



industriales

etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Tecnología fotovoltaica de lámina delgada de silicio amorfo (a-Si:H): comparación de su rendimiento en aplicaciones en sistema de energía eléctrica fotovoltaica integrados en los edificios (BIPV) frente a la tecnología de silicio policristalino mediante la matriz de potencias.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Fredy Manuel Almonte García
Director: Prof. Antonio Urbina
Codirector: Prof. José Abad



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Cartagena, junio 2022

Índice

1. Introducción	5
1.1 Energía solar.....	7
1.1.1 Células fotovoltaicas	8
1.1.2 El silicio en las células fotovoltaicas.....	9
2. Silicio amorfo.....	12
2.1.1 Estructura del silicio amorfo.....	13
2.1.2 Espectro de coeficiente de absorción	18
2.1.3 Banda de gap óptico.....	20
2.1.4 Propiedades eléctricas y de transporte.....	21
3. Semiconductores en una célula fotovoltaica.....	22
3.1.1 Funcionamiento de una célula fotovoltaica	23
3.1.2 Efecto de las resistencias parasitarias.....	25
3.1.3 Efectos de la irradiancia y temperatura	28
4. Modulo fotovoltaico	29
4.1.1 Parámetros de un módulo una célula fotovoltaica.....	30
4.1.2 Caracterización eléctrica de un módulo fotovoltaico	31
4.1.3 Parámetros fotovoltaicos característicos del dispositivo:.....	31
5. Objetivos generales	34
6. Objetivos específicos	35
7. Metodología.....	36
8. Resultados.....	38
8.1.1 Caracterización de módulo de silicio policristalino vs amorfo.....	38
8.1.2 Caracterización en función de la irradiancia	39
8.1.3 Caracterización del módulo de silicio policristalino vs amorfo en función de la temperatura	42
9. Conclusión.....	46
10. Bibliografía	47

1. Introducción

La energía eléctrica en la sociedad actual constituye una parte importante de todos y cada uno de los aspectos de la vida; ha contribuido en el desarrollo de la mayor parte de los avances tecnológicos, ya sea a nivel doméstico como en la industria. La economía energética, en particular los países industrializados, se basa en el uso de energía almacenada, principalmente energía fósil en forma de carbón, petróleo, y gas natural, así como energía nuclear en forma de isótopo de uranio 235U¹. En 2020, se consumieron aproximadamente 4.000 millones de toneladas métricas en el mundo de este recurso energético de origen fósil².



Figura 1 Generación de energía eléctrica renovables en el sistema eléctrico español durante todo el año 2020 RED ELETRICA DE ESPAÑA³.

España se ha caracterizado por sus recursos limitados de energía fósil, esto se traduce en una dependencia externa y, por consiguiente, en déficit. Según los últimos datos de Eurostat, el grado de dependencia energética exterior en España fue en 2020 de prácticamente el 70% presentando un descenso del 5,5 % respecto al 2019 debido a la pandemia, el país importó tres cuartas partes de la energía primaria consumida, con lo que el autoabastecimiento llegó solo al 25% y las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la generación de energía eléctrica fue de 36 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Como resultado de estos factores es el aumento del precio megavatio-hora, a 30 de septiembre de 2021 ascendía a 161,01 euros, 50 más que en agosto de ese mismo año³, mientras que para el 8 de marzo del 2022 la energía llegó a costar 700 €/MWh⁴. Por lo que el incremento de la demanda de energía eléctrica conlleva a un gasto elevado de energía. El consumo energético, concretamente de energía eléctrica, representa algo más del 3 % del PIB en España, siendo imposible mantener este ritmo por mucho más tiempo.

España dispone de entre 2.500 y 3.000 horas de sol al año, una media de 8,2 horas al día⁵. Nuestro planeta recibe $\sim 1.2 \times 10^{17}$ W de energía solar⁶, mientras que la tasa de consumo de energía en España⁷ en el año 2020 fue 0.8×10^{13} W. Esto significa que España recibe más energía solar en una hora que la que consume en todo un año.

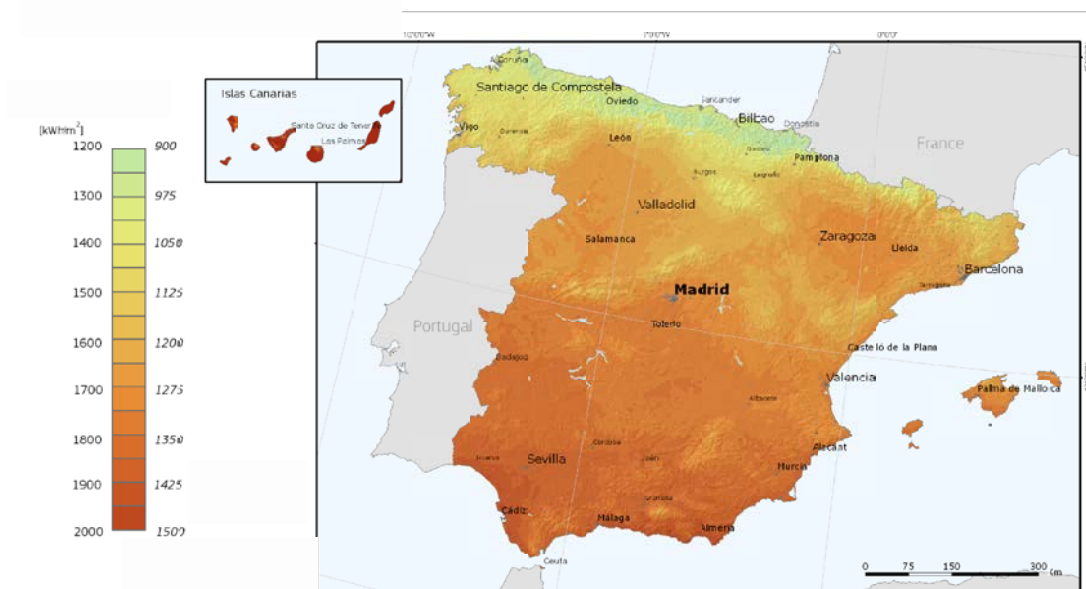


Figura 2 Irradiación global anual y potencial de electricidad solar en España⁸

Uno de los principales retos que tienen hoy todas las sociedades es el de producir energía eléctrica de forma sostenible, por lo que la energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable que se obtiene directamente de la radiación solar mediante un panel solar que a su vez la transforma en energía eléctrica.

La energía renovable por sí sola tiene la capacidad de satisfacer todas las necesidades energéticas del país en el futuro previsible. Otras fuentes de energía renovable incluyen energía eólica, solar, hidroeléctrica, biomasa, corrientes oceánicas, mareas y olas y energía geotérmica. El requisito de terreno para las células solares es mínimo. Cubrir el 0,16% de la superficie del mundo con un 10% de células eficientes proporcionaría $\sim 2 \times 10^{13}$ W de electricidad, más que la demanda energética total actual del planeta.

La evolución del mercado fotovoltaico está relacionada directamente con la eficiencia de estas, y este ha sido uno de los problemas para su desarrollo y masificación. La eficiencia de una célula solar (η) es el parámetro que indica cuanta densidad de potencia eléctrica se puede producir en

relación con la cantidad de irradiación solar recibida por metro cuadrado y cuya unidad es el vatio por metro cuadrado de área (W/m^2). Dentro de los tipos de energía fotovoltaica podemos encontrar varios, pero el silicio es uno de los más usados debido a que es muy abundante.

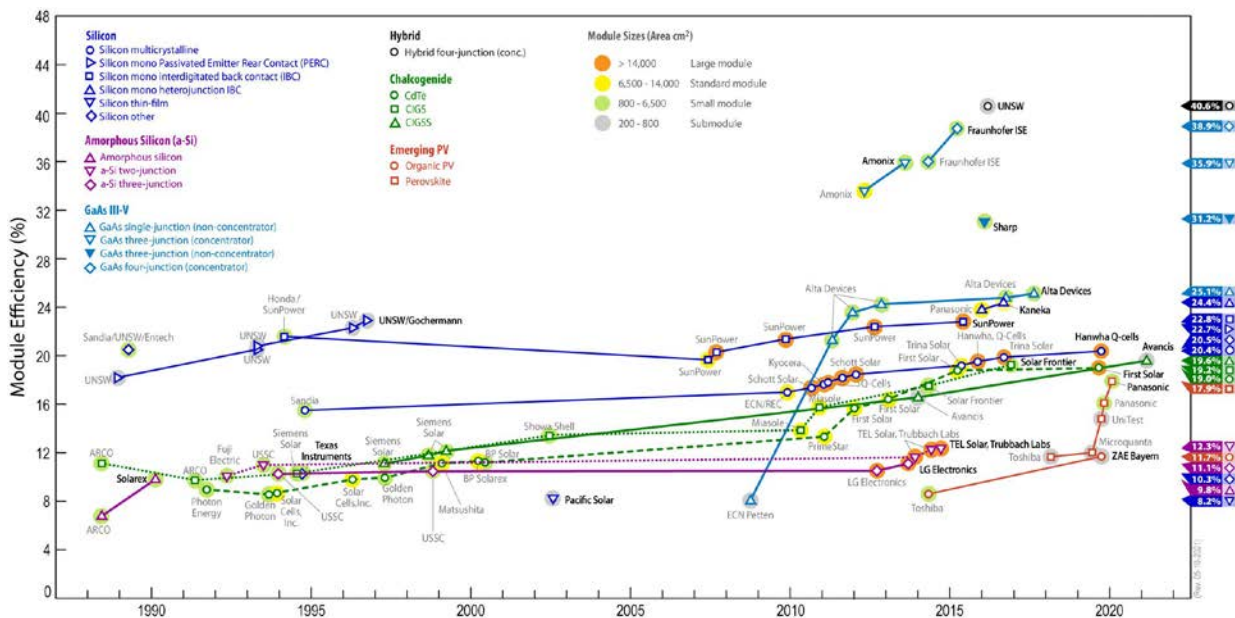


Figura 3 Rendimiento de las distintas tecnologías fotovoltaicas⁹

Actualmente las células solares de investigación que utilizan silicio amorfo o cristalino (monounión sin concentración) tienen una eficiencia del 14% y del 26% respectivamente, lo que se traslada a nivel de módulos comerciales en valores de 9.8% y 22.8% .

1.1 Energía solar

El sol genera una cantidad de energía en forma de radiación solar, siendo una de las fuentes más abundantes de energía. La energía irradiada por el sol procede de las reacciones nucleares de fusión en su núcleo, una pequeña parte de esta energía llega a la tierra en forma de radiación electromagnética en toda la gama del espectro (Figura 4).

La irradiación solar (I_s) es la potencia de la radiación solar que recibe un metro cuadrado de superficie expresada en W/m^2 . Disminuyendo su valor en función de la distancia, las condiciones standard de irradiación son de $1,000 W/m^2$ para el espectro solar AM1.5G. La irradiación solar (H_s) se corresponde al valor acumulado de la irradiación en un intervalo de tiempo determinado y es por tanto la energía durante dicho periodo de tiempo. La irradiación máxima diaria varía debido a que es un valor de potencia instantánea que varía a lo largo del tiempo.

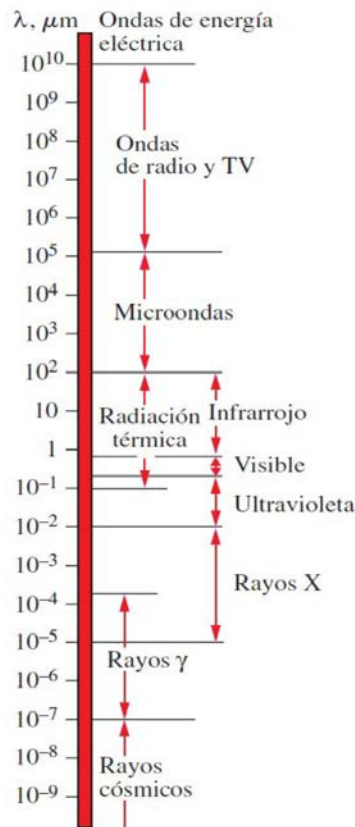


Figura 4 Espectro de ondas electromagnéticas.¹⁰

La radiación solar que llega a la superficie tiene diferentes componentes, la radiación directa – que es la que llega a la superficie en la dirección solar, la radiación difusa que procede del resto de direcciones y la radiación de albedo o reflejada, que se refiere a la que llega tras ser reflejada en el paisaje, suelo o estructuras circundantes. El conjunto de radiaciones que alcanza la superficie es la radiación global, pudiendo ser reflejada, absorbida o dispersada por la atmósfera.

1.1.1 Células fotovoltaicas

Se conoce como células fotovoltaicas el conjunto de dispositivos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar. Se basan fundamentalmente en un dispositivo electrónico semiconductor capaz de transformar la energía luminosa en energía eléctrica. El efecto fotovoltaico fue descubierto por el francés Alexandre-Edmond Becquerel en el año 1839, pero no fue hasta el 1883 que Charles Fritts creó la primera célula solar con una eficiencia del 1%¹¹. En la actualidad las células fotovoltaicas se clasifican en orgánicas, inorgánicas e híbridas¹².

1.1.2 El silicio en las células fotovoltaicas

Las células fotovoltaicas funcionan debido a unos materiales con propiedades electrónicas especiales que se conocen como semiconductores. Un semiconductor es un material cuya conducción eléctrica (en estado puro) no es tan buena como la de un material conductor ni tan mala como la de un material aislante (Figura 5). Su propiedad principal es que su estructura de niveles electrónicos (las bandas electrónicas en el material) presentan un gap de energía prohibida que separa la banda de valencia y la banda de conducción (Figuras 5 y 7). Ejemplos de este tipo de materiales en la naturaleza son el antimonio (Sb), arsénico (As) y el germanio (Ge).

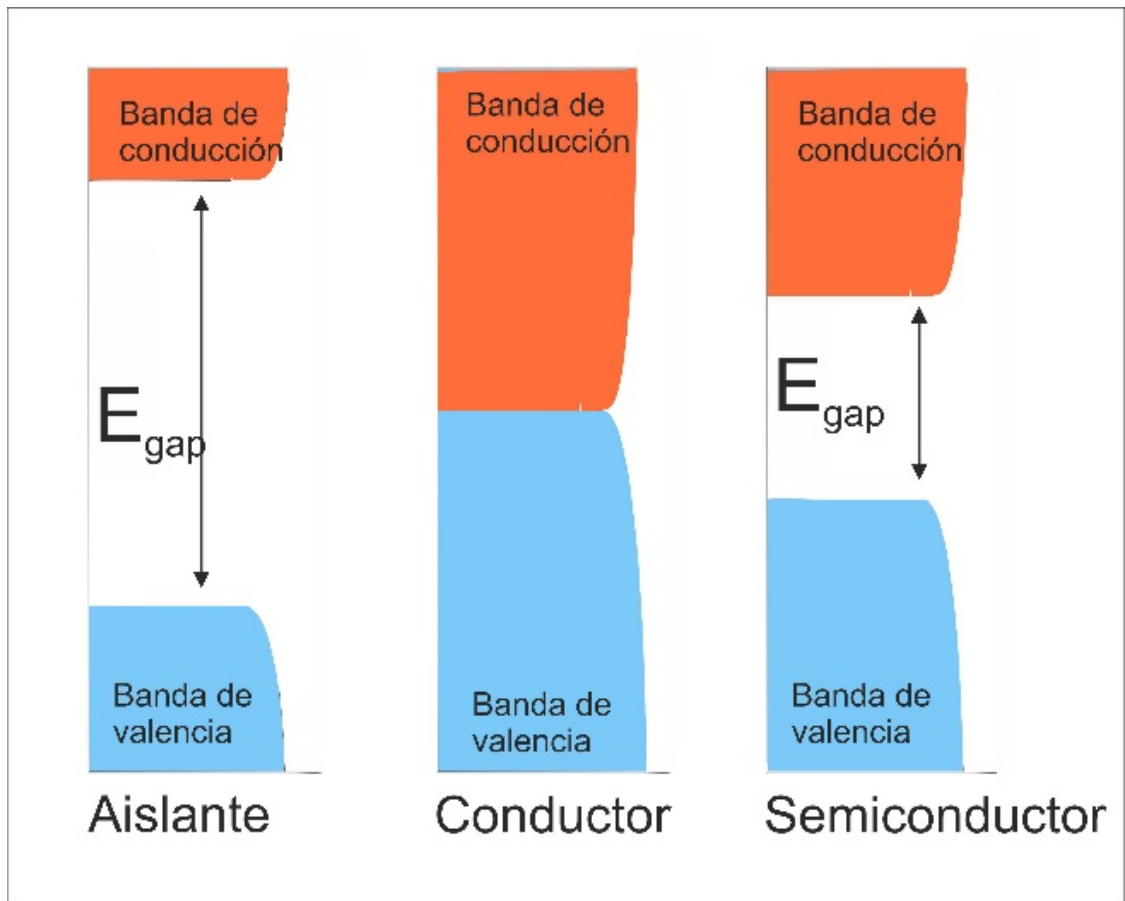


Figura 5 Representación esquemática de aislante, conductor y semiconductor.

La industria de células solares está dominada por el Silicio, ya que este material se utiliza en más del 90% del mercado actual^{13,14}. El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre (después del oxígeno). El silicio se encuentra con mayor frecuencia en la naturaleza como dióxido de silicio (sílice, SiO_2) y como silicatos (compuestos que contienen silicio, oxígeno,

metales, y quizás hidrógeno). La arena y el cuarzo son dos de sus formas más comunes. La arena generalmente es demasiado impura para ser procesada en silicio, pero los depósitos de alta calidad de cuarcita pueden ser casi un 99% de sílice pura.

En un átomo, los electrones se encuentran orbitando el núcleo atómico con determinados valores de energía conocidos como niveles energéticos. Cada nivel consiste en hasta 4 subniveles conocidos como orbitales: *s*, *d*, *p* y *f*, los cuales pueden hospedar 2, 6, 10 y 14 electrones respectivamente. Esto permite describir cada átomo según su configuración electrónica.

El Silicio en su última capa posee cuatro electrones (ver Figura 6). Cuando los átomos de Silicio se unen entre sí, comparten los electrones de las últimas capas con los átomos vecinos formando lo que se denomina enlaces covalentes. Estas uniones se realizan de forma ordenada dando lugar a una estructura cristalina y generando niveles de energía llamados bandas de energía. Y de la misma forma que los últimos niveles energéticos en un átomo definen sus propiedades químicas, las últimas bandas de energía definen las propiedades electrónicas de un cristal. Las dos últimas bandas ocupadas por electrones reciben el nombre de banda de conducción y banda de valencia.

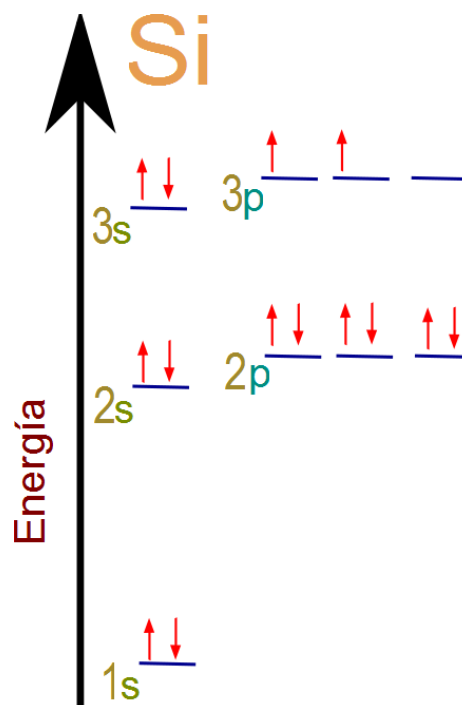


Figura 6 Configuración electrónica del silicio.

La energía del gap es la diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción (Figura 7) y desempeña un papel principal en la teoría de los semiconductores.

En general los electrones que tienen una energía suficiente para desligarse de los átomos se les denomina electrones libres. A la ausencia de un electrón en la banda de valencia se la denomina hueco. A los electrones que todavía permanecen ligados a los átomos se les asocia con los niveles de energía correspondientes a la banda de valencia. Generalmente, en un semiconductor intrínseco (es decir puro) el número de electrones es igual al de huecos y su conductividad intrínseca es baja.

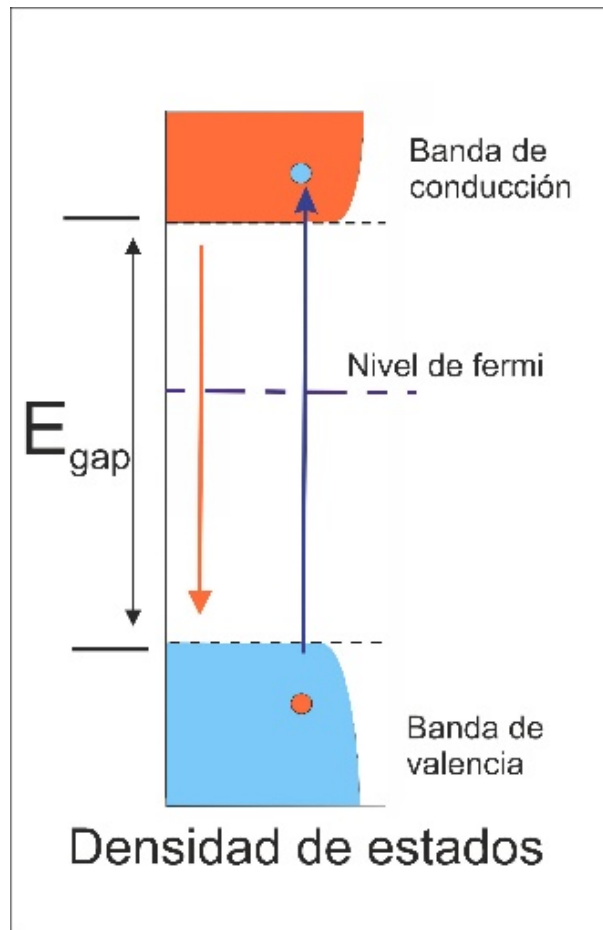


Figura 7 Representación esquemática de la banda de energía.

Sin embargo, la red cristalina del semiconductor se puede dopar introduciendo de forma controlada impurezas (átomos), lo que cambia el comportamiento de la red. Si la impureza introducida tiene en su última capa un electrón más que los átomos de la red se dice que es una impureza donadora porque dona un electrón a la banda de conducción. Si la impureza tiene un electrón menos entonces es una impureza aceptora porque acepta un electrón de la banda de valencia cuando haya un hueco.

Cuando un semiconductor se dopa con átomos donadores éstos pueden perder el electrón fácilmente y la conducción es mediada por electrones, en este caso el semiconductor es tipo n.

Cuando el dopaje se produce con átomos aceptores, éstos capturan un electrón fácilmente lo que origina la aparición de un hueco en la red y la conducción se origina principalmente por huecos, en este caso el semiconductor es tipo p.

Cuando un electrón gana energía externa suficiente para promocionarse de la banda de valencia a la banda de conducción, éste deja un hueco en la banda de valencia generando lo que se conoce como un par electrón-hueco (par e-h); cuando un electrón que se encuentra en la banda de conducción pierde su energía y regresa a la banda de valencia, éste es capturado por un hueco de la red, este proceso se conoce como recombinación de un par e-h. Estos procesos ocurren continuamente de forma dinámica en un semiconductor.

2. Silicio amorfo

No fue hasta 1974 que los investigadores comenzaron a darse cuenta ese silicio amorfo podría utilizarse en dispositivos fotovoltaicos¹⁵. Antes de eso, las propiedades eléctricas del material fueron clasificados como un aislante. Hoy, el silicio amorfo se usa comúnmente en los dispositivos de energía solar, ya que tienen bajos requerimientos de energía. Las células fotovoltaicas de silicio amorfo abarcan un 5% del mercado mundial.

Las películas delgadas de silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) producidas por depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD por sus siglas en inglés) han sido utilizadas en la industria fotovoltaica debido a su mejor coeficiente de absorción y bajo costo de producción, en comparación con los materiales cristalinos¹⁶. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos que han permitido optimizar los procesos de plasma y el diseño de las células solares, la degradación inducida por la luz sigue siendo uno de los principales obstáculos de esta tecnología.¹⁴ Por otra parte, las películas de silicio policristalino (poli c-Si) obtenidas también por PECVD presentan mejores propiedades de transporte de portadores de carga y estabilidad ante exposición prolongada a la radiación solar. Sin embargo, este material no tiene la capacidad de absorción del silicio amorfo y su costo de producción es mayor.

Idealmente, se busca un material que tenga las propiedades ópticas del silicio amorfo, con propiedades de transporte y una estabilidad similar a la del silicio cristalino. Intentado obtener un material con ambos criterios se ha promovido el uso del Silicio Policristalino en células solares de película delgada multi-unión. La eficiencia de célula solar policristalina es 12-14%^{17,18} que es un poco más bajo que las células de silicio cristalinas. Se debe a la presencia de defectos en los cristales conocidos como límites de grano¹⁹. Bell Laboratory fabricó las primeras células solares

de silicio cristalino en 1953, logrando un 4,5% de eficiencia, seguido en 1954 con dispositivos con un 6% de eficiencia²⁰. En los diez años transcurridos desde la primera demostración, la eficiencia de las células de silicio cristalino se mejoró a alrededor del 15% y eran lo suficientemente eficientes como para ser utilizadas como fuentes de energía eléctrica para naves espaciales, aplicaciones terrestres especiales como faros y productos de consumo como calculadoras electrónicas. Las células solares de silicio policristalinas ocupan más del 50% de las células solares debido a su menor costo²¹, a diferencia de la células monocristalinas.

2.1.1 Estructura del silicio amorfo

Como se ha mencionado existen diferentes tipos de silicio utilizados en células solares, que absorben diferentes rangos del espectro solar. El silicio amorfo es desordenado, mientras que en el silicio policristalino existen diferentes tipos que derivan su nombre de acuerdo al tamaño de los cristales: siendo el silicio policristalino el que contiene los cristales más grandes, seguidos por los microcristalinos y el nanocristalino tiene los cristales más pequeños.

Para ilustrar las diferencias en el orden estructural entre el silicio amorfo y el policristalino, se han representado esquemáticas la estructura atómica de los tipos de Silicio más utilizados en la Figura 8.

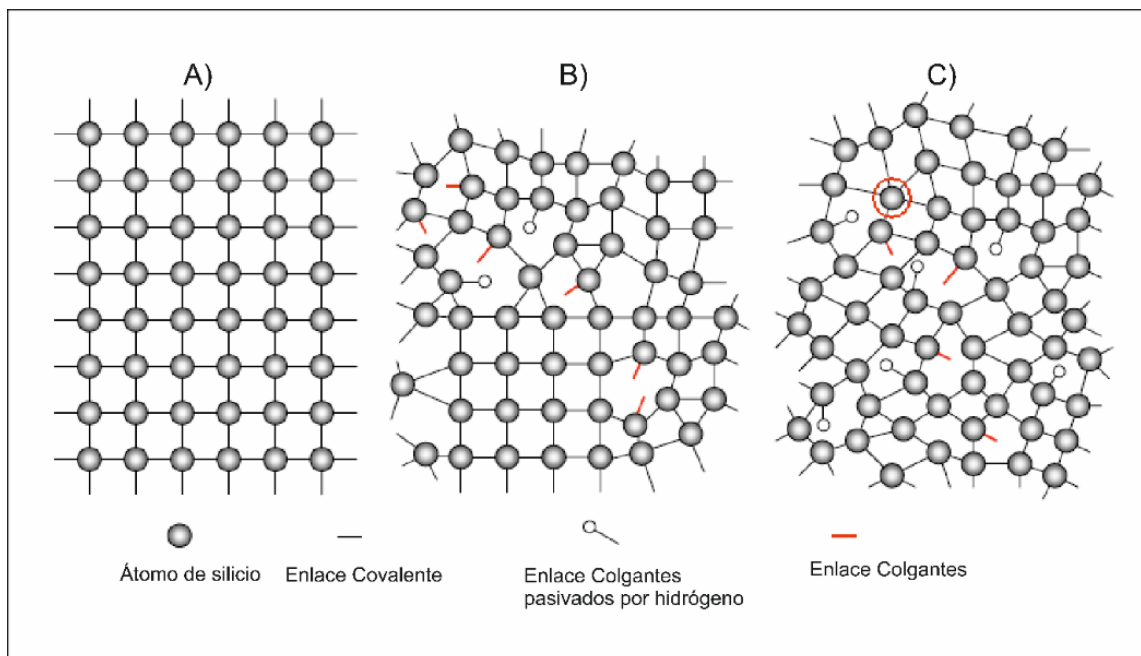


Figura 8 Representación esquemática de la estructura atómica de (a) c-Si, (b) poli-c-Si, y (c) a-Si:H²²

En el silicio cristalino, todos los átomos de Silicio están unidos covalentemente a otros cuatro átomos de Silicio. Los ángulos entre todos los enlaces son idénticos y todos los enlaces tienen la misma longitud. Esta alta regularidad no está presente en policristalino, donde el rango de orden de largo alcance sólo se encuentra en la parte del material llamados granos. En el silicio monocristalino, los dominios mono-cristalinos son macroscópicos, abarcando todo el material de la célula solar; en el poli-cristalino, los dominios cristalinos son menores, y pueden ser desde unos pocos centímetros (y visibles a simple vista) hasta escala micro-métrica, siendo en este caso llamado comúnmente silicio micro-cristalino. La parte cristalina (de distintos tamaños) dentro de un material poli-cristalino recibe el nombre de "grano". En los materiales amorfos el orden es de muy corto alcance, también conocido como red aleatoria continua, y las longitudes de enlace y los ángulos difieren de átomo a átomo, la red microcristalina tiene dominios cristalinos algo mayores, siendo un caso intermedio entre el silicio amorfo y el poli-cristalino. Donde el silicio policristalino contiene granos, el silicio amorfo contiene solo una red aleatoria continua y el orden de corto alcance no excede más que algunas distancias atómicas. Además, en el silicio amorfo los ángulos entre los enlaces no son idénticos y no todos los enlaces tienen la misma longitud. Por lo tanto, algunos enlaces en la red aleatoria continua se conocen como enlaces débiles, ya que se rompen fácilmente cuando hay suficiente energía. En la red, algunos átomos del Silicio solo están unidos a tres en lugar de cuatro átomos, estos se conocen como enlace colgante. El enlace colgante puede estar o no pasivado por un átomo de hidrógeno (H) y cuando el enlace colgante no está pasivado, es llamado unión colgante no pasivado o defecto. La pasivación de hidrógeno es una consecuencia natural del uso de silano al depositar el silicio amorfo y juega un papel importante al intentar reducir el número de enlaces colgantes a nivel de calidad del dispositivo. Otro tipo de defecto que aparece en la red aleatoria continua es cuando un átomo de Silicio está unido covalentemente a otros cinco átomos de Si, también conocido como enlace flotante²³. Ambos tipos de defectos se ilustran en la Figura 8b y la Figura 8.c como una línea roja (- colgante) y un círculo rojo (O flotante).

Para comprender el transporte de carga en un semiconductor como el silicio amorfo y el policristalino, es esencial tener algún conocimiento de la distribución de los estados del material. Esta distribución es ampliamente conocida como distribución de densidad de estados (DOS, de sus siglas en inglés Density of states) y es necesaria para analizar los defectos y la fotoinducción para ambos materiales.

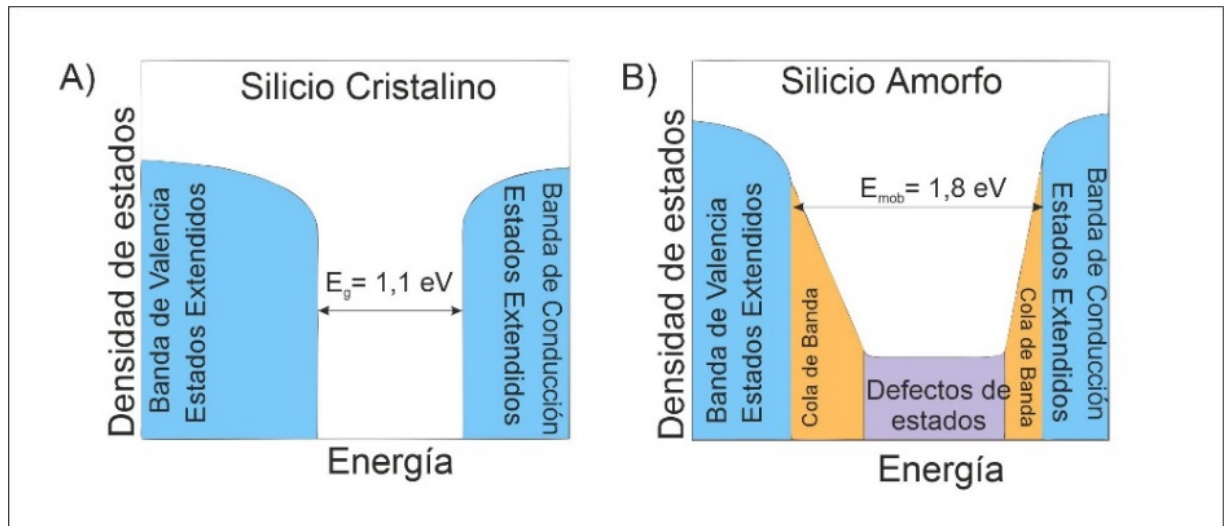


Figura 9 Comparación esquemática de las densidades de estados electrónicas distribuciones de (A) Silicio Cristalino, (B) Silicio Amorfo. En Silicio Cristalino y el Silicio poli-cristalino, la energía gap es de 1,1 eV. Para el silicio amorfo solo es posible definir una banda de movilidad, que es de aproximadamente 1,8 eV²².

En el silicio cristalino no hay estados de energía permitidos entre el borde de la banda de valencia y el borde de la banda de conducción. Por lo tanto, es posible definir la diferencia entre estos dos niveles de energía sin ambigüedades como la banda prohibida ó energía gap (E_g), que refleja la energía fotónica mínima que es requerida para excitar un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, es decir, la energía fotónica mínima necesaria para inducir una corriente fotoeléctrica. En termino de banda estructura y coeficiente de absorción el silicio policristalino se comporta como el silicio cristalino debido a que el orden de largo alcance dentro de los granos es idéntico al de un cristal de silicio. Sin embargo, las propiedades de transporte y recombinación están directamente afectados por la frontera entre los granos, es decir, por los átomos que están en la superficie de los granos. En el caso del silicio amorfo no existe un orden de largo alcance en su estructura atómica. Por lo tanto, el borde de la banda de conducción y valencia no se puede definir de la misma manera que se hace para el silicio cristalino. En vez de estados extendidos o no localizados claramente definidos como es en el silicio cristalino, donde la carga y los portadores pueden moverse libremente, los estados de energía en la banda de conducción y valencia en el silicio amorfo se extiende al espacio entre bandas; estos estados localizados son conocidos como cola. Los estados de cola se deben a enlaces Si-Si débiles, que se origina en el desorden estructural del silicio amorfo. Además, en el silicio amorfo existe una distribución continua de estados localizados entre los estados de cola de la valencia y de la banda de conducción debido a los defectos, tales como los enlaces colgantes²⁴. Una comparación esquemática de las densidades de los estados entre silicio cristalino y el silicio amorfo se presenta en la Figura 9.

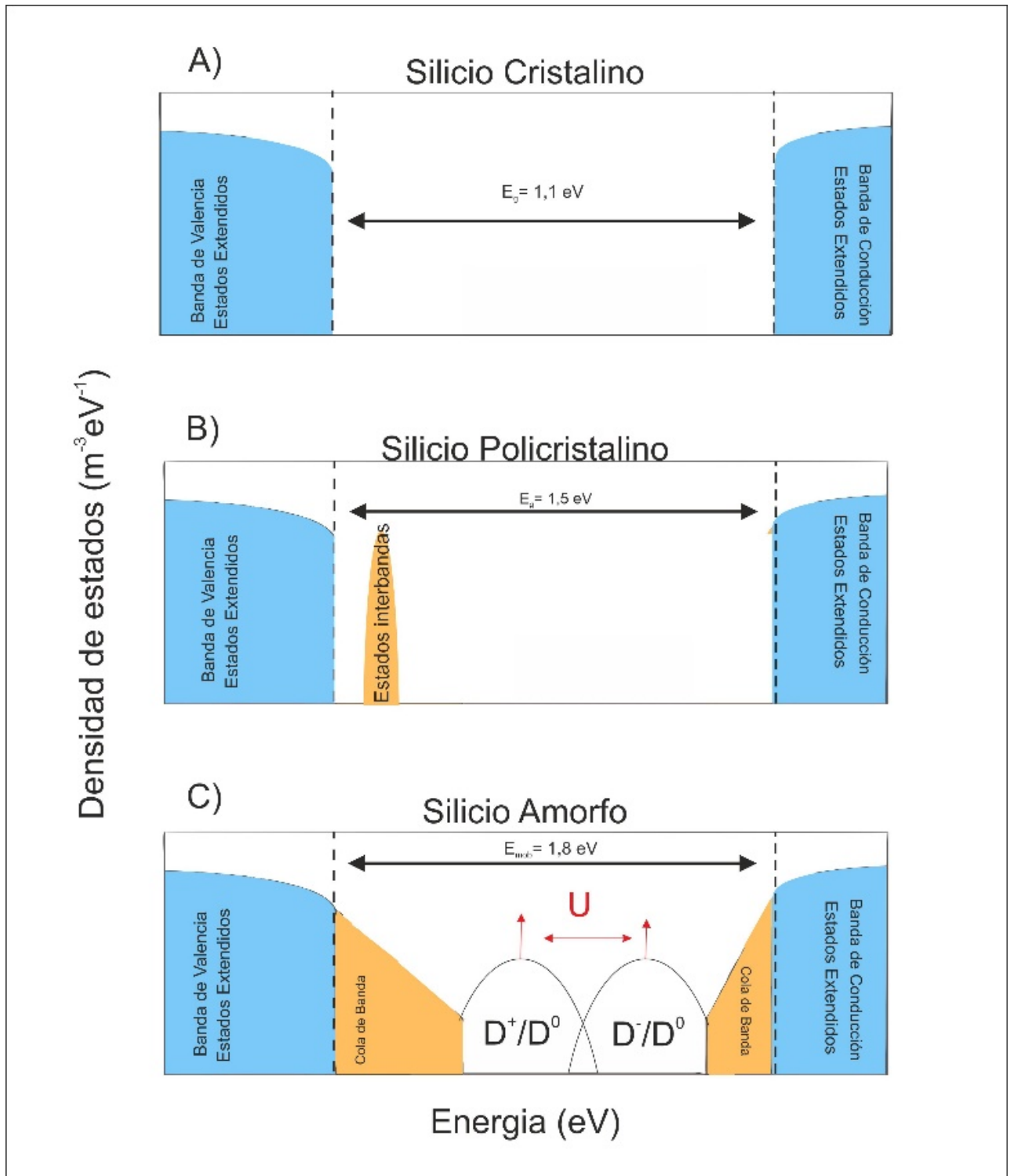


Figura 10 Representación esquemática estándar de la densidad de estados distribución en el c-Si, poli c-Si y a-Si:H con dos distribuciones gaussianas que modelan los estados defectuosos cargados de forma diferente. La diferencia de energía denotada como U es conocida como la energía de correlación, que se supone que es constante²⁴.

Aunque no existe una banda prohibida bien definida entre la banda de valencia y la de conducción en el silicio amorfo, es posible definir una banda de movilidad (E_{mob}). Se utiliza este

nombre porque la movilidad de los portadores de carga en los estados localizados (los estados de cola y defecto) es mucho menor que en los estados no localizados (los estados extendidos). De manera similar, todavía es posible usar el borde de la banda de valencia y el borde de la banda de conducción, pero en el silicio amorfo se refieren respectivamente al borde de movilidad de la banda de valencia y al borde de movilidad de la banda de conducción²⁴.

En general, los defectos están representados por dos distribuciones gaussianas centradas alrededor de diferentes energías, que están separadas por la energía de correlación (**U**), como se puede ver en la Figura 9. Hay tres posibles estados de carga para un enlace colgante: positivo (D^+), neutro (D^0) y negativo (D^-). Por lo tanto, en el diagrama de bandas, un enlace colgante está representado por dos transiciones en los niveles de energía que caracterizan la ocupación de la carga en el enlace colgante. Las distribuciones gaussianas sobre estos dos niveles de energía de transición (D^+/D^0 y D^0/D^- de la Figura 10) deben interpretarse como distribuciones de energía de los estados que corresponden a la carga de las transiciones de los enlaces colgantes entre el estado cargado positivamente y el estado neutro y entre el estado neutro y el estado cargado negativamente.

Las distribuciones gaussianas están en línea con la idea de que el desorden estructural en la red aleatoria continua da lugar a una distribución de estados, en lugar de estados ubicados en niveles de energía particulares, no explican el origen de los estados defectuosos, para ellos se utiliza un modelo ampliamente utilizado de la Distribución DOS en el silicio amorfo que sí incluye una explicación física del el origen de los estados de defectos es el llamado Modelo de grupo de defectos (DPM)^{25,26}. En el modelo de grupo de defectos, los enlaces colgantes se crean a partir de enlaces Si-Si débiles rotos, enlaces Si-H rotos y enlaces Si-Si doblemente hidrogenados. El modelo de grupo de defectos sugiere que se puede formar un defecto en cada uno de los tres diferentes estados de carga que se definen en el modelo. El defecto total la densidad se calcula entonces como la suma de estas tres distribuciones de energía, correspondientes a efectos positivos, neutros y negativos.

Las tres densidades de las distribuciones de defectos no pueden describirse mediante una Gaussiana simple, ya que también están determinadas por las ocupaciones de los tres estados de carga, que son funciones con una dependencia energética exponencial que afectan fuertemente la densidad de las distribuciones de defectos a baja y alta energías.

Sin entrar en los detalles matemáticos adicionales de la mecánica estadística que utilizan en el modelo, cabe mencionar que el modelo de grupo de defectos predice un aumento en el número total de enlaces colgantes en el silicio amorfo donde el nivel de Fermi cambia hacia la banda de

valencia o la banda de conducción. Esto significa que hay un rápido aumento en la densidad de defectos en la banda prohibida.

La discrepancia entre el modelado de estados defectuosos, el modelo general y el modelo de grupo de defectos se debe a la falta de un método directo para medir o determinar la distribución DOS en el silicio amorfo. Por lo tanto, la información sobre el DOS se obtiene de forma indirecta, mediante medidas de propiedades ópticas y/o eléctricas de una película de silicio amorfo. Varios métodos de medición optoeléctricos, se utilizan para calcular el espectro del coeficiente de absorción.

2.1.2 Espectro de coeficiente de absorción

Para estimar la densidad de defectos del material de manera indirecta se utiliza el espectro de coeficiente de absorción. En el silicio amorfo se necesita de 100 – 1000 veces menos de capa activa que en una célula solar de silicio cristalino. Esto es debido a que el espectro del coeficiente de absorción del silicio amorfo, y el coeficiente de absorción óptica (α) es casi 100 veces mayor en la parte visible del espectro del sol que para c-Si debido a la falta de orden de largo alcance en el silicio amorfo.

El espectro del coeficiente de absorción del silicio amorfo (Figura 12) se encuentra subdividido en tres regiones. En primer lugar, está la región de alta absorción, donde se excita directamente de la banda de valencia a la conducción. Esta región está determinada por la energía gap del material. A partir de esta energía se puede obtener una primera estimación de la fase del material y se puede obtener fácilmente de la curva del coeficiente de absorción de esta región. Este nivel de energía será denominado E_a^{24} .

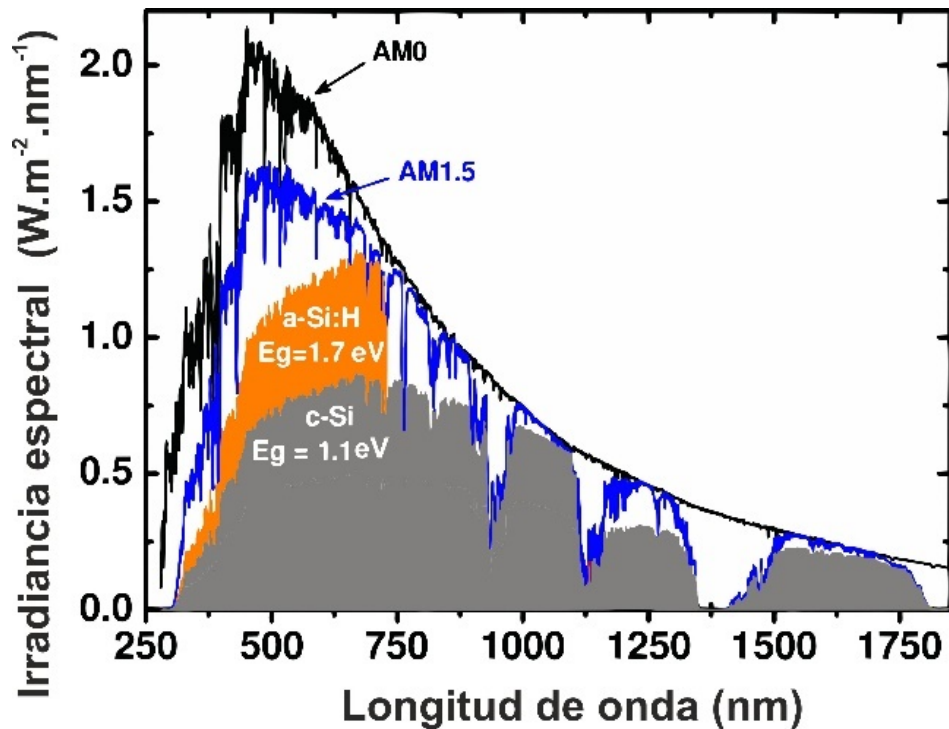


Figura 11 Las diferentes energías gap del c-Si y a-Si:H son causados por diferentes regiones del espectro solar. ²⁷

Como se observa la Figura 12, E_a aumenta con el aumento de la cristalinidad. La segunda región que se puede reconocer se caracteriza por un coeficiente de absorción decreciente exponencialmente hacia energías más bajas. Se puede decir que la absorción para estas energías corresponde a transiciones que involucran los estados de la cola en el silicio amorfo, porque el DOS muestra valencia exponencialmente decreciente y estados de cola de banda de conducción. Para obtener información sobre la distribución de los estados de cola, por lo tanto, se estima el coeficiente de absorción en esta región de energía media ajustándolo a una función exponencialmente decreciente, cuyo exponente se conoce como Urbach energía E_U :

Ecuación 1

$$\alpha = \alpha_0 \exp(E/E_U)$$

donde α_0 es una constante, E la energía del fotón y E_U la pendiente exponencial de la dependencia energética²⁴. El parámetro E_U es ampliamente utilizado para indicar la calidad del material, porque está relacionado con el desorden del material, ya que son producidos por los enlaces débiles. Valores de E_U por debajo 50 meV para el silicio amorfo se considera un material de calidad en el dispositivo.

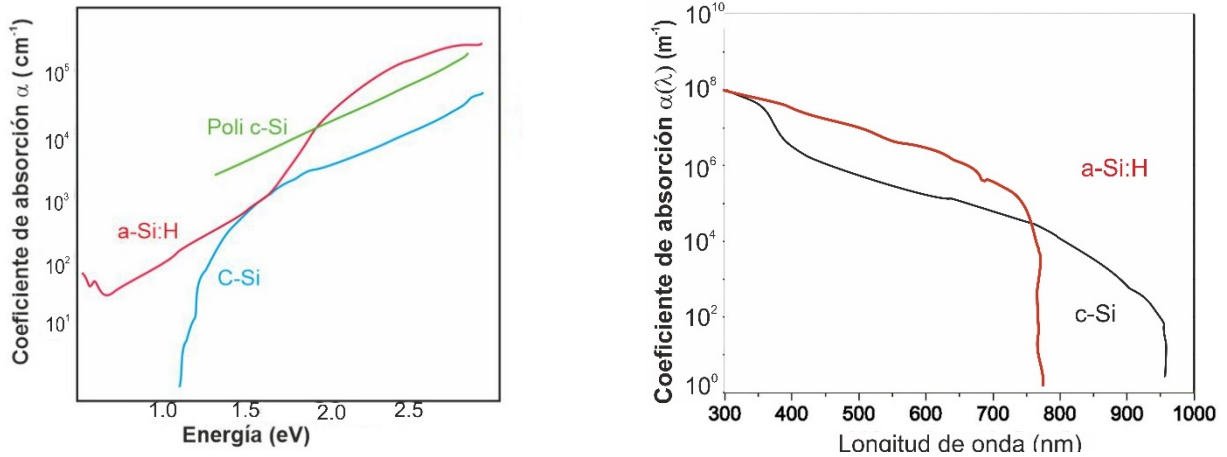


Figura 12 Espectros de coeficientes de absorción típicos correspondientes a c-Si, poli c-Si y al a-Si:H^{28,29}, en función de la energía y en función de la longitud de onda^{30,31}.

Finalmente, está la región de baja energía donde la absorción se debe a transiciones de electrones de los estados de defecto en el medio de la energía de gap a los estados extendidos. En otras palabras, la absorción del gap representa la absorción debida a defectos en la capa intrínseca de un panel solar, que es un factor importante que limita el rendimiento de una célula solar²⁴.

2.1.3 Banda de gap óptico.

Como se mencionó anteriormente, el silicio cristalino, policristalino y silicio amorfo tienen una estructura de bandas diferentes. Como consecuencia, estos materiales tienen diferentes espectros de coeficiente de absorción, como se puede ver en Figura 12, y absorben en diferentes partes del espectro solar.

A parte de la energía de gap que se han introducido hasta ahora, los llamados gap de banda óptica E_{opt} se puede definir para el silicio amorfo, que son obtenidos a partir de las propiedades ópticas del material confinadas en el espectro del coeficiente de absorción.

Si las distribuciones de DOS cerca de la banda de conducción y la banda de valencia tienen una dependencia energética lineal, el espacio óptico se denomina espacio cúbico o espacio de Klazes EK³².

2.1.4 Propiedades eléctricas y de transporte

Las propiedades eléctricas del silicio amorfo generalmente se caracterizan en términos de conductividad en oscuridad y de fotoconductividad. La medida de estas dos propiedades es un estándar para obtener información sobre la calidad del material para su aplicación en energía solar células. También da información sobre el producto de movilidad-vida útil y la influencia de impurezas. Las movilidades de los portadores de carga en los estados extendidos del silicio amorfo son alrededor de dos órdenes de magnitud menor que en el silicio cristalino. Por lo general, en el electrón la movilidad es de $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, y la movilidad del hueco es de $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ para el silicio amorfo. Los valores bajos de las movilidades de electrones y huecos y el alto valor del gap de movilidad dan como resultado una baja conductividad en oscuridad.

Mientras que en silicio policristalino las propiedades eléctricas del material son más complejas debido a que cambian por las imperfecciones presentes en la frontera de los granos. Los bordes del grano producen defectos en el material y los estados medios en la banda prohibida (estados interbanda). Estos estados están espacialmente localizados y tienden a atrapar portadores. El comportamiento de los estados depende de su posición energética con respecto a las bandas del material, los estados que están cerca de la banda de conducción actúan como trampas de electrones y los que están cerca de la banda de valencia actúan como trampas de huecos. Los que se encuentran en el centro de la banda prohibida pueden ser capaces de capturar ambos y también pueden actuar como centros de recombinación. Como los estados en la interbanda son capaces de atrapar portadores afectan la distribución del potencial cerca de los bordes del grano.²⁴

En la oscuridad las barreras de los bordes de grano son dominados por la conductividad del material policristalino, mientras que cuando el material se ilumina los granos reducen la barrera produciendo un incremento en la conductividad, por lo que a intensidades de iluminación solar el efecto de las barreras en la conductividad es despreciable en muchos casos.

Los efectos de los bordes de grano en el transporte de carga dependen de la dirección del flujo de corriente (normales o paralelos). El grado de estos efectos depende del dopaje, la densidad de estados de interfase y de la densidad de carga fotogenerada.²⁴ Otra propiedad afectada es la resistividad, que en un material policristalino es alta a bajos niveles de dopaje, cayendo muy rápido a niveles medios de dopaje hasta que finalmente es comparable con valores de material cristalino a altos valores de dopaje.

Por otro lado, dislocaciones, límites de grano e interfaces afectan el comportamiento de difusión de impurezas, ya que ofrecen un camino de difusión favorable a lo largo del defecto, lo cual mejora el coeficiente de difusión. Esto es muy importante ya que el control de los perfiles de difusión es esencial en las células solares.²⁴

3. Semiconductores en una célula fotovoltaica.

Para generar una fotocorriente es necesario fabricar una unión p-n que consiste en combinar un semiconductor en el que una zona sea de semiconductor tipo n y la otra zona de tipo p. Esta fabricación consiste en que un semiconductor pasa de una región a otra sin interrupción.

Cuando se ilumina la unión p-n genera un campo eléctrico en la célula que separa los pares eh: los huecos, cargas positivas, los dirige hacia el contacto del lado p lo que provoca la extracción de un electrón desde el metal que constituye el contacto; los electrones, cargas negativas, los dirige hacia el contacto del lado n inyectándolos en el metal. Esto hace posible el mantenimiento de una corriente eléctrica por el circuito exterior y en definitiva el funcionamiento de la célula como generador fotovoltaico.

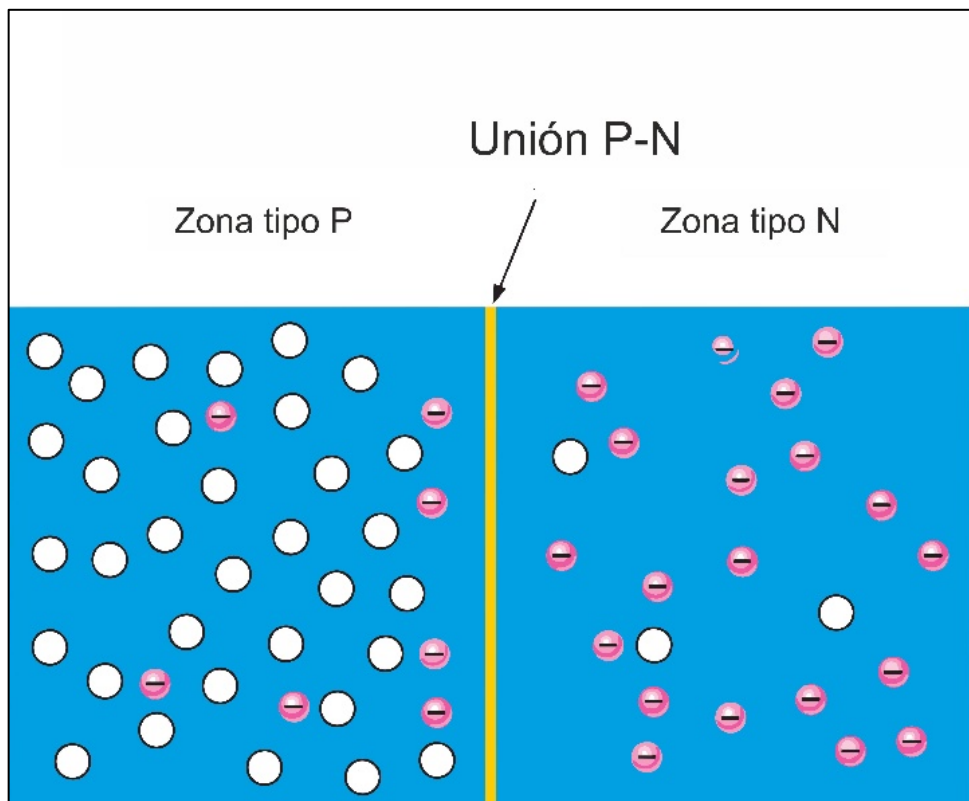


Figura 13 Esquema de la unión p/n semiconductor ³³

Cuando la luz incide sobre el dispositivo, los fotones de luz pueden entrar fácilmente a través de una capa muy delgada de la unión tipo p. La energía luminosa, en forma de fotones, suministra suficiente energía para crear pares de electrones y huecos. La luz incidente rompe la condición de equilibrio y los electrones libres pueden llegar rápidamente a la unión tipo n.

De manera similar, los huecos llegan rápidamente a la unión tipo p. Una vez los electrones libres recién creados llegan a la unión tipo n, no pueden cruzar debido al potencial de barrera. De manera similar, los huecos que llegan al lado de tipo p no pueden atravesar la barrera energética debido a que tienen el mismo potencial de energía. A medida que se generan pares electrón-hueco, constituye un potencial electrón circulando por el circuito exterior. Asociado a este proceso también tenemos los procesos de recombinación.

3.1.1 Funcionamiento de una célula fotovoltaica

Una célula fotovoltaica iluminada conectada a un circuito exterior generará una fotocorriente de intensidad $I(A)$. La curva I-V de una célula solar se puede obtener a partir del circuito. La estructura de una célula solar fotovoltaica es la misma que la de uno de los dispositivos electrónicos de estado sólido más utilizados, el diodo. En ausencia de iluminación, la intensidad eléctrica $I(V)$ que circula a través de una célula coincide con la de un diodo y es debida a la combinación inducida dentro del dispositivo por efecto de la tensión V , viniendo expresada, en función de la tensión, V , y de la temperatura, $T(K)$, según la ecuación:

Ecuación 2

$$I = I_D = I_0(T) \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

Siendo k_B la constante de Boltzmann.

El parámetro $I_0(T)$, denominado corriente inversa de saturación de diodo, depende fuertemente de la temperatura, T , según la expresión:

Ecuación 3

$$I_0(T) \propto \left[\frac{-E_g}{k_B T} \right]$$

En presencia de iluminación, la generación de corriente I_L por la luz se presenta por la corriente de un generador en paralelo con el diodo (que representa la unión p-n, ver en la Figura 15). La corriente de salida I es igual a la diferencia entre la corriente fotogenerada I_L y la corriente de diodo I_D :

Ecuación 4

$$I = I_L = I_{sc} - I_0(T) \left[\exp\left(\frac{q_E V}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

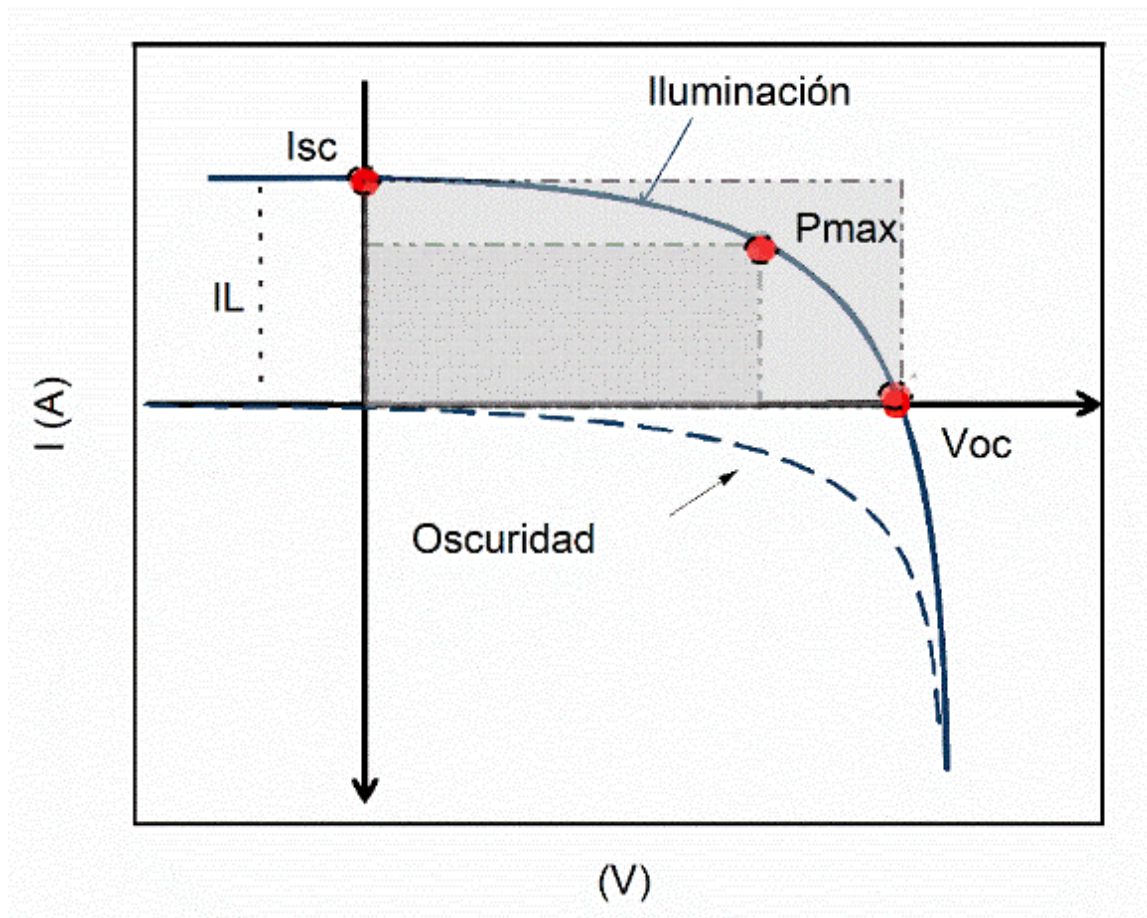


Figura 14 Representación de una curva I-V diodo

La curva ideal de una célula se ve alterada por la presencia de tres factores: el factor de idealidad, la resistencia serie y la resistencia paralela. El factor de idealidad, n_i , es un factor de corrección cuyo valor suele estar comprendido entre 1 y 2. En el caso de una célula solar ideal $n_i = 1$. En cambio, en células solares reales, con una importante influencia de los procesos de recombinación, el factor de idealidad se acerca más a 2. La resistencia serie, R_S , es una resistencia interna de la célula y se debe a la malla de metalización, a la resistencia de los contactos y a la resistencia del propio material semiconductor. La resistencia paralela, R_P , tiene

su origen en imperfecciones en la calidad de la unión p-n y es responsable de la existencia de fugas de corriente. La existencia de las resistencias serie y paralelo afectan significativamente al denominado factor de forma, FF, explicado más adelante, y, a través de este, a la eficiencia de la célula. Estos dos factores se consideran en el modelo de la célula, de forma que, finalmente, su ecuación característica será:

Ecuación 5

$$I = I_L = I_{SC} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q_E V + R_s I}{n_i k_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

Cuya representación gráfica da lugar a la curva característica de una célula solar, el circuito equivalente de una célula solar fotovoltaica se ilustra en la Figura 15.

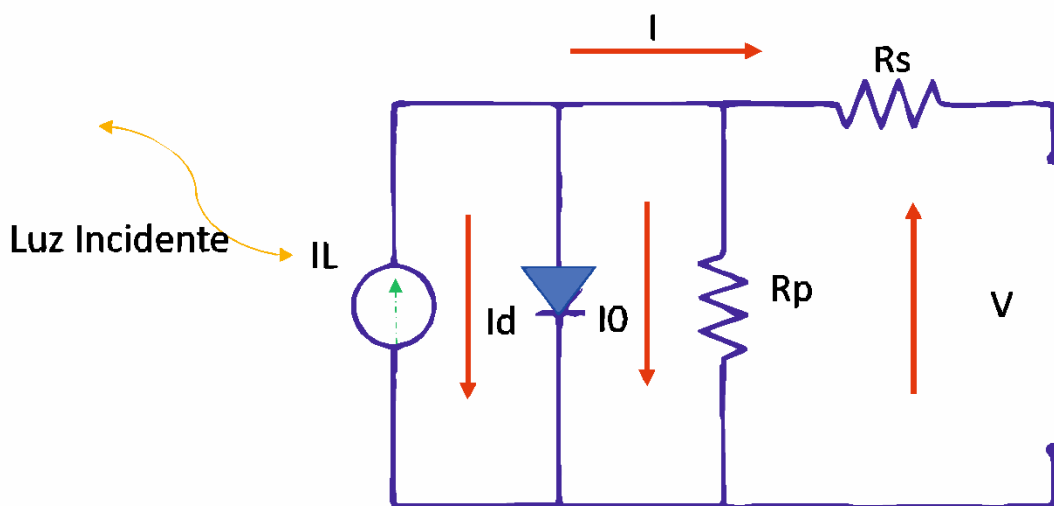


Figura 15 Representación de una célula fotovoltaica

3.1.2 Efecto de las resistencias parasitarias

Los efectos resistivos en las células solares reducen la eficiencia de la célula solar al disipar la energía en las resistencias. Las resistencias parasitarias más comunes son la resistencia en serie y la resistencia paralela mostrada en la Figura 15

En la mayoría de los casos y para valores típicos de resistencia en serie y en paralela, el impacto clave de la resistencia parásita es reducir el factor de llenado. Tanto la magnitud como el impacto

de la serie y la resistencia en paralelo dependen de la geometría de la célula solar, y del punto de funcionamiento de la célula solar. Dado que el valor de la resistencia dependerá del área de la célula solar, al comparar la resistencia en serie de las células solares que pueden tener diferentes áreas, una unidad común de resistencia es Ω/cm^2 .

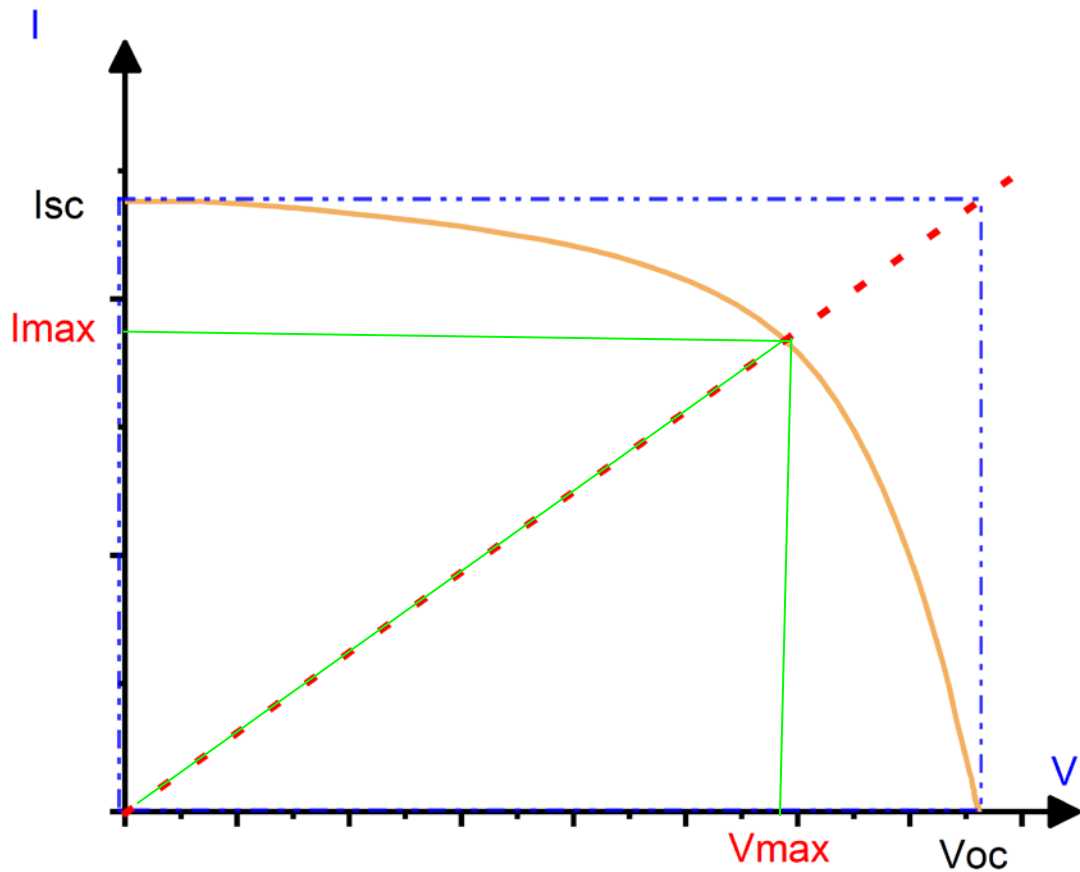


Figura 16 Representación de una curva I-V

Esta resistencia de área normalizada resulta de reemplazar la corriente con la densidad de corriente en la ley de Ohm como se muestra a continuación:

Ecuación 6

$$R'(\Omega/\text{cm}^2) = \frac{V}{I} \times \frac{1}{\text{Area}}$$

La resistencia característica (de carga, $R_{c,l}$ "load") de una célula solar es aquella que conectada como carga ("load") directamente a los terminales de la célula hace que bajo iluminación esta trabaje en un punto de su característica I(V) tal que genera la máxima

potencia (m_{pp}), indicado por el corte de la línea verde con la característica I(V) en la figura 16. Es decir, si la resistencia de la carga es igual a la resistencia característica de la célula solar, entonces el máximo de potencia (I_{mpp} x V_{mpp}) es transferido a la carga, y la célula solar opera en su punto de máxima potencia. Es un parámetro útil en la célula solar de análisis, especialmente cuando se examina el impacto de los mecanismos de pérdida.

Se puede definir además una resistencia característica nominal (R_{c,nom}) de una célula solar como la inversa de la pendiente de la línea roja discontinua que se muestra en la Figura 16 anterior, y que se construye a partir de los puntos extremos de la característica I V) en los ejes de voltaje (V_{OC}) y corriente (I_{SC})³⁴. Las dos resistencias características así definidas son muy similares, pero no siempre coinciden, dependiendo de la forma de la curva característica I(V), que está fuertemente condicionada por las resistencias parásitas.

Ecuación 7

$$R_{c,l} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}}; \quad R_{c,nom} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}}; \quad R_{c,l} \approx R_{c,nom}$$

La resistencia en serie en una célula solar tiene tres causas: en primer lugar, el movimiento de la corriente por el emisor y la base de la célula solar; en segundo lugar, la resistencia de contacto entre el contacto de metal, el silicio y, finalmente, la resistencia de la parte superior y trasera de contactos metálicos. El principal impacto de la resistencia en serie es reducir el factor de relleno, aunque valores excesivamente altos también pueden reducir la corriente de cortocircuito.

3.1.3 Efectos de la irradiancia y temperatura

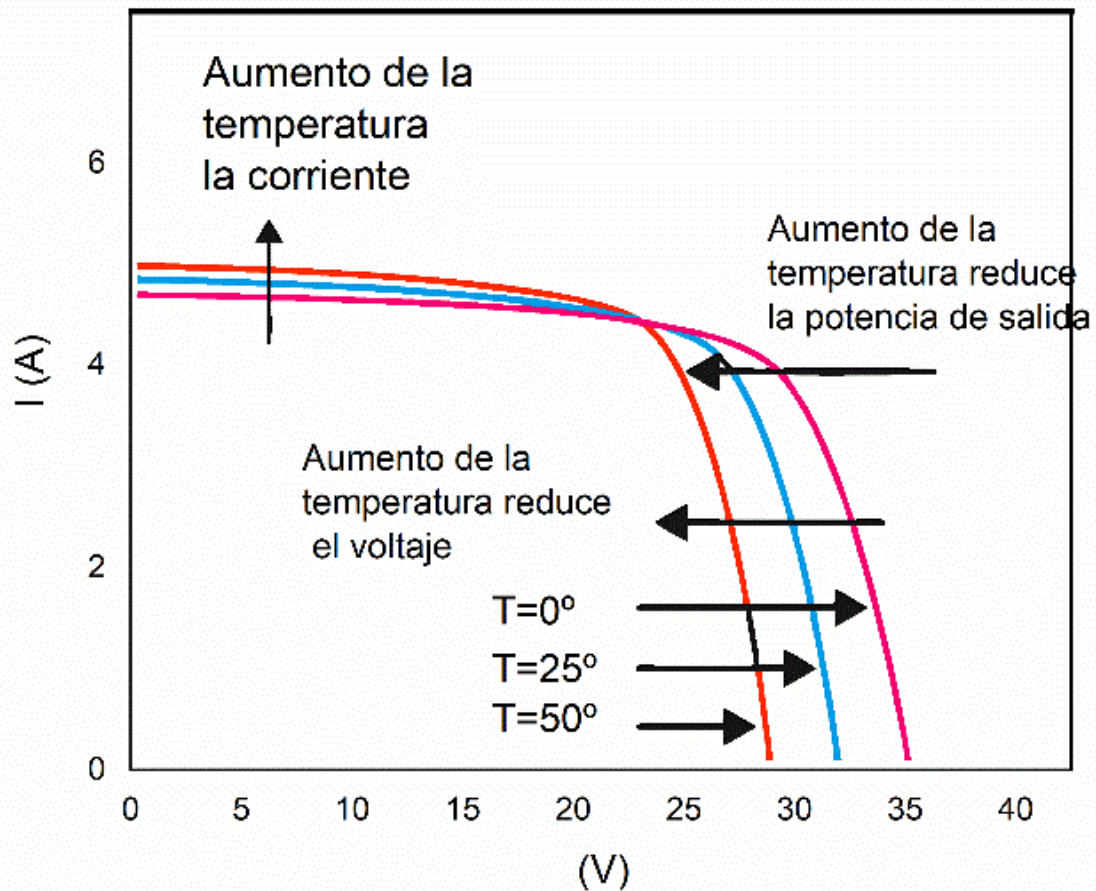


Figura 17 El efecto de la temperatura en la curva IV de una célula solar.³⁵

Los parámetros de mayor influencia sobre la curva I-V de una célula fotovoltaica son la irradiancia y la temperatura. Por un lado, dado que la corriente de cargas generadas a partir de la radiación es proporcional al flujo de fotones con energía superior al ancho de la banda prohibida bandgap, la intensidad de cortocircuito de una célula solar es directamente proporcional a la intensidad de la iluminación incidente. En cambio, la tensión en circuito abierto no experimenta grandes variaciones al modificarse las condiciones de la radiación solar. La proporcionalidad con la irradiancia permite el cálculo de la producción diaria fácilmente.

El efecto de la temperatura sobre la curva I-V es diferente: al aumentar la temperatura la tensión del circuito abierto disminuye³⁶. Como consecuencia el factor de forma FF también disminuye a medida que aumenta la temperatura. La intensidad de corriente de cortocircuito, en cambio, permanece prácticamente constante. El impacto del aumento de la temperatura se muestra en la Figura 17.

4. Modulo fotovoltaico

Una célula solar proporciona poca energía, y a baja tensión. Un determinado número de células se asocian eléctricamente para que trabajen como una sola, buscando suministrar niveles de tensión y potencia adecuados a cada aplicación, esta asociación es lo que se llama módulo fotovoltaico.

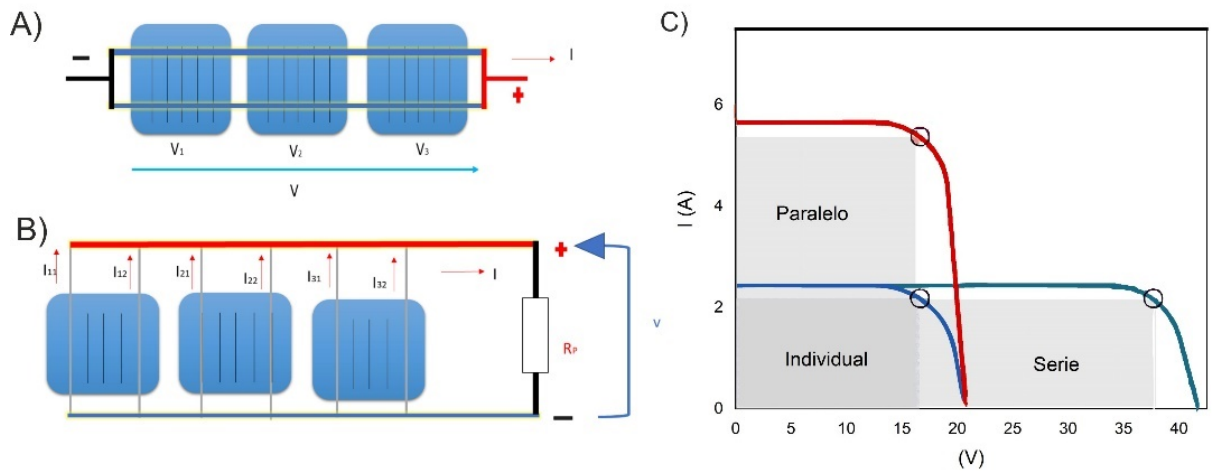


Figura 18 A) módulos fotovoltaicos en serie, B) módulos fotovoltaicos en paralelo y C) Representación de curva IV con las diferencias configuraciones de la célula en el módulo.²⁴

Los módulos fotovoltaicos se pueden conectar eléctricamente en serie para aumentar el voltaje, o se pueden conectar en paralelo para aumentar el amperaje de salida.

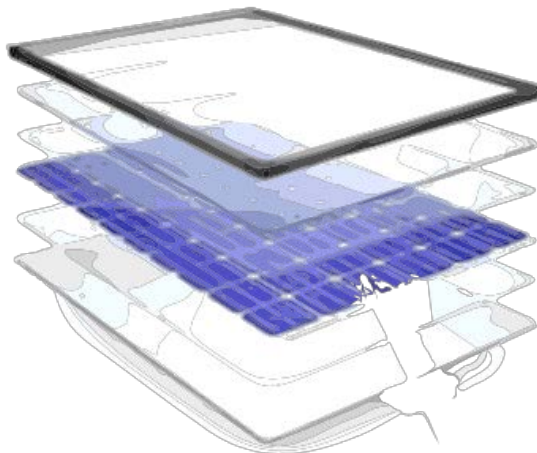


Figura 19 Partes de un panel solar fotovoltaico

Un módulo solar típico está compuesto por:

- Marco de aluminio
- Cristal
- Encapsulado
- Células Solares
- Encapsulado
- Cubierta Posterior
- Caja de conexiones

4.1.1 Parámetros de un módulo una célula fotovoltaica.

Generalmente en las hojas de características de los módulos fotovoltaicos suelen aparecer unas características eléctricas que vienen a determinar el comportamiento eléctrico del módulo bajo unas condiciones estándar de medida (STC) que son, por convenio internacional, de $1000\text{W}/\text{m}^2$ con espectro AM1.5G y temperatura del módulo durante la medida: $T=25^\circ\text{C}$.

Las células fotovoltaicas de silicio policristalino en la actualidad tienen una eficiencia del 26% y las células amorfas de silicio tienen actualmente una eficiencia cerca 14%³⁷. Una característica importante de las células fotovoltaicas es que el voltaje de la célula no depende de su tamaño, y sigue siendo bastante constante con el cambio de la intensidad de luz. La corriente en un dispositivo, sin embargo, es casi directamente proporcional a la intensidad de la luz y al tamaño (en concreto el área). Para comparar diversas células se las clasifica por densidad de corriente, o amperios por centímetro cuadrado del área de la célula.

La potencia entregada por una célula solar se puede aumentar con bastante eficacia empleando un mecanismo de seguimiento para mantener el dispositivo fotovoltaico directamente frente al sol, o concentrando la luz del sol usando lentes o espejos. Sin embargo, hay límites a este proceso, debido a la complejidad de los mecanismos, y a la necesidad de refrescar las células. La corriente es relativamente estable a altas temperaturas, pero el voltaje se reduce, conduciendo a una caída de potencia a causa del aumento de la temperatura de la célula.

4.1.2 Caracterización eléctrica de un módulo fotovoltaico

La caracterización de un panel fotovoltaico se utiliza para medir principalmente su eficiencia, ya que su comportamiento eléctrico está definido por parámetros fundamentales que se obtienen de una curva IV, donde se representa la corriente y el voltaje, siendo sensible a variaciones de condiciones ambientales y del estado del mismo panel.

4.1.3 Parámetros fotovoltaicos característicos del dispositivo:

Voltaje a circuito abierto (V_{oc}): Se define como el máximo valor de voltaje que se registra cuando el dispositivo se encuentra en condiciones de circuito abierto ($R = \infty$, $I = 0$). Este valor está condicionado por el grado de iluminación y los procesos de recombinación

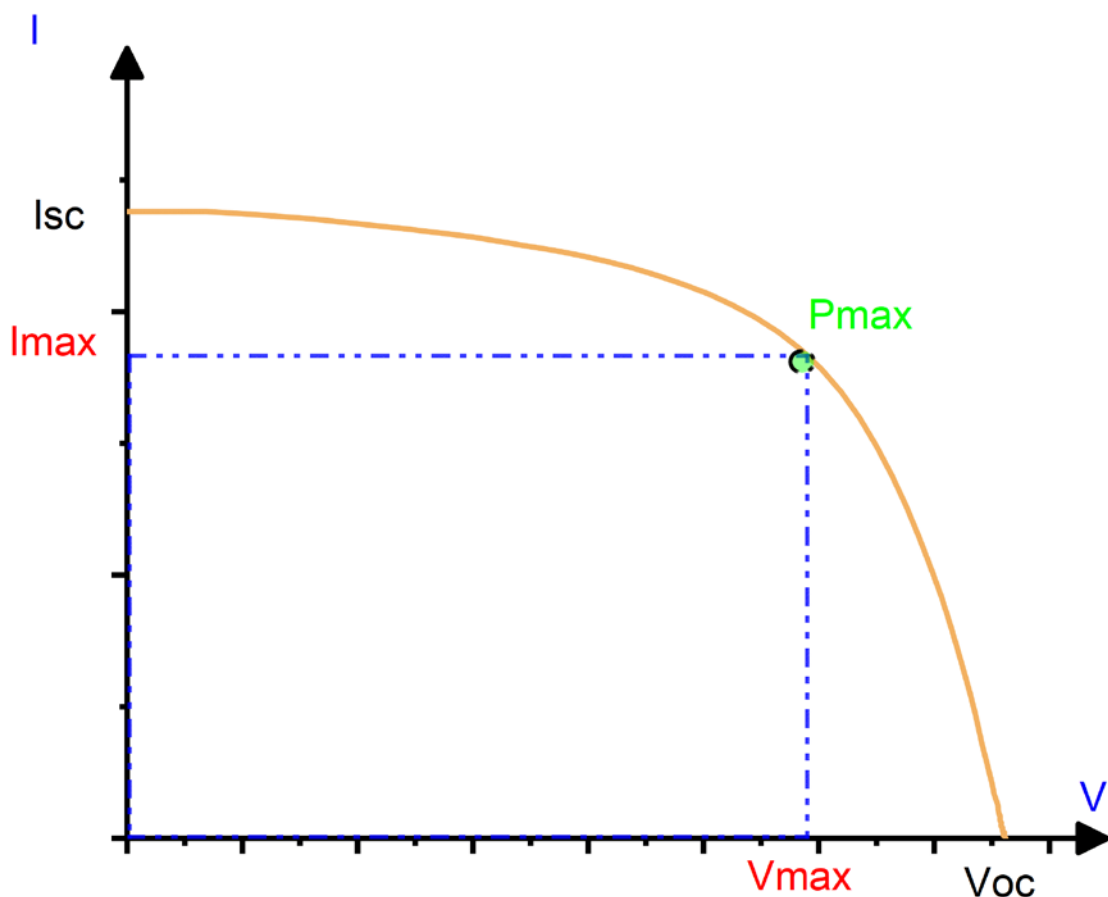


Figura 20 Representación esquemática de una curva i-v

- **Intensidad de cortocircuito (I_{SC}):** Determinada por el máximo valor de corriente que difunde por el dispositivo en condiciones de circuito cerrado ($V = 0$, $R = 0$).

Potencia pico o potencia máxima (P_{MAX})

La potencia que es capaz de suministrar un panel se da siempre en vatios pico (W_p). El panel fotovoltaico funciona a potencia máxima cuando proporciona una corriente y una tensión tal que su producto es máximo ($I_{MAX} \times V_{MAX} = P_{MAX}$). A ese punto de coordenadas (I_{MAX} , V_{MAX}) se le denomina punto de máxima potencia. También es posible encontrar dentro de las especificaciones del fabricante la potencia mínima P_{MIN} garantizada contra la degradabilidad de las constantes eléctricas.

A partir de estos parámetros se puede obtener la eficiencia η de conversión del dispositivo:

Ecuación 8

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_{sol}}$$

Donde **FF** es el factor de llenado o factor de forma de la célula y P_{sol} es la potencia de luz incidente. **FF** siempre será un valor más pequeño que 1 y el módulo fotovoltaico será tanto mejor cuanto más se aproxime a 1 su factor de forma. A su vez, el factor de llenado viene dado por la siguiente relación:

Ecuación 9

$$FF = \frac{P_{MAX}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$$

El factor de forma revela información sobre la forma de la curva característica del dispositivo solar y de cuánto se aproxima a su forma idealizada, definida como un rectángulo con vértices, $(0,0)$, $(0, I_{sc})$, $(V_{oc}, 0)$ y (I_{sc}, V_{oc}) .

La cantidad de energía que entrega un dispositivo fotovoltaico está determinada por:

- El tipo y el área del material.
- La intensidad de la luz del sol.
- La longitud de onda de la luz del sol.

5. Objetivos generales

En este trabajo nos centraremos en las comparaciones eléctricas y de rendimientos de dos tecnologías fotovoltaicas diferentes de lámina delgada de silicio y de silicio policristalinos ambas integradas en estructuras cúbicas sobre el tejado del edificio CyOIN, de la Universidad de Murcia. Las medidas han sido realizadas bajo diferentes condiciones ambientales.

Medir curvas características en módulos fotovoltaicos de silicio amorfo y silicio policristalino. Medidas en condiciones ambientales de irradiancia y temperatura reales y obtener los parámetros eléctricos fundamentales para construir la matriz de potencias para compararla a las curvas características de los módulos fotovoltaicos.

6. Objetivos específicos

- Obtener los parámetros eléctricos (I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} ...)
- Construir la matriz de potencias $P(G, T_m)$ -> potencia en función de irradiancia y temperatura del módulo
- Analizar las curvas I-V características de los paneles

7. Metodología

Los módulos fotovoltaicos que se usaron durante este trabajo fueron³⁸:

- Silicio Amorfo -IATENERGY modelo /TYPE:SM-80-24V
- Silicio Policristalino- Shine Solar modelo SHS100W-36

Para la adquisición de los datos se utilizó un dispositivo de medición de potencia máxima y trazador de curva IV modelo pve-modelo PVPM 1500X³⁹ para módulos fotovoltaicos y generadores.

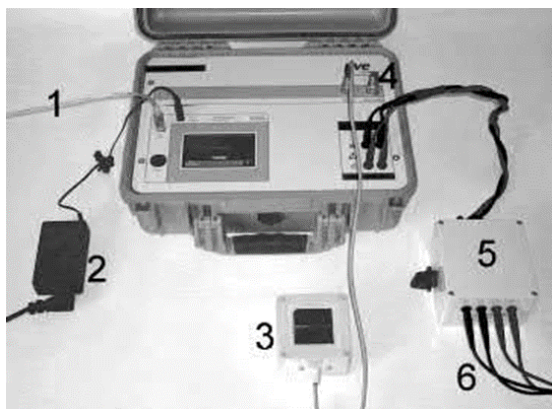


Figura 21 Componentes de PVPM 1500

1. Conexión USB a la PC operativa
2. Fuente de alimentación externa
3. Sensor de referencia de irradiancia
4. RTD de ejercicio (Pt100) o adaptador de cortocircuito
5. Interruptor de seguridad
6. Cable de medición de 4 hilos

Las medidas de ambos módulos se realizaron en condiciones ambientales de irradiancia y temperatura reales en distintas fechas y horas. Los datos fueron adquiridos en Murcia (sureste España 38°01'24"N - 1°10'32"W) en la azotea del Centro de Investigación en Óptica y Nanofísica (CIOyN) en la Universidad Murcia.

La recolección de los datos fue tomada en tres días diferente:

- Día 1: jueves 24 de abril del 2021.
- Día 2: jueves 6 de mayo del 2021.
- Día 3: jueves 24 de junio del 2021

Característica de los paneles solares utilizados

Tabla 1

	Silicio policristalino	Silicio amorfo
	Modelo SHS100W-36P	Modelo SM-80-24V
	c-Si	a-Si:H
	Atersa	EPS
	SHS	100
Pmax [W]	100	80
Vmax [V]	18,1	34,33
I _{max} [A]	5,56	2,33
Voc [V]	22,2	43,83
I _{sc} [A]	5,93	2,51
FF	0,76	0,73
Área Activa [m ²]	0,7	0,67
η [%]	14	12
Largo [mm]	1200	1205
Ancho [mm]	670	605
Espesor (marco no incluido) [mm]	4,5	6,8
Peso [kg]	8,2	12
Marco (M)	M	M
Encapsulamiento	Cristal	Cristal-Cristal
Células #	36	134
Conformación de la célula	Serie	2 serie de 67 - paralelo 2



Los datos obtenidos fueron analizados utilizando los programas PVPM.disp⁴⁰, Excel⁴¹ y originPro⁴².

8. Resultados

En las siguientes secciones se presentan los resultados experimentales de las medidas y una breve discusión en cada caso. El objetivo principal es la caracterización del módulo de silicio amorfo, y también se incluyen medidas detalladas del módulo de silicio cristalino, que se toma como referencia.

8.1.1 Caracterización de módulo de silicio policristalino vs amorfo

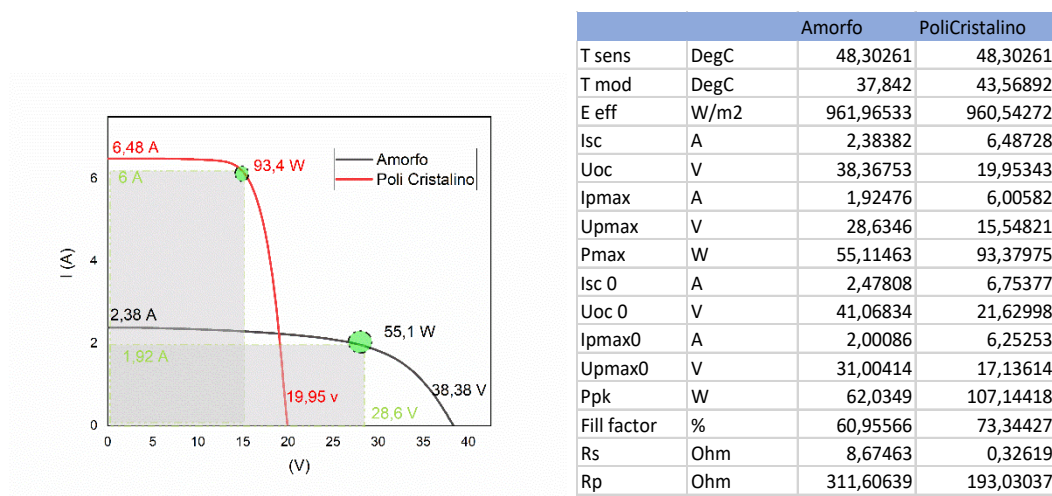


Figura 22 Curva I-V, donde la curva roja representa el módulo fotovoltaico del silicio policristalino y la curva negra representa la de silicio amorfo ambas con una irradiancia de 900 W/m².

En la Figura 22 se representa una curva I-V en ambos módulos con una irradiancia de 960 W/m², donde la corriente de cortocircuito (I_{sc}) para el módulo de silicio policristalino es de 6.48 A. En contraste con el módulo de silicio amorfo donde se observa claramente que tiene 3 veces menos de corriente de cortocircuito (I_{sc}) con un valor de 2.38 A. Si determinamos el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) observamos que el módulo de silicio amorfo adquiere un valor de 38,38V a diferencia del policristalino que solo genera la mitad unos 19,95V. Este comportamiento es debido a la configuración de los módulos fotovoltaicos. Cabe destacar que el punto de potencia máximo para el módulo de silicio policristalino es de 93,4 W, mientras que para el silicio es de unos 55,1 W.

A partir de estos resultados obtenidos en la Figura 22, se procedió a realizar un estudio más profundo de ambos módulos. Eficiencia en la conversión de potencia (PCE). Es la relación entre

la máxima potencia generada en el circuito externo y la potencia solar P_{Solar} incidente, que suele venir estandarizada para el espectro solar. La Ecuación 8 quedará⁴³:

Ecuación 9

$$PCE = \frac{P_{\text{MAX}}}{P_{\text{Solar}}} = \frac{I_{\text{SC}} \cdot V_{\text{OC}} FF}{P_{\text{Solar}}}$$

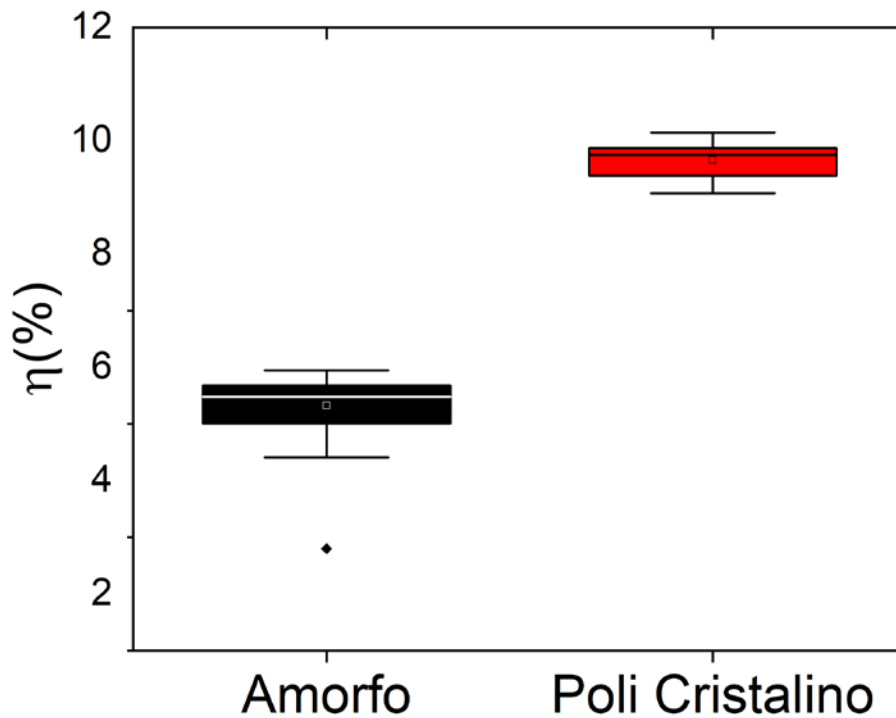


Figura 23 Representación de la eficiencia para el módulo de silicio amorfo (negro) y para el Policristalino (Rojo).

Finalmente sustituyendo los valores de la Ecuación 9 por los datos obtenidos de las curvas I-V hemos calculado la eficiencia de ambos módulos obtenidos $\eta[\%] = 5.3 \pm 1.9$ el módulo amorfo y $\eta[\%] = 9.8 \pm 0.5$ para el módulo cristalino, datos acorde con lo esperada debido a las propiedades físicas del silicio policristalino.

8.1.2 Caracterización en función de la irradiancia

Los datos ordenados de cada tecnología de célula se investigaron para valores de intensidad de luz de 164, 689, 805, 908 y 962 W/m². Como se muestra en la Figura 24, a medida que

aumentaba la intensidad de la luz, las curvas I-V de la tecnología de célula policristalina se desplazaron hacia arriba con un aumento significativo en las corrientes de cortocircuito con ligeros cambios en los voltajes de circuito abierto. Se hicieron observaciones similares para las dos tecnologías de células. Sin embargo, las tasas de aumento de los voltajes de circuito abierto fueron diferentes para cada una de las tecnologías de células. Esto se debe a que las células se fabrican con diferentes materiales, cada uno con sus propias características físicas.

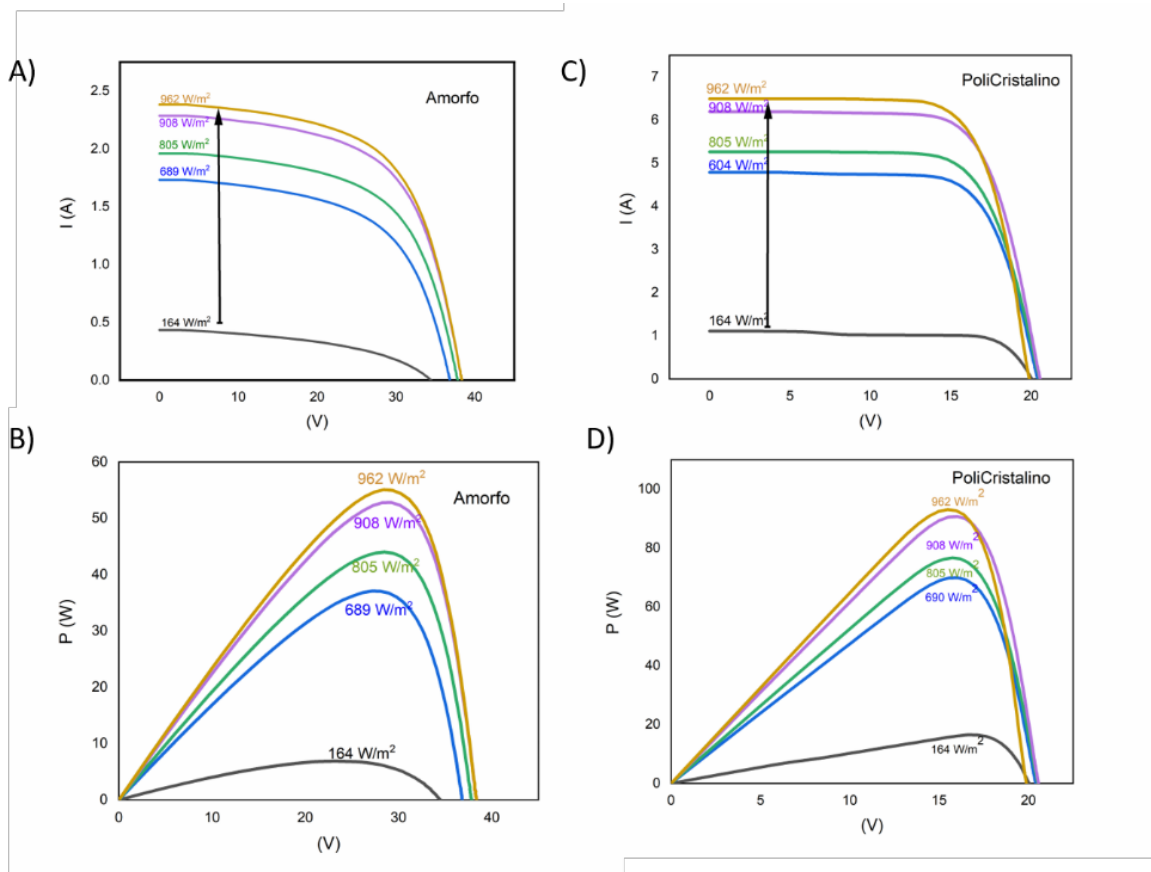


Figura 24 Representación de la intensidad de cortocircuito en función del voltaje para el silicio Amorfo A) y para el silicio policristalino B) y potencia en función del voltaje para el silicio Amorfo y B) para el silicio policristalino. Donde la curva amarilla representa 962 W/m², morada 908 W/m², verde 805 W/m², azul 689 W/m² y negro 164 W/m².

Como se muestra en la Figura 25, se observó que la tasa de aumento de la densidad de corriente de las células con respecto a la intensidad era diferente. Para el silicio policristalino, la corriente aumenta en 7 A por unidad de cambio en la irradiancia y para el silicio amorfo, la corriente aumenta en 2,5 A por unidad de aumento en la energía solar.

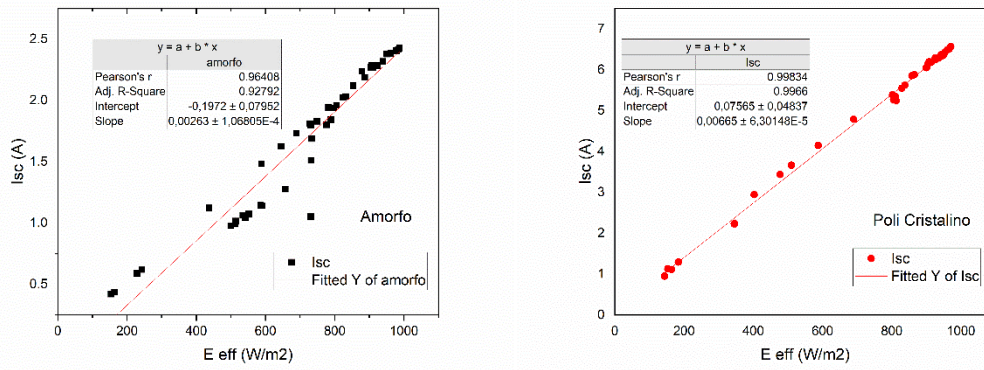


Figura 25 Representación de la intensidad de cortocircuito en función de la irradiancia, donde el grafico de la izquierda representa los datos de silicio amorfo, mientras que el de la derecha son los datos obtenidos del silicio policristalino.

Un aumento en la intensidad de la luz significó un aumento en el número de fotones incidentes que a su vez resultó en un aumento en los pares de huecos de electrones generados. Las células solares de silicio se clasifican por su estructura y la forma en que crecen los granos cristalinos en la mayor parte del semiconductor. Los policristalinos son estructuras con una gran cantidad de límites de grano que actúan como trampas para los huecos de electrones generados, mientras las estructuras amorfas contienen una alta densidad de enlaces colgantes con el mayor número de trampas para los huecos de electrones generados. Por lo tanto, los policristalinos exhiben un mejor rendimiento en términos de fotocorriente.

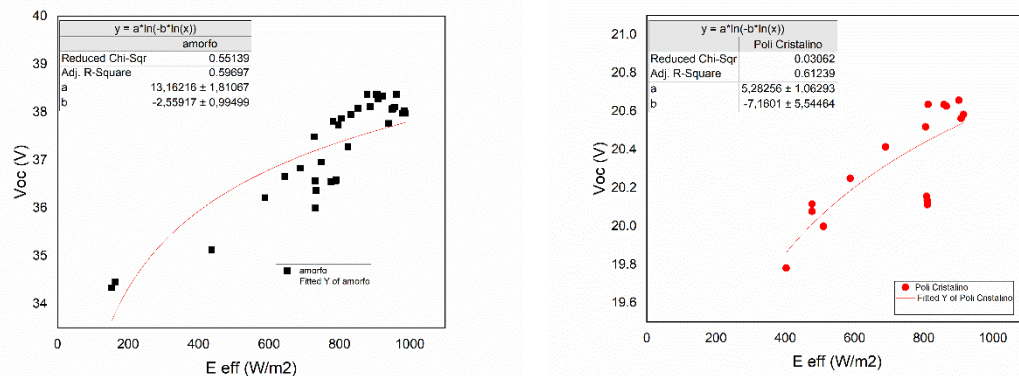


Figura 26 Representación del voltaje abierto en función de la irradiancia, donde el grafico de la izquierda representa los datos de silicio amorfo y mientras que el de la derecha son los datos obtenidos del silicio policristalino.

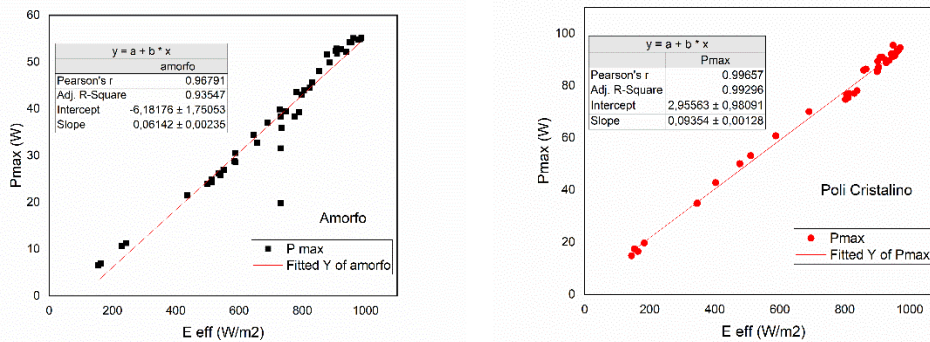


Figura 27 Representación de potencia máxima en función de la irradiancia, donde el grafico de la izquierda representa los datos de silicio amorfo; mientras que el de la derecha son los datos obtenidos del silicio policristalino.

Otra observación interesante fue que el aumento en la intensidad de la luz resultó en un cambio en voltaje de circuito abierto. Como se muestra en la Figura 26, los cambios más notables ocurrieron para la célula tipo amorfo, donde a 500 W/m² el voltaje de circuito abierto es de 37 V, mientras que, para el silicio policristalino el cambio del voltaje de circuito abierto no es considerable.

Al final lo más importante de un módulo fotovoltaico es el producto de la intensidad por la corriente que es lo que conocemos como potencia máxima. Si representamos la potencia máxima de ambos módulos frente a la irradiancia, claro que a misma iluminación los módulos de silicio policristalino obtienen mayor potencia, alrededor de 100W frente a 60W del módulo de silicio amorfo. Esto se debe a la cristalinidad del silicio policristalino.

8.1.3 Caracterización del módulo de silicio policristalino vs amorfo en función de la temperatura

Los datos ordenados se analizaron para valores de temperatura de 25,7, 33,3, 37,6, 39,9 y 40,5°C para el silicio amorfo, mientras que para el silicio policristalino las temperaturas 29,3, 32,2, 37,8 y 45,2 °C. Se observó que un aumento en la temperatura hizo que las curvas I-V en el silicio policristalino tuvieran un ligero desplazamiento hacia la izquierda (consecuente disminución en los voltajes de circuito abierto con corrientes de cortocircuito casi inalteradas). En la figura 28 se debe indicar que la variación de las curvas I-V, además del impacto del cambio de temperatura se debe sobre todo a la variación de irradiancia de una curva a otra, que impacta todavía más fuertemente a la generación de fotocorriente.

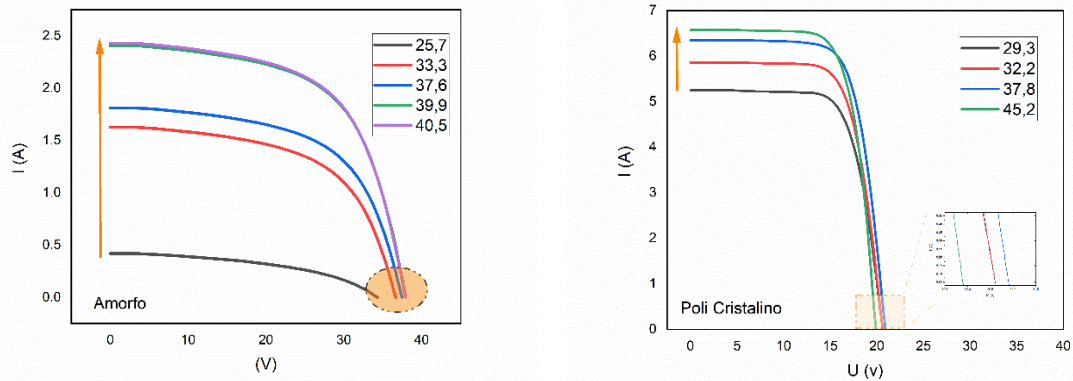


Figura 28 Representación de la intensidad de cortocircuito en función del voltaje para el silicio Amorfo graficado en la izquierda, la curva negra corresponde a 25,7 °, la roja 33, 3°, la azul 37,6, la verde 39,9 y la morada a 40,5°. y para el silicio policristalino a la derecha la curva negra 29,9°, roja 32,2, azul 37,8° y verde 45,2°.

Para medidas con una irradiancia igual, pero con distintas temperaturas de módulo (y ambientales), se podría separar la dependencia de la temperatura. Para ello se utilizará la representación de la matriz de potencias (Figura 29). Un aumento en la temperatura significó un aumento en la concentración intrínseca del portador que a su vez resultó en una disminución en el potencial incorporado de la célula. Esto último como reflejó de la disminución observada en los voltajes de circuito abierto. La Figura 28 muestra las curvas I-V para la tecnología de célula policristalina y amorfas para temperaturas variables. Se observó que la tasa de disminución de los voltajes de circuito abierto es diferente para cada tecnología de célula. Como se muestra en la Figura 28, el silicio policristalino exhibió disminución del voltaje de circuito abierto con la temperatura (45,2°C) en comparación con la de silicio amorfo que aumento con la temperatura (40,5°). Por lo tanto, la tecnología de silicio amorfo es más apropiada para lugares con grandes variaciones de temperatura, ya que el rendimiento de las células con tecnología es estable en tales condiciones en comparación con la tecnología de silicio policristalino. La **temperatura del módulo** está íntimamente relacionada con la temperatura ambiente y la irradiación.

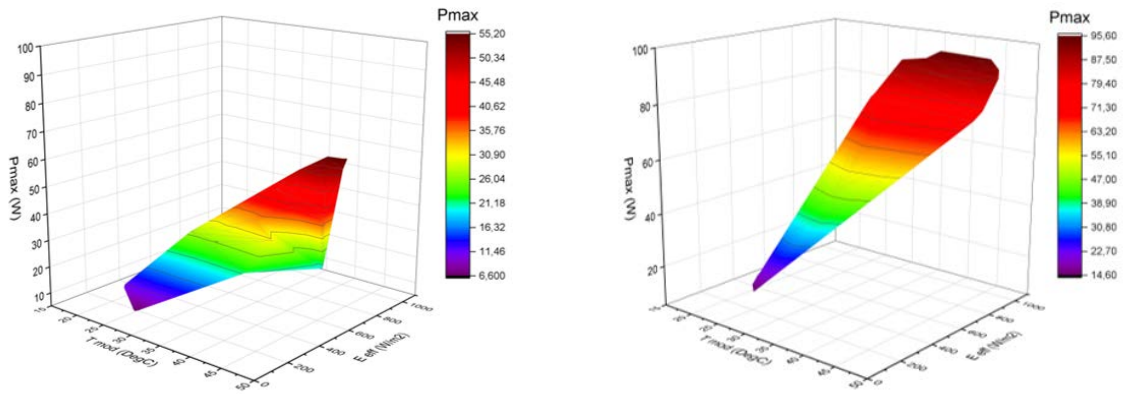


Figura 29 Representación de la matriz de potencias (power matrix). En el gráfico de la izquierda la figura corresponde al módulo de silicio Amorfo y el de la derecha al Policristalino.

Los parámetros eléctricos V_{oc} , I_{sc} y P_{max} se extrajeron de las curvas I-V y se analizaron. El enfoque principal está en el estudio de la potencia máxima en varias combinaciones de temperatura e irradiancia. La Figura 29 muestra los datos de P_{max} en un gráfico de superficie en función de la temperatura y la irradiancia. La variación de P_{max} en el rango medido es obviamente la más fuerte, como era de esperar. La variación general causada por la temperatura en el rango de 15 $^{\circ}C$ a 50 $^{\circ}C$ a una irradiancia de 0 a 1000 W/m^2 . Por esta razón, una gráfica de P_{max} , irradiancia en función de la temperatura puede ayudar a visualizar mejor el efecto de la temperatura en los módulos solares.

En las Figura 29 se muestran todas las curvas I-V medidas a desde 164-962 W/m^2 para todas las temperaturas en el rango de 15 $^{\circ}C$ a 55 $^{\circ}C$. La variación con la temperatura de V_{oc} e I_{sc} extraída de las curvas IV se presenta en las figuras anteriores. Se observa su dependencia lineal con la temperatura. También podemos observar que debido a que el silicio amorfo tiene una mejor absorción en todo el espectro, también tiene una mayor variación en la temperatura del módulo mientras que para el silicio policristalino es directamente proporcional a la irradiancia.

9. Conclusión

Se realizaron curvas IV para los módulos fotovoltaicos, de donde se obtuvieron los parámetros eléctricos. Donde para la misma irradiancia ($960 \pm 2 \text{ W/m}^2$) se obtuvieron los valores de I_{sc} 2,38 A para el módulo de silicio amorfo frente a 6,48 A para las mismas condiciones en el módulo del silicio policristalino, el voltaje de corriente abierta (Voc) se adquieren valores 38,36 V para el amorfo frente al policristalino donde solo se obtuvieron 19,85 V.

Se construyo la matriz de potencias $P(G, T_m)$ -> potencia en función de irradiancia y temperatura del módulo, donde se estudió el efecto que ejerce la temperatura en ambas tecnologías siendo el silicio amorfo es más apropiada para lugares con grandes variaciones de temperatura, ya que el rendimiento de las células con tecnología es estable en tales condiciones en comparación con la tecnología de silicio policristalino. Se observa la dependencia lineal con la temperatura y que el silicio amorfo tiene una mejor absorción en todo el espectro, también tiene una mayor variación en la temperatura del módulo mientras que para el silicio policristalino es directamente proporcional con la irradiancia.

Se realizaron curvas IV características de los paneles tanto del silicio amorfo como del silicio policristalinos a diferentes valores de irradiancia, obteniendo los mejores resultados para el silicio policristalinos en términos de fotocorriente.

10. Bibliografía

1. Peter Würfel. *Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts, 2nd Edition* | Wiley.
2. IEA. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020 – Analysis. IEA. Accessed October 8, 2021. <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>
3. REE. Informe del Sistema Eléctrico Español 2020. :100.
4. Cruz SD la. El precio de la luz pulveriza todos los récords y alcanzará el martes su máximo histórico con 545 euros/MWh. La Razón. Published March 7, 2022. Accessed March 28, 2022. <https://www.larazon.es/economia/20220307/ghf3igkl2bc5dkuuwa7fk3z6ve.html>
5. IGN. *España a Través de Los Mapas*. Accessed October 8, 2021. https://www.ign.es/espmap/mapas_clima_bach/Mapa_clima_11.htm
6. Markvart T. *Solar Electricity*. John Wiley & Sons; 2000.
7. Datos Macro. *España - Consumo de electricidad 2020*.
8. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. Accessed January 2, 2022. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html
9. Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart. Accessed January 2, 2022. <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html>
10. Medina YC. *Introducción a la termodinámica*. Editorial Universitaria (Cuba); 2020.
11. This Month in Physics History. Accessed October 8, 2021. <http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>
12. SelvakumarPitchaiyaaMuthukumarasamyNatarajanaAgilanSanthanamaVijayshankarAsokanbAkilaYuvapragasamaVenkatramanMadurai RamakrishnanaSubramaniam E.PalanisamycSenthilarasuSundaramdDhayalanVelauthapillaie. A review on the classification of organic/inorganic/carbonaceous hole transporting materials for perovskite solar cell application - ScienceDirect. *Arabian Journal of Chemistry*. 13. Accessed October 8, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535218301333>
13. Tao M. Inorganic Photovoltaic Solar Cells: Silicon and Beyond. *The Electrochemical Society Interface*. 2008;17(4):30.
14. Wilson GM, Al-Jassim M, Metzger WK, et al. The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020;53(49):493001.
15. Carlson DE, Wronski CR. Amorphous silicon solar cell. *Appl Phys Lett*. 1976;28(11):671-673. doi:10.1063/1.88617
16. Qarony W, Hossain MI, Hossain MK, et al. Efficient amorphous silicon solar cells: characterization, optimization, and optical loss analysis. *Results in Physics*. 2017;7:4287-4293.
17. Sharma S, Jain KK, Sharma A. Solar Cells: In Research and Applications—A Review. *Materials Sciences and Applications*. 2015;6(12):1145-1155. doi:10.4236/msa.2015.612113
18. Ruby DS, Zaidi S, Narayanan S, Yamanaka S, Balanga R. RIE-Texturing of Industrial Multicrystalline Silicon Solar Cells. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2005;127(1):146-149. doi:10.1115/1.1756926
19. Kittler M, Seifert W, Krüger O. Electrical Behaviour of Crystal Defects in Silicon Solar Cells. *Solid State Phenomena*. 2001;78-79:39-48. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.78-79.39
20. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power: Journal of Applied Physics: Vol 25, No 5. Accessed October 9, 2021. <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1721711>
21. Lotfi D, Hatem E. Phosphorus diffusion gettering process of multicrystalline silicon using a sacrificial porous silicon layer. *Nanoscale Research Letters*. 2012;7(1):424. doi:10.1186/1556-276X-7-424
22. M. Zeman. Lecture notes and slides from the Solar Cells course.

23. Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications | Wiley. Wiley.com. Accessed March 1, 2022. <https://www.wiley.com/en-us/Thin+Film+Solar+Cells%3A+Fabrication%2C+Characterization+and+Applications-p-9780470091272>
24. Jenny Nelson. *The Physics of Solar Cells*. Imperial College, UK Accessed March 3, 2022. <https://www.worldscientific.com/doi/epdf/10.1142/p276>
25. Powell null, Deane null. Improved defect-pool model for charged defects in amorphous silicon. *Phys Rev B Condens Matter*. 1993;48(15):10815-10827. doi:10.1103/physrevb.48.10815
26. Powell null, Deane null. Defect-pool model and the hydrogen density of states in hydrogenated amorphous silicon. *Phys Rev B Condens Matter*. 1996;53(15):10121-10132. doi:10.1103/physrevb.53.10121
27. Labrune M. Silicon surface passivation and epitaxial growth on c-Si by low temperature plasma processes for high efficiency solar cells. *undefined*. Published online 2011. Accessed March 7, 2022. <https://www.semanticscholar.org/paper/Silicon-surface-passivation-and-epitaxial-growth-on-Labrune/c140de7a769ff051718571fa978f67694bc33206>
28. Hossain M. *Enhancement of Light-Trapping in Single and Multi-Junction Thin Film Silicon Solar Cells on Periodic Textured Substrate*. 2013. doi:10.13140/RG.2.2.29273.67686
29. A silicon carbide-based highly transparent passivating contact for crystalline silicon solar cells approaching efficiencies of 24% | Nature Energy. Accessed March 4, 2022. <https://www.nature.com/articles/s41560-021-00806-9>
30. Peters M, Goldschmidt JC, Löper P, et al. Spectrally-Selective Photonic Structures for PV Applications. *Energies*. 2010;3(2):171-193. doi:10.3390/en3020171
31. Ziang X, Shifeng L, Laixiang Q, et al. Refractive index and extinction coefficient of CH₃NH₃PbI₃ studied by spectroscopic ellipsometry. *Opt Mater Express, OME*. 2015;5(1):29-43. doi:10.1364/OME.5.000029
32. Chen SH, Wang HW, Chang TW. Absorption coefficient modeling of microcrystalline silicon thin film using Maxwell-Garnett effective medium theory. *Opt Express, OE*. 2012;20(102):A197-A204. doi:10.1364/OE.20.00A197
33. Óscar Perpiñán Lamigueiro. *Energía Solar Fotovoltaica*. Accessed January 2, 2022. <https://oscarperpinan.github.io/esf/>
34. Green MA. Accuracy of analytical expressions for solar cell fill factors. *Solar Cells*. 1982;7(3):337-340. doi:10.1016/0379-6787(82)90057-6
35. How does temperature and irradiance affect I-V curves? | Solar FAQs. Seaward. Accessed March 8, 2022. <https://www.seaward.com/gb/support/solar/faqs/00797-how-does-temperature-and-irradiance-affect-i-v-curves/>
36. Furkan D, Mehmet Emin M. Critical Factors that Affecting Efficiency of Solar Cells. *Smart Grid and Renewable Energy*. 2010;2010. doi:10.4236/sgre.2010.11007
37. Efficient amorphous silicon solar cells: characterization, optimization, and optical loss analysis - ScienceDirect. Accessed October 9, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379717312123>
38. BrunSolar. Accessed October 10, 2021. <http://www.epssolar.es/brun/>
39. [Standard-Titel]. PV test instruments, IV curve tracers. Accessed October 10, 2021. https://www.pv-engineering.de/en/products/standard-titel?tt_products%5BbackPID%5D=231&tt_products%5Bcat%5D=1&tt_products%5Bproduct%5D=22&cHash=1f49f4655f5afec28612f6bbae55c4eb
40. Installation Of The Transfer Software Pvpmpm.disp - PV-Engineering PVPM 2540C User Manual [Page 18] | ManualsLib. Accessed October 10, 2021. <https://www.manualslib.com/manual/1226847/Pv-Engineering-Pvpmpm-2540c.html?page=18>
41. Microsoft Excel Spreadsheet Software | Microsoft 365. Accessed October 10, 2021. <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel>
42. OriginLab - Origin and OriginPro - Data Analysis and Graphing Software. Accessed October 10, 2021. <https://www.originlab.com/>
43. Álvarez-Láinez ML, Martínez-Tejada HV, Isaza FJ. *Nanotecnología: Fundamentos y aplicaciones*. Universidad de Antioquia; 2020.

