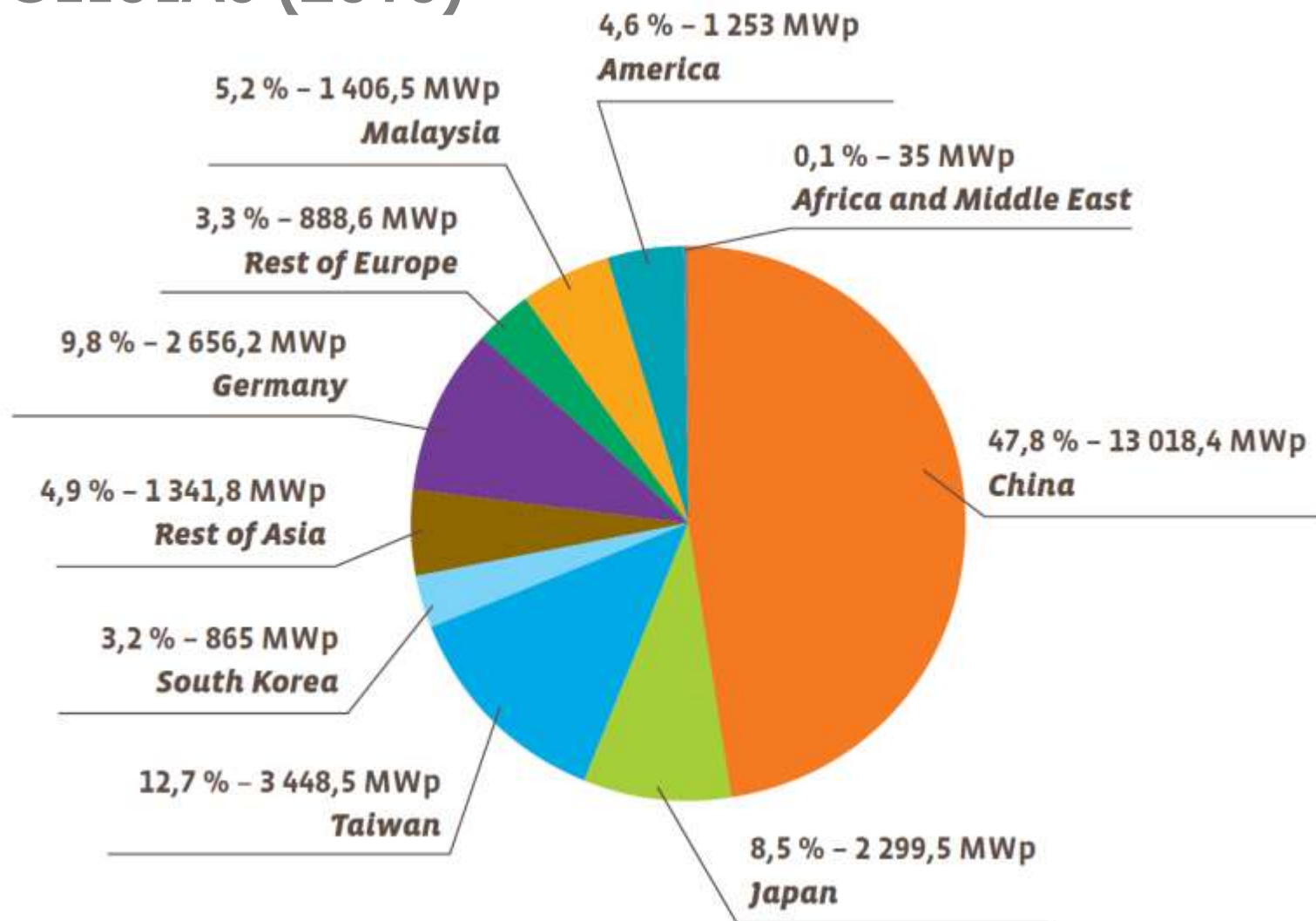


# PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CÉLULAS



[Fuente: Observ'ER, Photovoltaic Barometer, 2011]

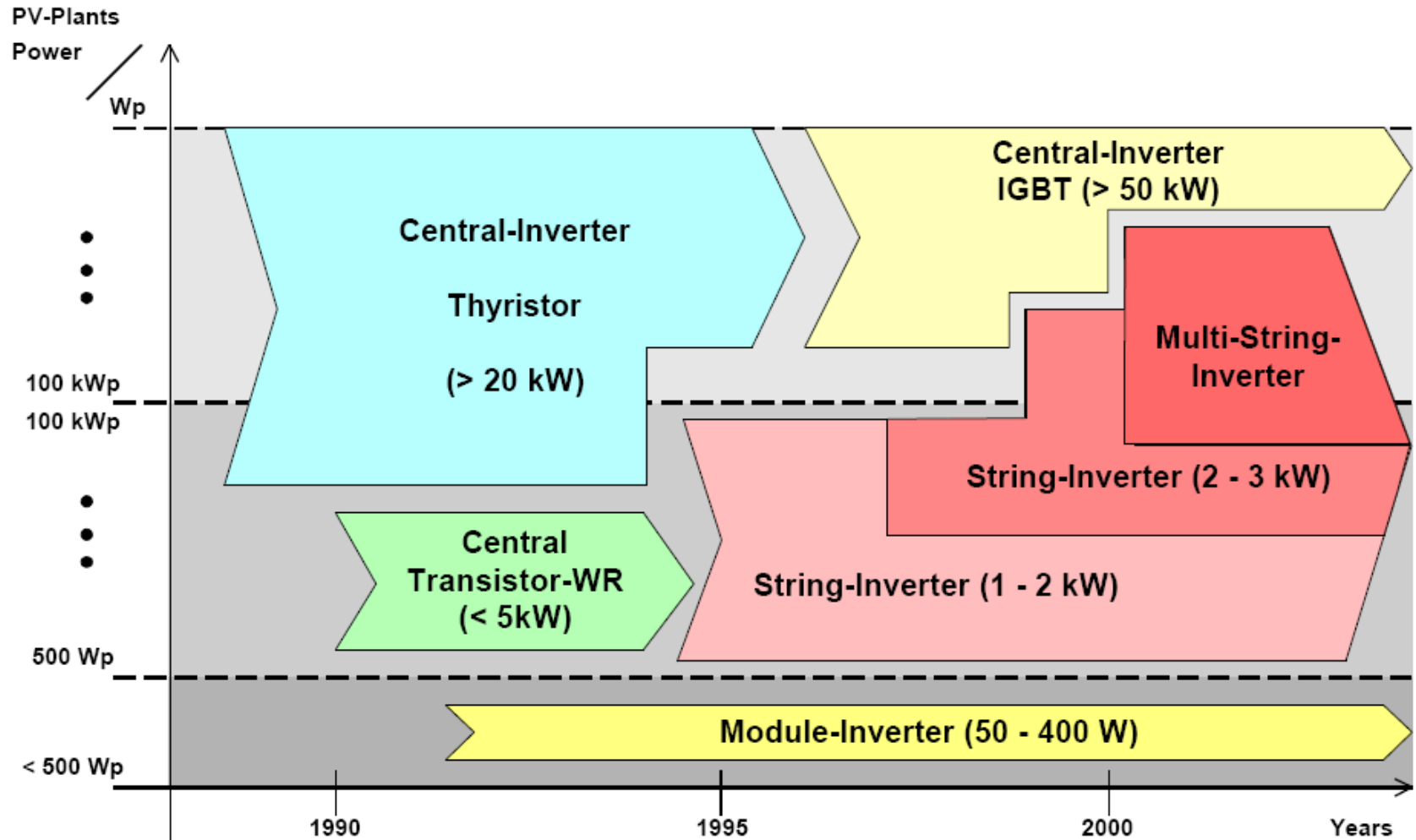
# DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE LA PRODUCCIÓN DE CÉLULAS (2010)



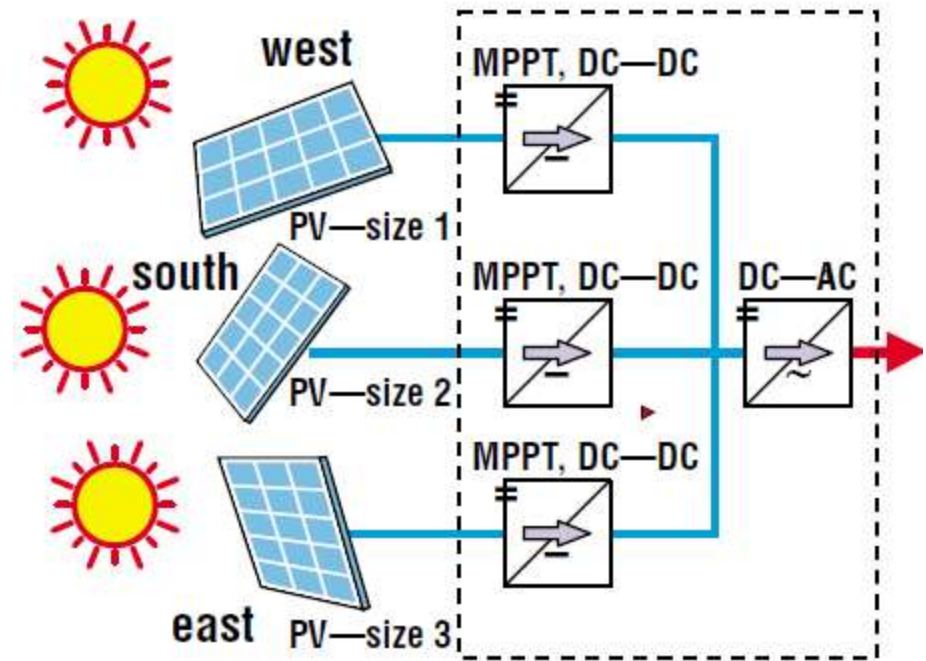
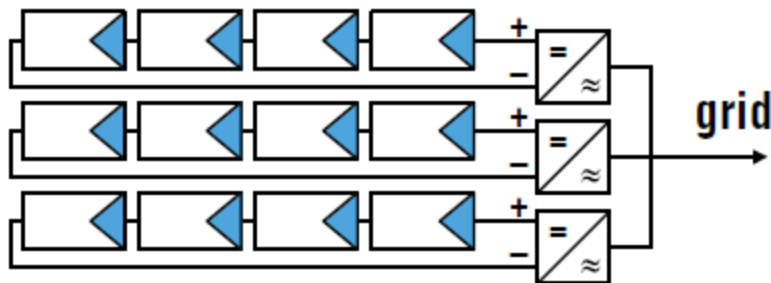
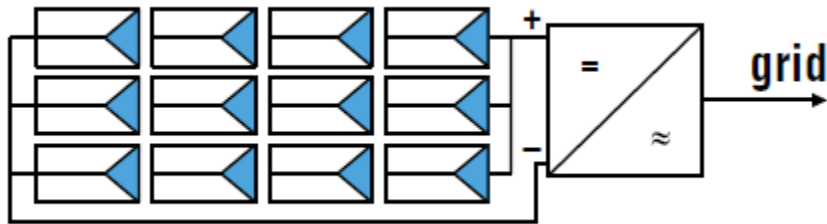
## 2. Tecnologías fotovoltaicas



### Evolución de los inversores conectados a la red



### Topologías de los inversores conectados a la red







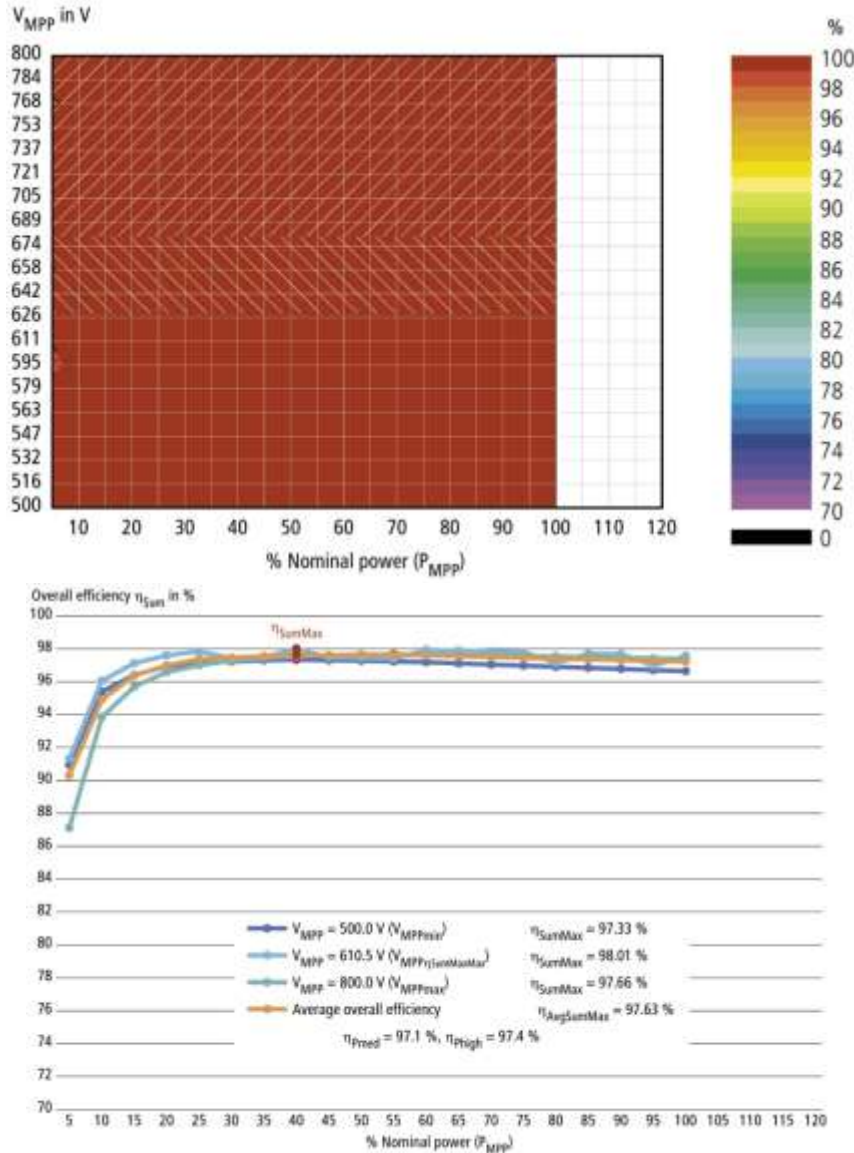
Inversores string ( $\leq 5$  kW)



Inversores módulo AC (240 W)

Inversor central (5-1000 kW)





Chint Power's CPS SC20KTL-O is a transformerless string inverter with a DC nominal power of 20.8 kW

The MPP range stretches from 500 to • 800 V; the upper limit is too close to the device's maximum DC voltage

The conversion efficiency reaches a • maximum of 98.1 percent, while the European efficiency came in at 97.5 percent and the device's Californian efficiency is 97.8 percent

The PHOTON efficiency at high irradiation is 97.4 percent, while the device achieves a PHOTON efficiency of 97.8 percent at medium irradiation

The device is clearly • arranged, it is with protection



### Arquitectura de conexionado distribuida

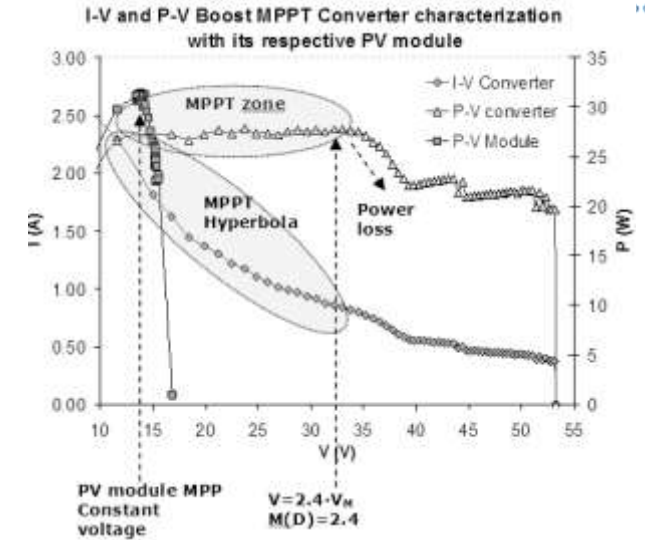
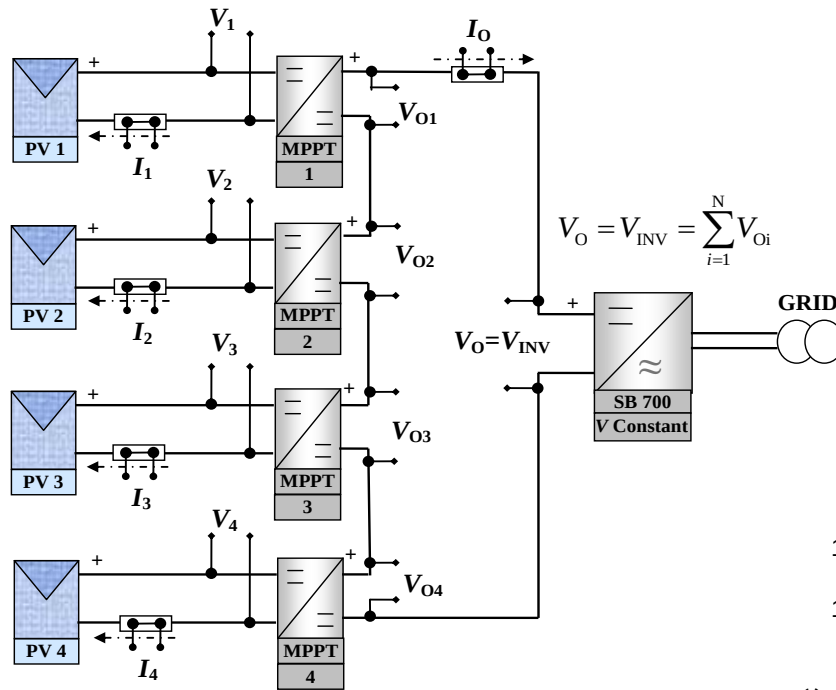
#### ☐ Ventajas

- ✓ Mejor optimización de cada módulo
- ✓ Aumenta la fiabilidad debido a la redundancia de equipos
- ✓ Mejor monitorización, y por tanto mejor control
- ✓ Posibilidad de mezclar módulos de diferentes tecnologías, tamaños y potencias en un mismo sistema fotovoltaico

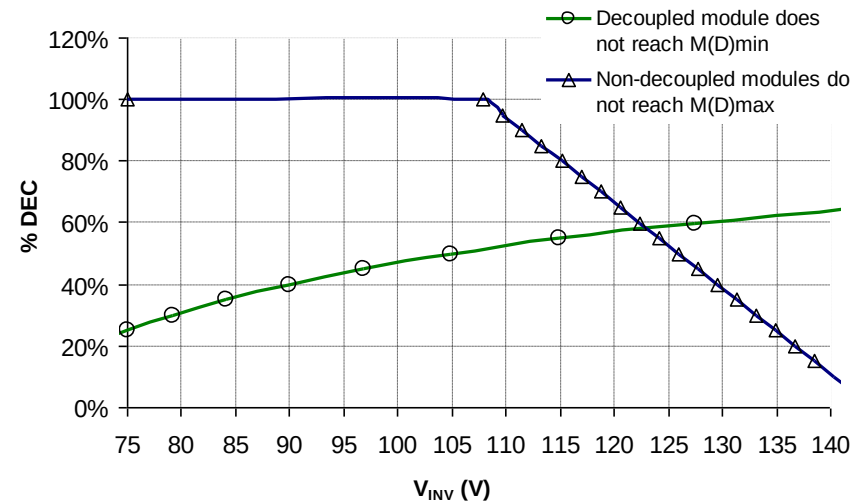
#### ☐ Inconvenientes

- ✓ Temperatura de trabajo
- ✓ Módulos AC: vigilancia de red
- ✓ Coste del ciclo de vida del producto

## Módulos MPPT

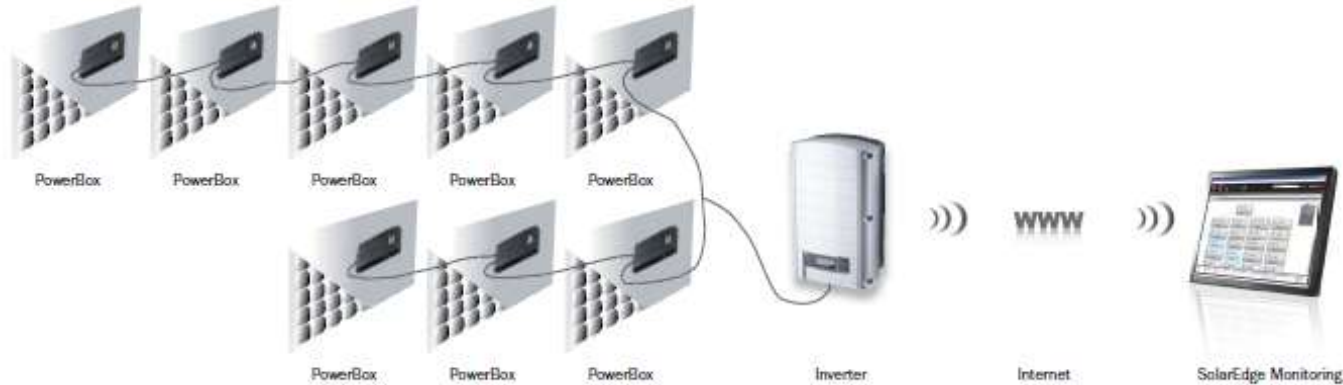


Maximum allowed decoupling in one PV module as a function of  $V_{INV}$

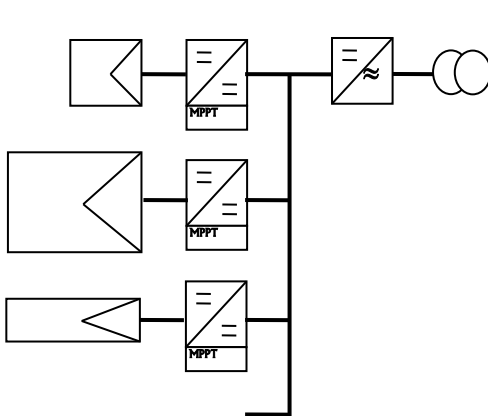




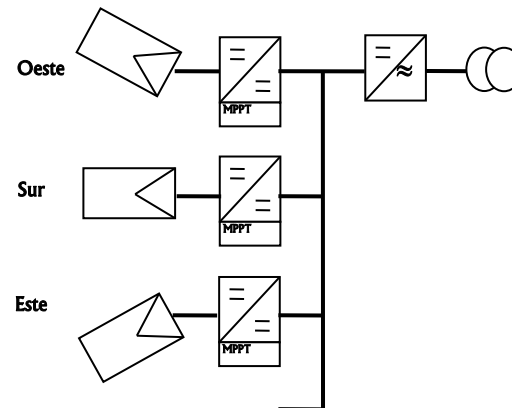
### Módulos MPPT



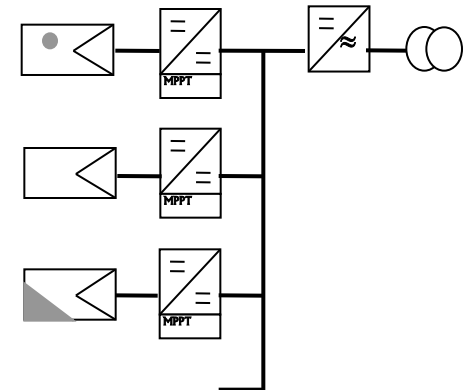
### Diferente tamaño (potencia)



### Inclinación y orientación



### Sombras o suciedad



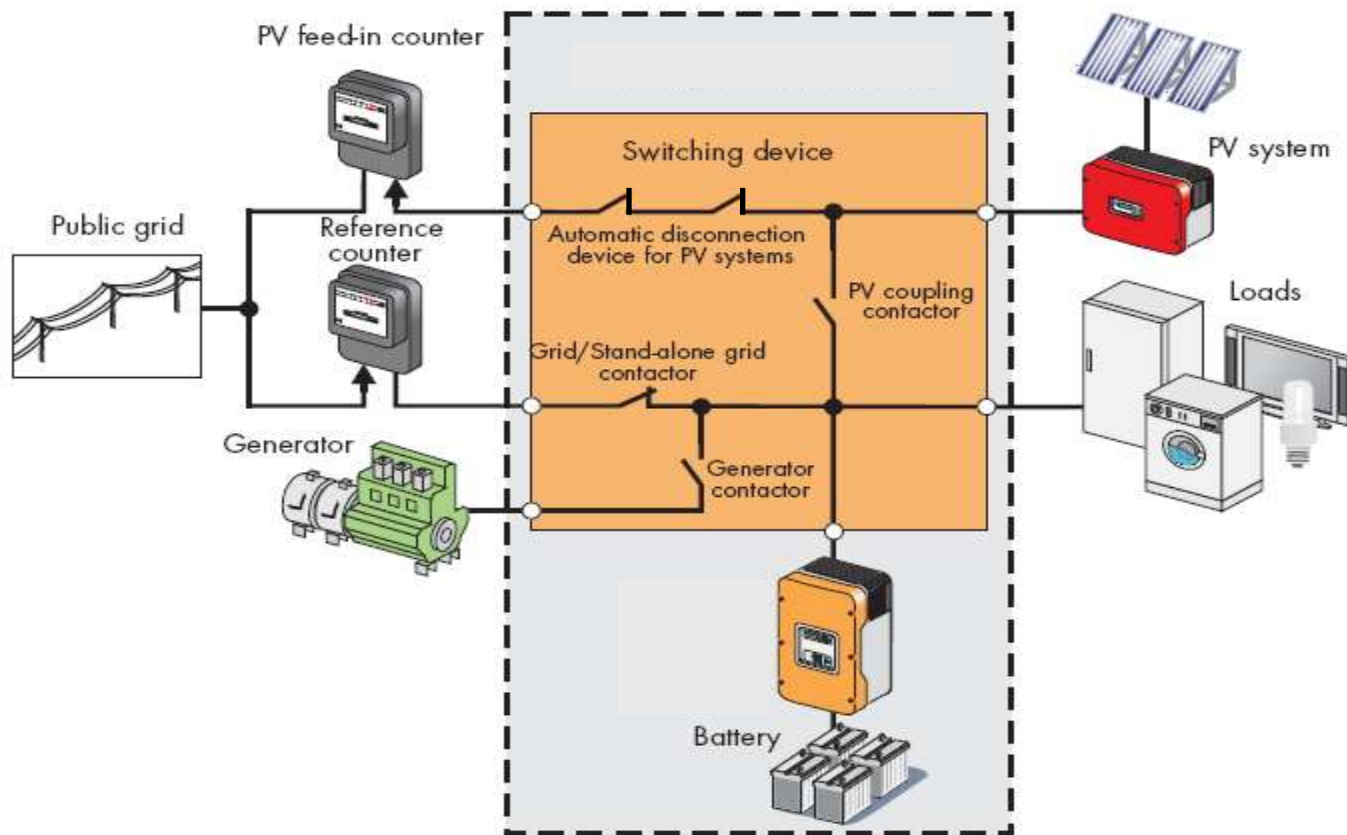
## 2. Tecnologías fotovoltaicas

Sistemas fotovoltaicos híbridos para la gestión del consumo

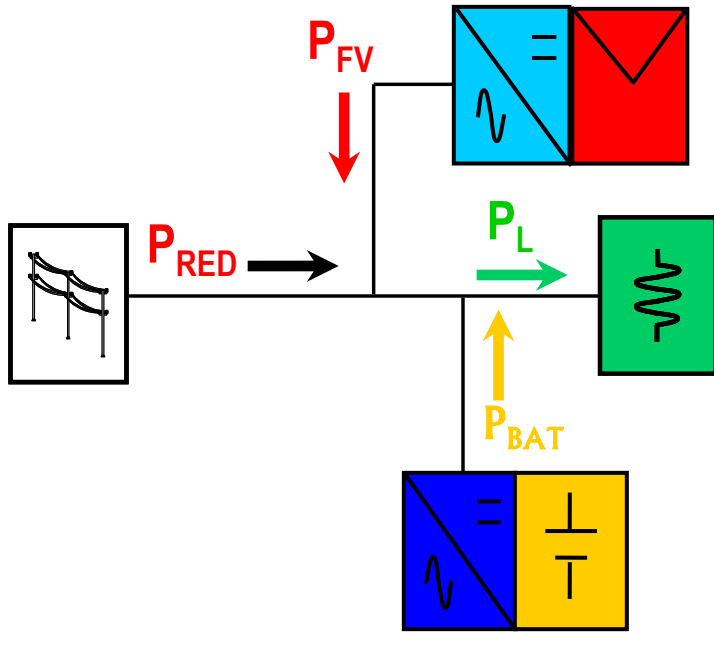
Sistemas FV híbridos: Conexión a red + Acumulación (+ Generador auxiliar)

Gestión de cargas eléctricas (electrodomésticos, climatización,...)

⇒ GESTIÓN ACTIVA DE LA DEMANDA CON TECNOLOGÍAS RENOVABLES



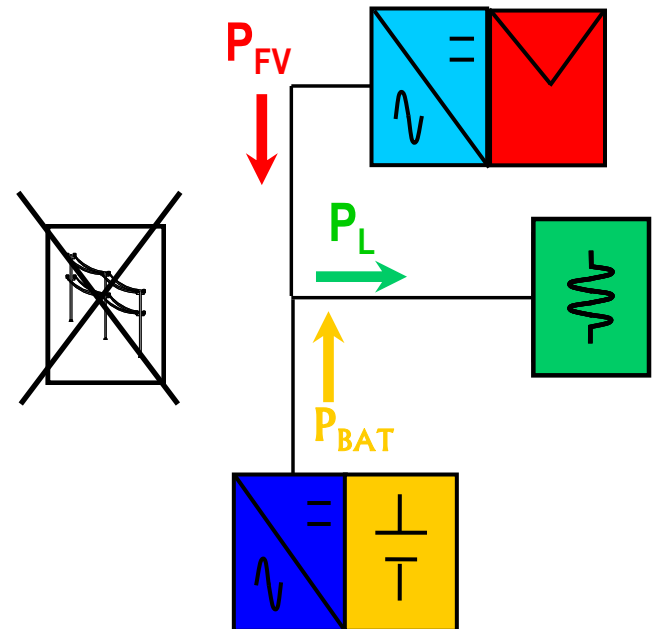
### Modo de funcionamiento conectado a red



- Fotovoltaica atiende (suministra potencia) a:  
1º Consumos, Baterías, 2º Red
- Carga de baterías de fotovoltaica o red
- Producción fotovoltaica óptima (seguimiento PmP)

### • Modo de funcionamiento aislado

- Conmutación del contactor de red muy rápida: ~ 30 ms
- Inversor de baterías controla la microrred (fuente de tensión, control de los inversores fotovoltaicos mediante la frecuencia)
- Posibilidad de definir líneas de consumo prioritarias



## CENTRALES FOTOVOLTAICAS

- Enfoque centralizado
- $P_{\text{nomG}} = 100 \text{ kW} - 10 \text{ MW}$  (típicamente)
- Estrategias de captación solar: estática, seguimiento solar, concentración  
→ Mayores posibilidades de optimización
- Explotación: compañías eléctricas y productores independientes





### 3. Aplicaciones conectadas a la red eléctrica



Tudela (1.2 MW<sub>p</sub>)



500 kW<sub>p</sub> Euclides©,  
Tenerife

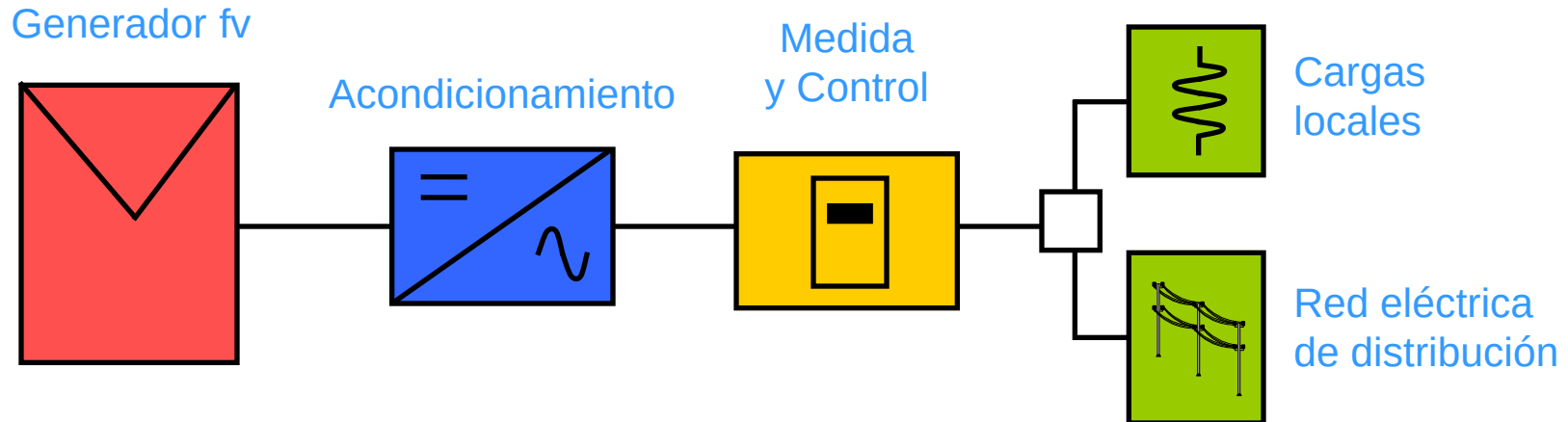


## INSTALACIONES INTEGRADAS EN ENTORNOS URBANOS

- $P_{\text{nomG}} = 1 \text{ kW} - 2 \text{ MW}$  (típicamente)
- Integración arquitectónica en edificios (Edificios Fotovoltaicos Conectados a la Red) y construcciones urbanas → Multifuncionalidad de generadores fotovoltaicos
- Paradigma de la generación distribuida e intercambios con la red eléctrica → Posibilidades de gestión de la demanda
- Explotación: particulares, inversores públicos y privados



### 3. Aplicaciones conectadas a la red eléctrica



**Generador fotovoltaico:**

Módulos fotovoltaicos, Estructura de soporte

**Acondicionamiento:**

Convertidor DC/AC (inversor)

**Medida y control:**

Protecciones, contadores

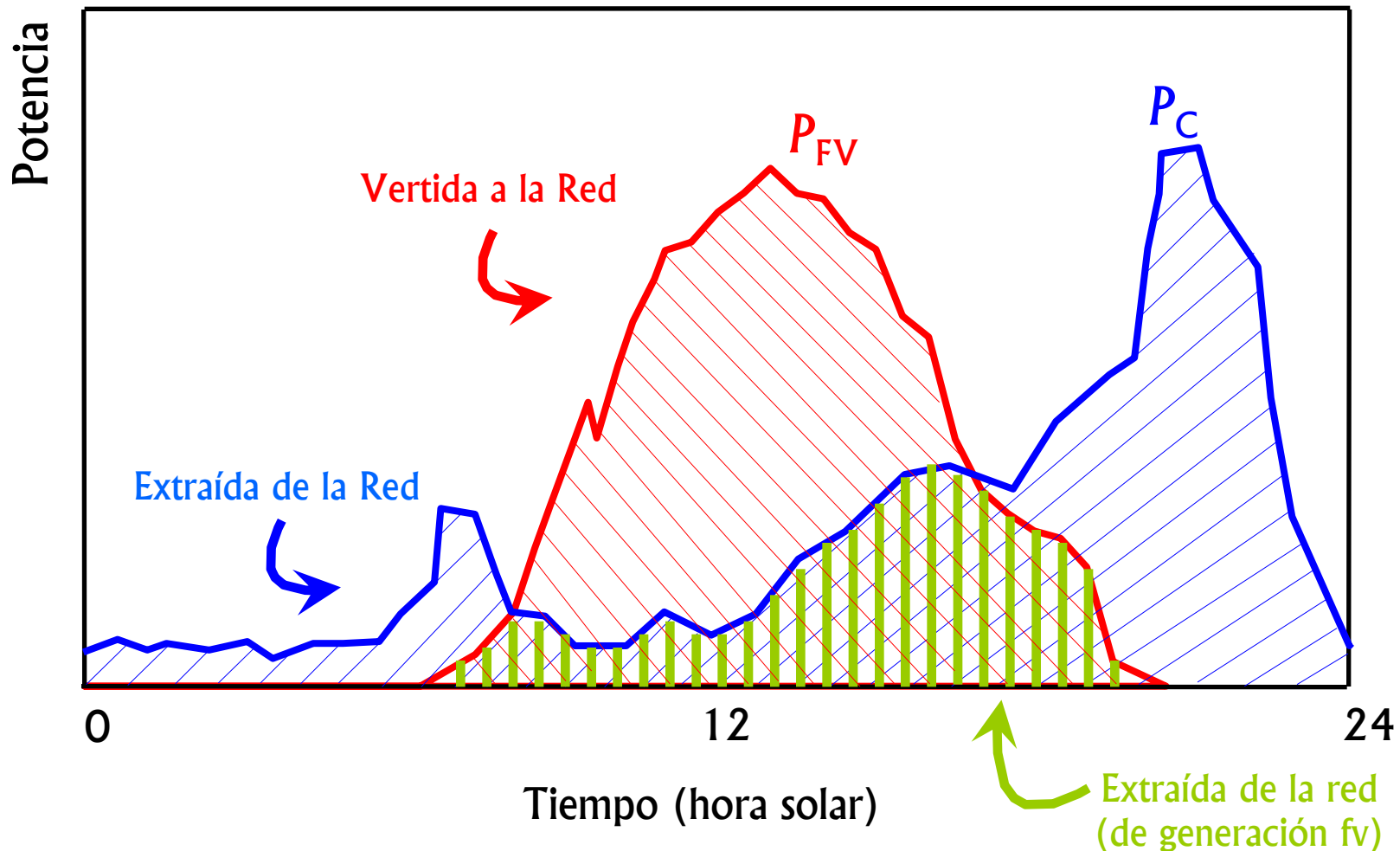
**Cargas:**

Consumos locales (AC), Otros consumidores (red eléctrica)

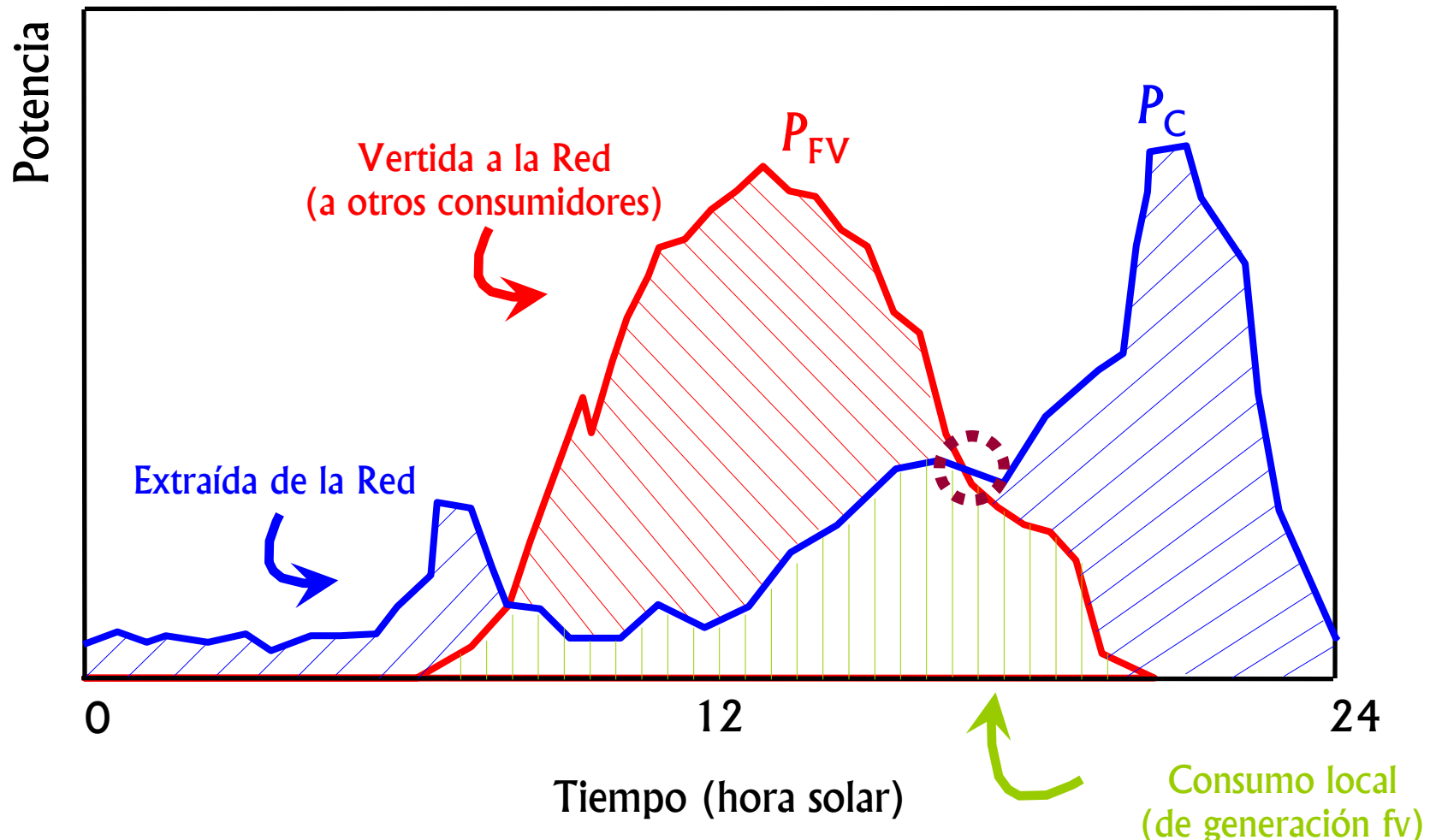
## \* INTERACCIÓN EDIFICIO FV – RED ELÉCTRICA

Instalación fotovoltaica acogida al “Régimen Especial”

(Conexión a la red de distribución)



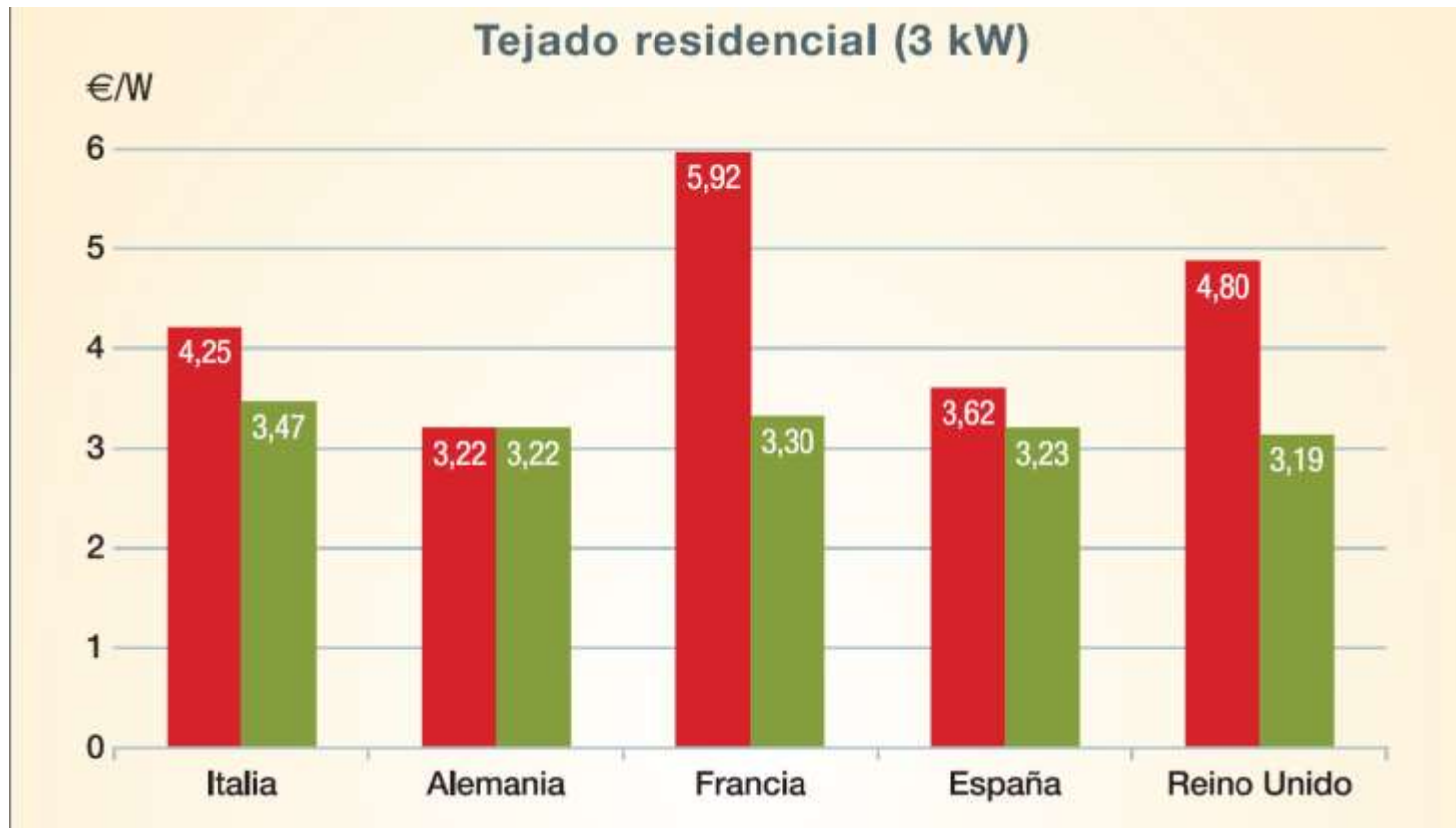
## Instalación fotovoltaica en modalidad “Autoconsumo” (Conexión a la red interior de consumo)





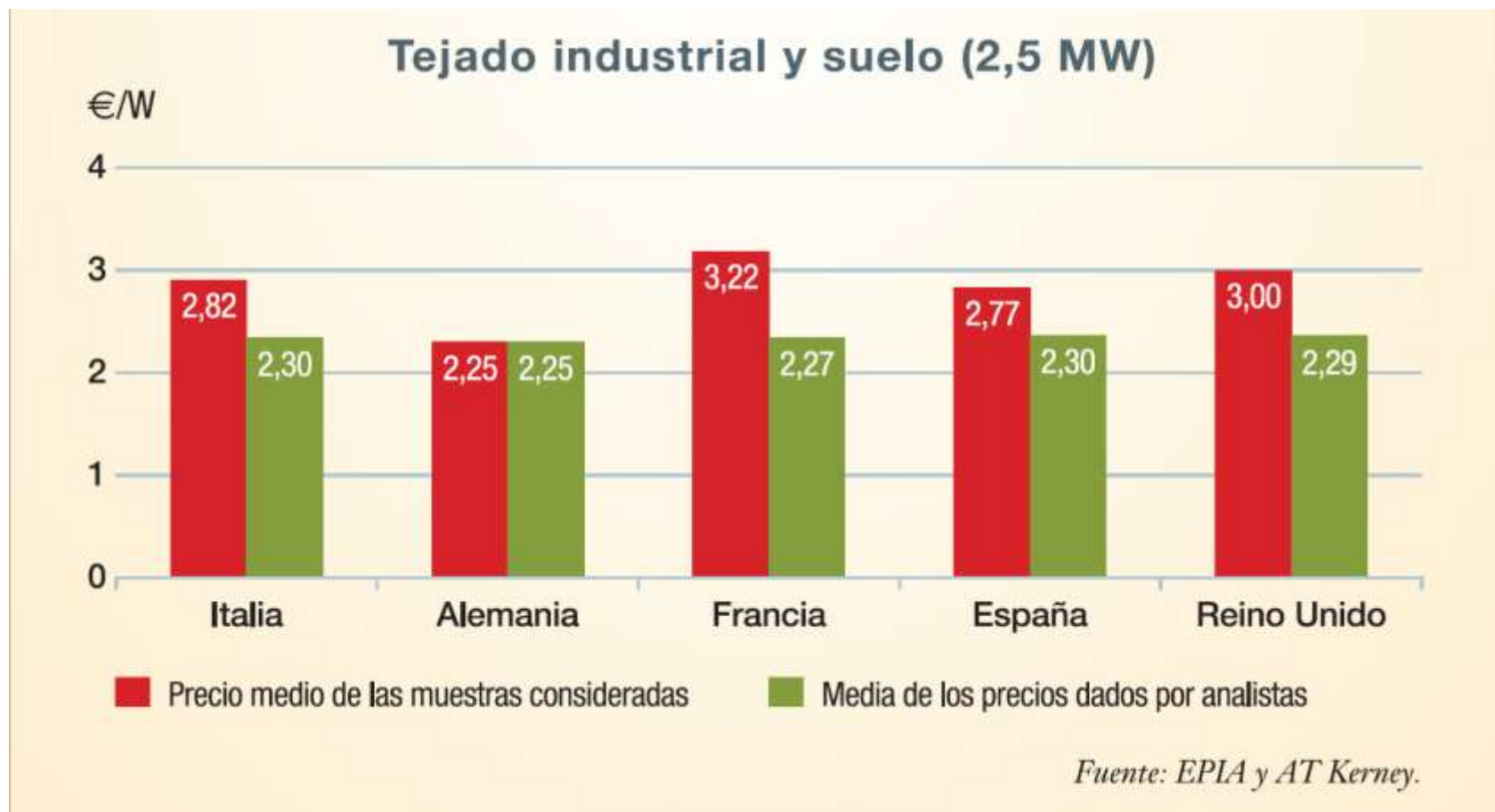
## CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

Precio de instalaciones completas, por cada W de módulo instalado



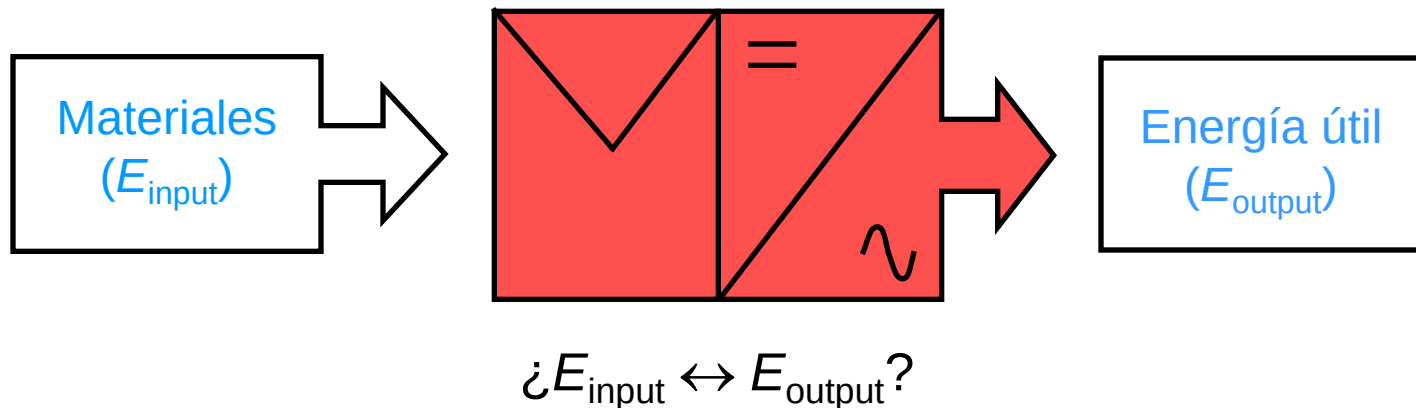
[Fuente: Asociación de la Industria Fotovoltaica, 2011]

### 3. Aplicaciones conectadas a la red eléctrica



## CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

Concepto “Tiempo de recuperación energética” (Energy Payback-time):



#### ■ EPBT (Energy Pay-Back Time):

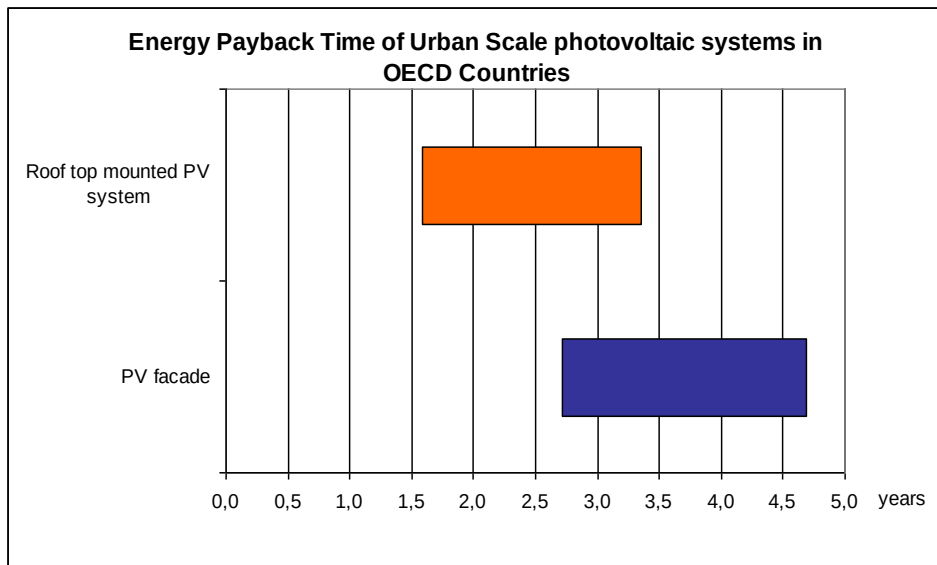
Tiempo que tarda un sistema en generar la energía necesaria para su fabricación

$$\begin{aligned} EPBT &= \frac{\text{Energía primaria para fabricación}}{\text{Energía útil anual primaria equivalente}} = \\ &= \frac{\Sigma E_{\text{primaria, componentes}}}{E_{\text{FV, año}} / \eta_{\text{E, Sistema eléctrico}}} \end{aligned}$$

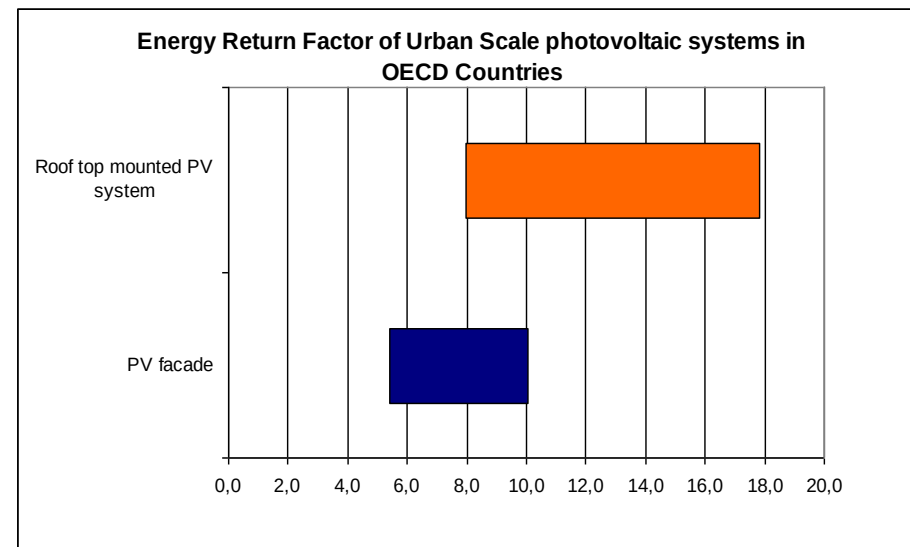
### 3. Aplicaciones conectadas a la red eléctrica

#### Hipótesis:

- Tiempo de vida de la instalación fv: 30 años
- Integración arquitectónica en cubiertas y fachadas



|                   | Energía primaria [MJ/kWp] |
|-------------------|---------------------------|
| Laminados         | 25 606                    |
| Marcos metálicos  | 1 061                     |
| Resto del sistema | 2 660                     |
| <b>SISTEMA FV</b> | <b>29 327</b>             |

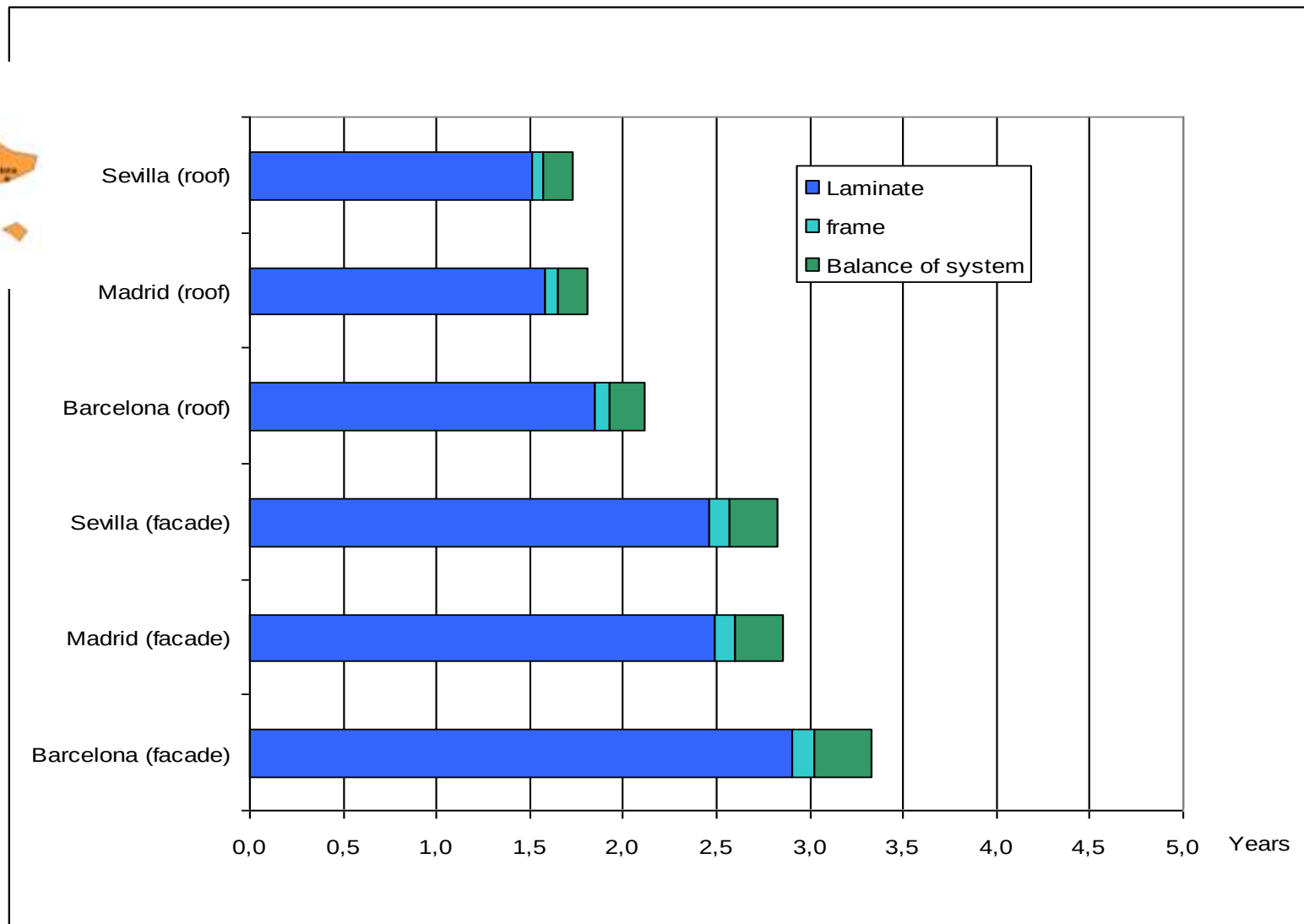


[Fuente: IEA-Photovoltaic Power Systems Programme, “Compared assessment of environmental indicators of photovoltaic electricity in OCDE cities”. Report IEA-PVPS-T10-01:2006]

### 3. Aplicaciones conectadas a la red eléctrica



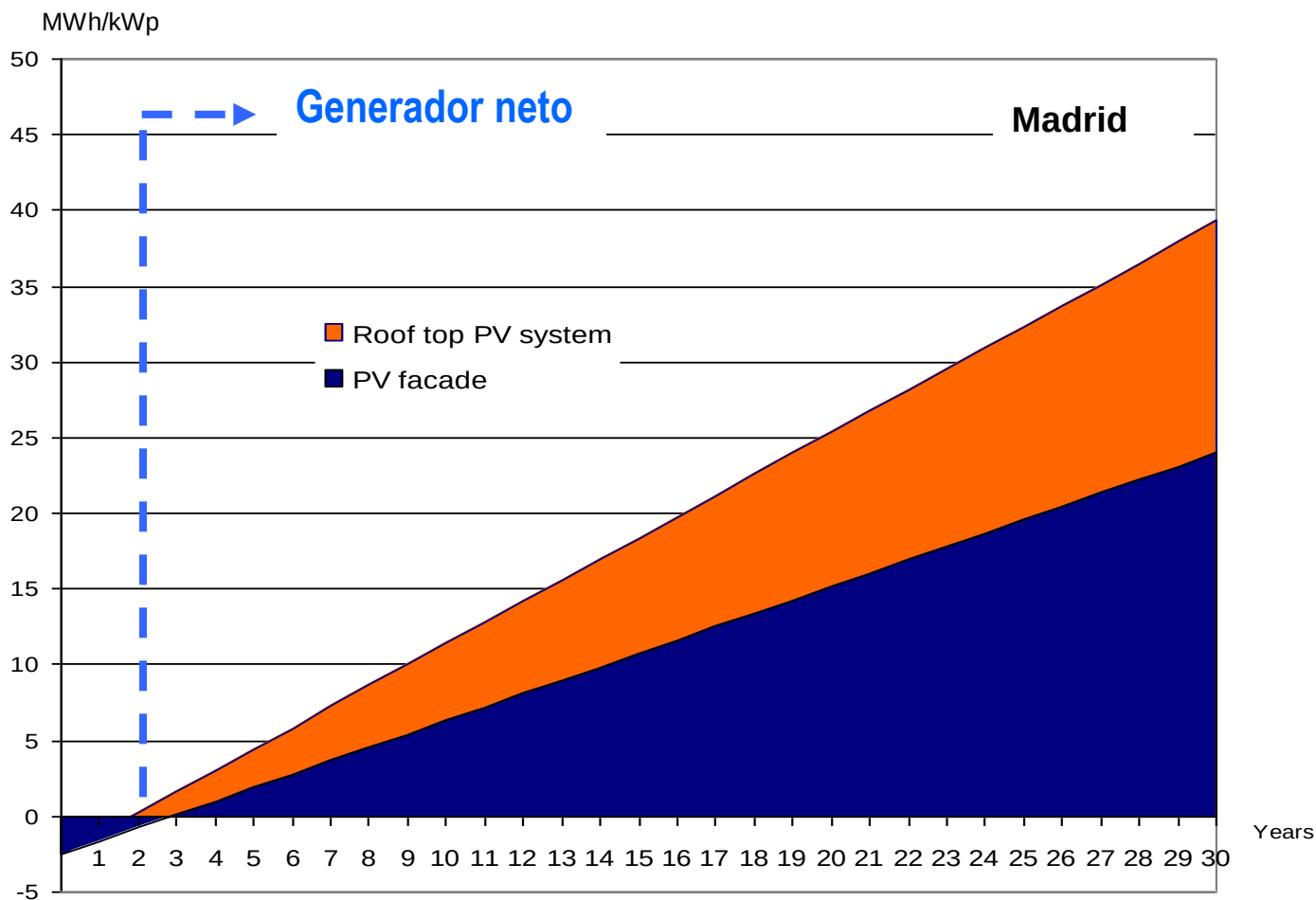
España:



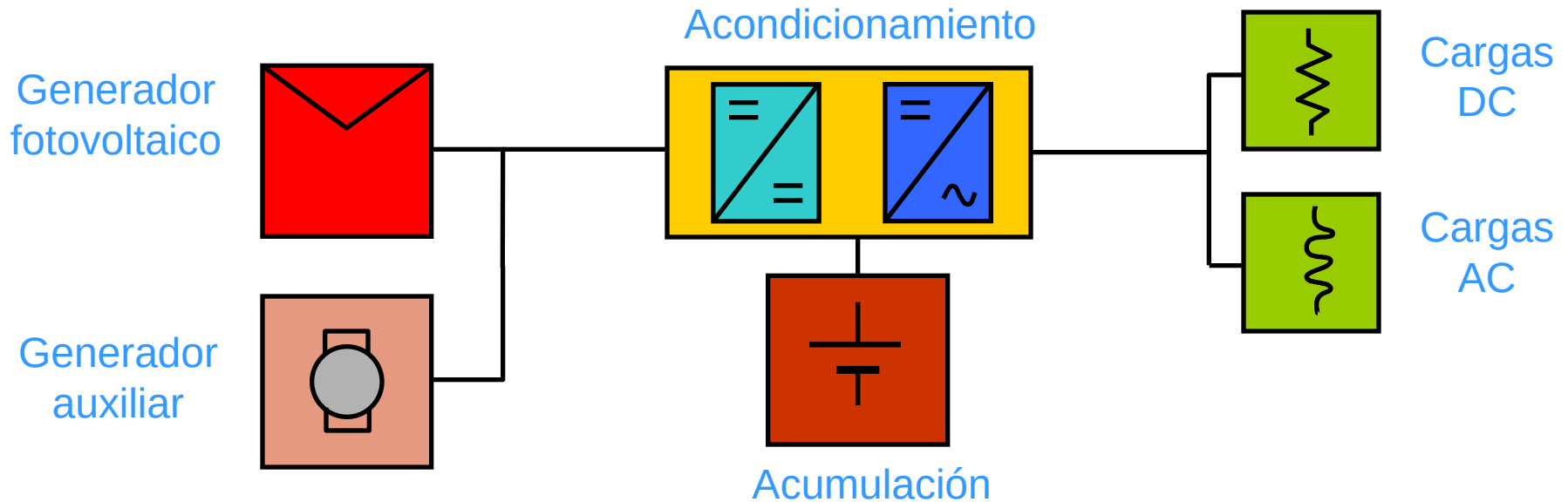
[Fuente: "Compared assessment of environmental indicators of photovoltaic electricity in OCDE cities".  
IEA-PVPS-T10-01:2006]



#### Balance energético:



# 4. APLICACIONES AUTÓNOMAS



**Generador fotovoltaico:**

Módulos fotovoltaicos, Estructura de soporte

**Acondicionamiento:**

Regulador de carga de batería, Convertidor DC/AC (inversor),  
Convertidor DC/DC (Seguidor del PmP)

**Acumulación:**

Baterías (Pb ácido)

**Cargas:**

Aplicaciones de consumo (DC, AC)

## 4. Aplicaciones autónomas

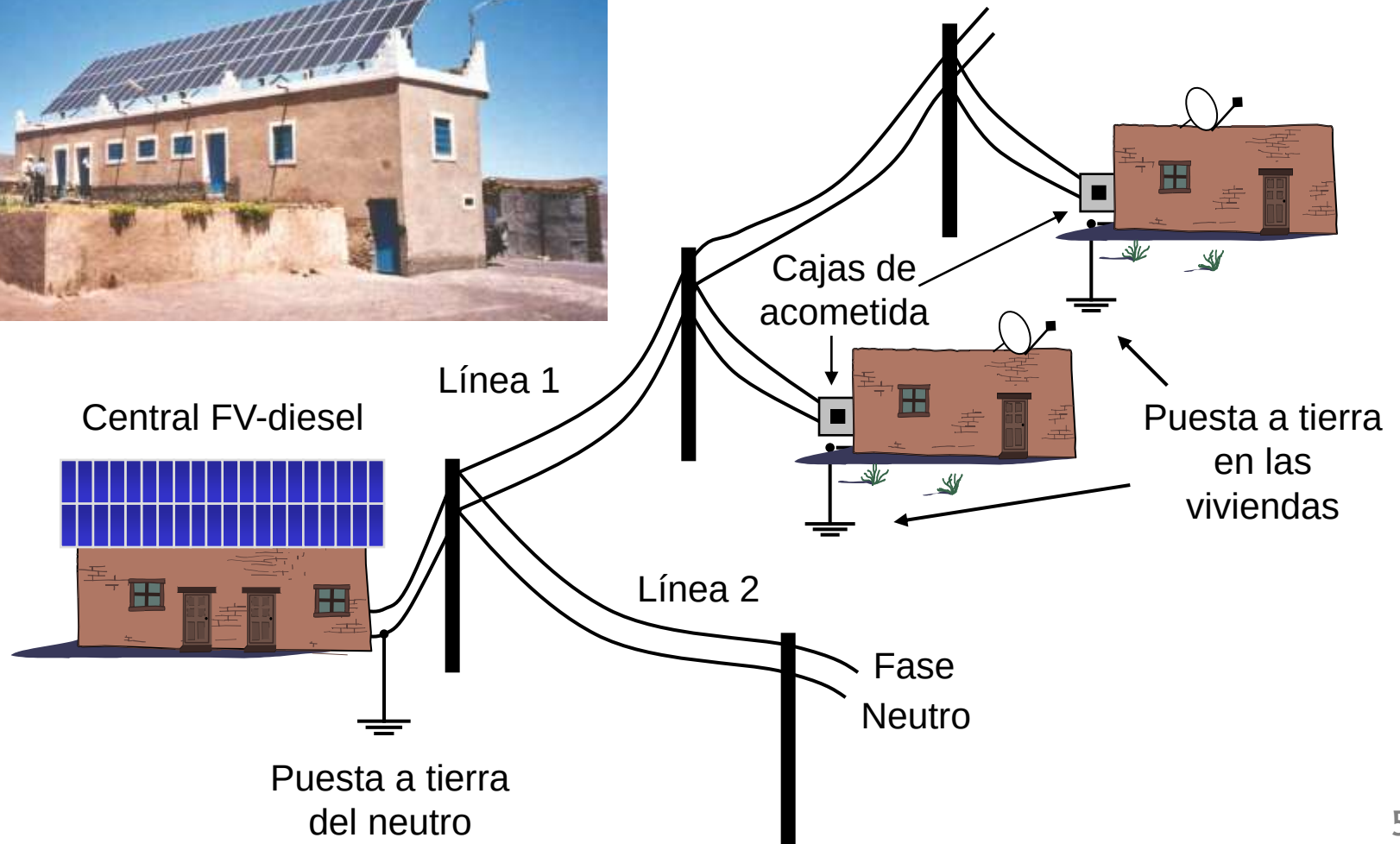


POLITÉCNICA  
Instituto de Energía Solar

### Nuevas tendencias:



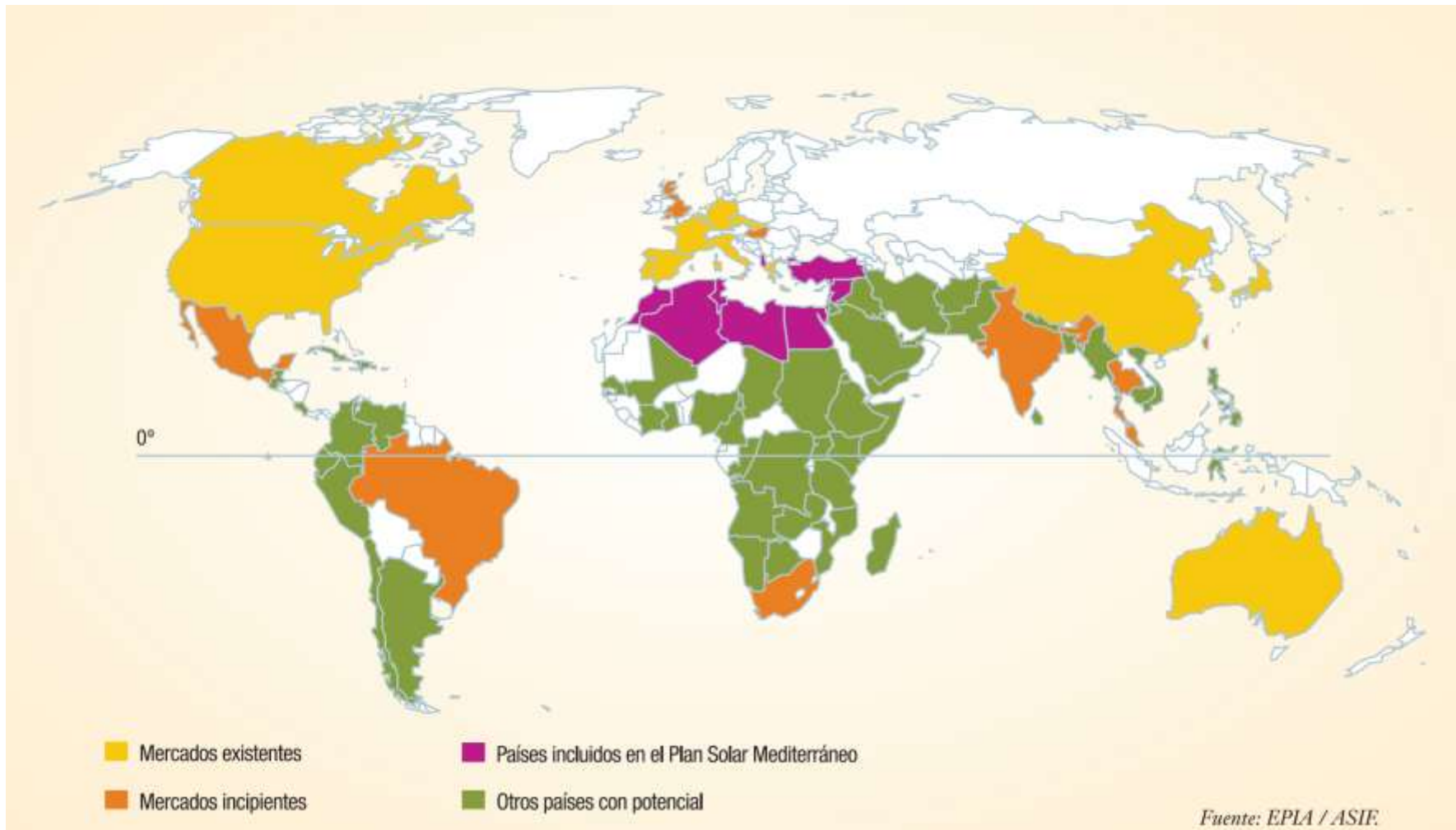
### Minicentrales



# 5. MERCADOS FOTOVOLTAICOS



POLITÉCNICA  
Instituto de Energía Solar

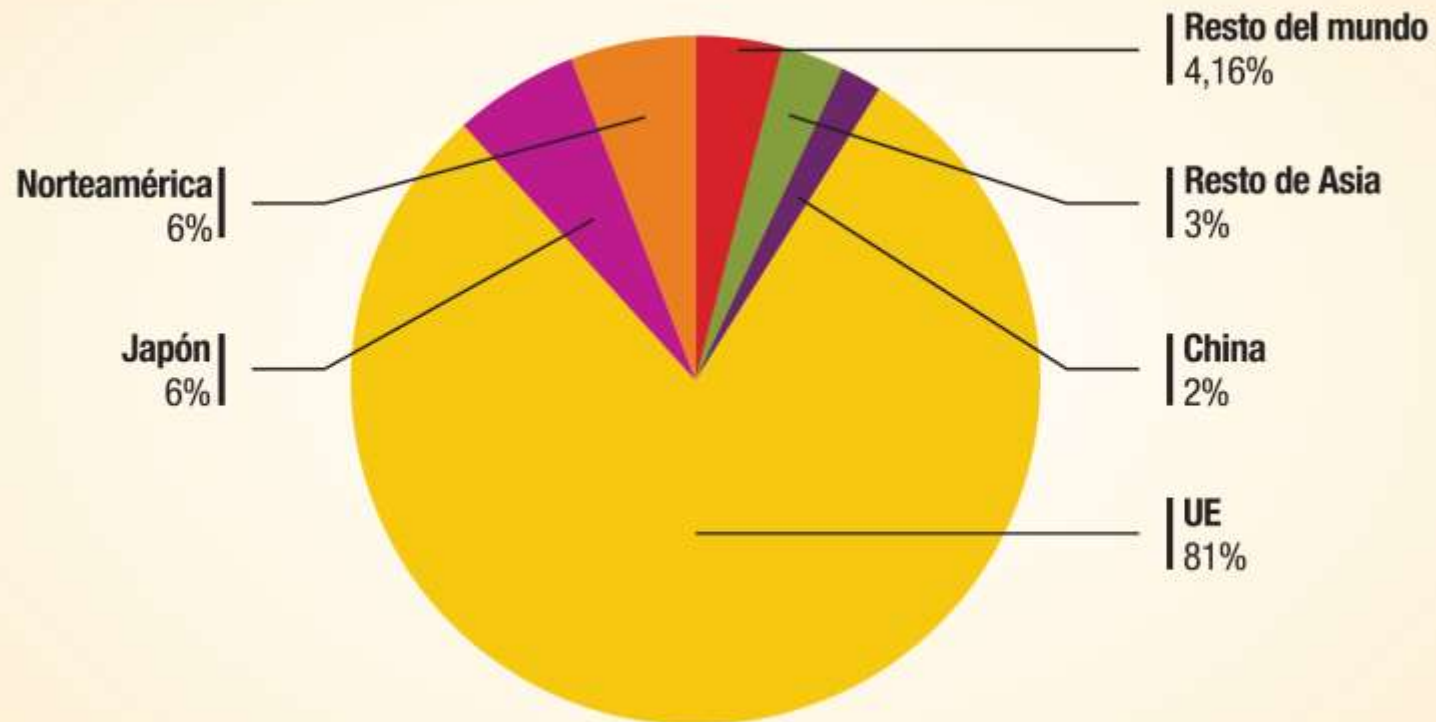


[Fuente: Asociación de la Industria Fotovoltaica, Informe anual 2011]



## 5. Mercados fotovoltaicos

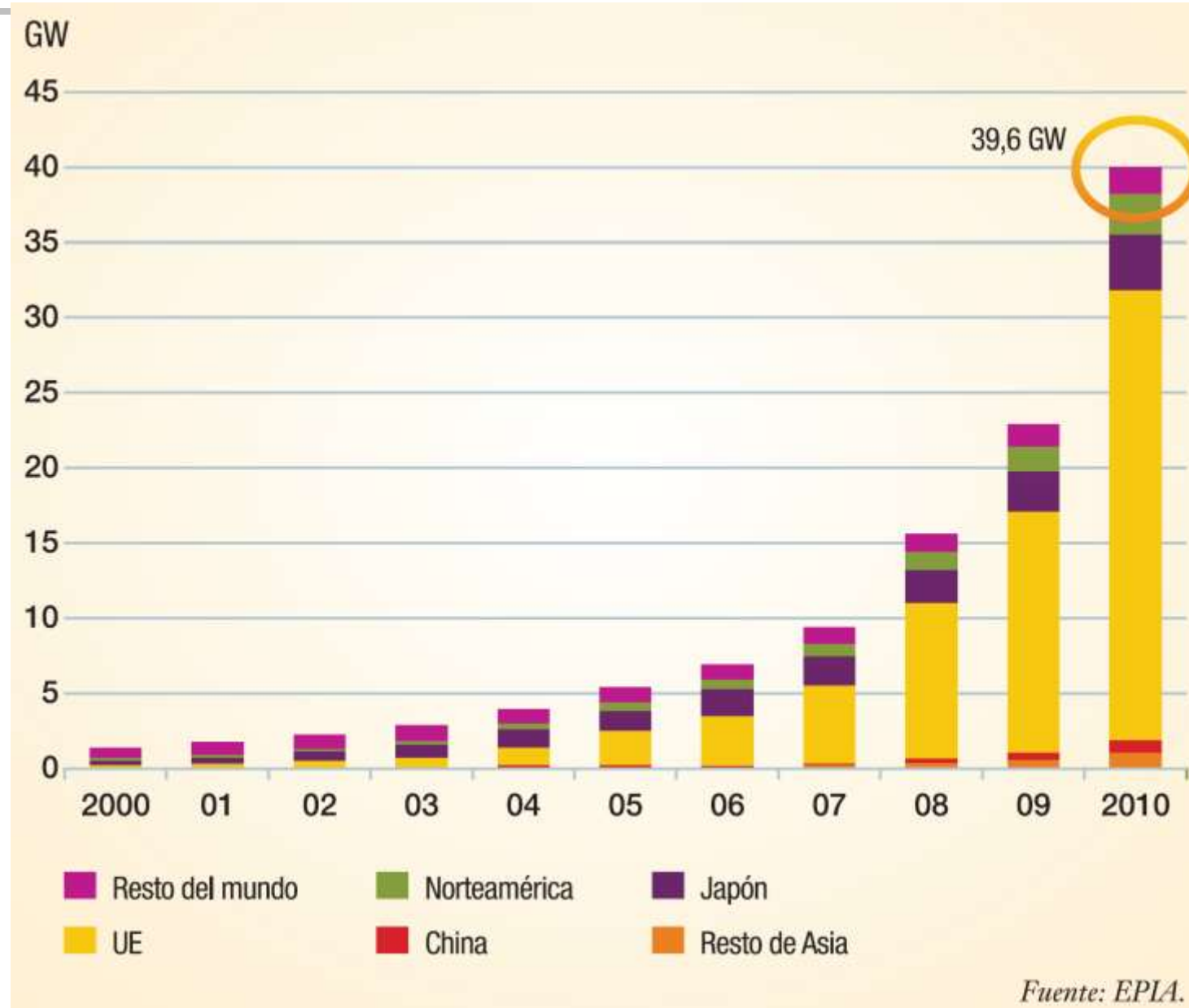
### REPARTO DEL MERCADO MUNDIAL EN 2010



*Fuente: EPIA.*

*[Fuente: ASIF, Informe anual 2011]*

## 5. Mercados fotovoltaicos

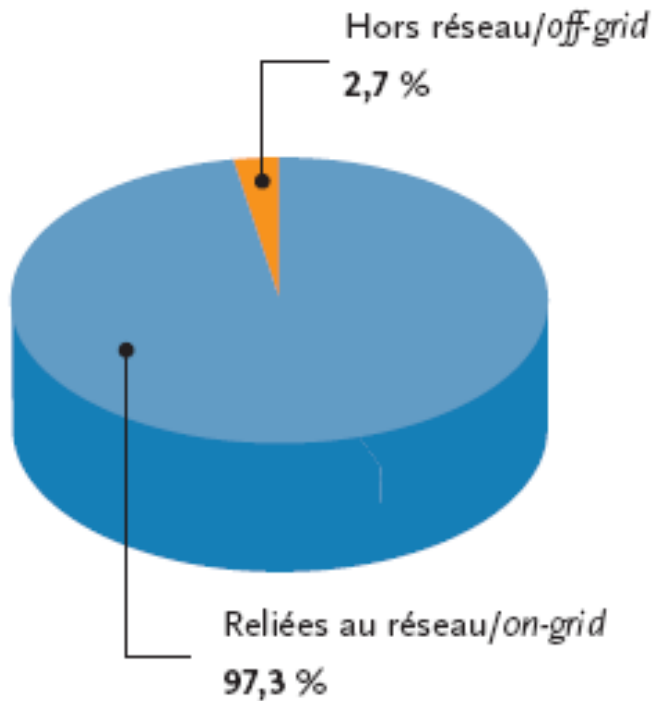


[Fuente: ASIF, Informe anual 2011]

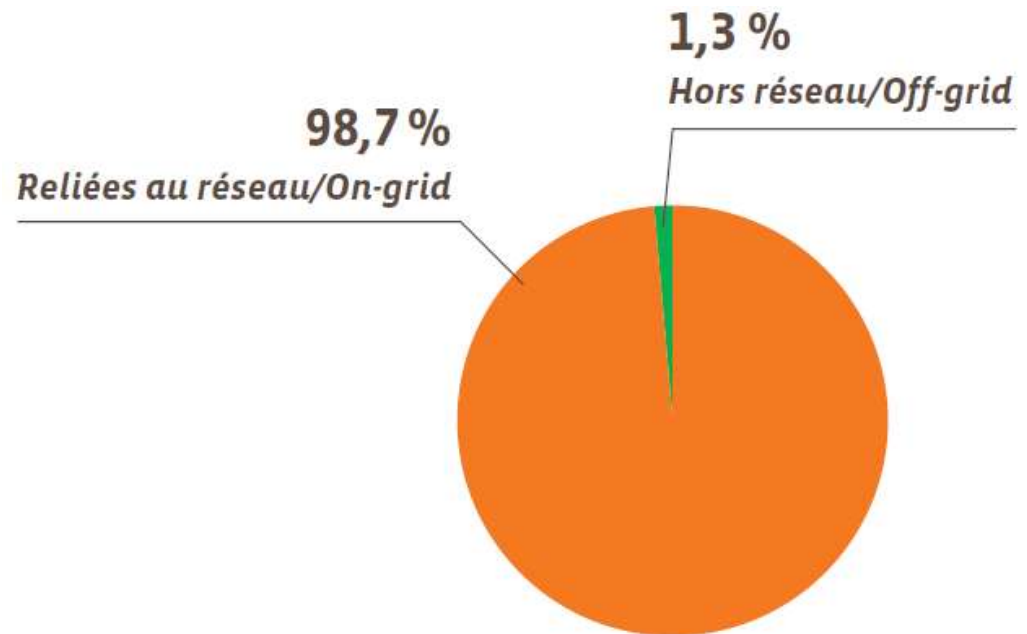
# MERCADO EN LA UNIÓN EUROPEA

## APLICACIONES

Acumuladas a finales de 2007

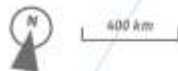


Acumuladas a finales de 2008



[Fuente: Observ'ER, Photovoltaic Barometer, 2008-9]

# POTENCIA INSTALADA A FINALES DE 2010 (MWp)

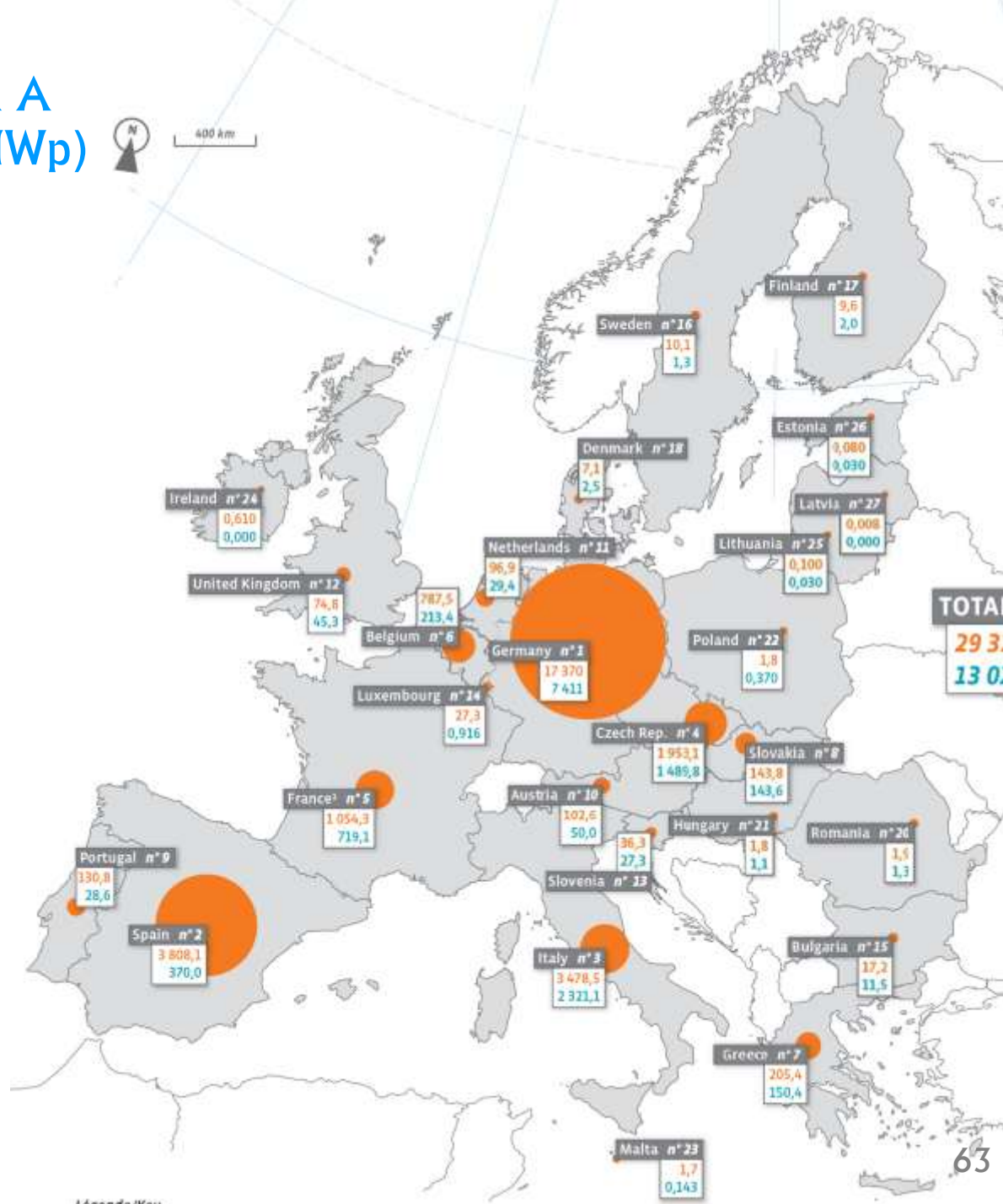


90

*Puissance cumulée installée  
dans les pays de l'Union  
européenne fin 2010\* (en MWc)*  
Cumulated installed capacity  
in the European Union countries  
at the end of 2010\* (in MWp)

50

*Puissance installée durant l'année  
2010 dans les pays de l'Union  
européenne\* (en MWc)*  
Installed capacity in the  
European Union countries  
during 2010\* (in MWp)

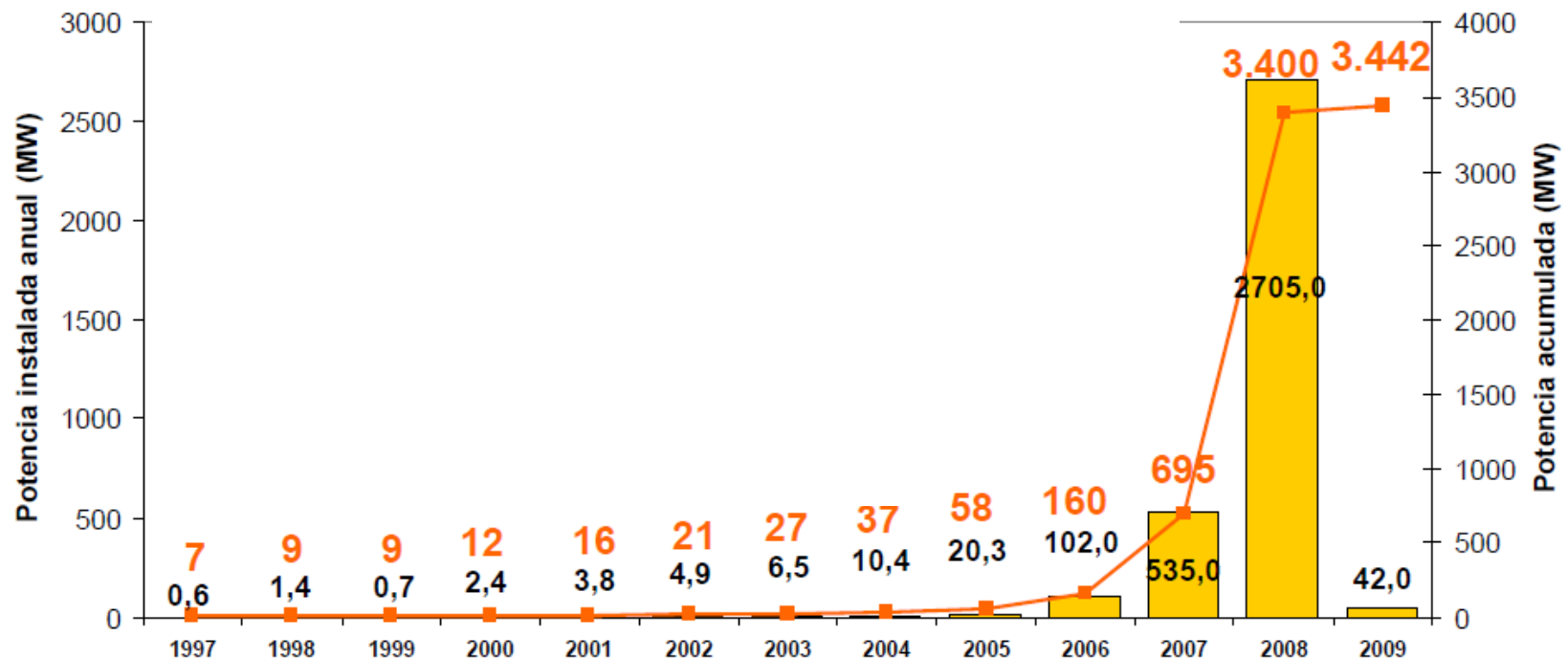


### POTENCIA INSTALADA PER CÁPITA (finales 2010)

|             | Wc/hab<br>Wp/inhab |
|-------------|--------------------|
| Germany     | 212,3              |
| Czech Rep   | 185,9              |
| Spain       | 82,8               |
| Belgium     | 72,6               |
| Italy       | 57,6               |
| Luxembourg  | 54,3               |
| Slovakia    | 26,5               |
| Greece      | 18,2               |
| Slovenia    | 17,8               |
| France*     | 16,3               |
| Portugal    | 12,3               |
| Austria     | 12,2               |
| Cyprus      | 7,8                |
| Netherlands | 5,8                |



# MERCADO EN ESPAÑA



↑ **RD 2818/1998**  
 Fomento sistemas hasta 5 kW

↑ **RD 1663/2000**  
 Normativa conexión a red (Baja Tensión)

↑ **RD 436/2004**  
 Fomento sistemas hasta 100 kW

↑ **RD 661/2007**  
 Fomento sistemas hasta 10 MW

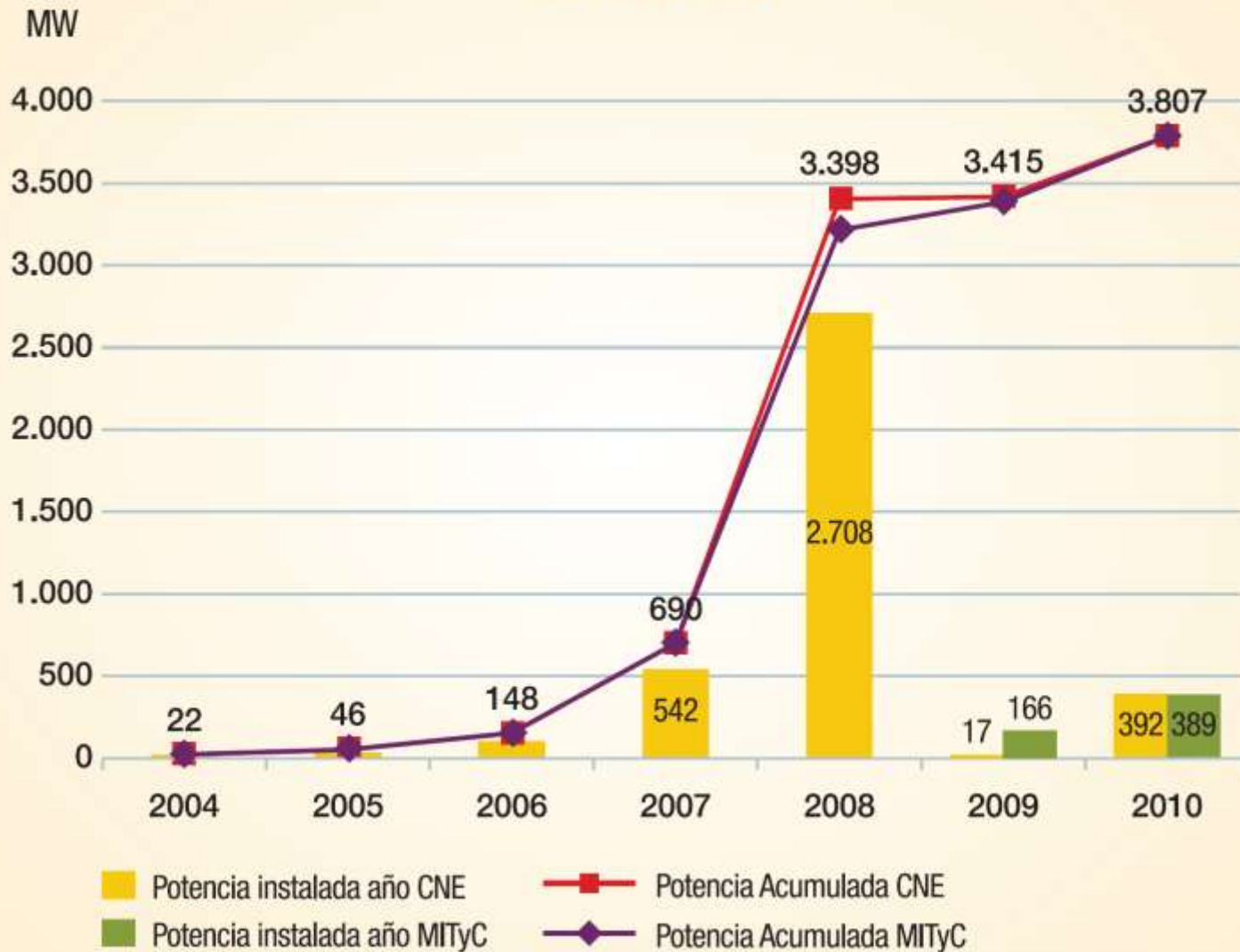
↑ **RD 1578/2008**  
 Fomento sistemas en edificación

[Fuente: IDAE, 2010]

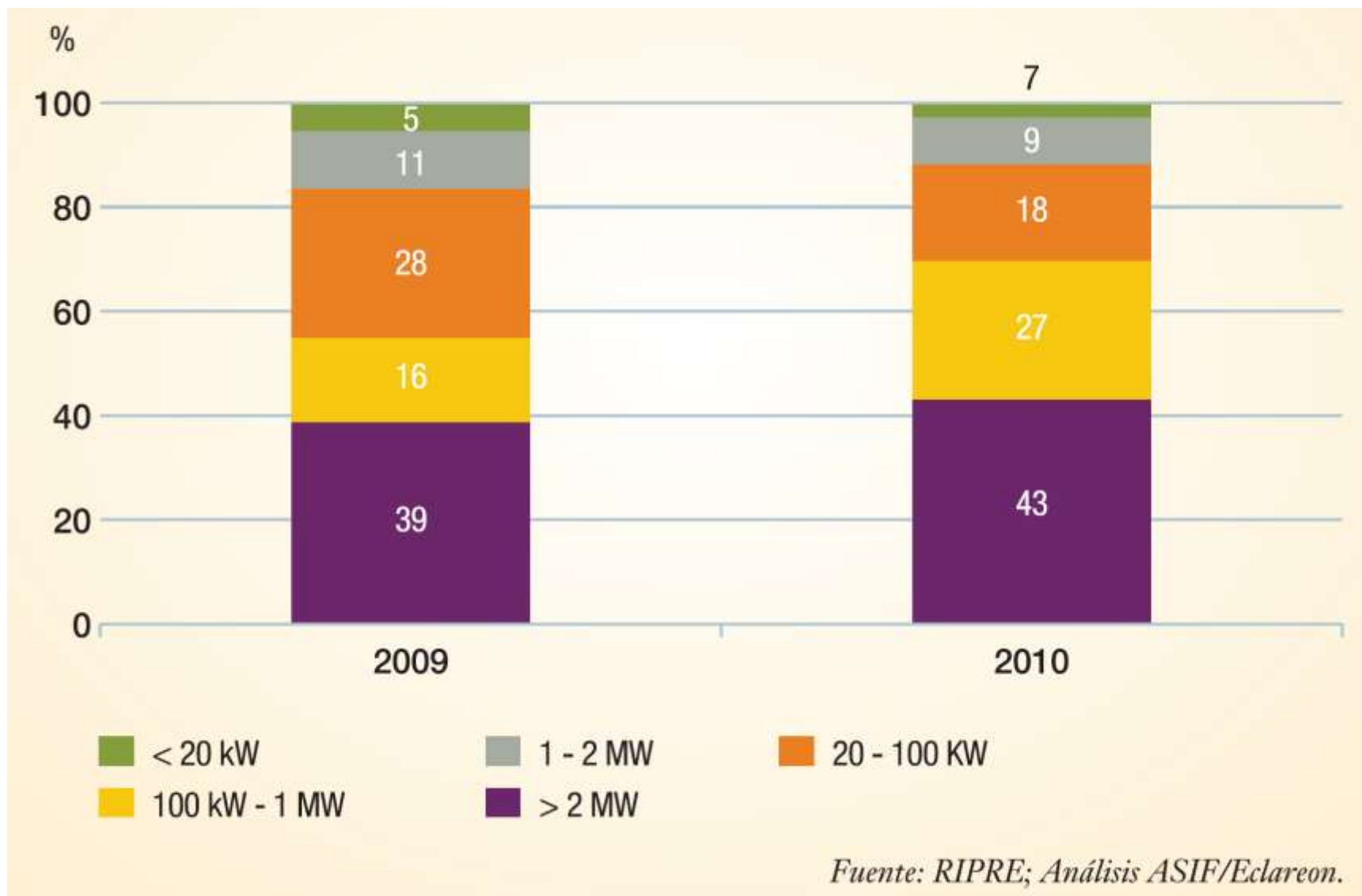
## 5. Mercados fotovoltaicos



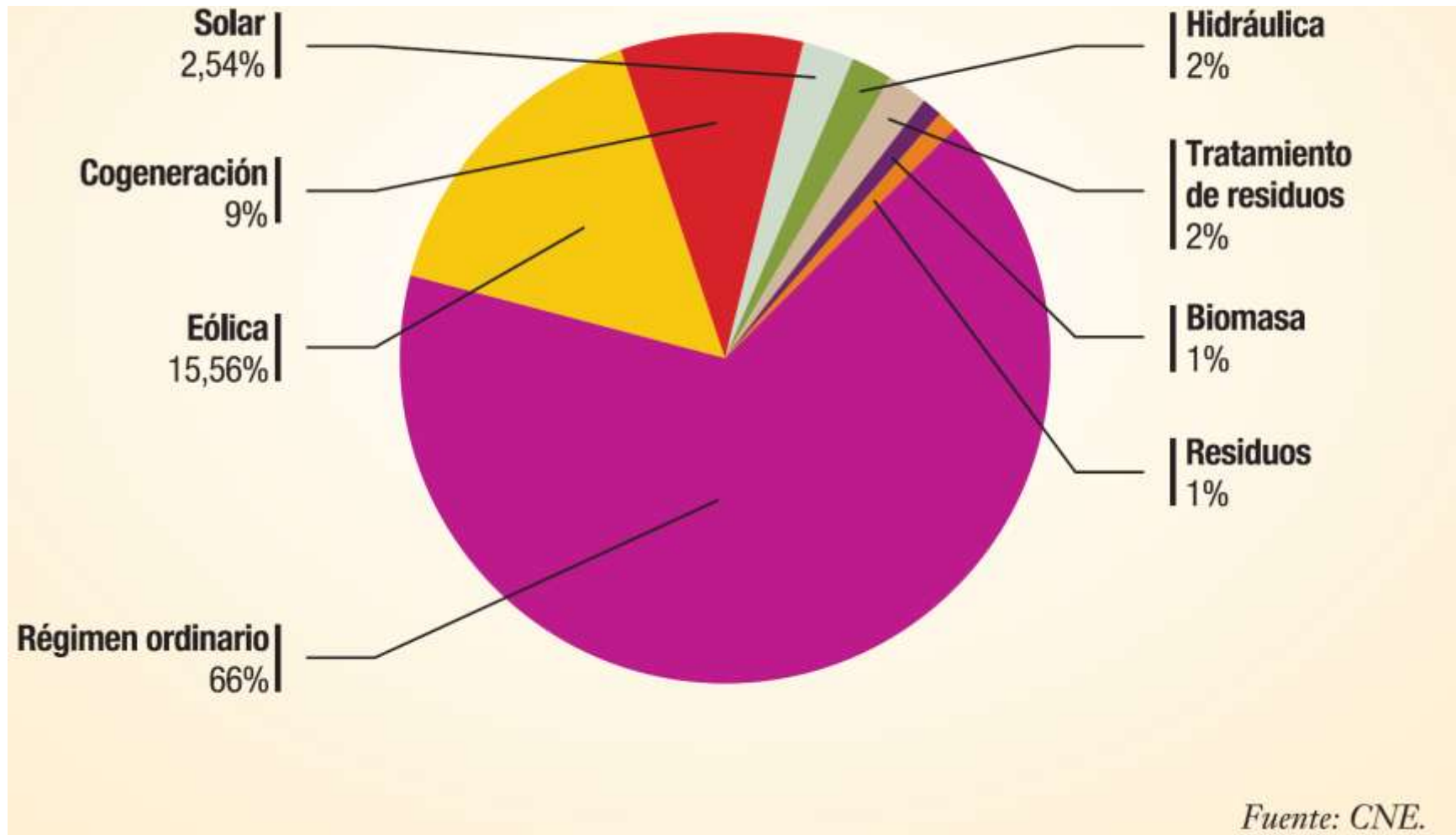
### EVOLUCIÓN DEL MERCADO FOTOVOLTAICO EN ESPAÑA



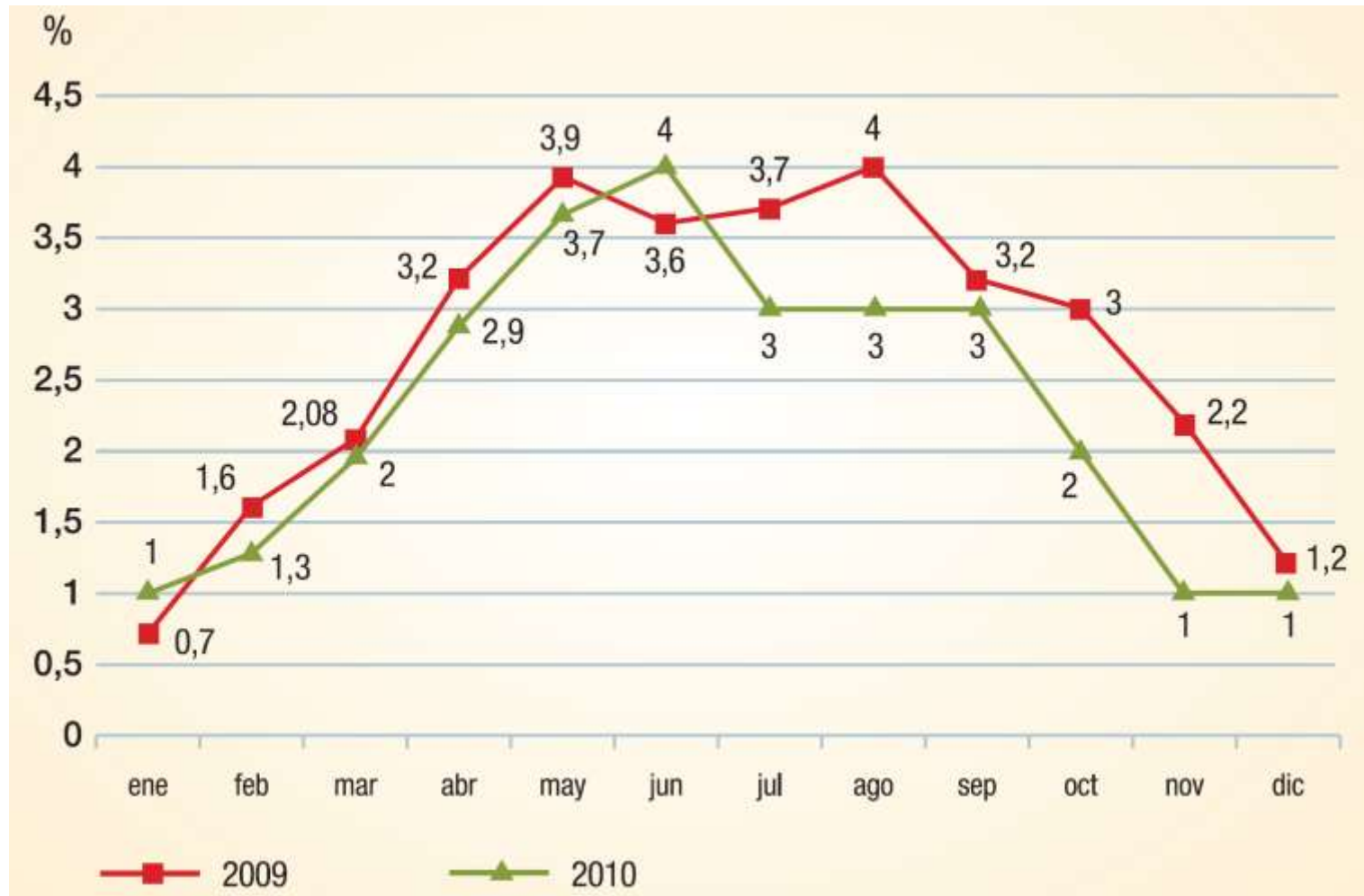
### MERCADO POR TAMAÑO DE INSTALACIÓN EN 2009 Y 2010



# COBERTURA ANUAL DE LA DEMANDA ELÉCTRICA NACIONAL POR TECNOLOGÍAS (2010)



### COBERTURA MENSUAL DE LA DEMANDA ELÉCTRICA NACIONAL MEDIANTE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA



[Fuente: ASIF, Informe anual 2011]



- Disminución de costes
- Incremento de la eficiencia
- Integración arquitectónica en entornos construidos
- Integración en las redes eléctricas

- La tecnología de silicio domina hoy por hoy la industria fotovoltaica
- Los fabricantes eligen la estructura del dispositivo basándose en compromisos entre la eficiencia alcanzable y los costes de fabricación
- Con la tecnología actual, la energía invertida en un sistema fotovoltaico se puede recuperar en menos de cuatro años en Europa Central, dos años en Europa del Sur
- Se están desarrollando nuevos conceptos tecnológicos que pueden abaratar de forma importante la tecnología: focalizar esfuerzos en reducir costes a expensas de pérdidas en eficiencia, o apuntar a muy altas eficiencias que compensen los costes
- Las aplicaciones conectadas a la red han demostrado su viabilidad técnica, si bien la económica ha estado hasta el momento supeditada a mecanismos de incentivos
- Las aplicaciones aisladas son la única opción rentable en muchos entornos rurales de países empobrecidos
- Retos de la tecnología fotovoltaica: disminución de costes, incremento de la eficiencia, integración en entornos contruidos, integración en las redes eléctricas.

**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**