

3. Células fotovoltaicas

La transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica se realiza mediante un dispositivo denominado célula solar. Al proceso por el cual se produce esta transformación se le denomina efecto fotovoltaico. Este efecto se puede producir en sólidos, líquidos y gases. Hoy día se logran las mejores eficiencias en sólidos

Las células solares están formadas por materiales semiconductores como el silicio, arseniuro de galio, telurio de cadmio o Diseleniuro de cobre y indio. Se utilizan estos semiconductores porque sus átomos son muy sensibles a la energía de los fotones de la radiación solar incidente cuya longitud de onda está entre 0,35 y 3 micrómetros. A nivel mundial la gran mayoría de las células fabricadas son de silicio. Las células que más se utilizan son las de silicio monocristalino, silicio policristalino y las de silicio amorfo.

Para la fabricación de células solares, el material empleado debe ser lo más puro posible, obtenido mediante procesos químicos complejos.

En estos últimos años se ha experimentado un gran auge en la fabricación comercial de las células solares de telurio de cadmio o Diseleniuro de cobre, indio y galio.

3.1 Características eléctricas de las Células Solares

3.1.1 Circuito equivalente de una célula solar

Desde el punto de vista eléctrico, existen diferentes modelos para representar el circuito eléctrico equivalente de una célula solar. Con el **Modelo Efectivo de Células Solares**, se puede determinar la curva característica corriente-tensión únicamente con cuatro parámetros de las células solares. Con ello se disminuye la carga de cálculo, aunque negativamente se tenga menos información precisa de los parámetros de los módulos.

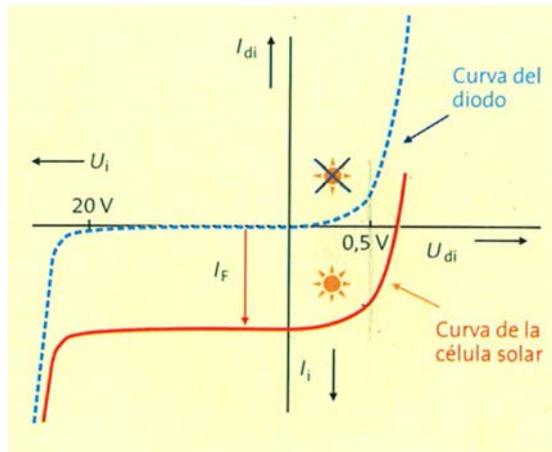


Figura 3.1: Curva característica I-V de célula solar sobre la que incide radiación.

Lo que aporta de excepcional el modelo efectivo de células solares, es que la Resistencia en serie (R_s) y la Resistencia en paralelo (R_p) de los modelos estándar, se agrupan en una resistencia fotovoltaica ficticia (R_F). Esta resistencia fotovoltaica puede tomar valores tanto positivos como negativos por lo que no representa a una resistencia óhmica.

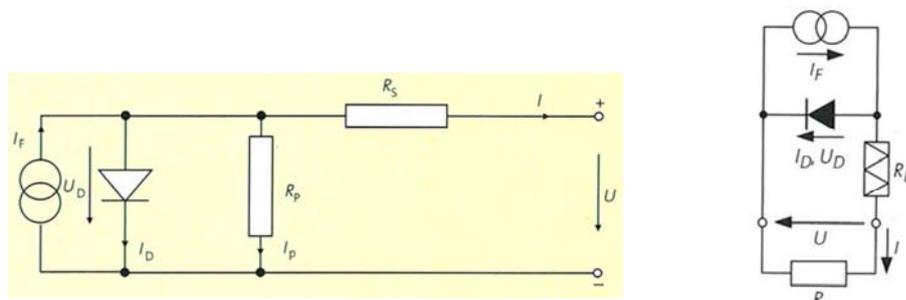


Figura 3.2: Circuito eléctrico equivalente ampliado y Modelo Efectivo de células solares

De esta forma, conociendo la tensión de circuito abierto (U_{ca}), la corriente de cortocircuito (I_{cc}), la tensión en el punto de máxima potencia (U_{PMP}) y la corriente en ese punto (I_{PMP}), se determinarán los cuatro parámetros de las células (R_F , U_T , I_0 , I_F) con las siguientes expresiones:

$$R_F = -M * \frac{I_{cc}}{I_{PMP}} + \frac{U_{PMP}}{I_{PMP}} * \left(1 - \frac{I_{cc}}{I_{PMP}}\right)$$

$$U_T = -(M + R_F) * I_{cc}$$

$$I_0 = I_{cc} * e^{-\frac{U_{ca}}{U_T}}$$

$$I_F = I_{cc}$$

Donde:

- R_F : Resistencia Fotovoltaica ficticia en ohmios (Ω).
- U_T : Tensión de Temperatura en voltios (V).
- I_O : Corriente de Oscuridad en amperios (A).
- I_F : Corriente de Fotocorriente en amperios (A).
- I_{cc} : Corriente de Cortocircuito en amperios (A).
- I_{PMP} : Corriente en el punto de máxima potencia en amperios (A).
- U_{PMP} : Tensión en el punto de máxima potencia en voltios (V).
- U_{ca} : Tensión de circuito abierto en voltios (V).
- M : pendiente de la curva.

La pendiente M depende de los siguientes parámetros:

$$M = f(U_{ca}, I_{cc}, U_{PMP}, I_{PMP})$$

Se puede determinar una función aproximada de la curva característica con una exactitud del 1% con la siguiente expresión:

$$M = \frac{U_{ca}}{I_{cc}} * (K_1 * \frac{I_{PMP} * U_{PMP}}{U_{ca} * I_{cc}} + K_2 * \frac{U_{PMP}}{U_{ca}} + K_3 * \frac{I_{PMP}}{I_{cc}} + K_4)$$

Donde K_1 , K_2 , k_3 y K_4 son constantes numéricas calculadas mediante métodos numéricos matemáticos con los siguientes valores:

- $K_1 = -5,411$
- $K_2 = 6,540$
- $k_3 = 3,417$
- $K_4 = 4,422$

Los parámetros requeridos de las células y de los módulos fotovoltaicos, son facilitados por los distintos fabricantes.

3.1.2 Curva Característica y Parámetros Características de una célula solar

La curva característica de una célula solar cuando actúa como generador de energía, se corresponde con el cuarto cuadrante de la curva característica indicada anteriormente. A modo de ejemplo, se representa de forma especular respecto al eje de tensión para una célula de silicio cristalino.

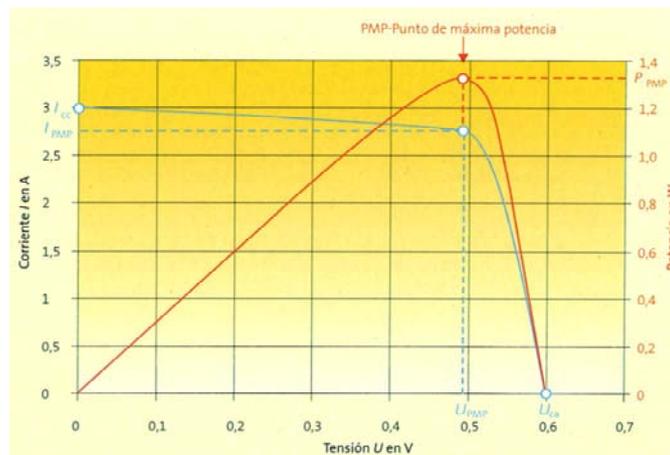


Figura 3.3: Curva Característica I-V y P-V de una célula solar de silicio cristalino

Cuando sobre una célula solar incide radiación y no existe nada conectado a la célula se alcanza la tensión de circuito abierto, por el contrario si se cortocircuitan los bornes, se obtiene la corriente de cortocircuito. Para medir experimentalmente toda la curva se necesita una resistencia variable (Shunt), un voltímetro y un amperímetro.

Condiciones Estándar (STC)

Como se ha comentado para que una célula genere energía, debe incidir una radiación, en este sentido para poder comparar distintas células o módulos fotovoltaicos, se fijan unas condiciones de referencia en las curvas características. Estas condiciones de referencia se denominan **Condiciones Estándar** y están definidas por la norma ICE 60904, quedando resumida de la siguiente forma:

Condiciones Estándar (STC)
Nivel de Irradiancia $E = 1000 \text{ W/m}^2$
Temperatura de la célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ con una tolerancia de $\pm 2^\circ$
El espectro de la radiación está fijado según la norma IEC 60904-3, con una masa de aire $AM = 1,5$

La irradiancia solar es la magnitud que mide la radiación solar y es utilizada para cuantificar la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. Se mide en kW/ m²

La irradiación es la energía incidente en una superficie a lo largo de un cierto periodo de tiempo y la unidad en la que se mide es en kWh/m². La irradiación suele también llamarse horas equivalentes de radiación.

Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC)

En ingles Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), este parámetro se utiliza para conocer cómo influye la temperatura de la célula en el funcionamiento de la misma. Concretamente es el valor de temperatura que alcanza la célula cuando se aplican las siguientes condiciones de operación:

Temperatura de Operación Nominal de la Célula (TONC)
Nivel de Irradiancia $E = 800 \text{ W/m}^2$
Temperatura ambiente = 20 °C
Velocidad del Viento = 1 m/s

Continuando con la curva característica, indicar que esta viene definida básicamente por los siguientes tres puntos:

1. Punto de máxima potencia (PMP): es el punto donde la célula produce la máxima potencia. A este punto le corresponde una potencia P_{PMP} , una corriente I_{PMP} , y una tensión U_{PMP} . A la potencia máxima en condiciones STC, se le denomina potencia pico y su unidad es el watio pico (Wp)
2. Corriente de cortocircuito (I_{CC}): es la corriente cuando la tensión a la que se somete a la célula es nula, es decir, se ha cortocircuitado los bornes de la célula. Suele tener un valor entre un 5% y un 15% mayor que la corriente en el punto de máxima potencia.
3. Tensión de circuito abierto (U_{ca}): es la tensión a la cual la célula no produce corriente.

Dependiendo del tipo de célula, los puntos los valores de los puntos varían, de tal forma que para producir la misma potencia son necesarios diferentes tamaños de células.

Respecto a la corriente de cortocircuito, indicar que es proporcional linealmente al nivel de irradiancia, lo cual para el doble valor de irradiancia se obtiene el doble de corriente.

Por el contrario la tensión de circuito abierto permanece relativamente constante respecto a la irradiancia. Cuando la irradiancia disminuye a valores por debajo de 100 W/m², la tensión de circuito abierto disminuye fuertemente.

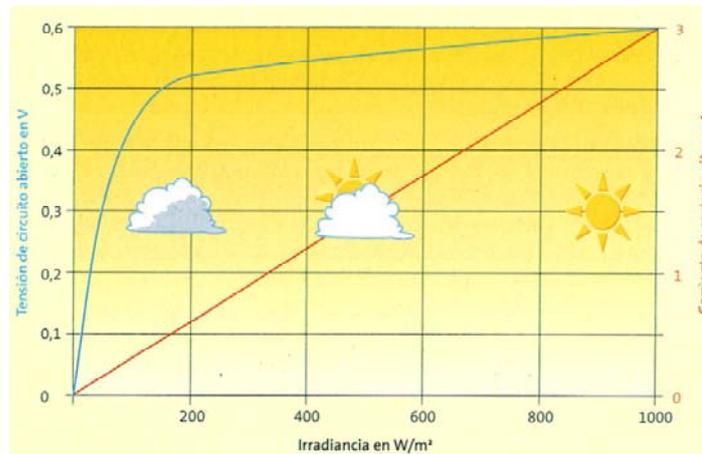


Figura 3.4: Influencia de la irradiancia

3.1.2.1 Factor de forma (FF)

El factor de forma indica lo cuadrada que es la curva característica de las células solares. Se define como el cociente entre la máxima potencia en condiciones estándar y el producto de la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto en condiciones estándar (STC).

$$FF = \frac{U_{PMP} * I_{PMP}}{U_{ca} * I_{cc}} = \frac{P_{PMP}}{U_{ca} * I_{cc}}$$

3.1.3 Sensibilidad Espectral

La sensibilidad espectral de una célula describe en que rango de longitudes trabaja de forma más eficiente. La radiación solar mas energética es la que incide entre longitud de onda entre 400 nm y 800 nm que corresponde con la zona del espectro de luz visible.

Las células de silicio cristalino se comportan de forma más eficiente en el rango de onda larga, por el contrario las células de película delgada utilizan mejor la luz visible. Las de silicio amorfo absorben mejor la radiación de onda corta y las de CdTe y CIS las de onda media.

Las células apiladas, que son células formadas por varias células de película delgada, se optimizan cada una de ellas para adaptarse bien a las diferentes longitudes de onda.

3.1.4 Rendimiento de células y módulos fotovoltaicos

El rendimiento de las células solares o de un módulo, se define como el cociente entre la potencia pico suministrada por la célula (P_{PMP}) y la irradiancia incidente (E) por unidad de superficie de la célula o el módulo (A).

$$\eta = \frac{P_{PMP}}{A * E} = \frac{FF * U_{ca} * I_{cc}}{A * E}$$

En los datos suministrados por el fabricante, el rendimiento viene siempre referido a las condiciones estándar (STC)

$$\eta_n = \eta_{STC} = \frac{P_{PMP}(STC)}{A * 1000 \text{ W/m}^2}$$

El rendimiento de las células depende de la irradiancia y de la temperatura de la célula. Al aumentar la temperatura el rendimiento de las células disminuye, con lo que las células trabajan mejor a baja temperatura.

La variación del rendimiento con la temperatura depende de muchos factores, entre ellos el material de la célula y de la propia irradiancia.

Como se puede apreciar la temperatura influye directamente sobre los parámetros básicos de una célula. Al aumentar la temperatura de una célula empeora el funcionamiento de la misma de tal forma que:

- Aumenta ligeramente la Intensidad de cortocircuito.
- Disminuye la tensión de circuito abierto.
- El Factor de Forma disminuye.
- El rendimiento decrece.

3.2 Tipología de células solares

Dentro de las distintas tipologías de células existentes en la construcción de módulos fotovoltaicos, en este análisis nos centraremos en las siguientes tipos de células:

- Silicio cristalino:
 - Células de Silicio Monocristalino
 - Células de Silicio Policristalino
- Película delgada:
 - Células de Silicio Amorfo
 - Células de Telurio de Cadmio (CdTe)
 - Célula de Diseleniuro de Indio y Cobre con Galio (CIS y CIGS)

3.2.1 Células de silicio cristalino

Las células cristalinas están formadas fundamentalmente por silicio, este no se encuentra en estado puro sino unido al oxígeno en forma de dióxido de silicio. Para obtener silicio puro, se debe separar primero del oxígeno no sedeado del dióxido y para ello se introduce la arena de cuarzo y polvo de carbono en un crisol donde se funden. De esta manera se obtiene silicio metalúrgico con una pureza del 98%.

Este silicio no es de la suficiente pureza como para que pueda ser utilizado con fines electrónicos, por este motivo se purifica el silicio metalúrgico mediante procesos químicos.

El silicio se muele y se mete junto con gas clorhídrico en un horno. El producto químico de dicha reacción es el hidrógeno, el Cl_3Si y un líquido que hierve a 31 °C. Mediante destilaciones sucesivas se consigue el grado de pureza deseado.

Posteriormente se coloca el Cl_3Si con hidrógeno a 1.000 °C obteniéndose así silicio. Este silicio puede ser manipulado posteriormente de muchas formas diferentes, en función del procedimiento se obtiene células monocristalinas o policristalinas.

3.2.1.1 Células de Silicio Monocristalino

Para la obtención de silicio monocristalino de aplicación terrestre se establece un proceso denominado Czochralski (proceso en crisol). Mediante este procedimiento, se toma una semilla de silicio monocristalino con una determinada orientación cristalina y se introduce en el crisol hasta que toca la superficie de la masa fundida de silicio que se encuentra en el crisol y se extrae hacia arriba girando muy lentamente sobre el eje de la varilla.

De esta manera se elaboran monocristales cilíndricos de un diámetro de unos 30 cm y una longitud de varios metros. Estos cilindros se cortan después en finas láminas de 0,3 mm de espesor denominadas obleas.

A partir de las obleas dopadas tipo p se produce una fina capa dopada tipo n, mediante difusión de fósforo. Tras la colocación en la capa posterior del contacto se colocan las líneas por donde circula la corriente en la cara anterior de la oblea y se le dota de una capa antirreflectante.

Existen otros métodos de fabricación de silicio monocristalino, como el de fases líquidas que permite obtener células de mayor pureza y rendimiento, pero a su vez el material que se emplea resulta que el método sea más caro.

El rendimiento obtenido con el método de Czochralski ronda el 15-18%.

3.2.1.2 Células de Silicio Policristalino

El proceso de elaboración más usado para la obtención de silicio policristalino, es el procedimiento de fusión en bloques. Se toma sílice al vacío y se calienta a 1.500 °C, que debido a la menor temperatura del fondo del crisol, 800°C, se enfría de nuevo.

De esta forma se forman bloques de silicio de 40x40 cm y 30 cm de altura. Estos bloques se cortan en lingotes y posteriormente en obleas de 0,3 mm de espesor. En el corte de las obleas se pierde parte del silicio. Mediante el proceso de dopaje con fósforo también se ponen los contactos eléctricos por la cara posterior. Por último, se dota a la oblea con la red para direccionar la corriente en la cara anterior así como un tratamiento superficial antirreflectante.

El rendimiento obtenido con este método ronda el 13-15%.

3.2.2 Células de Película delgada

Los procesos de fabricación de células solares de película delgada se han desarrollado fuertemente a partir de los años noventa. Para fabricarlos se cubre un sustrato (vidrio en la mayoría de los casos) con una capa muy fina de un semiconductor sensible a la radiación (fotosensible). Se emplean procedimientos como procesos de deposición, método Sputter (pulverización catódica) o baños electrolíticos. Como material semiconductor se utiliza silicio amorfo, CuInSe_2 (CIS) y CdTe.

Debido a la gran absorción de la radiación de estos materiales basta con espesores menores de 0,001 mm para la transformación de la radiación solar en electricidad. La temperatura que se alcanza en el proceso de fabricación es de unos 200-500 °C frente a los 1500 °C de células de silicio cristalino.

El poco material y la baja energía consumida junto a la posibilidad de un alto grado de automatización del proceso ofrecen un considerable potencial de reducción de costes frente a la tecnología de silicio cristalino.

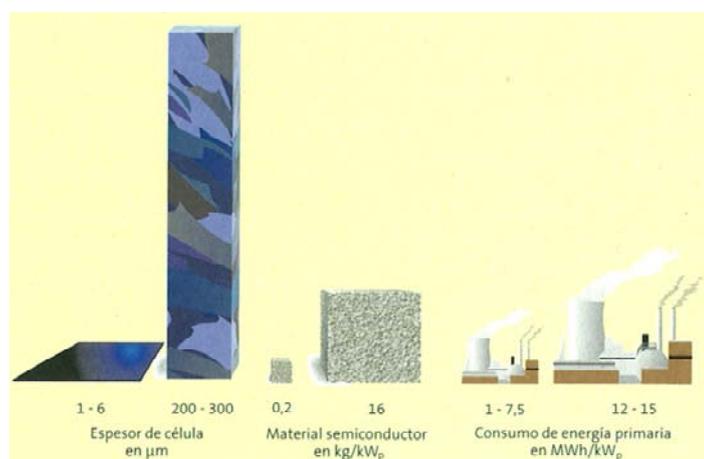


Figura 3.5: Comparación entre células de película delgada y células de silicio cristalino

Otra diferencia entre las células de silicio cristalino y las de película delgada, es la forma de las células. Las células de silicio cristalino dependen de las medidas de las obleas, por el contrario en las células de película delgada el material empleado como sustrato, se puede cortar como se quiera y posteriormente cubrirlo con material semiconductor.

Sin embargo a la conmutación interna solo se pueden conectar células de igual medida. En función de esto, la forma que más se aprovecha eléctricamente es la superficie rectangular.

Respecto al modo de conexión, también existe diferencias. Mientras que las células cristalinas se sueldan (conexión externa) las de película delgada se conectan monolíticamente (conexión interna).

Los módulos de película delgada se comportan mejor frente a la radiación difusa y al incremento de la temperatura que los de células cristalinas, por el contrario su rendimiento, en condiciones climáticas normales, es pero por lo que la producción energética por unidad de superficie es menor.

Respecto al sombreadamiento, los módulos de película delgada se comportan mejor, esto es debido a la forma de las células, tiras largas y delgadas, que son menos sensibles a sombreados ya que necesitaría un objeto largo y fino para cubrir la célula.

3.2.2.1 Células de Silicio Amorfo

El silicio amorfo no forma ninguna estructura cristalina regular, sino una red desordenada. De esta forma da lugar a enlaces abiertos en los que se deposita el hidrógeno. El silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H), se transforma en un reactor de plasma, mediante disposición química de fase gaseosa de silano (SiH_4), en forma gaseosa. Para ello, la temperatura debe alcanzar 200-250 °C.

La dopación se realiza a través de una mezcla gaseosa, que contiene el elemento dopador necesario. En el caso de la dopación-p, se puede utilizar B_2H_6 y para la dopación-n PH_3 .

Debido a la pequeña longitud de difusión de a-Si:H dopado, los transportadores libres de carga en una unión p-n directa no duran lo suficiente para poder producir corriente.

Por ello se introduce una capa intermedia, no dopada, entre las capas dopadas n- y p-, en la vida de los portadores de carga es mayor. Aquí tiene lugar la absorción de radiación y la producción de corriente.

Es ahora cuando las células se aíslan con vidrio por la cara anterior. Como alternativa también existe la secuencia contraria de capas (nip) y aisladas en la cara posterior. Se pueden obtener módulos flexibles sobre diferentes materiales como son planchas metálicas o de plástico.

Un inconveniente de las células amorfa es su bajo rendimiento debido al envejecimiento de las células por la inducción de la radiación (Efecto Staebler-Wronski)

sobre todo durante los primeros 6-12 meses de puesta en funcionamiento. Para contrarrestar este problema se desarrollan las células formadas a su vez por 2 o 3 células, como son las células tándem y las triples sucesivamente depositadas.

Cada parte de la célula se puede optimizar para un determinado rango del espectro y con ello aumentar el rendimiento global. Además el efecto de envejecimiento se ve reducido en estas células.

El rendimiento obtenido en estas células ronda el 5-8%.

3.2.2.2 Células de Telurio de Cadmio (CdTe)

La elaboración de células de telurio de cadmio se consigue a partir de un sustrato con una capa conductora transparente, generalmente de óxido de estaño. Se coloca sobre ésta una capa conductora ventana de tipo n de CdS y a continuación una capa conductora absorbente tipo p de CdTe.

Los procedimientos de elaboración empleados son procedimientos sencillos como serigrafía, separación galvánica o spray. Para módulos de grandes dimensiones, se emplean procedimientos de evaporación en los que se mantienen suficientemente alejados la fuente de vapor y el sustrato. La separación de las capas de CdS y de CdTe, se lleva a cabo a unas temperaturas de unos 700 °C mediante proceso de vacío. La doble capa de CdS/CdTe se activa mediante sobrecalentamiento en una atmósfera con cloro.

El CdS se constituye como capa exterior absorbiendo una pequeña cantidad de radiación de onda corta y deja pasar el resto de la radiación hacia la capa activa de CdTe. El contacto metálico posterior se coloca mediante procedimientos de pulverización.

El principal inconveniente radica en la toxicidad producida por el cadmio. La unión CdTe no es tóxica y sí muy estable. Los riesgos medioambientales y de salud, sólo aparecen cuando está en estado gaseoso, pero nunca se dan el proceso de elaboración en una planta de producción.

El rendimiento obtenido en estas células ronda el 6-9%.

3.2.2.3 Célula de Diseleniuro de Indio y Cobre con Galio (CIS y CIGS)

El material semiconductor activo en las células CIS es el Diseleniuro de cobre e indio (CuInSe_2). En ocasiones se encuentra CIS unido al Galio (CIGS) y azufre.

Para la fabricación de células se toma el sustrato de vidrio en primer lugar y mediante pulverización catódica se coloca una capa delgada de molibdeno que actúa como electrodo posterior. La capa absorbadora CIS tipo p se crea en una cámara de vacío a una temperatura de 500 °C, al evaporarse simultáneamente el cobre, el indio y el selenio. Otra posibilidad sería colocar los elementos individuales en capas sucesivas.

Como contacto frontal transparente se puede utilizar óxido de zinc dopado con aluminio (ZnO:Al), que sería la capa dopada tipo n pulverizándose con una capa dopada intermedia de i-ZnO. Se suele utilizar una capa amortiguadora tipo n de sulfato de cadmio para reducir las pérdidas debida a la adaptación de los campos a la red de cristal de las capas CIS y ZnO.

Las células CIS, a diferencia de las de silicio amorfo, no están sujetas a envejecimiento por la luz inducida.

Un desarrollo previsible en este tipo de células, es la sustitución de la capa amortiguadora de CdS por enlaces libres de cadmio. Actualmente las células más desarrolladas son las CIGS.

El rendimiento obtenido en estas células ronda el 8-10%.

3.2.3 Comparación de células solares

Como se ha podido apreciar las células de mayor rendimiento son las células de silicio cristalino, en este sentido cuando el espacio sea determinante, estas células jugarán con ventaja al disponer de mayor rendimiento y con lo cual mayor producción por metro cuadrado.

Por el contrario las células de película delgada necesitan un menor aporte de material y energía para su construcción, con lo que estas características se reflejarán en el precio final de los módulos.