

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática Industrial



Trabajo Fin de Grado

Estudio de células solares flexibles de última generación:
Aplicaciones y limitaciones

Autor: Alejandro Javier de Palma Rodríguez

Tutor y cotutor (en su caso): Fernando Naranjo Vega y Susana
María Fernández Ruano

2023

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

**Grado en Ingeniería en Electrónica y Automática
Industrial**

Trabajo Fin de Grado
Estudio de células solares flexibles de última generación:
aplicaciones y limitaciones

Autor: Alejandro Javier de Palma Rodríguez

Tutor/es: Fernando Naranjo Vega y Susana María
Fernández Ruano

TRIBUNAL:

Presidente: Fº JAVIER MECA MECA

Vocal 1º: ALMUDENA LÓPEZ DORADO

Vocal 2º: FERNANDO B. NARANJO VEGA

FECHA: 10/07/2023

Agradecimientos

A mis padres, los únicos responsables de que haya llegado a donde he llegado, por haberme brindado siempre la oportunidad de hacer todo lo que he querido y lo que no.

A los amigos que he conocido en esta universidad, por haberme dado unos de los mejores años de mi vida, sin los que, literalmente, no habría conseguido esto.

Índice general

Agradecimientos.....	3
Índice de figuras	6
Índice de tablas.....	8
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Palabras clave.....	11
Introducción.....	12
1. Células solares. Tipos y principio de funcionamiento	15
1.1 Definición	15
1.2 Historia de las células solares.....	16
1.3 Principio de funcionamiento.....	17
1.4 Parámetros característicos de una célula solar.....	18
1.4.1 Curva I-V	18
1.4.2 Corriente de cortocircuito	19
1.4.3 Tensión a circuito abierto	20
1.4.4 Factor de llenado	21
1.4.5 Eficiencia	22
1.5 Tipos de células solares: generaciones.....	22
1.5.1 Primera generación: Silicio cristalino.....	22
1.5.2 Segunda generación: Película delgada.....	24
1.5.3 Tercera generación: células basadas en tecnologías orgánicas e innovadoras	25
2. Tecnología flexible.....	27
2.1 Substratos utilizados en la tecnología solar flexible	27
2.1.1 Metálicos: Acero inoxidable, aleación de aluminio, lámina de Ti.....	27
2.1.2 Cerámicos.....	28
2.1.3 Plásticos: PEN, PET, PC, PI.....	28
2.1.4 Desarrollo futuro	29
2.2 Propiedades requeridas por los substratos para la fabricación de células solares flexibles.....	30
2.2.1 Flexibilidad	30
2.2.2 Permeabilidad al vapor de agua y al oxígeno	31
2.2.3 Estabilidad térmica	32
2.2.4 Estabilidad medioambiental.....	32
2.2.5 Propiedades ópticas.....	33
2.3 Materiales absorbentes	34
2.3.1 a-Si:H.....	34

2.3.2	CIGS	36
2.3.3	Semiconductores orgánicos	37
2.4	Materiales de contacto	41
2.4.1	Óxido conductor transparente (TCO)	42
2.4.2	Láminas de metal fino	42
2.4.3	Nanocables metálicos	43
2.4.4	Nanotubos de carbono y grafenos	44
2.4.5	Polímeros conductores	45
2.5	Ventajas de las células solares flexibles	46
2.6	Inconvenientes de las células solares flexibles	46
2.7	Aplicaciones	47
3.	Caso práctico	50
3.1	Introducción	50
3.2	Simulación de célula con AZO	50
3.2.1	Obtención de datos	52
3.2.2	Cálculo de resultados	56
3.3	Análisis de limitaciones del dispositivo	63
3.3.1	Uso de bajas temperaturas por limitación del sustrato	63
3.3.2	Pérdidas ópticas del sustrato de plástico en comparación con el vidrio convencional	64
3.3.3	Baja estabilidad mecánica	66
4.	Conclusiones	67
	Bibliografía	69

Índice de figuras

Figura 1. Estructura de una célula solar [365].....	15
Figura 2. El primer panel fotovoltaico creado por Charles Fritts [366].....	16
Figura 3. Esquema de funcionamiento de la célula solar [14].....	18
Figura 4. Ejemplo Curva I-V de una célula solar [15].....	19
Figura 5. Curva I-V de una célula solar incidiendo en la corriente de cortocircuito [15]	19
Figura 6. Curva I-V de una célula solar incidiendo en la tensión a circuito abierto [15].....	20
Figura 7. Curva I-V con un FF alto [15].....	21
Figura 8. Curva I-V con un FF bajo [15].....	21
Figura 9. Célula de silicio monocristalino (izquierda) y policristalino (derecha)	23
Figura 10. Evolución de las eficiencias de las células de primera generación [19].....	24
Figura 11. Eficiencias de las células de segunda generación [19].....	25
Figura 12. Tabla cronológica de los sustratos más utilizados a lo largo del tiempo [2].....	27
Figura 13. Resumen cualitativo de cinco propiedades esenciales de los tres tipos de sustratos. Acero inoxidable (izquierda), vidrio willow (medio) y poliimida (PI) incolora (derecha) [2].....	29
Figura 14. Curva tensión deformación de un material [27].....	30
Figura 15. Gráfico en el que se muestra la temperatura de transición vítrea en relación con la temperatura y a la rigidez de un material. [34].....	32
Figura 16. Comparativa de estructura molecular entre silicio cristalino (a) y silicio amorfo (b)	35
Figura 17. Célula solar basada en heterounión de silicio de la empresa Hanenergy [41].....	36
Figura 18. Estructura de una célula solar basada en CIGS [45].....	37
Figura 19. Estructura química de los semiconductores orgánicos más utilizados [25].....	38
Figura 20. Estructura química de los polímeros más utilizados para el desarrollo de células solares [46].....	39
Figura 21. Perovskita	40
Figura 22. Estructura de una célula solar [2].....	41
Figura 23. Estructura de nanotubo de pared única (a) y nano tubo de pared múltiple (b)[66].....	44
Figura 24 Comparación de propiedades físicas de distintos electrodos. [2].....	45
Figura 25. Paneles solares flexibles basados en a-Si:H.....	48
Figura 26. Dron Zephyr de la empresa AIRBUS [80].....	48
Figura 27. Protopipo de Toyota Prius Eléctrico [11]	49
Figura 28. Estructura del dispositivo sujeto a estudio.....	51
Figura 29. Eficiencia cuántica interna en función de la longitud de onda.....	53
Figura 30. Irradiancia en función de la longitud de onda.....	54

Figura 31. Transmisión de la capa de AZO 1 sobre PET en función de la longitud de onda.....	55
Figura 32. Transmisión de la capa de AZO 2 sobre PET en función de la longitud de onda.....	55
Figura 33. Transmisión de la capa de AZO sobre vidrio en función de la longitud de onda	56
Figura 34. Densidad de corriente del AZO 1 sobre PET en función de la longitud de onda	61
Figura 35. Densidad de corriente del AZO 2 sobre PET en función de la longitud de onda	61
Figura 36. Densidad de corriente del AZO sobre vidrio en función de la longitud de onda	62
Figura 37. Espectro de transmitancia del PET en función de la longitud de onda.....	64
Figura 38. Espectro de transmitancia del PEN en función de la longitud de onda.	65
Figura 39. Espectro de transmitancia del vidrio Corning en función de la longitud de onda.....	65

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de densidades de corriente de las capas simuladas	58
Tabla 2. Comparación de resultados de densidad de corriente.....	62

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un estado del arte de las células solares flexibles y un análisis de sus aplicaciones y limitaciones.

El proyecto se divide en tres capítulos principales. En el capítulo 1, se realiza un estudio sobre la célula solar como dispositivo, historia de las células solares, tipos, estructura, parámetros. El capítulo 2, engloba todo lo referente a los distintos tipos de elementos que puede tener una célula flexible y a como estos influyen en su funcionamiento como dispositivo. En el capítulo 3, se realiza un estudio de células flexibles reales, concretamente analizando mediante simulaciones en MATLAB la densidad de corriente de 3 capas de contacto distintas, con datos proporcionados por el CIEMAT.

Abstract

The present work aims to provide a state of the art of flexible solar cells and an analysis of their applications and limitations.

The project is divided into three main chapters. In chapter 1, a study is made on the solar cell as a device, history of solar cells, types, structure, parameters. Chapter 2 covers everything related to the different types of elements that a flexible cell can have and how they influence its performance as a device. In chapter 3, a study of real flexible cells is carried out, specifically analyzing by means of MATLAB simulations the current density of 3 different contact layers, with data provided by CIEMAT.

Palabras clave

Célula solar, célula solar flexible, flexibilidad, eficiencia, método de producción, silicio, substrato, material absorbente, material de contacto, propiedades ópticas, conductividad, durabilidad, rentabilidad, transmitancia, PET, PEN, AZO.

Introducción

La generación energética de hoy en día esta principalmente dominada por el uso de los combustibles fósiles, tales como el gas, el petróleo y el carbón, los cuales son los responsables del 37% de la generación eléctrica en la Unión Europea en 2021 [1]. Este dato es especialmente alarmante, de cara a las nuevas políticas medio ambientales que se están poniendo en marcha en la actualidad que se marcan el objetivo de neutralidad en 2050 [2].

El cambio climático es un hecho que no se puede obviar, y el uso de estos combustibles le afecta directamente debido a la contaminación, las emisiones de CO₂ y la destrucción de nuestro entorno. Es por ello por lo que numerosas naciones han empezado a firmar acuerdos para frenar esta situación, tales como el Acuerdo de Paris de 2015 [3], el Real Decreto 376/2022 [4] por el que se regulan los criterios de sostenibilidad y de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero o la Ley 7/2022 [5] sobre residuos y suelos contaminados. Nos encontramos en un punto de transición energética, en el que los países de la unión europea han acordado cumplir una serie de objetivos tales como un uso entorno al 32% de generación renovable o una reducción del 40% de las emisiones de CO₂ [6].

Con todos estos precedentes, el desarrollo y utilización de energías renovables se ha convertido en el punto clave para proteger el medio ambiente de cara a las generaciones venideras. Las fuentes de energía renovable, tales como el sol, el viento, las mareas o el calor geotérmico, tienen un enorme potencial para desbancar a las a los combustibles convencionales en el futuro. Es por esto por lo que se ha convertido en necesidad el desarrollo de sistemas eficientes capaces de extraer la energía de los recursos naturales anteriormente mencionados.

La luz solar ha sido identificada como la más limpia y prometedora de las fuentes naturales, y las células solares han sido el objeto de investigación principal para el desarrollo de estas tecnologías. Gracias a esto el precio de estos dispositivos se ha reducido considerablemente, desde 100\$/W en 1975 hasta alrededor de 0,3\$/W [7] en 2021. Numerosos países han instalado ya grandes plantas fotovoltaicas, como el parque solar de Bhadla en India, construida en 2020, con una capacidad de 2245MW, o la

localizada en Abu Dhabi, que cuenta con 3,2 millones de paneles solares y una potencia instalada de 1177MW.

La generación fotovoltaica está basada en el funcionamiento de las células solares. Una célula solar es un dispositivo capaz de transformar la energía de la luz en electricidad gracias al denominado efecto fotoeléctrico [8]. Estos dispositivos suelen estar formados por materiales semiconductores, tales como el silicio. Cuando los fotones provenientes de la luz solar inciden en estos materiales, se produce la liberación de electrones desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, lo que genera una corriente eléctrica, que se extrae para obtener electricidad.

Desde los años 70 se ha incidido principalmente en el uso y el estudio de células y paneles fabricados sobre un sustrato rígido de silicio (en su mayor parte silicio monocristalino). Sin embargo, estas células se rompen con facilidad, y es por ello por lo que deben protegerse con metales y carcasas de vidrio. El salto hacia un dispositivo que sea flexible implica numerosas ventajas, puesto que están fabricados con capas mucho más finas, pueden flexionarse, normalmente hasta un ángulo de 30°, y seguir manteniendo su funcionalidad. Esta alternativa presenta un gran potencial debido a su ligereza, lo que favorece su desplazamiento a cualquier lugar, a su maleabilidad y a la capacidad que tienen estas células de adaptarse a la superficie en la que se instalan, así como el adquirir el ángulo que más les convenga para conseguir el mayor rendimiento. Incluso, gracias a su diseño, pueden funcionar en superficies donde se produzcan vibraciones sin que se dañe su estructura. Sin embargo, el mayor obstáculo que presentan es que son mucho menos eficientes que los dispositivos rígidos [1]. Como ejemplo, los paneles de células solares rígidas actuales tienen una eficiencia media entre el 16% y el 22,2% [9], dependiendo de la tecnología que utilizan, mientras que los flexibles de película delgada rondan entre el 7-19,4% [10]. Esto significa que sería necesario colocar un número mayor de paneles flexibles para producir la misma cantidad que un panel rígido. Debido al enorme interés que despiertan estas tecnologías flexibles, ideales para aplicaciones en pequeña escala, en este trabajo se estudiarán las células solares en lámina delgada fabricadas sobre sustrato flexible

Gracias al rápido avance durante los últimos años en estos nuevos materiales, se espera que los paneles de células solares flexibles sean comercializados para su uso en embarcaciones, choches, caravanas y autoconsumo de campings, entre otras aplicaciones. Actualmente esta tecnología representa el 25% [2] del mercado total de generación fotoeléctrica, y no hay duda de que en los años venideros estará integrada en

muchos de nuestros dispositivos electrónicos móviles, tales como teléfonos, bicicletas y coches eléctricos, ordenadores portátiles etc.

En concreto, ciertas compañías automovilísticas han comenzado a implementar esta tecnología en sus vehículos eléctricos, como por ejemplo un Toyota Prius que ha añadido un sistema de células flexibles en el techo del vehículo [11].

El material utilizado en la fabricación de estos dispositivos flexibles juega un papel crucial en la conversión energética. En este trabajo se incidirá en el estudio de sus características y como afecta a la eficiencia de las células.

1. Células solares. Tipos y principio de funcionamiento

1.1 Definición

Las células solares son dispositivos que permiten obtener electricidad a partir de la energía solar gracias al efecto fotoeléctrico. Están compuestas por materiales semiconductores, como el Silicio, que reaccionan a la luz, produciendo una corriente eléctrica.

Cuando la luz procedente del sol incide sobre una célula solar fotovoltaica, los fotones excitan los electrones del material semiconductor, los cuales se mueven hacia el exterior del dispositivo y pueden ser capturados para generar electricidad.

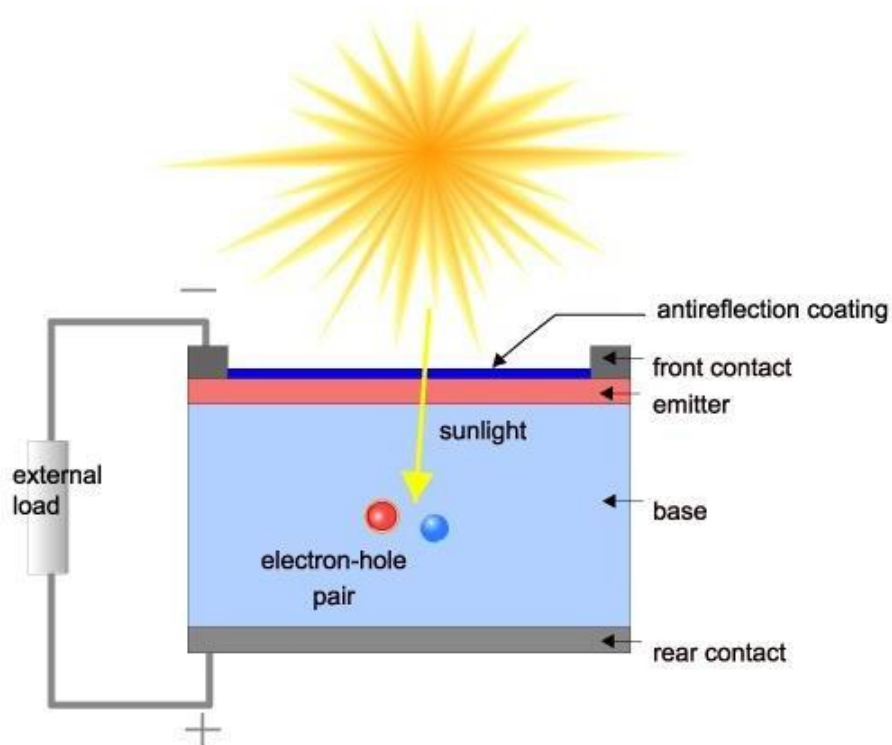


Figura 1. Estructura de una célula solar [365]

1.2 Historia de las células solares

La historia de estos dispositivos comienza en 1839, año en el que el científico francés Edmond Becquerel descubrió que la luz podía aumentar la generación eléctrica si se colocaban dos electrodos metálicos en una solución conductora. Nombró a este fenómeno como “efecto fotovoltaico”.

En 1873 el ingeniero inglés Willoughby Smith descubrió que el selenio se vuelve eléctricamente conductor cuando absorbe luz. Tres años después, William Grylls Adams y Richard Evans Day determinaron que el Selenio generaba electricidad al exponerse a la luz solar, sin calentarse en exceso. Estos hallazgos dieron conocimiento de la facilidad de absorber y mantener la energía del sol.

La primera célula solar fue producida en el año 1883 por el neoyorquino Charles Fritts. Este dispositivo estaba formado por selenio y una fina capa de oro, y presentaba una eficiencia de conversión de energía del 1-2%.



Figura 2. El primer panel fotovoltaico creado por Charles Fritts [366]

Hacia 1953 los físicos Daryl Chapin, Calvin Fuller y Gerald Pearson descubrieron que el silicio es más eficiente que el selenio, lo que permitió desarrollar una célula solar con un 6% de eficiencia. En 1956, Western Electric comenzó a vender licencias comerciales para sus dispositivos fotovoltaicos, pero los costes prohibitivos de las células solares de silicio impidieron que se comercializasen a gran escala [13].

Conforme el precio del petróleo empezó a incrementarse en la década de los 70, la demanda de energía aumentó. Fue entonces cuando la empresa Exxon Corporation financió la investigación de células solares para obtener dispositivos basados en el

silicio, con materiales más baratos y de calidad inferior. Los costes pasaron de 100\$/W a 20-40\$/W.

En la década de 1980 se produjo un gran avance con la invención de la célula solar de lámina delgada, fabricada con materiales como el telurio de cadmio y sulfuro de cobre.

Entre las décadas de 1990 y 2000 la producción y eficiencia de estos dispositivos siguió aumentando, llegando a utilizarse para cubrir parte de la demanda eléctrica de domicilios y empresas.

Actualmente las células solares se consideran una de las tecnologías más prometedoras para la producción energética proveniente de energías renovables. Las investigaciones, enfocadas principalmente en el desarrollo de nuevos materiales absorbentes amigables con el medio ambiente y libres de materias críticas para la célula solar, continúan mejorando su eficiencia y su coste de producción, lo que convierte a este sector en una alternativa competitiva con respecto a los combustibles fósiles.

1.3 Principio de funcionamiento

El funcionamiento de una célula fotovoltaica está estrechamente relacionado con los materiales que la componen. Estos dispositivos están formados por dos capas de semiconductor de comportamiento eléctrico opuesto. La capa negativa o semiconductor N consiste en un semiconductor que ha sido modificado, introduciendo impurezas, para que presente un exceso de electrones. La capa positiva o semiconductor P, por el contrario, se modifica para que presente exceso de “huecos” o de ausencia de electrones. Al incidir la luz en la unión entre ambos semiconductores (unión P/N) se originan tanto electrones como huecos, los cuales son repelidos hacia la región P o N respectivamente gracias al campo eléctrico interno presente en la unión. Esto provocará un aumento de la diferencia de potencial entre ambas capas, de tal manera que, si conectamos una carga entre las dos regiones, los electrones de la capa P viajarán a través de la unión hacia el lado N y viceversa, generándose una corriente eléctrica de arrastre (frente a la de difusión que aparece cuando la unión trabaja en directa).

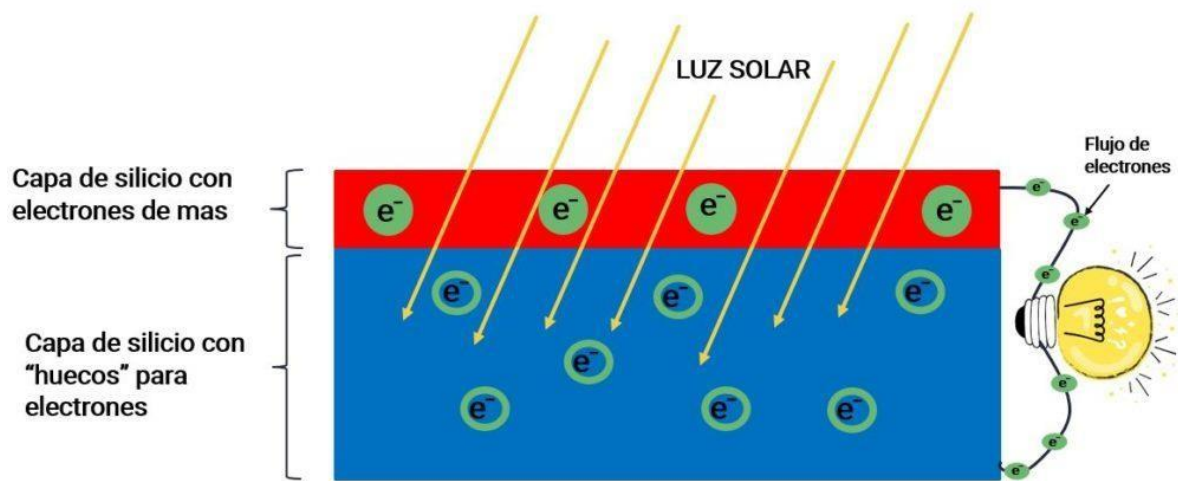


Figura 3. Esquema de funcionamiento de la célula solar [14]

1.4 Parámetros característicos de una célula solar

A la hora de analizar y comparar unas células solares con otras, las hojas de características de estos dispositivos nos dan información de una serie de parámetros que describen su funcionamiento:

1.4.1 Curva I-V

La curva intensidad-voltaje (I-V) es un gráfico que representa la potencia producida por una célula solar en función de dos parámetros que explicaremos a continuación, la corriente de cortocircuito y la tensión a circuito abierto. Los datos de esta gráfica están ligados a unas determinadas condiciones ambientales, como la temperatura ambiente y la radiación solar incidente:

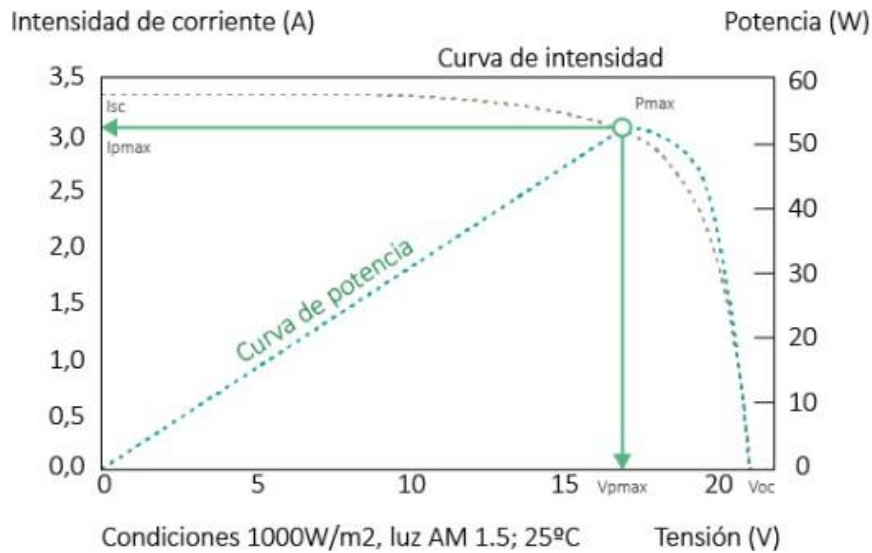


Figura 4. Ejemplo Curva I-V de una célula solar [15]

1.4.2 Corriente de cortocircuito

La corriente de cortocircuito (I_{sc}) es la corriente que circula a través de la célula solar cuando la tensión entre el ánodo y el cátodo es cero (es decir, cuando el dispositivo se cortocircuita). La magnitud de esta corriente depende de la captación y generación de los portadores de carga inducidos por la luz. En el caso de una célula solar ideal, con la mínimas pérdidas posibles, la corriente inducida por la luz y la corriente de cortocircuito deberían ser idénticas. Por lo tanto, como indica la figura 5, la I_{sc} es la corriente máxima que se puede obtener en una célula solar [15].

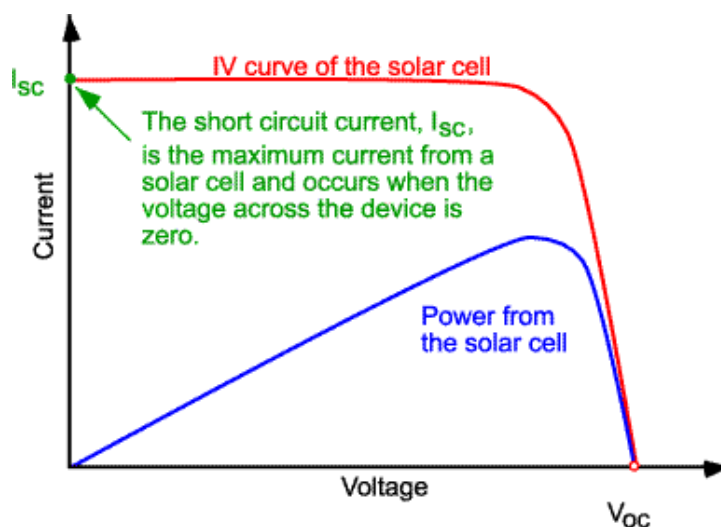


Figura 5. Curva I-V de una célula solar incidiendo en la corriente de cortocircuito [15]

La corriente de cortocircuito de una célula solar depende de una serie de factores:

- El número de fotones: determinará la potencia de la luz incidente en la célula. La corriente de cortocircuito es directamente proporcional a la intensidad de la luz.
- El espectro de la luz incidente
- El área de la célula solar: normalmente se sustituye el dato del área por el de la densidad de corriente de cortocircuito J_{sc} (mA/cm²).
- Las propiedades ópticas: absorción y reflexión principalmente.

1.4.3 Tensión a circuito abierto

La tensión a circuito abierto (V_{oc}) se define como la tensión máxima que puede producir la célula cuando la corriente que circula por ella es nula.

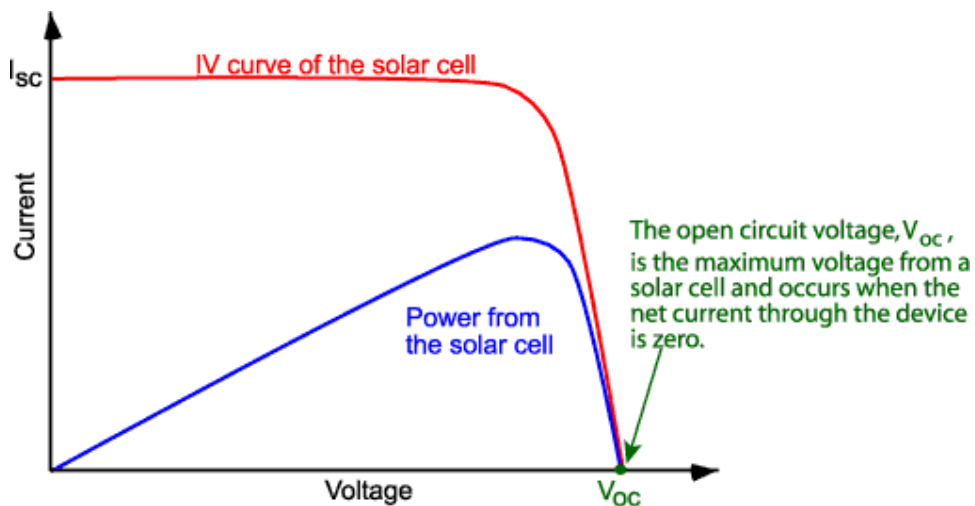


Figura 6. Curva I-V de una célula solar incidiendo en la tensión a circuito abierto [15]

Como se observa en la figura 6, la I_{sc} y la V_{oc} corresponden a los valores máximos de corriente y tensión de la célula, pero en ambos casos la potencia será nula por la ley de ohm:

$$P = I \cdot V$$

La tensión en circuito abierto depende de factores como la corriente de saturación de la célula y la corriente generada debido a la luz.

1.4.4 Factor de llenado

El factor de llenado FF (Fill Factor) es un parámetro que define la potencia máxima de funcionamiento de la célula solar, en función de la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto. El factor de llenado se define como la relación entre la potencia máxima y la I_{sc} y V_{oc} . Gráficamente, representa el área máxima del rectángulo que se ajusta a la curva I-V.

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

A continuación, en las figuras 7 y 8, se representa la corriente producida en la células (línea roja) y la potencia (línea azul), como función de la tensión.

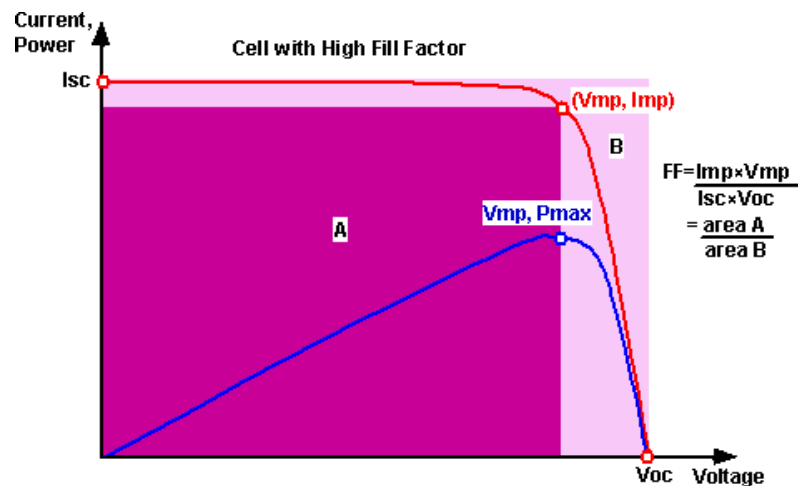


Figura 7. Curva I-V con un FF alto [15]

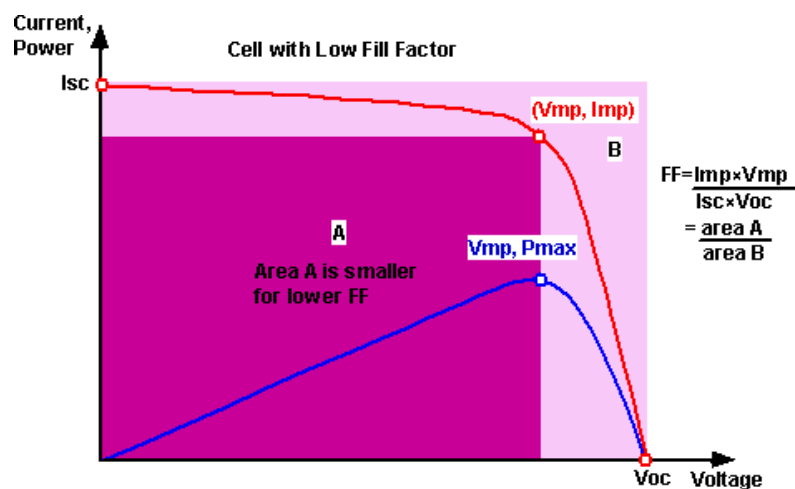


Figura 8. Curva I-V con un FF bajo [15]

A mayor factor de llenado, mayor es el área que se ajusta a la curva I-V, y por tanto el punto de potencia máxima (V_{mp}, I_{mp}) de la célula es mayor.

1.4.5 Eficiencia

La eficiencia es el parámetro más comúnmente utilizado para determinar el rendimiento de una célula solar. Se define como la relación entre la energía eléctrica producida por la célula y la energía solar absorbida. Este parámetro depende del espectro y la intensidad de luz incidente, y de la temperatura ambiente, estas condiciones deben estar cuidadosamente controladas si se quiere obtener un valor de eficiencia representativo. Por ejemplo, para medir el rendimiento de células solares en la Tierra, se realiza la medición a 25°C y un espectro AM1.5. Si las células estuviesen destinadas para uso espacial, se mediría con un espectro AM0 [16].

La eficiencia de una célula solar se obtiene a partir de los parámetros analizados anteriormente según la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}}$$

1.5 Tipos de células solares: generaciones

Hoy en día existe una gran variedad de células solares basadas en distintos tipos de materiales y distintas tecnologías, que se pueden agrupar en tres grandes grupos o generaciones: células de silicio cristalino, de película delgada y células basadas en tecnologías emergentes.

1.5.1 Primera generación: Silicio cristalino

Esta generación representa cerca del 95% [17] del mercado fotovoltaico global. Están formadas a partir de placas de silicio cristalino cortadas en láminas delgadas. En general, estos dispositivos son los más eficientes. Sin embargo, presentan problemas bajo altas temperaturas.

Existen dos tipos de células de silicio cristalino:

- **Células monocristalinas**

Estos dispositivos presentan eficiencias de hasta un 24% [18], y presentan una durabilidad de alrededor de 25 años, requiriendo un mantenimiento muy bajo. Sin embargo, producir grandes superficies de estos cristales eleva considerablemente el coste de producción.

- **Células policristalinas**

Se originan enfriando y fragmentando cristales de silicio de mayor tamaño para obtener cristales individuales más pequeños. Esta tecnología es mucho más barata que la monocristalina debido a que sus condiciones de fabricación son menos restrictivas, requieren un menor consumo energético puesto que no es necesario que el material sea de tan elevada calidad y presenta una resistencia al calor ligeramente menor. Sin embargo, su alta densidad de defectos en las capas policristalinas no les permite alcanzar una eficiencia superior al 22% [18].

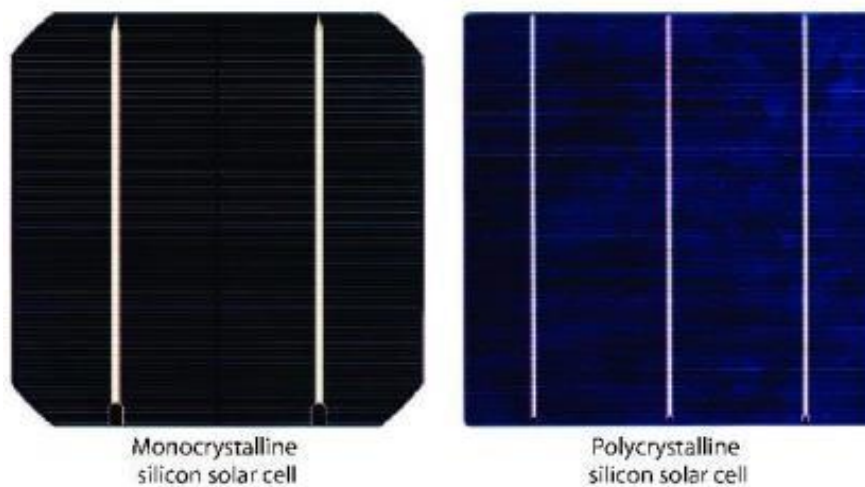


Figura 9. Célula de silicio monocristalino (izquierda) y policristalino (derecha)

La siguiente gráfica muestra la evolución de las principales tecnologías basadas en el silicio, como el silicio monocristalino, policristalino, silicio de capa delgada o heterounión de silicio. Como se observa en la figura 10, el silicio monocristalino es la tecnología que a día de hoy presenta la eficiencia máxima, con un 27,6%.

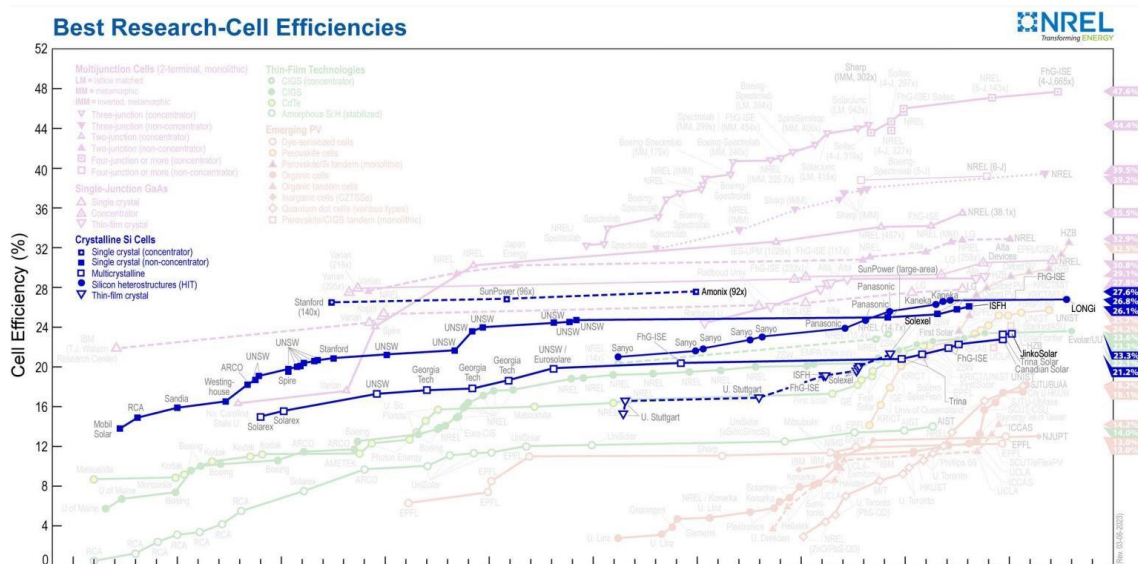


Figura 10. Evolución de las eficiencias de las células de primera generación [19]

1.5.2 Segunda generación: Película delgada

La segunda generación de células solares está basada en un método de producción epitaxial cuyo objetivo es crear láminas más delgadas. El principal propósito de esta tecnología es reducir los costes de producción respecto a la primera generación. Podemos dividir las células de película delgada en tres grupos:

- **Células solares de silicio amorfo**

Estos dispositivos se forman depositando silicio en forma de vapor sobre un sustrato de plástico, vidrio o acero inoxidable. A diferencia de las células monocristalinas y policristalinas, no presentan celdas, sino una estructura unificada. Su estructura presenta una organización atómica bastante irregular que favorece la absorción de luz. Una variante de este material denominado silicio amorfo hidrogenado, puede alcanzar eficiencias alrededor del 24% [18].

- **Células solares de telururo de cadmio**

Estas células están basadas en las uniones P/N descritas anteriormente. Una capa N formada por sulfato de cadmio (CdS) y una capa P formada por telururo de cadmio (CdTe). Actualmente esta tecnología alcanza eficiencias alrededor del 22% [18] y es la más comercializada después del silicio. Sin embargo, debido a la toxicidad del cadmio y la poca abundancia de telurio, estos dispositivos se encarecen notablemente.

- **Células solares CIGS**

Esta tecnología está basada en uniones P/N compuestas por cobre-indio-galio-selenio (de ahí su nombre CIGS). Alcanzan eficiencias cercanas al 20% [18], sin embargo, presentan muchos problemas de reproducibilidad.

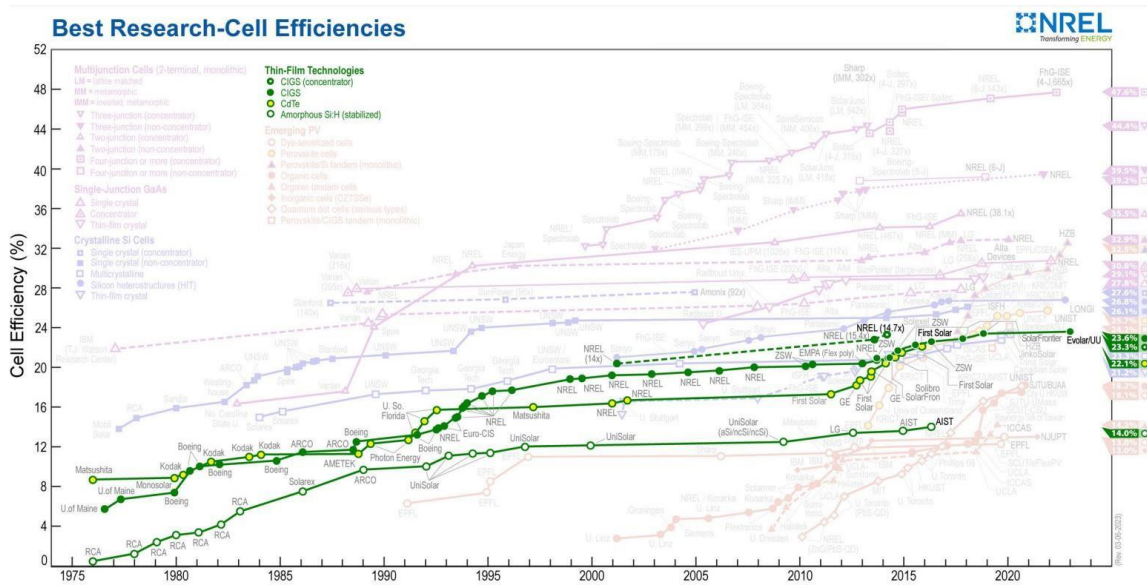


Figura 11. Eficiencias de las células de segunda generación [19]

1.5.3 Tercera generación: células basadas en tecnologías orgánicas e innovadoras

La tercera generación engloba una serie de tecnologías de células solares que se encuentran aún en diferentes fases de desarrollo y producción, que no presentan la tradicional unión P/N y que buscan desbancar al silicio en cuanto a costes de producción y eficiencia de conversión energética. Algunos ejemplos de tecnologías de esta generación son los dispositivos tándem, las células de perovskita, las células de puntos cuánticos o los nanotubos de carbono [20], las cuales pueden llegar a superar la eficiencia del silicio (figura 6).

Los análisis teóricos de este tipo de tecnologías apuntan a que podrían tener eficiencias de entre el 30% y el 60% [21], aunque todavía enfrentan desafíos en términos de estabilidad a largo plazo y costo.

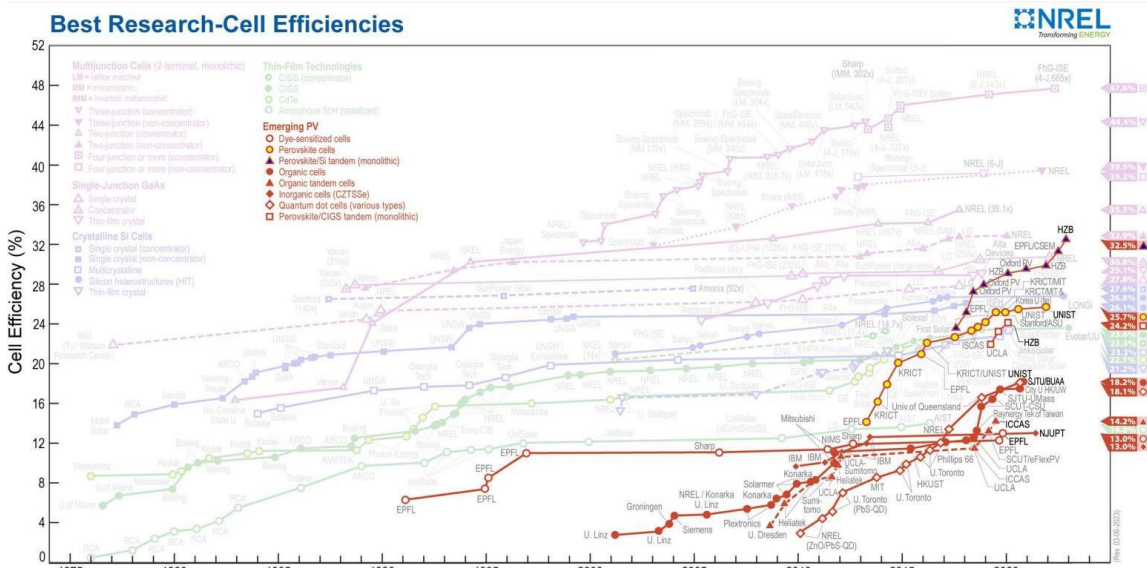


Figura 6. Eficiencias de las células de tercera generación [19]

2. Tecnología flexible

Desde los años 70, el mercado de la tecnología fotovoltaica ha estado orientado al desarrollo de las células solares fabricadas sobre silicio rígido. Aunque se han obtenido grandes avances con este material, son dispositivos frágiles que suelen necesitar protecciones como carcasas de metal o vidrio. La utilización de materiales flexibles y maleables permite obtener células solares ligeras que presentan un gran abanico de posibilidades de aplicación, como coches eléctricos, satélites o aeronaves no tripuladas [2], y tiene el potencial de revolucionar la industria solar.

2.1 Substratos utilizados en la tecnología solar flexible

Los substratos flexibles son uno de los pilares fundamentales en la fabricación de las células solares flexibles. Los sustratos utilizados dependerán del tipo de dispositivo solar y de las propiedades requeridas para su aplicación específica. Se categorizan principalmente en metálicos, cerámicos y plásticos. En la tabla mostrada en la figura 12 podemos observar la evolución cronológica de los sustratos más utilizados.

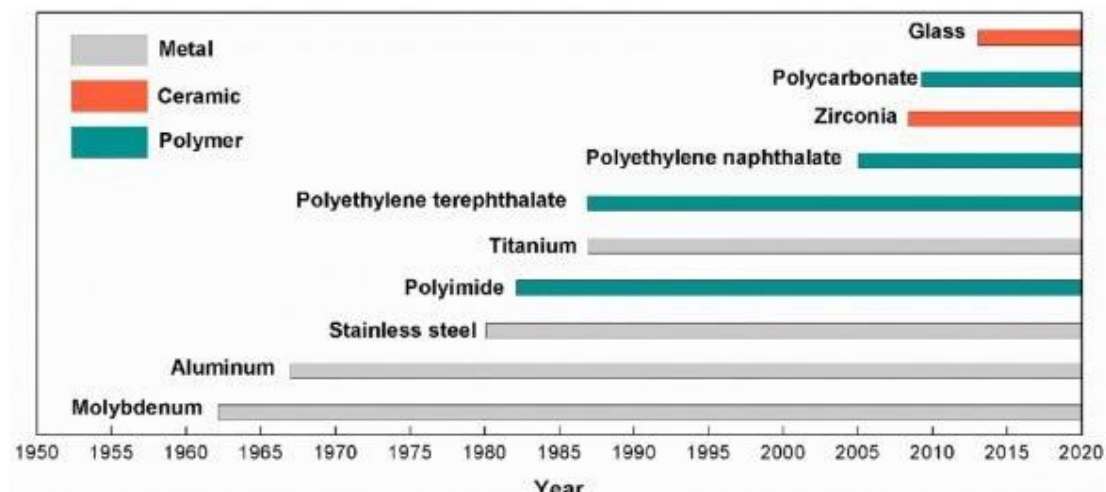


Figura 12. Tabla cronológica de los substratos más utilizados a lo largo del tiempo [2]

2.1.1 Metálicos: Acero inoxidable, aleación de aluminio, lámina de Ti

El sustrato de acero inoxidable se utiliza en la fabricación y comercialización de paneles solares flexibles, y de paneles flexibles de cobre, indio, galio y selenio (CIGS)

por empresas, como Global Solar y GSHK [1]. La lámina de aleación de aluminio también es utilizada para la comercialización de células flexibles. Un ejemplo es el producto desarrollado por la empresa Nanosolar, basado en un panel enrollable con sustrato de aleación de aluminio de bajo costo [2].

Otros materiales metálicos, como la lámina de titanio, se han utilizado en los últimos años para la fabricación de células solares de perovskita (PSC) [22]. Utilizando un ánodo de matriz de nanohilos de dióxido de titanio sobre un sustrato de lámina de Ti, se han obtenido dispositivos con una eficiencia del 13,07% [23]. Sin embargo, el titanio es un metal altamente costoso lo que hace que su comercialización sea poco rentable.

2.1.2 Cerámicos

El vidrio Willow es un tipo de sustrato de vidrio flexible desarrollado por la empresa Corning, destinado a la fabricación de células solares flexibles. En 2017, se consiguió desarrollar una célula de perovskita con un 18,1% [24] de eficiencia de conversión energética.

Otro ejemplo de sustrato cerámico es el sustrato de cinta de circonio, que ha dado lugar a células solares constituidas por cobre, zinc, estaño y sulfuro de selenio (CZTSSe) con una eficiencia del 11,5% [25].

2.1.3 Plásticos: PEN, PET, PC, PI

El sustrato de plástico (o polímeros) es uno de los más interesantes para la fabricación de células solares flexibles debido a su ligereza y su bajo coste. Los más utilizados son el tereftalato de polietileno (PET), PEN, policarbonato (PC) y poliimida (PI). Recientemente, H. Yoon desarrolló una célula solar de perovskita fabricada sobre un sustrato de naftalato de polietileno (PEN) con una eficiencia del 19,1% [26].

Sin embargo, el plástico presenta ciertos inconvenientes como su alta permeabilidad al oxígeno y a la humedad, lo que hace necesario que estos sustratos se recubran con óxidos de aluminio o de silicio. Además, presentan una baja estabilidad térmica lo que lo hace poco adecuado para células que utilicen materiales absorbentes que se fabriquen a altas temperaturas, como las células solares de CIGS. No obstante, es muy adecuado para dispositivos que se fabriquen y/o que trabajen a bajas temperaturas como las PSC.

A continuación, la figura 13 muestra un resumen de las cualidades más relevantes de los sustratos metálicos, plásticos y cerámicos nombrados anteriormente.

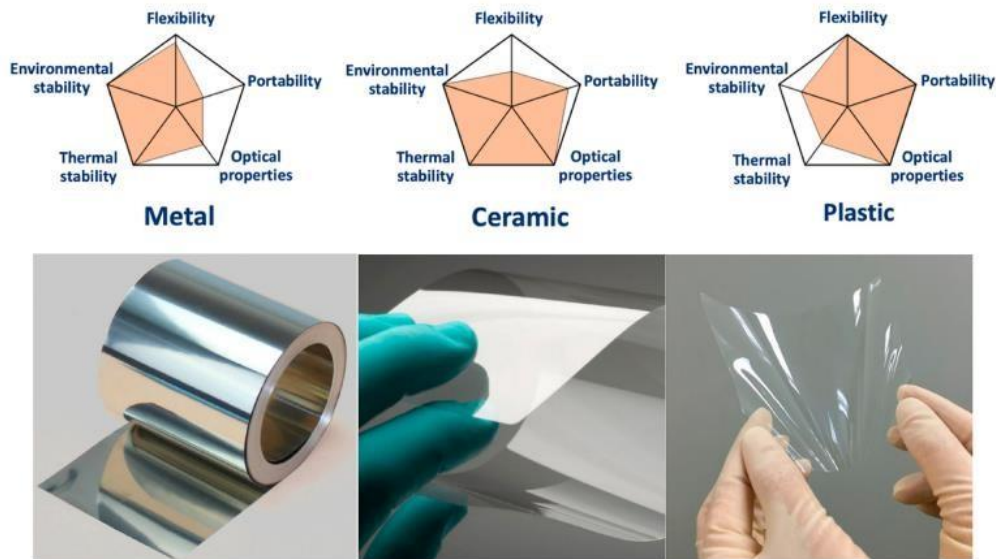


Figura 13. Resumen cualitativo de cinco propiedades esenciales de los tres tipos de sustratos. Acero inoxidable (izquierda), vidrio willow (medio) y poliimida (PI) incolora (derecha) [2]

2.1.4 Desarrollo futuro

De cara al futuro, el estudio de los sustratos basados en láminas metálicas seguirá en desarrollo, debido a que juega un papel crucial en la fabricación de células solares flexibles basadas en CIGS y en silicio, gracias a su excelente flexibilidad y estabilidad térmica. No obstante, las láminas metálicas usadas en la fabricación de las células suelen presentar elevadas rugosidades superficiales que hay que eliminar para que puedan ser compatibles con el resto de los componentes electrónicos del dispositivo. Por ello es necesario llevar a cabo un proceso de pulido de la superficie, lo que aumenta el coste de producción. Debido a esto muchas investigaciones actuales están orientadas a conseguir procesos de pulido de bajo coste [2].

Por otro lado, en los últimos años los sustratos cerámicos se han introducido en el mercado de la tecnología solar flexible [2]. Sin embargo, por su estructura, presentan menos flexibilidad que los sustratos metálicos o plásticos, por lo que las investigaciones están orientadas a conseguir una mayor flexibilidad reduciendo el grosor de las láminas o encontrando otras variedades cerámicas.

Los sustratos basados en plástico destacan por su flexibilidad y su bajo coste de producción. Su desarrollo está encaminado en aumentar la su eficiencia y vida útil. Sin

embargo, para que dispongan de una permeabilidad a la humedad y a los gases adecuada, deben recubrirse con revestimientos que encarecen el proceso de producción. En resumen, la investigación de los substratos flexibles está destinada a reducir el coste de producción de las células, obtener la máxima eficiencia posible y aumentar su durabilidad.

2.2 Propiedades requeridas por los substratos para la fabricación de células solares flexibles

2.2.1 Flexibilidad

La flexibilidad es la capacidad de un material de doblarse o deformarse sin llegar al límite elástico, es decir, sin que se produzcan roturas mecánicas o deformaciones plásticas permanentes.

La flexibilidad de los materiales viene definida por su curva tensión-deformación, la cual representa la relación entre la tensión aplicada a un material y la deformación que este sufre en consecuencia.

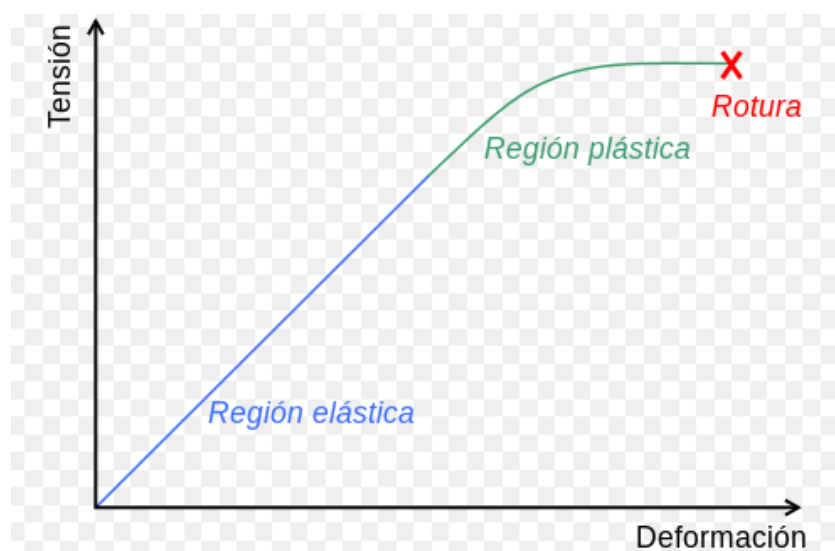


Figura 14. Curva tensión deformación de un material [27]

En la gráfica se pueden distinguir tres zonas diferenciadas:

- Región elástica: en esta zona el material se deforma, pero volverá a su posición inicial una vez cese la tensión que se está aplicando. El punto de tensión máxima que se puede aplicar dentro de esta región se conoce como límite elástico.

- Región plástica: una vez se llega a esta zona, la deformación del material es irreversible y no volverá a su estado original.
- Rotura: la estructura del material no puede soportar la tensión aplicada y se producen roturas mecánicas.

La flexibilidad juega un papel crucial en los materiales que conforman las células flexibles, ya que determinarán cuánto y de qué manera podrán deformarse estos dispositivos, de cara a las aplicaciones para las que se las quiera destinar.

2.2.2 Permeabilidad al vapor de agua y al oxígeno

La transmisión de vapor de agua y oxígeno (WVTR y OTR) son dos parámetros cruciales para determinar la permeabilidad al oxígeno y a la humedad de los materiales utilizados en las células solares flexibles. Los requerimientos de OTR y WVTR vendrán definidos por la aplicación para la que estén destinados los dispositivos. Por ejemplo, una célula solar flexible fabricada sobre un sustrato orgánico requiere una OTR de $10^{-3} \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y una WPTR de $10^{-3} \text{ gm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ [28,29].

Estas propiedades son inherentes al tipo de material utilizado. El metal y el vidrio, por ejemplo, presentan una permeabilidad muy baja debido a la densidad atómica que presenta su estructura. Sin embargo, los materiales plásticos presentan una permeabilidad mucho más elevada, debido a que la estructura atómica de estos materiales es menos densa y dejan muchos huecos en su interior. Las moléculas de agua y de oxígeno pueden moverse libremente por estos huecos y reaccionar con los materiales absorbentes del dispositivo [2].

Los materiales cerámicos actúan como fuertes barreras impidiendo la difusión de gases, humedad e incluso luz, como por ejemplo, el sustrato PET recubierto de óxido de silicio que presenta una WVTR de WPTR de $10^{-1} \text{ gm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y una OTR de $10^{-1} \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ [30]. Sin embargo, no son propiedades que permita su uso para células solares flexibles.

Generalmente, para obtener valores de permeabilidad óptimos para el empleo de células solares flexibles, se requiere un conjunto de barreras orgánicas/inorgánicas multicapa. Por ejemplo, un sustrato PET recubierto de 5 capas de AlOx-poliacrilato presenta una WVTR de $102 \text{ gm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ [31]. No obstante, la utilización de estos recubrimientos multicapa encarecen sustancialmente la fabricación de estos sustratos plásticos.

2.2.3 Estabilidad térmica

La estabilidad térmica es de importancia en los materiales de sustrato, ya que determinará si la fabricación de las células solares, utilizando ese sustrato, puede llevarse a cabo a altas temperaturas. Los materiales cerámicos y los metales son tolerantes a altas temperaturas. Por ejemplo, el acero inoxidable aguanta temperaturas de hasta 900°C y el vidrio de hasta 650°C [32].

Los plásticos, por el contrario, suelen tener una estabilidad térmica baja que viene limitada por su temperatura de transición vítrea (T_g). Esta temperatura marca el punto en el que un polímero amorfo pasa de un estado duro/vítreo a un estado blando/correoso, o viceversa [33]. La siguiente figura muestra cómo se relaciona el valor de esta temperatura con la rigidez del material.

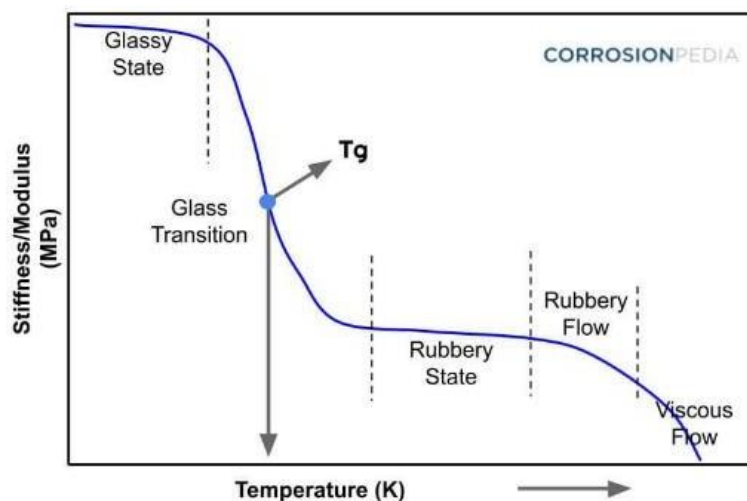


Figura 15. Gráfico en el que se muestra la temperatura de transición vítrea en relación con la temperatura y a la rigidez de un material. [34]

La mayoría de los materiales plásticos presentan una T_g baja, de unos 70°C para sustratos PET, 145°C [35] para sustratos PC, y hasta 300°C [36] para sustratos PI, lo que hace que estos últimos sean los más usados para la fabricación de módulos flexibles.

2.2.4 Estabilidad medioambiental

La estabilidad medioambiental del sustrato utilizado es otra propiedad a tener en cuenta en la tecnología flexible. Es necesario que los materiales del sustrato de la célula solar

sean capaces de resistir a posibles ataques químicos durante su funcionamiento al aire libre.

Los sustratos metálicos suelen tener una buena estabilidad medioambiental. El acero inoxidable, por ejemplo, es muy resistente a la corrosión de ácido-base. El titanio es un metal reactivo que se oxida fácilmente, esta capa de óxido protege al metal de sustancias químicas como los ácidos [37].

Los materiales cerámicos también se caracterizan por tener una estabilidad medioambiental adecuada. El cristal es resistente a ataques de agua, disoluciones saladas, ácidos y otras sustancias orgánicas, sin embargo, es vulnerable a contactos con ácidos fluorhídricos.

En general, los sustratos metálicos y cerámicos tienen un comportamiento óptimo en el funcionamiento de la célula solar al aire libre. No obstante, los sustratos basados en plásticos presentan una menor estabilidad medioambiental, debido a que los polímeros son muy susceptibles a la degradación, por la presencia del oxígeno. Además, los polímeros se vuelven quebradizos si se exponen a rayos ultravioleta, lo que hace necesario en ocasiones colocar filtros que protejan los sustratos plásticos.

2.2.5 Propiedades ópticas

Las propiedades ópticas del sustrato flexible son un factor a tener en cuenta, ya que determinarán como debe ser fabricada la estructura de la célula solar. Estos dispositivos suelen requerir sustratos que presenten una transmitancia y reflectancia a la luz elevadas.

Al hablar de transmitancia óptica, nos referimos al porcentaje de luz que atraviesa un cuerpo, en una determinada longitud de onda. Cuando la luz incide sobre un cuerpo, este absorberá parte de esa luz, parte la reflejará y otra fracción del haz de luz atravesará el cuerpo, según la transmitancia.

La reflectancia, por el contrario, es la característica por la cual un espectro de luz es reflejado por la superficie de un objeto.

En función del tipo de material utilizado, absorberá y reflejará un determinado porcentaje de luz. El acero inoxidable, por ejemplo, presenta una reflectancia del 60%-70% [38] en el espectro visible, sin embargo, su transmitancia en esta misma región es baja.

Los sustratos de vidrio, por el contrario, son ópticamente transparentes, y presentan una transmitancia de más del 90% [39]. Los materiales plásticos también pueden ser muy transparentes, el PC y el PET presentan una transmitancia de aproximadamente el 85% [82].

Las células solares fabricadas sobre sustratos metálicos requieren que el electrodo superior (que suele ser el del ánodo) sea transparente para que la luz pueda atravesarlo e incidir directamente en el material absorbente. Sin embargo, en los dispositivos basados en sustratos de plástico y vidrio, este electrodo puede ser transparente o reflectivo en función de la aplicación de la célula.

2.3 Materiales absorbentes

Los materiales absorbentes son fundamentales para el funcionamiento de las células solares, ya que son los encargados de capturar la energía de la luz y convertirla en electricidad. En el caso de las células solares fotovoltaicas, los materiales absorbentes son los responsables de la absorción de los fotones y la generación de pares electrón-hueco, que luego son separados y utilizados para generar corriente eléctrica.

Actualmente se están investigando una gran variedad de materiales, como a-Si:H, CIGS, polímeros y perovskitas con el objetivo de conseguir una eficiencia y un bajo coste que sean capaces de competir con las tecnologías solares rígidas.

2.3.1 a-Si:H

El silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) es un material semiconductor que se obtiene de una forma no cristalina (amorfa) del silicio, en la cual los átomos de este elemento se encuentran desordenados y forman enlaces con los átomos de hidrógeno. En la figura 14 podemos observar la diferencia entre una estructura molecular ordenada, y otra desordenada.

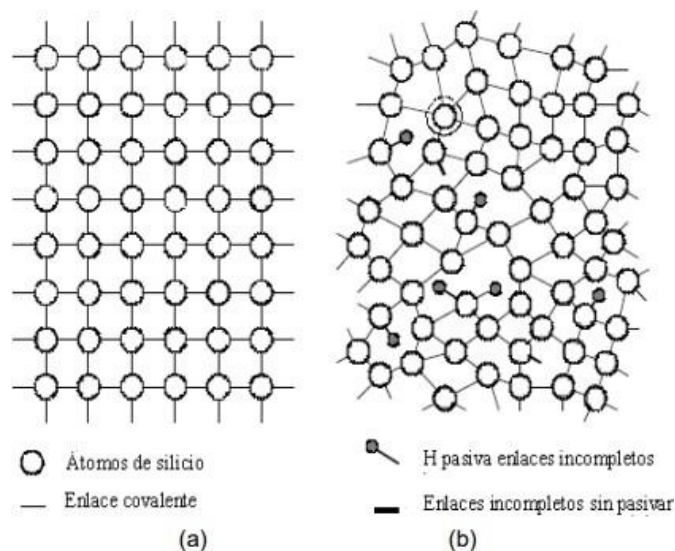


Figura 16. Comparativa de estructura molecular entre silicio cristalino (a) y silicio amorfo (b)

Una propiedad interesante de este material es su capacidad de absorber una amplia gama de longitudes de onda de la luz solar, lo que le confiere una alta eficiencia de conversión de energía solar a electricidad. Además, se puede depositar con espesores finos, por lo que las células solares flexibles que lo utilizan necesitan menos material que las de silicio cristalino, lo que abarata su producción. No obstante, el silicio amorfo hidrogenado presenta menos eficiencia que otros materiales absorbentes como el telururo de cadmio o el seleniuro de cobre, y su estabilidad a largo plazo aún se encuentra en investigación, lo que limita su aplicación en grandes proyectos solares [1]. Las últimas investigaciones de este material están orientadas al desarrollo de dispositivos multiunión para formar a-Si/a-SiGe/a-SiGe, los cuales presentan una estabilidad y eficiencia superior [40]. Del mismo modo, se está explorando también células con triple unión de capas de silicio amorfo hidrogenado, a-SiGe y silicio nanocristalino hidrogenado (n-Si:H).

Recientemente la empresa Hanenergy ha anunciado una célula solar de silicio de heterounión con una eficiencia del 25,11% [41]. La figura 15 muestra un ejemplo de estos dispositivos.

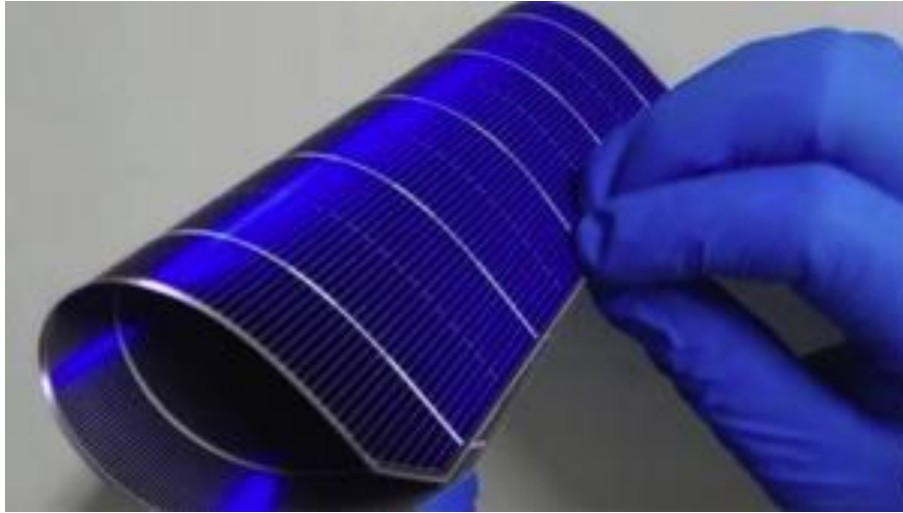


Figura 17. Célula solar basada en heterounión de silicio de la empresa Hanenergy [41]

2.3.2 CIGS

Los materiales “CIGS”, cuyo nombre es debido a su composición, cobre(Cu), indio(In), galio(Ga) y selenio(Se), presentan menos defectos que el silicio amorfo hidrogenado dentro de una película sólida, y son muy interesantes para la aplicación fotovoltaica flexible.

El CuInSe_2 presenta una absorción extremadamente alta, y al añadir pequeñas cantidades de galio, se potencia su absorción lumínica, pudiendo absorber el 99% de la luz incidente en el material, y aumentando la eficiencia del dispositivo.

Son producidos mediante procesos de preparación tales como la evaporación, la pulverización catódica, o la electrodeposición. Las mejores células CIGS se obtienen mediante un proceso de codeposición en vacío que permite ajustar la composición química y el grosor de la capa del material [42].

De esta manera, se obtienen estructuras con unión P-N que facilitan el flujo de electrones y huecos, para conseguir una mayor conversión eléctrica. En las últimas investigaciones de estos materiales, se han incorporado elementos alcalinos (potasio, cesio, sodio) consiguiendo una eficiencia récord del 22,6% [43].

Un ejemplo de esta tecnología es el módulo solar flexible fabricado por la empresa Solar Cloth, con una eficiencia del 17,6%, destinado a aplicaciones en vivienda, invernadero, aeronáutica, deporte y ocio [44].

En la figura 16 se muestra la estructura completa de una célula solar basada en CIGS.

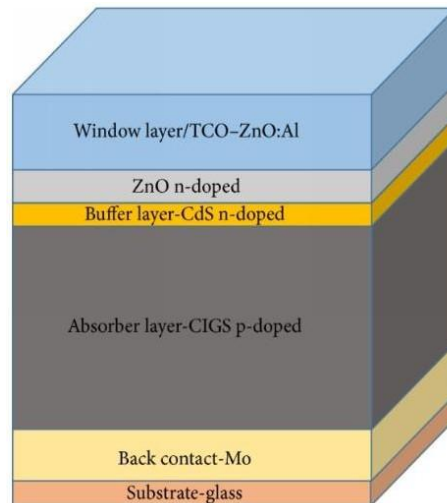


Figura 18. Estructura de una célula solar basada en CIGS [45]

2.3.3 Semiconductores orgánicos

La utilización de semiconductores orgánicos en la tecnología fotovoltaica actual no puede competir con las eficiencias alcanzadas por las células convencionales de silicio, pero presentan una serie de ventajas frente a los semiconductores inorgánicos. Las células solares orgánicas (OFV) se caracterizan por tener una estructura flexible y ligera, características semitransparentes, bajo coste de fabricación y una gran abundancia de los materiales que las conforman.

En las células solares orgánicas conviven dos materiales orgánicos diferentes, el dador y el aceptor de electrones, a diferencia de las células inorgánicas donde el material del semiconductor tipo P y tipo N es el mismo, normalmente silicio dopado con distintos elementos.

Un factor de gran importancia a la hora de elegir los materiales que actuarán como dador y aceptor es que presenten una movilidad de portadores alta, tanto de electrones como de huecos. La movilidad de carga se encuentra relacionada con la estructura del material, cuanto menor densidad de defectos presente su estructura, mayor movilidad tendrá.

Los materiales utilizados como semiconductores orgánicos son principalmente de tres tipos: polímeros, moléculas pequeñas y perovskitas. En muchos dispositivos se mezclan los tipos de materiales buscando la composición que ofrezca mayor movilidad de carga

[24].

La figura 17 muestra la estructura molecular de los semiconductores orgánicos más utilizados.

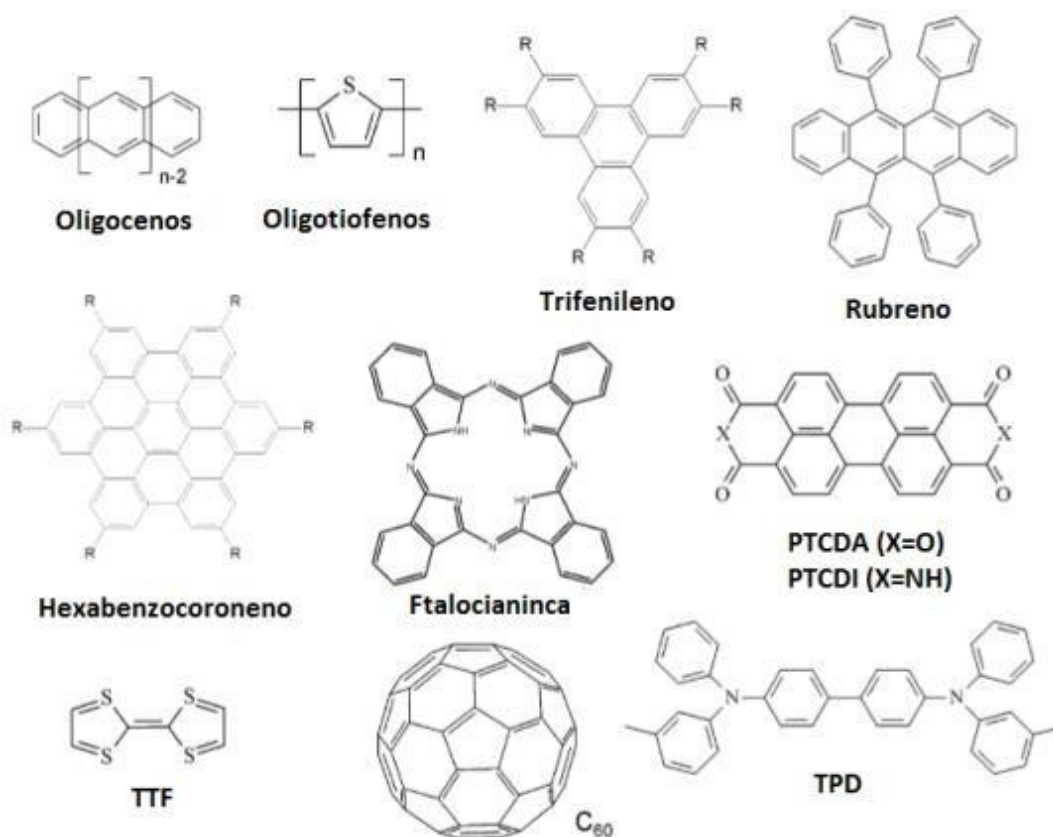


Figura 19. Estructura química de los semiconductores orgánicos más utilizados [25]

Los materiales con una estructura más organizada, como los semiconductores cristalinos, presentan una movilidad de portadores a temperatura ambiente de 0,1-20cm²/Vs. Los materiales amorfos, por el contrario, presentan una movilidad mucho más reducida (varios ordenes de magnitud por debajo) [26].

Los polímeros presentan una movilidad mucho más reducida que los materiales anteriores, ya que se tratan de materiales amorfos. La figura 18 muestra sus estructuras más comunes.

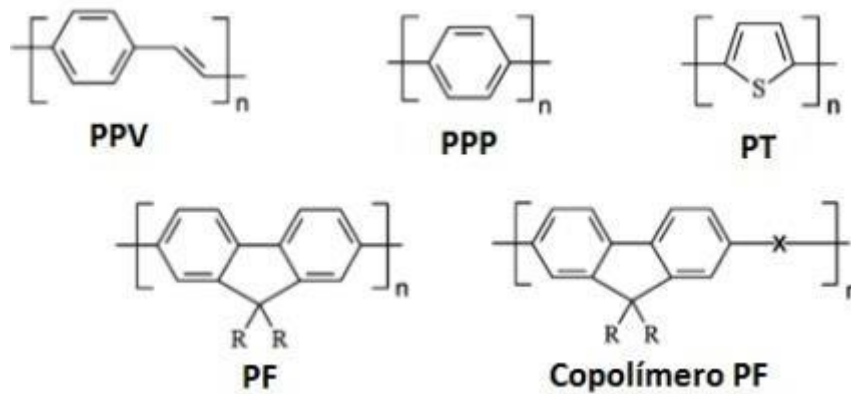


Figura 20. Estructura química de los polímeros más utilizados para el desarrollo de células solares [46]

Existen varios factores comunes a todos estos materiales que influyen en la movilidad de los portadores de carga:

- **Empaquetamiento molecular:** existe relación entre la posición que ocupan las moléculas que interactúan entre sí y la movilidad de cargas. Un claro ejemplo se da en los cristales, que presentan diferentes características según la dirección de la luz de la propagación de la luz.
- **Desorden:** existen dos tipos de desorden en la estructura de un material. El primero se refiere al desorden diagonal, que describe las oscilaciones presentes en los estados energéticos del material. El segundo se conoce como desorden no diagonal, y se refiere a las variaciones en la forma en la que interactúan las moléculas del polímero.
- **Campo eléctrico:** la presencia de un campo eléctrico externo también resulta ser influyente en la movilidad de los portadores de carga, tanto en cristales individuales como en sistemas desordenados. En el caso de los cristales individuales, al aumentar el campo eléctrico disminuirá la movilidad. Sin embargo, en los materiales de estructura desordenada, los portadores adquieren mayor movilidad al aumentar el campo eléctrico.
- **Temperatura:** la temperatura también funciona de manera distinta en cristales individuales y en materiales desordenados. En los cristales, la movilidad de huecos y electrones disminuye a mayor temperatura. Sin embargo, en los materiales desordenados, la temperatura suministra la energía necesaria a los portadores para saltar las barreras energéticas, por lo que, a mayor temperatura, mayor movilidad.

- Impurezas: la movilidad puede aumentar considerablemente cuando se purifica el material.
- Densidad de portadores de carga: este factor va ligado a las impurezas presentes en el material. A mayor presencia de portadores, mayor probabilidad de anular las diferencias energéticas de las impurezas y favorecer su movilidad.

Células Solares de Perovskita

Las células solares de perovskita (PCE) son la promesa de la tecnología fotovoltaica actual, llegando a alcanzar una eficiencia del 25,9% en muy poco tiempo de estudio, frente a las de silicio, que han necesitado más de 60 años de desarrollo para alcanzar estos niveles. Según el laboratorio Nacional de Energías Renovables de los estados unidos (NREL), esta tecnología podría superar el 30% de eficiencia, parámetro inalcanzable por el momento para las tecnologías actuales, que se estima que podrían llegar al 27,6% como máximo [47].

La perovskita es un mineral que está compuesto, a nivel químico, por trióxido de titanio y calcio, y a pesar de que no es un mineral muy común, puede ser sintetizado artificialmente con relativa facilidad, lo que lo abarata su coste de producción y lo hace competitivo económicamente hablando.



Es

Figura 21. Perovskita

La composición de este mineral da lugar a una serie de complejas propiedades físicas que permiten que se genere energía eléctrica gracias a la radiación solar, y se caracteriza por tener propiedades como un alto coeficiente de absorción solar, capacidad de transportar carga eléctrica de cualquier polaridad con un largo alcance, necesidad de

menor energía para excitar electrones, alta constante dieléctrica y otras propiedades ferroeléctricas.

El uso de este mineral como material absorbente de células solares ofrece una serie de ventajas y beneficios:

- Los paneles fotovoltaicos son más sencillos de producir debido a que las células de perovskita son flexibles, ligeras y se pueden producir a temperaturas más bajas que otras células, lo que produce menos residuos.
- Los fabricantes pueden usar numerosas técnicas de fabricación, como la impresión 3D.
- Como se ha remarcado anteriormente, presentan eficiencias muy altas al inicio de su investigación.

Como inconvenientes a destacar, estas células tienden a ser algo inestables cuando las temperaturas aumentan y son bastante vulnerables a la humedad [48].

2.4 Materiales de contacto

La estructura de una célula solar (mostrada en la figura 20), suele estar compuesta por una primera capa formada por un electrodo conductor (TCE), la cual se deposita sobre un sustrato transparente, seguida por una segunda capa de material activo, y finalmente una tercera capa formada por un electrodo reflectante. En el caso de las células solares transparentes o semitransparentes, ambos electrodos deberán ser transparentes.

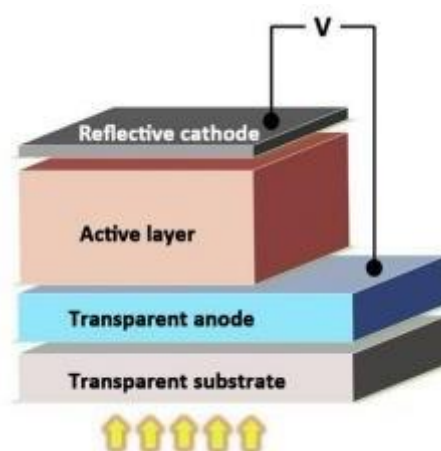


Figura 22. Estructura de una célula solar [2]

A continuación, se discutirán las distintas alternativas desarrolladas hasta el momento como materiales de contacto para células solares flexibles.

2.4.1 Óxido conductor transparente (TCO)

Los óxidos conductores transparentes son los materiales de contacto más comúnmente utilizados en las células solares flexibles. Hasta ahora, el óxido de indio dopado con estaño (ITO) ha sido el material de contacto más utilizado en la industria de células solares [49], función de trabajo de 4,3-4,7 eV. Esta función de trabajo se ha mejorado hasta 4,7-5.0 eV a través de métodos como tratamientos de UV-ozono, plasma oxigenado u otros tratamiento químicos [50,51].

Aunque el ITO se considera el material de contacto más popular, presenta algunos inconvenientes como la dificultad de suministro de indio en la actualidad. Además, la industria de fabricación de televisores, smartphones y otros dispositivos consume una gran cantidad de ITO, limitando la cantidad de este material destinado a la industria solar [52].

Entre las alternativas al ITO destacan los óxidos de zinc dopados con distintos metales como el aluminio (AZO) o el galio (GZO) [53].

2.4.2 Láminas de metal fino

Las láminas finas (espesor $< 100\text{nm}$) de metales como el aluminio, la plata y el magnesio, las cuales se caracterizan por tener gran conductividad, son comúnmente utilizadas en la producción de electrodos reflectantes. Cuando el espesor de estas láminas se reduce por debajo de los 20nm, se vuelven semitransparentes [54], lo que las convierte en un sustituto del ITO en la producción de dispositivos óptico-electrónicos [55].

Al disponer estas láminas metálicas entre dos materiales dieléctricos se obtiene una multicapa formada por dieléctrico/capa metálica fina/dieléctrico (DMD) que combina las propiedades transparentes de los dieléctricos con la alta conductividad de la láminas metálicas [56]. En los electrodos basados en DMD, toda la conductividad eléctrica recae sobre la capa metálica, mientras que las capas externas de dieléctrico se encargan de proveer al electrodo de una alta transparencia. Existen muchas opciones de materiales

para estas capas de dieléctricos incluyendo óxidos metálicos (MoO_x , ZnO , WO_3) y otros materiales orgánicos [57].

Las redes metálicas, formadas por pequeños hilos metálicos (de espesor $\sim 1\mu\text{m}$), son otra alternativa muy usada como material de contacto en células solares basadas en silicio o en CIGS [58]. Otro ejemplo de electrodos formados por pequeñas redes de hilos metálicos son las mallas metálicas. El tamaño de los huecos de la malla metálica influirá en la cantidad de luz absorbida por el material absorbente de la célula. Algunos ejemplos son las mallas formadas por plata, oro o cobre, las cuales pueden producirse mediante técnicas de litografía nanoimpresa, dando lugar a dispositivos comparables con los electrodos basados en ITO [59].

2.4.3 Nanocables metálicos

Las nanoestructuras metálicas basadas en cobre, oro y níquel se consideran materiales de contacto prometedores. Gracias a que los nanocables metálicos presentan una buena dispersión en superficies previamente tratadas, se han desarrollado técnicas como recubrimiento por rotación [60], recubrimiento por aspersion [61] o *drop casting* [62] destinadas a la producción de redes de nanocables metálicos. Dentro de los nanocables, los formados por plata son los que presentan mayor flexibilidad y mejores propiedades eléctricas.

Generalmente en el uso de estas redes de nanocables, es necesaria una capa que sirva como soporte plano de manera que estos puedan servir funcionalmente como electrodos, normalmente plata [63]. Esta capa también sirve para reducir la interconexión entre el electrodo y el material absorbente.

El conjunto de la red de nanocables de plata junto con la capa de ácido en células solares, da lugar a unos electrodos caracterizados por excelentes propiedades de conducción y flexibilidad.

No obstante, la longitud típica de estos nanocables de plata se encuentra en el rango 1-50 μm , lo que normalmente no es suficiente para mantener la integridad en redes y mallas, por lo que tienden a romperse en el proceso de fabricación [2].

2.4.4 Nanotubos de carbono y grafenos

Los nanotubos de carbono y grafeno han sido objeto de estudio por parte del sector industrial desde los últimos 20 años debido a sus singulares propiedades eléctricas, mecánicas y ópticas y a la posibilidad de su aplicación en electrodos de células solares flexibles.

En función del número de capas de carbono de los nanotubos, podemos clasificarlos en dos tipos: nanotubos de pared única [64] y los tubos de pared múltiple [65]. Ambos tipos de nanotubos se han utilizado en la producción de electrodos, y el nano tubo de pared única presenta una mejor transparencia y conductividad, debido a la diferencia de transmitancia bajo la misma densidad de corriente. La figura 23 muestra la estructura de ambos tipos de nanotubos.

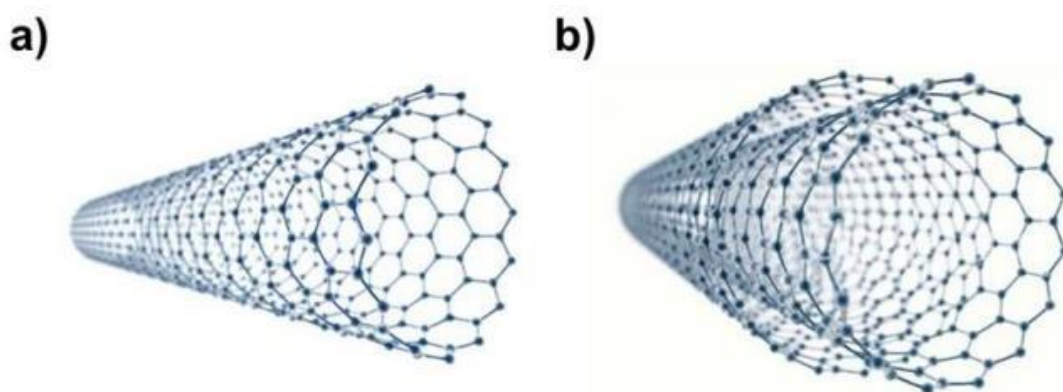


Figura 23. Estructura de nanotubo de pared única (a) y nano tubo de pared múltiple (b)[66]

La deposición química de vapor (CVD) es la técnica más utilizada para sintetizar nanotubos de pared única y conseguir así finas láminas de grafeno. Este proceso ha supuesto un gran avance en el desarrollo de electrodos de grafeno para células solares [67]. Actualmente, se están desarrollando nuevos métodos de fabricación con un coste inferior como la producción por quiralidad controlada [68] o por clonación de nanotubos [69].

Sin embargo, para que estos materiales puedan ser comercializados a gran escala se deberá continuar con el estudio de técnicas de producción y sintetización más baratas.

2.4.5 Polímeros conductores

Algunos polímeros como el PEDOT: PSS se han utilizado desde los años noventa en dispositivos óptico-electrónicos, su principal objetivo es reducir la rugosidad que presentan, por ejemplo, el ITO en su superficie [70]. Los polímeros como el PEDOT: PSS han sido objeto de investigación debido a sus singulares propiedades ópticas y a su compatibilidad con la tecnología flexible [71].

El principal reto de estos polímeros es mejorar su conductividad eléctrica, para lo cual se han sometido a distintos procesos, como distintos dopajes químicos como la polianilina, el polipirrol y el politiofeno [72]. Algunos estudios defienden que ciertas moléculas como el etilenglicol [73]

o el sorbitol [74] pueden incrementar la conductividad del PEDOT: PSS en un orden de magnitud. Por ejemplo, Kim et al demuestra en su estudio que consiguió un PEDOT: PSS dopado con un 6% de etilenglicol con una conductividad de 1418 S cm^{-1} [75].

Los últimos estudios revelan que estos polímeros pueden llegar a valores de conductividad comparables a los del ITO ($\sim 10^3 \text{ S cm}^{-1}$) para poder usarse como electrodos transparentes. Además, tienen la ventaja de que su proceso de fabricación se realiza a baja temperatura.

A continuación, se muestra en la figura 22 una comparación de las propiedades físicas más significativas de los tipos de materiales de contacto para electrodos mencionados anteriormente:

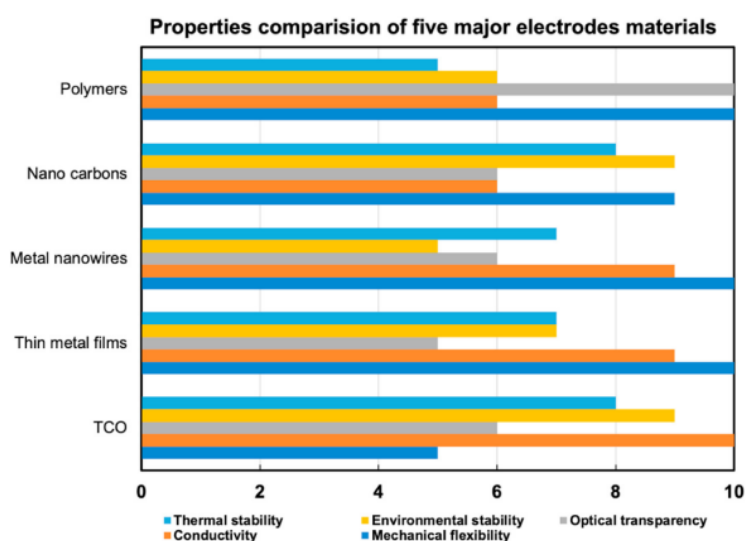


Figura 24 Comparación de propiedades físicas de distintos electrodos. [2]

2.5 Ventajas de las células solares flexibles

- **Menor consumo de materia prima:** la fabricación de estos dispositivos requiere menor cantidad de material, tanto en el caso de los sustratos como en el de los materiales absorbentes, se busca el mínimo grosor posible por lo que se reduce la materia prima necesaria. De esta manera, aparte de reducirse el coste de producción, estos dispositivos flexibles son una opción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.
- **Alta resistencia:** a pesar de ser flexibles y dar apariencia de tener una estructura más insegura que las células convencionales, están completamente impermeabilizados y son muy resistentes a las condiciones climáticas adversas. Además, gracias a su flexibilidad, su estructura es más resistente a vientos fuertes.
- **Ahorro de espacio:** Al tratarse de dispositivos extremadamente finos y poder adaptarse completamente a las curvas y a las formas de la superficie en la que se aplica, requieren menos espacio para su instalación, a diferencia de los paneles fotovoltaicos convencionales que necesitan un espacio específico que no se puede modificar. Además, su aspecto final es mucho más estético ya que se adaptan a la superficie y por tanto al entorno en el que se instalan.
- **Sistema económico:** el uso de estos dispositivos ya supone un ahorro en la economía del hogar, pero su instalación generalmente puede realizarse sin obras, como por ejemplo, mediante fuertes adhesivos, lo que reduce su coste.
- **Ligereza:** los paneles de células solares flexibles pesan hasta un 75% ^[76] menos que los convencionales, lo que los hace idóneos para su instalación en tejados o estructuras que no puedan soportar mucho peso. Además, al pesar menor, su transporte es mucho más sencillo. Por ejemplo, un panel solar flexible de 100W puede pesar 3kg frente a los 12kg de un panel convencional ^[77].

2.6 Inconvenientes de las células solares flexibles

- **Mayor coste de producción:** actualmente estas células tienen un consumo mucho menor que las rígidas de silicio, y como se ha señalado anteriormente en varias ocasiones, muchos de los materiales utilizados necesitan el desarrollo de

procesos de producción más baratos. Además, la materia prima de esta tecnología es, en general, menos abundante que la de los dispositivos rígidos.

- **Menor durabilidad:** estos dispositivos, a diferencia de los paneles fotovoltaicos convencionales, no disponen de una capa protectora de vidrio ni de un marco metálico, lo que sumando a que estas células son considerablemente más finas, hacen que su estructura sea menos resistente a los golpes.
- **Menor eficiencia:** este es el inconveniente más notorio por el cual las células solares rígidas de silicio protagonizan el mercado de la energía solar actual. Como se ha visto anteriormente a lo largo del trabajo, se ha mejorado mucho la eficiencia en los últimos años de los materiales absorbentes utilizados en la tecnología flexible (CIGS, aSi:H, semiconductores orgánicos), y aunque algunos materiales, como las perovskitas, prometen tener a largo plazo eficiencias asombrosas, actualmente no pueden competir con las células solares convencionales.

2.7 Aplicaciones

- **Ropa y textiles inteligentes:** La integración de células solares flexibles en la ropa y los textiles permite la creación de prendas inteligentes que pueden generar energía a partir de la luz solar. Estas prendas pueden utilizarse para cargar dispositivos electrónicos, como teléfonos móviles, o para alimentar sensores y sistemas de monitoreo integrados en la ropa [78].
- **Materiales de construcción:** Las células solares flexibles se pueden incorporar en materiales de construcción, como vidrios y revestimientos, para generar energía solar a partir de las fachadas de los edificios. Esto permite que los edificios sean más eficientes desde el punto de vista energético y contribuyan a la generación de energía renovable.



Figura 25. Paneles solares flexibles basados en a-Si:H

- **Dispositivos de energía portátil:** Las células solares flexibles se utilizan en la fabricación de cargadores solares portátiles y sistemas de energía autónomos. Estos dispositivos son especialmente útiles en actividades al aire libre, como acampadas o excursiones, donde no hay acceso a fuentes de energía convencionales.
- **Aplicaciones militares y de defensa:** Las células solares flexibles se utilizan en aplicaciones militares, como equipos de comunicación portátiles, sensores remotos y sistemas de vigilancia. La capacidad de flexibilidad y ligereza de estas células las hace ideales para su uso en situaciones tácticas donde se requiere una fuente de energía autónoma [79].



Figura 26. Dron Zephyr de la empresa AIRBUS [80]

- **Transporte sostenible:** Las células solares flexibles se están integrando en vehículos eléctricos y otros medios de transporte para proporcionar una fuente

de energía adicional. Por ejemplo, los techos de los automóviles pueden estar equipados con células solares flexibles que cargan las baterías del vehículo, lo que aumenta la autonomía y reduce la dependencia de la red eléctrica [11].



Figura 27. Protoptipo de Toyota Prius Eléctrico [11]

3. Caso práctico

3.1 Introducción

En esta memoria, se ha presentado un estudio en profundidad de la tecnología de célula solar flexible, exponiendo sus principales ventajas y limitaciones, y por tanto, su validación o no para las diversas aplicaciones en las que se pueden utilizar.

En este capítulo, el objetivo principal es comparar la densidad de corriente generada por una célula solar flexible depositada sobre un sustrato plástico convencional, como es el PET (polietileno tereftalato) y otra depositada sobre un sustrato rígido, como es el vidrio corning, utilizando el entorno de programación MATLAB. Tal y como se ha explicado a lo largo de la memoria, las láminas que constituyen el dispositivo solar, cuando se depositan sobre un sustrato flexible, se fabrican a temperaturas inferiores a la adecuada, y por tanto, presentan propiedades alejadas a las óptimas. Esto da lugar a que haya pérdidas en la célula solar por el simple hecho de ser fabricadas sobre sustratos flexibles.

Para ello, se va a estimar cual es la pérdida generada en los principales parámetros del dispositivo al usar sustrato flexible. Nos centraremos en el estudio del Óxido de Zinc de Aluminio (AZO, *aluminum-doped zinc oxide*, por sus siglas en inglés) como material de contacto frontal de una célula de lámina delgada de silicio amorfo, estudiando cómo propiedades, como la transmitancia (T), afectan a la densidad de corriente producida (J_{sc}) en función de la longitud de onda, dependiendo del sustrato utilizado.

El AZO es un semiconductor transparente que ha despertado un gran interés debido a su alta conductividad y transparencia en el rango de luz visible. Estas propiedades hacen del AZO un material prometedor para su uso como electrodo transparente en células solares flexibles [84].

3.2 Simulación de célula con AZO

El dispositivo utilizado para el caso práctico se caracteriza por estar depositado sobre un sustrato plástico PET, y consta de una estructura p-i-n del material absorbente de silicio amorfo hidrogenado y de una capa de AZO como material de contacto frontal. En la figura 28 se muestra la estructura del dispositivo descrito:

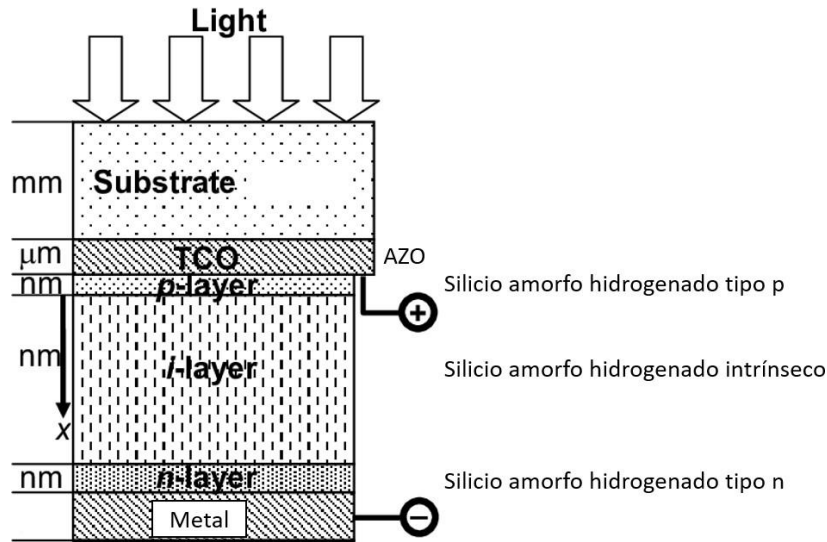


Figura 28. Estructura del dispositivo sujeto a estudio.

Como se ha dicho anteriormente, los parámetros a estudiar dependen de la longitud de onda. El análisis se realizará para un rango de longitudes de onda de 305nm a 820nm (rango de valores de energía cuántica interna proporcionados por el CIEMAT). El análisis consistirá en la comparación de la densidad de corriente obtenida:

$$J_{SC} = q \int \frac{I(\lambda)}{E_{ph}} \cdot T(\lambda) \cdot IQE(\lambda) \cdot d\lambda$$

donde q es la carga del electrón expresada en Coulombios (C), $I(\lambda)$ es la irradiancia solar expresada en $\frac{W}{m^2 \cdot nm}$, $T(\lambda)$ es la transmitancia del AZO expresada en (%), $IQE(\lambda)$ es la eficiencia cuántica interna expresada en, E_{ph} es la energía del fotón incidente, que calcularemos como $E_{ph} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, siendo h la constante de Planck y c la velocidad de la luz. La densidad de corriente J_{SC} mide la cantidad de corriente por área y se expresa en $\frac{A}{m^2}$.

Los valores de energía cuántica interna, transmitancia e irradiancia son proporcionados por el CIEMAT.

A continuación, se procederá a analizar el código realizado en Matlab y sus correspondientes resultados.

3.2.1 Obtención de datos

En el siguiente código se extraen los datos de un archivo Excel llamado *Datos_solar.xlsx*. En dicho archivo se encuentran organizados los datos en columnas. La primera corresponde a la longitud de onda, la segunda a la IQE, la tercera a la irradiancia, la cuarta a la transmisión de la capa de AZO 1 sobre PET, la quinta a la transmisión de la capa de AZO 2 sobre PET y la sexta a la transmisión de la capa de AZO sobre vidrio. También se declaran las constantes que vamos a utilizar.

```
% Leer los datos del archivo de Excel
data = xlsread('Datos_solar.xlsx');
lambda = data(:, 1);           % Valores de lambda
eficiencia = data(:, 2);       % Valores de eficiencia cuántica interna
irradiancia = data(:, 3);      % Valores de irradiancia solar
transmisionAZO1 = data(:, 4);  % Valores de transmisión
transmisionAZO2 = data(:, 5);  % Valores de transmisión
transmisionAZOv = data(:, 6);  % Valores de transmisión

% Parámetros y constantes
q = 1.6e-19;                   % Carga del electrón [C]
h = 6.626e-34;                 % Constante de Planck [J*s]
c = 3e8;                       % Velocidad de la luz [m/s]
```

Una vez tenemos creados todos los vectores de los datos, procedemos a graficar los parámetros. En primer lugar, graficaremos la IQE y la irradiancia, comunes a todas las capas de AZO:

- **Eficiencia Cuántica interna** (de una unión p-n de silicio amorfo). La figura 29 muestra la medida suministrada por el CIEMAT de la eficiencia cuántica interna de la unión de silicio amorfo empleada en todos los dispositivos. Las láminas p-i-n de silicio amorfo hidrogenado se fabrican con una dilución de H_2 de 80 sccm. Y la estructura completa está depositada sobre AZO sobre un sustrato de ITO/PET (siendo el ITO/PET el sustrato comercial). Para las simulaciones, se usará esta eficiencia cuántica interna como referencia para el estudio.

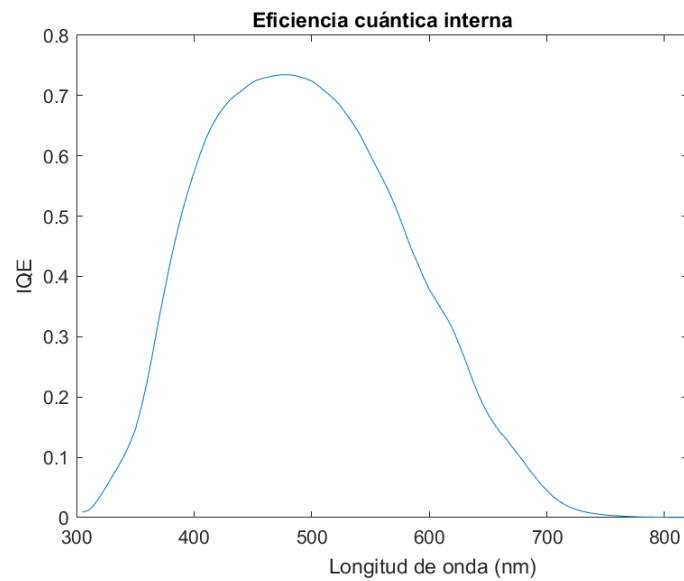


Figura 29. Eficiencia cuántica interna en función de la longitud de onda

- **Irradiancia** (espectro radiación solar AM1.5). El espectro estándar empleado para la estimación de la corriente de corto circuito se muestra en la figura 30.

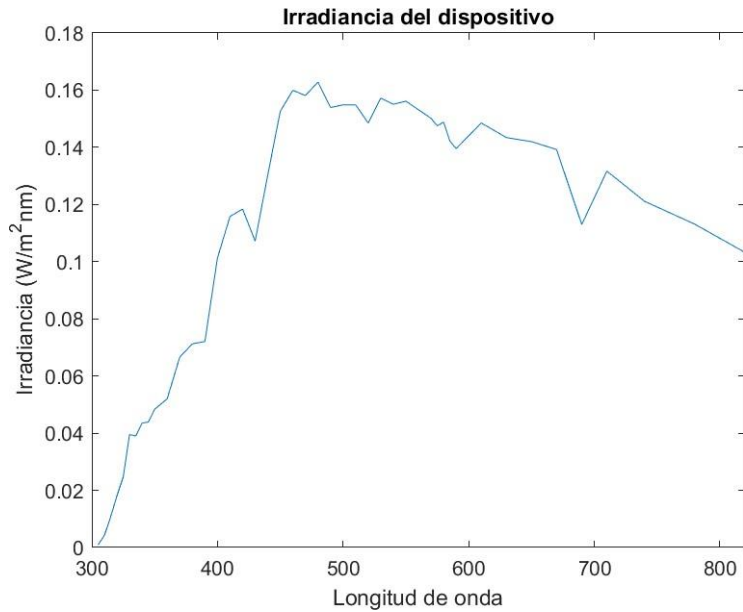


Figura 30. Irradiancia en función de la longitud de onda

Las capas de AZO sobre PET y la de AZO sobre vidrio estudiadas se han caracterizado por el CIEMAT, a continuación, se muestran los espectros de transmisión en función de la longitud de onda, para cada capa de AZO, así como las condiciones de depósito de las capas estudiadas.

- **AZO 1 sobre PET:**

Condiciones de fabricación por pulverización catódica: Lámina de AZO de 300nm de grosor, depositada a 100°C directamente sobre PET, al que se le ha realizado un tratamiento de ataque con plasma previo al depósito (bias 120W durante 240S) para mejorar la adherencia de la lámina de AZO, y una potencia de radiofrecuencia de 200W (“Low RPF”).

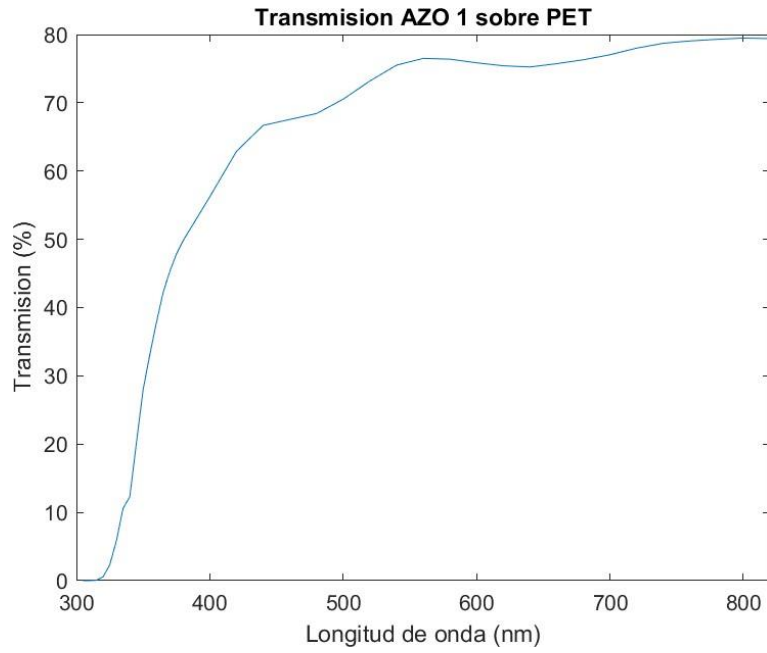


Figura 31. Transmisión de la capa de AZO 1 sobre PET en función de la longitud de onda

- **AZO 2 SOBRE PET:**

Condiciones de fabricación por pulverización catódica: Lámina de 300nm de AZO depositada (con el mismo tratamiento previo anteriormente descrito) a 100°C, y con mayor potencia de radiofrecuencia, 250W (“High RPF”).

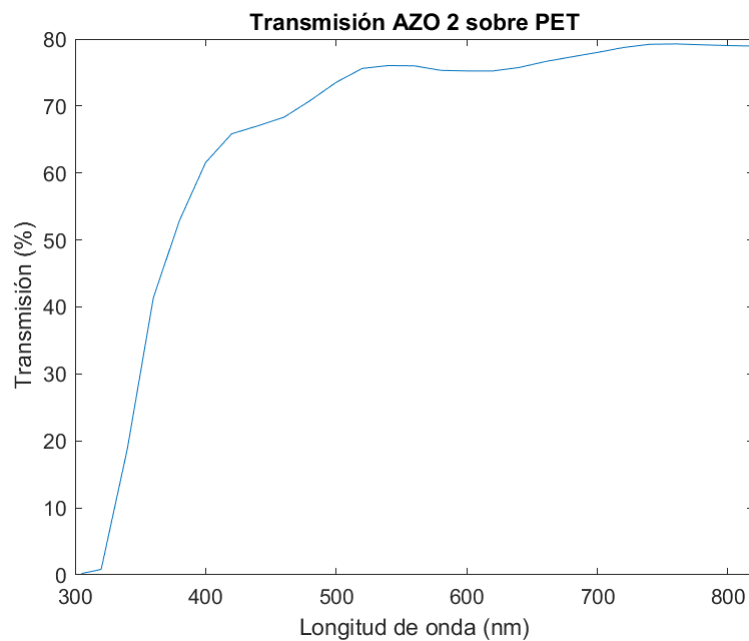


Figura 32. Transmisión de la capa de AZO 2 sobre PET en función de la longitud de onda

- **AZO sobre VIDRIO:**

Condiciones de fabricación: óptimas para una lámina de AZO de 400nm de espesor depositada sobre vidrio a 400°C y 250W

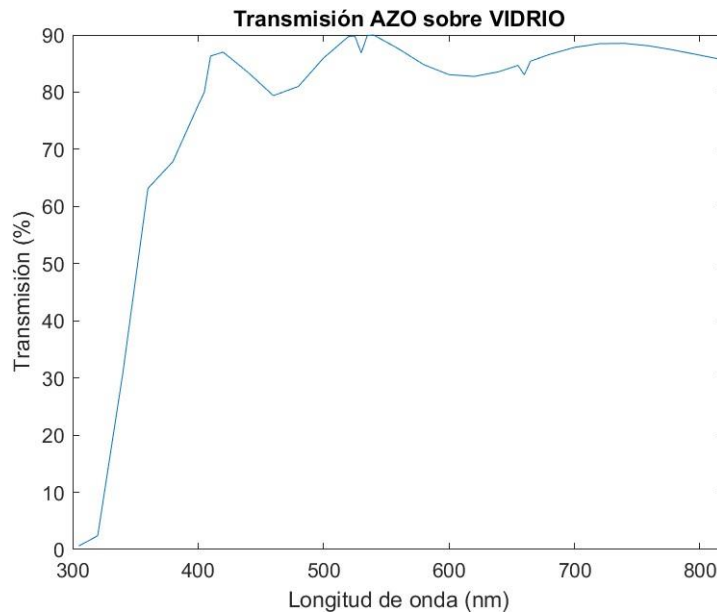


Figura 33. Transmisión de la capa de AZO sobre vidrio en función de la longitud de onda

3.2.2 Cálculo de resultados

Una vez estudiados todos los parámetros que involucra la densidad de corriente, modelaremos la ecuación en MATLAB:

1. Inicializamos el vector de longitud de onda:

```
% Cálculo de la densidad de corriente para cada valor de lambda  
Jsc = zeros(size(lambda)); % Inicializar el vector de densidades de corriente
```

2. Creamos un bucle que recorra todos los valores de longitud de onda (305-820nm). Damos un valor de Irradiancia, IQE, y transmisiones y energía del fotón incidente para cada valor del vector:

```

for i = 1:length(lambda)
    I(i) = irradiancia(i);           % Irradiancia correspondiente a lambda
    T_AZO1(i) = transmisionAZO1(i)/100;           % Transmisión correspondiente a lambda
    T_AZO2(i) = transmisionAZO2(i)/100;           % Transmisión correspondiente a lambda
    T_AZOv(i) = transmisionAZOv(i)/100;           % Transmisión correspondiente a lambda
    IQE(i) = eficiencia(i);           % Eficiencia cuántica interna correspondiente a lambda
    Eph(i) = (h * c) / (lambda(i).*1e-9);           % Energía del fotón correspondiente a lambda

```

3. Escribimos el código de la integral de la densidad de corriente y la calculamos para todos los valores de longitud de onda y para cada capa de material de contacto respectivamente. Los datos se guardarán en un array.

```

% Cálculo de la integral numérica
delta_lambda = 5;           % Paso de integración
lambda_min = min(lambda);   % Límite inferior de integración
lambda_max = max(lambda);   % Límite superior de integración
lambda_range = lambda_min:delta_lambda:lambda_max;
producto_AZO1(i) = I(i) .* IQE(i) .* T_AZO1(i) ./ Eph(i);
producto_AZO2(i) = I(i) .* IQE(i) .* T_AZO2(i) ./ Eph(i);
producto_AZOv(i) = I(i) .* IQE(i) .* T_AZOv(i) ./ Eph(i);
Jsc_AZO1(i) = q * producto_AZO1(i) * delta_lambda;
Jsc_AZO2(i) = q * producto_AZO2(i) * delta_lambda;
Jsc_AZOv(i) = q * producto_AZOv(i) * delta_lambda;

```

Delta_lambda representa la distancia entre cada punto del vector de lambda, como los valores están separados de 5 en 5, el valor de esta variable es de 5, y representa $d\lambda$ en la integral.

Lambda_min y *Lambda_max* representan los límites de integración, el valor mínimo (305nm) y máximo (820nm) de longitud de onda.

4. Calculamos la corriente total de la célula *Isc* para cada capa de material de contacto:

```

Jsc_total_AZO1 = sum (Jsc_AZO1);
Jsc_total_AZO2 = sum (Jsc_AZO2);
Jsc_total_AZOv = sum (Jsc_AZOv);
end

```

5. Obtención e impresión de los resultados

El siguiente bucle recorre todo el vector de densidad de corriente y lo imprime para cada valor de lambda:

```

% Imprimir los resultados
for i = 1:length(lambda)
    fprintf('Para lambda = %.2e, la densidad de corriente (Jsc) es: %.2e mA/cm^2\n', lambda(i), Jsc_AZOv(i));
end

```

RESULTADOS DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/cm²)

Tabla 1. Resultados de densidades de corriente de las capas simuladas

Lambda	Jsc AZO 1	Jsc AZO 2	Jsc AZO VIDRIO
305	2,55E-10	2,15E-08	6,54E-08
310	9,21E-10	2,56E-07	7,58E-07
315	1,64E-07	1,78E-06	5,21E-06
320	4,59E-06	6,71E-06	1,96E-05
325	3,73E-05	8,58E-04	0,000153582
330	0,00020585	0,000344958	0,000584878
335	0,000461856	0,000622101	0,001032899
340	0,000736597	0,00112637	0,001849485
345	0,001488391	0,001799082	0,002864891
350	0,002767927	0,002977779	0,004649814
355	0,004313736	0,004658494	0,007175854
360	0,006385701	0,006991158	0,010661808
365	0,010100021	0,010595863	0,015391856
370	0,014748118	0,015359772	0,021335612
375	0,018809188	0,019660928	0,026204025
380	0,023077068	0,024515848	0,03144534
385	0,026741229	0,028646295	0,036574476
390	0,030459449	0,032883913	0,041805771
395	0,040817391	0,044387328	0,056206031
400	0,052506582	0,057488249	0,072525275
405	0,061646485	0,066695076	0,08518233
410	0,071523084	0,07650405	0,103668607
415	0,077728627	0,082241104	0,110018605
420	0,083871365	0,087820144	0,116010854
425	0,08375707	0,086784573	0,112955656
430	0,083139711	0,085262418	0,10933166
435	0,095676487	0,097133077	0,122698464
440	0,108771623	0,109338336	0,136046644
445	0,121177921	0,121992026	0,149245916
450	0,13407559	0,135177243	0,162582935
455	0,140068024	0,141427438	0,167204669
460	0,145940725	0,147573007	0,171477146
465	0,147616133	0,15014476	0,173773607
470	0,14918517	0,152621959	0,175949942
475	0,153724898	0,158168601	0,181641256

480	0,158135771	0,163629322	0,187197748
485	0,15638144	0,162131766	0,186523518
490	0,154203795	0,160182609	0,185288218
495	0,156805267	0,163194004	0,189778768
500	0,159167409	0,165961434	0,194001441
505	0,160804398	0,167272966	0,196299137
510	0,162003465	0,168129371	0,198061933
515	0,159919196	0,165587505	0,195803538
520	0,157567277	0,162785805	0,193204201
525	0,162391327	0,166683319	0,197683996
530	0,166544424	0,169849488	0,194571148
535	0,164796994	0,166999005	0,197767044
540	0,162612558	0,163747378	0,193774092
545	0,16040292	0,16097059	0,189226739
550	0,157800262	0,15781947	0,18428542
555	0,153242379	0,152740755	0,177157393
560	0,148704262	0,147715885	0,170170685
565	0,14333598	0,142120064	0,162794923
570	0,137289225	0,135872299	0,154745865
575	0,12964115	0,128064737	0,145008905
580	0,124809939	0,123062566	0,138529396
585	0,113541966	0,112116046	0,125598487
590	0,106595834	0,105411366	0,117515017
595	0,103014931	0,102019813	0,113179621
600	0,099847928	0,099028871	0,109323046
605	0,097979682	0,097315313	0,107331823
610	0,095566415	0,095054734	0,104741337
615	0,091114372	0,090756879	0,099912667
620	0,085919381	0,085705548	0,094264076
625	0,079270978	0,079254089	0,087238917
630	0,072514675	0,072664438	0,080050656
635	0,065433981	0,065718369	0,072457385
640	0,05880369	0,059193544	0,065316309
645	0,052991456	0,053412787	0,059021502
650	0,048095352	0,048541096	0,053714049
655	0,043962558	0,044427714	0,049231286
660	0,040232776	0,04071112	0,044113142
665	0,0373723	0,037831042	0,042075494
670	0,033802474	0,03423038	0,038157074
675	0,029088418	0,029467779	0,032922023
680	0,024638919	0,024969643	0,027958935
685	0,020056339	0,020320671	0,022785619
690	0,016248727	0,016458942	0,018481433
695	0,013993828	0,014171497	0,01593518
700	0,011953522	0,012102419	0,01362754

705	0,009829816	0,009944438	0,011192079
710	0,008103951	0,008192041	0,009214344
715	0,00631461	0,006378288	0,007171463
720	0,004914645	0,004960369	0,005574494
725	0,003860328	0,003893281	0,004369136
730	0,002994444	0,003017718	0,003381799
735	0,002399885	0,002416714	0,002704486
740	0,001933997	0,001946095	0,002174999
745	0,0015608	0,001569128	0,001751014
750	0,001227259	0,001232683	0,001373605
755	0,000993022	0,0009965	0,001108836
760	0,000833343	0,000835501	0,000928358
765	0,000664837	0,000665795	0,000738511
770	0,00053501	0,000535168	0,000592587
775	0,000409377	0,000409029	0,000452127
780	0,000309908	0,000309291	0,000341284
785	0,000267074	0,000266287	0,000293206
790	0,000252507	0,000251521	0,000276357
795	0,000208708	0,000207694	0,000227715
800	0,000166031	0,000165066	0,000180589
805	0,000120103	0,000119408	0,00013034
810	8,92E-05	8,87E-05	9,66E-05
815	7,92E-05	7,87E-05	8,55E-05
820	8,39E-05	8,34E-05	9,04E-05

DENSIDAD DE CORRIENTE CAPA DE AZO 1 SOBRE PET:

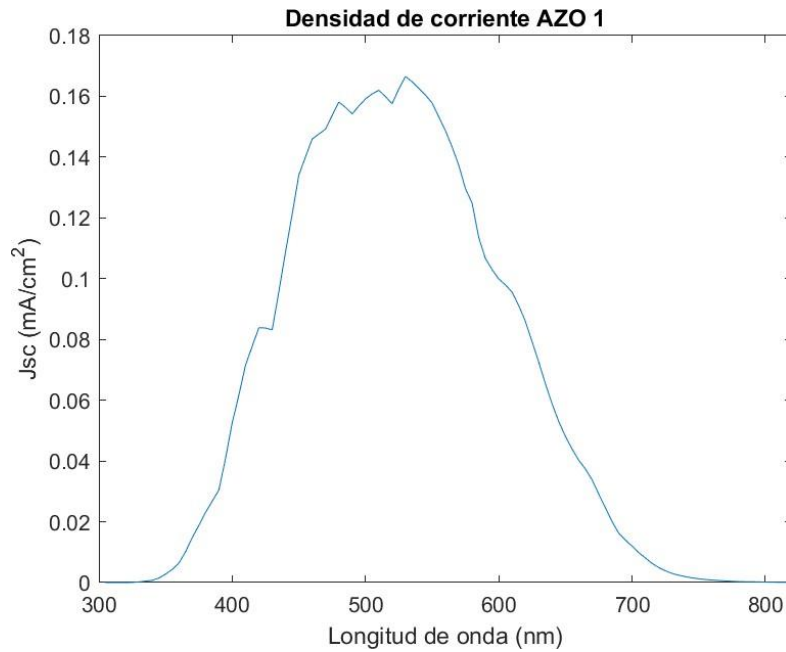


Figura 34. Densidad de corriente del AZO 1 sobre PET en función de la longitud de onda

La corriente total J_{sc} estimada del dispositivo con esta capa de AZO es de 6,6183 mA/cm^2 .

DENSIDAD DE CORRIENTE CAPA DE AZO 2 SOBRE PET:

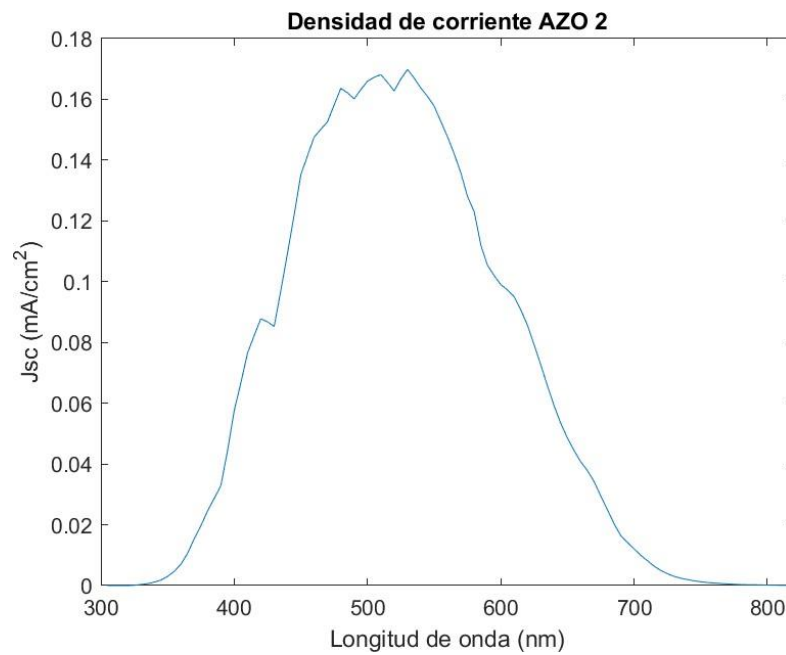


Figura 35. Densidad de corriente del AZO 2 sobre PET en función de la longitud de onda

La corriente total J_{sc} estimada del dispositivo con esta capa de AZO es de 6,7350 mA/cm^2 .

DENSIDAD DE CORRIENTE CAPA DE AZO SOBRE VIDRIO:

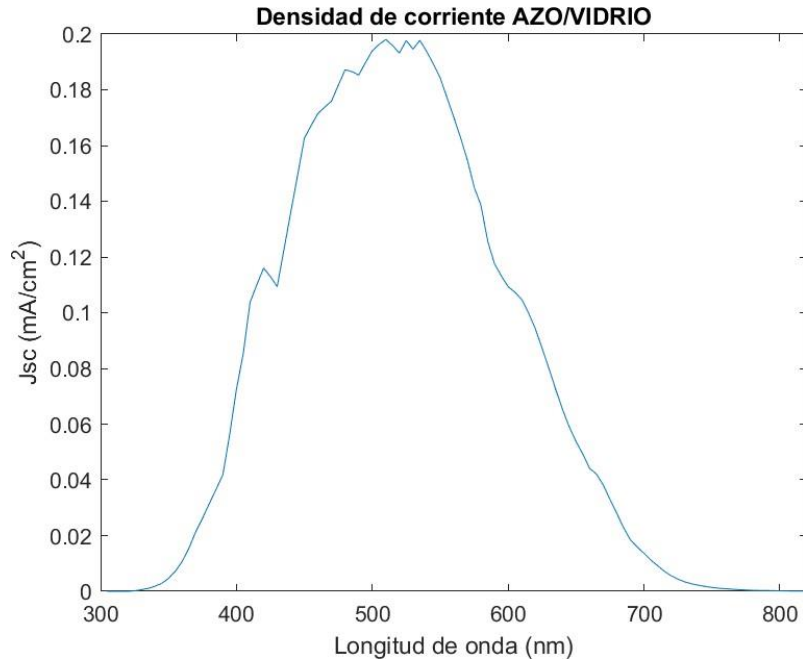


Figura 36. Densidad de corriente del AZO sobre vidrio en función de la longitud de onda

La corriente total Jsc estimada del dispositivo con esta capa de AZO es de 7,8896 mA/cm².

Tabla 2. Comparación de resultados de densidad de corriente.

Tipo de contacto	Jsc (mA/cm ²) Medida experimental	Jsc (mA/ cm ²) Estimada
High RFP	11,1	6,7350
Low RFP	10,4	6,6183
AZO/vidrio	13,0	7,8896

3.3 Análisis de limitaciones del dispositivo

En el siguiente apartado se analizarán las dos principales limitaciones del dispositivo de estudio, concretamente del sustrato utilizado, en este caso PET. Se han utilizado datos de una célula que utiliza un sustrato plástico PET de la empresa *GOODFELLOW*, cuya referencia es ES301425 (0,125mm de espesor).

3.3.1 Uso de bajas temperaturas por limitación del sustrato

El uso de un sustrato plástico tiene ciertas limitaciones en cuanto a los valores de temperatura que podemos alcanzar durante la fabricación del dispositivo.

En el caso del PET utilizado, se trata de un material duro, con buenas propiedades de protección y una buena resistencia química. Suele ser muy transparente e incoloro, pero en la secciones gruesas suele ser más opaco y blanquecino. Su temperatura máxima de utilización oscila entre 115-170°C. Comparado con su equivalente PEN, empiezan a encoger de manera significativa a partir de 150°C en vez de a 190°C. Sus resistencias a la tracción son similares, pero el PEN tiene es un 25% más resistente a temperatura ambiente. [81].

El precio del PET utilizado depende de su forma y dimensiones. Como ejemplo, una muestra cuadrada de 300mm x 300mm tiene un precio de 89€, mientras que su equivalente PEN, para la misma muestra y dimensiones, tiene un precio de 233,51€ [81]. Por una parte, esto es un punto positivo ya que supone un menor gasto energético en el proceso de producción de la célula solar, y por tanto, un menor coste de producción, pero se considera negativo ya que al producirse a estas temperaturas se producen importantes pérdidas ópticas y eléctricas (la resistencia de la hoja de AZO puede llegar a ser un 50% mayor cuando se deposita a baja temperatura) por depositar fuera de la temperatura óptima las láminas que componen el dispositivo. Esto supone una reducción considerable de la transmitancia y un aumento de la absorción de la capa que hace de contacto y por tanto una disminución de la eficiencia del dispositivo ya que llega menos luz a la capa activa.

3.3.2 Pérdidas ópticas del sustrato de plástico en comparación con el vidrio convencional

En nuestro dispositivo de estudio, se ha utilizado una configuración de superestrato (el PET se encuentra en la parte superior de la estructura y es la primera capa en contacto con la luz). Por tanto, las propiedades ópticas del PET suponen una gran importancia en la célula.

El plástico presenta unas propiedades ópticas considerablemente peores que el vidrio. Mientras que los sustratos de cristal suelen caracterizarse una transmitancia de aproximadamente el 90% [39], los plásticos rondan el 85% [82], esto supone una reducción significativa de la energía en forma de luz que atraviesa el polímero de plástico y que llega al p-i-n. A continuación, podemos observar los distintos espectros de transmitancia del PET, PEN y el vidrio *Corning*:

Espectro de transmitancia del sustrato PEN:

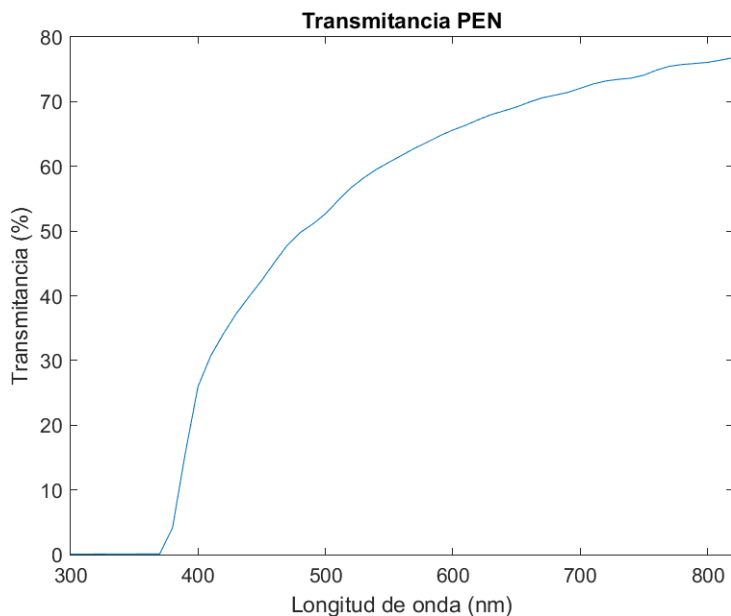


Figura 37. Espectro de transmitancia del PET en función de la longitud de onda

Espectro de transmitancia del substrato PET:

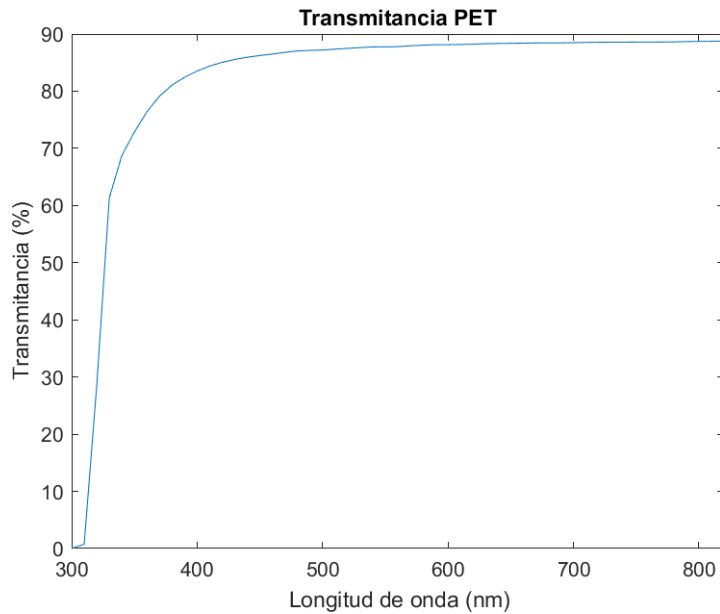


Figura 38. Espectro de transmitancia del PEN en función de la longitud de onda.

Espectro de transmitancia del substrato PET:

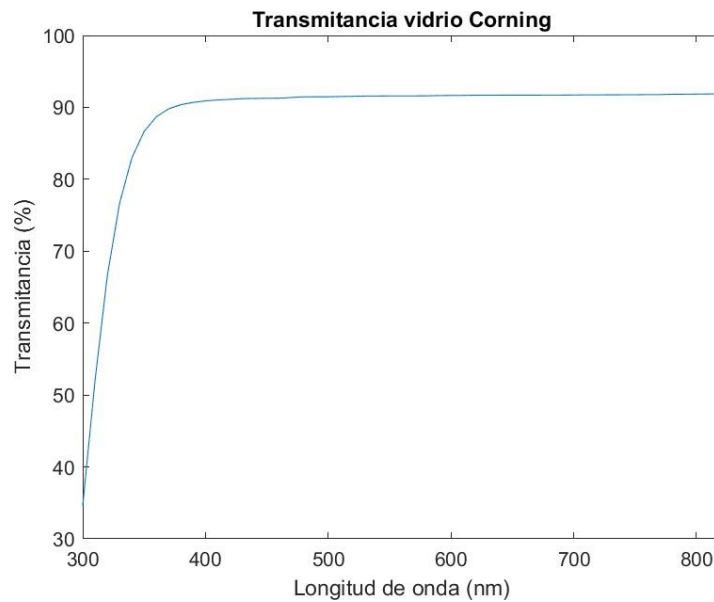


Figura 39. Espectro de transmitancia del vidrio Corning en función de la longitud de onda.

Los espectros experimentales de estos tres sustratos corroboran lo mencionado anteriormente. El vidrio, al ser un sustrato de cristal presenta propiedades ópticas mejor que el plástico, por eso el espectro de transmitancia llega al 90% a menor longitud de onda y se mantiene constante.

En cuanto a los sustratos plásticos, se observa claramente en los espectros que el PET utilizado posee mejores propiedades ópticas que su homólogo PEN.

3.3.3 Baja estabilidad mecánica

Las capas depositadas sobre plásticos pueden presentar tensiones intrínsecas en las láminas p-i-n del silicio amorfo hidrogenado (el conocido *peel-off*). Lo anterior produce que la capa se separe del sustrato, presentando grietas y variando la continuidad en el dispositivo. Su efecto es la fractura de la célula, volviendo el dispositivo no funcional. Un estudio en profundidad sobre este efecto se puede encontrar en la referencia [83].

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado un estudio de los materiales clave (englobando los sustratos, materiales absorbentes y materiales de contacto) para la producción de células solares flexibles.

Los materiales de sustratos vistos incluyen metales, cerámicas, cristales y plásticos. A pesar de los avances conseguidos en todos estos materiales, sigue siendo necesario un sustrato que satisfaga los requerimientos de flexibilidad, resistencia térmica y bajo coste de producción a la vez. En el caso de los sustratos metálicos, el principal inconveniente es la rugosidad de su superficie y la poca ductilidad que presenta, no obstante, es la mejor elección en cuanto a resistencia térmica se refiere. En cuanto a los plásticos, la alternativa más prometedora es el PI, por su estabilidad térmica, pero es necesario desarrollar métodos de producción más baratos. Los sustratos cerámicos se caracterizan por tener las mejores propiedades térmicas, pero al igual que en el caso de los plásticos, es necesario desarrollar un método de fabricación que implique un menor coste.

Los materiales absorbentes estudiados incluyen el silicio amorfo hidrogenado, CIGS y los semiconductores orgánicos. El a-Si:H y CIGS son los materiales que se espera que dominen el futuro del mercado solar, sin embargo, la perovskita es el material más competente en cuanto a eficiencia potencial y a su baja temperatura de fabricación, por lo que se espera que el desarrollo de las células solares orgánicas aumente en los próximos años.

En cuanto a los materiales de contacto, los óxidos conductores transparentes seguirán siendo los protagonistas ya que el estudio de nano materiales se encuentra aún en investigación.

Finalmente, el objetivo de este trabajo no solo consiste en realizar el estado del arte para este tipo de dispositivos, sino también de sacar una conclusión sobre si las células solares flexibles pueden suponer una competencia real para los paneles solares de silicio rígido que actualmente dominan el mercado.

Desde mi punto de vista, estos dispositivos aún no se encuentran lo suficientemente desarrollados como para hacer frente a las células de silicio. Aunque muchos de los materiales presentan eficiencias prometedoras, actualmente no son capaces de igualar las eficiencias y estabilidad del silicio a la vez que mantienen un bajo coste de producción. Es por estas razones por las que considero que el uso de las células solares

flexibles en la actualidad solo tiene interés en aplicaciones específicas, en las que se requiera una cierta curvatura en la superficie de instalación. En casos convencionales como cubrir parte del suministro eléctrico doméstico, los paneles de células solares de silicio siguen siendo la mejor opción hoy en día.

Bibliografía

- [1] Caixa, C. /. O. S. ‘. (s. f.). *Las energías renovables producen el 37% de la electricidad consumida en la UE.* [ctxt.es | Contexto y Acción.](https://ctxt.es/es/20230201/Firmas/42065/Observatorio-Social-la-Caixa-union-europea-energias-renovables-electricidad.htm#:~:text=Seg%C3%BAAn%20datos%20de%20Eurostat%2C%20el,cifra%20era%20solo%20del%2023%25)
<https://ctxt.es/es/20230201/Firmas/42065/Observatorio-Social-la-Caixa-union-europea-energias-renovables-electricidad.htm#:~:text=Seg%C3%BAAn%20datos%20de%20Eurostat%2C%20el,cifra%20era%20solo%20del%2023%25>.
- [2] Xiaoyue Li, Peicheng Li, Zhongbin Wu, Deying Luo, Hong-Yu Yu, Zheng-Hong Lu, “Review and perspective of materials for flexible solar cells”, *Materials Reports: Energy*, 1, 100001 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.matre.2020.09.001>.
- [3] Naciones Unidas (ONU), *Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC)*, 12 Diciembre 2015, <https://www.refworld.org/es/docid/602021b64.html>
- [4] Real decreto 376/2022, de 17 de mayo, por el que se regulan los criterios de sostenibilidad y de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de los biocarburantes, biolíquidos y combustibles de biomasa, así como el sistema de garantías de origen de los gases renovables. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/05/17/376>
- [5] Ley 7/2022, de 8 de abril, sobre residuos y suelos contaminados por una economía circular. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7/con>
- [6] *Nuevo paquete de medidas: Energía limpia para todos los europeos.* Obtenido de Hispacoop: <https://www.hispacoop.com/home/index.php/features/12-energia/358-nuevo-paquete-de-medidas-energia-limpia-para-todos-los-europeos>.
- [7] Carbonell, M. (2023) *Tendencias de la Energía Fotovoltaica en España, Calefacción.* DAA GmbH. Available at: <https://www.hogarsense.es/placas-solares/energia-fotovoltaica-espana>
- [8] Iberdrola. (2021). *CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.* Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/innovacion/celulas-fotovoltaicas-fotoelectronica>
- [9] Paneles solares más eficientes 2022. *Blog SOLARNUB Energía Fotovoltaica.* <https://blog.solarnub.com/paneles-solares-mas-eficientes-2022/>
- [10] <https://elalmacenfotovoltaico.com/inicio/906-kit-solar-camper-430w-bluetooth-con-bateria-1700wh-diarios.html>
- [11] Toyota Prius 2023 https://www.toyota.es/coches/prius-plugin?gclid=Cj0KCQiA-JacBhC0ARIsAIxybyM9UCoXYA8jGJd5fm4JKvGiOANk72naB8n8ekJiV0dfnNEytHAXEgaAjKtEALw_wcB&gclsrc=aw.ds

- [12] Gestor. (2021, 17 septiembre). *Cómo ha evolucionado la Energía Solar a lo largo de la historia*. Greening-e. <https://greening-e.com/como-ha-evolucionado-la-energia-solar-a-lo-largo-de-la-historia/>
- [13] Historia de las células solares y su evolución tecnológica. Grupo JAB. <https://www.grupojab.es/historia-de-las-celulas-solares-y-su-evolucion-tecnologica/>
- [14] Tuvatio. (2021). *¿CÓMO FUNCIONAN LOS PANELES SOLARES? TUVATIO*. <https://tuvatio.es/blog/como-funcionan-paneles-solares/>
- [15] Huang J-M, Chu P, Chang F-C. Conformational changes and molecular motion of poly(ethylene terephthalate) annealed above glass transition temperature. *Polymer*. 2000;41:1741–1748. [Conformational changes and molecular motion of poly\(ethylene terephthalate\) annealed above glass transition temperature - ScienceDirect](https://doi.org/10.1016/S0021-8995(00)51741-1)
- [16] *Eficiencia | PVEducation*. (s. f.). <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lula-solar/eficiencia>
- [17] Prego, C. (2022) *Las células solares de Perovskita Acaban de Dar un paso de Gigante contra su punto débil: La Durabilidad, Xataka*. Available at: <https://www.xataka.com/energia/celulas-solares-perovskita-acaban-dar-paso-gigante-su-punto-debil-durabilidad#:~:text=Se%20calcula%20que%20las%20celdas,de%20mayores%20cuotas%20de%20rendimiento>
- [18] M. A. Green, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J.Hohl-Ebinger, M. Yoshita and A.W.Y. Ho-Baillie, Solar cell efficiency tables (version 54), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27, 7, 565-575, (2019).
- [19] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [20] *¿En qué consisten las generaciones de los Paneles Solares? | Paneles solares*. (s. f.). <https://solarenergia.mx/productos/en-que-consisten-las-generaciones-de-los-paneles-solares/>
- [21] Celda fotovoltaica de tercera generación – HiSoUR Arte Cultura Historia. (s. f.). <https://www.hisour.com/es/third-generation-photovoltaic-cell-39628/>
- [22] Xiao Y, Han G, Zhou H, Wu J. An efficient titanium foil based perovskite solar cell: using a titanium dioxide nanowire array anode and transparent poly(3, 4-ethylenedioxythiophene) electrode. *RSC Adv*. 2016;6:2778–2784
- [23] Wang X, Li Z, Xu W, et al. TiO₂ nanotube arrays based flexible perovskite solar cells with transparent carbon nanotube electrode. *Nano Energy*. 2015;11:728–735.
- [24] Dou B, Miller EM, Christians JA, et al. High-performance flexible perovskite solar cells on ultrathin glass: implications of the TCO. *The journal of physical chemistry letters*. 2017;8:4960–4966

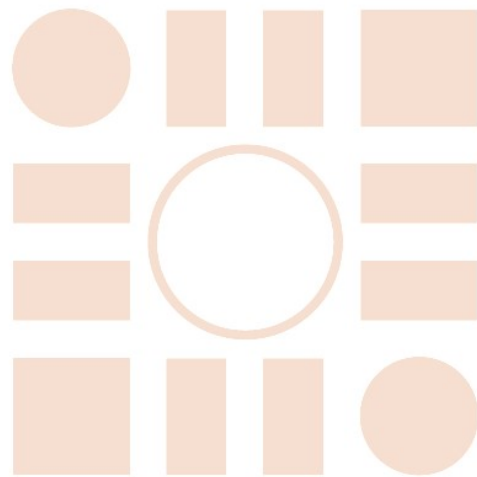
- [25] Dou B, Miller EM, Christians JA, et al. High-performance flexible perovskite solar cells on ultrathin glass: implications of the TCO. *The journal of physical chemistry letters*. 2017;8:4960–4966.
- [26] Yoon H, Kang SM, Lee J-K, Choi M. Hysteresis-free low-temperature-processed planar perovskite solar cells with 19.1% efficiency. *Energy Environ Sci*. 2016;9: 2262–2266.
- [27] curva-tension-deformacion - Naukas. (2013, 18 febrero). Naukas. <https://naukas.com/2013/02/19/la-fisica-del-evento-de-cheliabinsk/curva-tension-deformacion/>
- [28] Cros S, De Bettignies R, Berson S, et al. Definition of encapsulation barrier requirements: a method applied to organic solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2011;95:S65–S69. At: [Definition of encapsulation barrier requirements: A method applied to organic solar cells - ScienceDirect](#)
- [29] Choy WC. *Organic Solar Cells: Materials and Device Physics*. Springer; 2012.
- [30] Fahlteich J, Fahland M, Schonberger W, Schiller N. Permeation barrier properties of ϵ thin oxide films on flexible polymer substrates. *Thin Solid Films*. 2009;517: 3075–3080. At: [Permeation barrier properties of thin oxide films on flexible polymer substrates - ScienceDirect](#)
- [31] Crawford GP. *Flexible Flat Panel Display Technology*. Wiley Online Library 2005 Vol. 3.
- [32] Wong WS, Salleo A. *Flexible Electronics: Materials and Applications*. 11. Springer Science & Business Media; 2009.
- [33] Mexpolimeros. (s. f.). Tg *Temperatura de Transición vítrea. Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos*. <https://www.mexpolimeros.com/tg.html>
- [34] Industriapedia, & Industriapedia. (2022). Qué es Temperatura de transición vítrea (Tg). Industriapedia. <https://industriapedia.com/que-es-temperatura-de-transicion-vitrea-tg/>
- [35] Fan CF, Çagin T, Shi W, Smith KA. Local chain dynamics of a model polycarbonate near glass transition temperature: a molecular dynamics simulation. *Macromol Theory Simul*. 1997;6:83–102.
- [36] Yokota R, Yamamoto S, Yano S, et al. Molecular design of heat resistant polyimides having excellent processability and high glass transition temperature. *High Perform Polym*. 2001;13:S61–S72.
- [37] Pan J, Thierry D, Leygraf C. Electrochemical impedance spectroscopy study of the passive oxide film on titanium for implant application. *Electrochim Acta*. 1996;41: 1143–1153.
- [38] Karlsson T, Roos A. Optical properties and spectral selectivity of copper oxide on stainless steel. *Sol Energy Mater*. 1984;10:105–119
- [39] Kolli M, Hamidouche M, Bouaouadja N, Fantozzi G. HF etching effect on sandblasted soda-lime glass properties. *J Eur Ceram Soc*. 2009;29:2697–2704. At: [HF etching effect on sandblasted soda-lime glass properties - ScienceDirect](#)
- [40] Yang J, Banerjee A, Guha S. Triple-junction amorphous silicon alloy solar cell with 14.6% initial and 13.0% stable conversion efficiencies. *Appl Phys Lett*. 1997;70: 2975–2977.

- [41] Ranjan, R. (2019). Hanergy Achieves 25.11% Conversion Efficiency for its Silicon Heterojunction Solar Technology. Mercomindia.com. <https://www.mercomindia.com/hanergy-achieves-conversion-efficiency>
- [42] . Ramanujam J, Bishop DM, Todorov TK, et al. Flexible CIGS, CdTe and a-Si: H based thin film solar cells: a review. *Prog Mater Sci.* 2020;110:100619.
- [43] Jackson P, Wuerz R, Hariskos D, Lotter E, Witte W, Powalla M. Effects of heavy alkali elements in Cu (In, Ga) Se₂ solar cells with efficiencies up to 22.6%. *Phys Status Solidi Rapid Res Lett.* 2016;10:583–586
- [44] Bellini, E. (2022, 22 febrero). Módulos solares CIGS enrollables en Francia. pv magazine España. <https://www.pv-magazine.es/2022/02/22/modulos-solares-cigs-enrollables-en-francia/>
- [45] Energía, S. N. (2019, 25 febrero). Tecnología de células solares CIGS - Conocimiento - DS New Energy. SD Nuevo Energía. <https://www.dsisolar.com/info/cigs-solar-cell-technology-32862127.html>
- [46] Green M. (2003), *Third Generation photovoltaics*. Advanced Solar Energy conversión.
- [47] Santos, E. (2023, 16 mayo). Paneles solares de perovskita. *Sunalizer España*. <https://www.sunalizer.es/post/perovskita>
- [48] EcoInventos, R. (2022, 18 julio). Las células solares de perovskita están revolucionando las placas solares. EcoInventos. <https://ecoinventos.com/celulas-solares-perovskita/#Desventajas>
- [49] Tang CW. Two-layer organic photovoltaic cell. *Appl Phys Lett.* 1986;48:183–185.
- [50] Hong Z, Liang C, Sun X, Zeng X. Characterization of organic photovoltaic devices with indium-tin-oxide anode treated by plasma in various gases. *J Appl Phys.* 2006; 100, 093711.
- [51] Destruel P, Bock H, Seguy I, Jolinat P, Oukachmih M, Bedel-Pereira E. Influence of indium tin oxide treatment using UV–ozone and argon plasma on the photovoltaic parameters of devices based on organic discotic materials. *Polym Int.* 2006;55: 601–607.
- [52] Na SI, Kim SS, Jo J, Kim DY. Efficient and flexible ITO-free organic solar cells using highly conductive polymer anodes. *Adv Mater.* 2008;20:4061–4067
- [53] Liu H, Wu Z, Hu J, et al. Efficient and ultraviolet durable inverted organic solar cells based on an aluminum-doped zinc oxide transparent cathode. *Appl Phys Lett.* 2013; 103:135_131
- [54] Wang Z, Helander M, Lu Z. Transparent conducting thin films for OLEDs. In: *Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs)*. Elsevier; 2013:49–76.
- [55] Podo R, Lee C, Moon D, Han J. Transparent conducting metal electrode for top emission organic light-emitting devices: Ca–Ag double layer. *Appl Phys Lett.* 2004; 84:4614–4616.
- [56] Fan JC, Bachner FJ, Foley GH, Zavracky PM. Transparent heat-mirror films of TiO₂/Ag/TiO₂ for solar energy collection and radiation insulation. *Appl Phys Lett.* 1974; 25:693–695.
- [57] Jung GH, Hong K, Dong WJ, Kim S, Lee JL. BCP/Ag/MoO₃ transparent cathodes for organic photovoltaics. *Adv Energy Mater.* 2011;1:1023–1028

- [58] Yu J-S, Jung GH, Jo J, et al. Transparent conductive film with printable embedded patterns for organic solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2013;109:142–147.
- [59] Kang MG, Kim MS, Kim J, Guo LJ. Organic solar cells using nanoimprinted transparent metal electrodes. *Adv Mater*. 2008;20:4408–4413.
- [60] Leem DS, Edwards A, Faist M, Nelson J, Bradley DD, De Mello JC. Efficient organic solar cells with solution-processed silver nanowire electrodes. *Adv Mater*. 2011;23: 4371–4375.
- [61] Krantz J, Stubhan T, Richter M, et al. Spray-coated silver nanowires as top electrode layer in semitransparent P3HT: PCBM-based organic solar cell devices. *Adv Funct Mater*. 2013;23:1711–1717.
- [62] Reinhard M, Eckstein R, Slobodskyy A, Lemmer U, Colsmann A. Solution-processed polymer–silver nanowire top electrodes for inverted semi-transparent solar cells. *Org Electron*. 2013;14:273–277.
- [63] Gaynor W, Burkhard GF, McGehee MD, Peumans P. Smooth nanowire/polymer composite transparent electrodes. *Adv Mater*. 2011;23:2905–2910.
- [64] Iijima S, Ichihashi T. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*. 1993; 363:603.
- [65] Ago H, Petritsch K, Shaffer MS, Windle AH, Friend RH. Composites of carbon nanotubes and conjugated polymers for photovoltaic devices. *Adv Mater*. 1999;11: 1281–1285.
- [66] <https://digital.csic.es/bitstream/10261/203208/4/777907-1.pdf>
- [67] Wu F, Wang C, Hu H-Y, et al. One-step synthesis of hierarchical metal oxide nanosheet/carbon nanotube composites by chemical vapor deposition. *J Mater Sci*. 2019;54:1291–1303.
- [68] Yang F, Wang X, Zhang D, et al. Chirality-specific growth of single-walled carbon nanotubes on solid alloy catalysts. *Nature*. 2014;510:522.
- [69] Omachi H, Nakayama T, Takahashi E, Segawa Y, Itami K. Initiation of carbon nanotube growth by well-defined carbon nanorings. *Nat Chem*. 2013;5:572.
- [70] Po R, Carbonera C, Bernardi A, Camaioni N. The role of buffer layers in polymer solar cells. *Energy Environ Sci*. 2011;4:285–310.
- [71] Zhou Y, Cheun H, Choi S, Potscavage Jr WJ, Fuentes-Hernandez C, Kippelen B. Indium tin oxide-free and metal-free semitransparent organic solar cells. *Appl Phys Lett*. 2010;97:223
- [72] Kim YH, Sachse C, Machala ML, May C, Müller-Meskamp L, Leo K. Highly conductive PEDOT: PSS electrode with optimized solvent and thermal posttreatment for ITO-free organic solar cells. *Adv Funct Mater*. 2011;21:1076–1081.
- [73] Ouyang J, Chu CW, Chen FC, Xu Q, Yang Y. High-conductivity poly (3, 4-ethylenedioxythiophene): poly (styrene sulfonate) film and its application in polymer optoelectronic devices. *Adv Funct Mater*. 2005;15:203–208.

- [74] Admassie S, Zhang F, Manoj A, Svensson M, Andersson MR, Inganäs O. A polymer photodiode using vapour-phase polymerized PEDOT as an anode. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2006;90:133–141.
- [75] Zhou Y, Cheun H, Choi S, Fuentes-Hernandez C, Kippelen B. Optimization of a polymer top electrode for inverted semitransparent organic solar cells. *Org Electron*. 2011;12:827–831.
- [76] Comunicacion. (2022). *Paneles Solares Flexibles: Qué son, Ventajas y Precios*. Inarquia. <https://inarquia.es/paneles-solares-flexibles-caracteristicas-ventajas-precios/>
- [77] Ventajas e inconvenientes de las placas solares flexibles - Damia Solar Electrosol Energia S.L. (2015, 18 febrero). https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/ventajas-inconvenientes-paneles-solares-flexibles_1
- [78] Hernández, D. (2022, 21 mayo). Inventan células solares en textiles que proporcionan una fuente de energía. *Computer Hoy*. <https://computerhoy.com/noticias/tecnologia/inventan-celulas-solares-textiles-proporcionan-fuente-energia-1064445>
- [79] Roca, J. A. (2017). La NASA prueba un panel solar desenrollable en el espacio. *El Periódico de la Energía*. <https://elperiodicodelaenergia.com/la-nasa-prueba-un-panel-solar-desenrollable-en-el-espacio/>
- [80] Gosnold, V. A. P. B. (2019, 28 mayo). High-altitude Pseudosatellites, the future of Earth observation? *SatelliteObservation.net*. <https://satelliteobservation.net/2019/05/28/high-altitude-pseudosatellites-the-future-of-earth-observation/>
- [81] <https://www.goodfellow.com/es/p/es36-fm-000190/polyethylene-naphthalate-pen-film>
- [82] Lee C, Park A, Cho Y, Park M, Lee WI, Kim HW. Influence of ZnO buffer layer thickness on the electrical and optical properties of indium zinc oxide thin films deposited on PET substrates. *Ceram Int*. 2008;34:1093–1096
- [83] José Domingo Santos Rodríguez (2013). Desarrollo y caracterización de dispositivos fotovoltaicos p-i-n de silicio amorfo depositados por PECVD
- [84] Liu H, Wu Z, Hu J, et al. Efficient and ultraviolet durable inverted organic solar cells based on an aluminum-doped zinc oxide transparent cathode. *Appl Phys Lett*. 2013; 103:135_131.

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá